

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola De Engenharia

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

ANÁLISES DA ESTAMPABILIDADE A FRIO DE CHAPAS DO AÇO
HARDOX® 450

Evandro Fabrisio

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2025

Evandro Fabrisio

**ANÁLISES DA ESTAMPABILIDADE A FRIO DE CHAPAS DO AÇO
HARDOX® 450**

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

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Lício SCHAEFFER

PPGE3M

Porto Alegre

2025

Evandro Fabrisio

**ANÁLISES DA ESTAMPABILIDADE A FRIO DE CHAPAS DO AÇO
HARDOX® 450**

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

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Lírío SCHAEFFER

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Halston Mozetic (UFRGS) _____

Prof. Dr. Eng. Luís Fernando Folle (SENAI CIMATEC) _____

Prof. Dr. Eng. Rafael Gustavo Schreiber (IFSC) _____

Suplentes:

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFRGS) _____

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e por me proporcionar a chegar neste momento acadêmico.

Ao professor Dr.-Ing. Lírío Schaeffer pelo estímulo, paciência e dedicação para a conclusão desta obra.

Aos colegas Eng. Juliano Ercolani, Eng. Renan Ramalho, Eng. Camila Lisboa, Eng. Thiago Ivaniski e ao Acadêmico Camaro Rocha, pelas sugestões e auxílio ao longo de todo o trabalho.

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

Ao Professor Dr. Leandro Antônio Thesing, por disponibilizar o material, permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao SENAI CETEMO e ao Eng. Franco Picoli por todo apoio e auxílio.

A empresa Cinex Indústria do Mobiliário Ltda. e ao Eng. Gabriel Lazzari por todo apoio e auxílio.

A todos do CESF por todo incentivo e auxílio.

Ao Eng. Silmar Fachini, ao Eng. Eduardo Portolan e ao Eng. Evandro de Marco dos Santos por todo auxílio prestado nos ensaios realizado na empresa em que atuam.

A todos que colaboraram de forma direta ou indireta na elaboração deste trabalho, o meu agradecimento.

*Dedico este trabalho aos meus
pais Fiorelo Fabrisio e
Lucinda Tomasin Fabrisio.
A meu irmão Leandro Fabrisio.
A Patrícia Teresinha de Souza.
A minha filha Luísa de Souza
Fabrisio.*

“Eu não posso sempre mudar a direção do vento, mas eu posso
ajustar as minhas velas para sempre chegar ao meu destino”
(Jimmy Dean)

RESUMO

Os estudos com os chamados Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS - *Advanced High Strength Steels*) estão sendo mais frequentes e a verificação de características (ductilidade, resistência mecânica, etc.) destes Aços se faz necessária para que seu emprego atenda às exigências de qualidade solicitadas pela indústria. Os Aços Avançados de Alta Resistência estão apresentando muitas vantagens mecânicas em relação aos Aços convencionais, sendo a redução de peso a principal vantagem, porém as aplicações destes Aços vêm ocorrendo em processos de conformação a quente. Este estudo avaliou a estampabilidade a frio do Aço Avançado de Alta Resistência, cuja designação comercial é definida como Hardox® 450. A deformabilidade do material foi avaliada com base em experimentos realizados: Ensaio de Dureza, Ensaio Metalográfico, Ensaio de tração, Ensaio para determinação da Anisotropia, Ensaio Erichsen, Ensaio de Expansão de Furos, Ensaio dos Múltiplos Punções (Cinco Punções) Ensaio de Dobramento sob Tensão e Ensaio Nakajima Modificado para determinação da Curva Limite de Conformação. Nos ensaios realizados a frio (temperatura ambiente) o material apresentou resultados de elevada dureza, baixo estiramento, permitindo algumas situações de embutimento devido a sua condição martensítica mostrou ainda uma característica bastante anisotrópica, sendo que, desta forma os resultados obtidos apresentam um Aço de difícil conformabilidade quando utilizado em processos de conformação a frio. Na microestrutura do Aço estudado há a presença de uma estrutura que se supõe que seja uma matriz martensítica com grãos de austenita retida e perlita, onde a dureza apresentada 429 HBW descrita no catálogo do fabricante ficou muito próxima no material avaliado. Através do ensaio de tração se pode verificar que a Curva de Engenharia e a Curva de Escoamento apresentaram resultados similares, sendo que os ensaios realizados utilizaram corpos de provas nos sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°. No sentido de laminação a 0° ofereceu maior deslocamento até a ruptura e ocorreu a maior resistência mecânica em relação as demais direções. Na análise de Anisotropia, o material não apresentou boas características de estampabilidade, onde índice de anisotropia (r) ficou abaixo de 1 em todas as direções. No ensaio Erichsen o Aço apresentou um resultado de deslocamento mais elevado quando foi testado com Lubrificante. No ensaio de Expansão de Furo realizado o Aço apresentou média da taxa de expansão do furo. Na avaliação do atrito que foi analisado através do ensaio de Dobramento sob Tensão com pinos no diâmetro de Ø20mm e no diâmetro de Ø13mm nas respectivas zonas de contato e nas condições com e sem lubrificante, o pino de Ø20mm apresentou resultados próximos enquanto o pino de Ø13mm apresentou uma diferença de resultados mais significativa. No ensaio de Múltiplos Punções, o Aço apresentou um comportamento satisfatório de embutimento até um determinado diâmetro de blank, para o punção Cilíndrico e o punção Elíptico Raso, que apresentam geometrias mais uniformes, enquanto que para os demais punções (Hemisférico, Elíptico Profundo, Elíptico Extra Profundo) apresentou um comportamento insatisfatório. No ensaio Nakajima Modificado o material apresentou um comportamento de embutimento baixo, e baixa capacidade de estiramento. Diante de todos estes fatos apresentados através das análises realizadas é possível caracterizar este material de baixa conformabilidade para processos de conformação a frio.

Palavras-chave: Hardox® 450, Estampagem a Frio, Aço de alta Resistência.

ABSTRACT

Studies on so-called Advanced High Strength Steels (AHSS) are becoming more frequent and verification of the characteristics (ductility, mechanical strength, etc.) of these steels is necessary so that their use meets the quality requirements requested by the industry. Advanced High Strength Steels are presenting many mechanical advantages over conventional steels, with weight reduction being the main advantage, however, the applications of these steels have been occurring in hot forming processes. This study evaluated the cold forming ability of Advanced High Strength Steel, whose commercial designation is defined as Hardox® 450. The deformability of the material was evaluated based on experiments performed: Hardness Test, Metallographic Test, Tensile Test, Test to determine Anisotropy, Erichsen Test, Hole Expansion Test, Multiple Punch Test (five punches), Stress Bending Test and Modified Nakajima Test to determine the Forming Limit Curve. In the tests performed cold (room temperature) the material presented results of high hardness, low stretching, allowing some embedding situations due to its martensitic condition and also showed a very anisotropic characteristic, thus, the results obtained show a Steel that is difficult to form when used in cold forming processes. In the microstructure of the studied steel, there is the presence of a structure that is assumed to be a martensitic matrix with retained austenite and pearlite grains, where the hardness presented 429 HBW described in the manufacturer's catalog was very close in the evaluated material. Through the tensile test, it was possible to verify that the Engineering Curve and the Flow Curve presented similar results, and the tests performed used test specimens in the rolling directions of 0°, 45° and 90°. The rolling direction at 0° offered greater displacement until rupture and occurred the greatest mechanical resistance in relation to the other directions. In the Anisotropy analysis, the material did not present good stamping characteristics, where the anisotropy index (r) was below 1 in all directions. In the Erichsen test, the steel presented a higher displacement result when it was tested with Lubricant. In the Hole Expansion test performed, the steel presented an average hole expansion rate. In the evaluation of friction that was analyzed through the Bending under Tension test with pins with a diameter of Ø20mm and a diameter of Ø13mm in the respective contact zones and in the conditions with and without lubricant, the Ø20mm pin presented similar results while the Ø13mm pin presented a more significant difference in results. In the Multiple Punches test, the Steel presented a satisfactory drawing behavior up to a certain blank diameter, for the Cylindrical punch and the Shallow Elliptical punch, which present more uniform geometries, while for the other punches (Hemispherical, Deep Elliptical, Extra Deep Elliptical) it presented an unsatisfactory behavior. In the Modified Nakajima test, the material presented a low drawing behavior and low stretching capacity. Given all these facts presented through the analyses performed, it is possible to characterize this material as having low formability for cold forming processes.

Keywords: Hardox® 450, Cold Stamping, High Strength Steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de Pesquisa.....	22
Figura 2 – Aplicações de Aços AHSS em automóveis	24
Figura 3 – Limite de Resistência à tração e Alongamento total.....	25
Figura 4 – Aço Martensítico.....	27
Figura 5 – Ciclo térmico de formação da martensita (γ -Austenita, ε - Ripas de Martensita, α' – Martensita)	28
Figura 6 – Comparação entre dois Aços Martensíticos e um Aço de Baixa Liga	29
Figura 7 – Curva de Engenharia e de Escoamento.....	30
Figura 8 – Microestrutura de um Aço Dual Phase (DP), (F- grãos de ferrita e M - grãos de martensita)	31
Figura 9 – Produção do Aço Dual Phase (DP) – Recozimento Intercrítico	32
Figura 10 – Resistência à tração e Alongamento total de Aços Dual Phase (DP) comparando com o Aço Baixa Liga	33
Figura 11 – Diagrama de Engenharia do Aço Hardox® 450 e do Aço Hardox® 400	35
Figura 12 – A) Tensão de Engenharia x Deformação Relativa; B) Algumas dimensões do corpo de prova - Aço Hardox® 450; C) Direções de Laminação dos corpos de prova - Aço Hardox® 450	36
Figura 13 –Tensão Verdadeira x Deformação Verdadeira - Aço Hardox® 450.....	37
Figura 14 – Microestrutura do Aço Hardox® 450	38
Figura 15 – Microestrutura do Aço Hardox® 450	39
Figura 16 – Microestrutura do Aço Hardox® 450	39
Figura 17 – Dureza Vickers	41
Figura 18 – Extensômetro (<i>Clip Gage</i>) aplicado a um corpo de prova.....	42
Figura 19 – Definições de Espessura (s_0), Largura (b_0) e Comprimento (l_0) Iniciais do Corpo de Prova	43
Figura 20 – Definições de Espessura (s_0), Largura (b_0) e Comprimento (l_0) Finais do Corpo de Prova após a Ruptura.....	44
Figura 21 – Tensão de Engenharia X Deformação Relativa	45
Figura 22 – Curva de Engenharia X Curva de Escoamento.....	48
Figura 23 – Comportamento da Microestrutura durante o Processo de Laminação	49
Figura 24 – Orelhamento	49
Figura 25 – Sentido de laminação - Corpos de Prova para o ensaio de anisotropia.....	51
Figura 26 – Índice de anisotropia	51
Figura 27 – Ensaio Erichsen	53
Figura 28 – Altura do Copo	53
Figura 29 – Expansão de Furos	55
Figura 30 – Figura esquemática do ensaio Dobramento sob Tensão	56
Figura 31 – Cinco Punções – Variação de Geometria	57
Figura 32 – Cinco Punções – Dimensional dos Punções e Matriz	58
Figura 33 – Cinco Punções – Definições da Geratriz e Punção.....	59
Figura 34 – Curva Limite de Conformação (Diagrama de Goodwin-Keeler)	59
Figura 35 – O ferramental utilizado por Gronostajski e Dolny em 1980 para determinar a CLC	61
Figura 36 – Exemplo do método de verificação	62
Figura 37 – Exemplo de Plotagem	63
Figura 38 – Ferramental do ensaio Nakajima, sendo 1 a camada de lubrificação	64
Figura 39 – Modificação nos corpos de prova – Ensaio Nakajima (Klein e Cervelin - 1982)	65

Figura 40 – Corpos de prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima Modificado	66
Figura 41 – Matriz para o ensaio Nakajima Modificado	67
Figura 42 – Impressões nos corpos de prova	67
Figura 43 – Exemplo de uma impressão de malha nos corpos de prova	68
Figura 44 – Exemplo de Círculos	68
Figura 45 – Figura do Gráfico Esquemático do Diagrama Limite de Conformação...69	69
Figura 46 – Círculos deformados	70
Figura 47 – Medição dos diâmetros dos círculos deformados nos corpos-de-prova do ensaio Nakajima	70
Figura 48 – Figura do Gráfico Esquemático das diferentes zonas de deformação ...71	71
Figura 49 – Figura do Gráfico Esquemático do Comportamento da Curva e dos Círculos	72
Figura 50 – CLC típica para o Aço	72
Figura 51 – Classificações das Deformações - $\phi_1 \times \phi_2$	73
Figura 52 – Microscópio Olympus GX51 – Análise da Microestrutura do Aço Hardox® 450	74
Figura 53 – Durômetro Insize ISH-TDV1000 - Análise de Dureza do Aço Hardox® 450	75
Figura 54 – Corpos de Prova – Dimensões – Ensaio de tração.....	76
Figura 55 – Dimensões dos Corpos de Prova para o Ensaio de tração	76
Figura 56 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos.....	77
Figura 57 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos.....	77
Figura 58 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos.....	78
Figura 59 – Corpos de Prova Confeccionados nas direções de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação.....	79
Figura 60 – Corpos de Prova para a analisar a Anisotropia.....	79
Figura 61 – Corpos de Prova - Anisotropia	80
Figura 62 – Dimensões verificadas nos Corpos de Prova utilizados para analisar a Anisotropia	80
Figura 63 – Corpos de Prova utilizados a partir da Chapa do Aço Hardox® 450 - Ensaio Ericksen.....	81
Figura 64 – Altura do Copo (hc) obtido no Ensaio Ericksen.....	82
Figura 65 – Corpos de Prova utilizados a partir da Chapa do Aço Hardox® 450.....	83
Figura 66 – Altura do Flange (hf) gerado no Expansão de furo.....	83
Figura 67 – Ensaio de expansão de furo.....	83
Figura 68 – Máquina Usada no Ensaio de Dobramento Sob Tensão	84
Figura 69 – Componentes da Máquina para o Ensaio de Dobramento Sob Tensão	85
Figura 70 – Pinos para o Ensaio de Dobramento Sob Tensão	85
Figura 71 – Pinos para o Ensaio de Dobramento Sob Tensão	86
Figura 72 – Máquina utilizada no ensaio de Múltiplos Punções	87
Figura 73 – Capacidade de carga da Máquina utilizada no ensaio de Múltiplos Punções	87
Figura 74 – Painel Computacional da Máquina utilizada no ensaio de Múltiplos Punções	88
Figura 75 – Matriz e Prensa Chapas para o Ensaio dos Múltiplos Punções	88
Figura 76 – Matriz e Prensa Chapas utilizados para o Ensaio dos Múltiplos Punções	89
Figura 77 – Fixação da Matriz e Prensa Chapas no Porta Ferramental– Ensaio Múltiplos Punções	89

Figura 78 – Punções utilizados no ensaio de Múltiplos Punções	90
Figura 79 – Corpos de prova para o ensaio de Múltiplos Punções	90
Figura 80 – Fixação da Matriz e Prensa Chapas no Porta Ferramental – Ensaio Nakajima Modificado	91
Figura 81 – Punção Elipse Rasa	92
Figura 82 – Corpos de prova utilizados no ensaio Nakajima Modificado	93
Figura 83 – Exemplo de uma impressão de malha nos corpos de prova	93
Figura 84 – Exemplo do método de verificação	94
Figura 85 – Microestrutura do Aço Hardox® 450 estudado – 20 μ m	95
Figura 86 – Microestrutura do Aço Hardox® 450 estudado – 10 μ m	95
Figura 87 – Ensaio de Tração	97
Figura 88 – Ensaio de Tração – Corpos de prova: A) Comprimento Inicial; B) Comprimento Final	97
Figura 89 – Força X Deslocamento no sentido de laminação 0°	99
Figura 90 – Força X Deslocamento – Sentido de laminação 45°	100
Figura 91 – Força X Deslocamento – Sentido de laminação 90°	101
Figura 92 – Força X Deslocamento nos sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° ...	102
Figura 93 – Ensaio de Tração – Corpos de prova	103
Figura 94 – Corpos de Prova – Dimensões – Ensaio de tração	104
Figura 95 – Ensaio de Tração – Corpos de prova	105
Figura 96 – Curva de Engenharia (σ x ϵ) do Aço Hardox® 450 – 0°, 45° e 90°	107
Figura 97 – Corpos de Prova – Dimensões – Ensaio de tração	108
Figura 98 – Curva de Escoamento (φ x k_f) do Aço Hardox® 450 – 0°, 45° e 90° ...	110
Figura 99 – Resultados do Ensaio – Sem Lubrificante	114
Figura 100 – Resultados do Ensaio – Vaselina	115
Figura 101 – Força e Altura do Flange – Expansão de Furos	116
Figura 102 – A) Pino com diâmetro de 20mm; B) Pino com diâmetro de 13mm	117
Figura 103 – Pino Ø13mm – Sem Lubrificante	118
Figura 104 – Pino Ø13mm – Com o Lubrificante Vaselina Industrial	118
Figura 105 – Pino Ø20mm – Sem Lubrificante	119
Figura 106 – Pino Ø20mm – Com o Lubrificante Vaselina Industrial	120
Figura 107 – (a) Punção Cilíndrico; (b) Punção Elíptico Raso; (c) Punção Hemisférico; (d) Punção Elíptico Profundo; (e) Punção Elíptico Extra Profundo	121
Figura 108 – Ensaio – Punção Cilíndrico	122
Figura 109 – Punção Cilíndrico	123
Figura 110 – Ensaio – Punção Elíptico Raso	124
Figura 111 – Punção Elíptico Raso - Dimensional	124
Figura 112 – Ensaio – Punção Hemisférico	125
Figura 113 – Punção Hemisférico – Dimensional	126
Figura 114 – Ensaio – Punção Elíptico Profundo	127
Figura 115 – Punção Elíptico Profundo	127
Figura 116 – Ensaio – Elíptico Extra Profundo	128
Figura 117 – Punção Elíptico Extra Profundo	129
Figura 118 – Punção Elipse Rasa	130
Figura 119 – Grupos - Corpos de prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima Modificado	132
Figura 120 – Grupos – Dispersão de Pontos	135
Figura 121 – Curva CLC (Polinomial)	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química – Hardox® 450 – SSAB (2017).....	34
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas - Hardox® 450 – SSAB (2017).....	34
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas em Temperatura Ambiente (25°) - Hardox® 450 – Ivaniski (2017).....	36
Tabela 4 – Força e Deslocamento no sentido de laminação 0°	98
Tabela 5 – Força e Deslocamento no Sentido de laminação 45°	99
Tabela 6 – Força e Deslocamento no sentido de laminação 90°	100
Tabela 7 – Força e Deslocamento – Comparativo entre 0°, 45° e 90°	101
Tabela 8 – Força e Deslocamento – Comparativo entre 0°, 45° e 90°	103
Tabela 9 – Dimensões iniciais dos Corpos de Prova utilizados nos Ensaio de tração	104
Tabela 10 – Limite de Resistência atingidos nos diferentes sentidos de laminação (0°, 45° e 90°).....	105
Tabela 11 –Comprimentos Iniciais e finais dos Corpos de Prova utilizados nos diferentes sentidos de laminação (0°, 45° e 90°)	106
Tabela 12 – Deformação Relativa (ϵ) obtidos para os diferentes sentidos de laminação (0°, 45° e 90°).....	106
Tabela 13 – Resultados - Curva de Engenharia ($\sigma \times \epsilon$)	107
Tabela 14 – Dimensões iniciais dos Corpos de Prova utilizados nos Ensaio de tração	108
Tabela 15 – Limite de Resistência atingidos nos diferentes sentidos de laminação (0°, 45° e 90°).....	109
Tabela 16 – Área Instantânea (A) na Força Máxima do Limite de Resistência - 0°, 45° e 90°.....	109
Tabela 17 – Tensões de Escoamento (k_f) na Força Máxima do Limite de Resistência - 0°, 45° e 90°	109
Tabela 18 – Deformação Verdadeira (φ) - 0°, 45° e 90°	110
Tabela 19 – Resultados - Curva de Escoamento ($\varphi \times k_f$).....	111
Tabela 20 – Sentido de Laminação - 0°	111
Tabela 21 – Sentido de Laminação - 45°	112
Tabela 22 – Sentido de Laminação - 90°	112
Tabela 23 – Sentidos de Laminação – Índice de Anisotropia	112
Tabela 24 – Anisotropia Média e Anisotropia Planar.....	112
Tabela 25 – Força e Deformação – Sentido de laminação 90	113
Tabela 26 – Força e Deformação – Vaselina - Ensaio Erichsen	114
Tabela 27 – Força e Altura do Flange – Expansão de Furos.....	116
Tabela 28 – Resultados dimensionais para o D_h – Expansão de Furos	116
Tabela 29 – Taxa de expansão do furo para o Aço Hardox® 450	117
Tabela 30 – Resultados de Força Aplicada – Punção Cilíndrico.....	122
Tabela 31 – Resultados de Força Aplicada – Punção Elíptico Raso.....	123
Tabela 32 – Resultados de Força Aplicada – Punção Hemisférico	125
Tabela 33 – Resultados de Força Aplicada – Punção Elíptico Profundo.....	126
Tabela 34 – Resultados de Força Aplicada – Punção Elíptico Extra Profundo.....	128
Tabela 35 – Resultados – Razão Limite de Estampagem.....	129
Tabela 36 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima modificado.....	130
Tabela 37 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima Modificado.....	131
Tabela 38 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima Modificado.....	133

Tabela 39 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima modificado.....	134
Tabela 40 – Coeficiente de Atrito.....	139
Tabela 41 – Resultados – Razão Limite de Estampagem.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Aços Avançados de Alta Resistência (Advanced High Strength Steel)
AISI	American Iron and Steel Institute
CLC	Curva Limite de Conformação (Forming Limit Curve (FLC))
CP	Aços de Fases Complexas (Complex-Phase)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Aços Bifásicos (Dual Phase)
DST	Dobramento Sob (Tensão Bending Under Tension Test)
FB	Aços Ferríticobainíticos (Ferritic-Bainitic)
HF	Aços Estampados a Quente (Hot-Formed)
HSLA	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (High Strength Low Alloy)
ISO	International Organization for Standardization
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MS	Aços Martensíticos (Martensitic Steels)
NBR	Normas Brasileira
PHS	Aços Endurecidos por Pressão (Press Hardened Steel)
SSAB	Nome da Empresa Sueca que produz o Aço de Alta Resistência Hardox® 450
TRIP	Aços com Plasticidade Induzida por Transformação de Fases (Transformation Induced Plasticity Steel)
TWIP	Aço com Plasticidade Induzida por Maclação (Twinning-Induced Plasticity)
ULSAB-AVC	Ultra-Light Steel Automotive Body – Advanced Vehicle Concept)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área Instantânea da Secção do Corpo de Prova	[mm ²]
a	Diâmetro Final do Círculo na Direção 1	[mm]
A_0	Área Inicial da Secção do Corpo de Prova	[mm ²]
b	Diâmetro Final do Círculo na Direção 2	[mm]
b_0	Largura Inicial do Corpo Dde Prova	[mm]
b_1	Largura Final do Corpo de Prova após o Ensaio	[mm]
C	Constante da Curva de Escoamento	[MPa]
D	Diâmetro da Giratriz (Blank)	[mm]
d	Diâmetro do Punção	[mm]
D_0	Diâmetro Original do Furo	[mm]
d_0	Diâmetro Inicial do Círculo	[mm]
D_h	Diâmetro Médio do Furo após a Ruptura	[mm]
D_b	Diâmetro do Blank	[mm]
D_p	Diâmetro do Punção	[mm]
F	Força	[N]
F_1	Força na Garra 01	[N]
F_2	Força na Garra 02	[N]
h_c	Altura do Copo	[mm]
h_f	Altura da Flange	[mm]
k_f	Tensão de Escoamento	[MPa]
l_0	Comprimento Inicial do Corpo de Prova	[mm]
l_1	Comprimento Final do Corpo de Prova após a Ruptura	[mm]
n	Coefficiente de Encruamento	[—]
R	Raio	[mm]
R_m	Limite de Resistência à Tração	[MPa]
r_m	Anisotropia Média	[—]
r	Raio do Pino	[mm]
r	Índice de Anisotropia	[—]
r_{0°	Índice de Anisotropia na Direção de Laminação à 0°	[—]
r_{45°	Índice De Anisotropia na Direção de Laminação à 45°	[—]
r_{90°	Índice De Anisotropia na Direção de Laminação à 90°	[—]
s_0	Espessura Inicial do Corpo de Prova	[mm]
T	Torque	[Nm]

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

Δl	Alongamento	[mm]
ΔD	Deslocamento Absoluto	[mm]
Δr	Anisotropia Planar	[—]
β	Razão Limite De Estampagem	[—]
E	Módulo De Elasticidade	[MPa]
ε	Deformação Relativa	[%]
λ	Taxa De Expansão Do Furo	[%]
μ	Coeficiente De Atrito	[—]
σ	Tensão de Engenharia no Diagrama de Escoamento	[MPa]
σ_e	Tensão de Escoamento no Diagrama de Engenharia	[MPa]
φ	Deformação Verdadeira	[—]
φ_b	Deformação Verdadeira de Largura	[—]
φ_s	Deformação Verdadeira de Espessura	[—]
φ_1	Deformação Principal Maior na superfície da Chapa	[—]
φ_2	Deformação Principal Menor na superfície da Chapa	[—]
$\varnothing$	Diâmetro	[mm]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AHSS)	23
2.1.1 Classificação dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS)	26
2.2 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA MARTENSÍTICOS (MS - MARTENSITIC STEELS).....	27
2.3 AÇOS BIFÁSICOS (DP - DUAL PHASE STEELS).....	30
2.4 AÇO HARDOX® 450.....	33
2.5 ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS.....	40
2.5.1 Estampagem a Frio	40
2.6 DUREZA	40
2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS	41
2.7.1 Tensão de Engenharia (σ) X Deformação Relativa (ϵ)	42
2.7.2 Tensão Escoamento (k_f) X Deformação Verdadeira (ϕ).....	45
2.8 ANÁLISE DA ANISOTROPIA	48
2.9 ENSAIO ERICHSEN.....	52
2.10 EXPANSÃO DE FUROS	54
2.11 ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO	55
2.11.1 Equação Usada para o Cálculo do Coeficiente de Atrito	56
2.12 ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES.....	57
2.13 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO	59
2.13.1 Ensaio Nakajima	64
2.13.2 Ensaio Nakajima Modificado.....	66
2.14 VISIOPLASTICIDADE.....	67
3 MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1 MICROESTRUTURA	74
3.2 ENSAIO DE DUREZA.....	75

3.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	75
3.4	ANÁLISE DA ANISOTROPIA.....	78
3.5	ENSAIO ERICHSEN	81
3.6	ENSAIO DE EXPANSÃO DE FUROS	82
3.7	ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO	84
3.8	ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES	86
3.9	ENSAIO NAKAJIMA MODIFICADO	91
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	95
4.1	MICROESTRUTURA	95
4.2	ENSAIO DE DUREZA.....	96
4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS - HARDOX® 450.....	96
4.3.1	Força X Deslocamento	96
4.3.2	Curva de Engenharia	103
4.3.3	Curva de Escoamento	107
4.4	ANÁLISE DA ANISOTROPIA.....	111
4.5	ENSAIO ERICHSEN	113
4.6	EXPANSÃO DE FUROS	115
4.7	ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO	117
4.8	ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES	120
4.9	ENSAIO NAKAJIMA MODIFICADO	129
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	137
5.1	MICROESTRUTURA	137
5.2	ENSAIO DE DUREZA.....	137
5.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS - HARDOX® 450.....	137
5.4	ANÁLISE DA ANISOTROPIA.....	138
5.5	ENSAIO ERICHSEN	138
5.6	ENSAIO EXPANSÃO DE FUROS	138
5.7	ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO	138
5.8	ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES	139
5.9	ENSAIO NAKAJIMA MODIFICADO	140

6 CONCLUSÕES	141
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	148

1 INTRODUÇÃO

A produção de estampados utilizando chapas de Aço como principal matéria prima vem crescendo no Brasil de maneira significativa. Estes produtos vêm atendendo os diversos mercados como o automotivo, de eletrodomésticos, bens e serviços, entre outros.

Os estudos de novos Aços são de extrema importância para atender os padrões de qualidades desejados e as mais diferentes propriedades mecânicas. Já os estudos em processos como a estampagem estão ocorrendo principalmente com os chamados Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS - *Advanced High Strength Steels*), cuja aplicação está acontecendo em diversos setores industriais, em especial na indústria automotiva.

As indústrias de implementos rodoviários e automobilística vêm utilizando em seus projetos os Aços de alta resistência. As aplicações destes Aços têm se concentrado em componentes com alto grau de desgaste, como caçambas, estruturas de veículos florestais, estruturas de veículos fora de estrada, caçamba (“pá”) do carregador frontal e traseiro de retroescavadeiras.

As pesquisas realizadas com os Aços AHSS, utilizando o processo estampagem a quente, geralmente tem apresentado uma boa qualidade e um elevado grau de precisão dimensional em peças acabadas. Porém, este processo de estampagem a quente envolve algumas etapas complexas como o aquecimento das chapas, jateamento para a retirada da “carepa”, irradiação de fornos, desgaste do ferramental, etc. Alguns fatores também devem ser considerados no processo de estampagem a quente como:

- a) A questão de um maior custo envolvido no processo;
- b) A necessidade de mão de obra especializada;
- c) Equipamentos que atendam todas as demandas do processo de transformação;
- d) Ferramental específico com sistema de resfriamento.

Diante destas averiguações que ocorrem na estampagem a quente, algumas pesquisas que vêm acontecendo têm buscado realizar uma avaliação das

características de chapas de alta resistência com o objetivo de analisar a sua estampabilidade quando submetidas ao processo de estampagem a frio.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo geral analisar a deformação a frio para materiais de alta resistência, utilizando como elemento de estudo o Aço de alta resistência Hardox® 450.

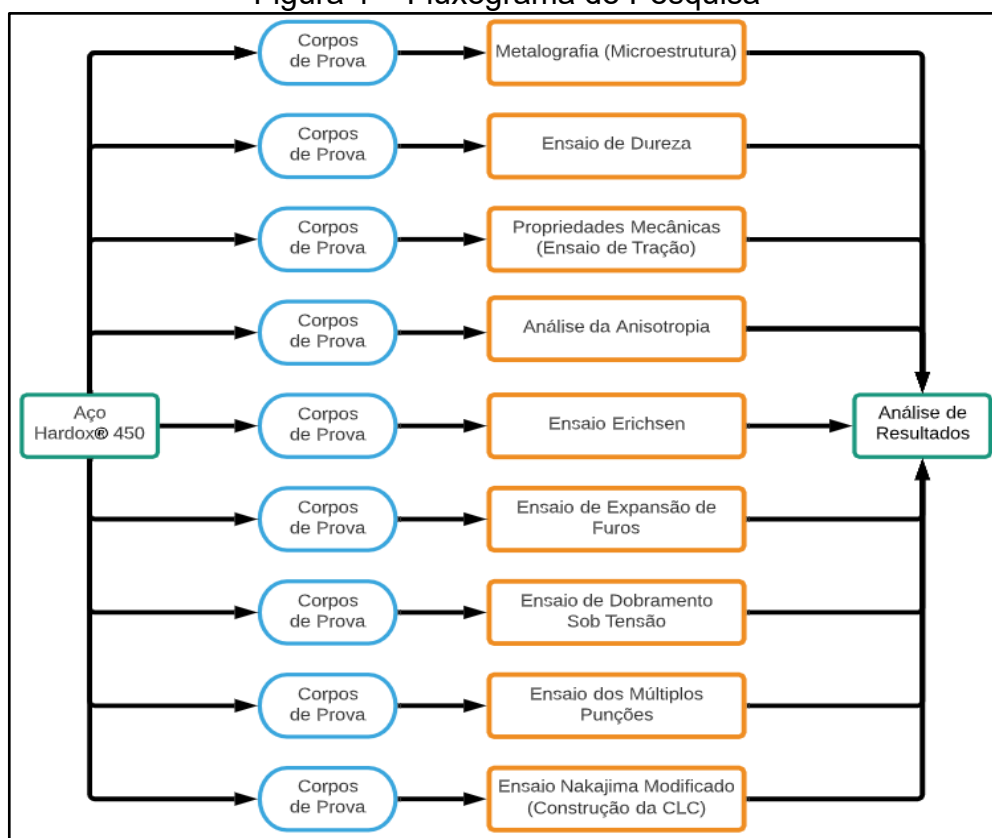
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Realizar os ensaios: de Tração, Erichsen, Expansão de Furos, Dureza Anisotropia, Dobramento sob Tensão, Cinco Punções e levantamento da Curva Limite de Conformação (CLC);
- b) Verificar os resultados com o objetivo de fornecer uma perspectiva necessária para os limites de deformação a frio;
- c) Construção da Curva de Engenharia e da Curva de Escoamento deste material.

Na Figura 1 se pode visualizar o fluxo de trabalho realizado neste estudo.

Figura 1 – Fluxograma de Pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho foi utilizada chapa de Aço de alta resistência Hardox® 450 fabricada pela empresa sueca SSAB cuja finalidade é o uso em veículos pesados como escavadeiras, caminhões e vagões de trem. Este material tem sido utilizado em especial para estes veículos devido ao transporte e manipulação de materiais abrasivos como areia, minérios entre outros, devido a sua alta resistências, e diante destas características o desafio foi realizar a análise de estampabilidade a frio para o Hardox® 450, uma vez que geralmente as chapas de AHSS são conformadas a quente por um processo denominado de “*Press Hardening*”.

Esse trabalho tem como finalidade mostrar as características de estampabilidade um Aço de alta resistência mecânica (com Tensão de Escoamento na ordem de 1250 MPa, Tensão Limite de Resistência de 1400 ± 100 MPa e Alongamento menor que 10%). Sendo que isso pode servir de base para projetos de estampagem, mostrando os limites geométricos de possíveis componentes que seriam possíveis de se produzir.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AHSS)

O avanço tecnológico de chapas de Aço possui um longo histórico de desenvolvimento. Com o objetivo de reduzir a emissões de monóxido de carbono e simultaneamente, melhorar a rigidez dos veículos, vários Aços de alta resistência foram utilizados e analisados nas últimas décadas (CHATTERJEE, 2009).

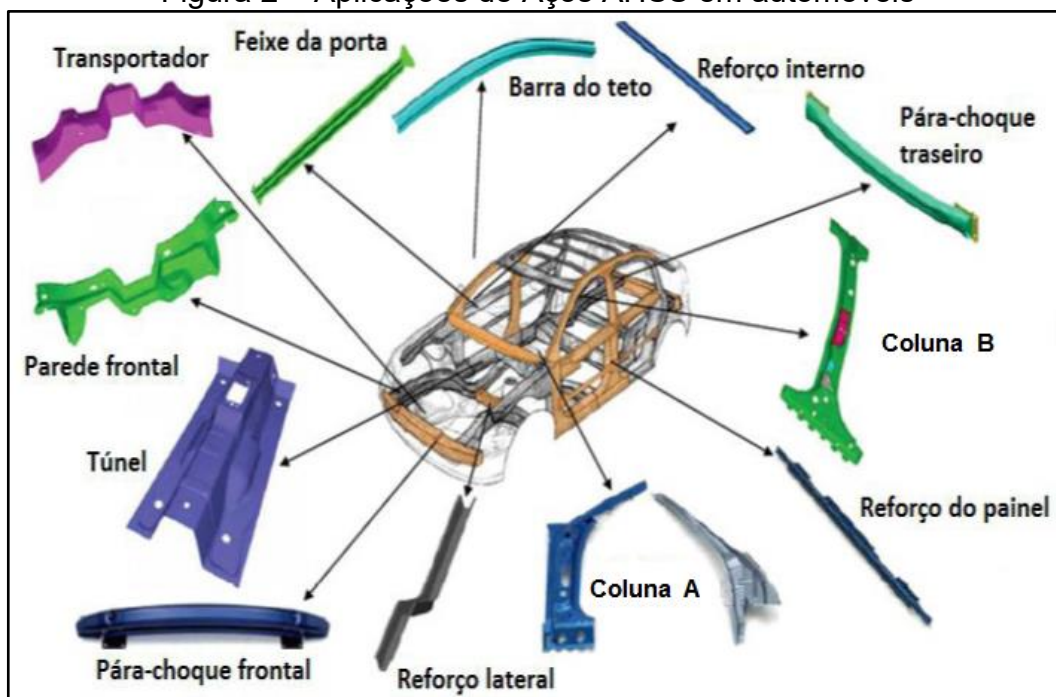
Segundo a fabricação de chapas com Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) visa atender às necessidades impostas pela indústria automotiva em fabricar veículos cada vez mais leves (redução de peso dos veículos) e mais econômicos, contribuindo de certa forma com o meio ambiente. Estes Aços possuem relativamente altos valores de resistência à tração e valores relativamente baixos de alongamento bem como valores baixos de anisotropia (ZANLUCHI, 2014).

As primeiras soluções apresentadas pelas indústrias siderúrgicas foram os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (*High Strength Low Alloy – HSLA*), que continham micro adições de Nb (Nióbio), Ti (Titânio) e V (Vanádio), cuja microestrutura ferrítica-perlítica mais refinada e capacidade de endurecimento por precipitação lhe proporcionavam maior resistência mecânica. Entretanto, com o aumento do nível de resistência mecânica destes Aços, estes apresentaram uma redução do seu alongamento total, ou seja, perda estampabilidade (TIGRINHO, 2011).

A partir das evidências levantadas nos Aços *HSLA*, a indústria apresenta os Aços bifásicos (Dual Phase), cuja microestrutura peculiar minimizava as perdas de estampabilidade decorrentes dos maiores níveis de resistência mecânica. Na década de 1990 todos esses novos Aços foram englobados numa só família, designada como Aços Avançados de Alta Resistência (*Advanced High Strength Steels – AHSS*) (GORNÍ, 2008).

Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) são Aços multifásicos que possuem na sua microestrutura fases como ferrita, martensita, bainita, e (ou) austenita retida e, estas fases são formadas em função dos elementos de liga e do processamento utilizado na fabricação destes Aços. Na Figura 2 se pode visualizar algumas aplicações de Aços de alta resistência (GIPIELA, 2012).

Figura 2 – Aplicações de Aços AHSS em automóveis



Fonte: Marra (2008).

A principal diferença entre os Aços HSLA e o Aço AHSS é a microestrutura. Os Aços HSLA possuem uma microestrutura monofásica. Os AHSS são materiais complexos, com composições químicas selecionadas e microestruturas multifásicas os quais contêm martensita, bainita e/ou austenita retida, resultantes de processos de aquecimento e resfriamento controlados (KEELER *et al.*, 2017).

Os Aços AHSS exibem maiores taxas de encruamento que os Aços HSLA e, dessa forma, têm grande potencial para absorção de energia em combinação com uma boa capacidade de conformação. Por serem Aços multifásicos, os Aços AHSS apresentam como característica principal alta capacidade de encruamento devido à baixa, relação entre a Tensão de Escoamento (σ_e) e o Limite de Resistência à tração (R_m). (FARIA NETO *et al.*, 2012).

Dentro dessa família de Aços AHSS, existem as classes de primeira e segunda geração, que são qualificadas para atender às demandas de desempenho funcional de certas peças, isso inclui:

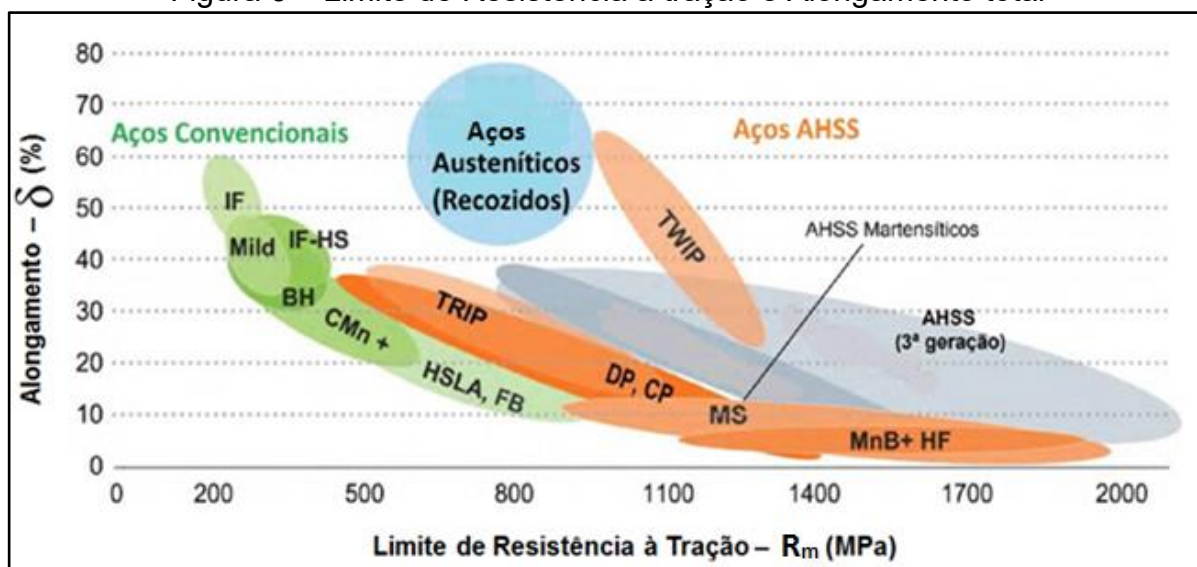
- a) DP - Aços Bifásicos (*Dual Phase*);
- b) TRIP - Aços com Plasticidade Induzida por Transformação de Fases (*Transformation Induced Plasticity Steel*);
- c) CP - Aços de Fases Complexas (*Complex-Phase*);

- d) MS - Aços Martensíticos (*Martensitic Steels*);
- e) FB - Aços Ferríticobainíticos (*Ferritic-Bainitic*);
- f) TWIP - Aço com Plasticidade Induzida por Maclação (*Twinning-Induced Plasticity*);
- g) PHS - Aços Endurecidos por Pressão (*Press Hardened Steel*);
- h) HF - Aços Estampados a Quente (*Hot-Formed*).

Os Aços DP e TRIP apresentam bom desempenho em peças nas zonas de colisão dos veículos, pois possuem alta absorção de energia, já os Aços PHS e MS apresentam melhor desempenho em segurança devido à resistência extremamente alta e são utilizados em peças estruturais do compartimento de passageiros (KEELER *et al.*, 2017).

Recentemente houve um aumento em pesquisas para desenvolvimento da terceira geração de Aços avançados de alta resistência, contendo ligas especiais e processamento termomecânico com finalidade de obter melhores combinações de ductilidade e resistência do que as classes atuais. Essas propriedades podem ser visualizadas na Figura 3, que mostra a relação entre o alongamento e a resistência à tração conforme as diferentes classes de materiais (KEELER *et al.*, 2017).

