

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E AVALIAÇÃO
EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS
NA ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE AÇO**

Adriano Roberto Krevicz

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:
Engenharia Industrial, Ramo Engenharia Mecânica

Julho de 2022

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE AÇO

Adriano Roberto Krevicz

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia Industrial, Ramo Engenharia Mecânica** no âmbito da **Dupla Diplomação** com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:

Prof.º Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita

Prof.º Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Orientadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.º Dr. Luciano Augusto Lourençato

Prof.º Dr. Thiago Antonini Alves

Julho de 2022

“Sucesso é uma decisão!”

Dedico este trabalho a Deus e a minha família.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por eu concluir este trabalho. São várias as pessoas às quais eu gostaria de expressar a minha gratidão e que, direta ou indiretamente, ajudaram a concluir esta etapa. A todos os colaboradores deste trabalho, o meu reconhecimento. Em especial:

O agradecimento mais importante, a minha família. Especialmente meus pais Augusto e Noeli, por todo o apoio e incentivo incondicional ao longo de toda a minha vida.

Aos professores orientadores deste trabalho: Prof.º Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita, Prof.º Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto, Prof.º Dr. Luciano Augusto Lourençato e Prof.º Dr. Thiago Antonini Alves. Pelo apoio, orientação, estímulo, compreensão e dedicação proporcionados, os meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do IPB, especialmente a Luísa Barreira, por toda a disponibilidade, apoio técnico e conhecimento compartilhado.

Ao Instituto Politécnico de Bragança por proporcionar, juntamente com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, a oportunidade da Dupla Diplomação e todos os ensinamentos que tive nesse período.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a todos professores, por todos ensinamentos, aprendizados e pela oportunidade de desenvolver este trabalho na Dupla Diplomação.

À equipe Baja Galha Azul, por todos os desafios e as experiências que foram responsáveis por abrir diversas portas com diferentes possibilidades para o desenvolvimento da minha vida pessoal e carreira profissional.

A todos amigos, tanto no Brasil quanto em Portugal, por todas as conversas, conselhos e apoio desde antes da realização deste trabalho.

Resumo

A constante exigência de melhores produtos e em larga escala resultam no desenvolvimento de novos materiais, com características únicas e que requerem processos de produção e conformação rápidos, eficientes, buscando produtos da melhor qualidade e com os menores custos possíveis. Deste modo, o conhecimento das propriedades mecânicas, dos limites de conformação são indispensáveis na avaliação das do comportamento dos novos materiais ao longo dos processos de fabricação. Mais importante ainda é saber quais são os resultados obtidos quando os parâmetros destes processos são alterados, sempre buscando a melhor qualidade e o menor custo possível.

Este trabalho teve como objetivo principal investigar, desenvolver e realizar a simulação numérica e avaliação experimental dos parâmetros envolvidos na estampagem de chapas de aço. Para cumprir estes objetivos, foi realizada a caracterização das propriedades mecânicas de três aços inoxidáveis ferríticos. Utilizando ensaios de tração com a técnica de correlação digital de imagem (CDI) e, também utilizando a CDI, desta vez com testes de Nakajima, foi realizada a caracterização das curvas limites de conformação (CLC's) dos materiais. Com os resultados percebe-se que, os corpos de prova na direção de laminação apresentaram menores valores de tensão de escoamento e resistência a tração. Para o encruamento dos materiais é observada uma tendência, onde a direção de 0° apresentou os maiores valores. Outra propriedade importante que foi avaliada é a anisotropia. Houve aumento dos valores de anisotropia junto com o aumento da direção dos corpos de prova em relação à direção de laminação, além da redução dos valores de anisotropia com o aumento da espessura do material. A redução de anisotropia representa um aumento da tendência de redução da espessura em relação às demais dimensões, o que é indesejado para processos de estampagem. Foram construídas as curvas limites de conformação a partir de ensaios experimentais e simulações numéricas, onde houve grande diferença entre os resultados encontrados experimentalmente contra as simulações. Segundo os ensaios experimentais, os dois materiais apresentaram boa capacidade de embutimento.

Palavras Chave: *Estampagem, Simulação numérica, Avaliação experimental, Curva limite de conformação, Chapas de aço, Parâmetros de estampagem.*

Abstract

The constant demand for better products and on large scale results in the development of new materials, with unique characteristics and that require fast, efficient production and conformation processes, seeking products of the best quality and with the lowest possible costs. Thus, knowledge of mechanical properties and conformation limits are essential in evaluating the behavior of new materials throughout the manufacturing processes. It is even more important to know which are the results obtained when the parameters of these processes are changed, always looking for the best quality and the lowest possible cost.

The main objective of this work is to investigate, to develop and perform the numerical simulation and experimental evaluation of the parameters involved on the stamping process of steel sheets. To complete the objectives, the characterization of the mechanical properties of three ferritic stainless steels was carried out. Tensile tests and Nakajima tests were carried out with the digital image correlation technique (DIC) for the materials characterization and the determining of the forming limit curves (FLC's). The results show that the specimens that followed the rolling direction had lower values in terms of yield and tensile strength. For the material hardening results, a trend is observed, where the 0° direction presented the highest values. Another important property that was evaluated is anisotropy. There was an increase in anisotropy values along with an increase in the direction of the specimens in relation to the rolling direction, in addition to a reduction in anisotropy values with increasing material thickness. The anisotropy reduction represents an increase in the tendency of thickness reduction in relation to the other dimensions, which is undesirable for stamping processes. The forming limit curves were constructed from experimental tests and numerical simulations, there was a great difference between the results found experimentally against the simulations. According to the experimental tests, the two materials show a good drawing capacity.

Keywords: *Stamping, Numerical simulation, Experimental evaluation, Forming Limit Curves, Steel sheets, Stamping parameters.*

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS	IX
NOMENCLATURA	X
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS.....	4
1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE	4
CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE.....	6
2.1 ESTAMPAGEM.....	6
2.2 ESTAMPAGEM SEQUENCIAL	10
2.2.1 <i>PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM</i>	10
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS CHAPAS	13
2.4 ANISOTROPIA.....	18
2.5 AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÕES E OBTENÇÃO DA CLC.....	21
2.5.1 <i>DIAGRAMA E CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO</i>	22
2.5.2 <i>ENSAIOS</i>	24
2.5.3 <i>MEDIÇÃO E ANÁLISE DO PERFIL DE DEFORMAÇÃO</i>	28
2.5.4 <i>IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO</i>	31
2.6 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CDI).....	34
CAPÍTULO 3: CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES E OBTENÇÃO DAS CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO	36
3.1 MATERIAIS.....	36
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	40
3.2.1 <i>METODOLOGIA E SETUP EXPERIMENTAL</i>	44
3.2.2 <i>RESULTADOS</i>	52

3.3	ENSAIO DE NAKAJIMA	67
3.3.1	METODOLOGIA E SETUP EXPERIMENTAL	67
3.3.2	RESULTADOS	82
3.4	OBTENÇÃO DAS CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC).....	87
CAPÍTULO 4: SIMULAÇÃO NUMÉRICA		93
4.1	METODOLOGIA.....	93
4.2	RESULTADOS	96
4.3	COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM.....	99
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....		102
5.1	CONCLUSÕES	102
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	103
REFERÊNCIAS		105
ANEXOS		111
ANEXO I – PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DA CURVA EM FORMATO DE SINO		112
ANEXO II - DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS CEDIDAS PELA EMPRESA CATRAPORT		114
ANEXO III – DESCRIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CEDIDOS PELA EMPRESA CATRAPORT.....		116
ANEXO IV – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO		117
ANEXO V - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES PARA OS CÁLCULOS DE ANISOTROPIA		119
ANEXO VI – PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE NAKAJIMA		125
ANEXO VII – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS: SUPERFÍCIES		126
ANEXO VIII – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ATRITO		127
ANEXO IX – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS: CÁLCULOS DE DEFORMAÇÕES		134

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema de uma ferramenta de embutimento profundo, adaptado de [10].....	7
Figura 2 – Embutimento profundo, adaptado de [10].	8
Figura 3 – Ferramenta sem guia própria, adaptado de [10].....	9
Figura 4 – Ferramenta guiada por pinos e buchas, [10].	9
Figura 5 – Parâmetros do Processo de Estampagem, [14].	11
Figura 6 – Defeitos em peças estampadas, adaptado de [18].	12
Figura 7 – Diagrama tensão vs. deformação (de engenharia), adaptado de [24].	14
Figura 8 – Diagrama tensão vs. deformação com limites de escoamento, adaptado de [10]. ...	15
Figura 9 – Diagrama tensão vs deformação verdadeira, adaptado de [10].....	17
Figura 10 – Diagrama tensão vs deformação verdadeira logarítmicos, adaptado de [10].....	17
Figura 11 – Anisotropia após o processo de laminação, adaptado de [10].	19
Figura 12 – Deformação em um elemento de volume, adaptado de [10].....	19
Figura 13 – Diagrama limite de conformação (DLC), adaptado de [20], [32].....	22
Figura 14 – Formato para corpos de prova, adaptado de [37].....	25
Figura 15 – Corpos de prova após a deformação, adaptado de [23].	25
Figura 16 – Tipos de grades utilizadas, adaptado de [39].	26
Figura 17 – Teste de Nakajima, adaptado de [37].....	28
Figura 18 – Deformações nas grades circulares, adaptado de [40].	29
Figura 19 – Blocos identificados antes e depois da deformação, adaptado de [52].....	34
Figura 20 – Amostras fornecidas pela Catraport.	37
Figura 21 – Aplicação dos aços inox do estudo, [60].....	38
Figura 22 – Conformabilidade de aços ferríticos x aços austeníticos, [63].....	40
Figura 23 – Corpo de prova para o Ensaio de Tração, adaptado de [64].	41
Figura 24 – Posicionamento da câmera e refletor.	45
Figura 25 – Corpos de prova para testes – Aço 1.4509, 2mm, 45°.	46
Figura 26 – Indicações do posicionamento da câmera.	47
Figura 27 – Calibração do posicionamento da câmera.....	47
Figura 28 – Definição de zoom e exposição.....	48
Figura 29 – Qualidade do padrão da superfície.	49
Figura 30 – Perda de pontos ensaio definitivo.	49
Figura 31 – Posicionamento e Identificação dos extensômetros.....	50
Figura 32 – Deformações no gráfico tensão x deformação, adaptado de [64].	51
Figura 33 – Corpos de prova após os ensaios de tração.	52
Figura 34 – Curvas de engenharia 1.4509 1,2mm.....	52
Figura 35 – Curvas de verdadeiras 1.4509 1,2mm.....	53
Figura 36 – Curvas verdadeiras 1.4509 1,2mm para o encruamento.	53
Figura 37 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4509 1,2mm.....	54
Figura 38 – Curvas de engenharia 1.4509 2mm.....	55
Figura 39 – Curvas de verdadeiras 1.4509 2mm.....	55
Figura 40 – Curvas verdadeiras 1.4509 2mm para o encruamento.	56

Figura 41 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4509 2mm.....	56
Figura 42 – Curvas de engenharia 1.4509 3mm.....	57
Figura 43 – Curvas de verdadeiras 1.4509 3mm.....	57
Figura 44 – Curvas verdadeiras 1.4509 3mm para o encruamento.....	58
Figura 45 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4509 3mm.....	58
Figura 46 – Curvas de engenharia 1.4510 1,2mm.....	59
Figura 47 – Curvas de verdadeiras 1.4510 1,2mm.....	59
Figura 48 – Curvas verdadeiras 1.4510 1,2mm para o encruamento.....	60
Figura 49 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4510 1,2mm.....	60
Figura 50 – Curvas de engenharia 1.4512 1,0mm.....	61
Figura 51 – Curvas de verdadeiras 1.4512 1,0mm.....	61
Figura 52 – Curvas verdadeiras 1.4512 1,0mm para o encruamento.....	62
Figura 53 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4512 1,0mm.....	62
Figura 54 – Curvas de engenharia 1.4512 1,2mm.....	63
Figura 55 – Curvas de verdadeiras 1.4512 1,2mm.....	63
Figura 56 – Curvas verdadeiras 1.4512 1,2mm para o encruamento.....	64
Figura 57 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4512 1,2mm.....	64
Figura 58 – Punção para ensaio de Nakajima.....	67
Figura 59 – Prensa chapas (esquerda) e matriz inferior (direita).....	67
Figura 60 – Corpos de prova para o ensaio de Nakajima.....	68
Figura 61 – Malha aplicada nos corpos de prova.....	69
Figura 62 – Resultados das operações de marcação.....	69
Figura 63 – Falhas na marcação da malha.....	70
Figura 64 – Marcação final da malha.....	71
Figura 65 – Posicionamento do corpo de prova.....	72
Figura 66 – Reflexos e matriz inferior com adesivo.....	73
Figura 67 – Suporte de fixação para câmeras.....	75
Figura 68 – Estudo do posicionamento das câmeras.....	76
Figura 69 – Suporte e posicionamento das câmeras.....	76
Figura 70 – Posicionamento das câmeras.....	76
Figura 71 – <i>Setup</i> final.....	77
Figura 72 – Calibração xadrez.....	79
Figura 73 – Medição paquímetro.....	79
Figura 74 – Instante de início da fratura/marcação das 3 seções de interesse.....	80
Figura 75 – Captura de imagens para medição de deformações.....	81
Figura 76 – Procedimento de tratamento da imagem.....	81
Figura 77 – Resultado final da medição.....	81
Figura 78 – Deformação corpos de prova Nakajima.....	82
Figura 79 – Força x deslocamento 1.4510 1,2mm – Nakajima.....	83
Figura 80 – Força x deslocamento 1.4512 1,0mm – Nakajima.....	83
Figura 81 – Fratura geometria 20mm (1.4512 – amostra 2).....	84
Figura 82 – Fratura geometria 40mm (1.4512 – amostra 2).....	84
Figura 83 – Fratura geometria 60mm (1.4512 – amostra 1).....	85
Figura 84 – Fratura geometria 80mm (1.4512 – amostra 1).....	85
Figura 85 – Fratura fora da região de interesse (1.4512 – 100mm).....	86
Figura 86 – Fratura geometria equibiaxial (1.4512 – amostra 1).....	86
Figura 87 – Descolamento das marcações.....	87
Figura 88 – Parábola inversa descentralizada.....	88
Figura 89 – Parábola inversa corrigida.....	89
Figura 90 – CLC aço 1.4510.....	91

Figura 91 – CLC aço 1.4512.	92
Figura 92 – Tensões e deformações principais – amostra de 60mm.	96
Figura 93 – Força x deslocamento 1.4510 1,2mm – Simulação.....	97
Figura 94 – Força x deslocamento 1.4512 1,0mm – Simulação.....	97
Figura 95 – CLC numérica aço 1.4510.	98
Figura 96 – CLC numérica aço 1.4512.	99
Figura 97 – CLC experimental X CLC numérica ($\mu=0,15$).	100

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores típicos para n e C, adaptado de [24].	16
Tabela 2 – Parâmetros gerais para os ensaios, adaptado de [37].	27
Tabela 3 – Equivalência de aços, adaptado de [55]–[59].	36
Tabela 4 – Dimensões e identificação dos materiais.	37
Tabela 5 – Composição dos Aços - % em massa, adaptado de [59].	38
Tabela 6 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, adaptado de [64].	41
Tabela 7 – Resultados médios para cada material x espessura x direção.	65
Tabela 8 – Anisotropia normal e planar para 15% de deformação.	66
Tabela 9 – Dimensões dos corpos de prova ensaio de Nakajima (mm).	68
Tabela 10 – Parâmetros para o Ensaio de Nakajima.	71
Tabela 11 – Propriedades dos materiais para a simulação.	94
Tabela 12 – Resultados para cada tamanho de malha.	94
Tabela 13 – Resultados para cada valor de atrito.	95

Nomenclatura

Letras Latinas Minúsculas

e	Deformação de engenharia	-
e_p	Deformação plástica de engenharia	-
l_0	Comprimento inicial	[m]
l_1	Comprimento final	[m]
Δl	Variação de comprimento	[m]
n	Coefficiente de encruamento	-
r	Índice de anisotropia ou coeficiente de Lankford	-
r_{0°	Índice de anisotropia a 0° em relação ao sentido de laminação	-
r_{45°	Índice de anisotropia a 45° em relação ao sentido de laminação	-
r_{90°	Índice de anisotropia a 90° em relação ao sentido de laminação	-
r_m	Índice de anisotropia normal	-
Δr	Índice de anisotropia planar	-
s_0	Área da secção inicial do corpo de prova	[m ²]
t_0	Espessura inicial	[m]
s_1	Área da secção deformada	[m ²]
s_{1i}	Área instantânea da secção deformada	[m ²]
t_1	Espessura final	[m]
w_0	Largura inicial	[m]
w_1	Largura final	[m]
Δw	Variação de largura	[m]

Letras Latinas Maiúsculas

A	Deformação na fratura	-
A_g	Deformação plástica na tensão máxima	-
A_{gt}	Deformação total na tensão máxima	-

A_t	Deformação total na Fratura	-
C	Constante da equação de Hollomon e Ludwik	[Pa]
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	
CLC	Curva Limite de Conformação	-
DLC	Diagrama Limite de Conformação	-
E	Módulo de elasticidade do material	[Pa]
F	Força aplicada	[N]
MISO	Multilinear Isotropic Hardening	-
MEF	Método dos Elementos Finitos	-

Símbolos gregos

σ	Tensão convencional ou de engenharia	[MPa]
$\sigma_{0,2\%}$	Tensão de escoamento a 0,2% de deformação	[MPa]
σ_{el}	Tensão de escoamento superior	[MPa]
σ_{es}	Tensão de escoamento inferior	[MPa]
σ_{esc}	Tensão de escoamento	[MPa]
σ_m	Tensão limite de resistência a tração	[MPa]
σ_{rup}	Tensão de ruptura	[MPa]
σ_v	Tensão real ou verdadeira	[MPa]
σ_{vi}	Tensão verdadeira instantânea	[MPa]
ε	Deformação real ou verdadeira	-
ε_1	Deformação verdadeira maior	-
ε_2	Deformação verdadeira menor	-
ε_l	Deformação verdadeira no comprimento	-
ε_{p_l}	Deformação plástica verdadeira no comprimento	-
ε_{p_t}	Deformação plástica verdadeira na espessura	-
ε_{p_w}	Deformação plástica verdadeira na largura	-
$\varepsilon_t / \varepsilon_3$	Deformação verdadeira na espessura	-
ε_w	Deformação verdadeira na largura	-
ε_{vi}	Deformação verdadeira instantânea	-
μ	Coefficiente de atrito	-
ν	Coefficiente de Poisson	-

Capítulo 1: Introdução

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Com o crescente desenvolvimento do mundo industrial, há a exigência cada vez maior de processos de produção mais rápidos e eficientes, portanto, é indispensável a otimização dos processos de produção. Com isso, há também o constante desenvolvimento e melhorias de materiais, com propriedades únicas, e cada vez mais avançadas. Pensando neste quesito de desenvolvimento de novos materiais, é impossível não citar os aços, os quais possuem uma gama enorme de aplicações, desde a utilização em componentes estruturais até equipamentos cirúrgicos [1]. Seguindo a linha dos aços, destacam-se os aços inoxidáveis que, devido à elevadas propriedades mecânicas, apresentam uma contribuição inovadora nas pesquisas sobre novas ligas e ampliam ainda mais as possibilidades de aplicação dos mesmos.

Percebe-se que, os aços inoxidáveis estão presentes em diversas aplicações industriais e domésticas, sendo a resistência mecânica e a resistência à corrosão as principais justificativas para sua utilização. Um ponto importante a se ressaltar sobre esses tipos de aços é apresentado por Kleiner [2], “embora alta resistência e ductilidade sejam geralmente propriedades mutuamente exclusivas, ambas são fornecidas pelo aço inoxidável”, o que possibilita um campo de aplicações diversificadas para esses materiais.

Os aços de alta resistência estão presentes principalmente na indústria automotiva, sendo ela a principal responsável pelos maiores avanços, sempre buscando maior resistência, viabilizando a redução de peso e a adequação dos componentes automotivos às exigências de diminuição do consumo de combustível, e o importante aumento na segurança em caso de acidentes com automóveis, [2] [3] .

Portanto, as aplicações dos aços inoxidáveis estão se expandindo rapidamente devido à sua capacidade de reduzir o peso, diminuir o consumo de matéria-prima, melhorar a economia de combustível e aumentar a resistência ao choque, além de possuírem boa resistência à fadiga

térmica, fluência e oxidação. Tais características possibilitam também, a utilização desses materiais em produtos de sistemas de exaustão de automóveis, onde os fabricantes de automóveis estão considerando temperaturas de serviço cada vez mais altas para o sistema de exaustão, a fim de cumprir as restrições dos padrões de poluição [2] [4]. Sendo assim, em algum momento os requisitos em termos de temperatura dos gases de escape podem ultrapassar os limites dos tipos de aço inoxidável atualmente usados para tais aplicações [4].

Buscando a viabilização da utilização das novas ligas, há a preocupação com os processos de fabricação dos componentes criados a partir de tais materiais e, principalmente, a eficiência da produção das peças finais. Nesta abordagem, deve-se destacar um processo entre os possíveis para a fabricação de peças, sendo ele o processo de conformação, mais especificamente a estampagem.

Na estampagem, uma chapa de metal é fixada em uma matriz, através da utilização de um prensa chapas. A seguir, um punção deforma a chapa de aço, proporcionando a geometria final desejada [5]. Com esse processo é possível realizar a produção de peças complexas, utilizando principalmente o processo de estampagem sequencial, ou multi-etapas, o qual consiste em realizar a estampagem da peça em várias etapas, possibilitando a criação de diversas geometrias e possibilidades de peças [6], [7]. As principais vantagens do processo de estampagem estão na alta eficiência, repetibilidade e, principalmente, economia, mantendo as condições de superfície da peça, adequadas em produções de largas escalas [8].