Figura 3 – Limite de Resistência à tração e Alongamento total



Fonte: Keeler *et al.* (2017).

Os Aços DP, TRIP, CP, MS compõem a primeira geração dos Aços AHSS. O TWIP faz parte da segunda geração, caracterizado por ótimos níveis de alongamento, mas de custo elevado. A terceira geração consiste no desenvolvimento de Aços AHSS

com alta deformabilidade, alta resistência mecânica (Figura 3) e custos competitivos (BILLUR; 2014).

Incluem-se na terceira geração os Q&P (quenching and partitioning), nano Aços (NanoSteel) e os TBF (aided bainitic ferrite). Todos os Aços AHSS são obtidos através de um rigoroso controle de sua composição química e taxa de resfriamento desde a fase austenita (ou austenita + ferrita), seja na laminação (produtos laminados a quente), seja no forno de recozimento contínuo (THESING, 2018).

O processo convencional de estampagem a frio de Aços de alta resistência é geralmente limitado à produção de peças com geometrias relativamente simples devido à limitada estampabilidade e dificuldades no controle geométrico devido ao retorno elástico. As elevadas forças de estampagem, as grandes distorções geométricas e excessivo desgaste de ferramentas são consequências da elevada resistência à deformação do material (SOUZA, 2013).

2.1.1 Classificação dos Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS)

Os AHSS são relativamente novos, e sua nomenclatura foi desenvolvida pelo consórcio ULSAB-AVC (*Ultra-Light Steel Automotive Body – Advanced Vehicle Concept*) que adota as especificações das Tensões de Escoamento e Limite de Resistência à Tração (também conhecida como Tensão Máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) em MPa), da seguinte forma (KEELER *et al.*, 2017):

XX AAA/BBB, onde:

- a) XX – Tipo de Aço;
- b) AAA - Tensão de Escoamento (σ_e) em MPa;
- c) BBB - Limite de Resistência à Tração (R_m) em Mpa.

Assim, um Aço Dual Phase com Tensão de Escoamento mínima de 600MPa e Limite de Resistência à tração mínima de 980MPa é denominado DP 600/980 e um Aço Martensítico com Tensão de Escoamento 1030MPa e Limite de Resistência à tração de 1300MPa é denominado MS 1030/1300. Portanto, ensaios mostrarão os resultados para as Tensões de Escoamento e Limite de Resistência à tração (THESING, 2018).

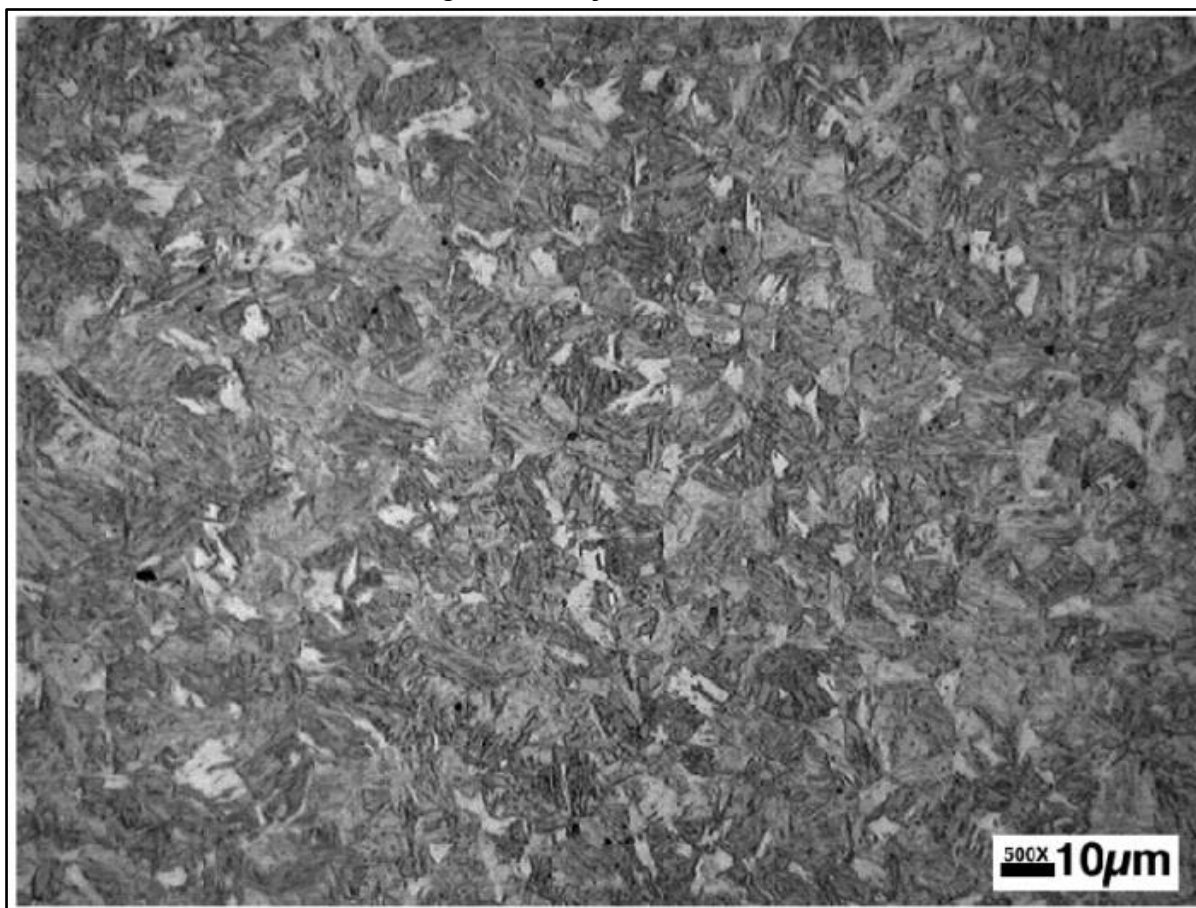
A seguir são apresentadas as subdivisões duas das dos Aços AHSS, destacando sua microestrutura, propriedades mecânicas e principais aplicações.

2.2 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA MARTENSÍTICOS (MS - MARTENSITIC STEELS)

Os Aços Martensíticos (MS - *Martensitic Steel*) (Figura 4) são os materiais mais resistentes para aplicações estruturais (GALINDO-NAVA, 2016).

Estes Aços são caracterizados por uma matriz martensítica que contém pequenas quantidades de ferrita e/ou bainita. Durante o processo de produção, a austenita existente na etapa da laminação a quente é transformada quase que totalmente em martensita a partir de um rápido resfriamento (têmpera). Estes Aços são submetidos a um revenimento pós-têmpera com o objetivo de melhorar a ductilidade e promover boa conformabilidade, mesmo para resistências muito elevadas (KEELER *et al.*, 2017).

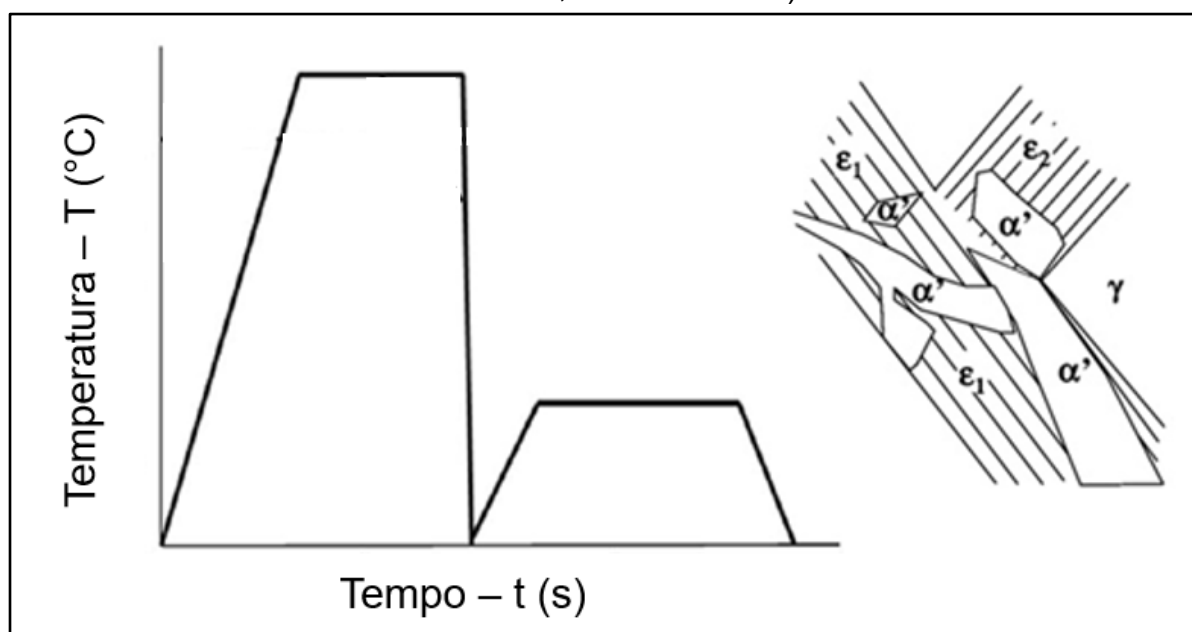
Figura 4 – Aço Martensítico



Fonte: Feng (2005).

A microestrutura em ripas é formada em Aços com teores de carbono abaixo entre 0,01 – 0,6 % e não há uma distribuição padrão de tamanho ou formato (Figura 5).

Figura 5 – Ciclo térmico de formação da martensita (γ -Austenita, ϵ - Ripas de Martensita, α' – Martensita)



Fonte: Ivaninski (2017).

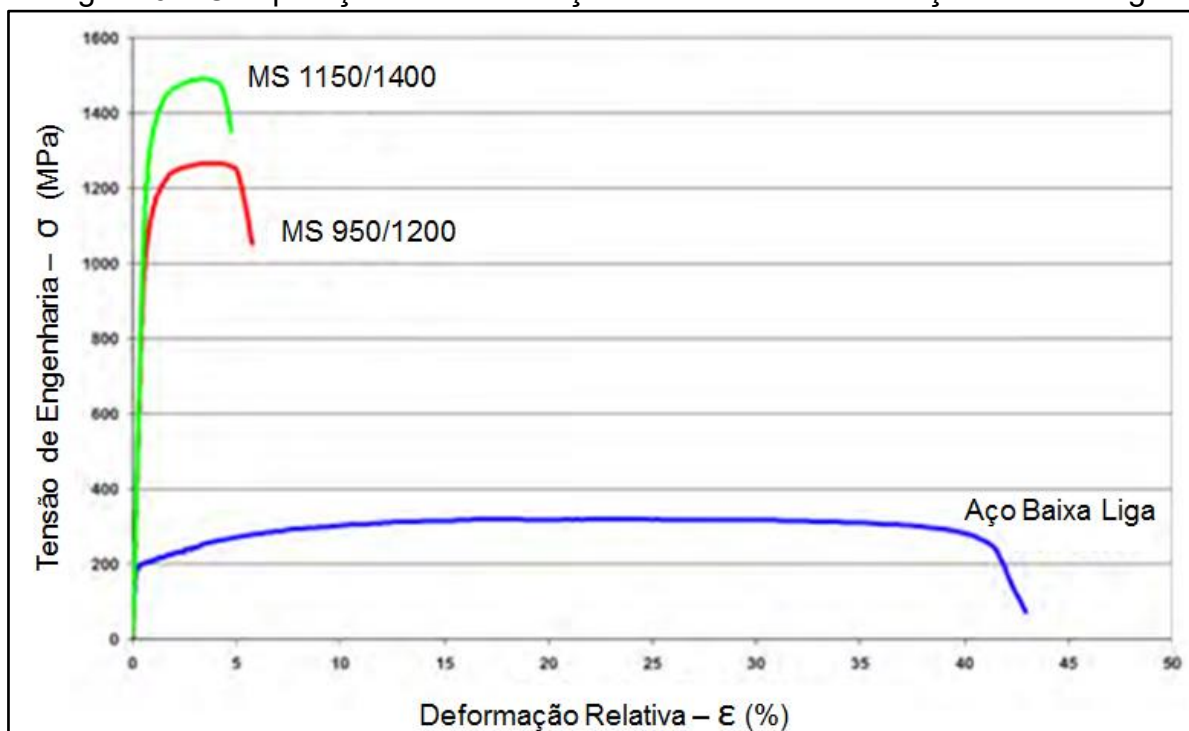
As chapas de natureza martensítica possuem baixo alongamento, quando sujeitas a tensões uniaxiais, porém a ductilidade aumenta quando elementos de liga são adicionados (FONSTEIN, 2015).

Entre os Aços multifásicos, os Aços Martensíticos (MS - *Martensitic Steel*) são os que apresentam os maiores altos Limites de Resistência à Tração (R_m) que podem chegar até 1700 Mpa (KEELER *et al.*, 2017).

A aplicação deste Aço não se limita somente à indústria automotiva, pois além de alta resistência mecânica, estes materiais possuem alta resistência à abrasão, sendo utilizados também no setor de mineração (ROSADO, 2011).

A Figura 6 apresenta dois tipos de Aços martensíticos submetidos a ensaios de tração uniaxial em temperatura ambiente e realizando a comparação com um ensaio de um Aço de baixa liga. Os dois Aços Martensíticos são caracterizados como MS 950/1200 e MS 1150/1400 onde o primeiro número (MS **950**/1200, MS **1150**/1400) indica a Tensão de Escoamento e o segundo número (MS 950/**1200**, MS 1150/**1400**) indica o seu Limite de Resistência (KEELER *et al.*, 2017).

Figura 6 – Comparação entre dois Aços Martensíticos e um Aço de Baixa Liga

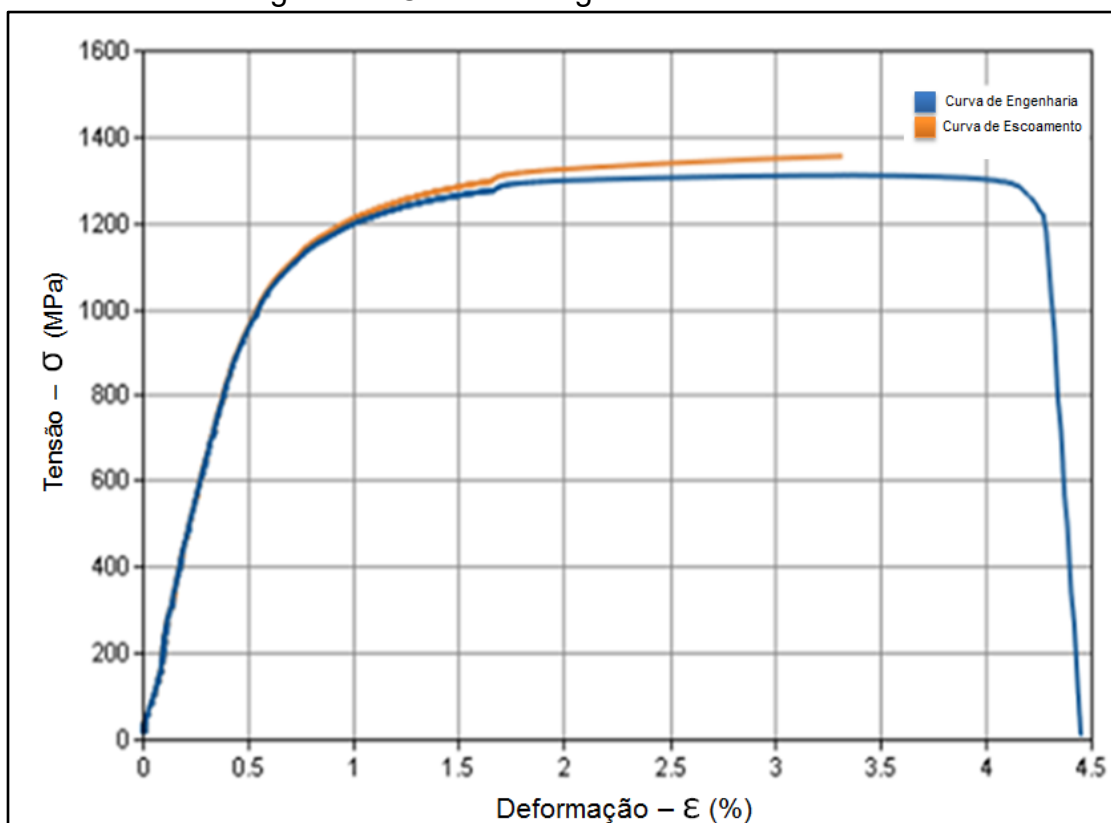


Fonte: Keeler *et al.* (2017).

É importante destacar que a estampabilidade dos Aços Aços Martensíticos (MS - *Martensitic Steel*) apresentados na Figura 6, é muito baixa, sendo necessária a aplicação do processo de estampagem a quente para obtenção de melhores resultados de conformação (THESING, 2018).

A Figura 7 apresenta a Curva de Escoamento do Aço Martensítico MS 1090/1315 (MS - *Martensitic Steel*) cuja tensão de Escoamento é de aproximadamente 1090 MPa e Limite de Resistência à tração é 1315 MPa. O alongamento deste material é de aproximadamente 4% (THESING, 2018).

Figura 7 – Curva de Engenharia e de Escoamento



Fonte: Thesing (2018).

Um exemplo de um Aço Avançado de Alta Resistência martensítico é o DOCOL® 190M que é um produzido pela empresa sueca SSAB, que possui uma Tensão de Escoamento (σ_e) de 1030 MPa e Limite de Resistência à tração (R_m) de 1300 MPa. Sendo destinado à estampagem a frio, método no qual a indústria da conformação está acostumada a trabalhar e no qual os custos de produção e retorno de investimentos podem ser calculados com maior facilidade (THESING, 2018).

2.3 AÇOS BIFÁSICOS (DP - DUAL PHASE STEELS)

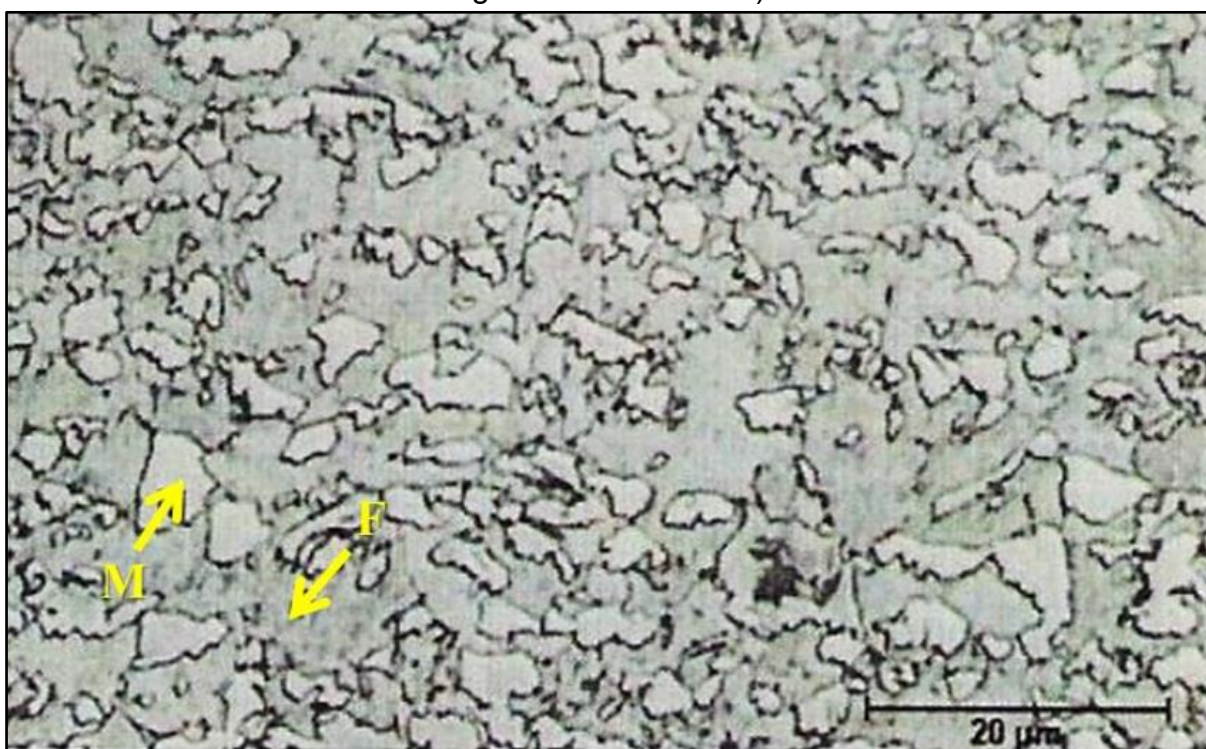
Os Aços Bifásicos (DP - *Dual Phase Steels*) estão sendo utilizado pela indústria automotiva para redução de massa, custo e aumentar a absorção de energia de impacto (Tsipouridis, 2006). Além disso, estes Aços são ideais para partes sujeitas à fadiga e para painéis sujeitos a forças de amassamento, tais como a lataria externa (THESING, 2018).

Este material é caracterizado por uma matriz ferrítica contendo uma segunda fase dura de martensita na forma de ilhas (TSIPOURIDIS, 2006).

Os Aços Bifásicos (duas fases: ferrita + martensita) são obtidos através do controle da taxa de resfriamento da fase austenita (em produtos laminados a quente) ou a partir das fases ferrita + austenita (para laminação a frio continuamente recozida e produtos revestidos por imersão a quente) a fim de transformar parte da austenita em ferrita antes que um rápido resfriamento transforme a austenita em martensita (ROSADO, 2011).

A microestrutura (Figura 8) é composta por ilhas de martensita (De 10 à 40%) ou de martensita/austenita dispersas em uma matriz macia de ferrita. Este tipo de microestrutura permite alcançar uma resistência à tração entre 500 à 1200 MPa (ROSADO, 2011).

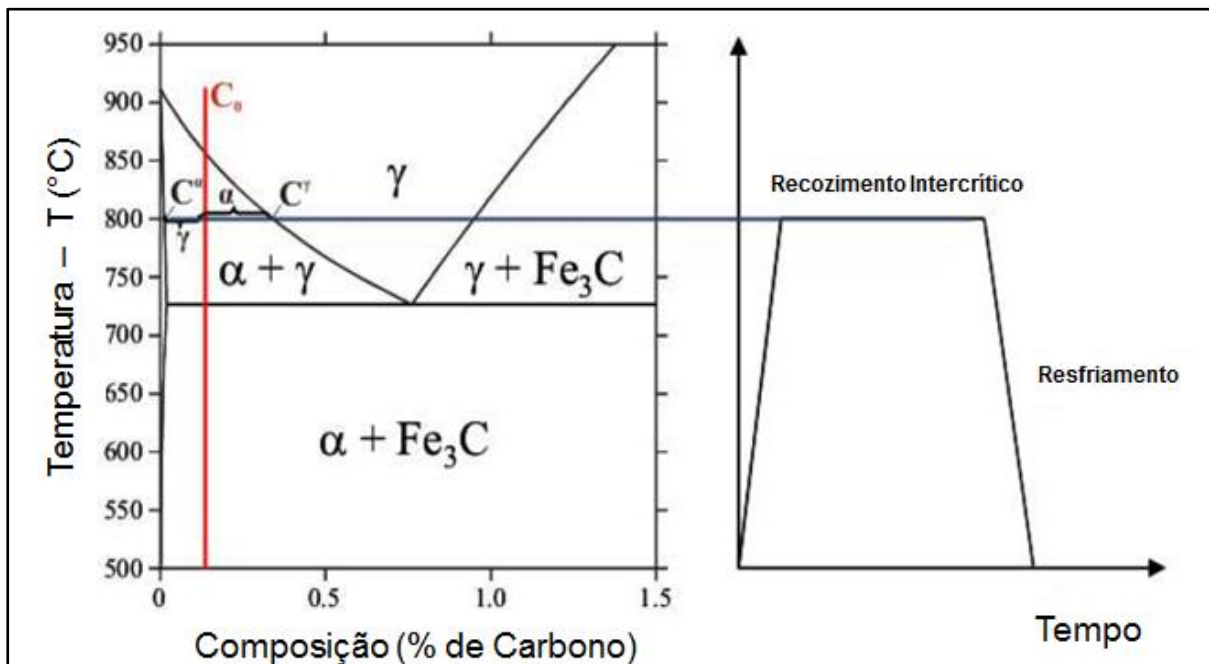
Figura 8 – Microestrutura de um Aço Dual Phase (DP), (F- grãos de ferrita e M - grãos de martensita)



Fonte: Keeler *et al.* (2017).

A martensita depende diretamente da temperatura de recozimento intercrítico e da taxa de resfriamento durante o processo de fabricação (Figura 9) (TSIPOURIDIS, 2006).

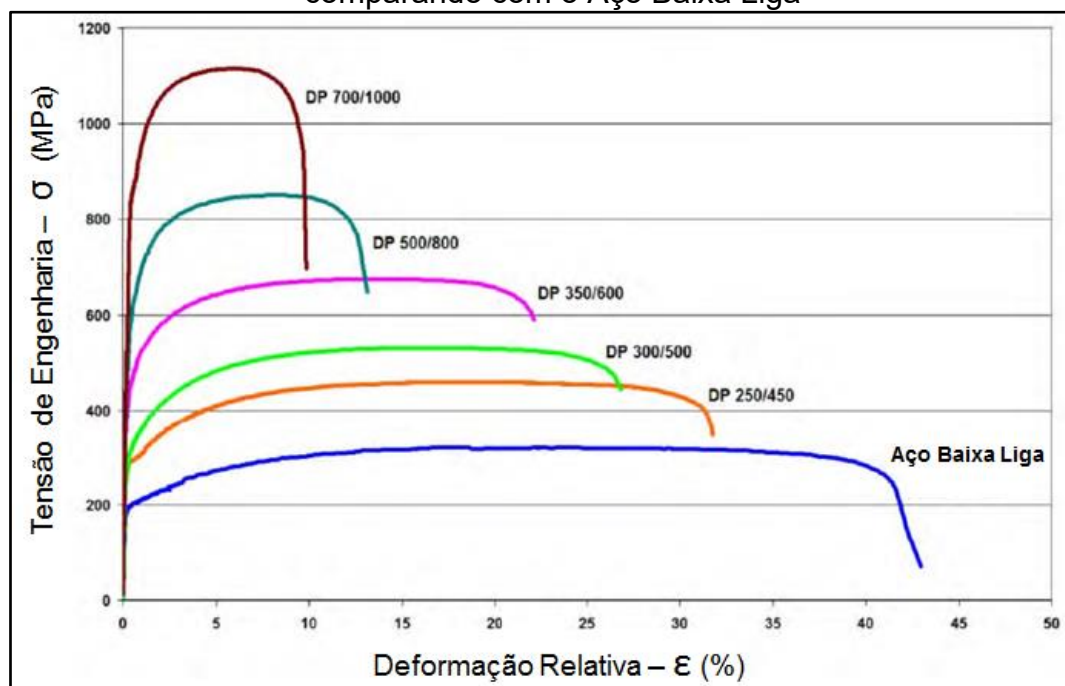
Figura 9 – Produção do Aço Dual Phase (DP) – Recozimento Intercrítico



Fonte: Tsipouridis (2006).

As curvas de Tensão versus Deformação uniaxiais para diferentes Aços Dual Phase (Para o DP 250/450 e DP 500/800 a espessura da chapa é de 1 mm, para as demais 1,8 a 2 mm) são apresentadas na Figura 10, em temperatura ambiente. Os gráficos demonstram o limite onde o material começa a escoar até seu alongamento total (KEELER *et al.*, 2017).

Figura 10 – Resistência à tração e Alongamento total de Aços Dual Phase (DP) comparando com o Aço Baixa Liga



Fonte: Keeler *et al.* (2017).

2.4 AÇO HARDOX® 450

O Aço Hardox® 450 é um Aço fabricado pela SSAB (com sede em Oxelösund na Suécia), sendo está uma liga resistente à abrasão e possui alta resistência, sendo orientado para aplicações em máquinas de grande porte (HUB, 2009).

O Aço Hardox® 450 possui boa capacidade de dobra e soldabilidade. Os produtos podem ser usados em vários componentes e estruturas sujeitas ao desgaste. O Hardox® 450 oferece melhor resistência à abrasão e a amassamento, bem como uma resistência ao desgaste (SSAB, 2017).

O Aço Hardox® 450 está disponível em espessuras de 3,2 a 130 mm como chapa grossa, em espessuras de 2,0 a 8,0 mm como tiras laminadas a quente e em espessuras de 0,7 a 2,1 mm como tiras laminadas a frio (SSAB, 2017).

O Aço Hardox® 450 possui os percentuais de elementos químicos detalhados na Tabela 1 e as propriedades mecânicas descritas na Tabela 2. O alongamento para chapas entre 0,7 à 2,10 mm de espessura pode chegar a 3% (SSAB, 2017).

Tabela 1 – Composição Química – Hardox® 450 – SSAB (2017)

C ¹⁾ (max %)	Si ¹⁾ (max %)	Mn ¹⁾ (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ¹⁾ (max %)	Ni ¹⁾ (max %)	Mo ¹⁾ (max %)	B ¹⁾ (max %)
0.18	0.25	1.30	0.015	0.004	0.10	0.10	0.04	0.003

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas - Hardox® 450 – SSAB (2017)

Grau	Espessura (mm)	Dureza (HBW)	Limite de Resistência R_m (MPa)	Limite de escoamento típico (MPa)
Hardox® 450	0.7- 2.10	425- 475	1370- 1600	1250

O Aço Hardox® 450 possui uma variação de tipos e suas características em relação aos componentes da liga e à dureza são os determinam esta variação, sendo que o seu código possui três números que estão diretamente ligados à dureza Brinell do material. Por exemplo, o Aço Hardox® 400 apresenta aproximadamente 400 de dureza Brinell. O crescente número de código (400, 450 e etc.) significa maior dureza, resistência à abrasão, força de tração e, porém, significa também diminuição da ductilidade, resistência e soldabilidade (HUB, 2009).

O Aço Hardox® 450 possui boas características de dureza, resistência e soldabilidade. Estas e outras características deste material estão descritas abaixo (HUB, 2009):

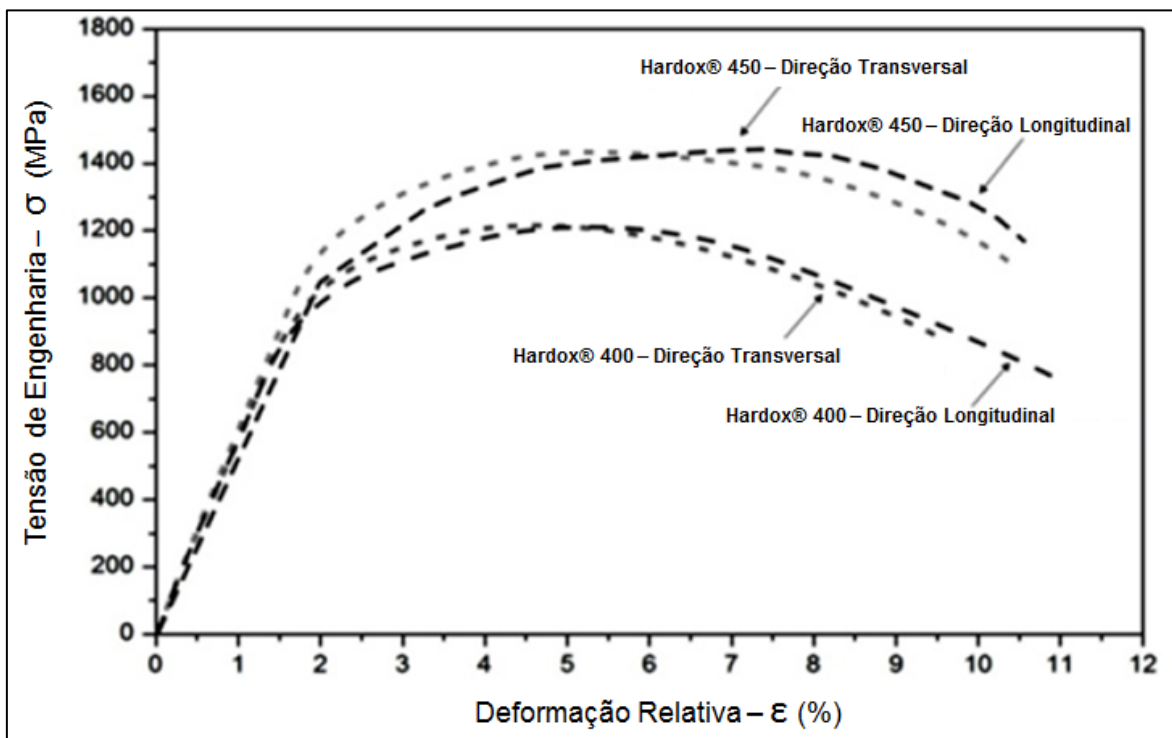
- Dureza Brinell HBW 420-475, valor médio HBW 450,
- A energia de impacto é de 35 J usando o teste Charpy-V à temperatura de 40 graus Celsius.

Ulewicz *et al.* (2013), estudaram a influência dos elementos de liga na mudança das propriedades de dois tipos de Aços martensíticos de grãos refinados, sendo estes o Aço Hardox® 400 e o Aço Hardox® 450. Foram analisadas as propriedades mecânicas como resistência a tração transversal e longitudinal a direção de laminação que ultrapassaram os 1000 MPa, no qual concluíram que a adição de elementos de liga com manganês, cromo e molibdênio aumentam a temperabilidade destas chapas. O estudo de caso foi realizado com chapas com 20 mm de espessura apresentou resultados:

- Alongamento (ϵ) de 10%;
- Tensão de Escoamento (σ_e) de 1200 MPa;
- Limite de resistência (R_m) de 1400 MPa.

Ulewicz *et al.* (2013), mostraram as informações citadas acima obtidas a partir das curvas geradas a partir do gráfico Tensão de Engenharia x Deformação Relativa ou Alongamento (%) (Figura 11). Nesse estudo foram avaliadas algumas propriedades mecânicas do Aço Hardox® 450 e Hardox® 400 no sentido longitudinal (0° em relação ao sentido de laminação) e transversal (90° em relação ao sentido de laminação).

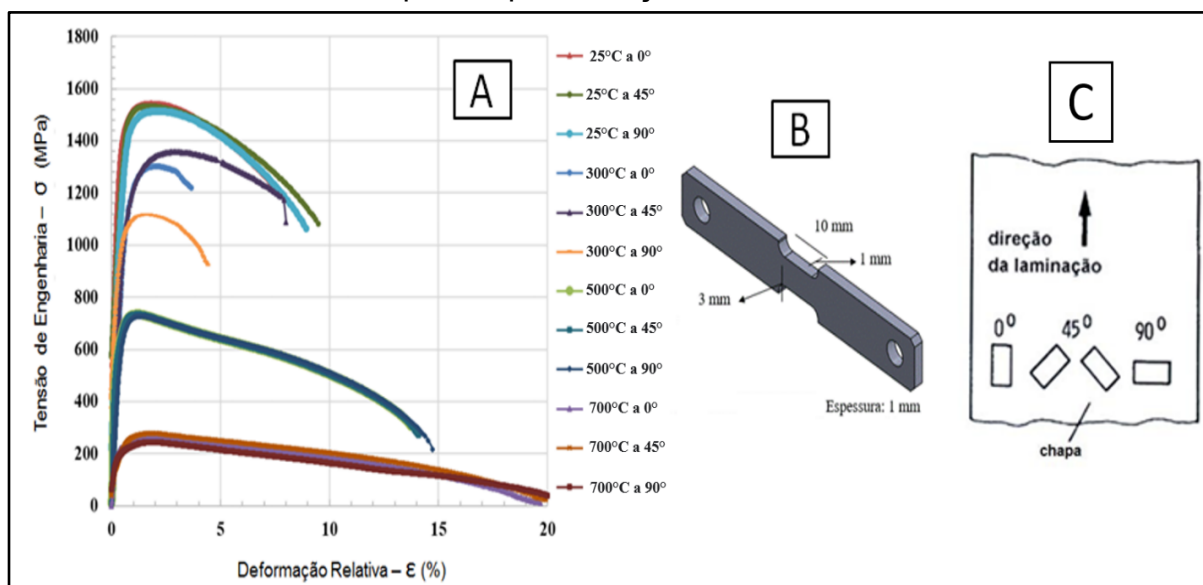
Figura 11 – Diagrama de Engenharia do Aço Hardox® 450 e do Aço Hardox® 400



Fonte: Ulewicz *et al.* (2013).

Ivaniski (2017) analisou através do gráfico Tensão de Engenharia x Deformação Relativa (Figura 12), algumas propriedades mecânicas do Aço Hardox® 450 nas três direções de laminação (0°, 45° e 90°) em diversas temperaturas.

Figura 12 – A) Tensão de Engenharia x Deformação Relativa; B) Algumas dimensões do corpo de prova - Aço Hardox® 450; C) Direções de Laminação dos corpos de prova - Aço Hardox® 450



Fonte: Ivaniski (2017).

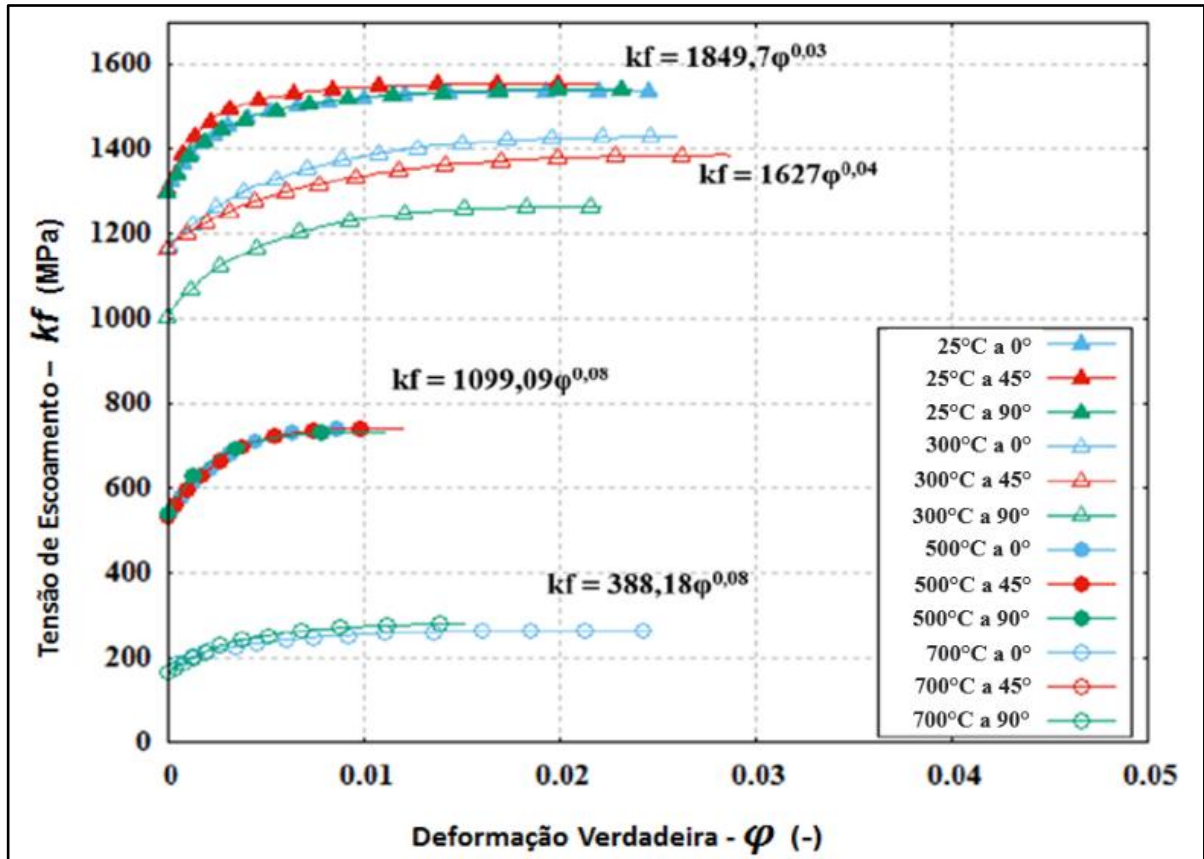
Conforme Ivaniski (2017), o estudo de caso foi realizado com chapas com 1 mm de espessura apresentou resultados semelhantes nas diferentes direções e com o coeficiente de encruamento (n) igual (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas em Temperatura Ambiente (25°) - Hardox® 450 – Ivaniski (2017)

Direções de Laminação	0°	45°	90°
Tensão de Escoamento (σ_e em MPa)	1308	1307	1309
Limite de Resistência (R_m em MPa)	1538	1538	1540
Deformação Relativa (ϵ em %)	8,7	10	8,92
Encruamento (n - adimensional)	0,03	0,03	0,03

Ivaniski (2017) analisou a Curva de Escoamento e construiu a equação de Hollomon (Figura 13).

Figura 13 –Tensão Verdadeira x Deformação Verdadeira - Aço Hardox® 450



Fonte: Ivaniski (2017).

A Figura 14 apresenta a microestrutura do Aço Hardox® 450, sendo composta por martensita revenida e com prováveis carbonetos (em torno de 0,26 % de carbono) precipitados em contornos de grãos (pontos mais escuros). Segundo o fabricante SSAB, a linha Hardox® passa por o tratamento térmico para ter maior resistência ao desgaste (MEDEIROS *et al.*, 2017).

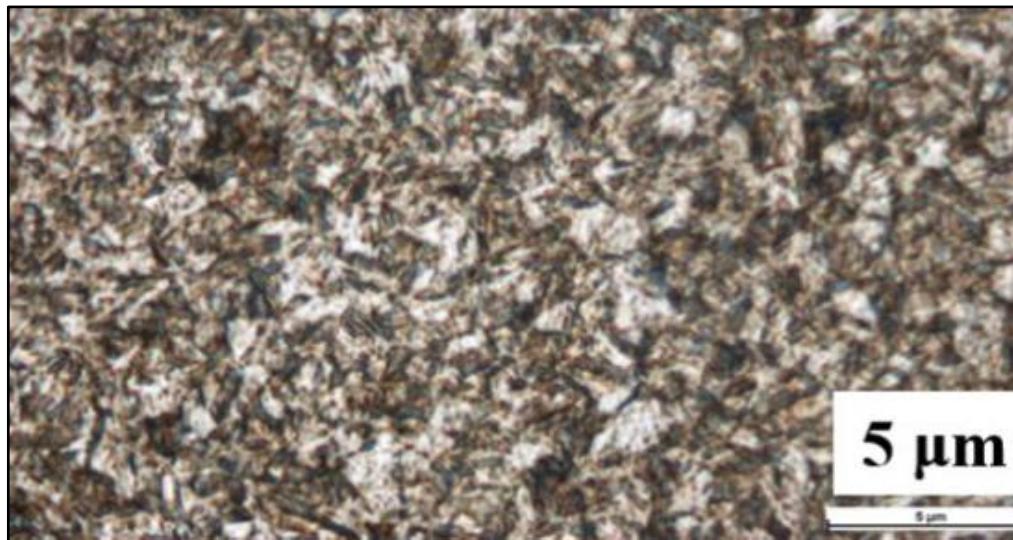
Figura 14 – Microestrutura do Aço Hardox® 450



Fonte: Medeiros *et al.* (2017).