Os novos aços desenvolvidos e aplicados na indústria possuem resistência elástica superior aos aços convencionais. Esta resistência mais alta resulta em uma menor deformação possível sem fratura, limitando assim, a conformabilidade desses materiais. Como consequência, aços de alta resistência necessitam de forças mais altas nas operações de conformação, tal como prensas mais rígidas e ferramentas mais resistentes ao desgaste. Ou seja, isso traz novos problemas ao projeto das ferramentas de estampagem (punção e matriz), afetando a sua vida útil e principalmente, a qualidade das peças acabadas [2].

Devido aos fatores citados anteriormente, o setor industrial da estampagem a frio é confrontado atualmente com dificuldades de manutenção da qualidade das peças produzidas ao longo de um ciclo de produção, principalmente em relação a defeitos nas peças, tais como trincas, enrugamento, redução da espessura e retorno elástico [9][10][11].

Avaliando o problema mais a fundo, os fatores que originam a não uniformidade da produção podem ter diferentes origens. Por exemplo, a degradação superficial da ferramenta de estampagem, cuja consequência é o aumento do atrito entre as superfícies da ferramenta e da peça, obrigando a uma alteração dos parâmetros do processo de estampagem [6]. Ainda durante

a produção das peças, é necessário o uso de grandes quantidades de lubrificante, além de alterar sucessivas vezes os parâmetros da prensa, pressão de estampagem ou a velocidade da linha de produção. Isso origina um aquecimento das superfícies e da peça com resultados diretos na qualidade final da peça estampada.

Outros fatores prendem-se com a variabilidade das características geométricas e das propriedades mecânicas da chapa utilizada no processo de estampagem. Embora as especificações técnicas do material sejam cumpridas por meio da verificação dos certificados do material, constata-se que, devido ao processo de fabricação da chapa de aço em bobina, não é possível garantir uma homogeneidade da espessura da chapa e das suas propriedades de conformação plástica, desvio que pode ser mais evidente com a mudança de bobina. Esta anisotropia geométrica e material, embora se encontre dentro dos limites normativos, origina uma conformação plástica distinta, e tem implicações diretas na qualidade final da peça, devido à deformação excessiva e ruptura ou fissuração localizada, [3].

Por isso desenvolveu-se uma metodologia para análise desses limites de conformação, conhecida como Curva Limite de Conformação (CLC). A CLC possibilita uma visão completa do desempenho que o material apresenta em determinado processo, fornecendo uma margem de segurança da utilização do mesmo. Através da identificação de pontos críticos de uma determinada peça em relação à CLC é possível direcionar os esforços de análise, trabalhando nos parâmetros de processo, visando evitar falhas ou fragilização dos componentes, principalmente devido à excessiva redução de espessura, [12].

Conhecendo as características do material, é necessário verificar a influência de diferentes parâmetros de processo e a sua correlação no resultado final da produção de uma peça. Esta operação pode ser demorada, pois devem ser realizadas inúmeras iterações e variações de parâmetros de processo. Neste momento entra a análise numérica, sendo muito útil para explorar e prever possibilidades de conformação na prática, além de possibilitar a otimização de tempo do processo mencionado. Esta metodologia permite a verificação da peça em relação a possibilidade da ocorrência de trincas, enrugamento, redução de espessura e retorno elástico durante o processo de estampagem. Deve-se destacar que, uma simulação confiável necessita de uma descrição precisa das propriedades mecânicas e de conformabilidade do material, [8], [13].

Portanto, através da simulação numérica, pode ser realizada a verificação rápida e precisa da influência dos parâmetros do processo de estampagem sobre a fabricação das peças. Em complemento, possíveis problemas no processo de estampagem podem ser percebidos, para então, serem minimizados e eliminados, [8], [13].

Desta maneira, é possível, no setor da estampagem a frio, uma integração do *know-how* de diferentes domínios do conhecimento e do desenvolvimento de modelos de correlação dos diversos fatores, etapas e fenômenos que influenciam em última análise a qualidade das peças produzidas, mas que evidenciam melhorias significativas ao nível ambiental e de aproveitamento dos recursos energéticos.

1.2 OBJETIVOS PROPOSTOS

A partir da contextualização apresentada, foi definido como objeto desta dissertação: conhecer as propriedades dos aços inoxidáveis EN 1.4509, 1.4510 e 1.4512 e, utilizando estes materiais, através de simulações numéricas, verificar a influência de parâmetros do processo de estampagem sobre a produção de peças obtidas a partir de chapas de aço.

A partir do objetivo geral foram delineados os objetivos específicos desta pesquisa:

- Obter as propriedades mecânicas dos aços propostos;
- Estudar as normas sobre ensaios pertinentes para obtenção das CLC, especificamente a ISO 12004-2;
- Realizar estado da arte sobre a estampagem de chapas;
- Planejar, projetar e desenvolver o setup experimental para obtenção dos dados da realização dos testes experimentais das chapas, o qual poderá ser utilizado posteriormente em outros experimentos e ensaios no laboratório do IPB;
- Estudar e montar as CLC dos aços propostos;
- Programar o código para obtenção dos dados dos testes e posterior tratamento dos mesmos, para obtenção das CLC;
- Aplicar as propriedades obtidas no *software* de simulação numérica, para avaliação da influência dos parâmetros utilizados no processo de estampagem sobre a qualidade e resultado final do processo.

1.3 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, onde:

O capítulo um apresenta a introdução do tema deste trabalho, seguida do contexto e motivação para o desenvolvimento da pesquisa, além dos objetivos propostos e organização da tese.

O capítulo dois apresenta o estado da arte sobre os principais tópicos relacionados a estampagem, além de temas específicos relacionados a esta dissertação.

O capítulo três apresenta a metodologia e equipamentos utilizados para o desenvolvimento experimental desta pesquisa. Também, são apresentados a caracterização das propriedades dos materiais utilizados e a obtenção das curvas FLC de cada material.

O capítulo quatro apresenta como foram realizadas as simulações numéricas, visando a análise de sensibilidade da variação de propriedades mecânicas e físicas dos materiais, junto com os parâmetros envolvidos na estampagem sequencial de aços, sobre o resultado final do processo de fabricação.

O capítulo cinco realiza o fechamento e conclusão desta tese, além apresentar propostas para trabalhos futuros.

Por último estão apresentados as referências e os anexos desta pesquisa.

Capítulo 2: Estado da Arte

Para executar a parte prática deste trabalho é necessário conhecer o estado da arte sobre os principais temas relacionados a estampagem, conformação de metais, defeitos, parâmetros de estampagem e simulação numérica.

2.1 ESTAMPAGEM

Por volta de 4000 a. C, no Egito, eram produzidos os primeiros copos de chapas de ouro e prata através do processo de embutimento manual. A conformação dos copos era obtida através do uso de simples martelos de pedra, os quais foram substituídos por martelos de embutir feitos de ferro a partir de 900 a. C. [10].

Muito mais tarde, por volta do século XVIII, foi desenvolvido o processo de laminação e a houve a fabricação das primeiras chapas finas de aço, possibilitando assim a produção em série de peças de chapa. Com o passar do tempo, foi constante melhoria dos processos, resultando na criação das prensas e novas ferramentas de corte e embutimento no fim do século XIX, iniciando assim, a fabricação em série de produtos estampados. Já no século XX, a otimização e desenvolvimento de máquinas e ferramentas para estampagem foram estimulados, devido à grande expansão da indústria automobilística [10].

Atualmente, há grandes avanços em relação a matéria prima, buscando maior resistência mecânica, térmica entre inúmeras outras características desejadas pelo mercado, até a melhoria de processos, buscando redução de custos, alta eficiência e alta qualidade dos produtos fabricados através do processo de estampagem.

Partindo para a definição, a estampagem é todo processo que envolve operações de corte e de conformação, onde uma chapa é submetida a uma ou mais transformações de deformação plástica, com a finalidade de se obter peças com geometrias próprias [10].

Entendendo sobre a classificação dos processos de estampagem, de acordo com a norma DIN 8580, os processos de estampagem estão incluídos em dois diferentes grupos [10]:

- Grupo principal dos processos de conformação;
- Grupo principal dos processos de separação.

Todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem gerar cavaco ou adicionar material (exemplos: o embutimento profundo, a dobra e o repuxamento) estão incluídos no grupo dos processos de conformação. Já no grupo dos processos de separação estão incluídos os processos de corte (exemplos: cisalhamento e o corte fino).

O primeiro processo de estampagem que pode ser citado é o embutimento profundo ou ainda, estampagem profunda. Para a execução do embutimento profundo são utilizadas ferramentas que consistem basicamente de um punção, uma matriz e um prensa-chapas (utilizado para evitar a formação de rugas durante o processo de conformação), como ilustrado na Figura 1. Alguns pontos importantes que devem ser citados são que os punções tem a geometria interna do produto a ser fabricado e entre o punção e a matriz deve existir uma folga, que é determinada pelo material e espessura da chapa [10], [14].

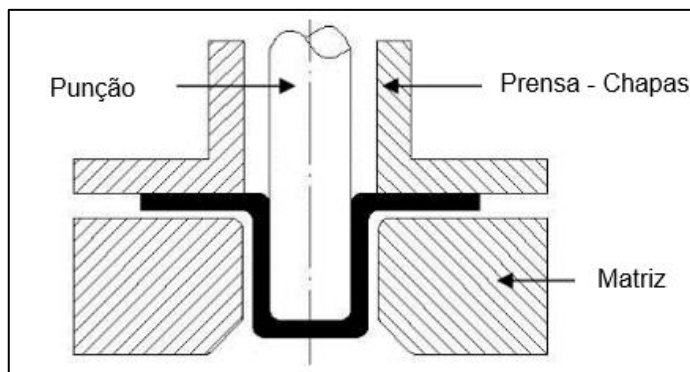


Figura 1 – Esquema de uma ferramenta de embutimento profundo, adaptado de [10].

O início do processo de embutimento profundo ocorre com um processo de estiramento biaxial durante o qual o fundo da peça é formado. Nesta primeira parte do processo a zona deformada é o fundo do copo e a espessura dele é diminuída, como ilustrado em a) na Figura 2. Após a formação do fundo é iniciado o processo de embutimento profundo, com a formação da parte cilíndrica da peça aproveitando o material do flange, como ilustrado em b) na Figura 2. Tanto na fase de estiramento quanto na fase de embutimento profundo podem ocorrer rupturas no fundo da peça formada. Para a primeira fase podem ocorrer rupturas durante todo processo pois a peça é enfraquecida devido à redução de espessura. Já para a segunda fase do processo, podem ocorrer rupturas no canto do fundo do copo devido, principalmente, à força

de conformação que tem que ser transmitida pelo fundo.

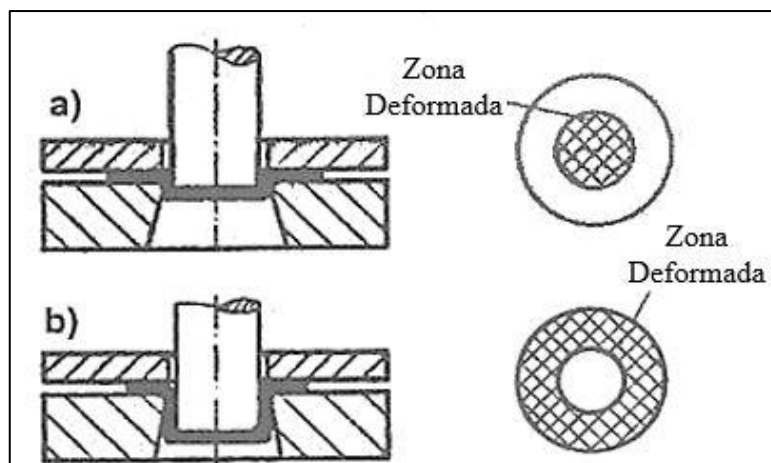


Figura 2 – Embutimento profundo, adaptado de [10].

O segundo processo de estampagem que pode ser citado é o corte por cisalhamento. Esse é um processo de separação, que é tratado como de estampagem por apresentar pontos em comum com estes. Os dois são efetuados por ferramentas que são acionadas por prensas, e inclusive, existem muitas ferramentas que combinam processos de estampagem com processos de corte [10].

A operação de corte ocorre a partir de dois cantos afiados, que passam um em frente do outro, com uma folga ente eles. Essa folga é determinada de acordo com o material e espessura da chapa que será cortada. É indispensável reforçar que os parâmetros citados anteriormente (folga de corte, espessura da chapa) em conjunto com propriedades do material, raio da aresta de corte, entre outros, têm influência significativa na qualidade da superfície de corte, afetando assim, a qualidade final da peça. Devido ao desgaste, alguns desses parâmetros do processo precisam ser alterados durante o processo [15], [16].

Para o projeto de uma ferramenta de corte adequada, é necessário saber a força máxima $F_{S \max}$ que vai ocorrer durante o corte, a qual depende de todos os parâmetros já citados anteriormente, além de considerar também as forças das molas que podem ser usadas para apertar o prensa chapas ou extrator [10].

Segundo Schaeffer [10], existem três tipos diferentes de ferramentas de corte conforme o número das peças produzidas e precisão requerida. O tipo mais simples consiste principalmente de punção, extrator, matriz e base, indicados como 1, 2, 3 e 4 respectivamente, na Figura 3. Tal ferramenta raramente é utilizada na produção industrial devido à dificuldade de ajuste e troca da mesma.

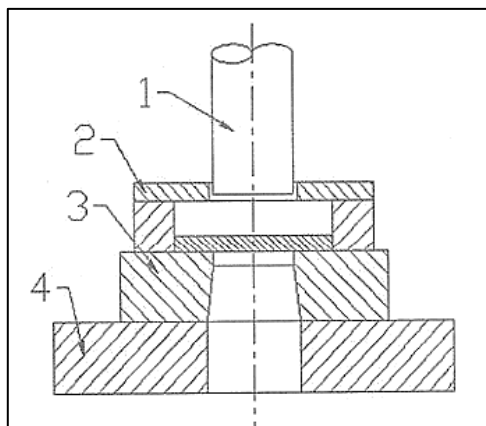


Figura 3 – Ferramenta sem guia própria, adaptado de [10].

O segundo tipo é a ferramenta com punção guiado. Este tipo de ferramenta é utilizado para peças mais precisas e para fabricação de pequenas quantidades, pois possuem uma boa relação entre baixo custo e bom manuseio na hora da troca e ajuste do ferramental.

O terceiro tipo e mais avançada ferramenta é a que possui guia por pinos e buchas, como ilustrado na Figura 4. Este tipo de ferramenta permite o trabalho com folgas mínimas para a fabricação em grandes séries de peças de alta precisão.

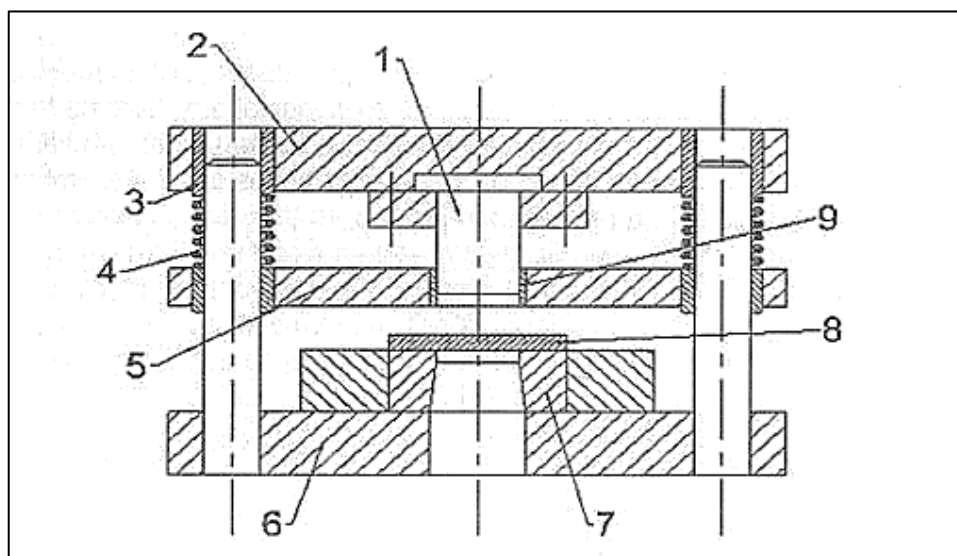


Figura 4 – Ferramenta guiada por pinos e buchas, [10].

O punção é indicado na Figura 4 através do número 1. O número 2 indica a placa superior. 3 e 9 indicam as buchas de guia. 4 indica a mola do prensa chapas. 5 indica a placa intermediária. 6 indica a placa inferior. 7 e 8 indicam a matriz e a chapa respectivamente.

2.2 ESTAMPAGEM SEQUENCIAL

Com o avanço das necessidades da indústria da conformação aumenta também a exigência de peças com maior qualidade, além de elevada complexidade, tanto na geometria quanto na produção de peças produzidas a partir do processo de estampagem. Além disso há a evolução das propriedades dos materiais, principalmente em relação à resistência tornando principalmente aços difíceis de serem conformados, exigindo maiores forças para a estampagem das peças. A estampagem sequencial, ou multi-etapas, surge nesse quesito de produção de peças complexas. Neste processo a estampagem da peça é realizada em várias etapas, possibilitando a criação de diversas geometrias e possibilidades de peças, simplificando a geometria necessária para cada ferramenta, mas mantendo o resultado final desejado para o processo [6], [7].

2.2.1 PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM

A estampagem é um processo de conformação onde ocorre a contínua interação entre ferramenta, lubrificante, material de conformação e equipamento. Como já discutido anteriormente, são diversos os fatores e parâmetros que influenciam o resultado final do processo de estampagem e buscando ilustrar esse contexto, a Figura 5 mostra uma série desses parâmetros que interferem e que devem ser controlados nos processos de estampagem [14].

O controle dos diversos parâmetros apresentados na Figura 5 é fundamental para a otimização do processo, principalmente devido à exigência das indústria por maiores velocidades de produção e deformação, além da introdução de novos materiais que possuem alta resistência mecânica. Sabe-se que, diversos aços desenvolvidos e aplicados na indústria, possuem resistência mecânica superior aos aços convencionais, entre outros fatores, que resultam em menor capacidade de deformação do material, além de diversos defeitos indesejáveis na peça acabada. Dessa maneira, aços de alta resistência exigem maiores forças nas operações de conformação, além de ferramentas de estampagem mais resistentes e principalmente, a necessidade de entender o comportamento desses novos materiais em relação a variação dos parâmetros de conformação durante a produção industrial de peças estampadas [2].

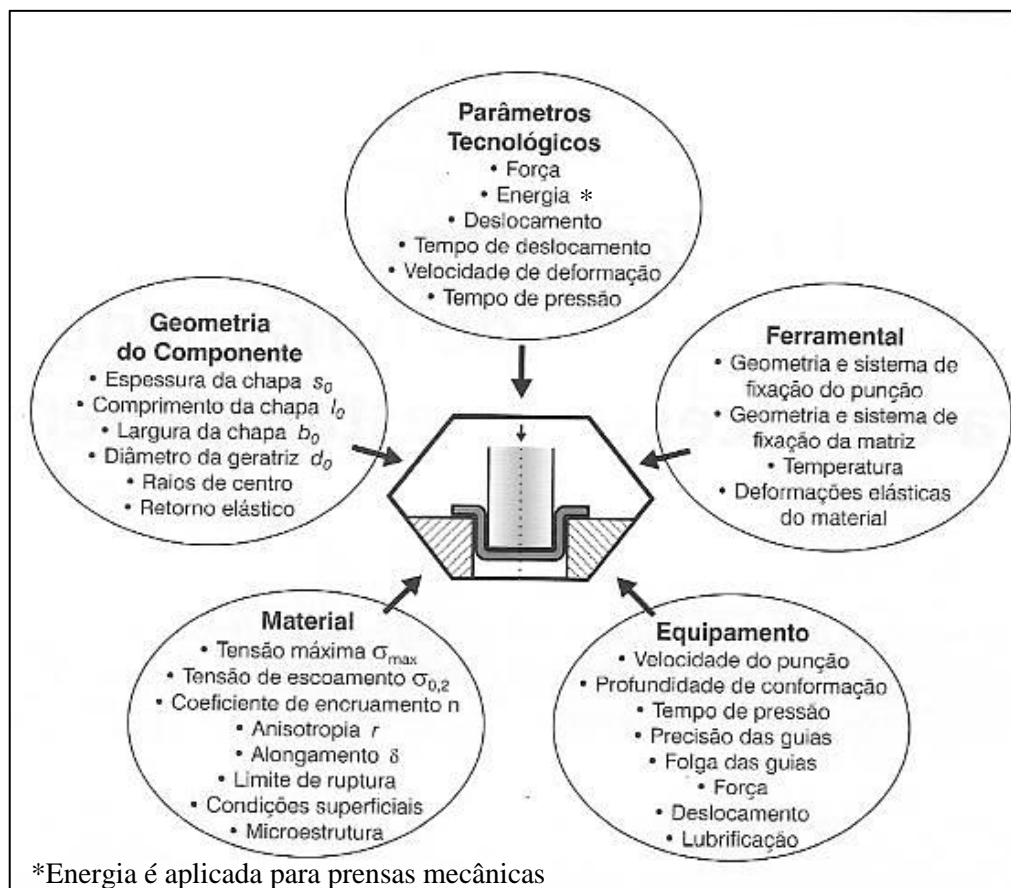


Figura 5 – Parâmetros do Processo de Estampagem, [14].

Segundo Bresciani [17], o controle desses parâmetros também é importante para evitar os principais defeitos encontrados em peças embutidas, que são decorrentes essencialmente de defeitos já existentes na chapa, de falhas no projeto e na construção da ferramenta, bem como erros na conservação do ferramental. Portanto, ao longo do processo de estampagem existem diversas variáveis que, quando não são levadas em conta, ou são mal dimensionadas, podem resultar em vários tipos de defeitos nos componentes produzidos. Schaeffer [10], elenca uma série de defeitos e suas prováveis causas, como ilustrado na Figura 6.