Segundo Ivaniski (2017), a microestrutura do Hardox® 450 é constituída de uma fase com matriz martensítica com grãos de austenita retida, devido aos elementos microligantes e também é composto de carbonetos que auxiliam na resistência mecânica e também na ductilidade da chapa. Na Figura 15 se observa as inclusões não metálicas na microestrutura, também ripas de martensita dispersas como também carbonetos de ferro, carbonetos de molibdênio e cromo, também é possível observar austenita retida após a tempera quando recebida destaca na coloração branca.

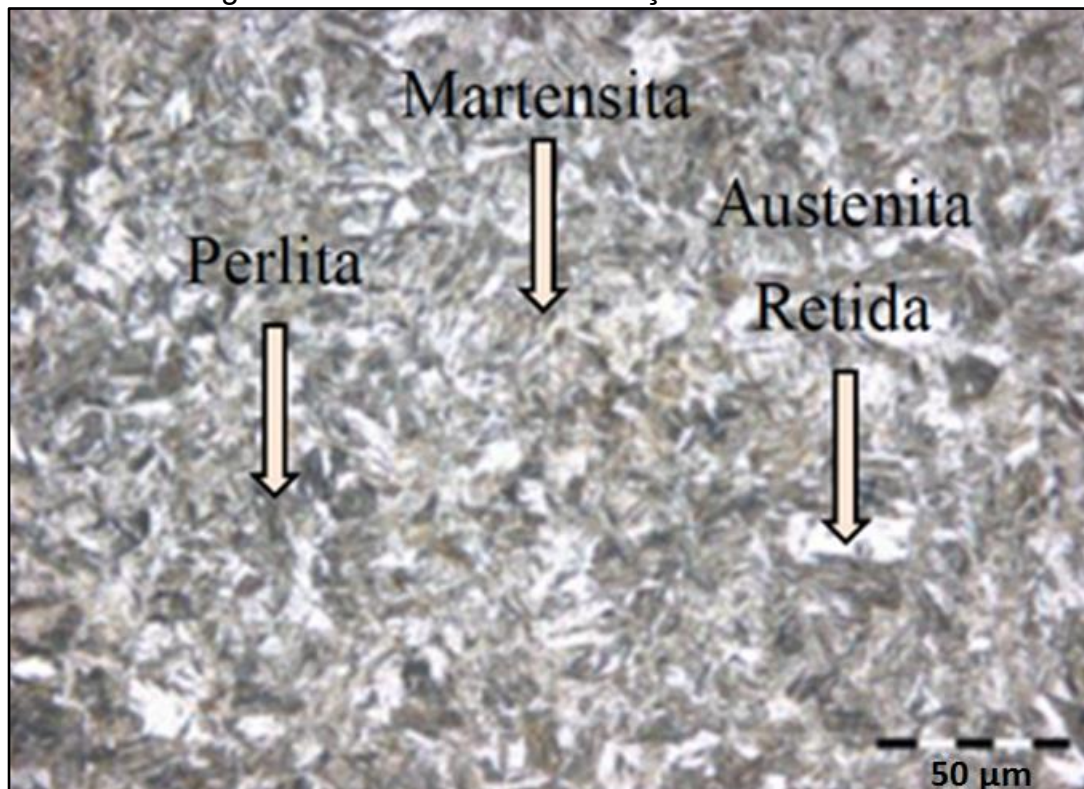
Figura 15 – Microestrutura do Aço Hardox® 450



Fonte: Ivaniski *et al.* (2017).

A Figura 16 é possível observar que o Hardox® 450 é um Aço martensítico devido a sua estrutura tetragonal e formato de agulhas ou ripas, com menor presença da fase perlítica e austenítica. Apresenta elevado teor de cromo, típico de estruturas como essa. Além disso, tem grande quantidade de manganês, o que contribui para diminuir a temperatura de transformação da martensita (Carmo, 2017).

Figura 16 – Microestrutura do Aço Hardox® 450



Fonte: Carmo (2017).

2.5 ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS

A estampagem de chapas é realizada utilizando uma matriz, com um prensa-chapas e um punção, fixos em uma prensa hidráulica ou mecânica. Assim o material é inserido na matriz, a prensa é acionada, ocorrendo à fixação do *blank* pelo prensa chapa e a movimentação do punção que deforma a chapa plasticamente, gerando um produto estampado (SCHAEFFER, 2004).

As avaliações mais recomendadas para a caracterização da estampabilidade de chapas são: Ensaio de Tração; A Curva de Escoamento; O Índice de Anisotropia; As Curvas Limite de Conformação e o Coeficiente de Atrito (SCHAEFFER, 2004).

2.5.1 Estampagem a Frio

A estampagem a frio é um processo que consiste na deformação plástica do material sem adição de calor, ou seja, todo o processo é realizado à temperatura ambiente. Os equipamentos de estampagem a frio são tipicamente prensas horizontais (na maioria dos casos), que efetuam as etapas de inserir o material na matriz ou ferramental, estampar o material na geometria desejada e cortar o material (Rodrigues, 2016).

Na estampagem a frio a tensão de Escoamento aumenta em cada nível de deformação, principalmente em função do fenômeno chamado encruamento (Turreta, 2008). Este processo apresenta o retorno elástico e exige altos esforços para conformação. (Souza, 2013). Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS), são extremamente difíceis de serem deformados a frio.

2.6 DUREZA

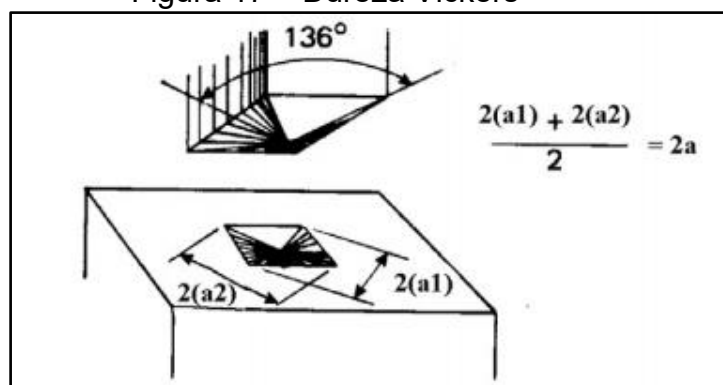
Dureza é uma propriedade mecânica do material que está relacionada à facilidade ou à dificuldade de deformação plástica localizada (Callister, 2011).

A plasticidade de uma chapa metálica pode ser medidas indiretamente com essa propriedade mecânica. São típicos chapas de alta dureza possuir baixa capacidade de estirar quando submetidas a esforços mecânicos, esses valores dependem da composição química, temperatura, tratamento térmico e também quando trabalhado a frio (Gedney, 2002).

O ensaio de dureza é considerado de simples realização e permite coletar diversas informações do material ensaiado como limite de resistência, módulo de elasticidade, resistência à fratura, tensões residuais, entre outros, sendo um dos ensaios mais realizados (Sousa, 2012).

A dureza Vickers é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas (Figura 17) (Dias, 2004).

Figura 17 – Dureza Vickers



Fonte: Schaeffer (2004).

Como o penetrador é um diamante, é considerado praticamente indeformável sendo que dentro de certos limites o valor da dureza obtida é o mesmo qualquer que seja a carga usada, para materiais homogêneos (Dias, 2004).

2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio de tração é um dos mais utilizados na indústria para avaliar as propriedades mecânicas de um material (GARCIA *et al.*, 2000).

O ensaio consiste em tracionar um corpo de prova, de forma a garantir um estado uniaxial de tensão, com força e velocidade constante até a ruptura, arquivando a Força (F) e o Comprimento (l_1) (alguns autores nomeiam o Comprimento como Estiramento, Alongamento ou Deslocamento) em cada instante (SCHAEFFER, 2004).

As propriedades obtidas através do ensaio de tração são: Módulo de Elasticidade (E), Tensão de escoamento (σ_e), Limite de Resistência (R_m) e Alongamento Total (Δl) (SCHAEFFER, 2004).

Durante a execução do ensaio de tração é recomendado o uso de extensômetros conhecidos como *Clip Gage*. O escorregamento do corpo de prova nas

garras de fixação, a deflexão do quadro de carga, composto pelas colunas da máquina, cabeçote e mesa, em relação à deformação do corpo de prova pode ser suficiente para gerar significativos erros e discrepâncias nos resultados. Por isso, o extensômetro deverá medir apenas a deformação do corpo de prova. O extensômetro é caracterizado por um mecanismo de fixação (Figura 18). Esses dispositivos podem ser usados e podem fornecer um alto grau de deformação e precisão da medição (HOUSE, 2000).

Figura 18 – Extensômetro (*Clip Gage*) aplicado a um corpo de prova



Fonte: House (2000).

2.7.1 Tensão de Engenharia (σ) X Deformação Relativa (ϵ)

A curva Tensão de Engenharia x Deformação Relativa acontece a partir de um corpo de prova com dimensões pré-estabelecidas através de norma. Com o equipamento em funcionamento as deformações ocorrem até que o material do corpo de prova seja rompido. O equipamento para ensaio de tração possui sensores que fazem a leitura da força aplicada no decorrer do ensaio e a variação de comprimento do corpo de prova (Ferrarini, 2004).

Com as medições de Força (F) e de Comprimento Final do Corpo de Prova após a Ruptura (l_f) é possível calcular a Tensão (σ) e a Deformação Relativa (ϵ), sendo que a Tensão de Engenharia pode ser calculada conforme a equação 01 (SCHAEFFER, 2004).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{eq. 01})$$

Onde:

- σ = é a Tensão de Engenharia (MPa);
- F = é a Força (N);
- A_0 = é a área inicial da secção do corpo de prova (mm²);

A área da secção inicial do corpo de prova pode ser calculada conforme a equação 02 (SCHAEFFER, 2004).

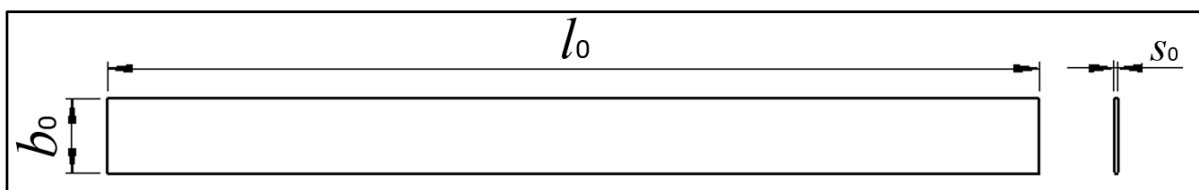
$$A_0 = s_0 \times b_0 \quad (\text{eq. 02})$$

Onde:

- A_0 = é a área inicial da secção do corpo de prova (mm²);
- s_0 = é a espessura inicial do corpo de prova (mm) (Figura 14);
- b_0 = é a largura inicial do corpo de prova (mm) (Figura 14);

Na Figura 19 é possível visualizar as definições de Espessura Inicial (s_0), Largura Inicial (b_0) e Comprimento Inicial (l_0) de um corpo de prova (SCHAEFFER, 2004).

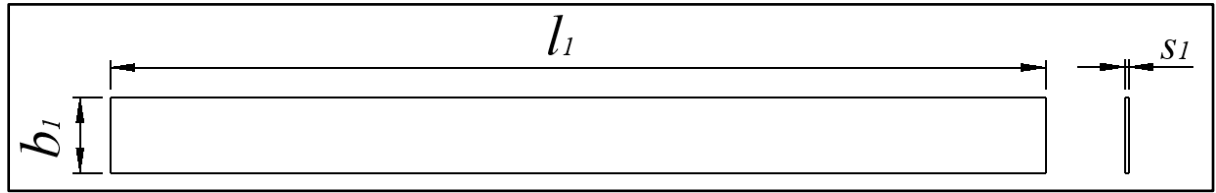
Figura 19 – Definições de Espessura (s_0), Largura (b_0) e Comprimento (l_0) Iniciais do Corpo de Prova



Fonte: Schaeffer (2004).

E na Figura 20 se pode visualizar as definições de Espessura Final (s_1), Largura Final (b_1) e Comprimento Final (l_1) de um corpo de prova após a Ruptura (SCHAEFFER, 2004).

Figura 20 – Definições de Espessura (s_0), Largura (b_0) e Comprimento (l_0) Finais do Corpo de Prova após a Ruptura



Fonte: Schaeffer (2004).

E a Deformação Relativa (ε), pode ser calculada conforme a equação 03 (SCHAEFFER, 2004).

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right) \times 100$$

$$\varepsilon = \left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad (\text{eq. 03})$$

Onde:

- ε = é a Deformação Relativa (%);
- l_0 = é o comprimento inicial (mm);
- l_1 = é o Comprimento Final do Corpo de Prova após a Ruptura (mm);

É importante observar na equação 03 que Alongamento Total (Δl) é obtido a partir da diferença do Comprimento Final do Corpo de Prova após a Ruptura (l_1) e o comprimento inicial (l_0). Na equação 04 é apresentada a formulação para obter o Alongamento Total (Δl) (SCHAEFFER, 2004).

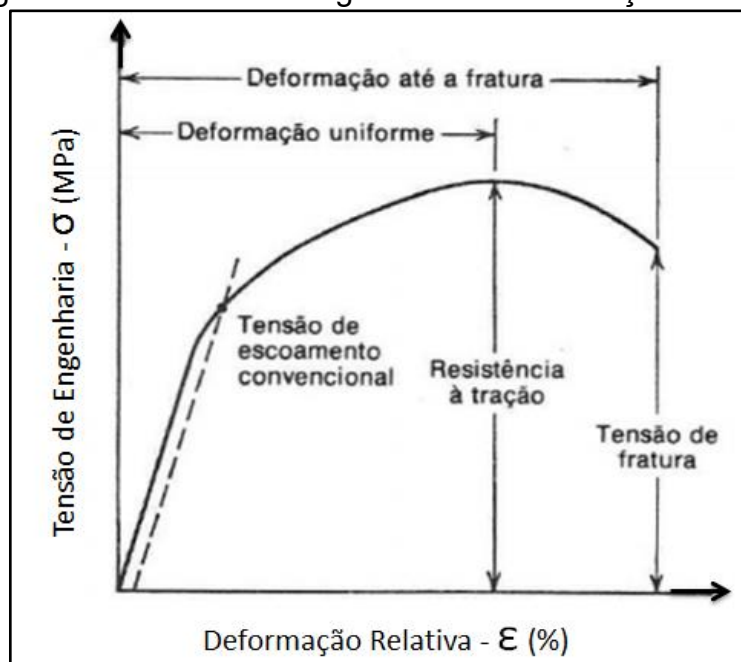
$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (\text{eq. 04})$$

Sendo:

- Δl = o Alongamento Total (mm) (também pode ser chamado de Deslocamento Total);
- l_0 = o comprimento inicial (mm);
- l_1 = o Comprimento Final do Corpo de Prova após a Ruptura (mm);

A curva típica entre Tensão de Engenharia e Deformação Relativa pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21 – Tensão de Engenharia X Deformação Relativa



Fonte: Dieter (1981).

2.7.2 Tensão Escoamento (kf) X Deformação Verdadeira (φ)

A variação da Tensão de Escoamento (kf) (que dá origem a chamada de Curva de Escoamento) que ocorre em um material durante a sua deformação, em função da Deformação Verdadeira (φ), pode ser obtida através do ensaio de tração, realizando as medições de Força (F) e comprimento (Δl) instantaneamente. A Tensão de Escoamento (kf) pode ser obtida através da equação 05 (SCHAEFFER, 2004).

$$kf = \frac{F}{A} \quad (\text{eq. 05})$$

Onde:

- kf = é a Tensão de Escoamento (MPa);
- F = é a Força (MPa);
- A = é a área instantânea da secção do corpo de prova (mm²);

A tensão de Escoamento (kf) também pode ser calculada utilizando a equação 06 (SCHAEFFER, 2004).

$$kf = \frac{R_m}{A} \quad (\text{eq. 06})$$

Onde:

- kf = é a Tensão de Escoamento (MPa);
- R_m = Limite de Resistência Máxima (alguns autores denominam de Tensão Máxima);
- A = é a área instantânea da secção do corpo de prova (mm²);

É importante a construção de curvas de Escoamento para a otimização de parâmetros de processo e avaliação do desempenho de chapas metálicas. Para isso são utilizadas relações matemáticas que permitem a quantificação dos resultados destas curvas. As equações de Hollomon e Ludwik (equação 07) descrevem o comportamento de chapas metálicas no regime plástico (KUMAR *et al.*, 2016).

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (\text{eq. 07})$$

Onde:

- kf = é a Tensão de Escoamento (MPa);
- C = é uma constante da Curva de Escoamento (MPa);
- φ = é Deformação Verdadeira (Adimensional);
- n = é o Coeficiente de Encruamento (Adimensional);

A Área Instantânea da secção pode ser obtida a partir da lei da constância de volume pela equação 08 (SCHAEFFER, 2004).

$$A = \frac{A_0 \times l_0}{l_1} \quad (\text{eq. 08})$$

Onde:

- A = é a Área Instantânea (mm²);
- A_0 = é a área inicial (mm²);
- l_0 = é o comprimento inicial do Corpo de Prova (mm);

- l_1 = é o comprimento final do Corpo de Prova após a Ruptura (mm);

Através da equação 09 é possível obter a Deformação Verdadeira (φ) (SCHAEFFER, 2004).

$$\varphi = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (\text{eq. 09})$$

Onde:

- φ = é a Deformação Verdadeira (-);
- l_0 = é o comprimento inicial (mm);
- l = é o comprimento instantâneo (mm);

A Deformação Verdadeira (φ) também pode ser calculada utilizando a equação 10 (SCHAEFFER, 2004).

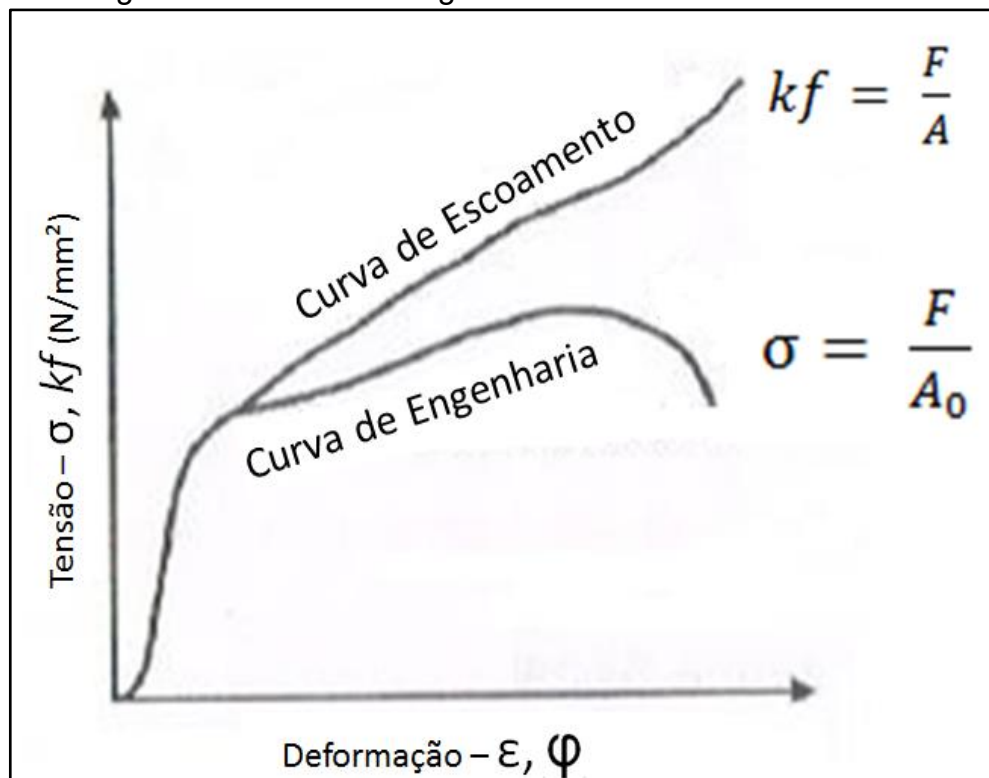
$$\varphi = \ln (1 + \varepsilon) \quad (\text{eq. 10})$$

Onde:

- φ = é a Deformação Verdadeira (-);
- $\ln$ = é o logaritmo natural;
- l = é o comprimento instantâneo (mm);

O conhecimento da resistência ao Escoamento (k_f) é fundamental para o cálculo da força de trabalho de conformação. Na Figura 22 pode-se visualizar esquematicamente a comparação entre a Curva de Engenharia e a Curva de Escoamento (Baú, 2012).

Figura 22 – Curva de Engenharia X Curva de Escoamento

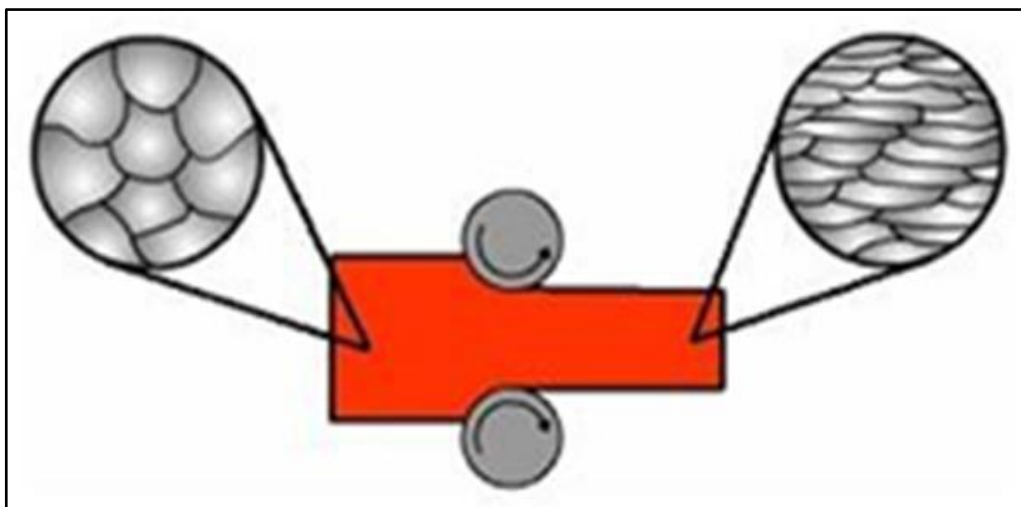


Fonte: Schaeffer (2004).

2.8 ANÁLISE DA ANISOTROPIA

Nos processos de laminação de chapas, os grãos que compõem a microestrutura são alongados na direção laminação (Figura 23) (SCHAEFFER, 2004).

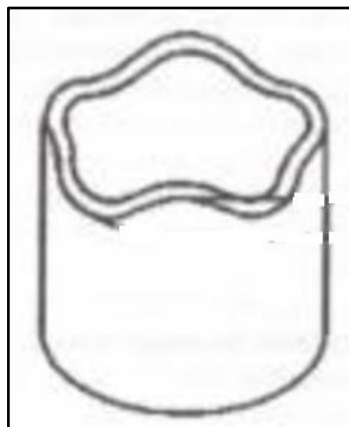
Figura 23 – Comportamento da Microestrutura durante o Processo de Laminação



Fonte: Adaptado de Oliveira (2010).

Esse alongamento provoca uma heterogeneidade nas propriedades das chapas. Uma consequência deste fenômeno ocorre nos processos de estampagem profunda, sendo conhecido como orelhamento (Figura 24). Sendo que a quantificação deste acontecimento, diferenciada dos grãos da microestrutura, é chamada de Índice de Anisotropia (r) (SCHAEFFER, 2004).

Figura 24 – Orelhamento



Fonte: Schaeffer (2004).

Para avaliar a anisotropia, é usado o Índice de Anisotropia (r), que é definido como sendo a razão das Deformações Verdadeiras (φ_s e φ_b) que ocorrem em um elemento de volume durante a deformação ou a relação entre a Deformação Verdadeira de largura (φ_b) pela Deformação Verdadeira da espessura (φ_s) do corpo de prova, num ensaio de tração. Mede-se a largura e a espessura em diversos pontos da parte útil do corpo de prova, antes do ensaio e após o ensaio. Normalmente,

dependendo do material, deforma-se de 10% a 20% do corpo de prova (Ferrarini, 2004).

Em um ensaio de tração, bem como em um processo de estampagem de uma chapa a anisotropia ocorre nos dois sentidos, espessura e largura e não é uniforme. Por isso que em algumas chapas diminuem mais rápido a espessura, ocorrendo rupturas prematuras, enquanto em outras chapas nas mesmas condições diminuem somente a largura, o que geralmente não causam problemas na estampagem (Ferrarini, 2004).

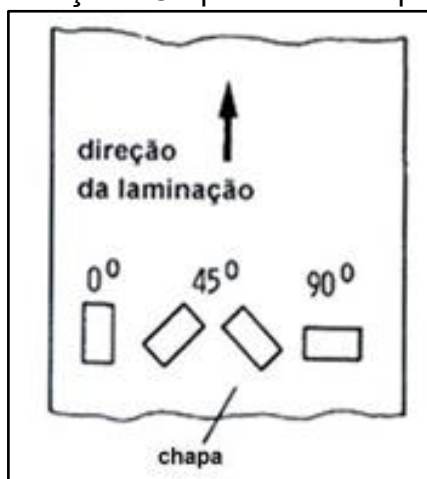
O cálculo da anisotropia é um método pelo qual se pode avaliar indiretamente a conformabilidade de chapas metálicas. A anisotropia pode ocorrer três situações distintas:

- $r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} = 1$ (isotropia total);
- $r_{0^\circ} = r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} = 1$ (anisotropia normal ou média e anisotropia planar);
- $r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} = 1$ (anisotropia média ou normal + anisotropia planar).

A figura 6 exibe um Escoamento localizado para materiais caracterizados por $r > 1$, $r = 1$ e $r < 1$, para um sistema biaxial de tensões ($\sigma_x = \sigma_y$), um alto valor de r ($r > 1$), ocasiona uma resistência ao afinamento da chapa, e portanto uma alta resistência da tensão biaxial, enquanto que, um baixo valor de r ($r < 1$), indica facilmente um afinamento da chapa, e portanto uma baixa resistência biaxial, enquanto que para materiais isotrópicos a anisotropia média é $r = 1$ e a anisotropia planar é $\Delta r = 0$ (Ferrarini, 2004).

Os valores do Índice de Anisotropia (r), determinados em corpos de prova situados em um mesmo material, não apresentam um único valor de anisotropia. São três razões de deformação que são obtidos em ensaios de tração de corpos de prova retirados nas três direções em relação ao sentido de laminação 0° , 45° e 90° conforme Figura 25 (SCHAEFFER, 2004).

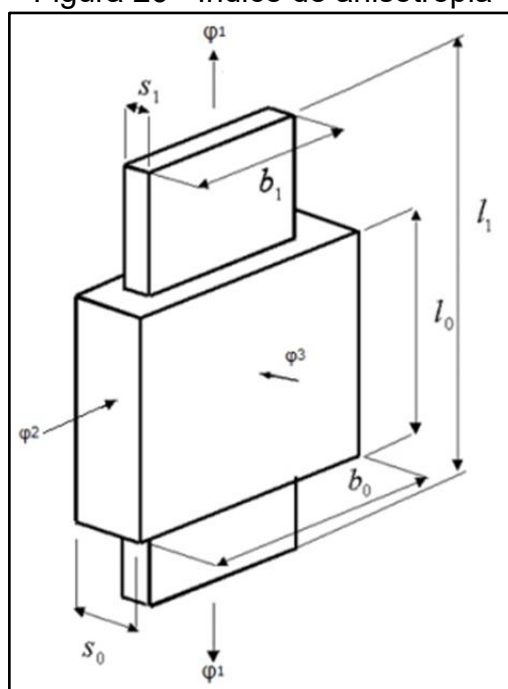
Figura 25 – Sentido de laminação - Corpos de Prova para o ensaio de anisotropia



Fonte: Schaeffer (2004).

O índice de anisotropia é definido como o quociente das deformações reais da largura e da espessura do corpo de prova (Figura 26) (SCHAEFFER, 2004).

Figura 26 - Índice de anisotropia



Fonte: Schaeffer (2004).

É possível avaliar a anisotropia utilizando-se o Índice de Anisotropia (equação 11), que é definido como a razão das Deformações Verdadeiras oriundas da deformação do ensaio ou pela relação entre a deformação real da largura pela deformação real do comprimento do corpo de prova, antes e após o ensaio de tração. As equações 12 e 13 referem-se à anisotropia média e anisotropia planar,

respectivamente(Deiter,1981).

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)}$$

$$r = \frac{\left(\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)\right)}{-\left(\left(\ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)\right) + \left(\ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right)\right)\right)} \quad (\text{eq. 11})$$

Onde:

- r = índice de anisotropia (Adimensional);
- b_1 = largura final do Corpo de Prova após o ensaio (mm);
- b_0 = largura inicial do Corpo de Prova (mm);
- l_1 = comprimento final do Corpo de Prova após a Ruptura (mm);
- l_0 = comprimento inicial do Corpo de Prova (mm).

$$r_m = \frac{1}{4} \cdot (r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (\text{eq. 12})$$

$$\Delta r = \left(\frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2}\right) + r_{45^\circ} \quad (\text{eq. 13})$$

Onde:

- r_m = anisotropia média (Adimensional);
- Δr = anisotropia planar (Adimensional);
- r_{0° = índice de anisotropia à 0° (Adimensional);
- r_{45° = índice de anisotropia à 45° (Adimensional);
- r_{90° = índice de anisotropia à 90° (Adimensional).

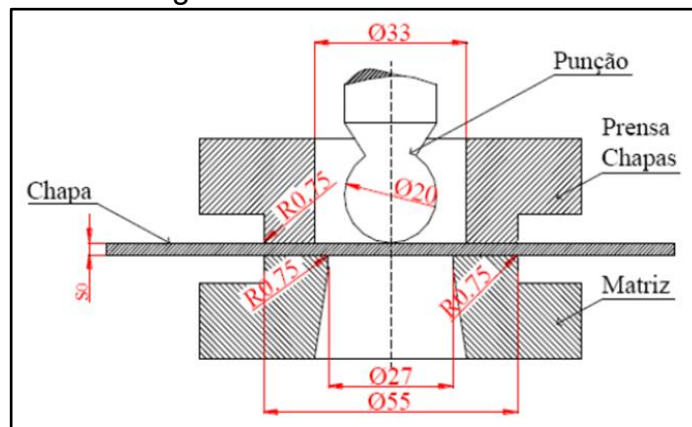
2.9 ENSAIO ERICHSEN

Este ensaio é muito utilizado para determinar a ductilidade de chapas, sendo que característico ocorrer deformações bidirecionais trativas, e existindo condições de

lubrificações controladas a deformação será biaxial. O corpo-de-prova deforma-se igualmente em módulo e direção, configurando assim o estiramento (SCHAEFFER, 2004).

Neste ensaio (Figura 27) o prensa chapas fixa o corpo de prova na matriz e este sofre deformação através da atuação do punção, onde o ensaio é finalizado após a visualização da ruptura (SCHAEFFER, 2004).

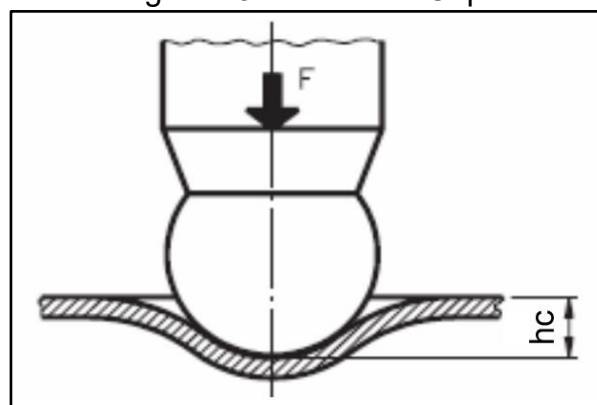
Figura 27 – Ensaio Erichsen



Fonte: Schaeffer (2004).

O Índice Erichsen de Embutimento (IE) é a altura do copo (h_c) após a atuação do punção (Figura 28) (Souza, 1982).

Figura 28 – Altura do Copo



Fonte: Souza (1982).

Um resultado elevado de Índice Erichsen de Embutimento (IE) representará uma boa estampabilidade do material, sendo que o mesmo possui uma relação positiva com o Índice de Encruamento (n) do material, assim, o aumento do Índice

Erichsen de Embutimento (IE) resulta no aumento do índice de encruamento (n) e vice-versa (OLIVEIRA, 2010).

A deformação da chapa deve ocorrer com uma velocidade de penetração entre 5mm/min e 20mm/min (ABNT NBR 5902, 1980).

2.10 EXPANSÃO DE FUROS

A conformabilidade de chapas pode ser dividida em:

- a) Conformabilidade de volume (*bulk sheet formability*);
- b) Conformabilidade de borda (*edge formability*).

A conformabilidade de volume é a capacidade da chapa ser conformada, sem que ocorram falhas nesse processo devido à falta de ductilidade. A conformabilidade de borda é a capacidade do material da chapa em ser estampado, sem que ocorram falhas por fratura em uma borda ou furo. A conformabilidade de borda é avaliada através de ensaios de expansão de furos e a medida é conhecida com taxa de expansão de furos (PAUL *et al.*, 2014).

A expansão de furos consiste em medir a porcentagem de um furo pode ser expandido até que ocorra o início da ruptura (FANG *et al.*, 2003).

Segundo FANG *et al.* (2003), atualmente, há duas normas utilizadas para avaliar a expansão de furos, sendo estas:

- a) A JFS T 1001 - 1996 (Norma Japonesa), muito usada por pesquisadores;
- b) A Norma ISO 16630:2009, muito usada pelas indústrias automobilísticas, principalmente na Europa.

A expansão deve ser realizada com um punção cônico de 60° e o diâmetro do furo no corpo de prova deve ser de 10mm. A razão de expansão de furo deve ser calculada conforme a equação 14 (ISO 16630, 2009).

$$\lambda = \left(\frac{D_h - D_0}{D_0} \right) \times 100 \quad (\text{eq. 14})$$

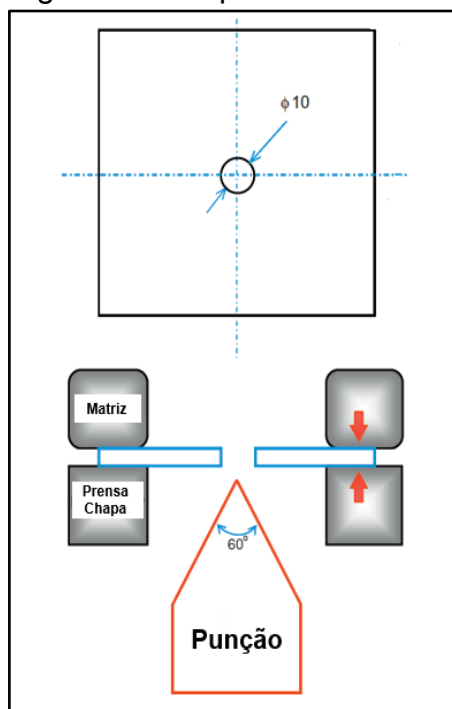
Onde:

- λ = é a taxa de expansão do furo (%);
- D_0 = é o diâmetro original do furo (mm);

- D_h = é o diâmetro médio do furo após a ruptura (mm);

A Figura 29 apresenta o punção e corpo de prova, conforme a norma orientações da norma.

Figura 29 – Expansão de Furos



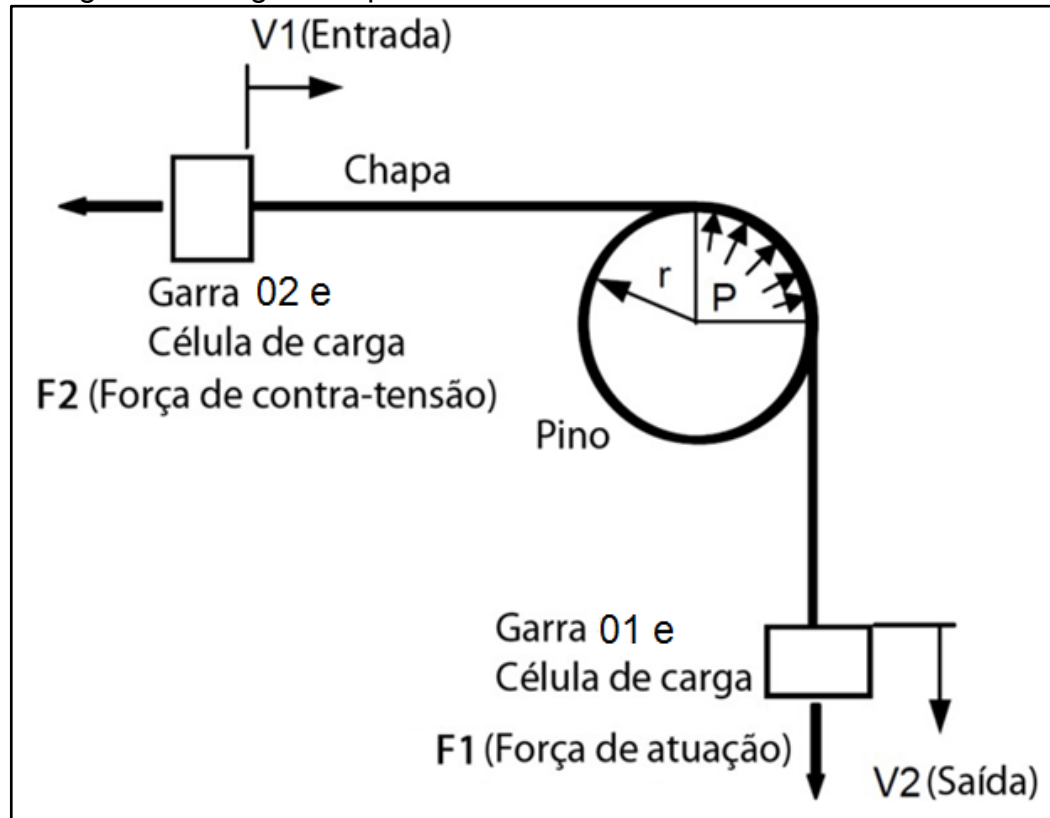
Fonte: Fang *et al.* (2003).

2.11 ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO

O ensaio de DST (dobramento sob tensão, cujo termo em inglês é *Bending Under Tension Test*) consiste em dobrar uma de chapa de determinada largura através de um pino de raio pré-determinado e sobre o mesmo fazer a chapa deslizar. Para que ocorra o deslize da chapa as extremidades da mesma são presas às garras, onde ocorre a aplicação de uma força em uma das extremidades da chapa que está fixa a uma garra para que haja o movimento relativo entre a chapa e o pino. Na outra extremidade é aplicada uma força contrária ao movimento com o objetivo de tencionar a chapa e poder-se variar a pressão de contato incidente sobre o pino. Esta descrição do ensaio pode ser visualizada através de um desenho esquemático (Figura 30). A força que gera o movimento é chamada de força de atuação (F_2 na Figura 30) e a força que é aplicada no sentido contrário é chamada de força de contra-tensão (F_1 na

Figura 30). O pino de raio r tem a função de simular o atrito na passagem do raio da matriz de estampagem, por ser nessa região que as tensões são maiores (Folle, 2012).

Figura 30 – Figura esquemática do ensaio Dobramento sob Tensão



Fonte: Folle (2012).

2.11.1 Equação Usada para o Cálculo do Coeficiente de Atrito

A equação 15 pode ser utilizada para determinar o Coeficiente de Atrito (Folle, 2012).

$$\mu = \frac{4 \times T}{r \times \pi (F_1 + F_2)} \quad (\text{eq. 15})$$

Onde:

- μ = é o Coeficiente de Atrito (Adimensional);
- T = é o Torque (Nm);
- F_1 = é a Força na garra 01(N);
- F_2 = é a Força na garra 02 (N);

- r = é o Raio do pino (m);
- π = é o Pi (3,1416);

2.12 ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES

O método dos Múltiplos Punções (também conhecido por ensaio dos Cinco Punções) foi desenvolvido pelo pesquisador alemão Roland Hennig, da Universidade Técnica de Dresde no ano de 1997 (ARRUDA *et al.*, 2011).

Conforme Arruda *et al.* (2011) O ensaio dos Múltiplos Punções é uma adaptação do ensaio *Swift*, onde são utilizados os Cinco Punções com diferentes geometrias (Figura 31), sendo que estas:

- a) Cilíndrica (a);
- b) Elíptica rasa (b);
- c) Hemisférica (c);
- d) Elíptica profunda (d);
- e) Elíptica extra profunda (e).

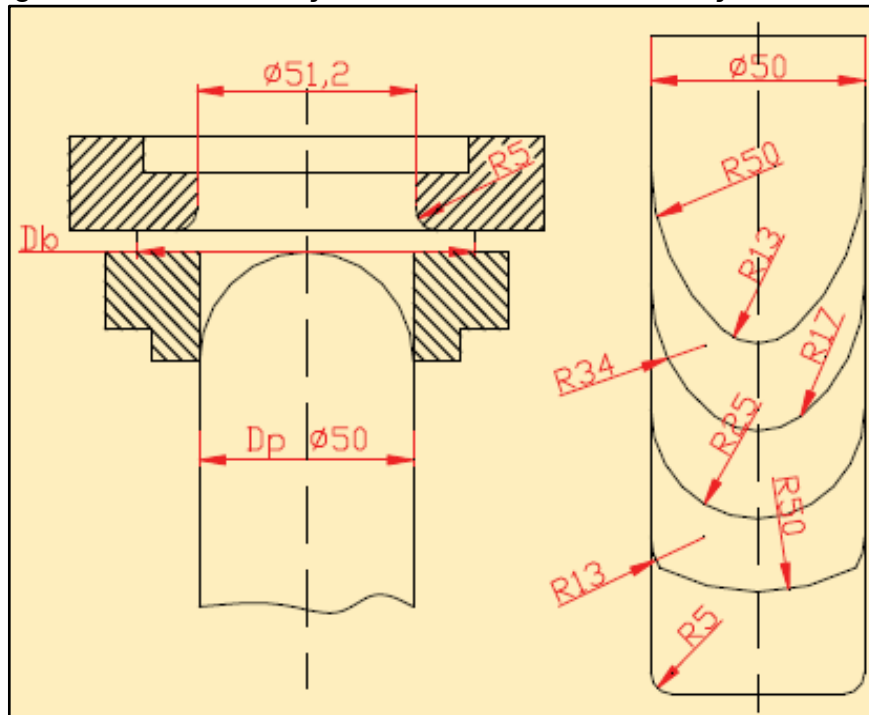
Figura 31 – Cinco Punções – Variação de Geometria



Fonte: Arruda *et al.* (2011).

Os punções possuem diâmetro de 50 mm, sendo que as variações geométricas estão presentes no diferentes raios que cada um dos punções apresenta em uma das extremidades dos mesmos (Figura 32) (ARRUDA *et al.*, 2011).

Figura 32 – Cinco Punções – Dimensional dos Punções e Matriz



Fonte: Arruda *et al.* (2011).

O ensaio dos Múltiplos Punções fornece a razão-limite de estampagem (β) (equação 16), para cada condição de deformação. A variação da geometria dos punções possibilita avaliar a combinação das deformações de estiramento e embutimento profundo e montar um gráfico comparativo entre materiais, de modo a facilitar a seleção de projetos de engenharia (ARRUDA *et al.*, 2011).

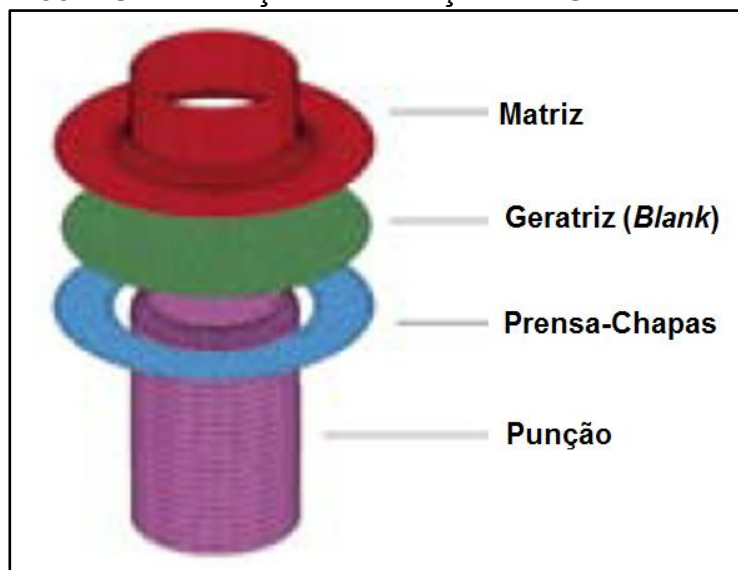
$$\beta = \frac{D}{d} \quad (\text{eq. 16})$$

Onde:

- β = é a Razão Limite de Estampagem (Adimensional);
- D = é o diâmetro da giratriz (mm);
- d = é o diâmetro do punção (mm);

O diâmetro da Geratriz é o diâmetro do *Blank* (Figura 33) (ARRUDA *et al.*, 2011).

Figura 33 – Cinco Punções – Definições da Geratriz e Punção



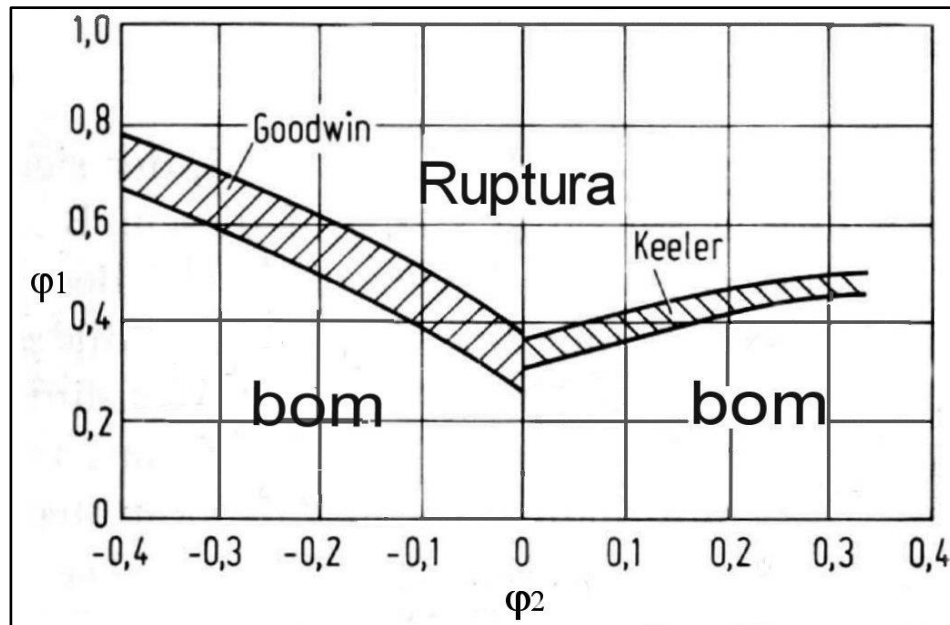
Fonte: Arruda *et al.* (2011).

Em 1997, o pesquisador Hennig afirmou que se utilizam estes punções para determinar a capacidade do material suportar deformações de embutimento profundo (cilíndrico) até estiramento (hemisférico) variando o punção. As deformações medidas em corpos de prova ensaiados com este método podem ser utilizadas para determinar a curva limite de conformação ou validá-la (NETTO, 2004).

2.13 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A Curva Limite de Conformação (CLC), também conhecida como diagrama de Goodwin-Keeler (Figura 34), representa uma ilustração gráfica da possibilidade de conformação máxima possível de uma chapa quando submetida a um estado de deformações biaxiais e uniaxiais no seu plano. É um dos critérios de segurança utilizados para identificar problemas existentes ou problemas que possam existir quando uma chapa metálica é submetida a uma conformação mecânica durante o processo de estampagem. A intensidade e o sentido das deformações existentes na superfície da chapa (ϵ_1 e ϵ_2) podem variar em pontos diferentes da mesma conforme ocorre a deformação (CRIVELLARO, 2003).

Figura 34 – Curva Limite de Conformação (Diagrama de Goodwin-Keeler)

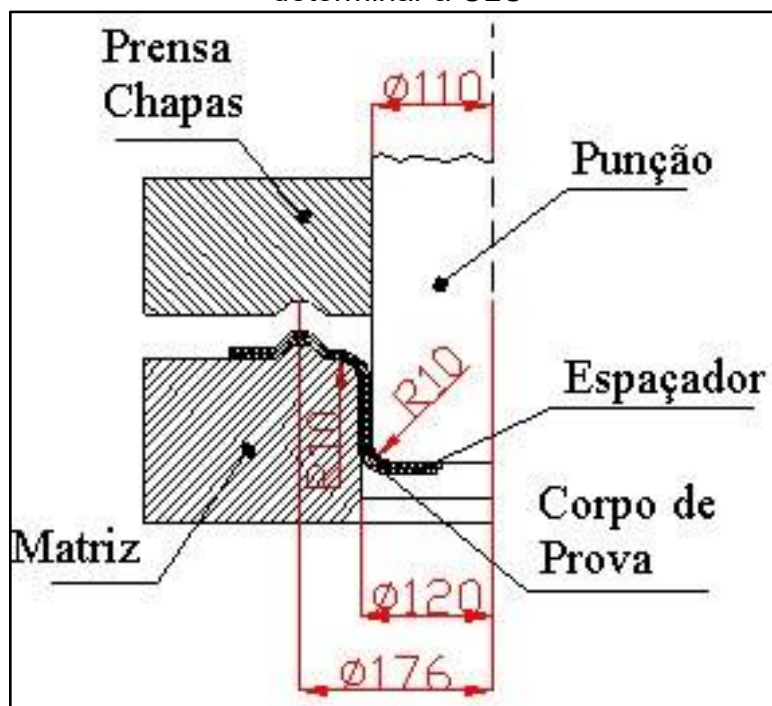


Fonte: Crivellaro (2003).

As Curvas Limites de Conformação (CLC) apenas dão os valores máximos das deformações permissíveis numa chapa, não fornecendo nenhuma informação de como se atinge estas deformações (CRIVELLARO, 2003).

Em 1980, outros dois pesquisadores (Gronostjki e Dolny), desenvolveram um método para determinar a CLC utilizando um punção cilíndrico buscando eliminar certas imperfeições que existiam nos métodos empregados até aquele ano (Figura 35) (NETTO, 2004).

Figura 35 – O ferramental utilizado por Gronostajski e Dolny em 1980 para determinar a CLC

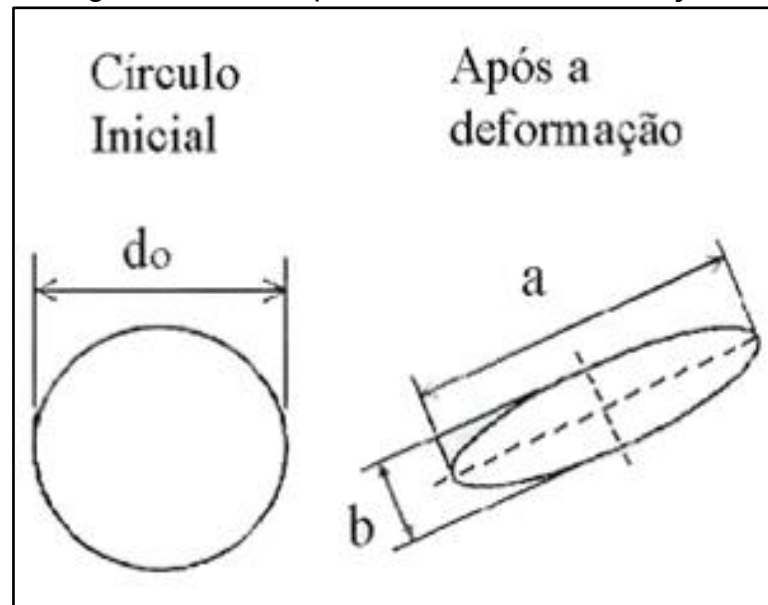


Fonte: Netto (2004).

A Curva Limite de Conformação (CLC) é a melhor maneira de representar as deformações principais maiores (ϵ_1) e menores (ϵ_2) que estão envolvidas numa superfície plana de uma chapa caracterizando o ponto exato da falha catastrófica quando esta é submetida a um estado de deformações que ultrapassa sua capacidade de estiramento. A CLC tem sido usada como um ótimo indicador na previsão de falhas de conformação em linhas de estampagem. O diagrama indica as condições de deformação que ocorre em uma região localizada no ponto de maior deformação. Contudo, o sucesso da estampagem depende da capacidade do material de redistribuir uniformemente da melhor maneira possível às deformações superficiais envolvidas no processo, garantindo uma peça livre de falhas (CRIVELLARO, 2003).

A Curva Limite de Conformação (CLC) é elaborada a partir dos ensaios experimentais: inicialmente círculos são gravados na superfície da peça, e depois da deformação verifica-se a variação de diâmetro daqueles círculos próximos à região da falha ou na estrição. Os comprimentos maior (a) e menor (b) das elipses deformadas (Figura 36) são transformados em Deformações Verdadeiras ϕ_1 e ϕ_2 , através da verificações realizadas com o auxílio das equações 17 e 18 (OTOMAR, 2010).

Figura 36 – Exemplo do método de verificação



Fonte: Schaeffer (2004).

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad (\text{eq. 17})$$

Onde:

- φ_1 = Deformação Principal Maior (na superfície da Chapa) (Adimensional);
- a = é o diâmetro final do círculo na direção 1 (mm);
- d_0 = é o diâmetro inicial do círculo (mm);

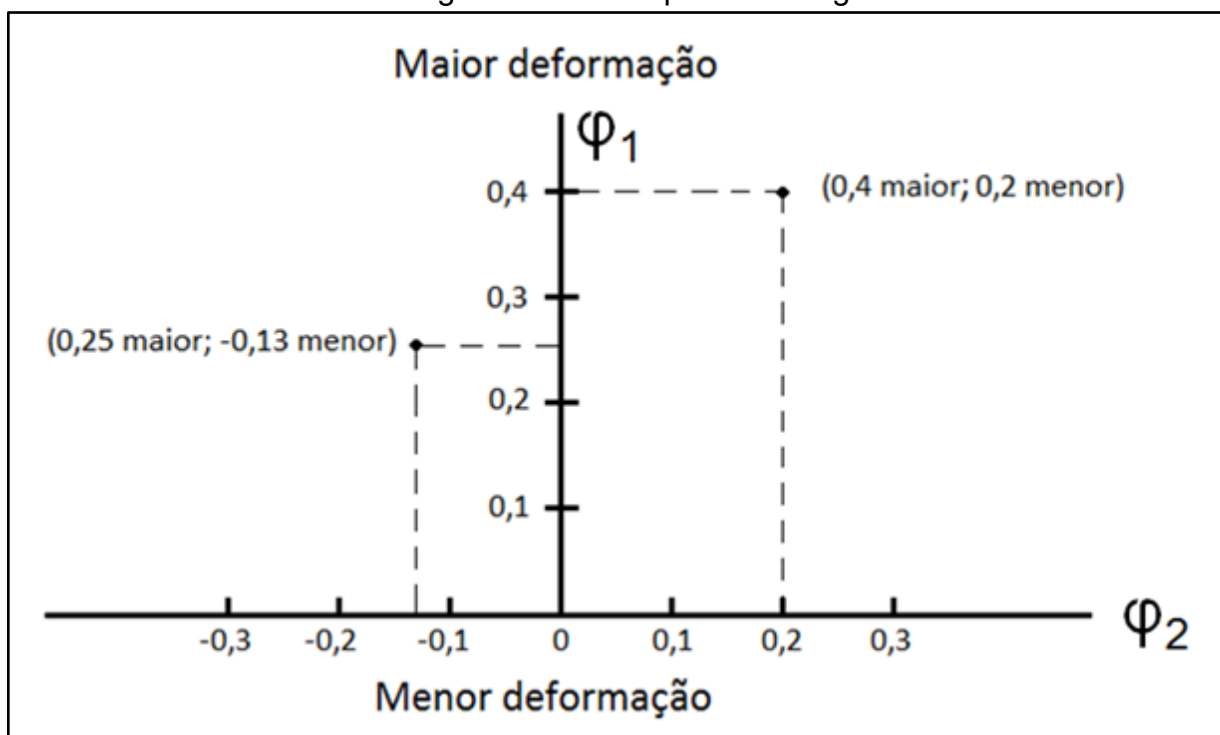
$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad (\text{eq. 18})$$

Onde:

- φ_2 = Deformação Principal Menor (na superfície da Chapa) (Adimensional);
- b = é o diâmetro final do círculo na direção 2 (mm);
- d_0 = é o diâmetro inicial do círculo (mm);

Após a verificação dos resultados obtidos a partir das equações 17 e 18, os mesmos são plotados (Figura 37) em um gráfico para a construção da curva CLC (SCHAEFFER, 2004).

Figura 37 – Exemplo de Plotagem



Fonte: Schaeffer (2004).

Na literatura existem diversas descrições de ensaios que podem determinar a Curva Limite de Conformação (CLC), como os testes uniaxiais (tração) e os ensaios de Swift, de Fukui, Erichsen, e Bulge Teste, porém estes ensaios embora provoquem deformações que atingem a zona plástica, não são os mais indicados para determinar a CLC de um material, pois eles definem apenas um único modo de deformação (BASTOS, 2009).

Como os materiais durante um processo real de conformação estão sujeitos a combinações dos diversos modos de deformação, seriam necessários diferentes ensaios para definir a CLC por completo (BASTOS, 2009).

Em 1968, Nakajima propôs determinar tanto as deformações de embutimento quanto as de estiramento através de um único método de ensaio, comparando seus resultados com os obtidos através de outros métodos de ensaios conhecidos em sua época, Bulge Teste e Erichsen (BASTOS, 2009).

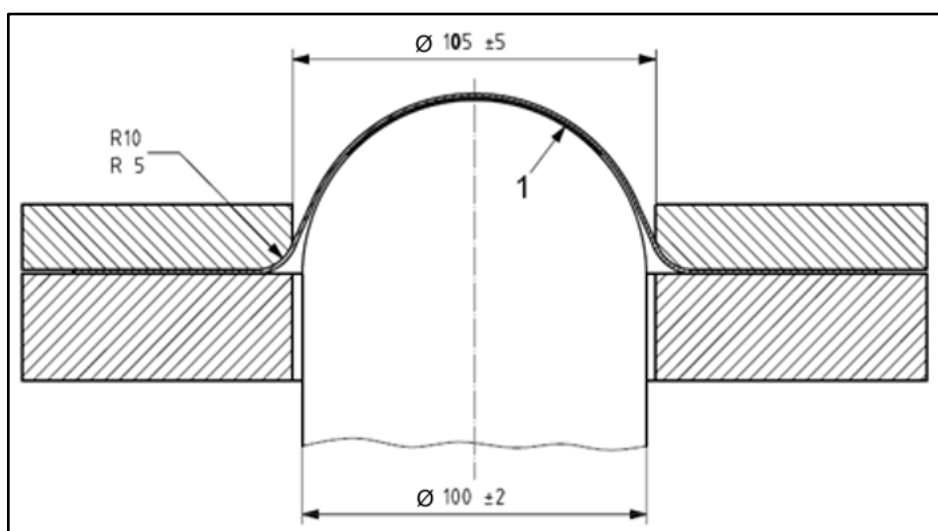
2.13.1 Ensaio Nakajima

O ensaio Nakajima propõe levantar a curva limite utilizando um único punção Hemisférico de 100mm de diâmetro, uma única matriz, modificando a forma dos corpos de prova, tiras com larguras diferenciadas. Cada tira era presa na matriz enquanto o punção era forçado perpendicularmente contra ela similar ao que acontece no ensaio Erichsen (NETTO, 2004).

Em 1980, Gronostjski e Dolny, buscando otimizar o método Nakajima, descreveram uma variação onde era utilizado o ferramental Marciniak, com a intenção de eliminar os efeitos do atrito entre a chapa e o ferramental (Bastos, 2009).

Atualmente o processo para determinação da Curva Limite de Conformação (CLC) segue a norma ISO 12004, que descreve o método de ensaio Nakajima onde este ensaio permite com um único ferramental (Figura 38) reproduzir estados de deformações uniaxiais e biaxiais, através da deformação imposta por um punção Semi-Esférico em chapas metálicas retangulares que variam de largura e são fixas por uma matriz e um prensa-chapa (Bastos, 2009).

Figura 38 – Ferramental do ensaio Nakajima, sendo 1 a camada de lubrificação



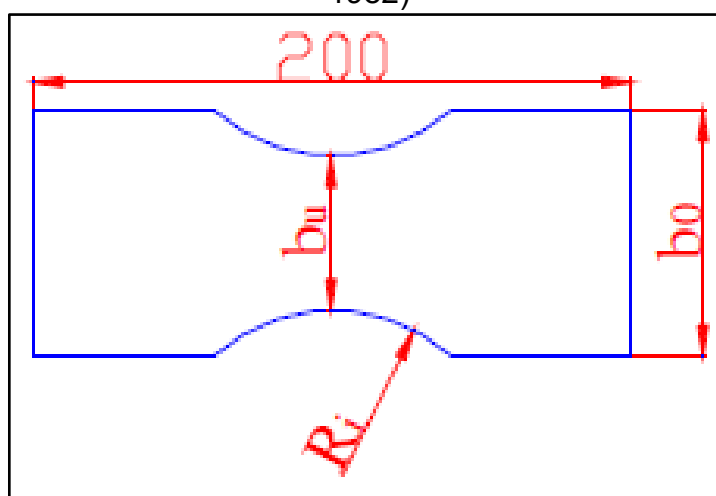
Fonte: ISO 12004-2 (2008).

No ensaio Nakajima, os modos de deformação são analisados variando-se a largura dos corpos de prova, onde aumentando a largura, é possível verificar mais adequadamente o modo de estiramento equi-biaxial (BASTOS, 2009).

Os corpos de prova ensaiados por Nakajima eram retangulares, com comprimento constante e igual a 200mm e com variações de largura, sendo estas de: 200, 175, 160, 140, 130, 120, 110, 80 e 50mm (NETTO, 2004).

Em 1982, dois pesquisadores (Klein e Cervelin), descreveram uma modificação para os corpos de prova Nakajima (Figura 39) com tiras entalhadas. A presença de entalhes modificava a restrição lateral da tira quando submetida ao ensaio de estiramento forçando a ruptura na região central do corpo de prova (NETTO, 2004).

Figura 39 – Modificação nos corpos de prova – Ensaio Nakajima (Klein e Cervelin - 1982)

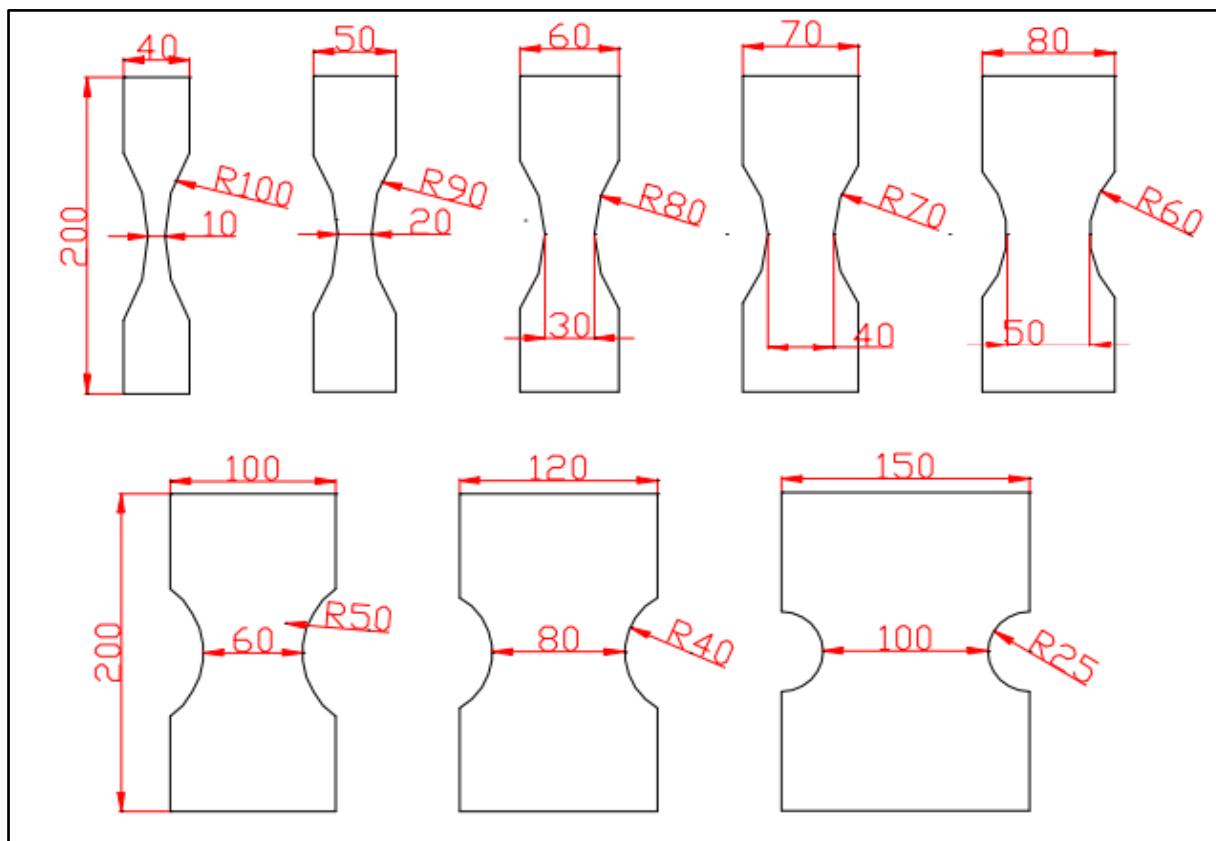


Fonte: Netto (2004).

Crivellaro (2003) cita que Nakajima propôs ensaiar corpos de provas na forma de discos com variação na geometria para traçar a CLC, porém o pesquisador Hasek modificou este ensaio adotando corpos de prova com entalhes circulares na chapa, mas mantendo a mesma geometria. Entretanto em 1997 o pesquisador Hennig propôs a utilização de uma série de 8 corpos de prova de forma retangular de mesmo comprimento, porém com diferentes larguras e raio dos entalhes com o objetivo de alcançar um maior nível de deformações principais maiores e menores na Curva Limite de Conformação (CLC). A Figura 40 apresenta a família (8 corpos de prova com diferentes dimensões de entalhes e largura) usados sugeridos por Hennig.

Figura 40 – Corpos de prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima

Modificado



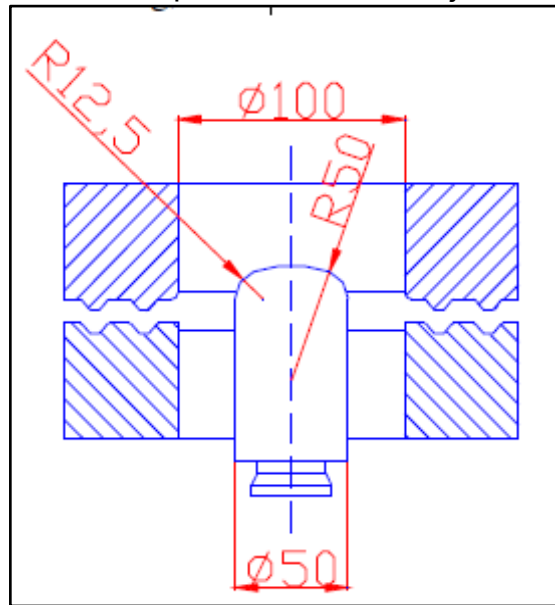
Fonte: Netto (2004).

2.13.2 Ensaio Nakajima Modificado

Em 1997, o pesquisador alemão Roland Hennig descreveu que posição onde ocorre a estricção é influenciada pela forma do punção, sendo o punção na forma de elipse rasa, por ter uma área de contato inicial maior que o punção hemisférico, provoca um menor nível de tensões no início do processo, distribuindo as deformações de modo mais uniforme (Figura 41) (FOLLE *et al.*, 2008).

O pesquisador Henning descreveu no ano de 1997 que embora Nakajima em 1968, tenha utilizado punção Hemisférico de 100 mm de diâmetro, a utilização de um punção com diâmetro de 50mm não acarretaria erros no ensaio por ser uma questão de semelhança geométrica (NETTO, 2004).

Figura 41 – Matriz para o ensaio Nakajima Modificado

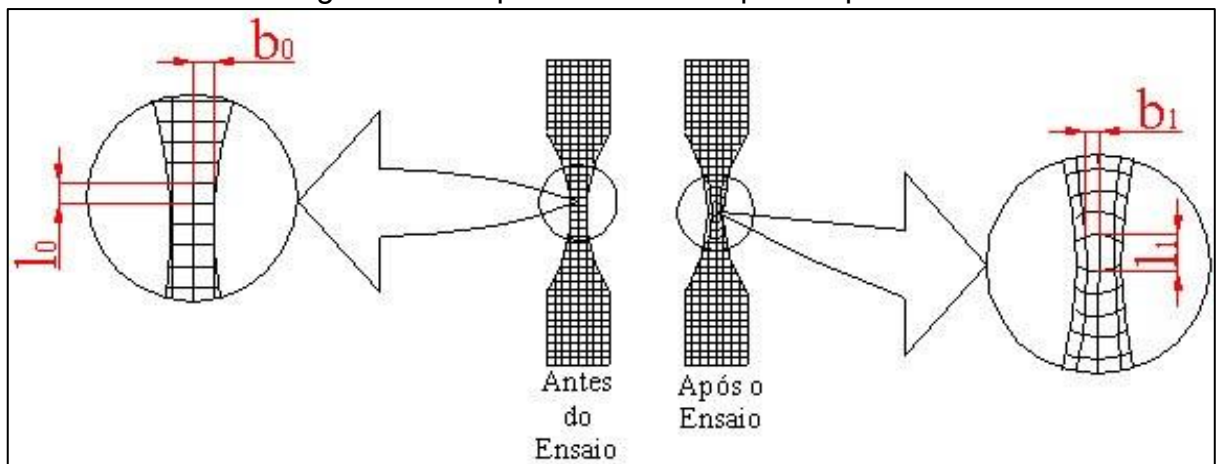


Fonte: Netto (2004).

2.14 Visioplaticidade

A visioplaticidade é o método de medir (Figura 42) deformações através da leitura de uma grade impressa na chapa com geometria conhecida, circular e/ou quadrada (NETTO, 2004).

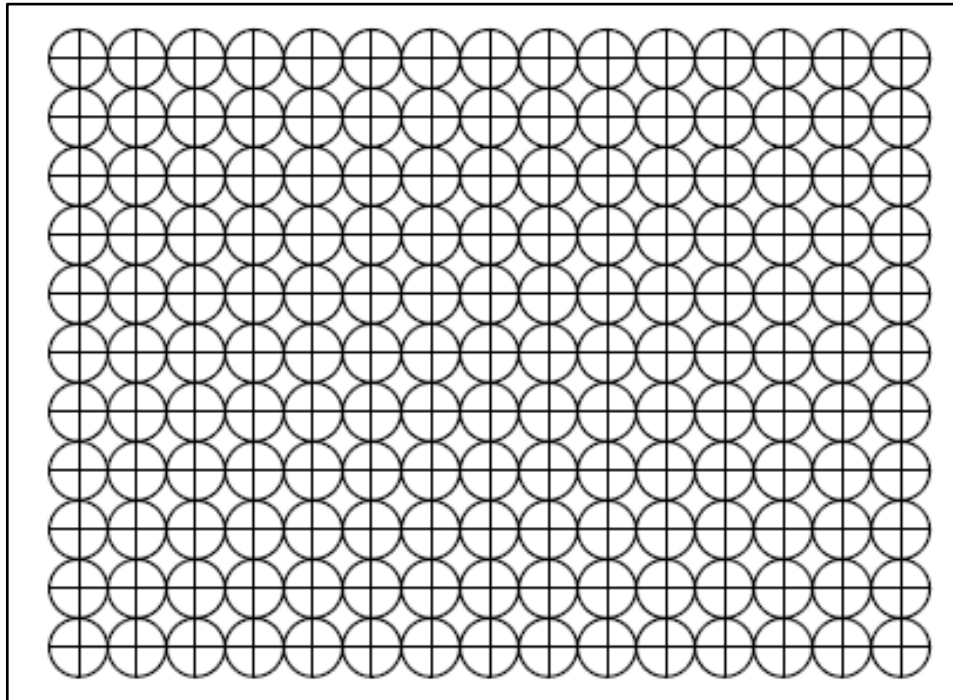
Figura 42 – Impressões nos corpos de prova



Fonte: Netto (2004).

A norma ISO 12004-1:2008 prevê a impressão de uma malha circular em regiões críticas da peça (Figura 43) (Lima, 2017).

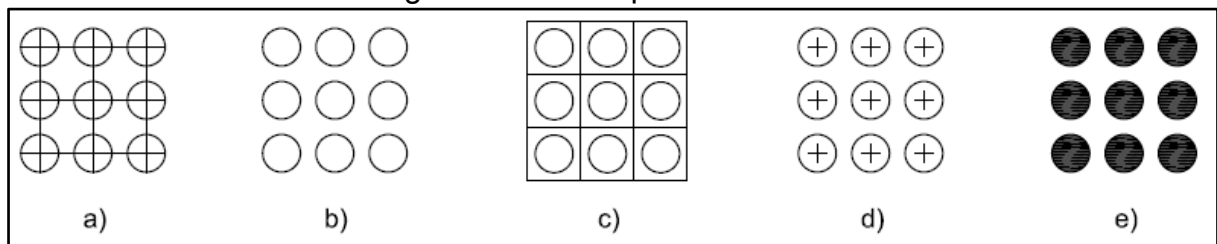
Figura 43 – Exemplo de uma impressão de malha nos corpos de prova



Fonte: ISO 12004-1 (2008).

A malha é gravada na chapa antes da estampagem, com círculos (Figura 44) de diâmetro entre 1,5 e 5mm (Lima, 2017).

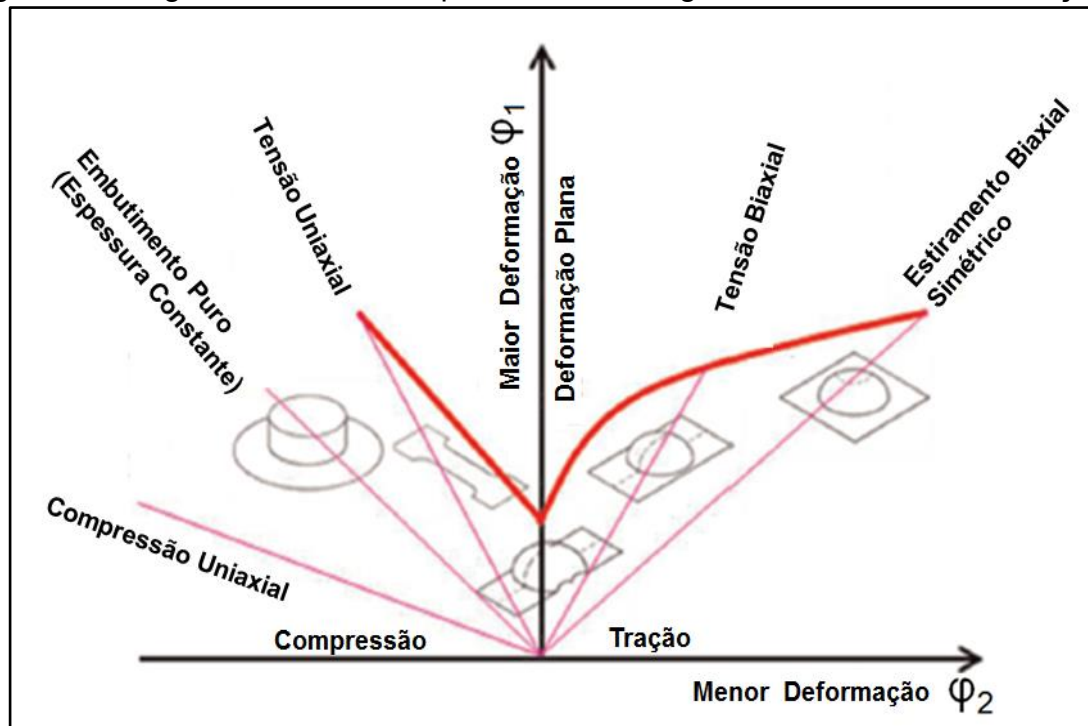
Figura 44 – Exemplo de Círculos



Fonte: ISO 12004-1 (2008).

Após a estampagem, as novas dimensões dos círculos são medidas e os dados plotados em um diagrama DLC (Diagrama Limite de Conformação (do inglês - Forming Limit Diagram (FLC))) (Figura 45), de maneira que os valores encontrados possam ser comparados com a CLC (Curva Limite de Conformação (do inglês - Forming Limit Curve (FLC))) e a curva de segurança, garantindo assim que modificações sejam feitas até que uma condição de boa estampabilidade possa ser assegurada (Lima, 2017).

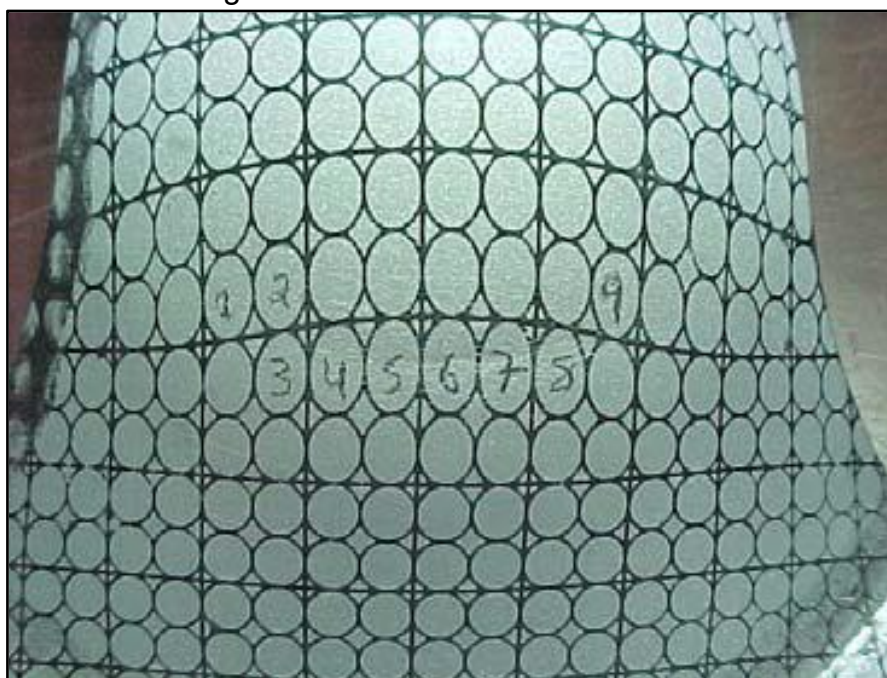
Figura 45 – Figura do Gráfico Esquemático do Diagrama Limite de Conformação



Fonte: Paul (2013).

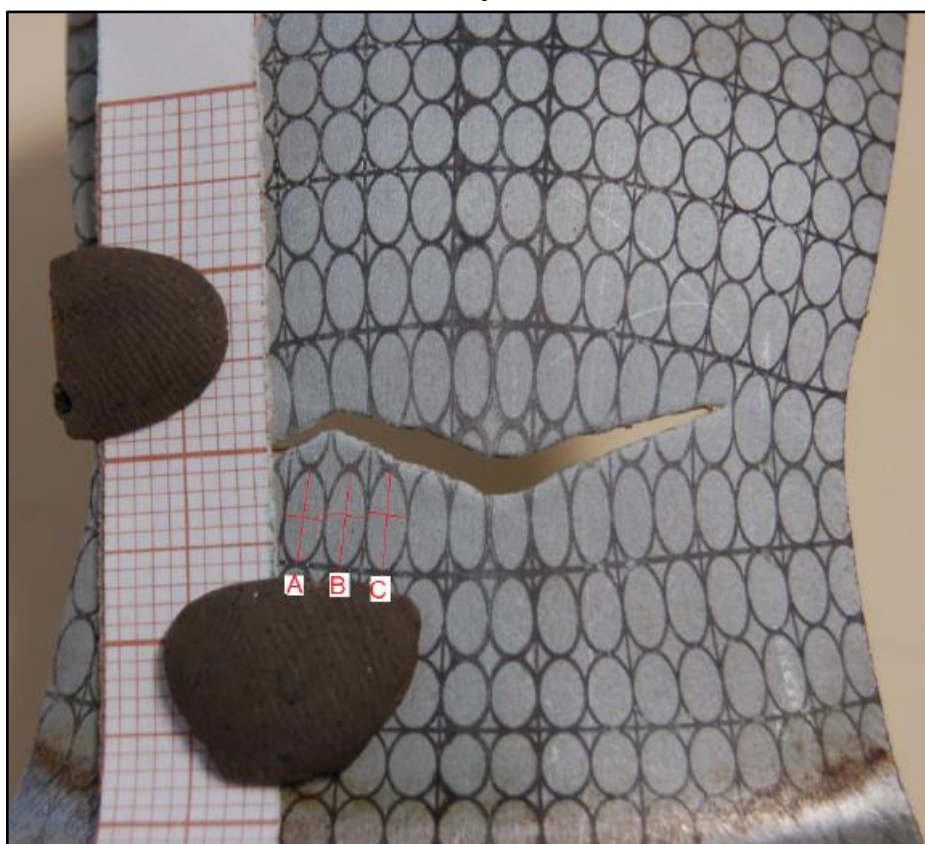
Após o processo de estampagem, os corpos de prova, que possuíam uma malha de círculos uniforme se deformaram até o instante de ruptura. É possível visualizar a deformação sofrida pelo material através do formato diferenciado dos círculos impressos na chapa (Figura 46 e 47) (CHEMIN FILHO, 2004).

Figura 46 – Círculos deformados



Fonte: Chemin Filho (2004).

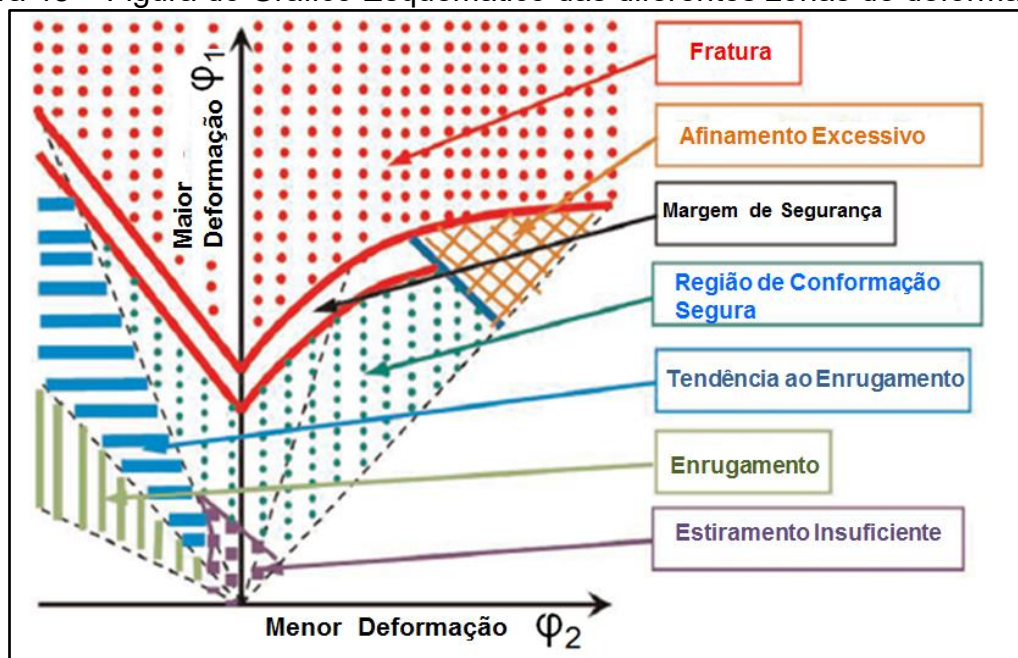
Figura 47 – Medição dos diâmetros dos círculos deformados nos corpos-de-prova do ensaio Nakajima



Fonte: Bastos (2009).

A Figura 48 mostra os detalhes das diferentes zonas de um Diagrama Limite de Conformação, construídas a partir da Curva Limite de Conformação (Paul, 2013).