Diversos estudos vêm sendo realizados para verificar a melhoria dos processos de estampagem, buscando evitar os defeitos e entender melhor os parâmetros que influenciam o resultado final do processo de estampagem.

Lazaroto [18] realizou a determinação experimental e numérica da curva limite de conformação para o aço SAE 1006 via ensaio de Nakajima, obtendo resultados mais conservadores através do software Dynaform® quando comparado com os experimentos reais.

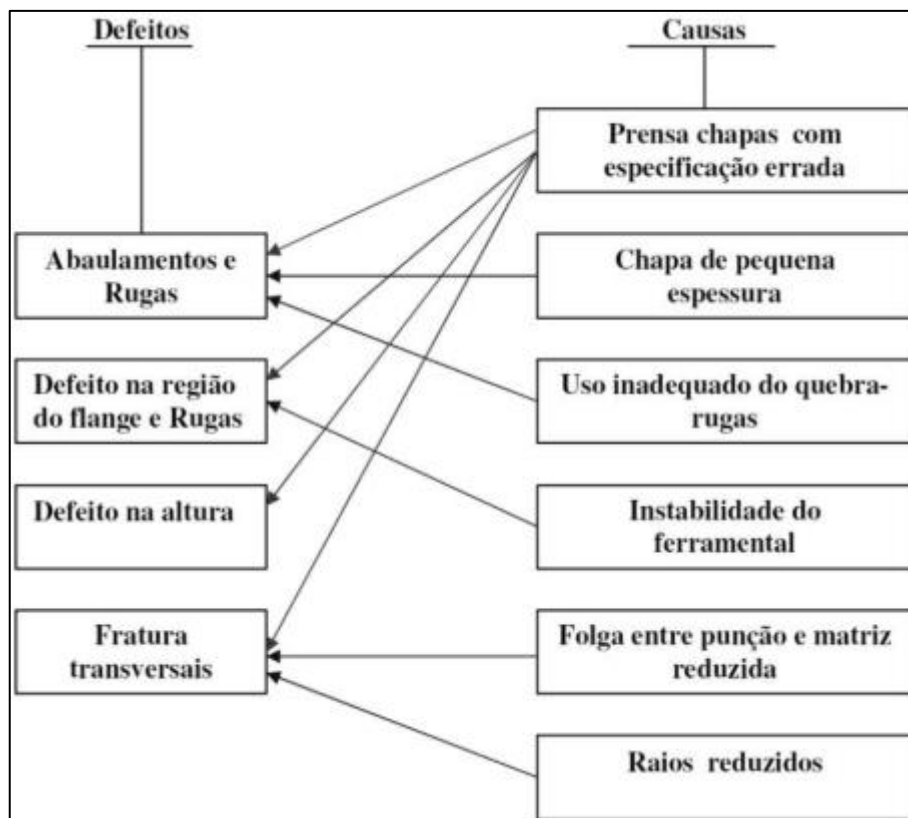


Figura 6 – Defeitos em peças estampadas, adaptado de [18].

Já Bastos [12] efetuou uma análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação para três aços distintos, com o objetivo de encontrar as distribuições das deformações em duas peças específicas, avaliando assim, o efeito da força de sujeição, do tipo de lubrificação, da geometria do *blank* e do revestimento de zinco no resultado final da estampagem. Zhang [19], assim como Manikandan [20], realizou um estudo do efeito do atrito na conformação por estiramento e sua influência na curva limite de conformação através de ensaios experimentais e simulação numérica, onde ambos concluíram que a redução do atrito é um ponto muito importante sobre os resultados de um processo de estampagem.

Hiremath [21] utilizou a modelagem de elementos finitos para simulação numérica do processo de conformação multi-etapas de uma roda para carro, visando o controle da redução excessiva de espessura. Um estudo parecido foi realizado por Chen [6], mas com aços *dual phase* laminados a quente.

Velho [22] e Pisano [1] avaliaram a obtenção de curvas limites de conformação e a estampabilidade de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, voltado principalmente para as características químicas e coeficientes de anisotropia dos materiais.

Demonstrando a importância da utilização de simulação numérica para otimização dos processos de estampagem, Carvalho [9] realizou um estudo sobre os parâmetros de estampagem

para eliminar o defeito de orelhas em peças estampadas. Sanay [23] também utilizou do método dos elementos finitos para simular um ensaio de Nakajima através do software Pam-Stamp 2G®, onde foram utilizados os aços AA2024-O e SAE 1006, concluindo que realizar a previsão de limite de conformação através do MEF pode se reduzir substancialmente o tempo e o custo do trabalho experimental e do processo de tentativa e erro.

2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS CHAPAS

O conhecimento das propriedades de um material é indispensável para que seja possível entender suas limitações e características de comportamento nas mais diversas situações em que pode estar sujeito. Um dos ensaios mais utilizados, e conhecidos, para caracterização dos materiais e determinação de suas propriedades mecânicas é o ensaio de tração. Este ensaio permite obter diversas propriedades do material, tais como o limite de resistência a tração, o limite de escoamento, o grau de encruamento e o índice de anisotropia [10].

O ensaio de tração é um teste uniaxial e sem atrito, efetuado em máquinas de ensaios que têm uma garra fixa e uma garra móvel para proporcionar a fixação do corpo de prova. Seguindo as instruções da especificação aplicável, tal como as normas DIN EN10002 e ASTM E8/E8M, o corpo de prova é obtido (relações de comprimento, largura e formato) e fixado, visando a garantia de que o mesmo esteja submetido a um estado uniaxial de tensão. A seguir, é aplicada uma força sobre o corpo de prova, o qual é tracionado pelo equipamento com velocidade constante, também normatizada, até que o mesmo sofra ruptura [10].

As máquinas de ensaio são equipadas com sensores para que registram a variação de força e o alongamento do corpo de prova durante a execução do ensaio. O resultado do ensaio de tração é o diagrama força vs. alongamento ou tensão convencional vs. deformação relativa, mostrado na Figura 7.

O diagrama ilustrado na Figura 7 apresenta uma curva tensão vs deformação, além dos principais pontos para interpretação da mesma, onde σ_{esc} ou $\sigma_{0,2\%}$ é a tensão de escoamento, σ_m é a tensão limite de resistência e σ_{rup} é a tensão de ruptura do material. Esse diagrama de tensão nominal vs. deformação relativa é calculado com os valores do diagrama força vs. alongamento em conjunto com as Equações (1) a (4).

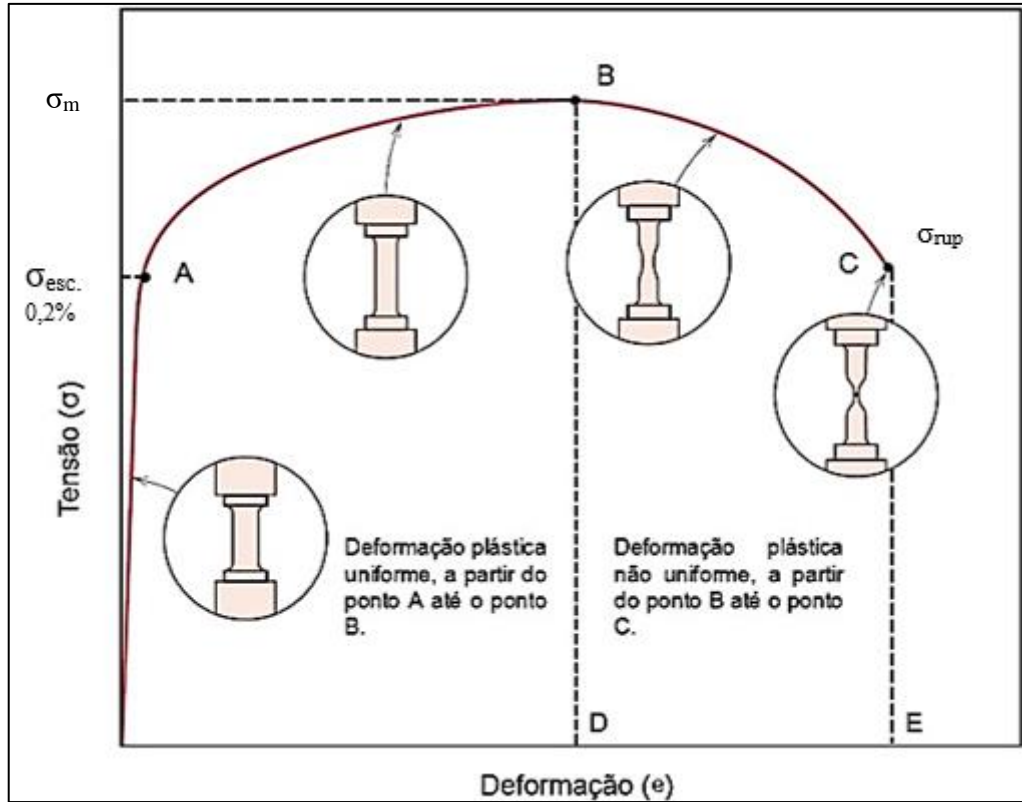


Figura 7 – Diagrama tensão vs. deformação (de engenharia), adaptado de [24].

$$s_0 = t_0 * w_0 \text{ [m}^2\text{]} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [Pa]} \quad (2)$$

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ [adimensional]} \quad (3)$$

$$\sigma = E * e \text{ [Pa]} \quad (4)$$

Onde: s_0 é área da secção inicial [m²]; t_0 é espessura inicial do corpo de prova [m]; w_0 é largura do corpo de prova [m]; σ é tensão convencional ou de engenharia [Pa]; F é força aplicada [N]; e é deformação de engenharia [adimensional]; l_1 é comprimento final [m]; l_0 é comprimento inicial [m]; Δl é variação de comprimento [m]; E é módulo de elasticidade do material [Pa].

Os materiais de chapas apresentam dois tipos de comportamento que na fase de transição da deformação elástica à deformação plástica. O primeiro é o caso apresentado pela Figura 7, onde o valor da tensão de escoamento não é evidente, curva apresentada geralmente por materiais dúcteis. Para esses casos o limite de escoamento utilizado é convencionalizado como a tensão que é medida em um ponto de 0,2% de deformação plástica. Sendo assim, encontrada

na curva tensão convencional vs. deformação relativa seguindo uma linha paralela à linha de Hooke que parte de 0,2% de deformação relativa [24].

O limite de escoamento, comumente representado por $\sigma_{0,2\%}$, representa a tensão na qual o material passa da zona de elástica da curva para a zona plástica. Para tensões abaixo do limite de escoamento, o material retornará ao seu estado inicial, independente da deformação que sofra [24].

O segundo tipo de comportamento é visto quando o material possui limite de escoamento superior σ_{eS} e também um limite inferior σ_{eI} na fase de transição da deformação elástica para a deformação plástica, como ilustrado na Figura 8. Esse tipo de comportamento ocorre devido ao envelhecimento do material, podendo causar problemas de aumento na rugosidade das superfícies das peças produzidas através dos processos de estiramento e embutimento profundo. Algumas normas, tais como a ABNT 5915 e a DIN EM 10130 determinam situações e prazos para utilização de materiais em processos de estampagem, de modo que o envelhecimento não influencie as propriedades dos materiais [10].

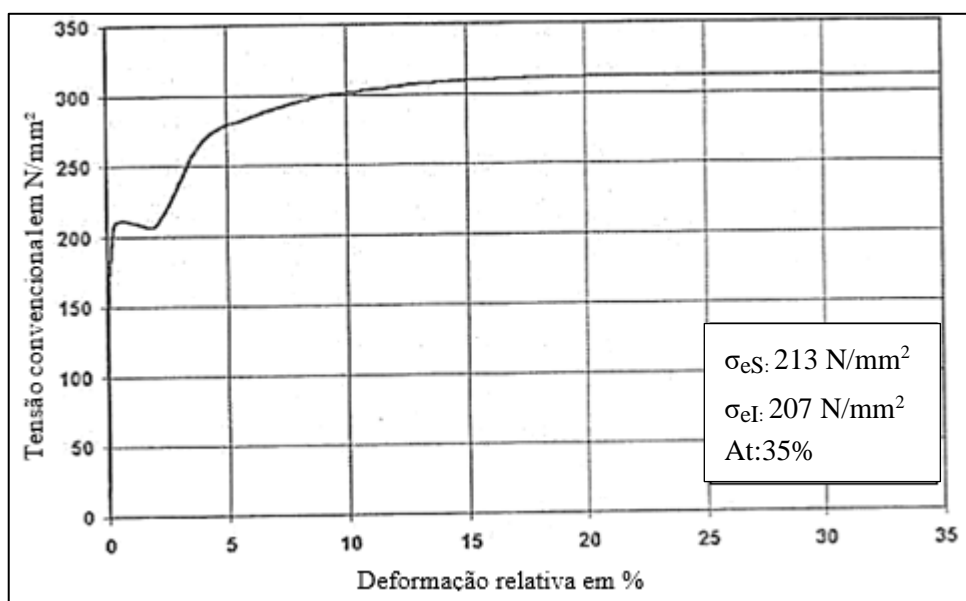


Figura 8— Diagrama tensão vs. deformação com limites de escoamento, adaptado de [10].

Para muitos projetos, é necessária a estimativa de forças para a fabricação de uma peça ou para a simulação de processos. Nestes casos é preciso verificar o comportamento mecânico do material usando a curva real, que apresenta os valores da tensão real (ou verdadeira σ_v) vs deformação real (ou verdadeira ϵ) durante todo processo de escoamento considerando o encruamento do material. Essa tensão verdadeira é definida como a carga F aplicada sobre o corpo dividida pela área da seção reta instantânea do mesmo corpo sobre o qual a deformação

está ocorrendo. Uma forma geral da representação da curva de escoamento para chapas é dada através da equação de Hollomon e Ludwik, apresentada na Equação (5)[10], [24].

$$\sigma_v = C * \varepsilon^n \text{ [Pa]} \quad (5)$$

Onde: σ_v é tensão verdadeira [Pa]; C é a constante de Hollomon [Pa]; ε é deformação verdadeira [adimensional]; n é coeficiente de encruamento [adimensional].

Os valores de C e n são constantes e variam de material para material, além de dependerem diretamente das condições de processamento dos mesmos. Deve-se atentar que a Equação (5) representa melhor o comportamento dos materiais ferríticos, já que para materiais austeníticos o coeficiente de encruamento n não é constante com a deformação [24]. Valores típicos para n e C estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores típicos para n e C, adaptado de [24].

MATERIAL	n	C (MPa)
Aço baixo carbono (recozido)	0,26	530
Aço liga (4340, recozido)	0,15	640
Aço inoxidável (304, recozido)	0,45	1275
Alumínio (recozido)	0,20	180
Liga de alumínio (2024, tratada termicamente)	0,16	690
Cobre (recozido)	0,54	315
Latão (70Cu-30Zn, recozido)	0,49	895

A curva de escoamento verdadeira pode ser calculada usando os resultados do ensaio de tração. Nestes cálculos são utilizadas as Equações (6) a (8), onde são calculados os valores das tensões e deformações verdadeiras.

$$\varepsilon = \ln (1 + e) \text{ [adimensional]} \quad (6)$$

$$\sigma_v = \frac{F}{s_{1i}} \text{ [Pa]} \quad (7)$$

$$\sigma_v = \sigma(1 + e) \text{ [Pa]} \quad (8)$$

Onde: s_{1i} é seção deformada instantânea [m²]; σ é tensão de engenharia [Pa]; ε é deformação verdadeira [adimensional]; F é força aplicada [N].

Percebe-se que na Equação (7) a tensão do escoamento é calculada através da seção deformada verdadeira s_{1i} do corpo de prova, sendo assim, chamada tensão verdadeira ou tensão real. A seção deformada verdadeira é calculada utilizando a Equação (9).

$$s_{1i} = \frac{s_0}{1 + e} [m^2] \quad (9)$$

Exemplos de diagramas tensão vs deformação verdadeiros são mostrados na Figura 9 e na Figura 10. Os gráficos apresentados foram calculados com os valores da curva convencional de um aço dúctil, com baixo teor de carbono [10].

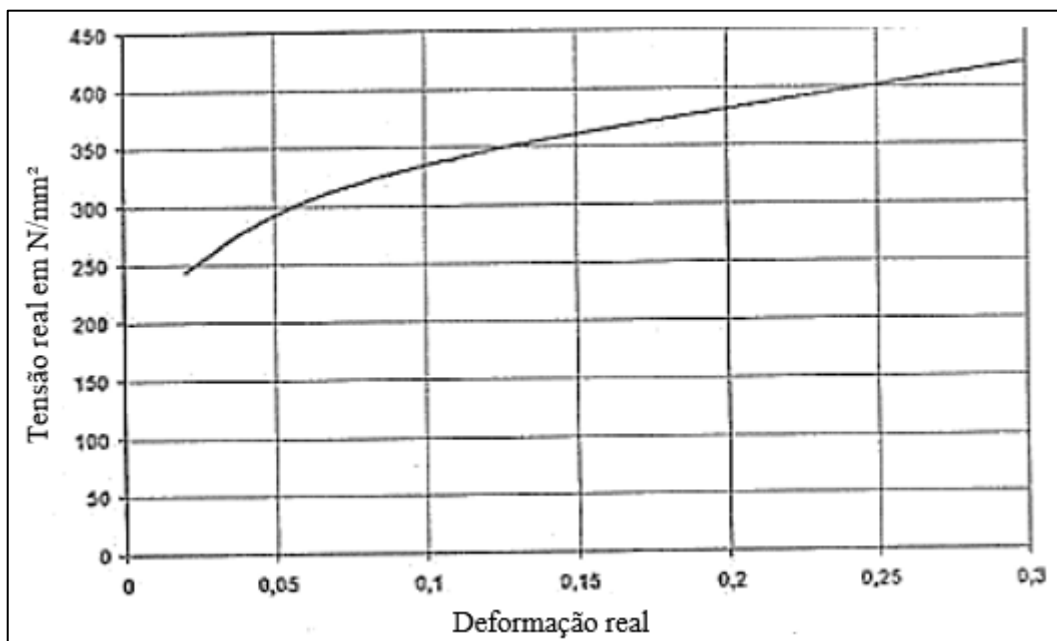


Figura 9 – Diagrama tensão vs deformação verdadeira, adaptado de [10].

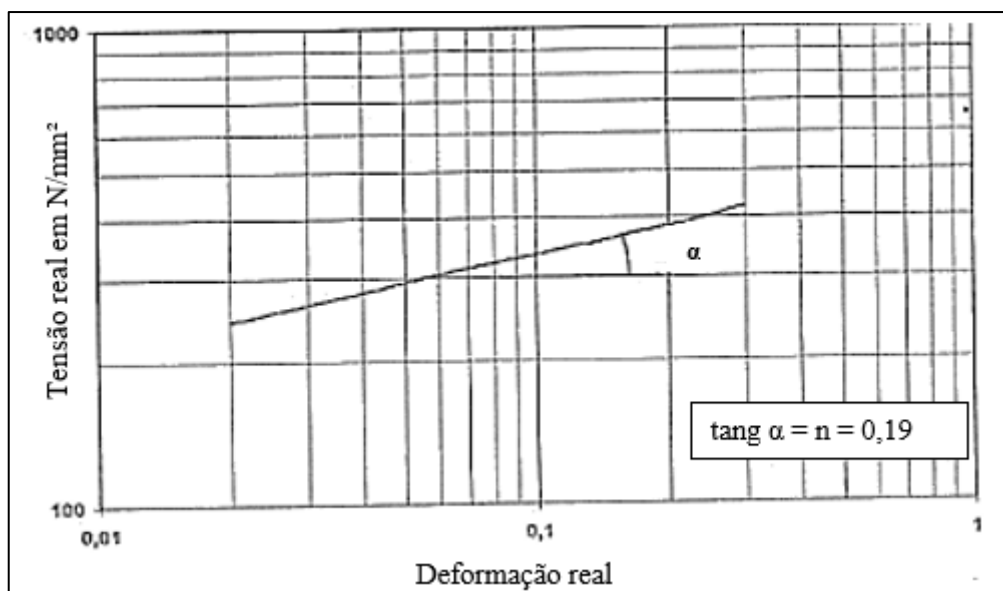


Figura 10 – Diagrama tensão vs deformação verdadeira logarítmicos, adaptado de [10].

A Figura 10 mostra a mesma curva da Figura 9, com a diferença na escala utilizada em cada um. O primeiro diagrama mostra a curva em eixos com escala linear, já o segundo

diagrama apresenta eixos em escala logarítmica. Um ponto importante está no fato de que a curva de escoamento de aços dúcteis para estampagem, principalmente o embutimento profundo, tem a forma de uma linha reta, sendo assim muito utilizado para a determinação do grau de encruamento. Ele é a tangente do ângulo α da curva com uma linha horizontal [10].

Outro método para a determinação do grau de encruamento encontra-se no SEW 1125. Nesta norma o coeficiente de encruamento n é calculado utilizando a Equação (10) onde são consideradas as tensões e deformações verdadeiras instantâneas ao longo da deformação do corpo até a ruptura do mesmo.

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\ln \varepsilon_{vi} \ln \sigma_{vi}) - (\sum_{i=1}^N \ln \varepsilon_{vi}) * (\sum_{i=1}^N \ln \sigma_{vi})}{N \sum_{i=1}^N (\ln \varepsilon_{vi})^2 - (\sum_{i=1}^N \ln \varepsilon_{vi})^2} \quad (10)$$

Onde: ε_{vi} é deformação verdadeira instantânea [adimensional] e σ_{vi} é tensão verdadeira instantânea [Pa].

O método utilizando a Equação (10) é aplicado principalmente se o ensaio de tração é feito em uma máquina computadorizada [10].

2.4 ANISOTROPIA

Idealmente, existem materiais que possuem propriedades físicas homogêneas em toda a sua extensão, mas nem todos são assim, na verdade, pouquíssimos são assim. As propriedades físicas dos materiais dependem de diversos fatores, sendo um deles relacionado à direção cristalográfica em que as medições são realizadas, pois as propriedades podem variar dependendo da direção de medição delas. Esta variação das propriedades em relação à direção é conhecida como anisotropia. Os materiais que não possuem variação de propriedades físicas dependente da direção, são conhecidos por isotrópicos [10], [24].

Partindo para o processo de estampagem, sabe-se que as chapas que são usadas neste processo são obtidas através do processo de laminação, onde há geração anisotropia. Tal anisotropia é causada pelo alongamento dos grãos do material em direção ao sentido da laminação, como ilustrado na Figura 11.

O fenômeno de anisotropia é complexo, sendo descrito através dos chamados índices de anisotropia, também conhecidos como coeficientes de Lankford ou ainda, índices r . Tais índices são calculados através da razão das deformações plásticas verdadeiras que ocorrem em um elemento de volume durante a deformação dele, como ilustrado na Figura 12. É importante

pontuar que, devido à dependência das propriedades do material em relação à direção de laminação, não existe um único índice de anisotropia, mas sim índices r que são obtidos em ensaios de tração que trabalham com corpos de prova retirados em três diferentes direções em relação ao sentido de laminação (0° , 45° e 90°) [10], [25].

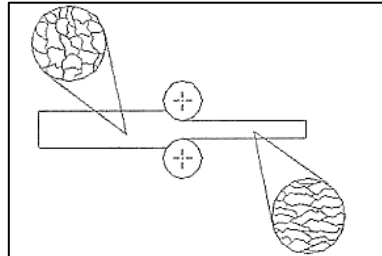


Figura 11 – Anisotropia após o processo de laminação, adaptado de [10].

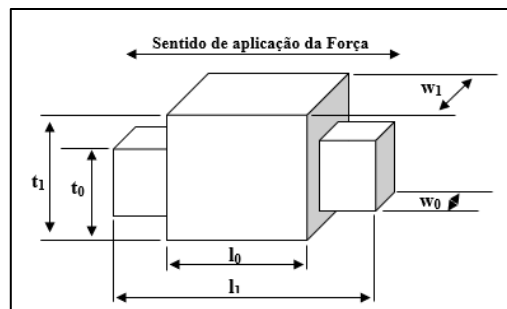


Figura 12 – Deformação em um elemento de volume, adaptado de [10].

Considerando um corpo com comprimento inicial l_0 , largura inicial w_0 e espessura inicial t_0 , quando aplicada uma força agindo no sentido indicado na Figura 12, ele sofre uma deformação, resultando nas dimensões no estado final l_1 , w_1 e t_1 . Aplicando a lei de constância do volume, qualquer alongamento em direção a um eixo de um sistema de coordenadas cartesianas causa alteração do elemento de volume nas outras duas direções, sendo representado pela Equação (11) [10], [26].

$$\varepsilon_t + \varepsilon_w + \varepsilon_l = 0 \quad (11)$$

Onde: ε_t é deformação verdadeira da espessura [adimensional]; ε_w é deformação verdadeira da largura [adimensional]; ε_l é deformação verdadeira do comprimento [adimensional].

Retornando ao índice de anisotropia, esse pode ser encontrado através da relação entre a deformação plástica verdadeira da largura do corpo de prova com a deformação verdadeira da espessura através da Equação (12) [10].

$$r = \frac{\varepsilon_{p_w}}{\varepsilon_{p_t}} \quad (12)$$

Onde: r é índice de anisotropia ou coeficiente de Lankford [adimensional]; ε_{p_w} é deformação plástica verdadeira da largura [adimensional]; ε_{p_t} é deformação plástica verdadeira da espessura [adimensional];

Na realidade, é difícil realizar a medição da espessura de um corpo de prova de chapa, ou seja, a probabilidade de erros é grande. Para superar essa dificuldade, pode ser considerada a constância do volume seguindo a Equação (11) [10], [26]. Sendo assim, encontrando a deformação em relação à espessura em função das demais deformações, o índice r pode ser definido através da Equação (13).

$$r = -\frac{\varepsilon_{p_w}}{(\varepsilon_{p_w} + \varepsilon_{p_t})} = \frac{\ln\left(\frac{w_1}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 * l_0}{w_1 * l_1}\right)} \quad (13)$$

Onde: w_0 é largura inicial [mm]; w_1 é largura final após a liberação da força de ensaio [mm]; l_0 é comprimento inicial [mm]; l_1 é comprimento final após a liberação da força de ensaio [mm].

Deve-se mencionar que estes índices são calculados sobre a deformação plástica, ou seja, a deformação permanente do material após a liberação da carga a que ele estava submetido. Caso a medição das dimensões seja realizada enquanto há a aplicação de carga, deve ser descontada a deformação elástica, tal como apresentado nas Equações (14) a (19) [27].

$$e_p = \left[\frac{\Delta l}{l_0} - \frac{F}{(s_0 * E)} \right] * 100\% \quad (14)$$

$$\varepsilon_{p_l} = \ln \left[\frac{(l_0 + \Delta l)}{l_0} - \frac{F}{(s_0 * E)} \right] \quad (15)$$

$$\varepsilon_{p_w} = \ln \left\{ \left[\frac{(w_0 - \Delta w)}{w_0} + \frac{(w_0 * \nu * F)}{(s_0 * E)} \right] / w_0 \right\} \quad (16)$$

Onde: e_p é deformação plástica de engenharia [%]; E é módulo de elasticidade do material [Pa]; Δw é largura final após a liberação da força de ensaio [m]; ν é coeficiente de Poisson (0,30 para aços) [adimensional];

Um alto valor para r quer dizer que o material que está sendo ensaiado tem uma grande capacidade de resistir à redução de espessura, possuindo as maiores deformações no plano, ou seja, na largura e no comprimento da chapa [26].

Sabendo-se que a anisotropia do material depende diretamente do sentido de laminação, a medição em somente um sentido pode determinar um resultado não verdadeiro, para solucionar esta questão é determinado um valor médio de anisotropia conhecido como r_m , ou

anisotropia normal. A anisotropia normal é calculada a partir da Equação (17) .

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (17)$$

Onde: r_m é anisotropia normal [adimensional]; r_{0° é anisotropia no sentido de laminação [adimensional]; r_{45° é anisotropia a 45° em relação ao sentido de laminação [adimensional]; r_{90° é anisotropia a 90° em relação ao sentido de laminação [adimensional].

Existe outro índice de anisotropia muito utilizado para análise do comportamento anisotrópico dos materiais. Sendo este chamado de coeficiente de anisotropia planar, também conhecido como Δr . Tal coeficiente indica as variações do comportamento do material no sentido plano da chapa, além de ser correlacionado com a tendência de formação do defeito chamado de “orelhas” no processo de estampagem. O coeficiente de anisotropia planar pode ser encontrado através da Equação (18).

$$\Delta r = \frac{(r_{0^\circ} + r_{90^\circ})}{2} - r_{45^\circ} \quad (18)$$

Onde: Δr é coeficiente de anisotropia planar [adimensional].

2.5 AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÕES E OBTENÇÃO DA CLC

São inúmeros os desafios de engenharia, muitos deles estão relacionados a avaliar se uma peça pode ser produzida utilizando um determinado processo de estampagem. Estes desafios envolvem principalmente a análise de ocorrência de defeitos e falhas em peças ao longo da estampagem, ou seja, a avaliação da capacidade de conformação dos materiais e também, a previsão e prevenção de defeitos encontrados no processo.

Para trabalhar com estas dificuldades foi desenvolvido o diagrama limite de conformação. Tal diagrama é composto pela curva limite de conformação, CLC, que é plotada em função das tensões verdadeiras da superfície de uma chapa durante um ensaio de conformação. No eixo vertical são indicadas as deformações maiores e no eixo horizontal são indicadas as deformações menores. Com as deformações definidas são plotadas as curvas limites de conformação CLC, que mostram se a chapa pode sustentar uma determinada deformação durante um processo de fabricação sem romper, [10], [28].

2.5.1 DIAGRAMA E CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A primeira abordagem sobre os DLC (Diagrama Limite de Conformação), ou FLD (*Forming Limit Diagram*), foi realizada por Keeler [29], que trabalhou com o lado direito do diagrama, na chamada região de estiramento. Posteriormente este conceito foi evoluído por Goodwin [30], que desenvolveu o lado esquerdo do diagrama, a chamada região de embutimento, [20], [31]. Um exemplo de diagrama limite de conformação pode ser visto na Figura 13.

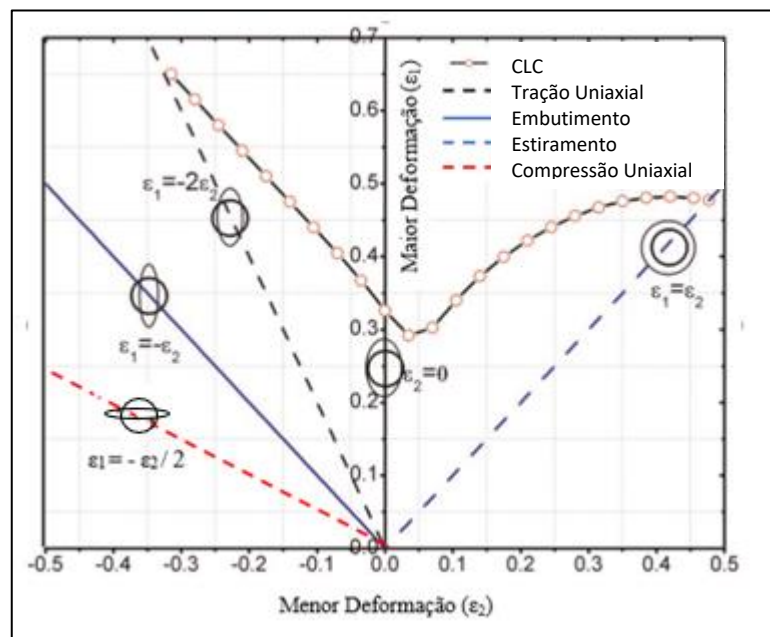


Figura 13 – Diagrama limite de conformação (DLC), adaptado de [20], [32].

A região abaixo da CLC, ou FLC (*Forming Limit Curve*), no diagrama limite de conformação, corresponde aos estados de deformação seguros do material, enquanto que a região acima da curva representa estados de deformação de falha sendo muito importante também para prever a estricção durante o processo de conformação de chapas, fornecendo um critério de falha para análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) possibilitando verificar se é viável a fabricação da peça com os parâmetros especificados em projeto, [33].

Para entender o funcionamento e a aplicação das curvas limites de conformação, é preciso entender que elas mudam de acordo com o tipo e espessura do material, podendo variar de bobina para bobina, ou até mesmo dentro de uma própria bobina, tudo isso devido a questões de processos de fabricação e principalmente, a anisotropia, [34].

Também é necessário conhecer os modos de deformação encontrados em um processo de conformação. A análise se inicia na lei de conservação do volume, já apresentada na Equação (11), mas generalizada na Equação (19) para desenvolver este conceito, [35].

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (19)$$

Onde: ε_1 é deformação verdadeira maior [adimensional]; ε_2 é deformação verdadeira menor [adimensional]; ε_3 é deformação verdadeira na espessura [adimensional].

Para a caracterização dos estados de deformações ao longo do processo de estampagem apenas a análise de ε_1 e ε_2 é suficiente, pois ε_3 pode ser encontrado através da Equação (19) [35], onde ε_1 e ε_2 são as deformações no plano, não importando a direção para cada um, mas sim o seu valor, ou seja, ε_1 sempre será a maior das deformações superficiais.

A seguir podem ser mapeados os modos de deformação de acordo com o ilustrado na Figura 13. O diagrama das deformações principais ilustrado anteriormente não representa nenhum processo específico, mas sim os modos de deformação aos quais uma chapa está sujeita em um processo qualquer. A elipse representada em cada ponto representa o contorno de deformação real de um elemento sofrendo a ação de tensões em específico.

Podem ser destacados pontos indicados através dos círculos e elipses sobre retas específicas no diagrama. O primeiro é o estiramento equi-biaxial, representado a direita na Figura 13. Para este caso, a partir da lei de conservação de volume, sendo que $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, a deformação na direção da espessura (ε_3) é duas vezes maior que na direção principal, $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1$. Neste modo de deformação, a espessura é reduzida mais rapidamente em relação à deformação principal ε_1 , pois a deformação é homogênea nas direções do plano, o que torna a estrição mais difusa [32].

O segundo é a deformação plana, representada ao centro do diagrama na Figura 13. Neste modo de deformação, a chapa se deforma apenas em uma direção evidenciado pela transformação do círculo em uma elipse, onde o eixo menor não sofre deformação. Aplicando-se a lei de conservação de volume, a deformação na direção da espessura encontra-se que $\varepsilon_2 = 0$ e $\varepsilon_3 = -\varepsilon_1$ sendo que aparecem estricções localizadas neste caso, tornando a chapa mais suscetível a fratura, [32].

O terceiro caso é a tração uniaxial, onde $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$. Através da lei da conservação de volume encontra-se que $\varepsilon_3 = \varepsilon_2$. Sendo assim, a chapa sofre estiramento na direção principal 1 e é contraída nas demais direções. Na prática, este modo de deformação ocorre toda vez que uma aresta livre é estirada, como no caso da extrusão de um furo, [32].

O quarto caso é conhecido como embutimento, representado à esquerda, sobre a reta embutimento, onde $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$. Neste modo de deformação, a espessura da chapa não se altera e as deformações possuem o mesmo valor, porém com sinais opostos. Aplicando-se a lei de conservação do volume obtêm-se que $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ e $\varepsilon_3 = 0$. Percebe-se que esta situação é muito crítica, pois a região abaixo da reta embutimento o valor de ε_3 (deformação na espessura) será maior que zero, ocorrendo a aproximação da tendência da ocorrência de rugas na chapa. Já para a região acima da reta embutimento ocorre que o valor ε_3 será menor que zero, afastando a probabilidade da ocorrência de enrugamento da chapa, [32].

O último caso é extremo e é chamado de compressão uniaxial. Neste modo de deformação $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2/2$ e $\varepsilon_3 = -\varepsilon_2/2$, portanto a chapa aumenta sua espessura e provavelmente sofrerá o enrugamento, [32].

2.5.2 ENSAIOS

Para obter os dados que são a base para a construção da curva limite de conformação (CLC), são necessárias informações sobre o comportamento do material nas mais variadas condições de escoamento. O modo obtenção de tais informações foi estudado ao longo dos anos para além dos métodos descritos anteriormente. Ou seja, outras metodologias foram desenvolvidas para obtenção destas curvas limites de conformação, como por exemplo, *bulge-test*, Hecker, Marciniak, Nakazima, entre outros procedimentos experimentais. Apesar de construída a teoria das CLC, nenhuma norma existia até 2002, quando foi criada a ASTM E2218 [36]. Mais tarde, foi elaborada a ISO 12004-2:2008 [37], uma nova normatização, que é utilizada atualmente em testes para obtenção das CLC [34].

A ISO 12004-2, descreve os procedimentos dos testes de Marciniak e Nakajima, para avaliação e determinação de CLC's em chapas de metal com uma espessura entre 0,3 mm e 4 mm. Resumidamente, em ambos testes, as peças planas de chapa são deformadas mecanicamente através um punção hemisférico, com um diâmetro de 100 mm, com uma velocidade de ensaio de 1 mm/s a 2 mm/s. Essa deformação final é medida para diferentes geometrias de amostra, para possibilitar a ocorrência dos estados de formação de deformação uniaxial para biaxial. A seguir, é plotada no diagrama limite de conformação, [37].

Segundo a norma ISO 12004-2 [37], o corpo de prova é uma chapa circular com um eixo central horizontal maior que 25% do diâmetro do punção, sendo que para um punção de 100 mm o comprimento de eixo deve estar entre 25 mm a 50 mm. Para não haver a concentração de tensões nos cantos do eixo, um raio de filete de 20 mm a 30 mm deve ser adotado, sendo

permitido que ao invés do eixo central, sejam utilizados cortes circulares, para realização dos raios de filete, em casos onde a deformação ε_2 seja maior que zero.

O formato padrão para o corpo de prova segue as ilustrações apresentadas na Figura 14 e na Figura 15, sendo que esta última apresenta exemplos de corpos de prova deformados após o ensaio. Existem casos onde podem ser utilizados corpos de prova em formato de tira (por exemplo para aços), mas é preferível a utilização da forma circular externa dos espaços, com um corte de comprimento total igual ao diâmetro do punção, pois esta configuração gera uma distribuição mais uniforme dos pontos limite de conformação experimental [37]. Sobre o corte, entende-se o comprimento total como a soma da dimensão 1 mais os dois raios 3 indicados na Figura 14.

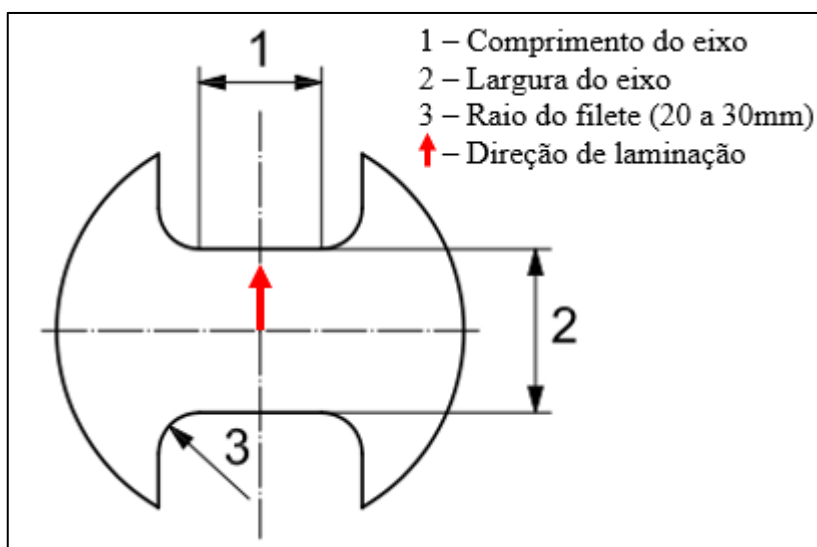


Figura 14 – Formato para corpos de prova, adaptado de [37].

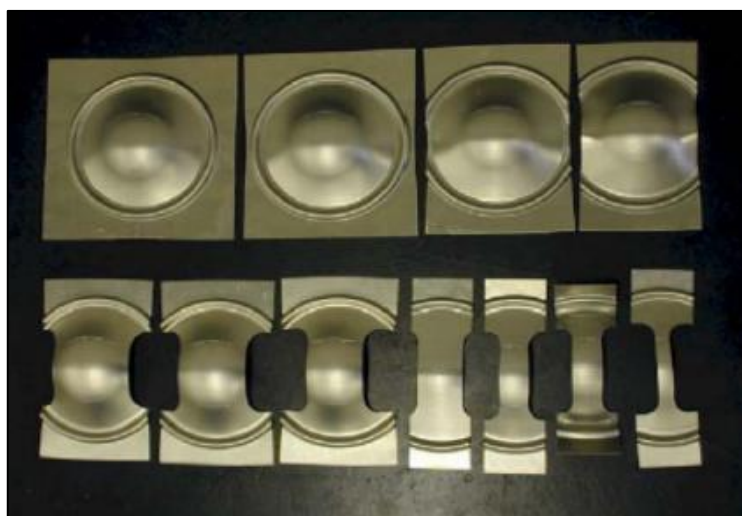


Figura 15 – Corpos de prova após a deformação, adaptado de [23].

Para o preparo dos corpos de prova é preferível que sejam utilizados processos que não causam rachaduras, endurecimento ou alterações na microestrutura, como fresamento ou eletroerosão, de modo a garantir que a fratura nunca inicie nas bordas dos corpos de prova, [37].

Deve-se destacar também que, ao menos cinco geometrias de corpo de prova são necessárias, e o número de amostras para cada geometria deve ser o suficiente para que sejam obtidos três ensaios válidos de acordo com a norma ISO 12004-02, [37], [38]

Antes de realizar os ensaios, deve ser definida a maneira que será realizada a medição das deformações que o corpo de prova sofreu. São diversos os métodos de medição de deformação, tal como marcação em grade, extensômetros mecânicos e espessura por ultrassom.

O principal método utilizado é a marcação em grade, devido à sua simplicidade e relativo baixo custo de realização. Este método consiste em realizar a marcação de uma malha, com dimensões pré-determinadas de formas geométricas simples, na superfície da chapa que será ensaiada. Os principais formatos utilizados estão ilustrados na Figura 16, [10], [39].

Sobre as dimensões das grades, estas estão relacionadas à espessura do material, sendo recomendado um tamanho de malha de uma vez a espessura do material até um valor máximo de 2,5 vezes a espessura do material. É importante destacar que, para um punção de 100 mm, a dimensão máxima deve ser de até 2,54 mm, ao passo que, para que seja atendida a exigência da precisão nos resultados para análise de deformação, a marcação da malha também deve ser muito precisa, [37], [39].

Também podem ser utilizadas malhas com padrões estocásticos (*speckle*), através da aplicação de tinta na superfície do corpo de prova, como ilustrado na Figura 16. Nesse caso deve-se garantir a aderência da tinta à superfície antes e após a deformação. Este método é utilizado para a medição de deformação através da correlação digital de imagem.