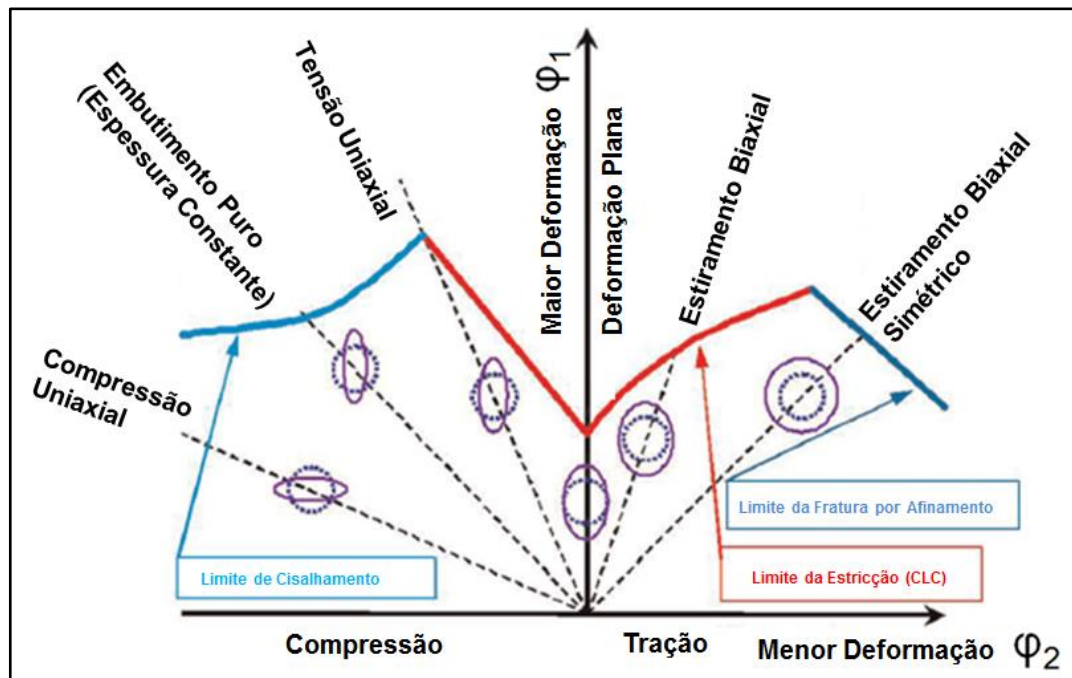
Figura 48 – Figura do Gráfico Esquemático das diferentes zonas de deformação



Fonte: Paul (2013).

Durante o ensaio, a malha de círculos apresenta diversos comportamentos na geometria deformada como se pode visualizar na Figura 49, o que faz a curva CLC acompanhar estes comportamentos (PAUL, 2013).

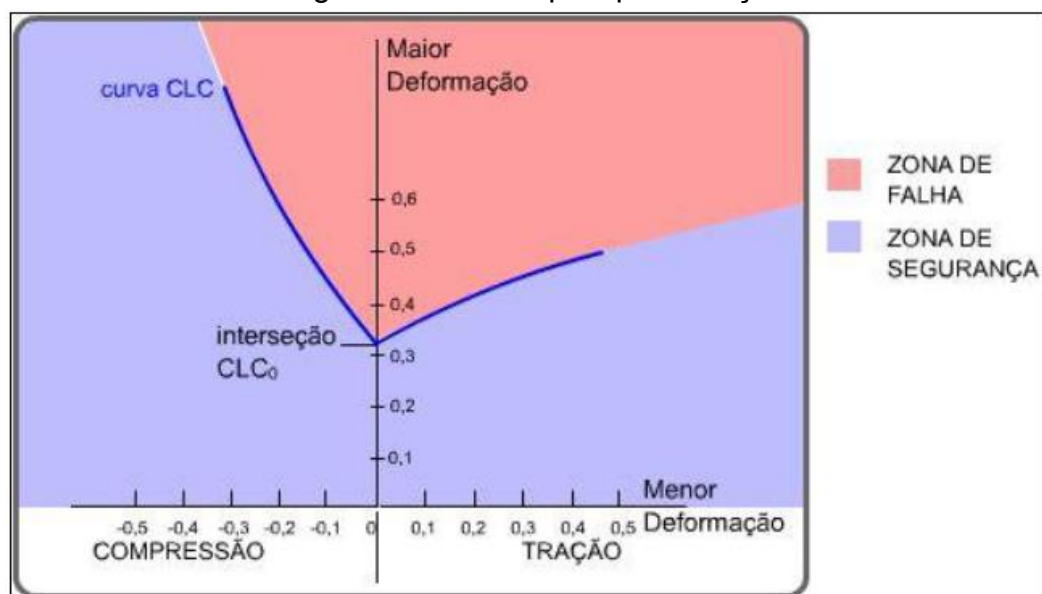
Figura 49 – Figura do Gráfico Esquemático do Comportamento da Curva e dos Círculos



Fonte: Paul (2013).

A geometria das ferramentas, forma do corpo de prova, lubrificante, qualidade do material e sistemática de aquisição dos dados, também são fatores a serem ponderados para a determinação da CLC. Uma curva CLC típica para o Aço pode ser vista na Figura 50 (SCHAEFFER, 2004).

Figura 50 – CLC típica para o Aço

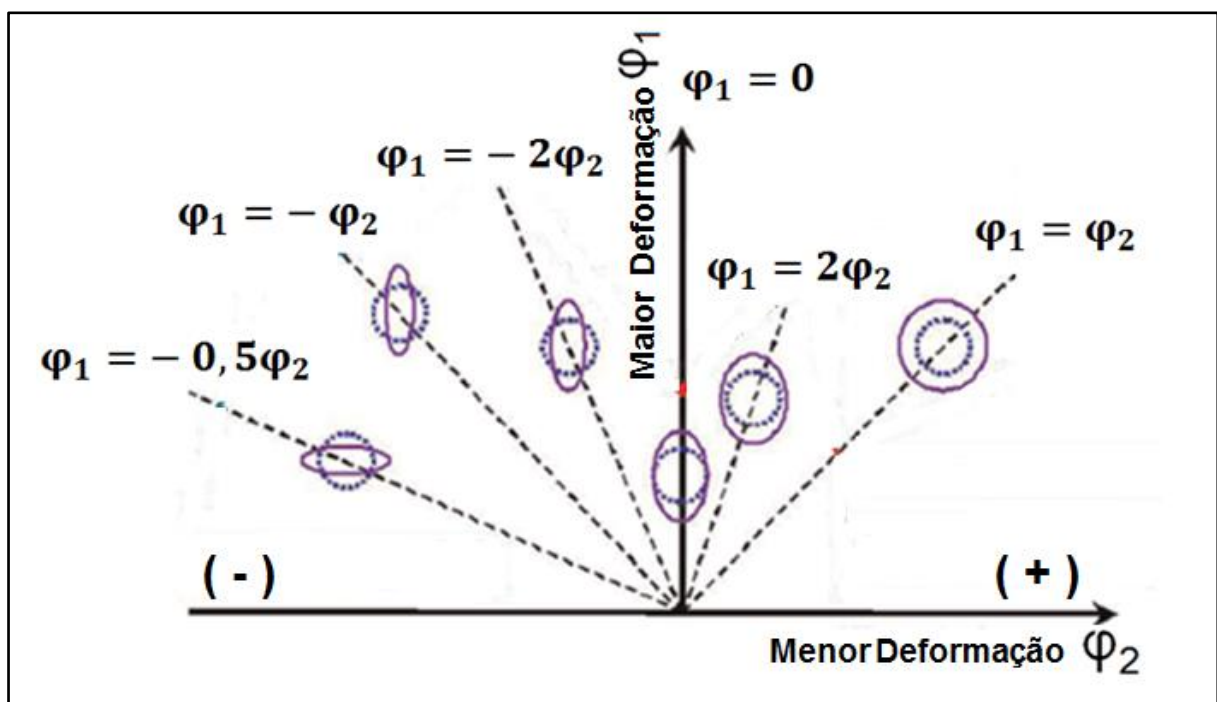


Fonte: Cimm (2017).

O diagrama limite de conformação é muito sensível a trajetórias de deformações não lineares. Assim, nessas situações, o diagrama não pode ser utilizado para prever se o processo de produção será bem ou mal-sucedido. A Curva Limite de Conformação descreve o caminho das deformações sofridas pelo material durante a estampagem, ou seja, é uma função que representa como a Deformação Principal φ_1 (Maior Deformação) varia com a Deformação φ_2 (Menor Deformação) (FOLLE *et al.*, 2008).

No processo de estampagem ocorrem diferentes combinações de deformações principais $\varphi_1 \times \varphi_2$ (NETTO, 2004). O Diagrama Limite de Conformação (Figura 51) apresenta os tipos e as classificações de deformações sofridas pela malha circular impressa na chapa (CHEMIN FILHO, 2004).

Figura 51 – Classificações das Deformações - $\varphi_1 \times \varphi_2$



Fonte: Paul (2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As pesquisas deste trabalho terão como base o Aço Hardox® 450, onde este Aço será submetido a testes de estampagem a frio para verificar o seu limite de conformação.

3.1 MICROESTRUTURA

A averiguação da microestrutura do Aço Hardox® 450 aconteceu no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), utilizando o microscópio olympus GX51 (Figura 52).

Figura 52 – Microscópio Olympus GX51 – Análise da Microestrutura do Aço Hardox® 450



A avaliação foi realizada utilizando uma amostra de Aço Hardox® 450, que passou os procedimentos de lixação e polimento e após a conclusão destes foi aplicado o Nital 0,2% na superfície polida da mesma.

3.2 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de microdureza foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), onde se averiguou a microdureza em Vickers, utilizando o Durômetro ISH-TDV1000 (Figura 53).

Figura 53 –Durômetro Insize ISH-TDV1000 - Análise de Dureza do Aço Hardox® 450



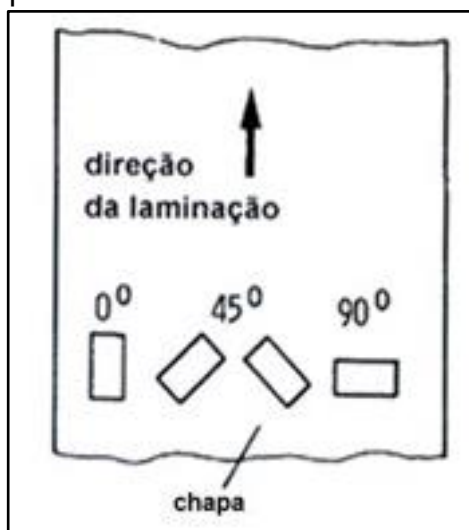
O ensaio foi executado utilizando uma amostra do material e aplicando uma carga de 500g durante 10 segundos, no qual o resultado obtido foi de 458 Vickers.

3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio de tração é o mais utilizado para a averiguação da Curva de Escoamento e da curva Engenharia.

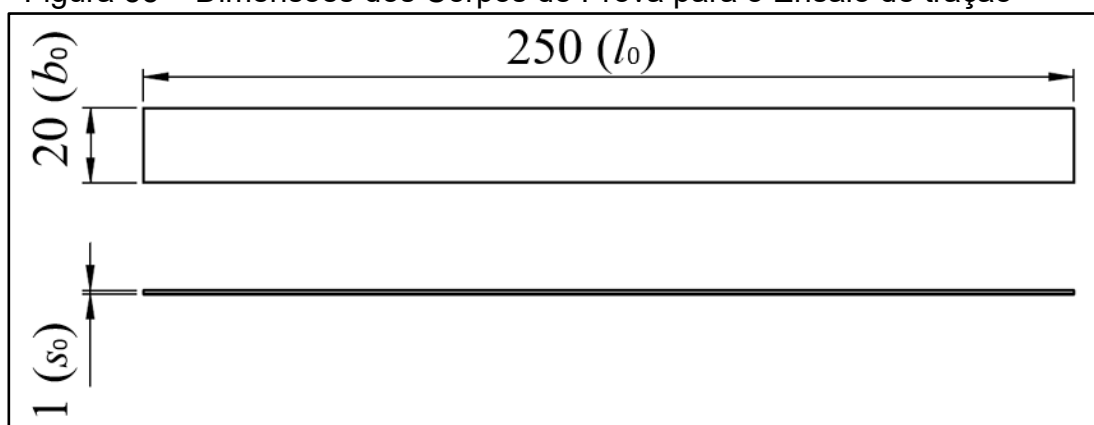
Os testes se iniciaram a partir da confecção dos corpos de prova, observando as três direções (0°, 45° e 90°) em relação ao sentido de laminação como pode-se visualizar na Figura 54.

Figura 54 – Corpos de Prova – Dimensões – Ensaio de tração



A norma ASTM E517-00 (2010) foi o referencial para o dimensionamento dos corpos de prova (Figura 55) utilizados no ensaio.

Figura 55 – Dimensões dos Corpos de Prova para o Ensaio de tração



O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (EMIC DL60000) (Figura 56) com capacidade de 60 kN, conectada a um computador que coletou as leituras de tempo, Deslocamento Instantâneo (δl) até atingir o Deslocamento Absoluto (ΔD) (ruptura do corpo de prova) (que também pode ser definido como Alongamento Total (Δl)) e Força (F) de cada experimento a uma velocidade de 5mm/min.

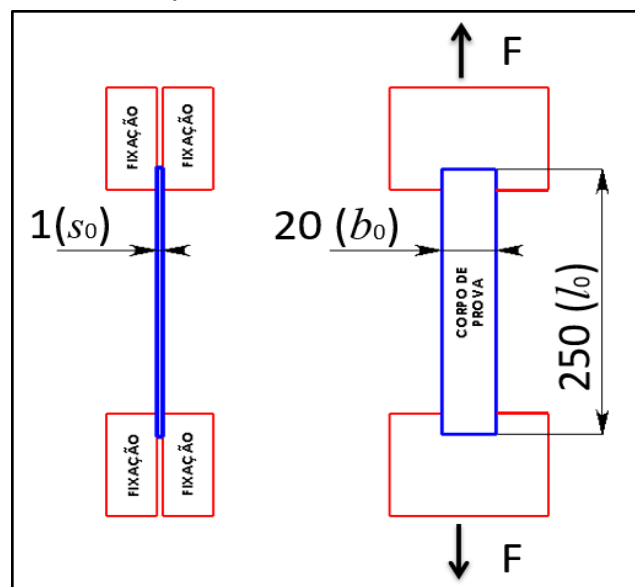
Figura 56 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos



Cada corpo de prova foi fixado ao conjunto de garras do equipamento (Figura 57), onde sofreram um processo de estiramento uniaxial, onde, conforme as orientações normativas cada corpo de prova deve ser o estiramento até seu rompimento total.

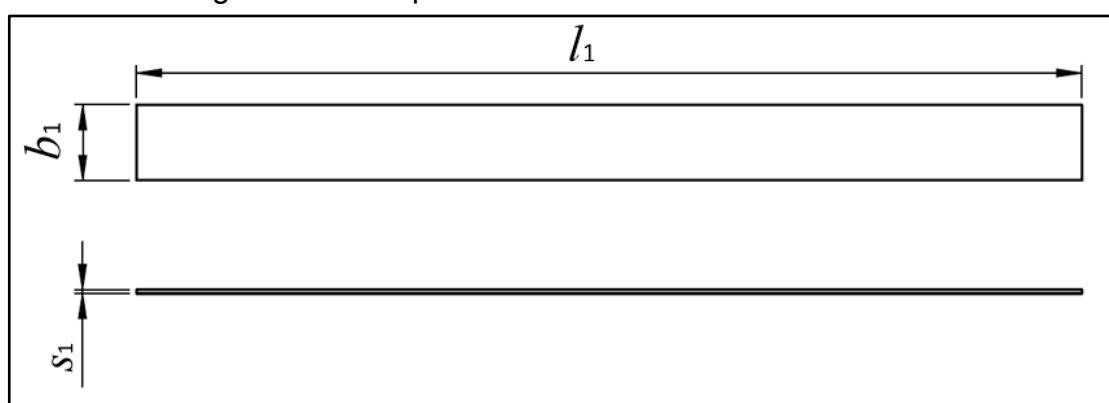
O ensaio foi realizado com a utilização de três corpos de prova confeccionados nas direções de 0° , 45° e 90° . O extensômetro não foi utilizado, pois o mesmo estava inoperante.

Figura 57 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos



Após a finalização dos ensaios, foram coletadas as dimensões l_1 , b_1 e s_1 (Figura 58) de cada corpo de prova nas três direções confeccionadas (0° , 45° e 90°) com o auxílio de um paquímetro. As leituras das dimensões l_1 coletadas com o auxílio de um paquímetro foram analisadas e comparadas com os dados de Deslocamento Absoluto (ΔD) gerados pelo computador conectado a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos onde se pode constatar que os resultados foram semelhantes o que não acarreta nenhum prejuízo para os resultados a serem analisados.

Figura 58 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos



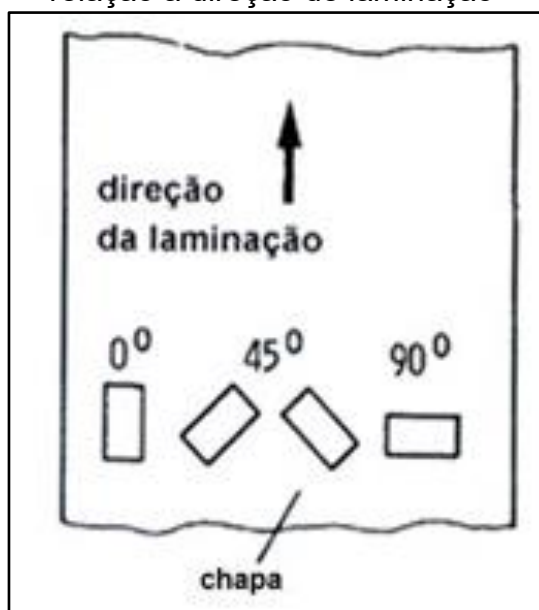
Na realização dos ensaios foi possível verificar que todos os corpos de prova romperam para uma deformação com menos de 1% de deformação plástica devido à alta resistência.

Com a coleta de informações dimensionais (l_1 , b_1 e s_1), foi possível realizar os cálculos direcionados as curvas de Escoamento e as curvas Engenharia (nas direções 0° , 45° e 90°) e posteriormente confeccionados os gráficos.

3.4 ANÁLISE DA ANISOTROPIA

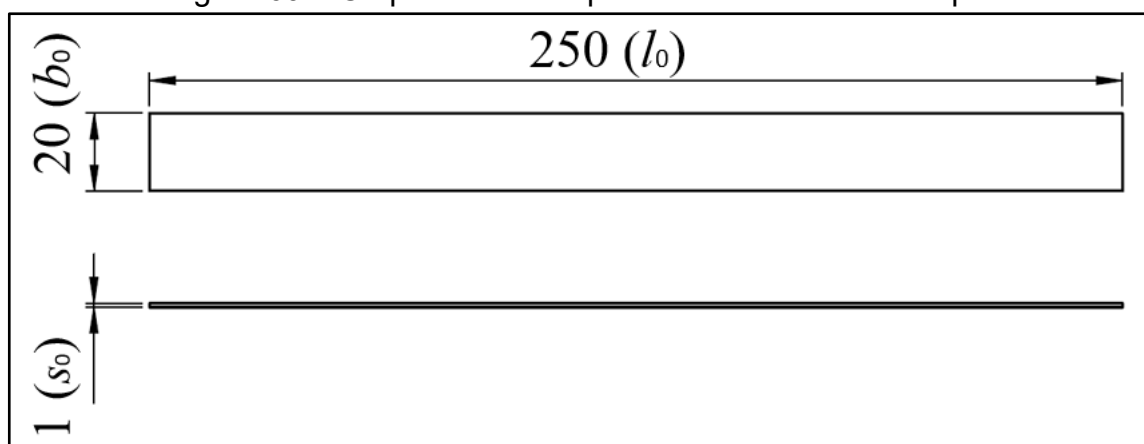
Para a realização do ensaio, utilizou-se a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (EMIC DL60000) para averiguar a anisotropia do Aço Hardox® 450, onde os corpos de prova utilizados foram confeccionados observando as três direções (0° , 45° e 90°) em relação ao sentido de laminação como pode-se visualizar na Figura 59. O ensaio foi realizado com a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos conectada a um computador que coletou as leituras de tempo, Deslocamento Absoluto (ΔD) e Força (F) de cada experimento a uma velocidade de 5mm/min.

Figura 59 – Corpos de Prova Confeccionados nas direções de 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação



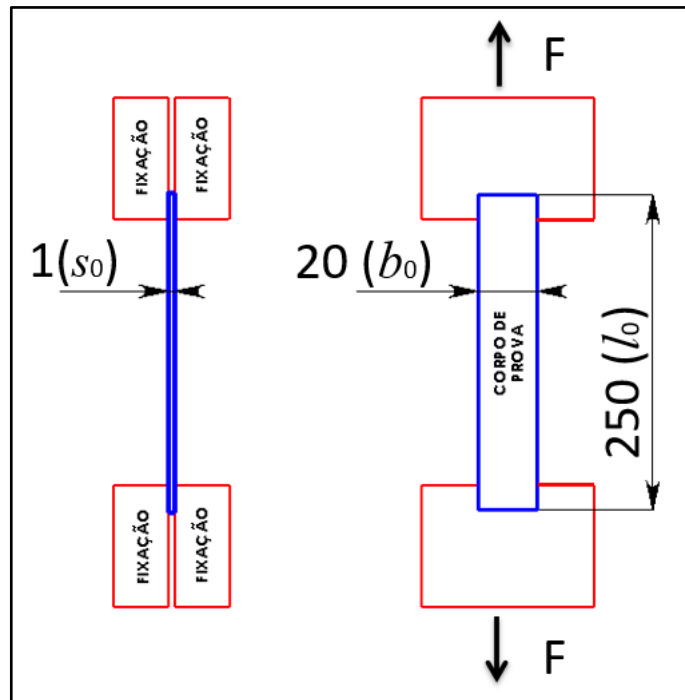
Os corpos de prova (Figura 60) utilizados no ensaio atendem as orientações dimensionais da norma ASTM E517-00 (2010).

Figura 60 – Corpos de Prova para a analisar a Anisotropia



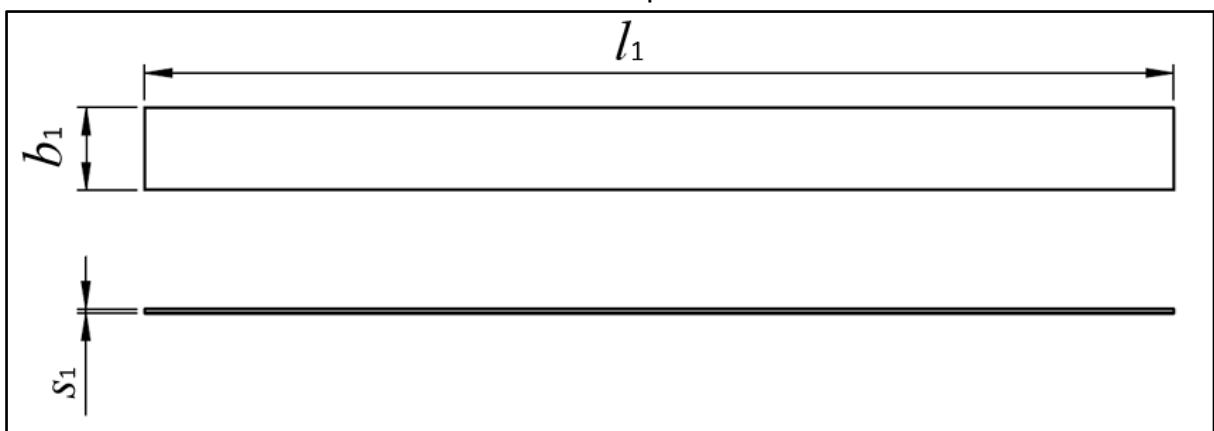
Cada corpo de prova foi fixado ao conjunto de garras do equipamento (Figura 61), onde sofreram um processo de estiramento uniaxial. Para a realização deste ensaio foram utilizados três corpos de prova confeccionados de cada umas das direções 0° , 45° e 90° , no qual, segundo as orientações normativas os mesmos devem sofrer uma deformação plástica de 15% na direção longitudinal. O extensômetro não foi utilizado, pois o mesmo estava inoperante.

Figura 61 – Corpos de Prova - Anisotropia



Após a finalização do ensaio, as dimensões l_1 , b_1 e s_1 (Figura 62) foram coletadas com o auxílio de um paquímetro. A leituras das dimensões l_1 foram analisadas e comparadas com os dados de Deslocamento Absoluto (ΔD) gerados pelo computador conectado a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos e pode-se constatar que os resultados foram semelhantes o que não acarreta nenhum prejuízo para os resultados a serem analisados.

Figura 62 – Dimensões verificadas nos Corpos de Prova utilizados para analisar a Anisotropia



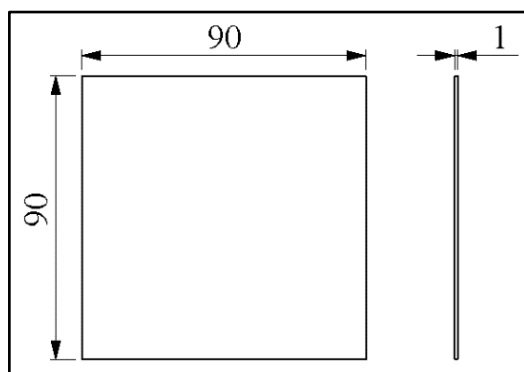
Observou-se que todos os corpos de prova romperam para uma deformação com menos de 1% de deformação plástica. De posse das informações dimensionais (l_1 , b_1 e s_1), os cálculos dos índices de anisotropia (nas direções 0°, 45° e 90°) e anisotropia média foram realizados a partir das equações 11, 12 e 13 e posteriormente avaliados os resultados.

3.5 ENSAIO ERICHSEN

Conforme NBR 16281(2014), para a realização do ensaio Erichsen é necessária aplicar uma carga de fixação do corpo de prova entre a matriz e o anel de fixação que deve ser de 1000kgf. Sendo que a velocidade de deformação do corpo de prova deve ser realizada sem choques e vibrações, com velocidade de penetração entre 5 mm/min e 20 mm/min. Para o ensaio Erichsen, utiliza-se a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (EMIC DL60000) (Figura 47) a uma velocidade de 5mm/min.

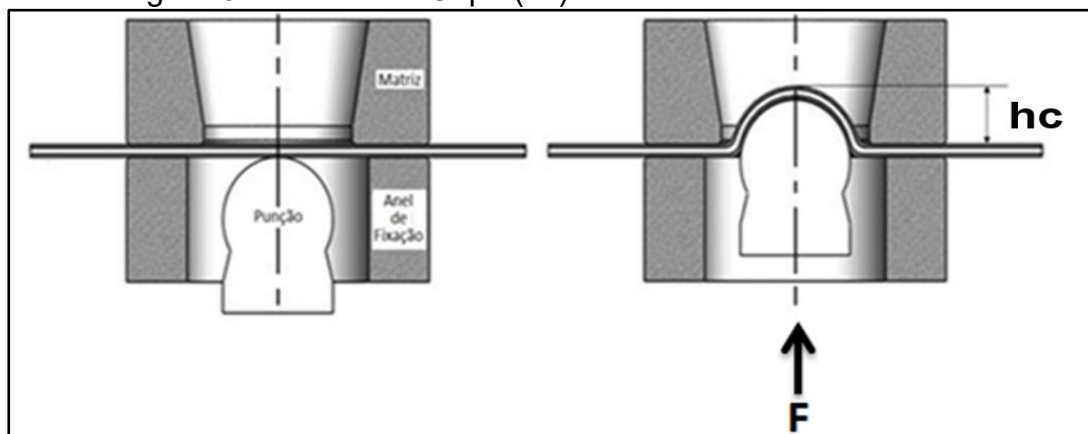
Os corpos de prova (Figura 63) utilizados no ensaio seguem as orientações dimensionais (90mm X 90mm) da NBR 16281(2014).

Figura 63 – Corpos de Prova utilizados a partir da Chapa do Aço Hardox® 450 - Ensaio Ericksen



Com o ensaio realizado, mede-se a máxima altura alcançada (h_c) até a fratura do corpo de prova conforme a Figura 64.

Figura 64 – Altura do Copo (h_c) obtido no Ensaio Ericksen



Para a realização deste ensaio foram utilizados três corpos de prova, apresentando assim a média dos resultados (altura do copo (h_c)) coletados.

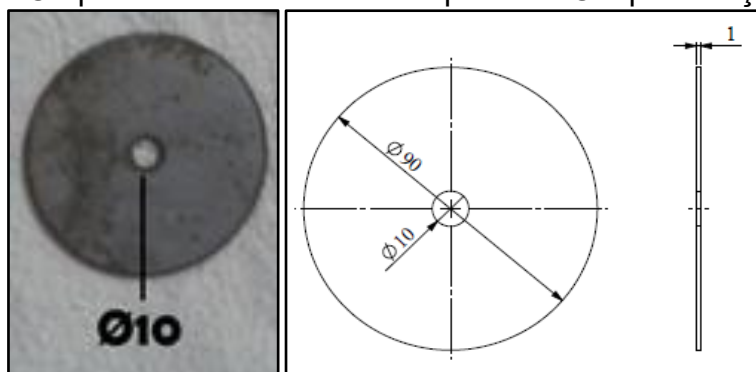
Todas as informações referentes à força (F) e Deslocamento Absoluto (ΔD) foram coletados a partir do auxílio computacional presente na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos.

3.6 ENSAIO DE EXPANSÃO DE FUROS

O ensaio de Expansão de Furo foi realizado com o auxílio de Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (EMIC DL60000) (Figura 30) com capacidade de 60 kN, conectada a um computador que coletou as leituras de tempo, Deslocamento Absoluto (ΔD) e Força (F) de cada experimento a uma velocidade de 5mm/min.

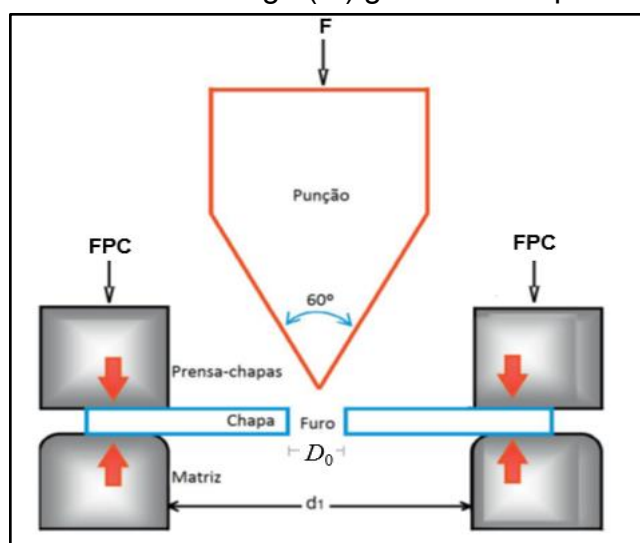
Para a realização do ensaio de expansão de furo foi usado o mesmo ferramental utilizado no ensaio Ericksen. Os corpos de prova (Figura 65) utilizados no ensaio seguem as orientações dimensionais da norma ISO 16630 (2009), e os mesmos foram confeccionados utilizando o processo de corte por jato d'água.

Figura 65 – Corpos de Prova utilizados a partir da Chapa do Aço Hardox® 450



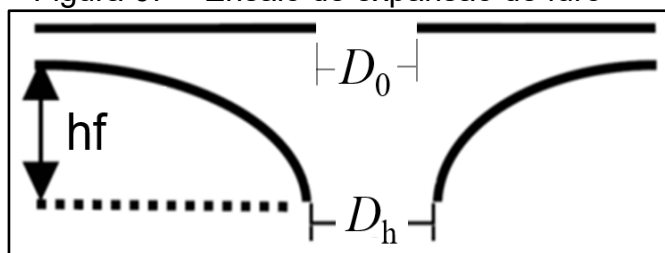
Com o ensaio realizado, mede-se o diâmetro final alcançado (d), onde o ensaio é finalizado no momento o punção gera um pequeno rasgo no furo expandido (Figura 66 e 67).

Figura 66 – Altura do Flange (h_f) gerado no Expansão de furo



Fonte: Thesing (2018).

Figura 67 – Ensaio de expansão de furo



Fonte: Thesing (2018).

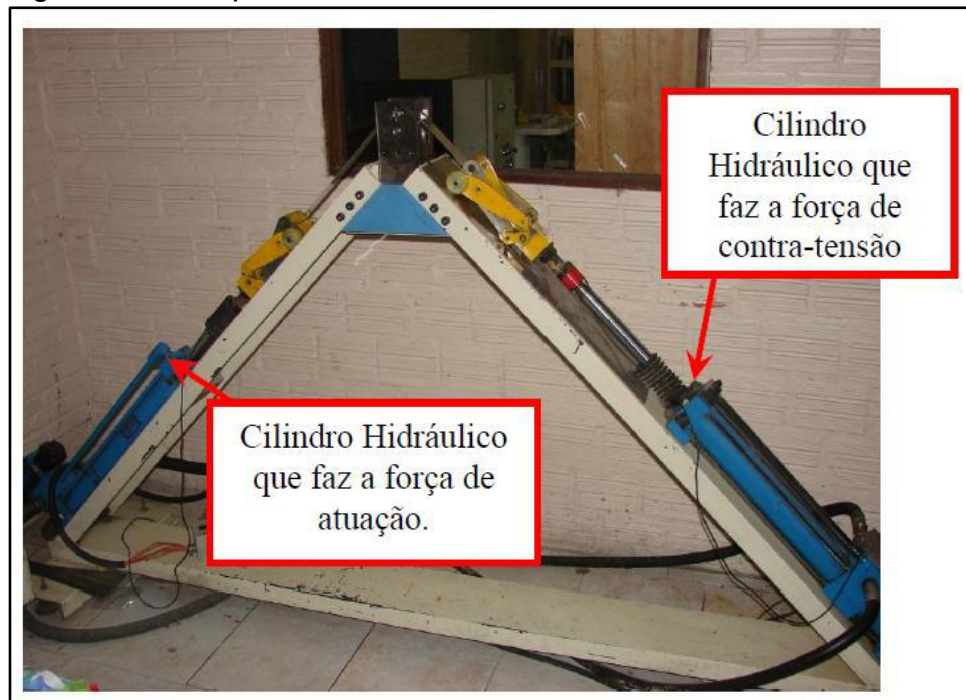
Para a realização deste ensaio foram utilizados três corpos de prova, apresentando assim a média dos resultados calculados com o auxílio da equação 13.

Todas as informações referentes a Força (F) e deslocamento foram coletados a partir do auxílio computacional presente na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos e o ensaio foi realizado sem o uso de lubrificantes.

3.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO

O ensaio de Dobramento Sob Tensão é recomendado para a verificação do atrito em chapas. Para este ensaio utiliza-se a máquina de dobramento sob tensão (Figuras 68 e 69).

Figura 68 – Máquina Usada no Ensaio de Dobramento Sob Tensão



Fonte: Folle (2012).

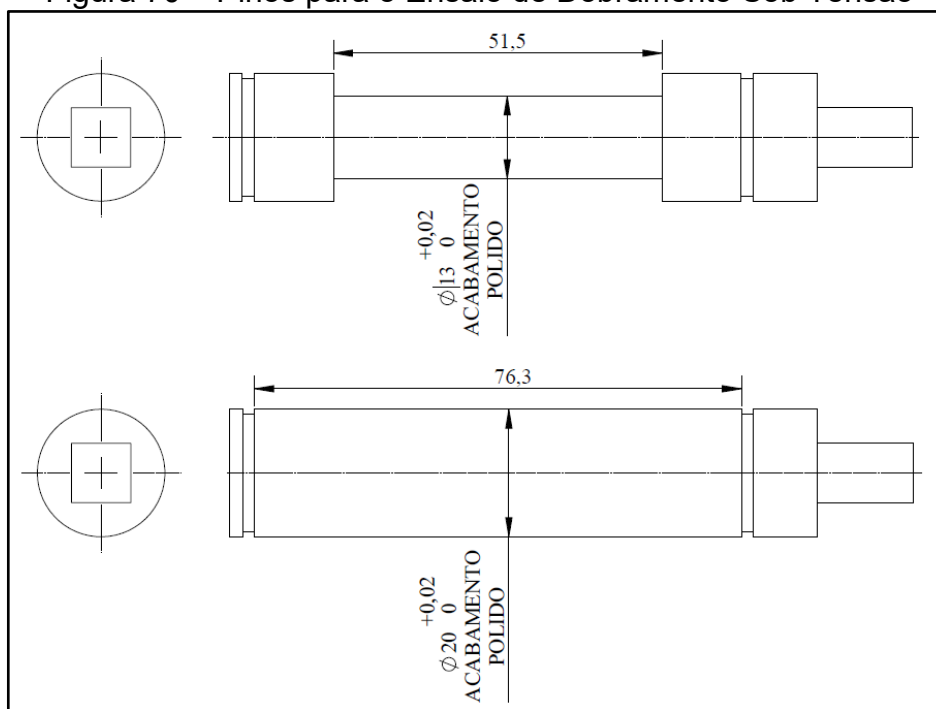
Figura 69 – Componentes da Máquina para o Ensaio de Dobramento Sob Tensão



Fonte: Folle (2012).

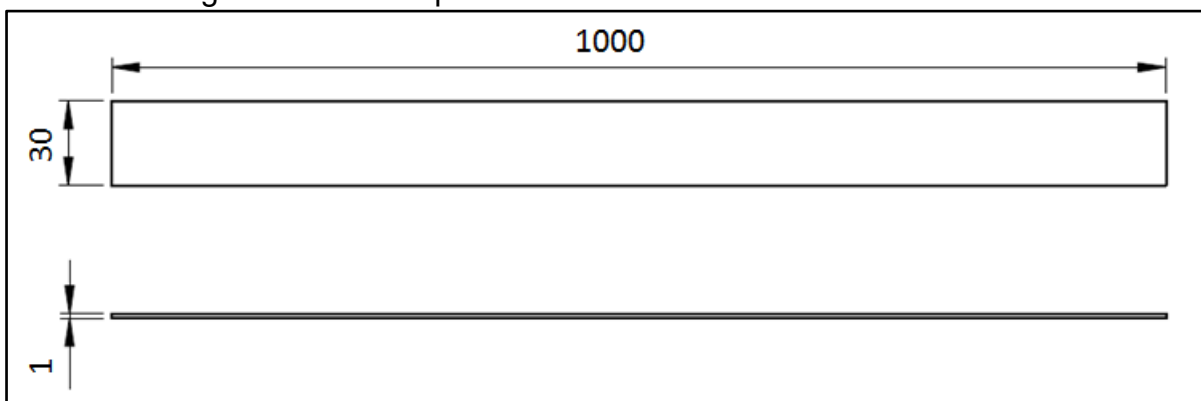
Através de um software são coletados dados de torque, força de atuação dos dois cilindros e através da célula de carga posicionada sob o suporte do pino, a força normal. Os pinos utilizados foram construídos utilizando o Aço ferramenta AISI D6, e sofreram tratamento térmico de tempera e revenimento, onde a dureza solicitada foi de 62HRC, e o acabamento polido. Os pinos (Figura 40) foram construídos nos diâmetros de 20mm e 13mm.

Figura 70 – Pinos para o Ensaio de Dobramento Sob Tensão



Os corpos de prova foram confeccionados conforme a Figura 71.

Figura 71 – Pinos para o Ensaio de Dobramento Sob Tensão



Assim, de posse dos dados gerados pelo equipamento pode-se calcular o coeficiente de atrito em razão do tempo através da equação 09.

3.8 ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES

O ensaio dos Múltiplos Punções (também conhecido por ensaio dos Cinco Punções) foi realizado nas dependências de uma empresa com sede na cidade de Farroupilha onde o equipamento utilizado para o ensaio foi uma prensa utilizada na estampagem de chapas (Figura 72) com capacidade de 3000 kN (Figura 73), velocidade de 0 à 81mm/s capacidade de força no prensa chapas de 1500 kN. As leituras necessárias para o ensaio foram coletadas no painel computacional (Figura 74), do equipamento.

Figura 72 – Máquina utilizada no ensaio de Múltiplos Punções



Figura 73 – Capacidade de carga da Máquina utilizada no ensaio de Múltiplos Punções



Figura 74 – Painel Computacional da Máquina utilizada no ensaio de Múltiplos Punções

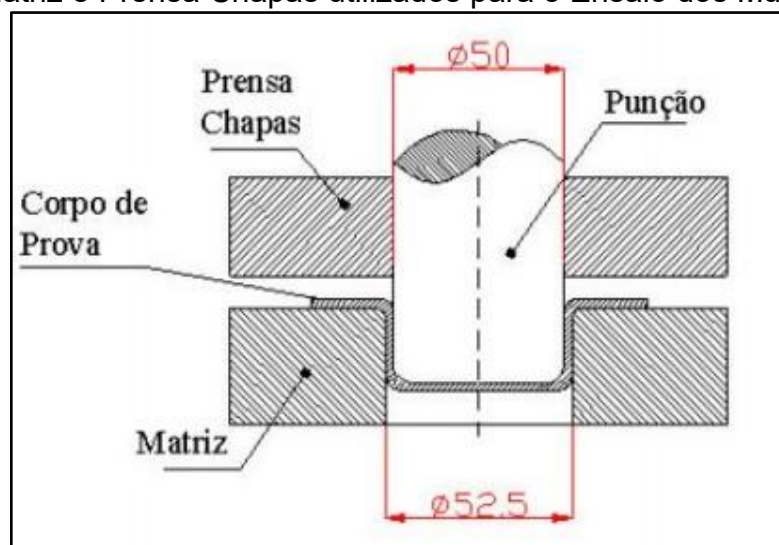


Para a realização ensaio dos Múltiplos Punções foi utilizado a Matriz e o Prensa Chapas apresentado nas Figuras 75 e 76.

Figura 75 – Matriz e Prensa Chapas para o Ensaio dos Múltiplos Punções



Figura 76 – Matriz e Prensa Chapas utilizados para o Ensaio dos Múltiplos Punções



Fonte: Netto (2004).

A realização do ensaio de Múltiplos Punções fixação da matriz somente foi possível a partir de uma adaptação em um porta ferramental que foi fixado na prensa com capacidade de 3000 kN (Figura 77).

Figura 77 – Fixação da Matriz e Prensa Chapas no Porta Ferramental– Ensaio Múltiplos Punções



Para a realização ensaio de Múltiplos Punções foram utilizados os Cinco Punções com diâmetro de 50mm e variação geométrica em uma das extremidades de cada punção, como pode-se visualizar na Figura 78.

Figura 78 – Punções utilizados no ensaio de Múltiplos Punções



Os Corpos de prova (Figura 79) utilizados no ensaio foram confeccionados utilizando o processo de corte por jato d'água. Para a realização do ensaio foi solicitada a confecção de 9 diâmetros (80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120mm) diferentes para os corpos de prova. Devido à dispersão dos resultados, recomenda-se que três corpos de prova sejam ensaiados, apresentando assim a média dos resultados calculados com o auxílio da equação 10.