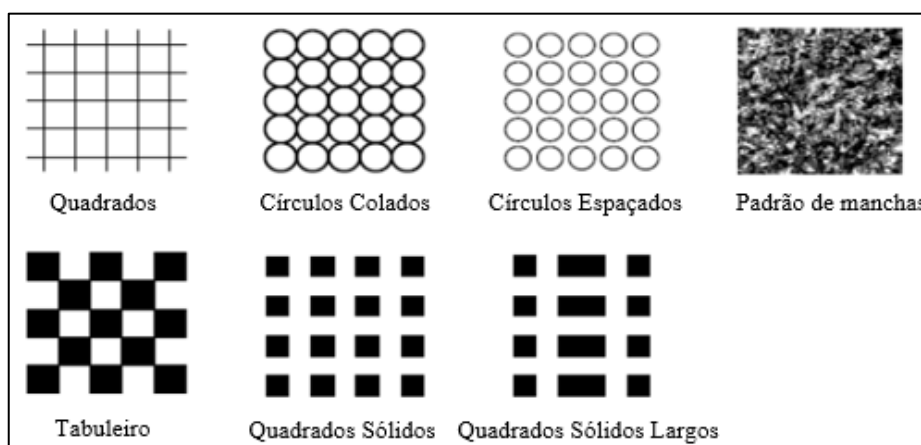


Figura 16 – Tipos de grades utilizadas, adaptado de [39].

Ainda sobre a marcação de grades, podem ser utilizados diversos métodos para marcar os padrões sobre a superfície da chapa. Ozturk [39] apresentou os principais, sendo eles: serigrafia, gravação eletroquímica, gravação fotoquímica e gravação a laser, sendo que cada um possui suas vantagens e desvantagens particulares. Em geral, o método mais usado é o processo eletroquímico, pois as marcações produzidas tem melhor resistência contra o atrito que ocorre durante o processo de conformação entre as superfícies da chapa da ferramenta, além de possuir fácil aplicação e baixo custo, [10], [39], [40].

De maneira geral, para a realização dos ensaios para obtenção das CLC deve-se seguir os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros gerais para os ensaios, adaptado de [37].

PARÂMETRO	VALOR
Velocidade do Punção	(1,5 ± 0,5) mm/s
Temperatura de teste	(23 ± 5) °C
Direção do corte do eixo central do corpo de prova	Alumínio: Eixo da chapa paralelo à direção de laminação Aço: Eixo da chapa perpendicular à direção de laminação
Rugosidade Superficial	A área de contato entre o punção e a peça deve ser polida
Material das Matrizes	Aço endurecido
Critério de parada do ensaio	Ocorrência de falha
Detecção da falha	Visualização da fratura ou queda de força no ensaio

É importante realçar que, para que sejam obtidas curvas de deformação uniformes, o fenômeno de escorregamento da chapa deve ser prevenido ao máximo. Para isso podem ser utilizadas maiores forças no prensa chapas, podem ser inseridas quinas no prensa chapas para melhor travamento do corpo de prova, entre outras alternativas.

Sobre os testes em específico, o ensaio de Nakajima é mais vantajoso em relação aos demais devido à simplicidade de suas ferramentas; as geometrias dos corpos de prova não são complexas e toda a curva limite de conformação pode ser determinada através deste tipo de ensaio, [41].

O ferramental utilizado no teste de Nakajima consiste em 3 componentes principais: um punção, uma matriz e um prensa chapas. O punção deve ser hemisférico com diâmetro de (100 ± 2) mm. A matriz deve possuir diâmetro interno igual a 105mm, sendo maior que $d_p + 2,5t$. Onde d_p é o diâmetro do punção e t é a espessura da chapa a ser ensaiada. A matriz também deve possuir um raio de quina de aproximadamente 8 mm, sendo o mínimo 5mm ou 2 vezes a espessura do corpo de prova (o maior valor entre os dois). E por último, deve ser utilizado um prensa chapas, para evitar o enrugamento do corpo de prova.

Um último ponto, mas não menos importante, deve ser utilizado um material

lubrificante entre o punção e o corpo de prova. A Figura 17 ilustra as informações apresentadas anteriormente, [37].

Partindo para o material lubrificante, a norma ISO 12004-2 apresenta diversas sugestões envolvendo óleo, graxa, placas de PE, PVC e PTFE, além de considerar uma possível combinação de camadas destes materiais sobre a superfície do corpo de prova. A aplicação de um sistema de lubrificação é de extrema importância, pois este possui grande influência sobre a forma que a fratura ocorrerá no corpo de teste, [20]. Tal fratura deve ocorrer a uma distância inferior a 15% do diâmetro do punção do ponto mais alto da peça conformada e, caso a falha ocorra fora do intervalo mencionado, normalmente é problema do sistema de lubrificação entre punção e amostra, sendo este teste individual invalidado e desconsiderado, [37].

Com um sistema de lubrificação ideal, a fratura é levada a ocorrer muito próximo ao topo da curva, eliminando assim um problema recorrente que é o estrangulamento simétrico ao topo da cúpula e com isso, a avaliação das deformações se torna mais precisa, [37], [38].

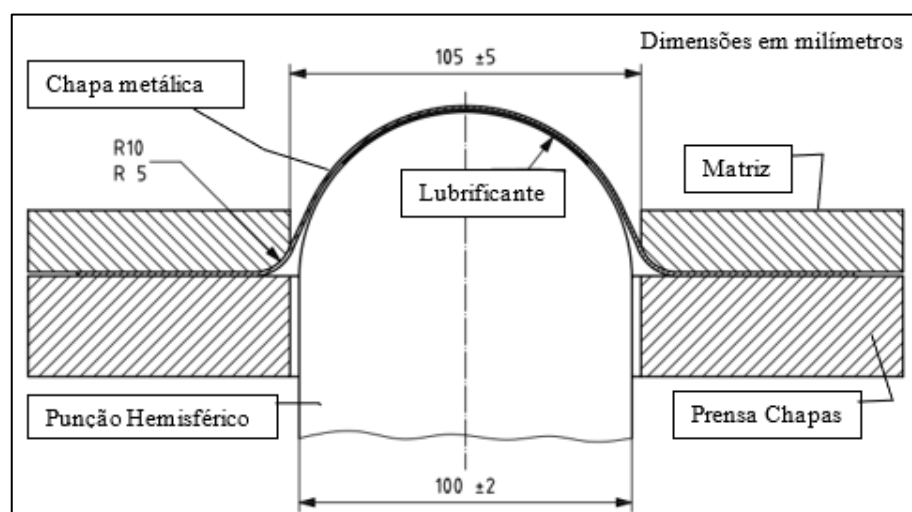


Figura 17 – Teste de Nakajima, adaptado de [37].

2.5.3 MEDIÇÃO E ANÁLISE DO PERFIL DE DEFORMAÇÃO

Para a avaliação das deformações, e a posterior obtenção dos valores de deformação verdadeira que são representados no diagrama limite de conformação, são utilizadas geralmente, como dito anteriormente, grades circulares. Após o ensaio, os círculos tornam-se elipses. Então as deformações de engenharia são medidas de acordo com os eixos da elipse, transformando-as em deformações verdadeiras, onde o eixo longo é a direção da deformação principal ϵ_1 , e perpendicular ao eixo de deformação principal está a direção de deformação menor, ϵ_2 , [40].

Os comprimentos do eixo principal de deformação e do eixo de menor deformação, são

identificados denotados como L_{ma} e L_{mi} na Figura 18. A mudança percentual no comprimento, em relação ao diâmetro inicial, representa a deformação de engenharia nessa direção, resultando assim nas Equações (20) e (21). Em seguida são encontradas as deformações verdadeiras utilizando Equação (6).

$$e_1 = \frac{L_{ma} - L_i}{L_i} \text{ [Adimensional]} \quad (20)$$

$$e_2 = \frac{L_{mi} - L_i}{L_i} \text{ [adimensional]} \quad (21)$$

Onde: e_1 e deformação maior de engenharia secção deformada [adimensional]; e_2 deformação menor de engenharia secção deformada [adimensional]; L_i é diâmetro inicial dos círculos da grade [mm]; L_{ma} é comprimento final do eixo maior da elipse [mm]; L_{mi} é comprimento final do eixo menor da elipse [mm].

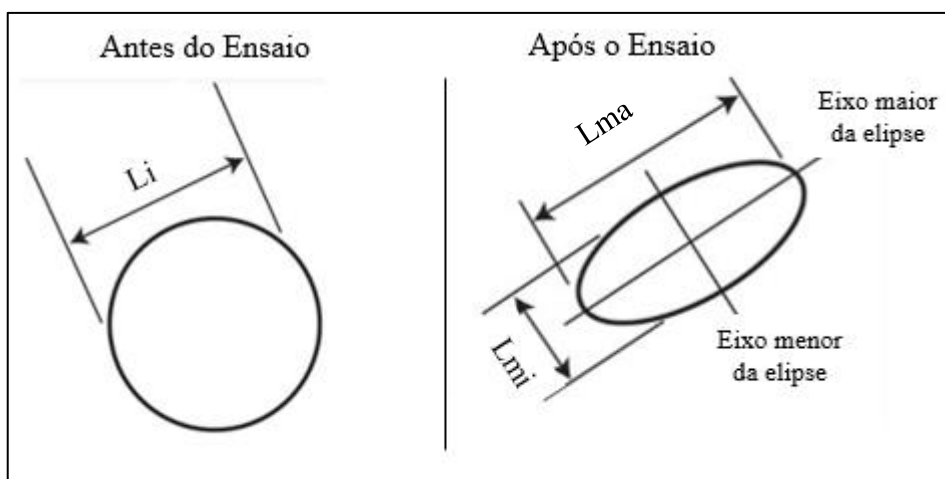


Figura 18 – Deformações nas grades circulares, adaptado de [40].

A medição dessas deformações pode se dar de diversas maneiras, tais como microscópios, escalas, paquímetros, entre outros. Entretanto, tais modos de medição possuem diversas desvantagens, como tempos de medição elevados, possibilidade de erro na leitura dos valores, muito devido à baixa resolução e distorção da visualização das deformações. Com isso, há a exigência de ferramentas de medição mais precisas e rápidas para a determinação das deformações, o que é possível através da utilização de sistemas de câmeras através da correlação digital de imagem, ou *digital image correlation (DIC)*. Também, a utilização de sistemas CDI garante a avaliação de todas as áreas em campo completo e sem contato para medição e análise de grade, além de possuir melhor resolução para avaliação dos dados, [40].

Outra vantagem da utilização de sistemas de CDI se dá na avaliação do exato momento da falha, além da medição mais precisa das deformações, já que no passado, os operadores que conduziam o teste precisavam perceber o estrangulamento da amostra usando os dedos, para então medir manualmente a distribuição de tensão naquela seção.

A norma ISO 12004-2 [37] descreve o procedimento correto para a utilização de sistemas de câmeras para a posterior análise e medição dos perfis de deformação.

Para a preparação do ensaio, são fixadas e direcionadas as câmeras para o corpo de prova na máquina de ensaio. A seguir essas câmeras são calibradas através de métodos específicos para correção de distorções de dimensões das lentes (definição de parâmetros intrínsecos das câmeras) e também para a localização das câmeras em relação ao corpo de prova (definição dos parâmetros extrínsecos das câmeras). O próximo passo é a realização do ensaio, onde deve ser registrada toda a sequência de imagens durante o mesmo, com uma frequência mínima de 10Hz, ou seja, 10fps (imagens por segundo), [34], [37], [42].

Após o ensaio, é verificada a última imagem em que ocorreu a fratura no corpo de prova. Nessa imagem são definidas e marcadas as posições da seção transversal perpendicular à fissura na imagem com fratura para, em seguida, transferir as mesmas marcações de volta para a última imagem antes da ocorrência da fratura, a fim de obter a seção transversal para classificar os valores $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ sem a abertura da fissura. São removidos os pontos de deformação na área da falha e a distribuição de deformações de antes do início do estrangulamento é reconstruída nesta região por ajuste de curva da parte restante da distribuição de deformação em ambos os lados da falha [37]. Este método é baseado na dependência de posição, conhecido como “método da seção transversal”, discutido nos estudos de Bragard [43] em 1972, [44].

São definidos 4 passos principais para a medição e desenvolvimento da CLC [37]:

- Definição das seções relevantes que contêm a falha;
- Marcação da região de falha utilizando um critério matemático objetivo para definição dos limites internos da janela de ajuste da curva;
- Definição de limites externos para obter uma largura ideal da janela de ajuste, permitindo a melhor aproximação de curva relevante para ambos os lados da falha;
- Cálculo da inversa da parábola para as janelas definidas, encontrando assim o valor de ε_1 desejado na posição definida para a falha.

Iniciando o primeiro passo, uma linha deve ser marcada sobre a fissura para identificar a orientação da falha. A seguir, são marcadas três seções perpendiculares à fissura, no estágio imediatamente antes da trinca da amostra. A primeira seção é posicionada no centro da fissura enquanto as outras duas seções são posicionadas uma em cada lado da linha principal, com uma

distância de 2 mm até a linha central, sendo que cada uma das seções deve possuir ao menos 40mm de comprimento e obter ao menos 10 pontos para verificação da deformação, Os valores de deformação ε_1 e ε_2 são calculados ao longo dessas três linhas de seção, [37], [38] .

Para o cálculo a seguir são necessários: a posição X e as deformações ε_1 e ε_2 para cada ponto de seção, onde: a posição X é identificada ao longo do comprimento do arco da seção na superfície deformada, contando a partir do primeiro ponto de interseção, por exemplo, com $X(0) = 0$ mm no início da seção S(1). Todo o comprimento do perfil deve ser armazenado em formato de tabela, em formato ASCII, para posterior avaliação com *software*. O arquivamento de todos os dados pode ser dado através da identificação da geometria da amostra, seguida pelo número da amostra e o número da seção que leva ao seguinte formato de arquivo.

O segundo passo consiste na extração da curva em formato de seno e, através dos pontos experimentais, a determinação dos limites internos para a curva de melhor ajuste. O terceiro, e último passo para traçar a curva limite de conformação, consiste em definir os limites externos para as janelas de melhor ajuste e também, avaliação da inversa da parábola de melhor ajuste da “curva em forma de sino”. Estes dois passos estão descritos no Anexo I, seguindo a orientação da norma ISO 12004-2. Finalmente, para avaliar um valor limite de conformação para a CLC, o valor médio de três avaliações da mesma geometria de amostra é usado. A CLC completa é então avaliada considerando os resultados da medição de deformação de todas as geometrias de amostra testadas, [37], [38].

2.5.4 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

Sabe-se que é preciso conhecer e entender o comportamento do material durante o processo de conformação, verificando se haverá falha ou sucesso. Para isso, existem basicamente duas opções. A primeira escolha é realizar essa análise experimentalmente, o que pode ter altos custos, além de exigir grande esforço e tempo. A segunda opção é utilizar a simulação numérica, através da aplicação das propriedades conhecidas do material sobre o método dos elementos finitos, o que proporciona a previsão do comportamento do material durante o processo de conformação e permite verificar se esse material concluirá a operação com sucesso ou falhará, sendo necessário realizar a alteração dos parâmetros de estampagem para um bom resultado do processo.

A simulação de estampagem utilizando o método de elementos finitos (MEF), já se tornou uma ferramenta eficiente para avaliar a conformabilidade de peças estampadas durante a fase de projeto, principalmente no quesito de avaliação de falhas, rapidez e redução de custos no desenvolvimento de ferramentas e processos de estampagem. Através da utilização da

simulação numérica, mais especificamente no MEF, são encontradas formas de solucionar questões intrínsecas ao processo de estampagem, como o efeito de alterações nos parâmetros de processo, impacto do atrito, formação de rugas, redução de espessura, entre outros pontos. O crescente avanço na capacidade de processamento dos programas e computadores atuais permitiu que as simulações se aproximassem cada vez mais dos resultados experimentais, tornando a simulação numérica um importante passo para validar os resultados práticos de um projeto, [13], [18], [45].

No MEF são criadas malhas virtuais nos materiais de interesse, onde estes são divididos em um número finito de elementos discretos, os quais são interligados através de pontos chamados nós. Esses elementos podem ser agrupados de inúmeras maneiras, modelando formas geométricas das mais diversas complexidades, [18], [46].

Para a aplicação em conformação de chapas, o material é discretizado em elementos finitos e então há a aplicação de deslocamento incremental ao longo de etapas de iteração, realizando assim o processo de conformação. Posteriormente, a malha é refinada para determinar os pontos de contato entre as ferramentas de conformação e a chapa metálica, a fim de garantir a melhor convergência de resultados do processo, [45].

São diversos os trabalhos que realizaram a avaliação de processo de estampagem através de simulação numérica, tal como Huang [47], Dos Reis [13], Wiebenga [48] e Manikandan [20] que realizaram estudos sobre a influência de vários parâmetros de estampagem na qualidade da final do processo. Sobretudo, deve-se enfatizar que as condições de contorno e os valores dos dados de entrada são fatores de extrema relevância para a obtenção de resultados confiáveis, [45].

Portanto, o projeto e a análise das operações de estampagem requerem um conhecimento aprofundado dos mecanismos de deformação, principalmente porque os processos envolvendo metais são caracterizados pela não linearidade, tanto na geometria, no comportamento do material quanto no comportamento do contato ou atrito entre materiais, [49].

Explicitamente, a não linearidade dos materiais pode ser descrita pela anisotropia. Sabendo-se que anisotropia tem grande influência sobre a capacidade de conformação de um material, a caracterização do comportamento dos materiais deve-se considerar um critério de falha que considere as propriedades anisotrópicas na simulação numérica, [49].

Com esta abordagem, foram desenvolvidos diversos modelos matemáticos para critérios de falha anisotrópicos. Entre eles pode-se citar Hill 48, Hill 90, Barlat 89, Barlat 91 e Barlat 2000. Apesar de mais antigo, o critério Hill 48 é o mais utilizado, pois considera o comportamento anisotrópico dos materiais acoplado com o endurecimento destes, além de que

os parâmetros que o descrevem são de simples obtenção, tanto para aços quanto para alumínio, [41], [49].

O critério de Hill 48 é uma extensão do critério de von Mises, possibilitando a caracterização de materiais ortotrópicos (tensão de cedência diferente para diferentes direções de sollicitação) de maneira simples. Para a aplicação na conformação o critério é descrito como apresentado na Equação (22), [41], [49].

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 - 1 = 0 \quad (22)$$

Onde F, G, H, L, M e N são coeficientes de propriedades do material e os índices x, y e z são referentes a direção de laminação sendo: paralelo, perpendicular e na direção da espessura do material. A Equação (28) é simplificada para o caso de estado plano de tensões (aplicado para avaliação de chapas), resultando na Equação (23), [41], [49].

$$(G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 - 1 = 0 \quad (23)$$

Para o cálculo da Equação (23) deve-se definir os coeficientes F, G, H e N, os quais podem ser encontrados através das de rácios de tensão ou em função dos coeficientes de anisotropia, como apresentado nas Equações (24) a (27), [41], [49], [50].

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) = \frac{H}{r_{90}} \quad (24)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) = \frac{1}{(r_0 + 1)} \quad (25)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) = r_0 G \quad (26)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{12}^2} \right) = \frac{1}{2} \frac{(r_0 + r_{90})(2r_{45} + 1)}{r_{90}(r_0 + 1)} \quad (27)$$

Os coeficientes R_{11} , R_{22} , R_{33} e R_{12} são razões de tensão nas direções paralela, perpendicular, na espessura e a 45° com a direção de laminação, que podem encontrados através das relações com os coeficiente de Lankford, como apresentado nas equações anteriores, [49].

Os *softwares* utilizados são diversos, tal como ANSYS/LS-DYNA® [13], ABAQUS® [49], Pam-Stamp® [41], entre outros. Através desses softwares foram desenvolvidos diversos estudos analisando a estampabilidade dos materiais, seja simulando ensaios experimentais, como Kumar [41] que obteve o diagrama limite de conformação através da simulação do ensaio de Nakajima, até Trzepieciniski [49] que realizou simulações para avaliar a anisotropia sobre a conformação de metais.

2.6 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CDI)

A Correlação Digital de Imagens (CDI) é um método de correlação que, a partir da captura de uma sequência de imagens através de câmeras, transfere-se essas imagens para algoritmos de correlação, é capaz de medir extensões e deslocamentos sem que haja contato com o objeto de interesse. Esta técnica possibilita a análise de deformações de um objeto, a duas e três dimensões, de uma maneira flexível e com uma boa confiabilidade em diferentes tipos de materiais e situações, sendo que para três dimensões são necessárias duas ou mais câmeras para a aquisição de imagens, [51].

Partindo para a medição, a primeira imagem é utilizada como referência, onde é definida uma região de interesse para a verificação das medições. Esta região de interesse então é dividida em blocos, onde cada bloco é dado através de um conjunto de pixels, definidos de acordo com a intensidade de sua cor. A seguir esses elementos são procurados na imagem seguinte, e o objetivo do algoritmo de correlação é determinar a nova posição para cada elemento, procurando os valores de intensidades dos pixels definidos anteriormente, como ilustrado na Figura 19. Por último, o algoritmo calcula o movimento que cada bloco realizou de uma imagem para a outra, obtendo assim os deslocamentos e deformações da região de interesse, [51], [52].

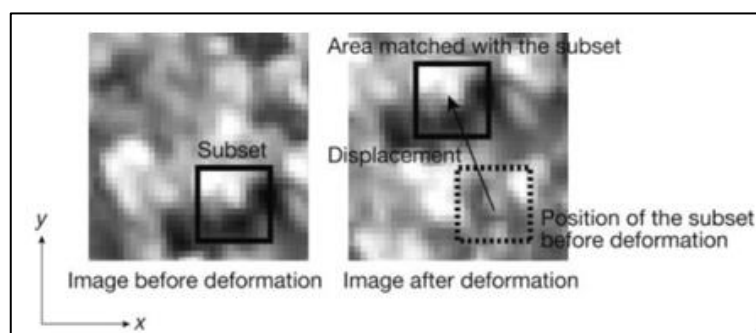


Figura 19 – Blocos identificados antes e depois da deformação, adaptado de [52].