Figura 79 – Corpos de prova para o ensaio de Múltiplos Punções



Devido as condições do Aço Hardox® 450, não foi possível realizar os ensaios com os corpos de prova nos diâmetros de 110, 115 e 120mm em nenhuma das

geometrias dos punções. Nos corpos de prova utilizados, o ensaio aconteceu com o uso do lubrificante.

3.9 ENSAIO NAKAJIMA MODIFICADO

O ensaio Nakajima Modificado (assim como ocorreu no ensaio dos Múltiplos Punções) foi realizado nas dependências de uma empresa com sede na cidade de Farroupilha onde o equipamento utilizado para o ensaio foi uma prensa utilizada na estampagem de chapas (Figura 72) com capacidade de 3000 kN (Figura 73), velocidade de 0 à 81mm/s capacidade de força no prensa chapas de 1500 kN. As leituras necessárias para o ensaio foram coletadas no painel computacional (Figura 74), do equipamento.

Para a realização do ensaio Nakajima Modificado foi utilizado a mesma Matriz e Prensa Chapas empregado nos ensaios realizados nas dependências da UFRGS (Figura 80).

Figura 80 – Fixação da Matriz e Prensa Chapas no Porta Ferramental – Ensaio Nakajima Modificado

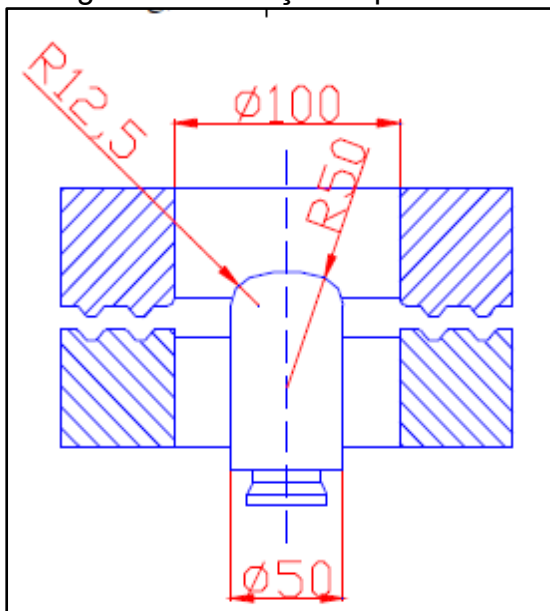


O corpo de prova é inserido e fixo na matriz onde, após esta primeira etapa do ensaio, o punção se desloca verticalmente exercendo um deslocamento no corpo de prova até a estricção do mesmo e assim finalizando o ensaio.

O punção utilizado no ensaio foi o punção na forma de Elipse Rasa no diâmetro de 50mm, onde conforme NETTO (2004), o pesquisador Henning (em 1997)

descreveu que embora Nakajima tenha utilizado punção Hemisférico de 100mm de diâmetro no ano de 1968, o punção com diâmetro de 50mm não acarretaria erros no ensaio por ser uma questão de semelhança geométrica (Figura 81).

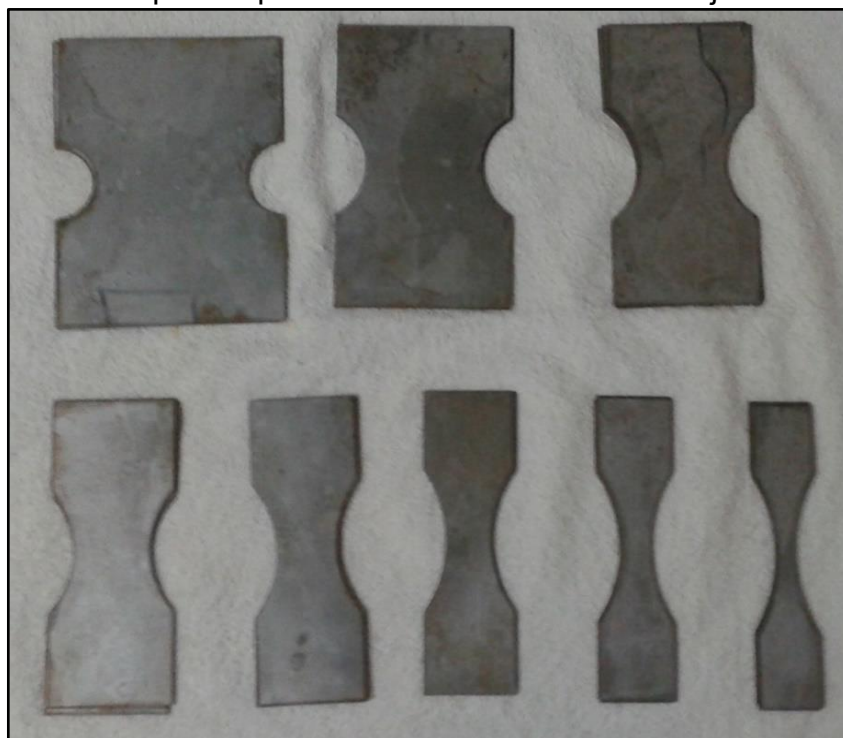
Figura 81 – Punção Elipse Rasa



Fonte: Netto (2004).

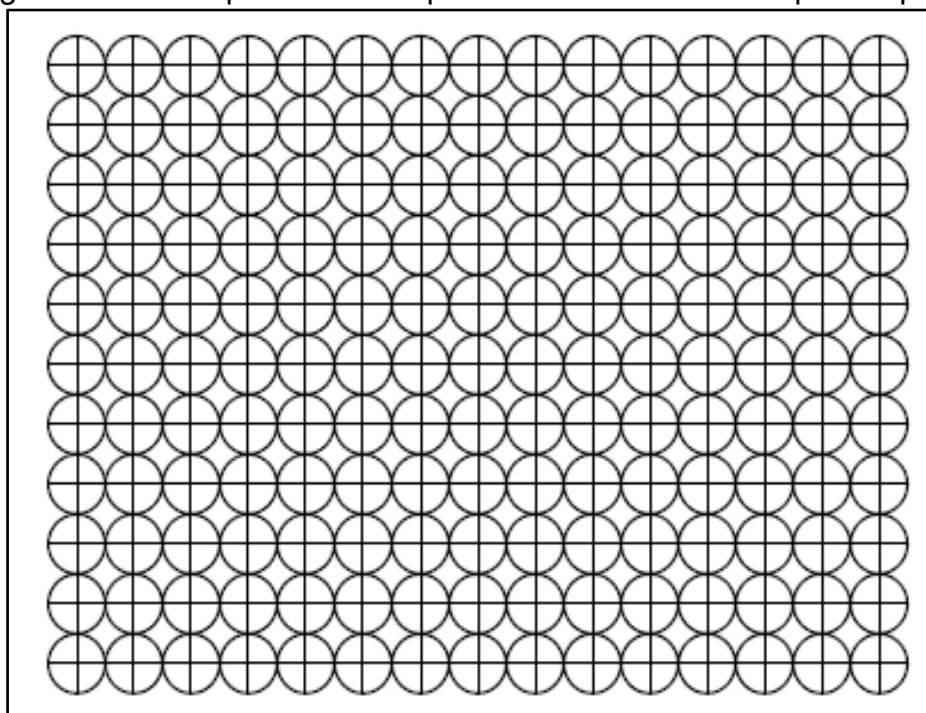
Os Corpos de prova (Figura 82) utilizados no ensaio foram devidamente marcados com a impressão de uma malha circular (o diâmetro dos círculos presentes na malha são de 2,5mm) (Figura 83) na região crítica dos mesmos através de um processo de marcação eletrolítica. Os mesmos foram confeccionados utilizando o processo de corte por jato d'água e extraídos a partir do sentido de laminação a 0°.

Figura 82 – Corpos de prova utilizados no ensaio Nakajima Modificado



Fonte: Elaborado pelo autor.

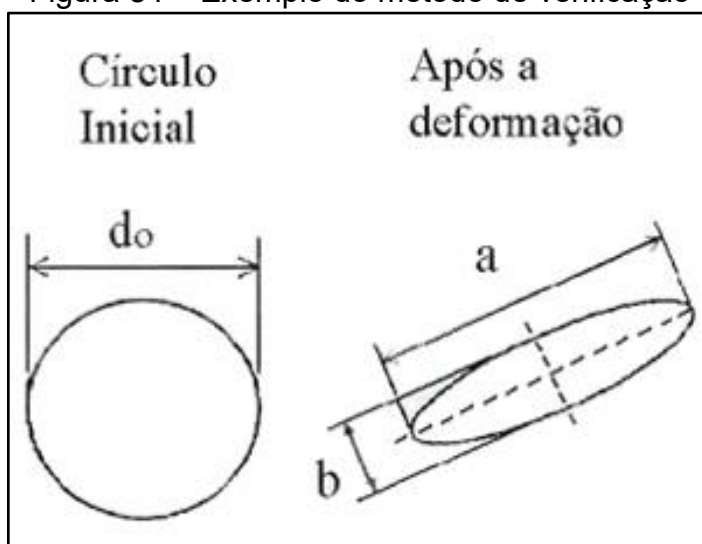
Figura 83 – Exemplo de uma impressão de malha nos corpos de prova



Fonte: ISO 12004-1 (2008).

Com o ensaio finalizado, os círculos presentes nos corpos de prova ensaiados são verificados com o auxílio de um paquímetro, e nessa verificação é realizada a avaliação do alongamento nas gerado nos círculos (Figura 84), onde os diâmetros iniciais são de 2,5mm.

Figura 84 – Exemplo do método de verificação



Fonte: Schaeffer (2004).

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 MICROESTRUTURA

A microestrutura avaliada a partir da amostra do Aço visualizada através do microscópio apresentou a matriz martensítica com grãos de austenita retida e perlita (Figuras 85 e 86).

Figura 85 – Microestrutura do Aço Hardox® 450 estudado – 20 μm

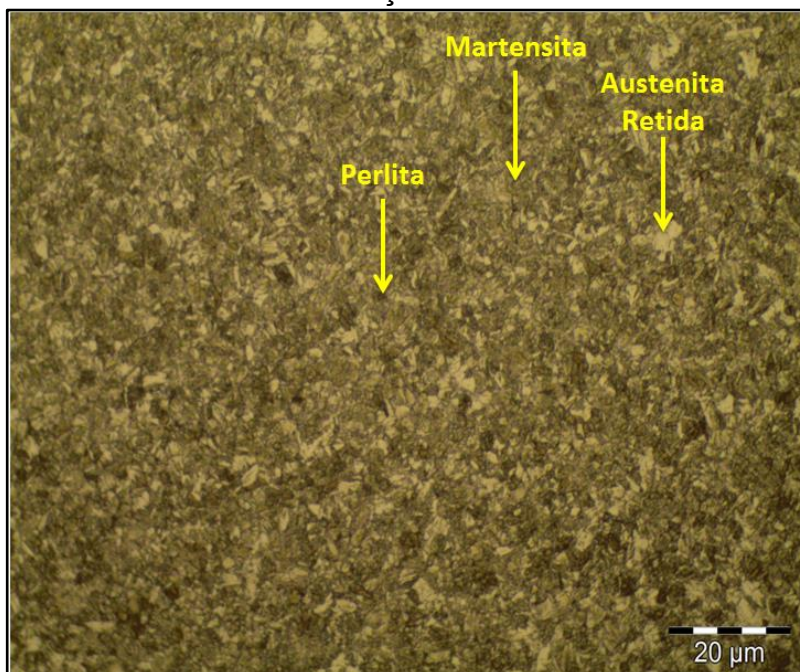
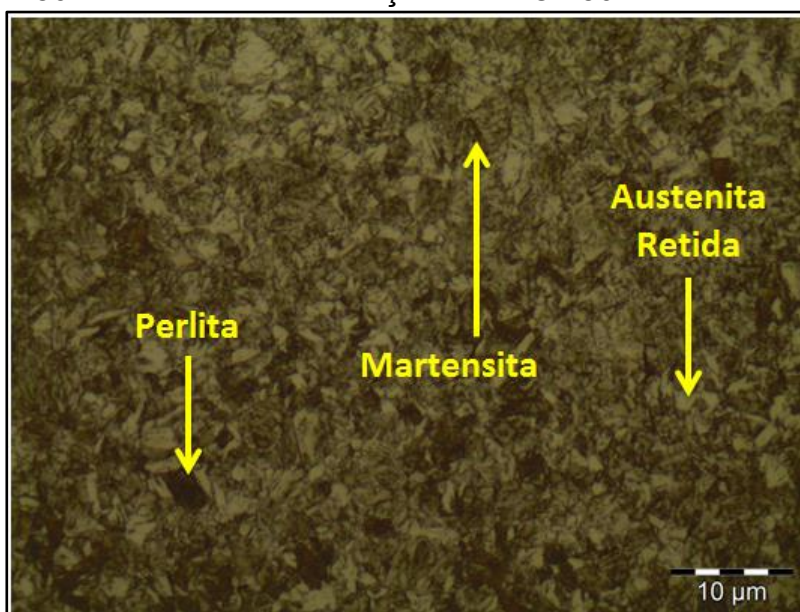


Figura 86 – Microestrutura do Aço Hardox® 450 estudado – 10 μm



Nas Figuras 85 e 86 se pode observar que o Aço Hardox® 450 é um Aço martensítico com menor presença de perlítica e austenítica. Essa característica é típica deste material, sendo que já foi citada e analisada por outros pesquisadores.

4.2 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza Vickers foi realizado para averiguar se as características da amostra estavam coerentes às informações apresentadas no catálogo da SSAB (Tabela 2), que indica que para o Aço Hardox® 450 a dureza deve estar entre 425 e 475 HBW (que representa a dureza em Brinell, onde a verificação ocorreu com a esfera de metal duro), sendo que resultado obtido foi de 458 Vickers (HV), o que equivale a aproximadamente a 429 HBW.

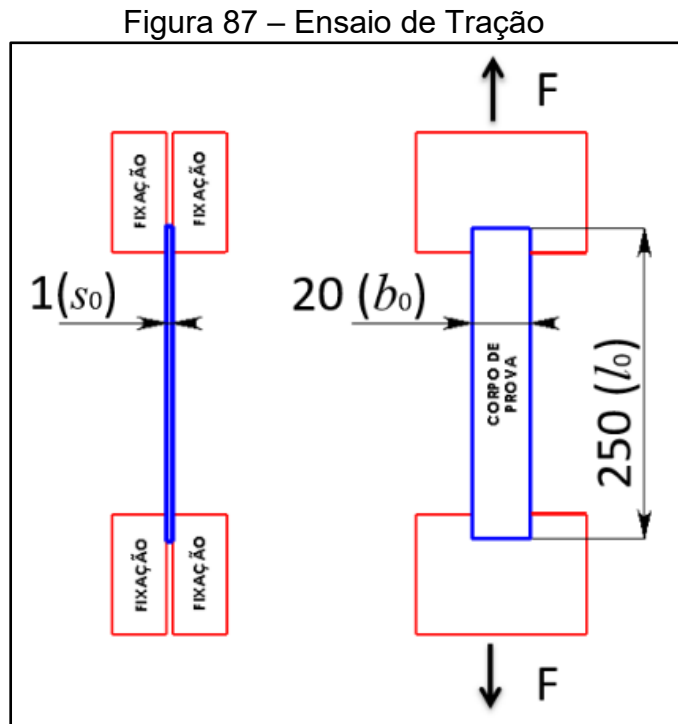
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS - HARDOX® 450

O ensaio de tração do material acontece a partir da fixação de um corpo de prova em um equipamento de tração, onde o mesmo sofre uma tensão uniaxial, até o rompimento do mesmo, e assim são gerados os gráficos e avaliados os resultados.

4.3.1 Força X Deslocamento

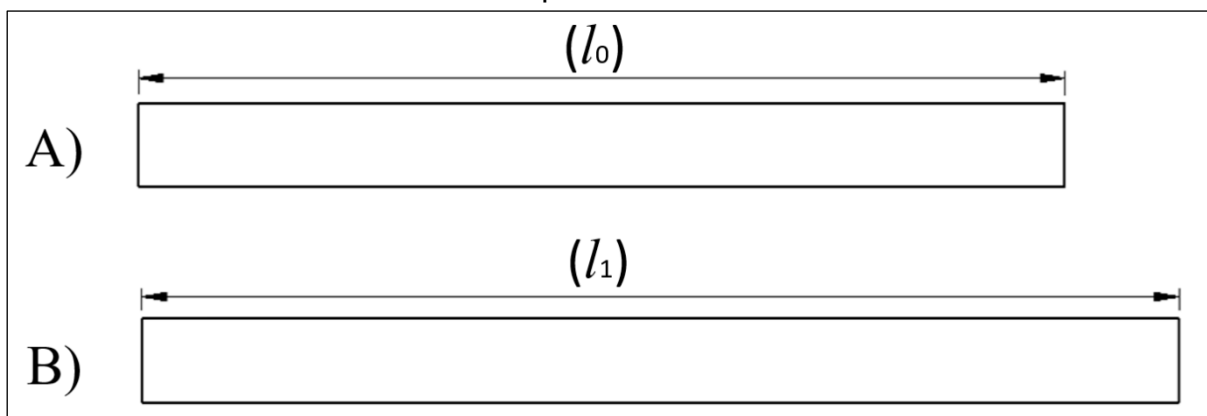
As curvas de Força (F) x Deslocamento Absoluto (ΔD) são geradas a partir dos dados de Força (F em N) e Deslocamento Absoluto (ΔD) (Alongamento Total (Δl em mm)) do Corpo de Prova até a Ruptura, onde estes são coletados durante o experimento, através de um software de aquisição de dados conectado ao equipamento durante o ensaio. O ensaio é paralisado após a ruptura total do corpo de prova ensaiado. Para a realização dos ensaios foram observados os sentidos de laminação (0° , 45° e 90°). Em cada uma das situações foram ensaiados três corpos de prova, que foram presos às garras de fixação do equipamento (Figura 87). Nestes ensaios o extensômetro não foi utilizado, pois o mesmo estava inoperante e as leituras das dimensões l_1 foram coletadas com o auxílio de um paquímetro e posteriormente analisadas e comparadas com os dados de Deslocamento Absoluto (ΔD) gerados pelo computador conectado a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos onde foi possível

constatar que os resultados foram semelhantes o que não gera nenhum prejuízo para os resultados a serem analisados.



Após a fixação do corpo de prova, o mesmo foi tracionado em um sentido uniaxial até romper, onde o comprimento inicial (l_0) (Figura 88 A) consequentemente sofre uma alteração dimensional devido ao processo de estiramento e assim se tem uma nova dimensão (l_1) (Figura 88 B). As condições de ensaio aplicadas foram as mesmas em todos ensaios realizados para cada uma das situações (sentidos de laminação de 0° , 45° e 90°).

Figura 88 – Ensaio de Tração – Corpos de prova: A) Comprimento Inicial; B) Comprimento Final



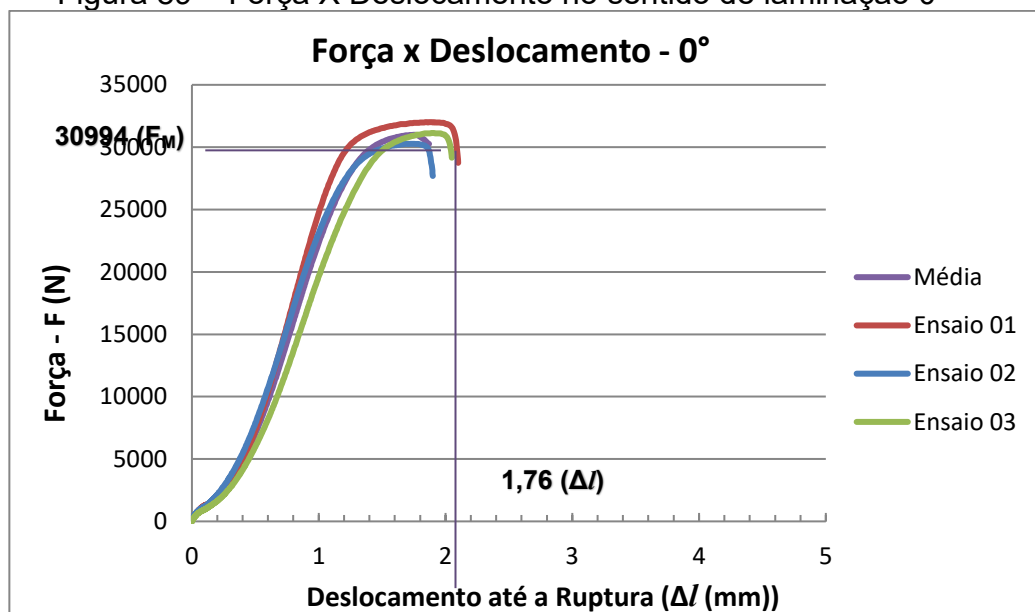
Na Tabela 4 apresentam-se os resultados de Força Máxima (em N) e de Deslocamento (mm) alcançados até o momento em que a Força Máxima atinge o Limite de Resistência (R_m), culminando com a ruptura dos corpos de prova confeccionados no mesmo sentido de laminação da chapa (0°). O Deslocamento até a Força Máxima (l_{FM} em mm) é o deslocamento executado pelo corpo de prova a partir o Comprimento Inicial (l_0) até o momento que o mesmo atinge a sua Força Máxima culminando com a ruptura do corpo de prova. Os dados de Deslocamento até a Força Máxima (l_{FM} em mm) são retirados dos dados gerados pelo computador conectado a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos. Os dados de Alongamento Total (Δl em mm) são obtidos através da equação 04.

Tabela 4 – Força e Deslocamento no sentido de laminação 0°

Ensaio	Força Máxima F_M (N)	Deslocamento até a Força Máxima – Δl (mm)
1	31822	1,64
2	31035	1,81
3	30125	1,84
Média	30994	1,76

A Figura 89 apresenta as curvas de Força (F) x Deslocamento Absoluto (ΔD) (Alongamento Total (Δl em mm)) geradas com corpos de prova confeccionados no sentido de laminação da chapa (0°) juntamente com a média. A Figura 85 mostra também a Força Máxima média juntamente com o deslocamento no momento que o corpo de prova atinge o Limite de Resistência (R_m).

Figura 89 – Força X Deslocamento no sentido de laminação 0°



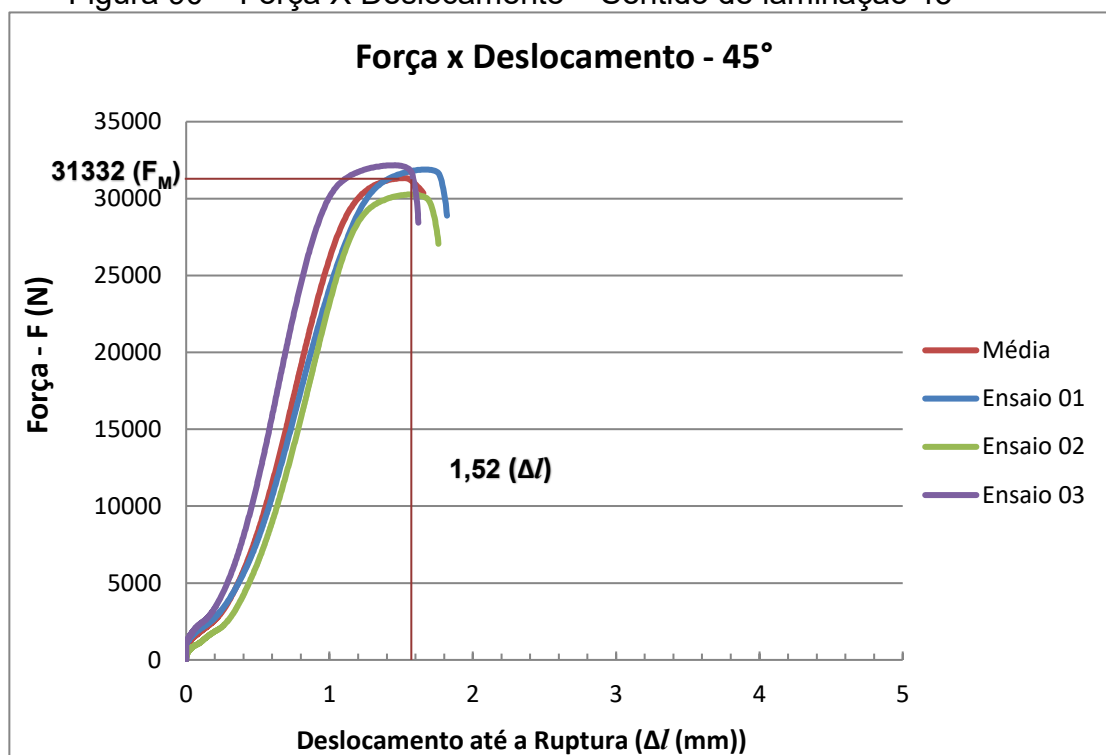
Na Tabela 5 são apresentados os resultados de Força Máxima (em N) e de Deslocamento Total (mm) (Alongamento Total (Δl em mm)) alcançados até o momento em que a Força Máxima atinge o Limite de Resistência (R_m), culminando com a ruptura dos corpos de prova confeccionados a 45° do sentido de laminação da chapa (0°).

Tabela 5 – Força e Deslocamento no Sentido de laminação 45°

Ensaio	Força F (N)	Deslocamento até a Força Máxima – Δl (mm)
1	30146	1,66
2	32111	1,36
3	31739	1,55
Média	31332	1,52

A Figura 90 exibe as curvas geradas com corpos de prova confeccionados a 45° do sentido de laminação da chapa juntamente com a média. A Figura 86 mostra também a Força Máxima média juntamente com o deslocamento no momento que o corpo de prova atinge o Limite de Resistência (R_m).

Figura 90 – Força X Deslocamento – Sentido de laminação 45°



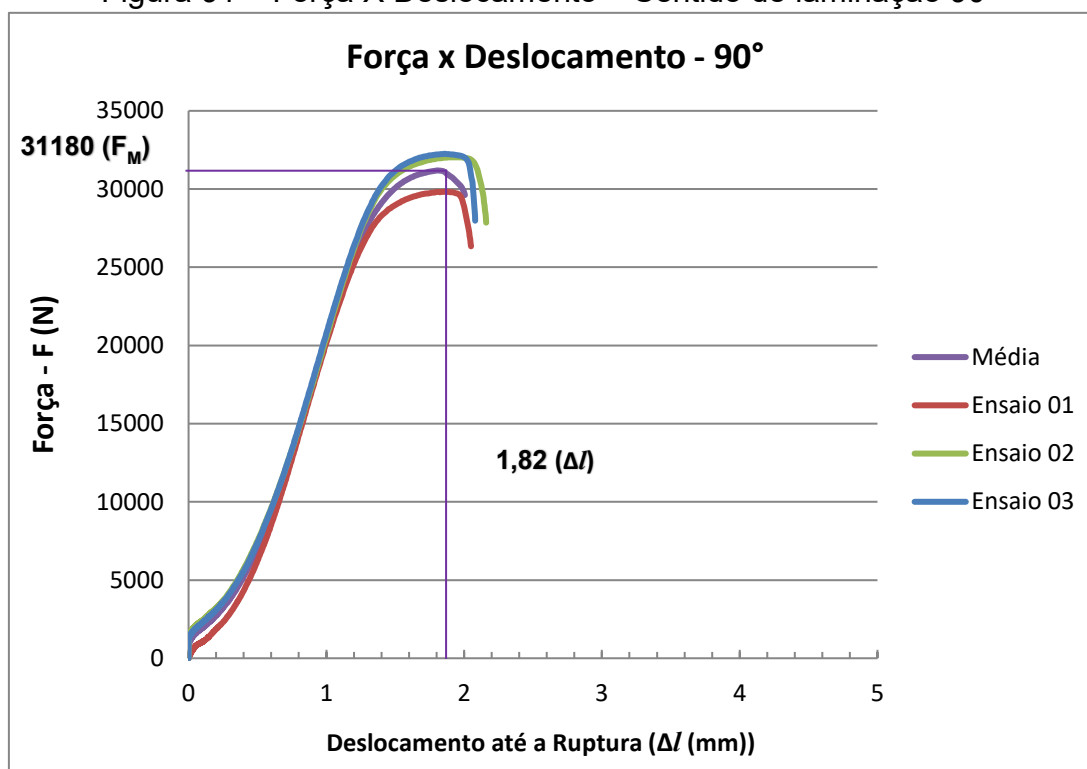
Na Tabela 6 são exibidos os resultados de Força Máxima (em N) e de Deslocamento (mm) (Alongamento Total (Δl em mm)) alcançados até o momento em que a Força Máxima atinge o Limite de Resistência (R_m), culminando com a ruptura dos corpos de prova confeccionados a 90° do sentido de laminação da chapa (0°).

Tabela 6 – Força e Deslocamento no sentido de laminação 90°

Ensaio	Força Máxima F_M (N)	Deslocamento até a Força Máxima – Δl (mm)
1	29401	1,60
2	31925	2,04
3	32215	1,82
Média	31180	1,82

A Figura 91 exibe as curvas geradas com corpos de prova confeccionados a 90° do sentido de laminação da chapa juntamente com a média. A Figura 86 mostra também a Força Máxima média juntamente com o deslocamento no momento que o corpo de prova atinge o Limite de Resistência (R_m).

Figura 91 – Força X Deslocamento – Sentido de laminação 90°



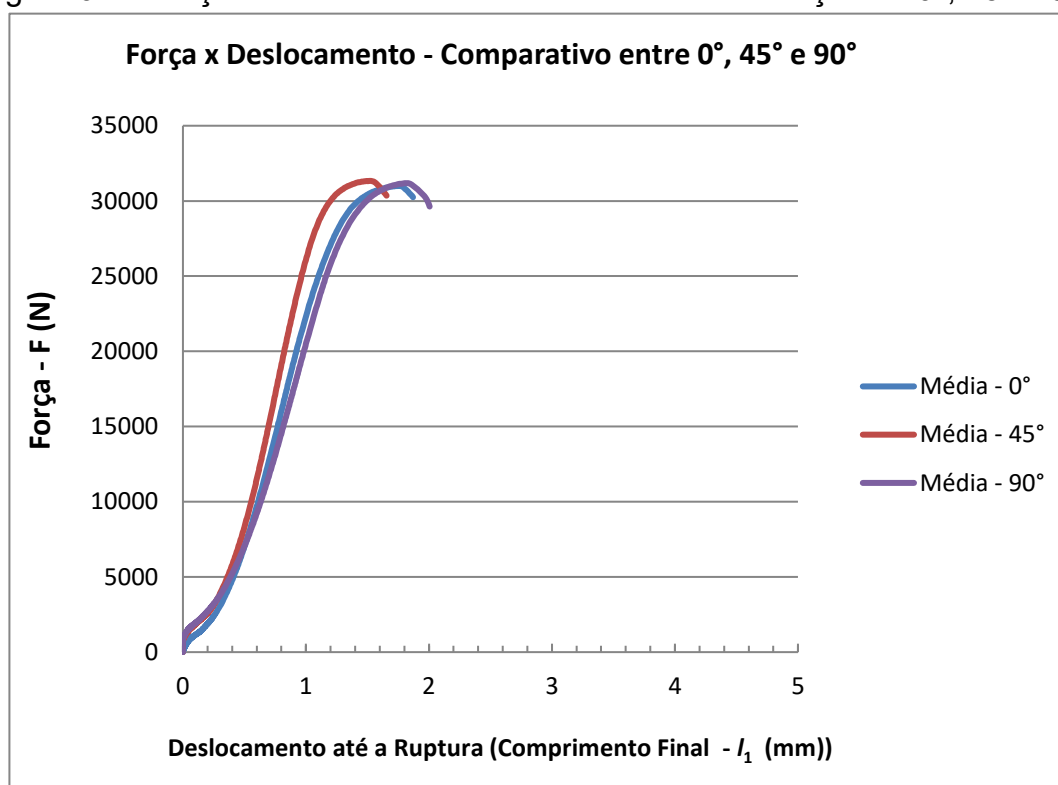
Na Tabela 7 é possível verificar os resultados médios Força Máxima (em N) e de Deslocamento (mm) (Alongamento Total (Δl em mm)) alcançados até o momento em que a Força Máxima atinge o Limite de Resistência (R_m), para os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°.

Tabela 7 – Força e Deslocamento – Comparativo entre 0°, 45° e 90°

Sentido de Laminação	Força Máxima F_M (N)	Deslocamento até a Força Máxima – Δl (mm)
0°	30994	1,76
45°	31332	1,52
90°	31180	1,82

A partir das curvas geradas e dos dados apresentados na Tabela 7 é possível verificar que os resultados de Força Máxima (em N) e de Deslocamento (mm) (Alongamento Total (Δl em mm)) alcançados até o momento em que a Força Máxima atinge o Limite de Resistência (R_m) praticamente foram similares. Na Figura 92 se pode observar as curvas médias de cada sentido.

Figura 92 – Força X Deslocamento nos sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°



Na Figura 92 é possível observar que a média dos resultados obtidos nos experimentos executados com os corpos de prova de 0° e 90° apresentaram resultados de Deslocamento (mm) bem próximos enquanto que a média dos resultados avaliados nos experimentos executados corpos de prova a 45° apresentou um resultado de Deslocamento Total (mm) um pouco inferior. A Força Máxima para cada uma das situações utilizadas no ensaio realizado (sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°) apresentou resultados semelhantes. A Força Máxima representa a carga necessária, onde o material atinge Limite de Resistência (R_m) do corpo de prova ensaiado até a ruptura do mesmo (Figura 92 e Tabela 07).

A diferença entre o comprimento inicial (l_0) e o comprimento final médio (l_1) é chamado de Deslocamento ou Alongamento Total e utiliza o símbolo Δl . Após a finalização do ensaio (ruptura total), as dimensões l_1 dos corpos de prova utilizados foram coletadas (Tabela 8) com o auxílio de um paquímetro (Figura 93).

Figura 93 – Ensaio de Tração – Corpos de prova

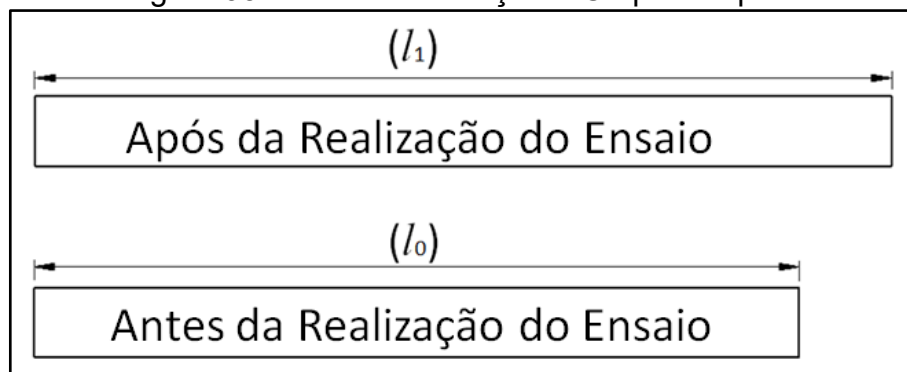


Tabela 8 – Força e Deslocamento – Comparativo entre 0°, 45° e 90°

Sentido de Laminação	Comprimento Inicial	Força Máxima	Deslocamento Total (EMIC)	Comprimento Final (EMIC)	Deslocamento Total (Paquímetro)	Deslocamento Total (Paquímetro)
	l_0 (mm)	F_M (N)	Δl (mm)	l_1 (mm)	l_1 (mm)	Δl (mm)
0°	250	30994	1,76	251,76	251,81	1,81
45°	250	31332	1,52	251,52	251,59	1,59
90°	250	31180	1,82	251,82	251,88	1,88

Na Tabela 8, se pode observar as dimensões de comprimento inicial (l_0) e o comprimento final médio (l_1) para cada um dos sentidos de laminação (0°, 45° e 90°). A leituras das dimensões l_1 foram analisadas e comparadas com os dados de Deslocamento Absoluto (ΔD) gerados pelo computador conectado a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos e pode-se verificar que os resultados foram semelhantes o que não acarreta nenhum prejuízo para os resultados a serem analisados.

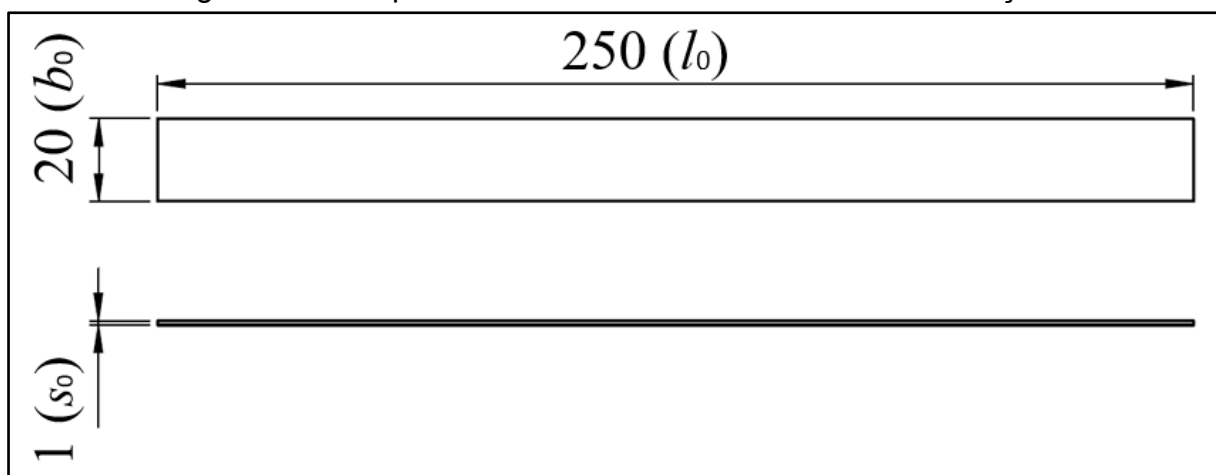
4.3.2 Curva de Engenharia

No ensaio de tração é realizada a medição e a coleta de dados de Força (F em N) e do Deslocamento Absoluto (ΔD) (Alongamento Total (Δl em mm)). Para a realização do ensaio foram utilizados corpos de prova confeccionados nas três diferentes direções de laminação (0°, 45° e 90°). Estes corpos, quando submetidos ao ensaio, fornecem pontos de Força (F em N) e de Alongamento Total (Δl em mm) a cada segundo que são coletados e utilizados na equação 01 e na equação 03 e os resultados gerados por estas equações são utilizados para a determinação da Curva

de Engenharia (chamada por alguns autores como Curva Convencional). A equação 01 é utilizada para o cálculo da Tensão de Engenharia (σ) enquanto que a equação 03 é utilizada para o cálculo da Deformação Relativa (ϵ).

Para realizar as averiguações com as equações é necessário verificar as dimensões iniciais dos corpos de prova, confeccionados conforme a norma ASTM E517-00 (2010) e apresentados na (Figura 94) utilizados no ensaio.

Figura 94 – Corpos de Prova – Dimensões – Ensaio de tração



Na Tabela 9, pode-se observar as dimensões iniciais dos corpos de prova confeccionados para serem utilizados nos ensaios.

Tabela 9 – Dimensões iniciais dos Corpos de Prova utilizados nos Ensaio de tração

Comprimento Inicial - l_0 (mm)	Largura Inicial - b_0 (mm)	Espessura Inicial - s_0 (mm)
250	20	1

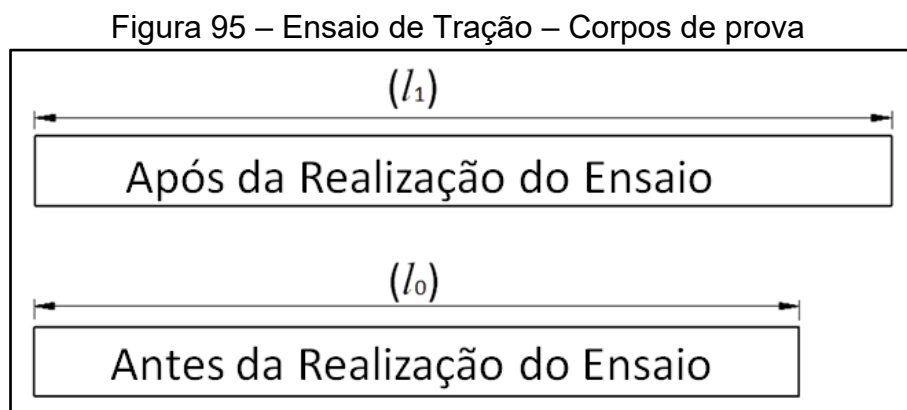
Para se realizar o cálculo da Tensão de Engenharia (σ) (equação 01) é preciso utilizar os dados de Força (F em N) coletados durante o ensaio de Tração e se calcular a área inicial da seção do corpo de prova (equação 02). Os dados da Força (F em N) de Tração sobre o corpo de prova são coletados a cada segundo de Tempo (s) em que o ensaio é realizado. Estes cálculos, foram utilizados para os sentidos de laminação de 0° , 45° e 90° . Na Tabela 7 são apresentados os resultados de Força Máxima (F_M em N) no momento que os corpos de prova atingem o Limite de

Resistência (R_m em MPa). Na Tabela 10, são apresentados os resultados de Tensão de Engenharia (σ em MPa) atingidos.

Tabela 10 – Limite de Resistência atingidos nos diferentes sentidos de laminação (0° , 45° e 90°)

Sentidos de Laminação dos Corpos de Prova	Tensão de Engenharia - σ (MPa)	Espessura Inicial - A_0 (mm ²)
0°	1550	20
45°	1567	20
90°	1559	20

Para realizar o cálculo da Deformação Relativa (ϵ) é preciso se verificar o comprimento inicial (l_0) e o comprimento final (l_1) e inserir estes dados na equação 03 (Figura 95).



Na Tabela 11, pode-se observar as dimensões de comprimento inicial (l_0) e o comprimento final médio (l_1) para cada um dos sentidos de laminação (0° , 45° e 90°). A diferença entre o comprimento inicial (l_0) e o comprimento final médio (l_1) é chamado de deslocamento ou alongamento e utiliza o símbolo Δl . Após a finalização do ensaio (ruptura total), as dimensões l_1 dos corpos de prova utilizados foram coletadas com o auxílio de um paquímetro. As leituras das dimensões l_1 foram analisadas e comparadas com os dados de Deslocamento Absoluto (ΔD) gerados pelo computador conectado a Máquina Universal de Ensaio Mecânicos e pode-se verificar que os resultados foram semelhantes o que não acarreta nenhum prejuízo para os resultados a serem analisados. Assim os dados de deslocamento (Δl) apresentados na Tabela 11

contemplam as dimensões coletadas no momento da ruptura total dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 11 – Comprimentos Iniciais e finais dos Corpos de Prova utilizados nos diferentes sentidos de laminação (0° , 45° e 90°)

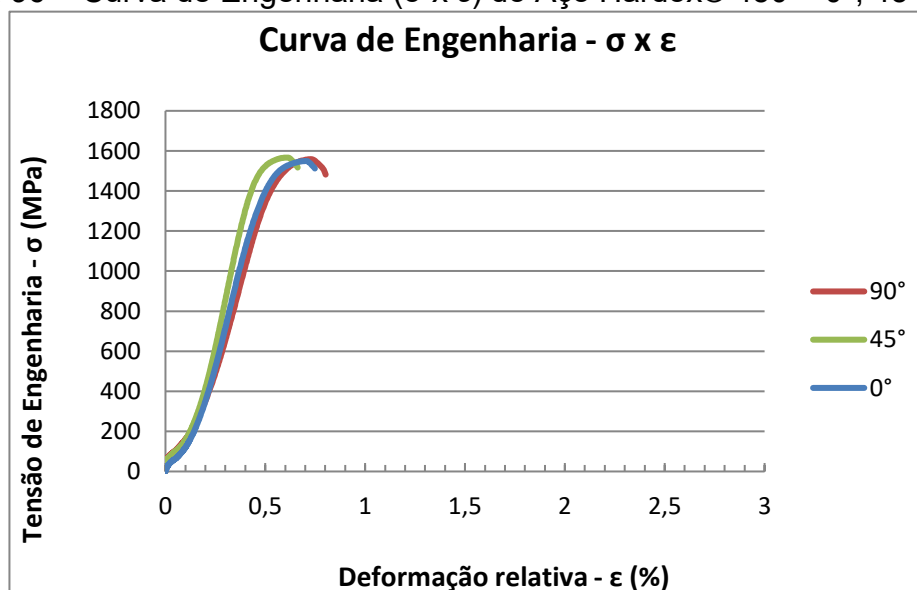
Sentido de laminação	Comprimento Inicial - l_0 (mm)	Comprimento Final - l_1 (mm)	Deslocamento Total - Δl (mm)
0°	250	251,76	1,76
45°	250	251,52	1,52
90°	250	251,82	1,82

Com os comprimentos iniciais (l_0) e os comprimentos finais (l_1) para cada um dos sentidos de laminação (0° , 45° e 90°) definidos é possível realizar os cálculos da Deformação Relativa (ϵ) com o auxílio da equação 03. Na Tabela 12, são apresentados os resultados de Deformação Relativa (ϵ).

Tabela 12 – Deformação Relativa (ϵ) obtidos para os diferentes sentidos de laminação (0° , 45° e 90°)

Sentidos de Laminação dos Corpos de Prova	Deslocamento Total - Δl (mm)	Deformação Relativa - ϵ (%)
0°	1,76	0,75
45°	1,52	0,66
90°	1,82	0,80

Na Figura 96, pode-se visualizar as Curvas de Engenharia resultantes para cada um dos sentidos de laminação, sendo que estes sentidos 0° , 45° e 90° .

Figura 96 – Curva de Engenharia ($\sigma \times \epsilon$) do Aço Hardox® 450 – 0°, 45° e 90°

Na Figura 96, é possível visualizar a geometria das Curvas de Engenharia dos obtidas para os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°, onde estão presentes os resultados dos cálculos apresentados na Tabela 10 e na Tabela 11. Na Figura 95, as Curvas de Engenharias resultantes dos sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° apresentaram resultados de Tensão de Engenharia (σ) e Deformação Relativa (ϵ) bem próximos, onde apenas a Curva de Engenharia à 45° apresentou uma leve retração em relação as Curvas de Engenharia à 0° e a 90° (Tabela 13).

Tabela 13 – Resultados - Curva de Engenharia ($\sigma \times \epsilon$)

Sentido de Laminação	Compr. Inicial l_0 (mm)	Largura Inicial b_0 (mm)	Espess. Inicial s_0 (mm)	Área Inicial A_0 (mm ²)	Força Máxima F_M (N)	Desloc. Total (EMIC) Δl (mm)	Tensão de Engenharia σ (MPa)	Deformação Relativa ϵ (%)
0°	250	20	1	20	30994	1,76	1550	0,75
45°	250	20	1	20	31332	1,52	1567	0,66
90°	250	20	1	20	31180	1,82	1559	0,8

4.3.3 Curva de Escoamento

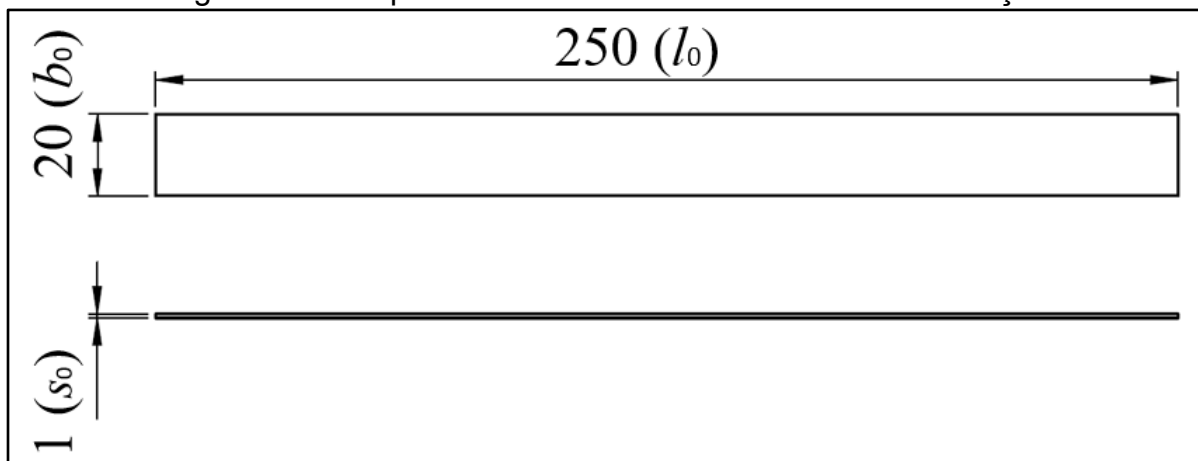
Os dados de Força (F em N) e de Deslocamento (l_1 em mm) foram obtidos com a realização do ensaio de tração a partir da utilização de corpos de prova confeccionados nas três diferentes direções de laminação (0°, 45° e 90°) foram

utilizados para a determinação da Curva de Escoamento (chamada por alguns autores como Curva Verdadeira).

Para a obtenção da Curva de Escoamento é necessário utilizar a equação 06 para se verificar a Tensão de Escoamento (kf) e a equação 09 para se avalia a Deformação Verdadeira (φ). Os resultados obtidos com estas equações são utilizados para a determinação da Curva de Escoamento (chamada por alguns autores como Curva Verdadeira). A Curva de Escoamento deve ser traçada a partir do início do estiramento de cada corpo de prova até o momento que os mesmos atingem o Limite de Resistência (R_m).

Para realizar as averiguações com as equações é necessário verificar as dimensões dos corpos de prova, confeccionados conforme a norma ASTM E517-00 (2010) (Figura 97).

Figura 97 – Corpos de Prova – Dimensões – Ensaio de tração



Na Tabela 14, pode-se observar as dimensões iniciais dos corpos de prova confeccionados para serem utilizados nos ensaios.

Tabela 14 – Dimensões iniciais dos Corpos de Prova utilizados nos Ensaios de tração

Comprimento Inicial - l_0 (mm)	Largura Inicial - b_0 (mm)	Espessura Inicial - s_0 (mm)
250	20	1

Para se realizar o cálculo da Tensão de Escoamento (kf) (equação 06) é preciso da Força (F em N) coletada durante o ensaio de Tração e do resultado do cálculo da Área Instantânea (A) da seção do corpo de prova (equação 08). Os dados da Força (F

em N) de Tração sobre o corpo de prova são coletados a cada segundo de Tempo (s) que o ensaio é realizado. Para os cálculos, pode-se utilizar os dados de Força (F em N) coletados nos sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° apresentados na Tabela 7, que apresentam os resultados de Força (F em N) no momento que os corpos de prova atingem a no momento que Limite de Resistência (R_m). Na Tabela 15, são apresentados os resultados de Limite de Resistência (R_m em MPa) atingidos.

Tabela 15 – Limite de Resistência atingidos nos diferentes sentidos de laminação (0°, 45° e 90°)

Sentidos de Laminação dos Corpos de Prova	Limite de Resistência - R_m (MPa)	Espessura Inicial - A_0 (mm ²)
0°	1550	20
45°	1567	20
90°	1559	20

Na Tabela 16, são apresentados os resultados da Área Instantânea (A) (equação 08) para os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° no momento que os corpos de prova atingem o Limite de Resistência (R_m).

Tabela 16 – Área Instantânea (A) na Força Máxima do Limite de Resistência - 0°, 45° e 90°

Sentido de Laminação	Comprimento Inicial - l_0 (mm)	Comprimento Final - l_1 (mm)	Área Instantânea da seção - A (mm ²)
0°	250	251,76	19,86
45°	250	251,52	19,88
90°	250	251,82	19,86

Na Tabela 17, podem-se visualizar os resultados das Tensões de Escoamento (k_f) (equação 06) para os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°.

Tabela 17 – Tensões de Escoamento (k_f) na Força Máxima do Limite de Resistência - 0°, 45° e 90°

Sentido de Laminação	Área Instantânea da seção - A (mm ²)	Força Máxima no Limite de Resistência - F_{MAX} (N)	Tensão de Escoamento - k_f (MPa)
0°	19,86	30994	1557,79
45°	19,88	31332	1575,30
90°	19,86	31180	1570,22

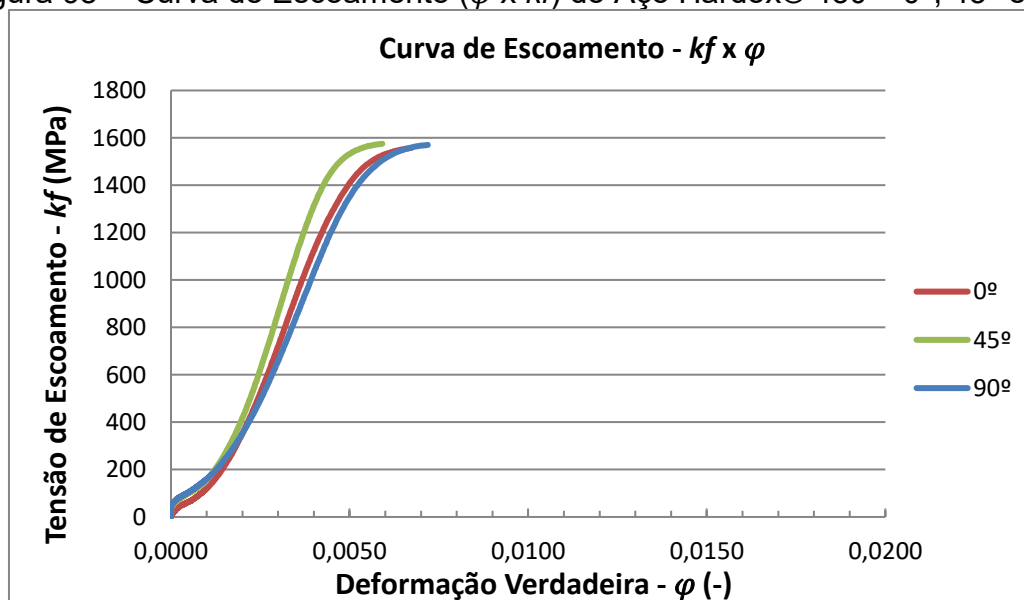
Na Tabela 18, são apresentados os resultados da Deformação Verdadeira (φ), para os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° no momento que os corpos de prova atingem o Limite de Resistência (R_m).

Tabela 18 – Deformação Verdadeira (φ) - 0°, 45° e 90°

Sentido de Laminação	Comprimento Inicial - l_0 (mm)	Comprimento Final - l_1 (mm)	Deformação Verdadeira - φ (–)
0°	250	251,76	0,00678
45°	250	251,52	0,00598
90°	250	251,82	0,00717

Com os experimentos realizados no equipamento destinado ao ensaio de tração é possível verificar a Curva de Escoamento (chamada por alguns autores como Curva Verdadeira) e a Curva de Engenharia (chamada por alguns autores como curva convencional). Na Figura 98 se pode visualizar as Curvas de Escoamento resultantes para cada um dos sentidos de laminação, sendo que estes sentidos 0°, 45° e 90°.

Figura 98 – Curva de Escoamento ($\varphi \times k_f$) do Aço Hardox® 450 – 0°, 45° e 90°



Na Figura 98, pode-se observar a geometria das Curvas de Escoamento dos sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°, onde os resultados os cálculos exemplificados na Tabela 15 e na Tabela 16 fazem parte da construção da mesma. Como se pode analisar na Figura 97, as Curvas de Escoamento resultantes dos

sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° apresentaram resultados Tensões de Escoamento (kf) e Deformação Verdadeira (φ) bem próximos, onde apenas a Curvas de Escoamento à 45° apresentou uma leve diferença na em relação as Curvas de Escoamento à 0° e a 90° (Tabela 19).

Tabela 19 – Resultados - Curva de Escoamento ($\varphi \times kf$)

Sentido de Laminação	Compr. Inicial	Largura Inicial	Espe. s. Inicial	Área Inicial	Desloc. Total (EMIC)	Compr. Final (EMIC)	Área Instant. da seção	Limite de Resist.	Deformação Verdadeira	Tensão de Escoamento
	l_0 (mm)	b_0 (mm)	s_0 (mm)	A_0 (mm ²)	Δl (mm)	l_1 (mm)	A (mm ²)	R_m (MPa)	φ (–)	kf (MPa)
0°	250	20	1	20	1,76	251,76	19,86	1550	0,00678	1557,79
45°	250	20	1	20	1,52	251,52	19,88	1567	0,00598	1575,30
90°	250	20	1	20	1,82	251,82	19,86	1559	0,00717	1570,22

4.4 ANÁLISE DA ANISOTROPIA

O ensaio de anisotropia avalia resposta do material para deformação em diferentes direções (Figuras 25 e 26). Para os experimentos optou-se em verificar a região de deformação com a utilização de um paquímetro digital.

As Tabelas 20, 21 e 22 mostram os resultados de deformação (em torno de 15%) registrados nos corpos de prova, sendo que foram ensaiados três corpos de prova para cada sentido de laminação e realizado a verificação da média destes três ensaios.

Tabela 20 – Sentido de Laminação - 0°

Sentido de Laminação - 0°			
Ensaio	l_1 (mm)	b_1 (mm)	s_1 (mm)
1	50,18	19,80	1,00
2	50,56	19,90	0,99
3	50,29	19,93	0,99
Média	50,34	19,88	0,99

Tabela 21 – Sentido de Laminação - 45°

Sentido de Laminação - 45°			
Ensaio	l_1 (mm)	b_1 (mm)	s_1 (mm)
1	50,21	19,88	0,99
2	50,59	19,95	0,99
3	50,14	19,96	1,00
Média	50,31	19,93	0,99

Tabela 22 – Sentido de Laminação - 90°

Sentido de Laminação - 90°			
Ensaio	l_1 (mm)	b_1 (mm)	s_1 (mm)
1	50,43	19,95	1,00
2	50,82	19,87	0,99
3	50,87	19,96	0,99
Média	50,71	19,93	0,99

Com as médias definidas em cada sentido de laminação, se calculou o índice de anisotropia (r) com o auxílio da equação 11, onde os resultados encontrados podem ser visualizados na Tabela 23.

Tabela 23 – Sentidos de Laminação – Índice de Anisotropia

Sentido	r
0°	-0,48
45°	-0,36
90°	-0,21

Com os valores presentes na Tabela 9 pode-se sugerir que o mesmo não apresenta uma boa estampabilidade visto que o índice de anisotropia (r), apresentou resultados abaixo menores de 1 ($r < 1$).

Assim, conhecidos os valores de r em cada sentido de laminação, se averiguou a r_m (anisotropia média) através da equação 12 que avalia a capacidade da chapa resistir ao afinamento, e a Δr (anisotropia planar) através da equação 13 que avalia a tendência ao orelhamento, sendo que estes valores podem ser analisados na Tabela 24.

Tabela 24 – Anisotropia Média e Anisotropia Planar

r_m	-0,350
Δr	0,018

4.5 ENSAIO ERICHSEN

O ensaio Erichsen avalia a altura máxima alcançada (em mm) pelo punção até a fratura do corpo de prova (Figura 64). É um ensaio biaxial de tensões importante para explicar a diferença com Aços de alta estampabilidade.

Para os experimentos optou-se em realizar os mesmos com e sem lubrificante, para averiguar a diferença de resultados entre os experimentos.

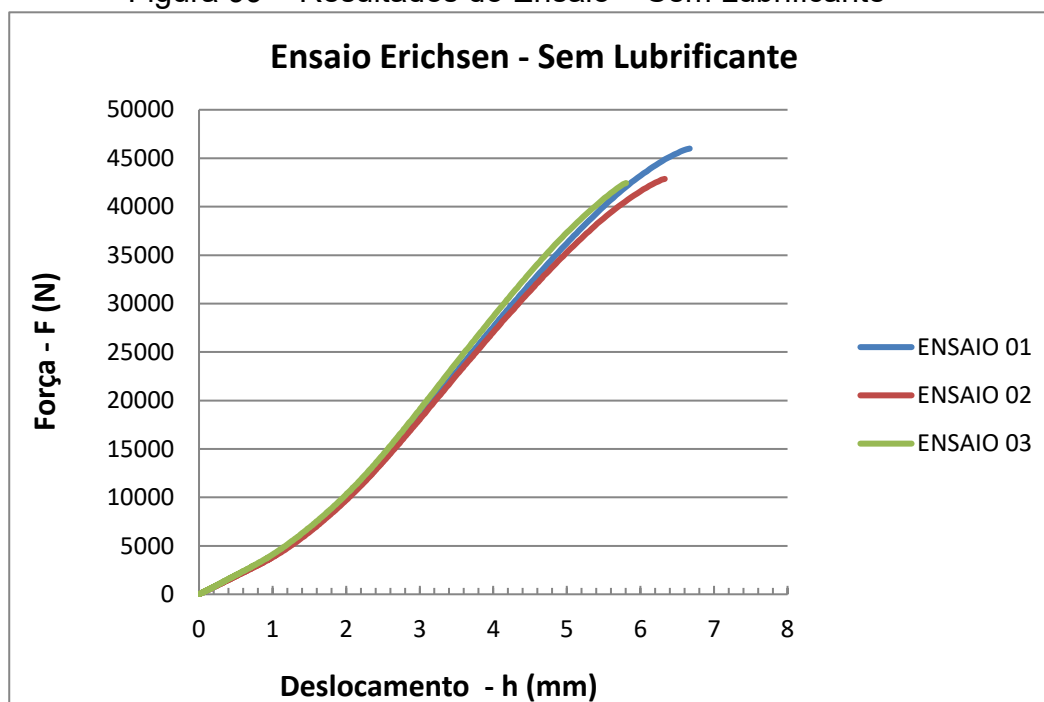
A Tabela 25 mostra os resultados altura máxima alcançada (em mm) até o momento da estricção e a força que causou esse fenômeno no corpo de prova, sendo que foram ensaiados três corpos de prova e realizado a verificação da média destes três ensaios.

Tabela 25 – Força e Deformação – Sentido de laminação 90

Ensaio	Força (N)	altura máxima alcançada – hc (mm)
1	45997	6,67
2	42866	6,33
3	42441	5,81
Média	43768	6,27

A Figura 99 apresenta o comportamento da curva Força (N) X Deslocamento (mm) máximo alcançado até o momento da estricção.

Figura 99 – Resultados do Ensaio – Sem Lubrificante



Com os experimentos finalizados e a média definida (Tabela 22), pode-se observar que o Hardox® 450, para a condição sem lubrificante apresentou um deslocamento (altura h em mm) de 6,27mm onde a força utilizada até a ruptura foi de 43768 N.

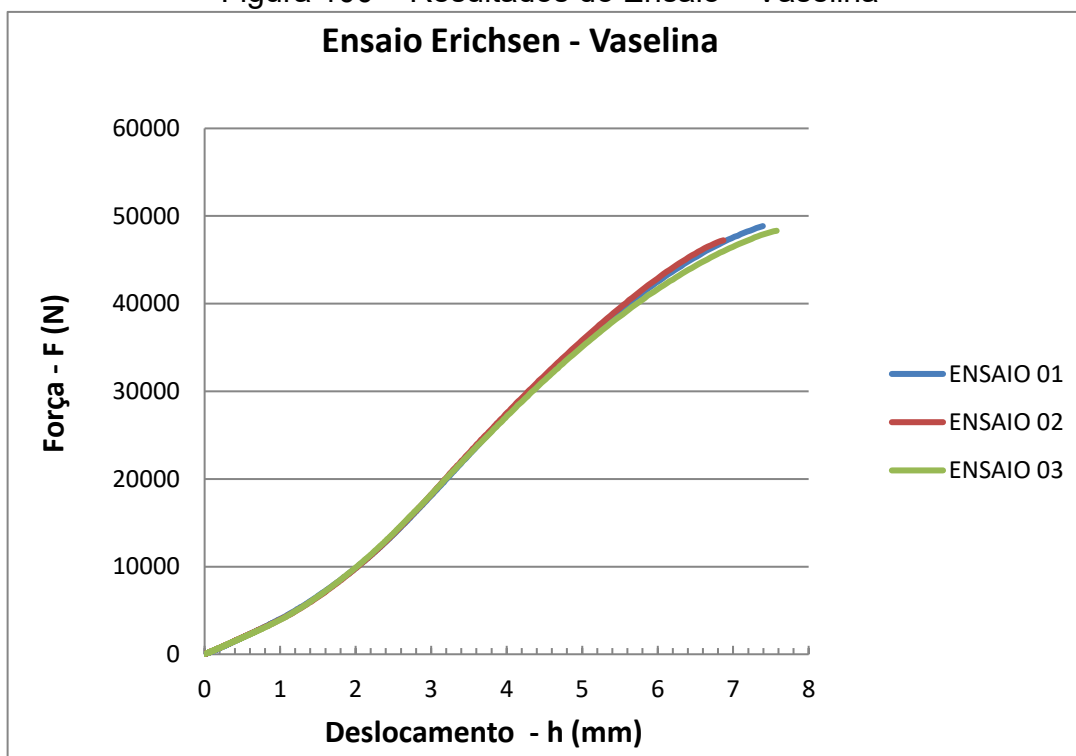
Os procedimentos de ensaio foram repetidos para a condição de lubrificação, onde foi utilizado o lubrificante Vaselina Industrial, sendo que a Tabela 26 apresenta os resultados da altura máxima alcançada (em mm) e força alcançados no momento da estricção e a força máxima utilizada.

Tabela 26 – Força e Deformação – Vaselina - Ensaio Erichsen

Ensaio	Força (N)	altura máxima alcançada – h_c (mm)
1	48850	7,39
2	47232	6,87
3	48318	7,58
Média	48133	7,28

A Figura 100 apresenta o comportamento da curva para a condição de lubrificação.

Figura 100 – Resultados do Ensaio – Vaselina



Com os resultados apresentados é possível observar que no experimento onde foi utilizado o lubrificante Vaselina, houve um maior estiramento da chapa, uma vez que o deslocamento médio obtido foi de 7,28 mm e a força utilizada até a ruptura foi de 48133 N.

4.6 EXPANSÃO DE FUROS

O ensaio de Expansão de Furos avalia com o auxílio da equação 14, a Taxa de Expansão do Furo (λ) ou também conhecida como Razão de Expansão de Furos. Esta taxa é utilizada para verificar a conformidade de borda (capacidade de a chapa ser estampada sem que ocorra a estricção na borda ou furo).

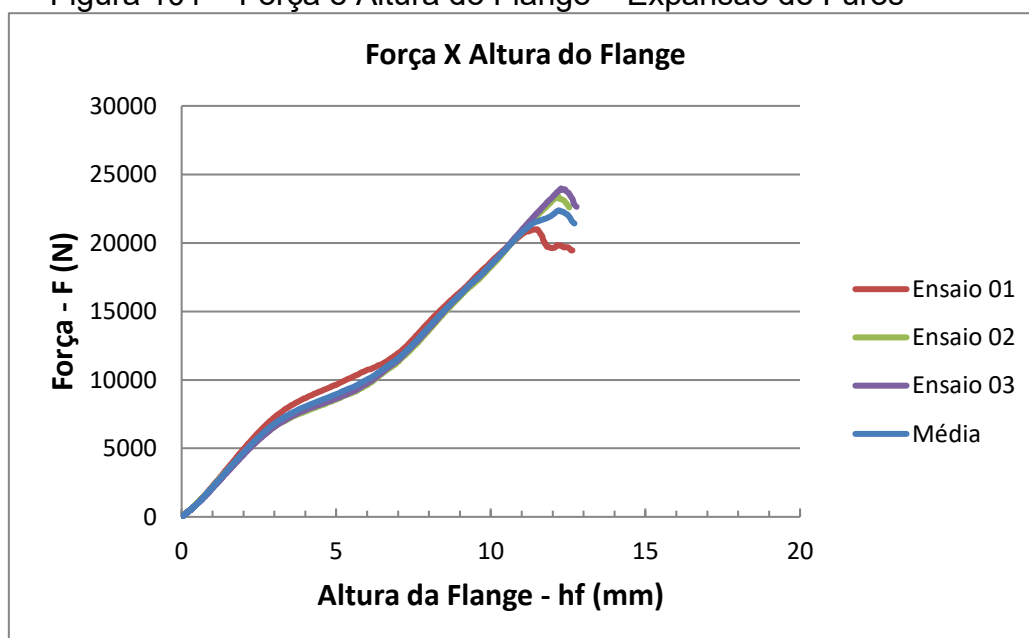
Na Tabela 27 apresentam-se os resultados de Força F (em N) e Deslocamento Absoluto (ΔD) em mm alcançado até momento em que ocorre a ruptura na borda do furo que está sendo expandido no corpo de prova. Os valores de deslocamento representam os valores da altura do flange atingidos por cada corpo de prova, juntamente com a média.

Tabela 27 – Força e Altura do Flange – Expansão de Furos

Ensaio	Força F (N)	Altura do Flange – hf (mm)
1	20997	11,47
2	23424	12,18
3	23978	12,27
MÉDIA	22380	12,20

A Figura 101 exibe as curvas geradas com os corpos de prova com o furo central de diâmetro de 10mm utilizados nos ensaios.

Figura 101 – Força e Altura do Flange – Expansão de Furos



Na Tabela 28 apresenta os resultados dimensionais para o D_h (diâmetro médio do furo após a ruptura) gerados nos corpos de prova com o furo central de diâmetro de 10mm utilizados nos ensaios.

Tabela 28 – Resultados dimensionais para o D_h – Expansão de Furos

Corpo	D_h (mm)
Ensaio 01	16,9
Ensaio 02	16,9
Ensaio 03	16
Média	16,60

A Tabela 29 apresenta a Taxa de Expansão do furo (λ) calculada a partir da equação 14.

Tabela 29 – Taxa de expansão do furo para o Aço Hardox® 450

Dh (mm)	Do (mm)	λ (%)
16,6	10	66

4.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO

O ensaio de dobramento sob tensão avalia o atrito de um corpo de prova que é preso nas suas extremidades por duas garras que quando acionadas realizam o deslizamento deste corpo sobre um pino, gerando dados de Força (F) e Tempo (s) que são coletados por software que serão utilizados na equação 15 para calcular o coeficiente de atrito.

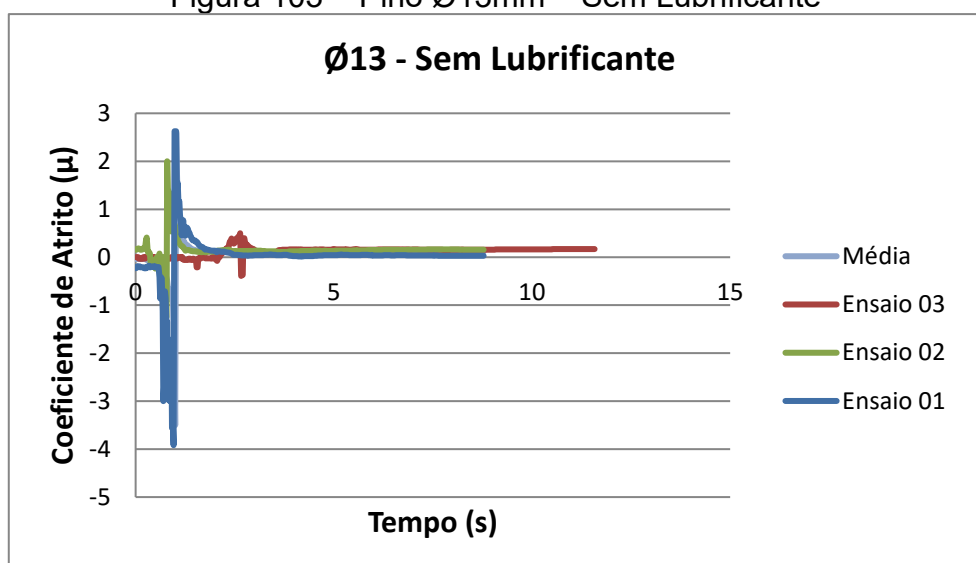
Neste ensaio os corpos de prova foram extraídos a partir do sentido de laminação a 0°. Para o experimento foram utilizados pinos com diâmetros de 13mm e 20mm (Figura 102) nas situações com lubrificante (Vaselina Industrial) e sem lubrificante foram ensaiados, onde para cada uma das análises foram ensaiados três corpos de prova.

Figura 102 – A) Pino com diâmetro de 20mm; B) Pino com diâmetro de 13mm



A Figura 103 mostra os dados gráficos para a condição sem lubrificante a partir da utilização do pino com diâmetro de 13mm. Os resultados apresentados no gráfico foram gerados a partir da utilização de três corpos de prova e da média dos mesmos.

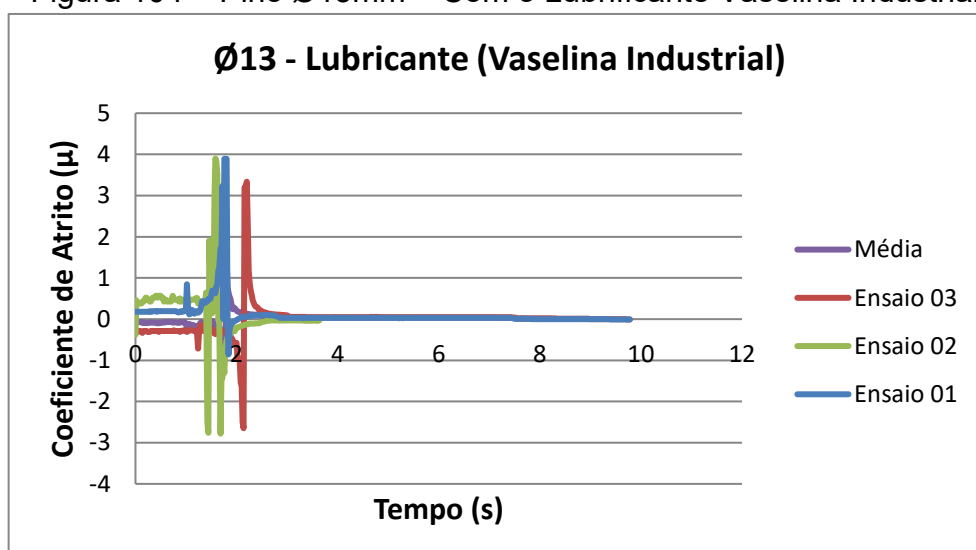
Figura 103 – Pino Ø13mm – Sem Lubrificante



Com os dados de atrito (μ) conhecidos para a condição sem lubrificante e utilizando do pino com diâmetro de 13mm, o atrito (μ) obtido foi de 0,116 (adimensional).

A Figura 104 apresenta os dados para a condição com lubrificante (Vaselina Industrial) onde o pino com diâmetro de 13mm também foi utilizado. Os dados apresentados neste gráfico são de três corpos de prova e a média destes mesmos corpos.

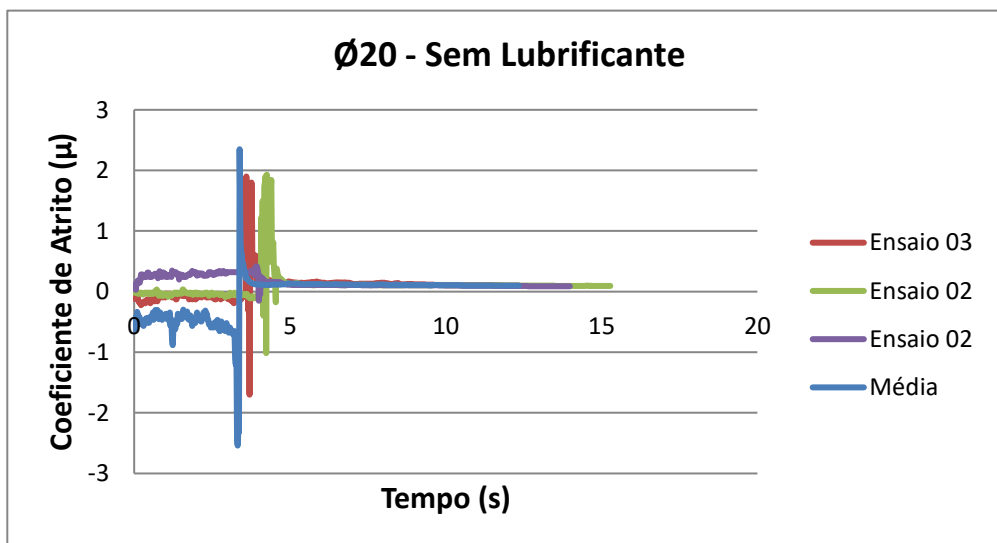
Figura 104 – Pino Ø13mm – Com o Lubrificante Vaselina Industrial



O atrito (μ) para a condição lubrificante Vaselina Industrial e pino com diâmetro de 13mm é de 0,038 (adimensional).

A Figura 105 exibe os dados para a condição sem lubrificante e com a utilização do pino com diâmetro de 20mm, sendo que estes dados são de três corpos de prova juntamente com a média.

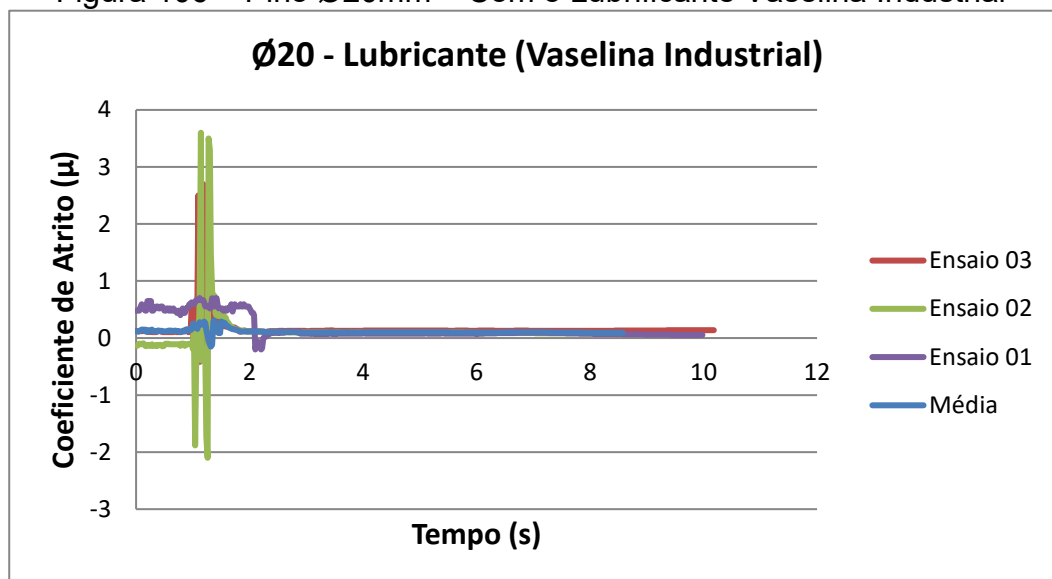
Figura 105 – Pino Ø20mm – Sem Lubrificante



Com os dados conhecidos, o atrito (μ) obtido para a condição sem lubrificante e pino com diâmetro de 20mm é de 0,102 (adimensional).

A Figura 106 apresenta os dados os dados para a condição com lubrificante (Vaselina Industrial) e com a utilização do pino com diâmetro de 20mm, onde os dados apresentados são de 3 corpos de prova e a média destes corpos.

Figura 106 – Pino Ø20mm – Com o Lubrificante Vaselina Industrial



Assim, com os dados conhecidos para a condição com o lubrificante Vaselina e pino com diâmetro de 20mm o atrito (μ) encontrado é de 0,119 (adimensional).

4.8 ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES

O ensaio dos Múltiplos Punções analisa a Razão Limite de Estampagem (β), onde utilizam-se punções de diversas geometrias (Cilíndrica (a); Elíptica Rasa (b); Hemisférica (c); Elíptica Profunda (d); Elíptica Extra Profunda (e)) (Figura 107). Neste ensaio é possível verificar a capacidade do material suportar deformações de embutimento profundo (Cilíndrica, Elíptica Rasa) até estiramento (Elíptica Profunda, Elíptica Extra Profunda). As deformações medidas nos corpos de prova ensaiados são utilizadas para determinar a Curva Limite de Conformação.

Para considerar o ensaio validado é preciso formar o “copo” sem a ruptura do mesmo e a partir do momento que o corpo de prova sofrer a ruptura estará assim indicado o Limite de Embutimento ou Estiramento do material para a geometria punção que estiver sendo utilizado no ensaio. Todos os ensaios foram realizados utilizando uma velocidade de deslocamento do pistão de 2,5mm/s.

Figura 107 – (a) Punção Cilíndrico; (b) Punção Elíptico Raso; (c) Punção Hemisférico; (d) Punção Elíptico Profundo; (e) Punção Elíptico Extra Profundo



Fonte: Arruda *et al.* (2011).

A Tabela 30 apresenta os resultados da Razão Limite de Estampagem (β) para o punção com a geometria Cilíndrica que foram obtidos a partir da utilização equação 16. Os dados de Força Aplicada (em kN) em cada ensaio foram coletados no painel da prensa após a finalização dos mesmos. A Força Aplicada é momento em que o corpo de prova inicia a deformação a partir da ação do punção até a formação do copo ou rompimento do mesmo.

Tabela 30 – Resultados de Força Aplicada – Punção Cilíndrico

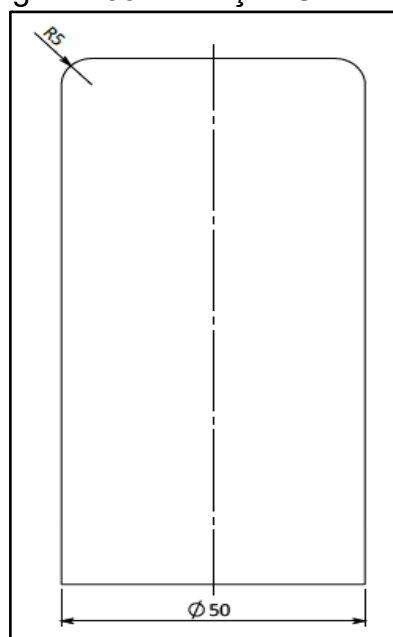
Punção Cilíndrico					
Força utilizada no prensa chapas (kN)					200
Ø Blank (mm) (Geratriz)	Ø Punção (mm)	B	Amostra	Situação	Força Aplicada (Considerando o início da Deformação até o Rompimento ou Formação do Copo) (kN)
80	50	1,6	COPO	VÁLIDO	117
					112
					113
Média					114,00
85	50	1,7	COPO	VÁLIDO	144
					151
					148
Média					147,67
90	50	1,8	COPO	VÁLIDO	159
					158
					156
Média					157,67
95	50	1,9	COPO	VÁLIDO	170
					185
					180
Média					178,33
100	50	2	RUPTURA	INVÁLIDO (RUPTURA)	130
					141
					190
Média					153,67

A Figura 108 apresenta os resultados atingidos utilizando o punção com a geometria Cilíndrica (Figura 109).

Figura 108 – Ensaio – Punção Cilíndrico



Figura 109 – Punção Cilíndrico



A Tabela 31 mostra os resultados da Razão Limite de Estampagem (β) para o punção com a geometria Elíptica Rasa que foram obtidos a partir da utilização equação 16. Os dados de Força Aplicada (em kN) em cada ensaio foram coletados no painel da prensa após a finalização dos mesmos.

Tabela 31 – Resultados de Força Aplicada – Punção Elíptico Raso

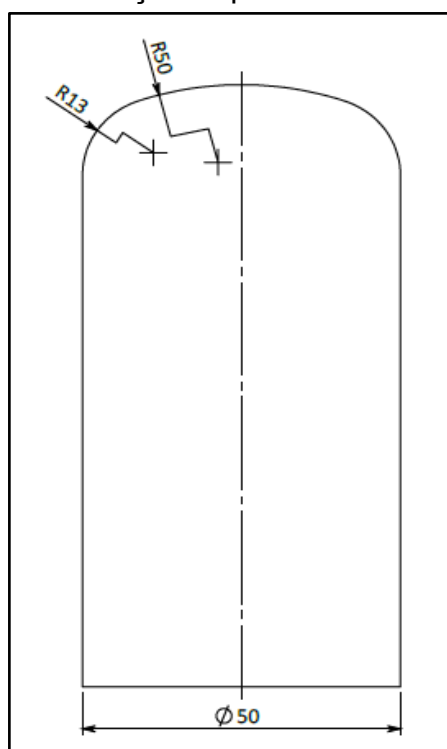
Punção Elíptico Raso					
Força utilizada no prensa chapas (kN)					200
Ø Blank (mm) (Geratriz)	Ø Punção (mm)	β	Amostra	Situação	Força Aplicada (Considerando o início da Deformação até o Rompimento ou Formação do Copo) (kN)
80	50	1,6	COPO	VÁLIDO	94
					100
					98
					Média 97,33
85	50	1,7	COPO	VÁLIDO	131
					135
					133
					Média 133,00
90	50	1,8	COPO	VÁLIDO	149
					160
					145
					Média 151,33
95	50	1,9	RUPTURA	INVÁLIDO (RUPTURA)	91
					90
					91
					Média 90,67

A Figura 110 apresenta os resultados atingidos utilizando o punção com a geometria Elíptica Rasa (Figura 111).

Figura 110 – Ensaio – Punção Elíptico Raso



Figura 111 – Punção Elíptico Raso - Dimensional



A Tabela 32 apresenta os resultados da Razão Limite de Estampagem (β) para o punção com a geometria Hemisférica que foram obtidos a partir da utilização equação 16. Os dados de Força Aplicada (em kN) em cada ensaio foram coletados no painel da prensa após a finalização dos mesmos.