Desta maneira não deve existir mais do que uma correspondência para um bloco, portanto, a superfície do objeto a ser analisado é preparada através da aplicação de uma grade de medição, geralmente utilizando manchas com uma disposição aleatória, de cor que contraste com a superfície da peça. Assim, a aplicação do padrão pode ser facilmente realizada com tinta branca como fundo sobreposta por manchas da cor preta, o que torna a preparação do procedimento experimental relativamente simples. A captura de imagens pode ser feita com uma câmera digital relativamente comum, mas prezando uma boa qualidade de imagens, pois esta pode interferir na interpretação dos resultados posteriores. Também é utilizada iluminação

do provete durante a aquisição de imagens para garantir uma melhor precisão e controle do ambiente para aquisição de imagens, [51], [52].

Uma etapa importante que deve ser mencionada é a calibração das câmeras que realizarão a captura de imagens. Esta técnica é aplicada para melhorar a qualidade das imagens, corrigindo a distorção das lentes ou medindo a dimensão de objetos reais. Com isso são verificados os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, sendo que o primeiro está relacionado à distância focal, centro óptico, coeficientes de distorção da lente e conhecer esses parâmetros permite melhorar a qualidade das imagens, corrigir a distorção da lente e mapear as distâncias da cena real para pixels na imagem. O segundo define a posição da câmera (translação) e o ângulo (rotação) no espaço em relação a um objeto fixo. Esses parâmetros são essenciais para a calibração do estéreo e a estrutura do movimento, [53].

Para esta calibração podem ser utilizadas diversas metodologias, onde existem duas principais. A primeira consiste em marcar uma distância qualquer conhecida no mundo real e relacionar com os pixels da imagem. A segunda consiste em realizar a captura de imagens de padrão de calibração em xadrez, com tamanhos de aresta constantes e conhecidos, pois o tabuleiro de possui um padrão regular facilita a detecção automática de distâncias. A seguir, essas imagens são transferidas para o software de medição, para que sejam identificadas as posições e distâncias no mapeamento das imagens do tabuleiro de xadrez. Cabe ressaltar aqui que a calibração de câmeras estéreo para medição em 3D é muito maior para câmeras para 2D, pois em duas dimensões é possível utilizar apenas uma câmera. Já para situações onde se deseja medir distâncias e deformações em 3D, onde são utilizadas no mínimo duas câmeras, é necessário que a calibração relacione a posição do objeto e os parâmetros para as duas câmeras em simultâneo, [53].

Existem diversas opções de softwares para avaliação das deformações através da correlação digital de imagem, onde Beleza [54] realizou um estudo sobre seis diferentes softwares de correlação digital de imagem, como propósito de apontar aqueles que oferecem as melhores vantagens. Entre os principais softwares avaliados estão o Gom Correlate®, muito conhecido e utilizado para a CDI e análise de movimento em duas e três dimensões; e o NCorr®, que é um algoritmo de correlação digital de imagem a duas dimensões desenvolvido no Matlab®. Também em Matlab®, Solav [53] desenvolver uma biblioteca de *software* de código aberto e gratuito para análise de imagens estéreo e obtenção de formas 3D, deslocamentos de campo completo e deformações para diversas situações

Capítulo 3: Caracterização das Propriedades e Obtenção das Curvas Limite de Conformação

Com base na teoria apresentada anteriormente, foram realizados estudos e testes de conformabilidade em laboratório. Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para estes estudos e os procedimentos experimentais realizados para caracterização das propriedades mecânicas, das propriedades de estampagem e levantamento das curvas limite de conformação dos mesmos. Foram utilizados três aços inoxidáveis distintos, o EN 1.4509, EN 1.4511 e EN 1.4512, sendo todos pertencentes à família de aços inoxidáveis ferríticos.

Para a caracterização das amostras foram preparados os corpos de prova seguindo as normas para realização de ensaios de tração e ensaios de Nakajima. Tanto para o ensaio de tração quanto para o ensaio de Nakajima foi necessário o estudo, projeto e desenvolvimento de um sistema de correlação por imagem digital, para posterior avaliação das deformações dos corpos de prova, seguida pela determinação das propriedades dos materiais.

3.1 MATERIAIS

Foram fornecidos pela Catraport chapas de aços inox ferríticos, sendo eles: EN 1.4509, EN 1.4510 e EN 1.4512 com equivalência descrita na Tabela 3. As propriedades dos aços utilizados estão descritas nas fichas técnicas apresentadas no Anexo II e no Anexo III.

Tabela 3 – Equivalência de aços, adaptado de [55]–[59].

AISI	EN-10088-2	SIMBOLOGIA
441	1.4509	X2CrTiNb18
439	1.4510	X3CrTi17
409	1.4512	X2CrTi12

Os materiais foram recebidos em seis modelos de chapas cortadas em formato de discos, como ilustrado na Figura 20, sendo apresentadas na Tabela 4 as suas dimensões e identificação para rastreio da bobina de que foram extraídos.

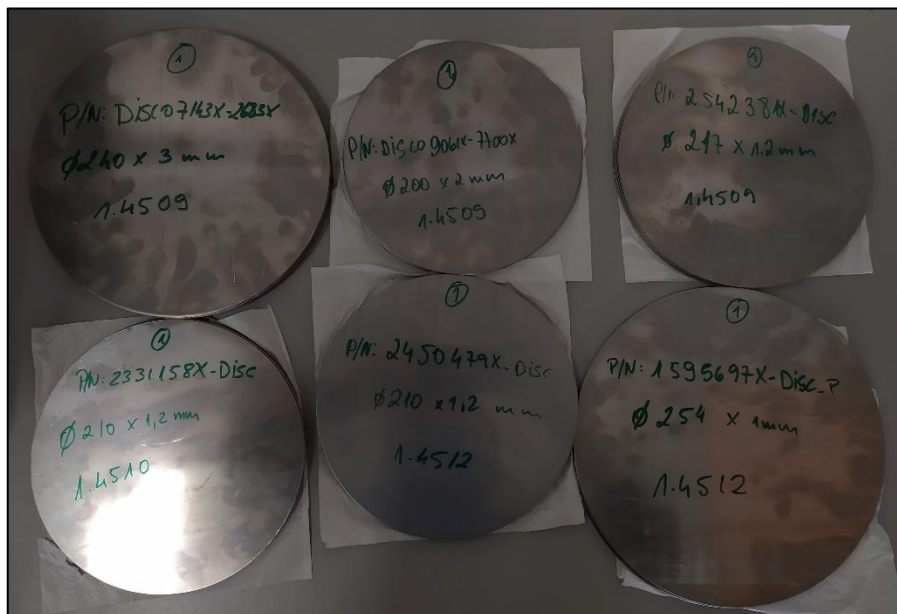


Figura 20 – Amostras fornecidas pela Catraport.

Tabela 4 – Dimensões e identificação dos materiais.

EN-10088-2	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Part Number
1.4509	200	2	Disco 9061X-7700X
1.4509	217	1,2	2542381X-Disc
1.4509	240	3	Disco 7143X-2683X
1.4510	210	1,2	2331158X-Disc
1.4512	210	1,2	2450479X - Disc
1.4512	254	1	1595697X-Disc_P

A principal aplicação destes aços se dá na indústria automobilística, mais especificamente, no sistema de exaustão dos gases resultantes da combustão de combustíveis, [60]. A Figura 21 ilustra a distribuição dos tipos de aço ao longo do sistema de exaustão de um automóvel.

Como citado anteriormente, a indústria vem desenvolvendo grandes avanços e melhorias das ligas, buscando o maior tempo de garantia, maior segurança e principalmente qualidade dos componentes automotivos. Citando sobre os aços inoxidáveis ferríticos, eles são elementos magnéticos, normalmente podem ser endurecidos através da conformação a frio e são utilizados no estado recozido, se destacando pela sua excelente resistência às altas temperaturas e, por isso são comumente utilizados em fogões, sistemas de exaustão de gases de

automóveis, entre outras aplicações. Aços típicos ferríticos são o AISI441, 439 e 409, [61], [62].

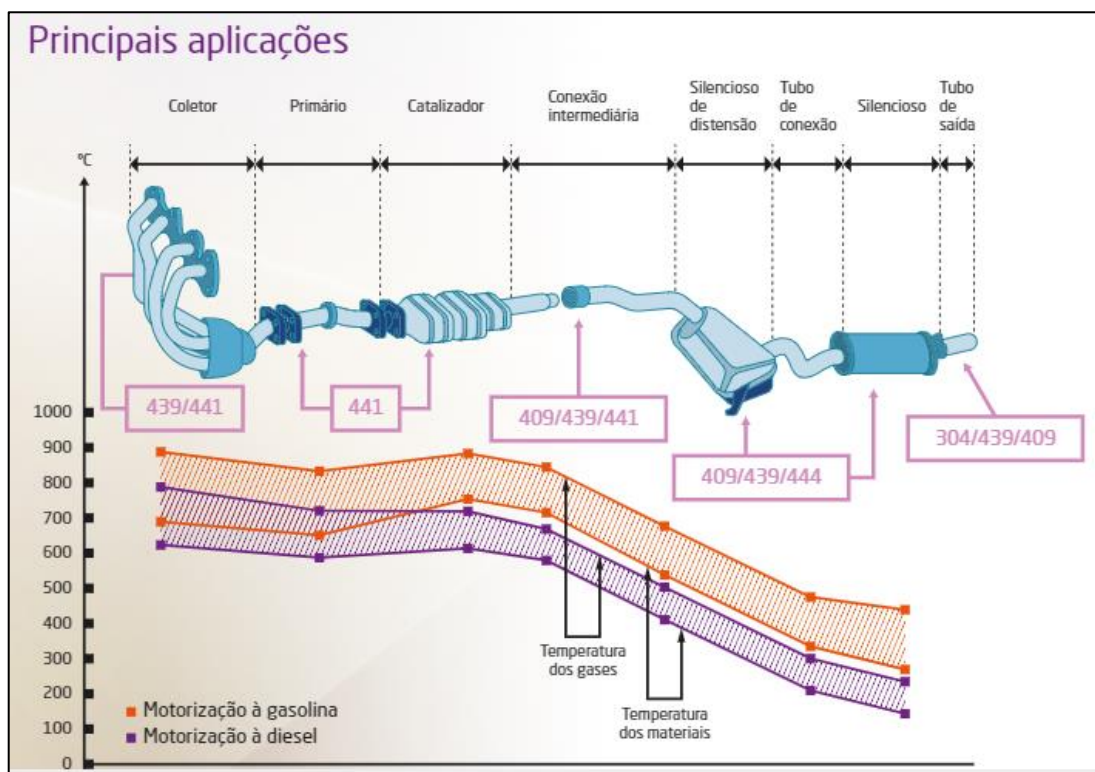


Figura 21 – Aplicação dos aços inox do estudo, [60].

A Tabela 5 ilustra a composição típica para os aços deste estudo.

Tabela 5 – Composição dos Aços - % em massa, adaptado de [59].

EN	Módulo Young ^{20°C}	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti
1.4509	220GPa	0,03	1,00	1,00	0,04	0,015	17,5 a 18,5	[3C+0,30] a 1,00	0,10 a 0,60
1.4510	220GPa	0,05	1,00	1,00	0,04	0,015	16,0 a 18,0	-	4(C+N)+0,15 a 0,80
1.4512	220GPa	0,03	1,00	1,00	0,04	0,015	10,5 a 12,5	-	6(C+N) a 0,65

As características interessantes desses aços são devidas principalmente a adição de elementos químicos em sua composição, tal como o nióbio, cromo e titânio. Mais especificamente, o aço 1.4509 é um aço inoxidável ferrítico com aproximadamente 17% de cromo, titânio e menos de 1% é nióbio o que transforma completamente o comportamento dos materiais, aumentando a resistência mecânica dos aços, sem prejudicar a sua tenacidade. Sem níquel, com boa resistência à corrosão e alta temperatura este aço foi originalmente projetado

para sistemas de exaustão. Essa adição de titânio e nióbio a ligas ferríticas, melhora a soldabilidade e a conformabilidade com tensão de escoamento ($\sigma_{0,2\%}$) em torno de 250MPa. O aço 1.4510 é muito semelhante ao 1.4509, mas sem a adição de nióbio e menos cromo em sua composição, possuindo tensão de escoamento ($\sigma_{0,2\%}$) em torno de 240MPa. Já para o aço 1.4512, há uma redução maior do percentual de cromo em sua composição, além de que também não há a adição de nióbio, possuindo tensão de escoamento ($\sigma_{0,2\%}$) em torno de 220MPa, [56].

Por fim, o menor teor de níquel promove maior endurecimento nesses tipos de aços, além que o teor relativamente alto de cromo melhora sua resistência à corrosão localizada, ou seja, esse tipo de aço ferrítico estabilizado tem boa resistência à corrosão por pite. Outro ponto importante a presença dos intermetálicos impede a ocorrência de sensitização durante a soldagem dos aços, garantindo que eles não sofram a corrosão intergranular. Além dessas vantagens, em termos de resistência à corrosão, os aços inoxidáveis ferríticos podem ser considerados como uma opção mais econômica aos aços austeníticos, com resultados similares e é justamente por essa série de benefícios que os aços inoxidáveis ferríticos 441, 439 e 409 são uma excelente opção em diversos setores, tal como o automotivo, [62].

Partindo para a conformação destes aços, Pisano [1] realizou uma pesquisa sobre as características de estampagem do aço 1.4509, comparando-o com o aço austenítico AISI 321.

Já Juntunen [63] realizou uma pesquisa sobre a conformabilidade final do aço 1.4512 através dos ensaios de Erichsen e Nakajima, obtendo resultados e comparando-os com o EN 1.4016 e o EN 1.0306. Ele conclui que o limite de conformabilidade do aço EN 1.4512 é melhor em comparação com o aço EN 1.4016. O aço EN 1.0306 foi melhor do que esses dois aços inoxidáveis em seu limite de conformabilidade. Ao final, os ensaios experimentais de conformabilidade mostraram que o aço inoxidável ferrítico EN 1.4512 se adequa extremamente bem a processos de repuxo e conformação profunda. Também existem previsões de CLC para os aços ferríticos AISI 409L e AISI 430, comparando resultados através do ensaio de Marciniak e Bressan–William–Hill (BWH) onde, além da CLC foram encontrados os valores de coeficiente de encruamento (n), resultando em resultados similares em ambas as situações, [28].

A Figura 22 ilustra uma comparação entre as CLC dos aços ferríticos mais comuns, além do aço austenítico AISI 304.

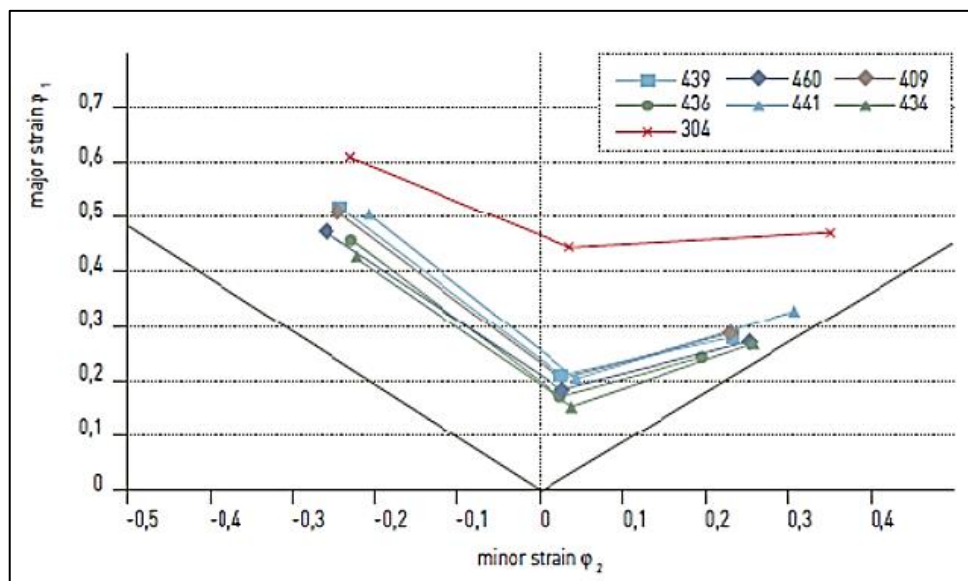


Figura 22 – Conformabilidade de aços ferríticos x aços austeníticos, [63].

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

A partir do ensaio de tração buscou-se obter as seguintes propriedades no ensaio de tração: limite de escoamento ($\sigma_{0,2\%}$), limite de resistência a tração (σ_m), alongamento máximo, diagramas tensão x deformação, coeficiente de encruamento (n) e coeficientes r de lankford.

Os ensaios foram executados em uma máquina universal de testes Instron modelo 4485 com capacidade de 15 toneladas, onde o software para aquisição de dados é o Blueville 2, da própria Instron. A norma utilizada foi a ISO 6892-1 (2009) [64], onde são definidas as dimensões dos corpos de prova, além das condições de realização dos ensaios de tração.

Devido à limitação das dimensões dos materiais disponíveis, foram necessários 2 modelos de corpo de prova, como ilustrado na Figura 23, sendo que as dimensões estão apresentadas na Tabela 6. O modelo 1 foi utilizado para chapas com espessura menor que 3mm, e o modelo 2 foi utilizado para a chapa com espessura igual a 3mm. Os corpos de prova foram obtidos através de corte a plasma a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação, sendo que foram realizados ensaios em 3 corpos de prova para cada direção. O corte se deu através do processo de corte a plasma.

Também foram realizadas marcas 3 transversais ao longo da largura de cada corpo de prova, como indicado através das linhas vermelhas 1, 2 e 3 na Figura 23. Estas marcas são utilizadas como referências locais para o cálculo das deformações ao longo do comprimento e largura do corpo de prova.

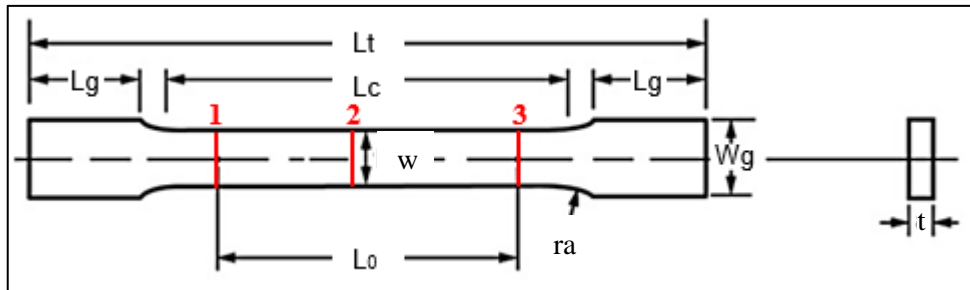


Figura 23 – Corpo de prova para o Ensaio de Tração, adaptado de [64].

Tabela 6 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração, adaptado de[64].

Dimensão	Chapas finas	Chapas grossas
L_0 – Comprimento útil (mm)	50,0	50,0
w – Largura (mm)	12,5	20,0
t – Espessura (mm)	<3mm	≥ 3 mm
ra – Raio de aresta (mm)	20,0	$\geq 12,0$
L_t – Comprimento total (mm)	159,57	189,50
L_c – Comprimento da zona útil (mm)	56,25	90,0
L_g – Comprimento da seção de engaste (mm)	40,0	40,0
W_g – Largura da seção de engaste (mm)	20,0	30,0

A norma a ISO 6892-1 (2009) [64] recomenda que a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}_{Lc}$) ao longo do comprimento para paralelo (L_c) seja mantida constante para todas as amostras em $0,00025 \text{ (mm/mm)s}^{-1}$. Para a máquina modelo Instron é possível controlar apenas a velocidade do ensaio v_c (mm/min), ou seja, para que a norma seja respeitada, é preciso encontrar uma relação entre taxa de deformação e velocidade, essa relação é dada através da Equação (28).

$$v_c = \dot{\epsilon}_{Lc} * L_c \text{ [mm/s]} \quad (28)$$

Onde: v_c é velocidade do ensaio [mm/s]; $\dot{\epsilon}_{Lc}$ é taxa de deformação no comprimento paralelo do corpo de prova [s^{-1}]; L_c é comprimento paralelo do corpo de prova [mm].

Sendo assim, é preciso alterar essa velocidade de acordo as dimensões do corpo de prova utilizado. Considerando os dados apresentados na Tabela 6 com a Equação (28), a velocidade definida para os ensaios foi de 0,8438mm/min para os corpos de prova do modelo 1, e 1,35 mm/min para os corpos de prova do modelo 2. A aquisição de dados foi realizada com 4 pontos/segundo durante o primeiro minuto de ensaio, então é realizada uma redução para 2 pontos/segundo para o restante do teste. Tal redução é necessária para garantir que todo o teste será armazenado, pois há a limitação de memória para gravação dos pontos.

Para a determinação dos valores das propriedades desejadas, foi desenvolvido um código em Matlab® baseado nas equações apresentadas anteriormente. Os dados resultantes

dos ensaios devem ser gravados em formato .csv e alocados no mesma pasta onde está o código em Matlab®. Com as planilhas alocadas, deve-se inserir, no código em Matlab®, as dimensões dos corpos de prova, tal como a largura, espessura e comprimento útil. A seguir, ao rodar o código, os resultados são inseridos em uma planilha de saída com todas as informações desejadas. Para os coeficientes anisotropia, foram utilizadas as Equações (11) a (18), seguindo a execução e os resultados obtidos nos ensaios através das normas pertinentes.

Para determinação do coeficiente de encruamento (n) foi utilizada a norma ISO 10275 (2007) [65], onde o corpo de prova é submetido à deformação de tração uniaxial e o expoente n é calculado considerando uma parte da curva tensão-deformação na região plástica ou, considerando toda a região de deformação plástica uniforme. Quando n é determinado ao longo de toda a faixa de deformação plástica uniforme, o limite superior para esses pontos de dados deve ser imediatamente anterior à deformação em que ocorre a força máxima do ensaio, [65].

Portanto, o próximo passo foi definir os instantes onde acontecia a deformação plástica uniforme, para verificar o trecho da curva tensão x deformação que devia ser convertida em tensão verdadeira x deformação verdadeira, e então encontrar o coeficiente de encruamento n . Após o ensaio de tração, são obtidos os dados de força e alongamento do corpo de prova para cada ponto verificado pela máquina ao longo do ensaio. A próxima etapa é tratar esses dados e então encontrar a tensão de engenharia através da Equação (2), já conhecendo a área da seção inicial do corpo de prova através da Equação (1). A seguir, é calculado o valor da deformação de engenharia através da Equação (3). Com isso é possível plotar a curva de tensão x deformação de engenharia. Após obtida a curva de engenharia, é possível definir a curva tensão verdadeira x deformação verdadeira, ou seja, neste momento é preciso utilizar as Equações (8) e (6), para converter a tensão e deformação de engenharia em tensão verdadeira e deformação verdadeira, respectivamente. O próximo passo é aplicar o logaritmo na tensão verdadeira e deformação verdadeira encontrados, resultando em duas colunas com comportamento linear. A seguir é calculada a regressão linear das últimas colunas, encontrando uma equação da mesma forma que a Equação (29). Então, utilizando a Equação (30) é possível encontrar o valor C da constante da Equação de Hollomon.

$$\log \sigma_v = A + n \log \varepsilon \text{ [adimensional]} \quad (29)$$

$$C = 10^A \text{ [adimensional]} \quad (30)$$

Onde: A é relacionado com o valor de C da Equação de Hollomon [adimensional]; C é o coeficiente da equação de Hollomon [adimensional]

Com os parâmetros da Equação (29) em mãos, é possível correlacioná-los com a equação de Hollomon, encontrando o valor de interesse do coeficiente de encruamento n .

Para a determinação dos coeficientes de anisotropia foi utilizada a norma ISO 10113 (2020) [27], onde não é explícito o instante em que devem ser realizadas as medições das deformações verdadeiras, apenas deve-se referenciar qual é o valor de deformação plástica em que as medições foram realizadas. Um ponto importante mencionado é que as medições devem ocorrer nos instantes de tempo onde há deformação plástica uniforme. É mencionado na literatura que as medições para aços são realizadas no trecho entre 15% e 20% de deformação plástica, ou então até o instante onde há a tensão máxima, pois é um trecho onde há a tendência de uniformização dos valores encontrados [66], [67]. Para avaliar o comportamento dos valores de encontrados para a anisotropia ao longo dos testes, os cálculos também foram realizados para valores de deformação plástica iguais 2%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 17,5% e A_g (deformação plástica no instante de tensão máxima). Para cada uma destas situações, nos instantes de tempo marcados, devem ser medidos a variação de largura (nas linhas 1, 2 e 3 citadas anteriormente) em conjunto com a medição da variação do comprimento útil (distância entre as linhas 1 e 3), para então prosseguir o ensaio normalmente até o rompimento do corpo de prova, tornando possível também o cálculo do alongamento total.

Para possibilitar a medição de deformações em tempo real para a anisotropia, decidiu-se utilizar o método de correlação digital de imagem, pois a medição da variação de largura e variação de comprimento deve antes da ruptura do corpo de prova, sendo assim, seria necessário parar o teste para possibilitar essa medição, o que poderia afetar os resultados finais, já que a norma define que a velocidade de ensaio deve ser constante ao longo de todo o teste.

Como já mencionado anteriormente, para que seja aplicada a correlação digital de imagem, deve ser aplicado um padrão de pintura que será medido em um software de correlação digital de imagem, onde o *software* selecionado foi o Gom correlate® 2021 Hotfix 3, Rev. 144624, Build 2021-12-09 (a partir do Gom Suite 2.0.1121.0). O Gom correlate® reconhece marcações no formato de *speckels*, sendo assim, após o corte, os corpos de prova devem receber uma camada de tinta branca para fundo e, após a secagem, deve ser realizada a pintura de manchas pretas para possibilitar a medição das deformações através do software.

Após a aplicação do padrão deve-se posicionar o corpo de prova na máquina de ensaios, garantindo a boa iluminação da área de interesse, correto posicionamento do setup experimental (garantindo a perpendicularidade da câmera com a amostra a ser ensaiada, além de uma boa resolução de imagem, com a correta focagem do corpo de prova.

Após o posicionamento do corpo de prova é iniciada a gravação do vídeo e também a execução do ensaio. Após o ensaio, as imagens são estratificadas em intervalos específicos do vídeo e a seguir, são inseridas no *software* Gom Correlate®. Já no Gom, é realizada a definição de escala para medição dos deslocamentos, definição da área de interesse e por último são inseridos os extensômetros para medição dos deslocamentos e deformações nos locais desejados. O próximo passo é encontrar o instante em que o corpo de prova atinge os valores de deformação plástica desejados, tomando nota dos valores indicados nos extensômetros digitais. Então, retornando ao Gom correlate®, são obtidos os valores de variação de largura e comprimento dos extensômetros, tornando possível o cálculo dos coeficientes de anisotropia desejados. O *software* possui uma função que apresenta a deformação total do extensômetro, sendo assim, os resultados estão em função da deformação total. Portanto, é necessário calcular os valores de deformação total que são equivalentes à deformação plástica desejada. Para isso, foi somado o valor da deformação elástica ao valor da deformação plástica desejado, resultando então no valor de deformação total equivalente aos valores de interesse para os cálculos da anisotropia.

Retornando a questão da correlação digital de imagem, antes da execução dos ensaios definitivos, foram realizados pré-testes. Tal procedimento é necessário para verificar a precisão e confirmar o correto funcionamento do *setup* experimental, além de estabelecer precisamente toda a metodologia para a realização das medições e ensaios com os corpos de prova definitivos.

3.2.1 METODOLOGIA E SETUP EXPERIMENTAL

Como mencionado anteriormente, foram realizados pré-testes para definição da metodologia e *setup* experimental. Para os pré-testes, foi utilizada uma câmera Laia® FULL HD 1080P apontada perpendicularmente para o corpo de prova, em conjunto com um algoritmo para captura de imagens desenvolvido em python.

Os resultados obtidos indicaram que não era possível utilizar o *setup* descrito anteriormente, pois o *software* de medições não reconhecia os pontos marcados, não sendo capaz de acompanhar, correlacionar os pixels entre cada imagem subsequente. Isso ocorreu devido a questão de baixa qualidade das imagens, uniformidade de iluminação e focagem da câmera sobre o corpo de prova.

A partir deste momento, decidiu-se por utilizar outra câmera para realizar a aquisição de imagens. Desta vez, foi utilizada uma câmera Canon® modelo EOS R6. Optou-se por realizar testes com esta câmera profissional para verificar se os resultados obtidos seriam ao mesmo nível dos anteriormente verificados com a câmera Laia. A vantagem de utilizar esta

câmera está na questão da diversidade e facilidade de alteração das propriedades de aquisição de imagens, pois esta possui um *software* próprio da fabricante (EOS Utility) que permite realizar essas personalizações, além da aquisição de imagens ser permitida utilizando o computador. Neste momento foi utilizado um refletor de led para a iluminação do ambiente região do ensaio.

Foram realizados testes com o novo *setup* experimental, avaliando a qualidade das imagens, resolução, além da uniformidade de iluminação e veracidade das dimensões medidas no Gom correlate® quando comparadas com a realidade. Ótimos resultados foram verificados, o que permitiu o seguimento do trabalho com o *setup* experimental ilustrado na Figura 24.



Figura 24 – Posicionamento da câmera e refletor.

Seguindo a descrição da metodologia, inicialmente deve ser realizada a limpeza dos corpos de prova, retirando todas as impurezas e finalizando com a utilização de acetona. Após a limpeza, foi realizada a aplicação de tinta branca mate, e após a secagem de um dia, foi aplicada a tinta preta mate. Após a secagem da tinta mate foram realizadas as devidas marcações, como ilustrado na Figura 25.

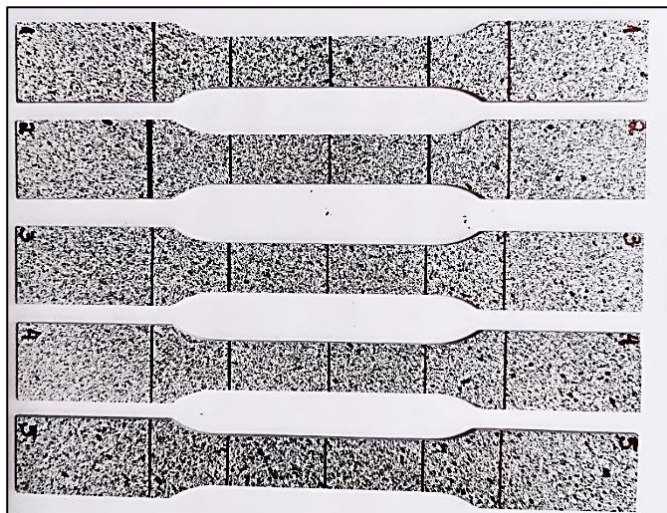


Figura 25 – Corpos de prova para testes – Aço 1.4509, 2mm, 45°.

Então, o corpo de prova foi posicionado na máquina de tração, fixando-o primeiramente na garra inferior, garantindo que este esteja na vertical. A seguir foi realizado o zero da carga, além do posicionamento e aperto da garra superior. Com as garras posicionadas, foi inserido o extensômetro nas marcas do comprimento útil e realizado o zero da deformação e extensão, possibilitando o mapeamento mais preciso da curva tensão deformação e demais propriedades através do ensaio de tração. O próximo passo foi definir os parâmetros de teste na máquina de ensaios e a seguir, a parametrização do setup de aquisição de imagens.

Os parâmetros da câmera definidos para a gravação dos vídeos foram: exposição manual (1/40s), foco (22), modo de foco (horizontal largo), compensação de iluminação (AWB), ISO (5000), abertura da lente objetiva (80mm), resolução (1920x1080p) com compressão para 25 *fps* (intervalo de captura reduzido na câmera, opção que permitiu uma redução no tamanho final do arquivo de vídeo).

Com os parâmetros de aquisição definidos, é realizada a calibração da posição da câmera, usando a referência do próprio *software* de aquisição de imagens, como ilustrado na Figura 26. A calibração é garantida inclinando a câmera de maneira que a linha azul seja sobreposta pela linha vermelha ao centro da imagem. O segundo ponto é garantir a sobreposição da linha amarela sobre a linha vermelha na escala lateral direita da Figura 26. O último ponto é buscar que o corpo de prova esteja no centro das grades cinzas apresentadas no *software*. O resultado esperado do posicionamento deve ser algo semelhante a Figura 27.

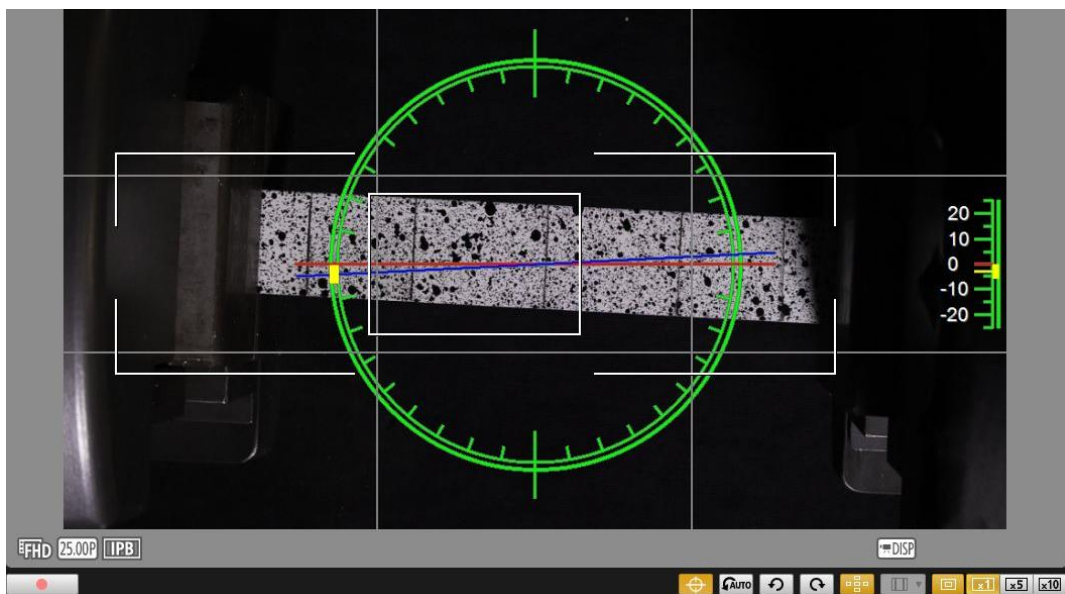


Figura 26 – Indicações do posicionamento da câmera.

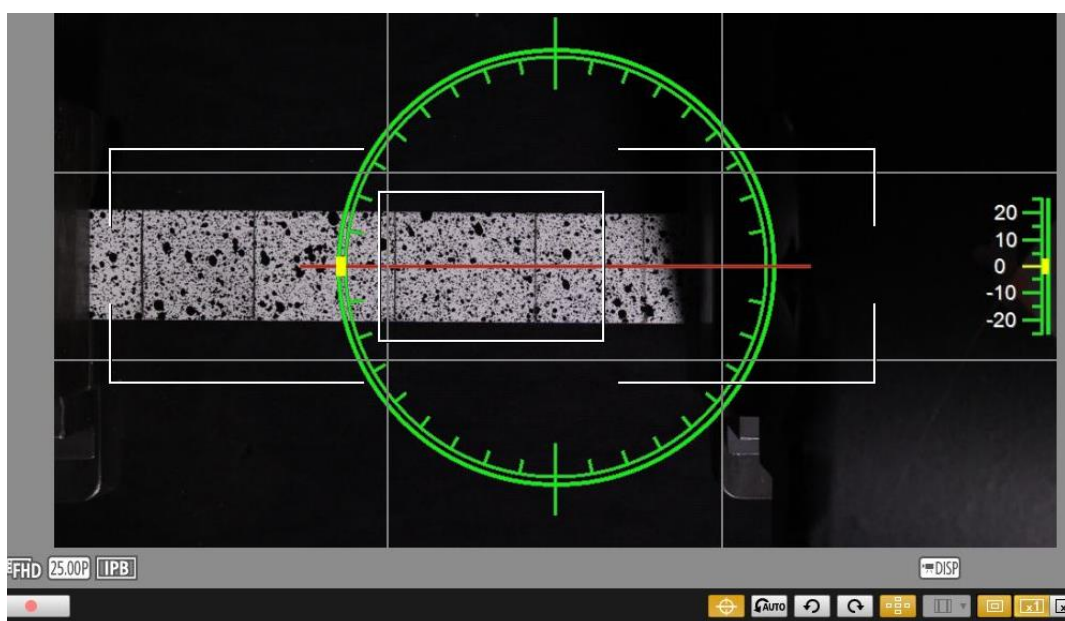


Figura 27 – Calibração do posicionamento da câmera.

Com a calibração estabelecida, é necessário ajustar o foco da câmera, assim como exposição, brilho, entre outras propriedades. A exposição foi ajustada automaticamente, buscando o maior reconhecimento de área possível, representado pela grade de quadrados verdes na Figura 28. Após a calibração da câmera, é iniciada a captura de imagens e logo em seguida, iniciado o ensaio de tração, marcando o exato instante de tempo de início do ensaio.

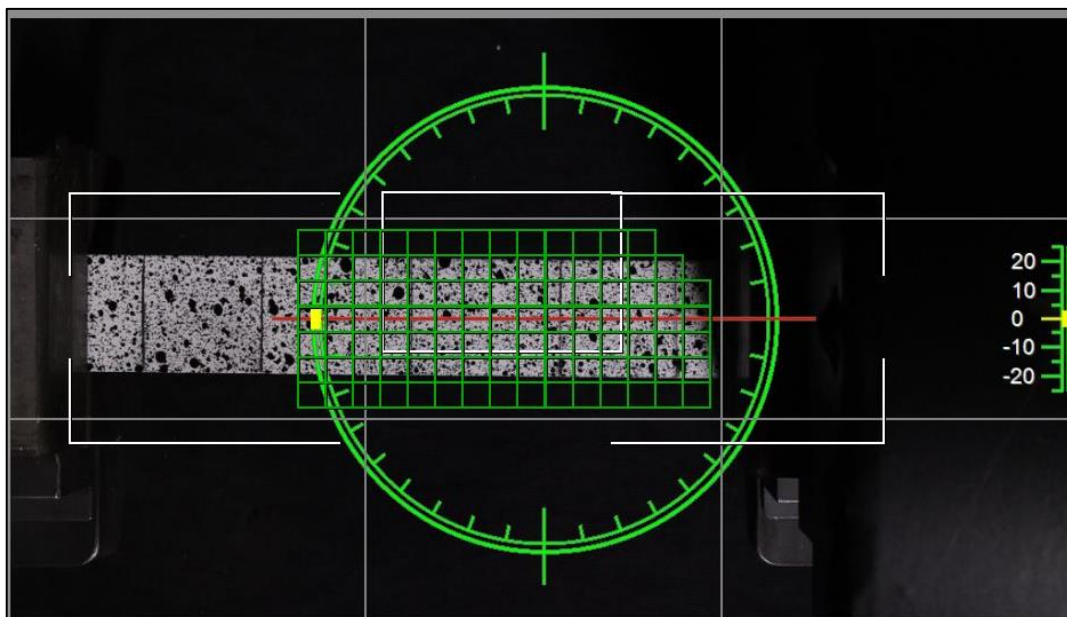


Figura 28 – Definição de zoom e exposição.

Quando o corpo de prova se rompeu, foi realizada a parada do deslocamento da garra e encerrado o ensaio no computador, e só então foi interrompida a aquisição de vídeo. O vídeo permanece na memória da câmera, então após a parada de aquisição de imagens, deve ser realizado o *download* do vídeo do ensaio para o computador.

Após o ensaio, foram exportados os dados do ensaio em um arquivo de formato .mad e então, esse arquivo foi importado para o Excel®, para que os dados fossem devidamente tratados e salvos em formato .csv, para realização dos cálculos pertinentes através do Matlab®.

Seguindo a análise, era necessário importar as imagens do ensaio para o Gom. Tal *software* permite que sejam processadas tanto imagens quanto vídeos, porém, este último pode levar mais tempo, e se tornar um arquivo muito grande devido à quantidade de informações que o mesmo possui. Para contornar este problema, optou-se por utilizar imagens sequenciais dos ensaios, no entanto a câmera não possuía configurações para que fosse capturadas imagens consecutivas e espaçadas entre si por um mesmo intervalo de tempo. Sendo assim, foi realizada a separação do vídeo em *frames*, através de um código desenvolvido no *software* Matlab®. Tal código foi desenvolvido visando a seleção do intervalo de tempo de vídeo que há o interesse de análise, além de permitir a separação de *frames* de vídeo através da definição de intervalos de tempo ou, intervalos de *frames*. Junto com a extração de imagens é realizado o corte de maneira que fosse visualizada a área mais próxima possível ao lado do corpo de prova.

As imagens obtidas são transferidas para o *software* Gom correlate®, onde foi criada a superfície de identificação seguindo o procedimento descrito no Anexo IV. Para a escala, foi marcada, digitalmente, a largura do corpo de prova como referência para identificação dos

pixels. Assim, o *software* relaciona essa a largura com o número de pixels para todas as imagens do ensaio, o que torna possível a medição de distâncias através dos extensômetro digitais.

Inicialmente percebe-se que a superfície não identifica com boa qualidade as marcações inseridas, menos as garras dos extensômetros, como ilustrado na imagem superior da Figura 29. Como pode ser visto na imagem inferior da Figura 29, apenas as garras dos extensômetros foram removidas do mapeamento da superfície, resultando em um ótimo reconhecimento do corpo de prova. Sendo assim, os extensômetros digitais devem ser reposicionados de maneira que estejam aderidos à superfície de interesse que será demarcada, o mais próximo possível das marcações referenciadas no anteriormente.

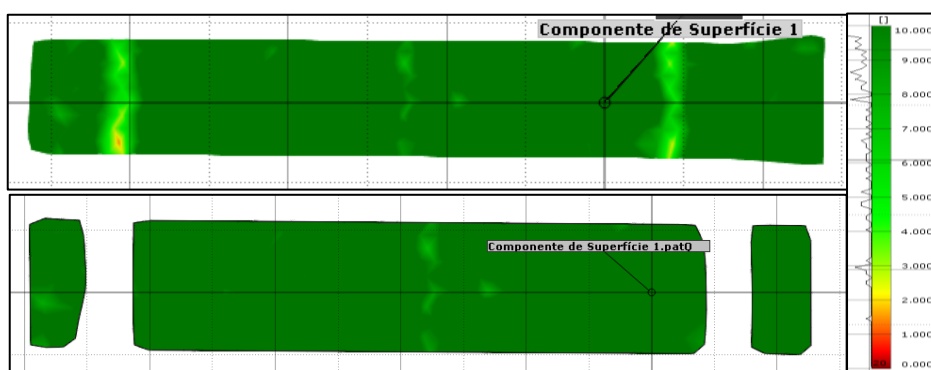


Figura 29 – Qualidade do padrão da superfície.

Com a superfície criada, foi verificado seu comportamento ao longo do ensaio, onde houve a perda de pontos centrais a partir da estricção do corpo de prova, como ilustrado na Figura 30. Isso afetou o comportamento do extensômetro 3, portanto foi necessário alterar seu posicionamento mais à direita do que a marca efetuada no corpo de prova. A perda de reconhecimento se repetiu, mas poucos estágio antes da ruptura do corpo de prova, sendo assim esta perda não exerceu influência sobre as posições e resultados de interesse, já que estes estágios estão próximos ao fim do ensaio.