Tabela 32 – Resultados de Força Aplicada – Punção Hemisférico

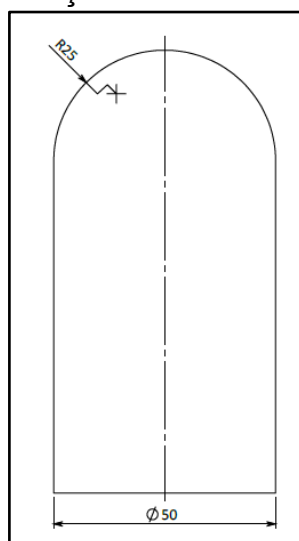
Punção Hemisférico					
Força no prensa chapas (kN)					120
Ø Blank (mm) (geratriz)	Ø Punção (mm)	β	Amostra	Situação	Força Aplicada (Considerando o início da Deformação até o Rompimento ou Formação do Copo) (kN)
80	50	1,6	RUPTURA	INVÁLIDO (RUPTURA)	70
					60
					70
Média					66,67

A Figura 112 apresenta os resultados atingidos utilizando o punção com a geometria hemisférica (Figura 113).

Figura 112 – Ensaio – Punção Hemisférico



Figura 113 – Punção Hemisférico – Dimensional



Na Tabela 33 apresenta os resultados da Razão Limite de Estampagem (β) para o punção com a geometria Elíptica Profunda que foram obtidos a partir da utilização equação 16. Os dados de Força Aplicada (em kN) em cada ensaio foram coletados no painel da prensa após a finalização dos mesmos.

Tabela 33 – Resultados de Força Aplicada – Punção Elíptico Profundo

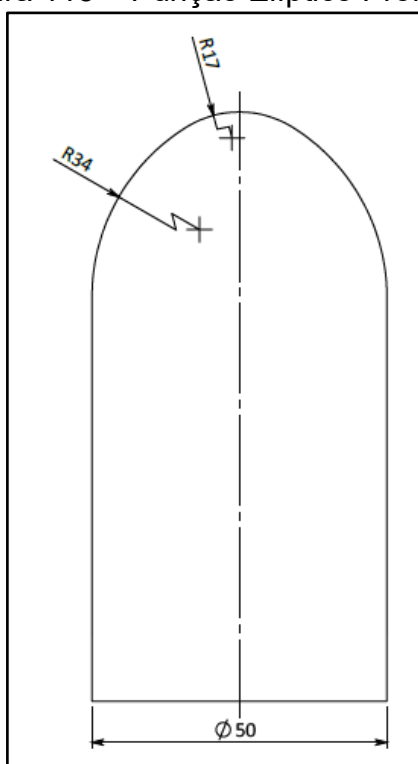
Punção Elíptico Profundo					
Força no prensa chapas (kN)					80
Ø Blank (Mm) (Geratriz)	Ø Punção (Mm)	B	Amostra	Situação	Força utilizada (considerada do início da deformação até o rompimento ou formação do copo) (kN)
80	50	1,6	RUPTURA	INVÁLIDO (RUPTURA)	35
					40
					35
Média					36,67

A Figura 114 apresenta os resultados atingidos utilizando o punção com a geometria Elíptica Profunda (Figura 115).

Figura 114 – Ensaio – Punção Elíptico Profundo



Figura 115 – Punção Elíptico Profundo



Na Tabela 34 apresenta os resultados da Razão Limite de Estampagem (β) para o punção com a geometria Elíptica Extra Profunda que foram obtidos a partir da utilização equação 16. Os dados de Força Aplicada (em kN) em cada ensaio foram coletados no painel da prensa após a finalização dos mesmos.

Tabela 34 – Resultados de Força Aplicada – Punção Elíptico Extra Profundo

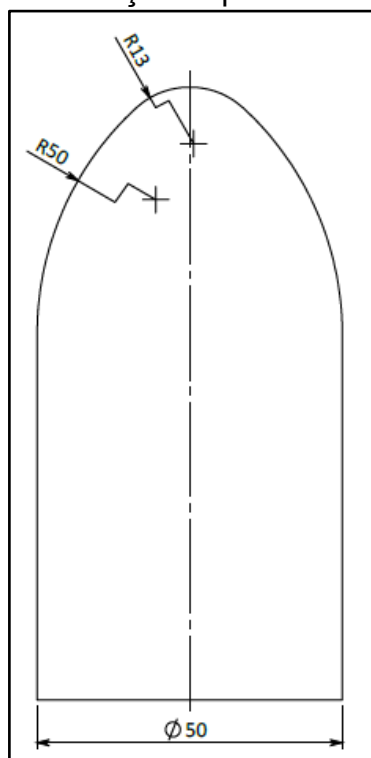
Punção Elíptico Extra Profundo					
Força no prensa chapas (kN)					60
Ø Blank (Mm) (Geratriz)	Ø Punção (Mm)	B	Amostra	Situação	Força utilizada (considerada do início da deformação até o rompimento ou formação do copo) (kN)
80	50	1,6	RUPTURA	INVÁLIDO (RUPTURA)	30
					32
					30
Média					30,67

Na Figura 116 apresentam-se os resultados atingidos utilizando o punção com a geometria Elíptica Profunda (Figura 117).

Figura 116 – Ensaio – Elíptico Extra Profundo



Figura 117 – Punção Elíptico Extra Profundo



A Tabela 35 mostra os resultados médios para a Razão Limite de Estampagem (β) atingidos para as geometrias de punções utilizadas nos ensaios realizados.

Tabela 35 – Resultados – Razão Limite de Estampagem
 β (Razão Limite de Estampagem)

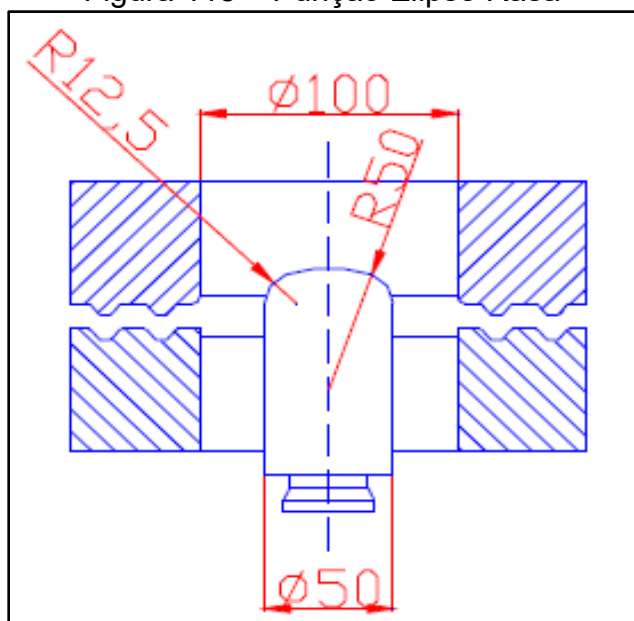
Condição	Punção - Geometria	Ø Blank (mm)				
		80	85	90	95	100
Embutimento	Cilíndrica	1,6	1,7	1,8	1,9	0
Embutimento	Elíptica Rasa	1,6	1,7	1,8	0	0
Embutimento / Estiramento	Hemisférico	0	0	0	0	0
Estiramento	Elíptico Profundo	0	0	0	0	0
Estiramento	Elíptico Extra Profundo	0	0	0	0	0

4.9 ENSAIO NAKAJIMA MODIFICADO

O ensaio Nakajima é o método de ensaio mais indicado para determinar a CLC (Curva Limite de Conformação), pois avalia as deformações de embutimento e as de estiramento através de um único método de ensaio.

Porém como já foi mencionado, o ensaio realizado foi o ensaio Nakajima Modificado, onde punção utilizado no ensaio foi o punção na forma de elipse rasa no diâmetro de 50mm, onde conforme NETTO (2004), o pesquisador Henning em 1997 descreveu que embora Nakajima tenha utilizado punção hemisférico de 100mm de diâmetro no ano de 1968, o punção com diâmetro de 50mm não acarretaria erros no ensaio por ser uma questão de semelhança geométrica (Figura 118).

Figura 118 – Punção Elipse Rasa



Fonte: Netto (2004).

Entretanto, para o ensaio ser validado é preciso fixar o corpo de prova no ferramental onde as ranhuras presentes no mesmo impedem que o corpo de prova deslize durante a ação do punção, a partir do momento que o corpo de prova apresentar uma pequena ruptura o ensaio estará finalizado. Todos os ensaios foram realizados utilizando as informações presentes na Tabela 36.

Tabela 36 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima modificado

Parâmetros para o Ensaio	
Velocidade Inicial	3,7mm/s
Força Utilizada no Prensa Chapas	1000 kN
Força Utilizada no Pistão	200 kN

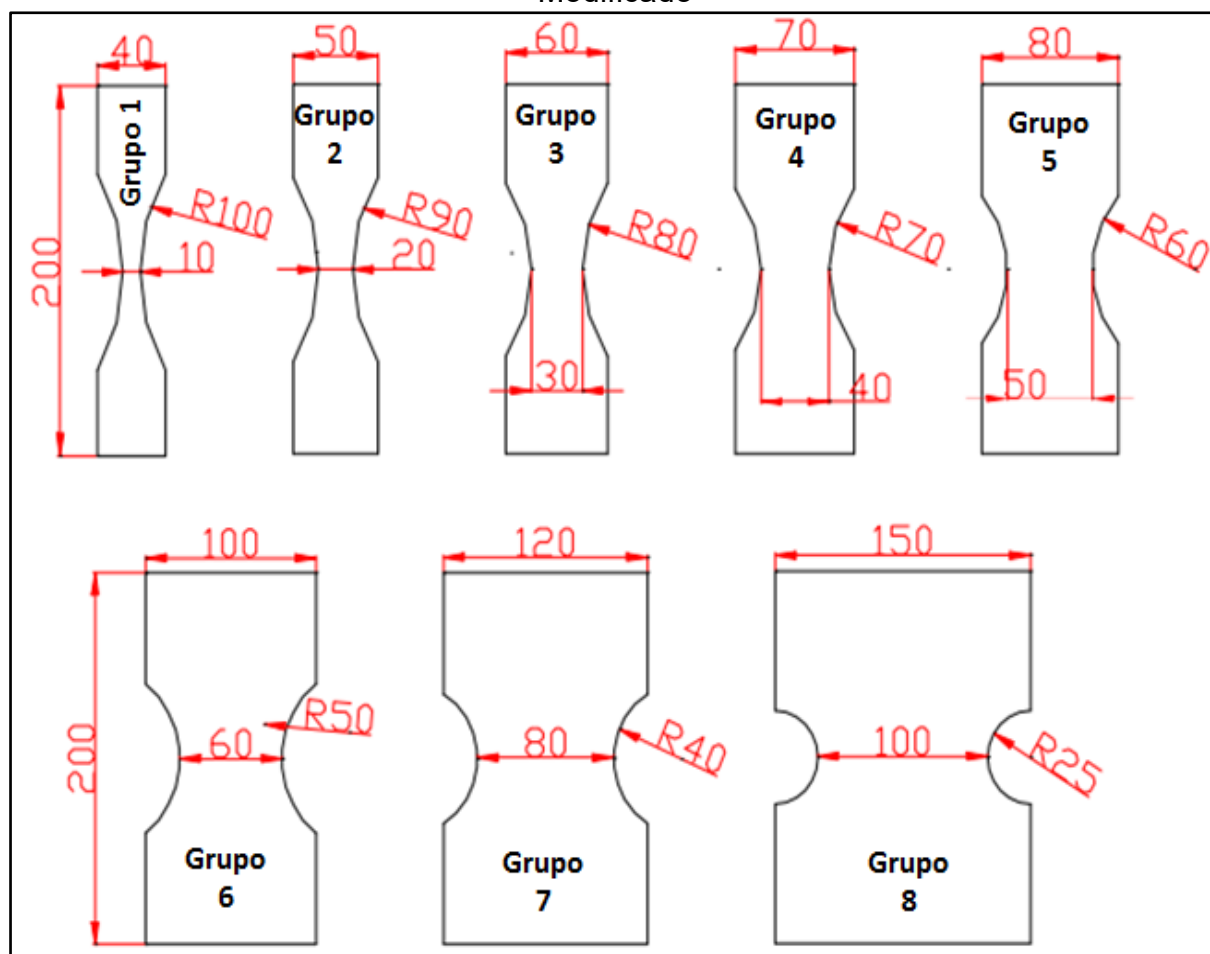
Na Tabela 37 apresentam-se os resultados de deslocamento (em mm) e força utilizada (considerada do início da deformação até o rompimento) (em kN) coletados no painel da prensa. Lembrando que foram ensaiados 3 corpos de prova para cada uma das 8 condições.

Tabela 37 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima Modificado

Corpos de Prova	Amostra	Deslocamento (Painel do Equipamento) (mm)	Força Utilizada (Considerada do Início da Deformação até o Rompimento) (kN)
1	01.01	16,4	3
	01.02	15,4	3
	01.03	13,8	2,8
Média		15,20	2,93
2	02.01	14,9	3
	02.02	14,8	3
	02.03	15,3	5
Média		15,00	3,67
3	03.01	16	10
	03.02	16,8	10
	03.03	16,8	10
Média		16,53	10,00
4	04.01	16,7	18
	04.02	17,7	21
	04.03	17,2	19,2
Média		17,20	19,40
5	05.01	15,8	21
	05.02	15,7	19
	05.03	15,4	21
Média		15,63	20,33
6	06.01	14,9	23
	06.02	14,9	24
	06.03	15,1	25
Média		14,97	24,00
7	07.01	14,9	27
	07.02	15	33
	07.03	15,3	30
Média		15,07	30,00
8	08.01	17,4	40
	08.02	16,7	47
	08.03	18,1	58
Média		17,40	48,33

Após o final dos ensaios, os corpos de prova foram divididos em grupos (Figura 119) e posteriormente foi realizada a coleta dimensional dos círculos deformados na região da ruptura (para cada grupo de corpo de prova foram ensaiados 3 amostras).

Figura 119 – Grupos - Corpos de prova para determinar a CLC pelo ensaio Nakajima Modificado



Na Tabela 38 apresentam-se os resultados dimensionais coletados junto aos círculos deformados na região da ruptura (para cada grupo de corpo de prova foram ensaiados 3 amostras).

Tabela 38 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima Modificado

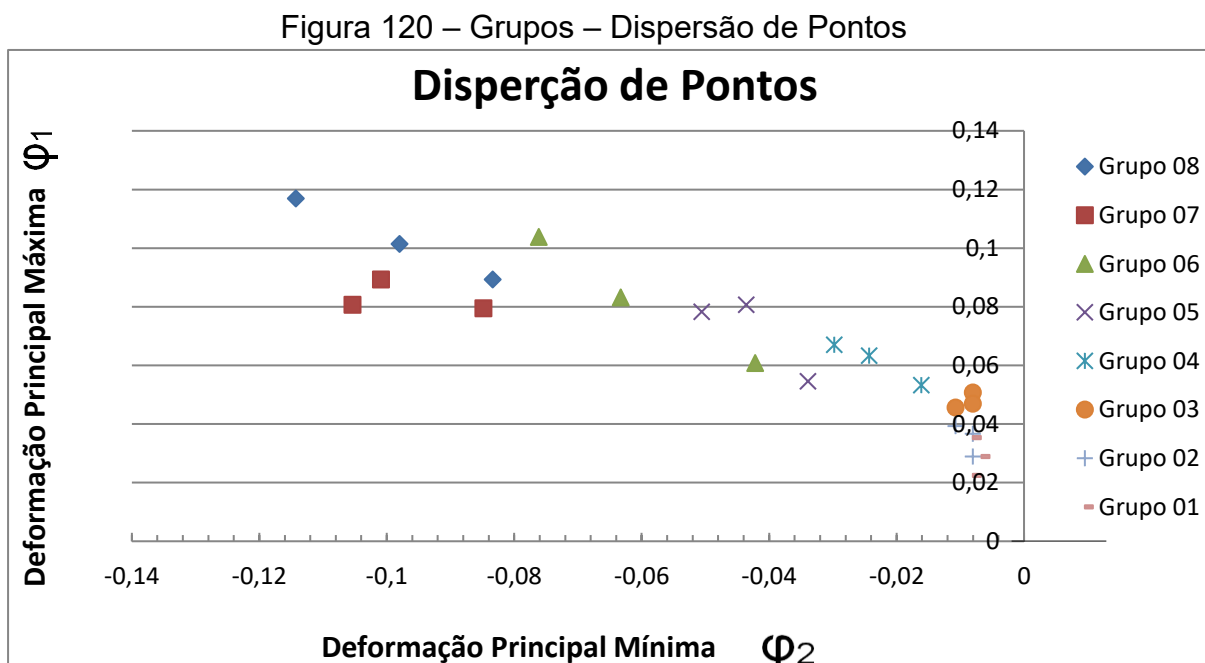
	Círculo Coletado	Corpo de Prova Amostra N.º 3		Círculo Coletado	Corpo de Prova Amostra N.º 2		Círculo Coletado	Corpo de Prova Amostra N.º 1		Média	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
Grupo 8											
	1	2,23	2,92	1	2,25	2,82	1	2,21	2,69	2,23	2,81
	2	2,27	2,9	2	2,28	2,72	2	2,25	2,68	2,267	2,767
	3	2,3	2,85	3	2,32	2,68	3	2,28	2,67	2,3	2,733
Grupo 7	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		Média	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,25	2,7	1	2,26	2,73	1	2,24	2,7	2,25	2,71
	2	2,25	2,68	2	2,25	2,85	2	2,28	2,67	2,26	2,733
	3	2,25	2,65	3	2,28	2,82	3	2,36	2,65	2,297	2,707
Grupo 6	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		Média	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,29	2,72	1	2,34	2,89	1	2,32	2,71	2,317	2,773
	2	2,33	2,62	2	2,38	2,88	2	2,33	2,65	2,347	2,717
	3	2,37	2,59	3	2,43	2,82	3	2,39	2,56	2,397	2,657
Grupo 5	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		MÉDIA	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,34	2,72	1	2,41	2,71	1	2,38	2,68	2,377	2,703
	2	2,37	2,71	2	2,41	2,72	2	2,4	2,7	2,393	2,71
	3	2,41	2,6	3	2,42	2,65	3	2,42	2,67	2,417	2,64
Grupo 4	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		MÉDIA	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,42	2,63	1	2,44	2,68	1	2,42	2,71	2,427	2,673
	2	2,45	2,62	2	2,43	2,73	2	2,44	2,64	2,44	2,663
	3	2,47	2,58	3	2,46	2,7	3	2,45	2,63	2,46	2,637
Grupo 3	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		MÉDIA	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,46	2,61	1	2,5	2,63	1	2,48	2,65	2,48	2,63
	2	2,47	2,63	2	2,48	2,61	2	2,49	2,62	2,48	2,62
	3	2,48	2,64	3	2,46	2,6	3	2,48	2,61	2,473	2,617
Grupo 2	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		MÉDIA	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,47	2,59	1	2,5	2,59	1	2,47	2,6	2,48	2,593
	2	2,46	2,55	2	2,49	2,58	2	2,49	2,59	2,48	2,573
	3	2,48	2,58	3	2,46	2,63	3	2,48	2,59	2,473	2,6
Grupo 1	Círculo Coletado	N.º 3		Círculo Coletado	N.º 2		Círculo Coletado	N.º 1		MÉDIA	
		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)		a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
	1	2,49	2,56	1	2,48	2,58	1	2,48	2,58	2,483	2,573
	2	2,47	2,52	2	2,49	2,57	2	2,48	2,58	2,48	2,557
	3	2,48	2,6	3	2,48	2,6	3	2,48	2,57	2,48	2,59

Com as médias definidas, calculou-se com base nas equações 17 e 18 deformações principais mínima e máxima (φ_1 e φ_2), onde o resultado encontrado pode ser visualizado na Tabela 39.

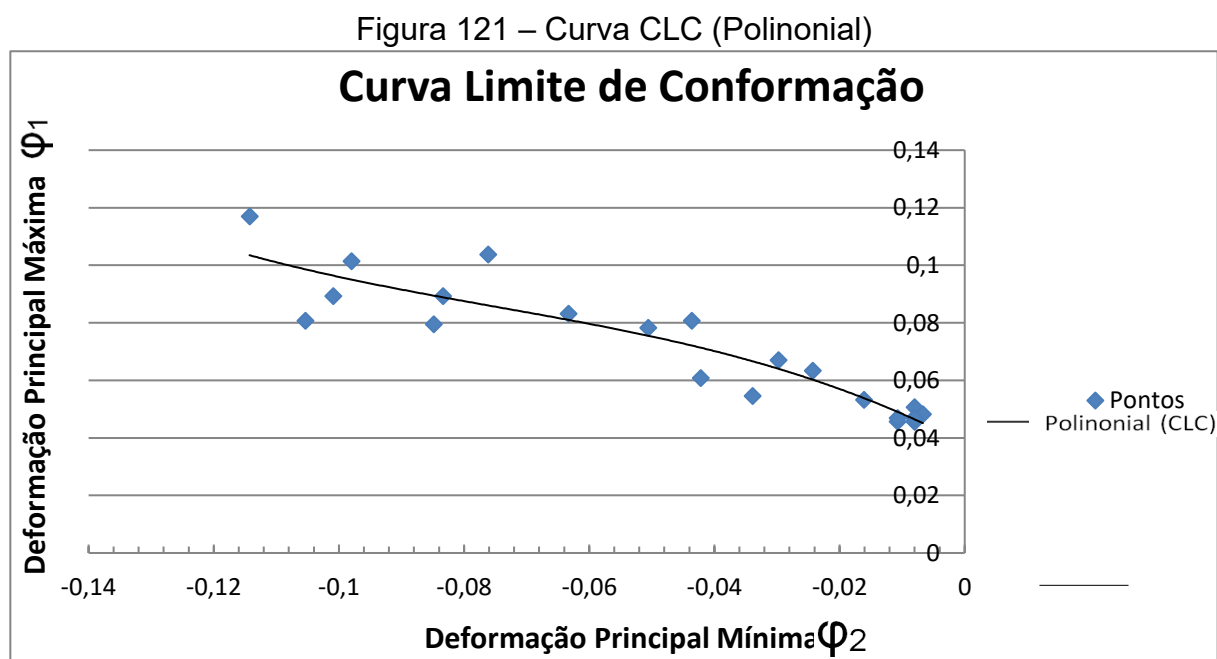
Tabela 39 – Parâmetros utilizados no ensaio Nakajima modificado

	Círculo Coletado (Médias)	Deformações (Médias)	
		φ_1	φ_2
Grupo 8			
	1	-0,114289146	0,116893751
	2	-0,097980408	0,101352494
	3	-0,083381609	0,089231134
Grupo 7			
	1	-0,105360516	0,080657903
	2	-0,100925919	0,089231134
	3	-0,084831936	0,079427134
Grupo 6			
	1	-0,076161361	0,103759234
	2	-0,06329485	0,083114907
	3	-0,042211849	0,060781472
Grupo 5			
	1	-0,050591786	0,078194848
	2	-0,043603637	0,080657903
	3	-0,033901552	0,054488185
Grupo 4			
	1	-0,029772158	0,067035401
	2	-0,024292693	0,063287739
	3	-0,016129382	0,053224761
Grupo 3			
	1	-0,008032172	0,050693114
	2	-0,008032172	0,046883586
	3	-0,010723963	0,045610511
Grupo 2			
	1	-0,008032172	0,038653318
	2	-0,008032172	0,028911343
	3	-0,010723963	0,039220713
Grupo 1			
	1	-0,006688988	0,028911343
	2	-0,008032172	0,022413595
	3	-0,008032172	0,035367144

A Figura 120 apresenta os dados de dispersão de pontos médios apresentados na Tabela 39.



Na Figura 121, pode-se visualizar a Curva Limite de Conformação traçada a partir dos resultados obtidos de ϕ_1 e ϕ_2 registrados na Tabela 34.



No Diagrama Curva Limite de Conformação (CLC) no qual o eixo das ordenadas corresponde às deformações principais máximas φ_1 (no sentido do comprimento) e o eixo das abscissas corresponde a φ_2 mínimas (no sentido da largura), é possível observar que a curva se modelou em apenas um quadrante, onde segundo a Figura 46 o material terá um comportamento de estiramento insuficiente e enrugamento (o que ficou evidente com os experimentos realizados no ensaio dos Cinco Punções).

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 MICROESTRUTURA

As microestruturas das amostras avaliadas apresentaram uma estrutura uma matriz martensítica com grãos de austenita retida e perlita, o que é característico nos materiais AHSS, e no caso do Hardox® 450 que tende a ter bons resultados ao desgaste que é uma necessidade devido à aplicação orientada pelo fabricante do mesmo.

5.2 ENSAIO DE DUREZA

No ensaio de dureza, o resultado de 458 Vickers (HV) (o que equivale a aproximadamente a 429 HBW) apresentado pela amostra ensaiada ficaram dentro da margem valores (Dureza Brinell entre 425 e 475 HBW) encontrados nas bibliografias e no catálogo do fabricante.

5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS - HARDOX® 450

Algumas propriedades mecânicas foram avaliadas através do ensaio de tração, onde observou-se que há uma influência insignificativa no sentido de laminação, pois os resultados para os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90° apresentaram um deslocamento médio em torno de 2mm, e as Curva de Engenharia média e de Escoamento média apresentaram resultados bem próximos com pouca diferença entre os mesmos.

Os resultados aonde o sentido de laminação utilizado foi de 45° apresentaram uma leve retração em comparação com os sentidos de laminação de 0°, 45° e 90°, para ambas as curvas. Os resultados obtidos para o Limite de Resistência à Tração médio também apresentaram pouca diferença variando entre 1550 MPa e 1570 MPa, sendo estes valores bem próximos ao que outros pesquisadores obtiveram.

5.4 ANÁLISE DA ANISOTROPIA

Na análise da Anisotropia pode-se observar que os índices de anisotropia (r), apresentados em todos os sentidos de laminação (0° , 45° e 90°) ficaram abaixo de 1. Na anisotropia média (r_m) que avalia a capacidade de a chapa resistir ao afinamento o resultado obtido foi de -0,350. Enquanto que a anisotropia planar (Δr) que avalia a tendência ao orelhamento, o valor apresentado foi de 0,018.

5.5 ENSAIO ERICHSEN

No ensaio Erichsen pode-se observar que a situação aonde ocorreu o uso do lubrificante os valores de deslocamento foram superiores a situação aonde não foi utilizado o lubrificante. Na condição sem lubrificante o deslocamento máximo atingido foi de 6,27mm enquanto na situação aonde se aplicou a Vaselina Industrial o deslocamento máximo atingido foi de 7,28mm.

Supõe-se que o efeito gerado pelo lubrificante comparando-se com a condição sem lubrificante, fez com que o punção obtivesse uma melhor distribuição da pressão em torno da chapa. Ocasionalmente uma deformação plástica mais homogênea até a deformação máxima na estrição.

5.6 ENSAIO EXPANSÃO DE FUROS

No ensaio de expansão de furos realizado sem a presença de lubrificante se observou que a taxa de expansão do furo (λ) média resultante foi de 66% e a altura da flange média atingida até a ruptura ficou em 12,195mm, utilizando uma força média nos ensaios de 22380 kN. Supõe-se que a taxa de expansão poderia apresentar taxas de expansão maiores, uma vez que o atrito seria amenizado.

5.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO SOB TENSÃO

Nos ensaios de dobramento sob tensão realizados observou-se que atrito é mais ameno em condições onde ocorreu presença de lubrificantes. Na tabela 40, podemos visualizar estas evidências.

Tabela 40 – Coeficiente de Atrito

Diâmetro dos Pinos (mm)	Condição	Coeficiente de Atrito (μ - adimensional)
Ø13	Com Lubrificação	0,03811
	Sem Lubrificação	0,11575
Ø20	Com Lubrificação	0,10248
	Sem Lubrificação	0,11894

Observou-se também que nas condições onde o pino possui o diâmetro de 13mm há uma diferença maior entre o atrito se comparado ao diâmetro de 20mm, onde supõe-se que o atrito esta diretamente ligado a zona de contato, ou seja, o pino com diâmetro de 20mm oferece uma zona de contato muito maior que o diâmetro de 13mm.

5.8 ENSAIO DOS MÚLTIPLOS PUNÇÕES

No ensaio de Múltiplos Punções (que avalia a Razão Limite de Estampagem) com a presença de lubrificante o comportamento do material aos punções com características de embutimento obtiveram alguns resultados satisfatórios enquanto que em punções com características de estiramento e variação de raios os resultados não atingiram uma situação satisfatória. Na Tabela 41, pode-se visualizar os resultados da Razão Limite de Estampagem obtidos.

Tabela 41 – Resultados – Razão Limite de Estampagem

β (Razão Limite de Estampagem)						
Condição	Punção - Geometria	Ø Blank (Mm)				
		80	85	90	95	100
Embutimento	Cilíndrica	1,6	1,7	1,8	1,9	0
Embutimento	Elíptica Rasa	1,6	1,7	1,8	0	0
Embutimento / Estiramento	Hemisférico	0	0	0	0	0
Estiramento	Elíptico Profundo	0	0	0	0	0
Estiramento	Elíptico Extra Profundo	0	0	0	0	0

Devido à estrutura martensítica do material, dureza elevada e aos resultados de índice de anisotropia vinculando o material a uma situação não favorável a estampagem, acredita-se que o material não possui boas características de estiramento enquanto que para embutimento o material ofereceu uma resposta satisfatória até determinado *blank*. Assim é possível afirmar que o material possui um limite de

embutimento satisfatório e de estiramento, e assim não sendo mais apto a apresentar um comportamento adequado de estampagem para geometrias mais regulares.

5.9 ENSAIO NAKAJIMA MODIFICADO

O ensaio Nakajima Modificado (o ensaio que capaz de reproduzir estados de deformações uniaxiais e biaxiais estampagem) é o método de ensaio mais indicado para determinar a CLC (Curva Limite de Conformação), pois avalia as deformações de embutimento e as de estiramento através de um único método de ensaio.

Porém como é possível visualizar na Tabela 34, os valores de ϕ_1 (Deformação Principal Máxima (sentido do comprimento)) ficaram abaixo de zero ($\phi_1 < 0$), enquanto os valores de ϕ_2 ficaram acima de zero ($\phi_2 > 0$).

Assim o material possui baixa (quase nula) capacidade de estiramento e pouca capacidade de embutimento com tendência ao orelhamento.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos ensaios realizados, algumas conclusões podem ser levantadas para o Aço Hardox® 450:

1. A microestrutura apresentou a presença de uma matriz martensítica com grãos de austenita retida e perlita, o que é característico em Aços de alta resistência;
2. No ensaio de Dureza, pode-se verificar que o Aço possui uma dureza de 458 Vickers (HV) (o que equivale a aproximadamente a 429 HBW), atendendo a informação presente no catálogo do fabricante;
3. Na análise das propriedades mecânicas, onde foi utilizado o ensaio de tração, se pode verificar que a Curva de Engenharia e a Curva de Escoamento apresentaram resultados bem próximos, sendo que isto se deve ao fato de o material não possuir uma boa característica de deformação. Também pode-se observar que sentido de laminação a 0° ofereceu maior deslocamento até a ruptura. Também se verifica que nesta direção de laminação a 0° ocorreu a maior resistência mecânica em relação as demais direções;
4. Na análise de Anisotropia, onde foi utilizado o ensaio de tração, pode-se verificar que o Aço analisado não possui boas características de estampabilidade uma vez que o índice de anisotropia (r) ficou abaixo de 1 em todas as direções;
5. No ensaio Erichsen pode-se observar que o mesmo apresenta um resultado de deslocamento mais elevado na condição com Lubrificante, aumentando o estiramento do material;
6. No ensaio de Expansão de Furo realizado pode-se observar que a média da taxa de expansão do furo (λ) foi de 66% e média da altura da flange atingida até a ruptura ficou em 12,195mm, utilizando um força média de 22380 kN. Acredita-se que a taxa de expansão resultante atingida poderia ser superior a partir do uso de lubrificantes nos ensaios uma vez que o atrito seria amenizado e assim interferindo na ruptura da borda;
7. No ensaio de Dobramento sob Tensão, para a situação aonde o pino de Ø20mm foi utilizado nas condições com e sem lubrificante apresentou resultados próximos enquanto na situação aonde o pino de Ø13mm

apresentou uma diferença de resultados mais significativa. Sendo que se supõe que este fatos estão diretamente ligados a zona de contato;

8. No ensaio de Múltiplos Punções realizado é possível observar que o material apresentou um comportamento satisfatório de embutimento até um determinado diâmetro de *blank*, para o punção Cilíndrico e o punção Elíptico Raso, que apresentam geometrias mais uniformes. Para os demais punções (Hemisférico, Elíptico Profundo, Elíptico Extra Profundo), que apresentam geometrias mais variadas o material apresentou um comportamento insatisfatório. Assim é possível afirmar que material possui limitações para as condições de embutimento e não possui boas condições de estiramento. Estas análises podem ser confirmadas a partir dos resultados de dureza elevada, índice de anisotropia e estrutura martensística;
9. No ensaio Nakajima Modificado é possível observar que o material apresentou um comportamento de embutimento baixa, e baixa capacidade de estiramento. Estas análises podem ser confirmadas a partir dos resultados de dureza elevada, índice de anisotropia e estrutura martensística.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados o Aço Hardox® 450 possui baixa capacidade para a deformação a frio (temperatura ambiente), com baixa capacidade de estiramento e permitindo algumas condições de embutimento e apresentou o “orelhamento”, uma vez que é um material bastante anisotrópico.

Os resultados encontrados nas pesquisas bibliográficas que apresentaram ensaios e estudos com Aço Hardox® 450 apresentaram números bem próximos aos encontrados neste estudo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16281:** Determinação do índice de embutimento em chapas de Aço pelo método Erichsen modificado. ABNT, 2014.

ARRUDA, R. P. de, FOLLE, L. F., SCHAEFFER, L., Simulação avalia ensaio de cinco punções para seleção de materiais. **Corte & Conformação**. São Paulo. jan/2011, p. 64-71.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E517-00, standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal**. ASTM, 2010.

BASTOS, A. L., **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**, 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BILLUR, E.; ALTAN, T. Three generations of advanced high strength steels for automotive applications, Part III. **Stamping Journal**, 2014.

BAÚ, A. R., **Estudo do processo de estampagem para materiais alternativos na fabricação de um componente para a indústria de máquinas agrícolas**, 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 7ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2011.

CARMO, A. C. C. do, **Análise estrutural através de simulação computacional de caçambas de caminhão basculante na mineração utilizando o aço microligado ao nióbio**, 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

CIMM. Centro de informação Metal Mecânica. **O que são as curvas limites de conformação**. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6602-o-que-sao-as-curvas-limite-de-conformacao#. Acesso em: 10 mar. 2019.

CHATTERJEE, D., Behind the development of advanced high strength steel (AHSS) including stainless steel for automotive and structural applications - an overview, **Materials Science and Metallurgy Engineering**, v.4, n. 1, p. 1-15, 2017.

CHEMIN FILHO, R. A., **Avaliação das deformações de chapas finas e curvas CLC para diferentes geometrias de punções**, 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CRIVELLARO, R. S., **Estudo da estampabilidade de tailored blanks soldadas a laser**. 2003. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DIAS, A. M. da S., **Análise numérica do processo de fratura no ensaio de indentação vickers em uma liga de carboneto de tungstênio com cobalto**. 2004. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50 114, Zugversuch ohne feindehnungsnessung an blechen**. Bänchen oder. Streifen mit liner dicke unter 3 mm. Husg. Deutsches institut für normung E.V. Berlin.Colonia: Beuth Verlog, 1978.

FARIA NETO, A.R.; HARADA A.; PEREIRA M.S. **Propriedades mecânicas relacionadas com a microestrutura de aços avançados destinados à indústria automobilística**. VI CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO - FOCO INDÚSTRIA AUTOMOTIVA, 2012.

FANG, X., FAN, Z., RALPH, B., The relationships between tensile properties and hole expansion property of C-Mn steels. **Journal of Materials Science**, v. 38, n.18, p. 3877 – 3882, 2003.

FENG, Z., KUO, M., **Friction stir spot welding of advanced high-strength steels – a feasibility study**. SAE International, 2005.

FERRARINI, J. L., **Caracterização dos Materiais para o Processo de Estampagem**, 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FOLLE, L. F., ARRUDA, R. P. de, SCHAEFFER, L., Escolha do Lubrificante Correto Torna Mais Precisa a Curva-Limite de Conformação. **Corte & Conformação**. São Paulo. abril/2008, p. 64-76.

FOLLE, L. F., **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem**, 2012. 131 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FONSTEIN, N., **Advanced high strength sheet steels: Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties**. Chicago: Springer, 2015

GALINDO-NAVA, E. I., RIVERA-DÍAZ-DEL-CASTILLO, P. E. J., Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels. **Scripta Materialia**, v. 110, n. 1, p. 96–100, 2016.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GEDNEY, R. Sheet metal formability. **Advanced Materials & Processes**, v. 160, n. 8, p. 33-36, 2002.

GIPIELA, M. L., **Estudo da expansão de furos e conformabilidade de chapas de aço multifásico CPW800**, 2012. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

HOUSE J. W.; GILLIS P. P., **Testing Machines and Strain Sensors**. ASM Handbook Mechanical Testing and Evaluation, Volume 8. Ohio, USA, 2000, p. 211-220.

HUB, J., KOMENDA, J., Ballistic Resistance of Steel Plate Hardox upon Impact of on-Penetrating Projectiles. **Advances in Military Technology**, v.4, n. 2, p. 79-91, 2009.

HU, J.; MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J., **Mechanics of sheet metal forming**. 2th edition, London: Elsevier, 2002.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12004-1**: Metallic Materials — Sheet and Strip — Determination of Forming-Limit Curves — Part 1: Measurement and Application of Forminglimit Diagrams in the Press Shop. ISO, 2008.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12004-2**: Metallic Materials — Sheet and Strip — Determination of Forming-Limit Curves — Part 2: Determination of forming-Limit Curves in the Laboratory. ISO, 2008.

IVANISKI, T. M., **Caracterização de chapas de alta resistência em aço dp600 e hardox450® visando a aplicação como máscaras utilizadas em matrizes de forjamento a quente**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

IVANISKI, T. M.; ZOTTIS, J.; COSTA, L. de L. de; ROCHA, A. da S.; SCHAEFFER, L.; **Análise das propriedades termomecânicas de uma chapa martensítica de grãos finos**. 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, Joinville. 2017.

KEELER, S.; KIMCHI, M.; MOONEY, P. J., **Advanced high-strength steels application guidelines**. v. 6. WorldAutoSteel. 2017.

KUMAR, M. V.; BALASUBRAMANIAN, V.; RAO, A. G. Hot tensile properties and strain hardening behaviour of Super 304HCu stainless steel. **Journal of Materials Research and Technology**, 2016.

LIMA, E. de. **Avaliação do limite de estrição de aços avançados de alta resistência**, 2017. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MARRA, K. M., **Aços dual phase da Usiminas: características e potencial de aplicação em veículos automotores**. 2º WORKSHOP SOBRE INOVAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE AÇOS DE ELEVADO VALOR AGREGADO - FOCO INDÚSTRIA AUTOMOTIVA, Congresso Anual da ABM, Santos. 2008.

MEDEIROS, E. C. de; CURI, E. M.; CASTRO, R. M.; CAVALER, L. C. de C. **Comparação do desgaste abrasivo das chapas de aço hardox® 450 e 550 e do**

polímero uhmw usados na superfície do sistema de transporte do minerador contínuo Joy Modelo 14CM09. V CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, Criciúma. 2017.

NETTO, S. E. S., **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação**, 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

OLIVEIRA, A. F. de. **Caracterização de um aço IF após relaminação no laminador de encruamento**, 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

OTOMAR, H. P., **Estudo comparativo da estampabilidade da liga de alumínio aa1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo**. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2010.

PAUL, S. K.; MUKHERJEE M.; KUNDU S.; CHANDRA S. **Prediction of hole expansion ratio for automotive grade steels. Computational Materials Science**, v. 89, p. 189–197, 2014.

PAUL, S. K., Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 89, p. 177–197, 2013.

RODRIGUES, M. G. dos S., **Produção de componentes por estampagem a frio: análise ao modelo de custos do produto**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. 2016.

ROSADO, D. B., **Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio em aços com resistência à tração acima de 1000 MPa**. Dissertação (Mestrado Acadêmico), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia mecânica: Tecnologia da deformação plástica**. 2. ed. Lisboa, Portugal, Escolar, 2010.

SSAB. **Hardox 450 CR Sheet**. 2017. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: 20 Agosto 2017.

SCHAEFFER, L., **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SOUSA, D. A. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2012.

SOUZA, F. B. P. de. **Simulação numérica do processo de estampagem a quente do aço USIBOR® 1500P**. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

SOUZA, S. A. de. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Editora Blücher, 1982.

THESING, L. A., **Expansão de furos em chapas de aço avançado de alta resistência (DOCOL® 190M)**. 2018. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018.

TIGRINHO, L. M. V., **Estudo da fratura do aço dp600 submetido a diferentes estados de tensão/ deformação**. 2011. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2011.

TURRETA, A., **Investigation of thermal, mechanical and microstrutural properties of quenchenable high strength steels in hot stamping operations**. 2008. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universitàdegli Studi di Padova, Itália

TSIPOURIDIS, P., **Mechanical properties of dual phase steels**. 2006. 122 f. (Doutorado em Engenharia). Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München Technischen Universität, Munich, Alemanha.

ULEWICZ, R.; MAZUR, M.; BOKUVKA, O. Structure and mechanical properties of fine-grained steels. Periodica Polytechnica. **Transportation Engineering**, v. 41, n. 2, p. 111-115, 2013.

ZANLUCHI, J. J. D., **Avaliação de retorno elástico para processos de estampagem à frio dos aços bifásicos DP600 E DP800**, 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Metalúrgia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Levantamento da Curva Limite de Conformação (CLC) entre os outros diversos tipos de Aço Hardox.
- Ensaio de Estampagem Profunda com o Aço Hardox® 450.
- Análises de alternativas para a estampagem de Aços de alta resistência (AHSS). Como por exemplo, o “step by step” ou trabalhos com diferentes forças de prensa-chapas e modificações do raio da matriz.
- Efeitos da estampabilidade do Aço Hardox® 450 no processo de dobramento.
- Análises da relação do Raio da Matriz com a espessura da chapa no processo de Estampagem Profunda. Os ensaios de Dobramento podem fornecer uma boa indicação sobre os procedimentos para produzir componentes com os Aços AHSS
- Análise do Índice de Encruamento (n) para os Aços AHSS, pois não é constante como comumente ocorre com os Aços de baixo carbono.
- Análise mais criteriosa das Curvas Limites de Conformação (CLC) para os Aços AHSS.