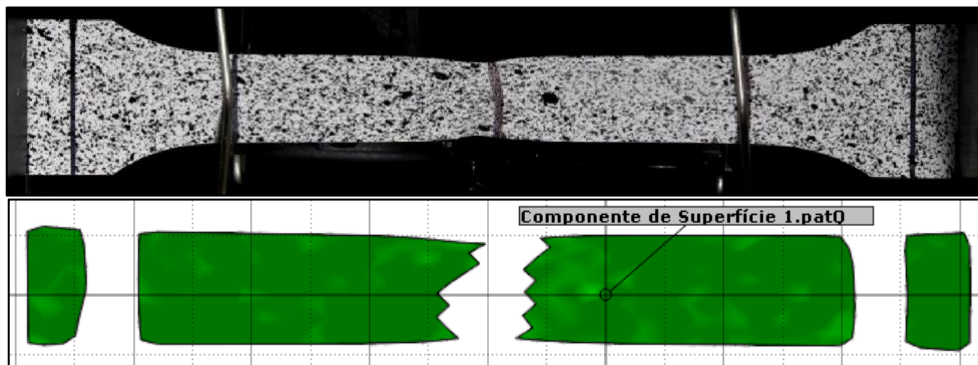


Figura 30 – Perda de pontos ensaio definitivo.

A seguir, os extensômetros digitais foram posicionados como ilustrado na Figura 31. Sendo que foi preciso alterar o comprimento dos extensômetros 2,3 e 4, pois o próprio *software* recuava a área de interesse para dentro do provete, como pode ser visualizado na região em azul na Figura 31. A partir desse momento, o comprimento adotado para os extensômetros foi de 10mm. Sendo assim foi considerado esse comprimento como inicial para os cálculos da anisotropia. A variação de largura foi calculada com referência a este comprimento de referência também. Foi realizada uma pequena compensação de posicionamento, como mencionado ao final dos pré-testes, para que fosse mantido o comprimento útil de 50mm do extensômetro, pois foi preciso eliminar os trechos das regiões ideais de posicionamento sobre as garras. O extensômetro 1 verifica a variação de comprimento, os extensômetros 2, 3 e 4 medem a variação na largura do comprimento útil do corpo de prova na parte inferior, média e superior respectivamente.

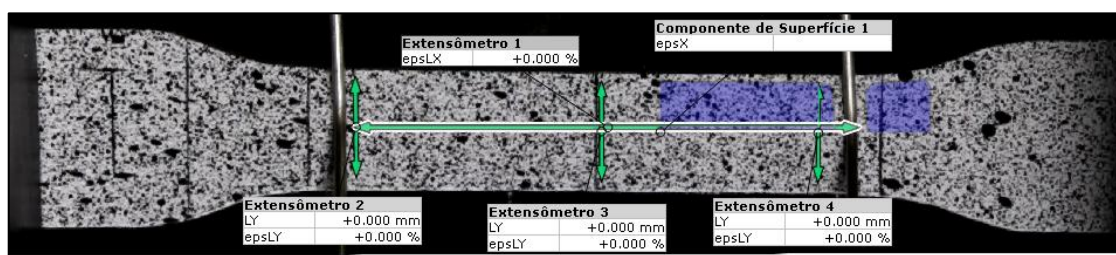


Figura 31 – Posicionamento e Identificação dos extensômetros.

Após o posicionamento dos extensômetros foi verificado deslocamento dos mesmos até o ponto onde o corpo de prova atingiu os valores desejados de deformação na direção x, apresentado pela medição epsLX no extensômetro 1. Neste momento foram verificados valores de deslocamento e anotados para os cálculos seguintes de anisotropia.

Para os cálculos de deformações relativas e total na tensão máxima, deformação relativa e total na fratura foi considerado as indicações a partir da Figura 32.

Onde: A é deformação na fratura [mm/mm]; A_g é deformação plástica na tensão máxima [mm/mm]; A_{gt} é deformação total na tensão máxima [mm/mm]; A_t é deformação total na fratura [mm/mm]; E é inclinação da parte elástica da curva de tensão deformação, equivalente ao módulo de elasticidade do material [MPa]; σ_m tensão limite de resistência a tração [MPa].

Os cálculos são dados através das Equações (31) a (34).

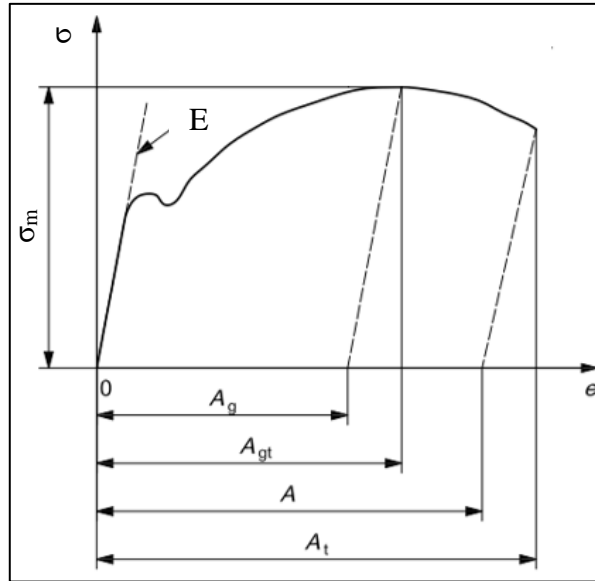


Figura 32 – Deformações no gráfico tensão x deformação, adaptado de [64].

$$A_g = \frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \text{ [adimensional]} \quad (31)$$

$$A_{gt} = \frac{\Delta L_m}{L_e} \text{ [adimensional]} \quad (32)$$

$$A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} \text{ [adimensional]} \quad (33)$$

$$A = \frac{\Delta L_f}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \text{ [adimensional]} \quad (34)$$

Onde: ΔL_f é extensão na fratura [mm]; ΔL_m é extensão na tensão máxima [mm]; L_e é comprimento útil do extensômetro [mm]; L_0 é comprimento útil do corpo de prova [mm]; L_u é comprimento da zona útil após o ensaio [mm];

Para o cálculo do coeficiente de encruamento percebeu-se que havia grande variação dependendo do ponto de início selecionado, sendo assim, foram realizadas diversas verificações, para avaliar quando os valores estavam mais próximos ao apresentado na literatura. Inicialmente, tomando como ponto inicial quando o ensaio atingiu 0,2% de deformação proporcional, onde o valor de n era muito pequeno. Realizando verificações notou-se que a partir do ponto onde a deformação total atingiu 2% houve uma maior consistência e constância nos valores encontrados para n . Assim, foi definido o ponto de 2% de deformação plástica como ponto de início para o cálculo de n . O local de tensão máxima é o limite superior para o cálculo do coeficiente de encruamento, resultando assim em um intervalo n_{2-Ag} .

O procedimento detalhado para os ensaios de tração está descrito no Anexo IV.

3.2.2 RESULTADOS

Os procedimentos mencionados anteriormente foram repetidos para todas as amostras, exceto para a avaliação da anisotropia, onde foi selecionado um ensaio para representar a anisotropia para a combinação de material x espessura x direção. Reduzindo assim o número de amostras para a avaliação de 54 para apenas 18 testes. Para representação, foram selecionados os testes com valores intermediários de $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m em relação aos outros dois ensaios para aquela situação de material. A Figura 33 ilustra os corpos de prova após os ensaios.



Figura 33 – Corpos de prova após os ensaios de tração.

Iniciando a análise dos resultados, a Figura 34 apresenta as curvas tensão x deformação de engenharia para os ensaios do material 1.4509 e 1,2mm de espessura e a Figura 35 apresenta as curvas tensão x deformação verdadeiras para o mesmo material.

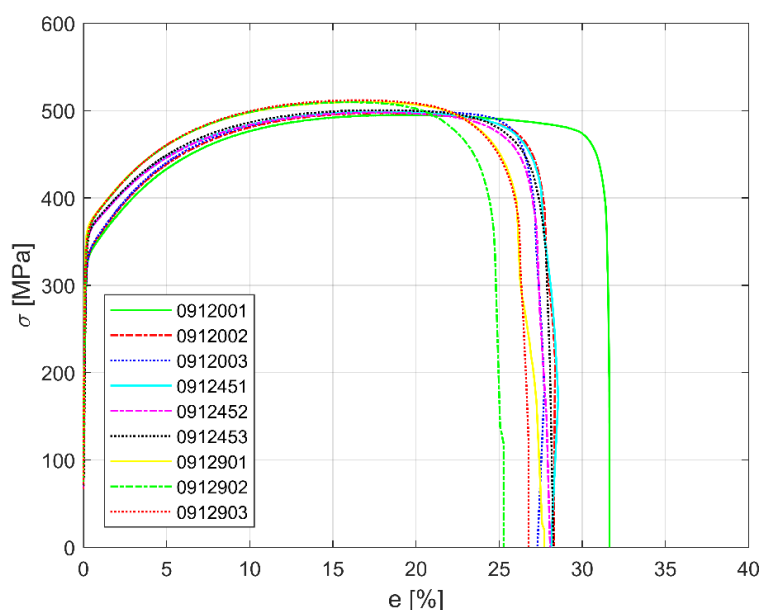


Figura 34 – Curvas de engenharia 1.4509 1,2mm.

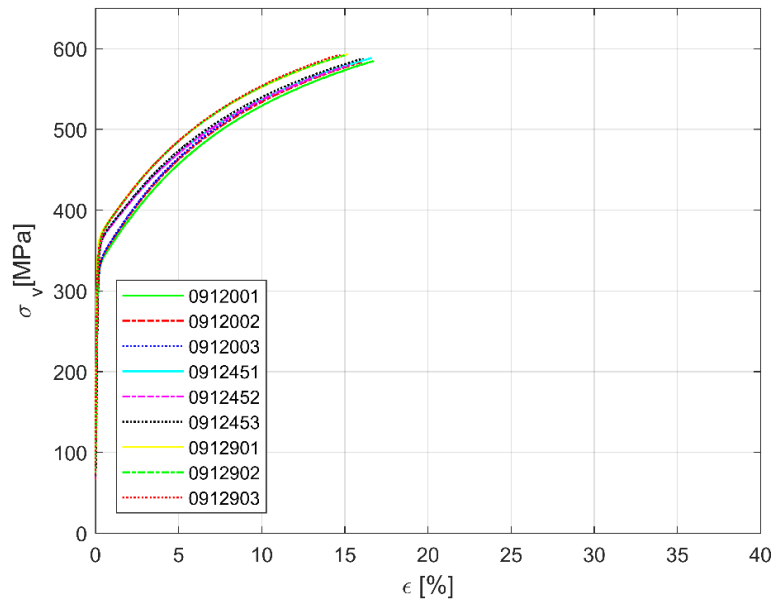


Figura 35 – Curvas de verdadeiras 1.4509 1,2mm.

Verificando os resultados, percebe-se que os corpos de prova de uma mesma direção apresentaram comportamento semelhante, pelo menos na região de alongamento uniforme. Os valores da tensão $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m aumentam com o valor do ângulo em relação à direção de laminação. O alongamento uniforme teve uma tendência inversa, sendo que o maior valor encontrado foi para a direção de 0° em relação à direção de laminação. A Figura 36 ilustra as curvas verdadeiras em escala log para o cálculo do coeficiente de encruamento.

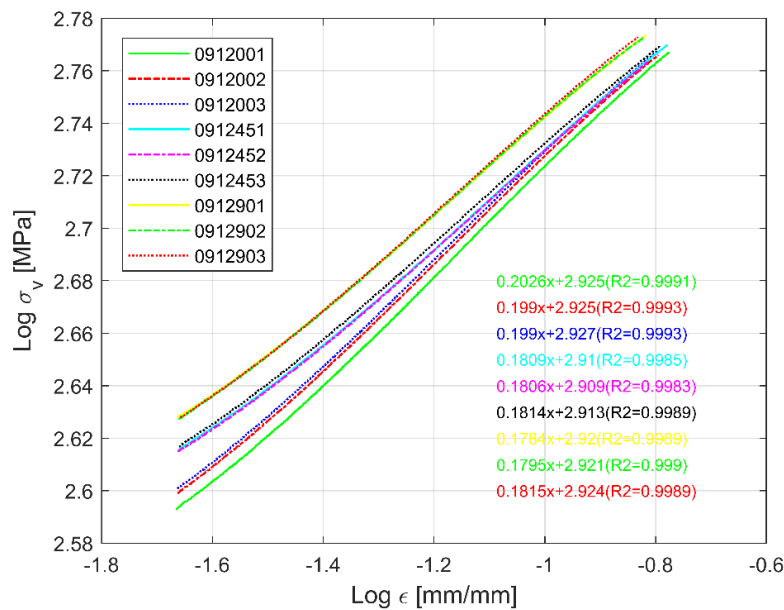


Figura 36 – Curvas verdadeiras 1.4509 1,2mm para o encruamento.

O coeficiente de encruamento apresentou tendência semelhante ao alongamento uniforme, sendo que os maiores valores encontrados são para a direção paralela a direção de laminação. A Figura 37 ilustra a variação dos valores de anisotropia ao longo do ensaio de tração.

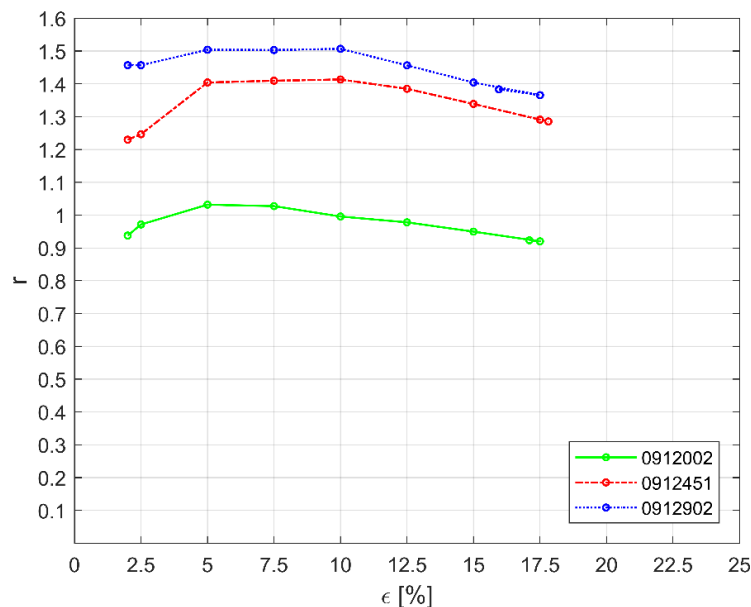


Figura 37 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4509 1,2mm.

Percebe-se que os valores estão acima ou muito próximos de 1, o que representa boa resistência do material à redução de espessura, havendo uma variação de aproximadamente 50% entre a anisotropia da direção a 0° e a direção 90°, que apresentaram os menores e maiores valores, respectivamente. Com o avanço da deformação é observada uma estabilização nos valores de anisotropia para deformação entre 5% e 10% aproximadamente. Em suma, os resultados apresentam homogeneidade para cada direção. A anisotropia normal e planar serão discutidas na comparação entre todos os ensaios.

Continuando com os resultados, a segunda configuração de testes apresentada é para o material 1.4509 com 2mm de espessura. A Figura 38 ilustra as curvas tensão x deformação de engenharia e a Figura 39 apresenta as curvas verdadeiras.

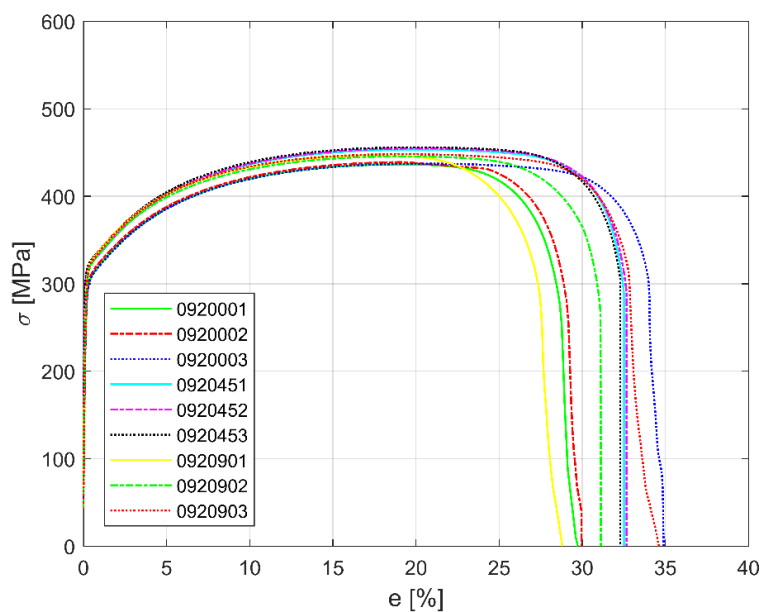


Figura 38 – Curvas de engenharia 1.4509 2mm.

Para estes ensaios os menores valores de $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m ficaram menores para a direção de 0° , sendo a direção com maior encruamento, como ilustrado na Figura 40. Percebe-se que, assim como nos ensaios anteriores, as curvas estão sobrepostas para cada direção, o que indica uma uniformidade nas propriedades, pelo menos até o valor de σ_m , onde os desvios aumentam.

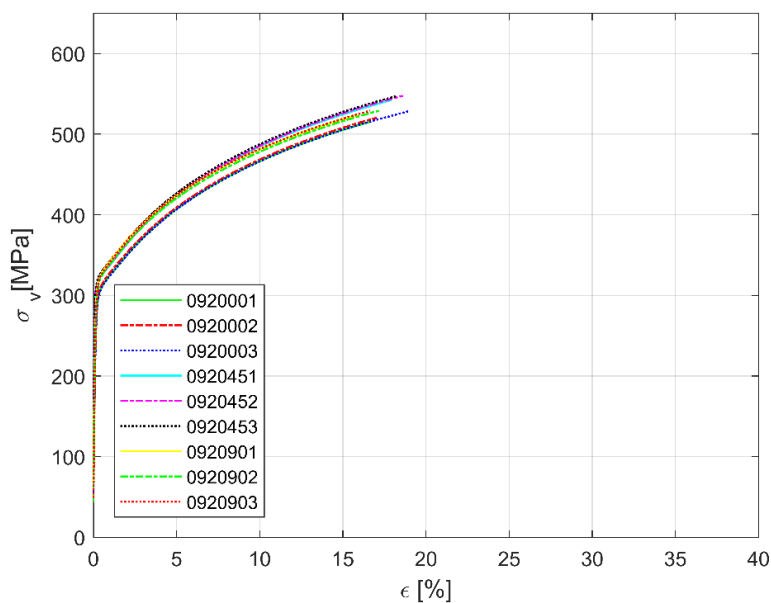


Figura 39 – Curvas de verdadeiras 1.4509 2mm.

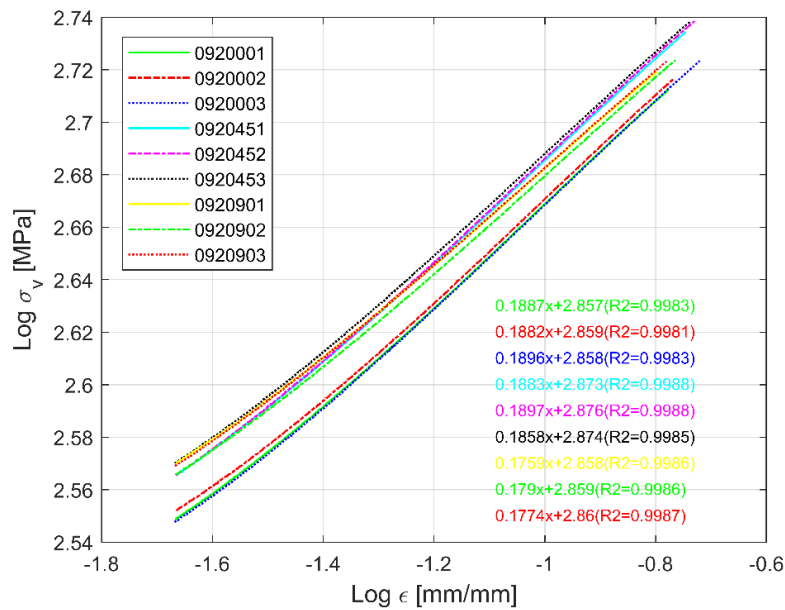


Figura 40 – Curvas verdadeiras 1.4509 2mm para o encruamento.

O comportamento da anisotropia ao longo dos ensaios é semelhante ao material anterior, sendo que os ensaios para a direção de 90° apresentaram os maiores valores de anisotropia, porém os valores são mais constantes ao longo de todo o alongamento uniforme, como apresentado na Figura 41.

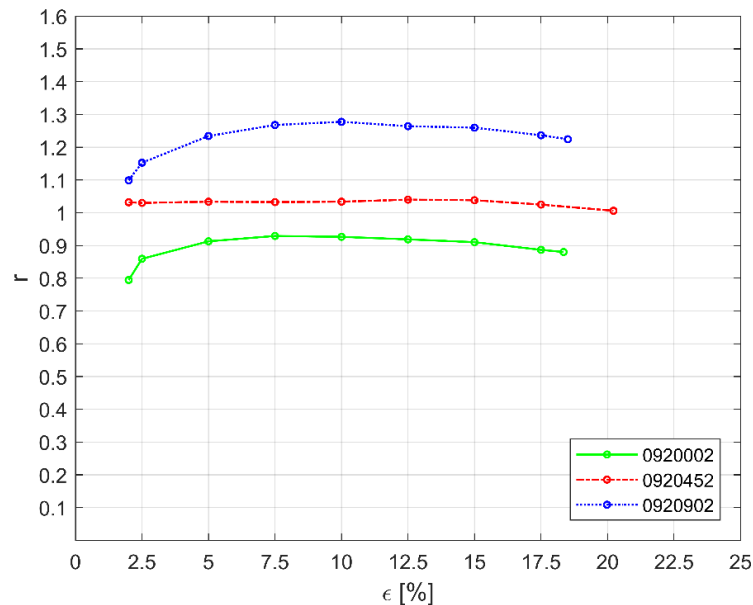


Figura 41 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4509 2mm.

Os gráficos a seguir são referentes aos ensaios para o material 1.4509 com 3mm de espessura. Iniciando pela Figura 42 e Figura 43, que apresentam as curvas de tensão x deformação de engenharia e verdadeiras, respectivamente.

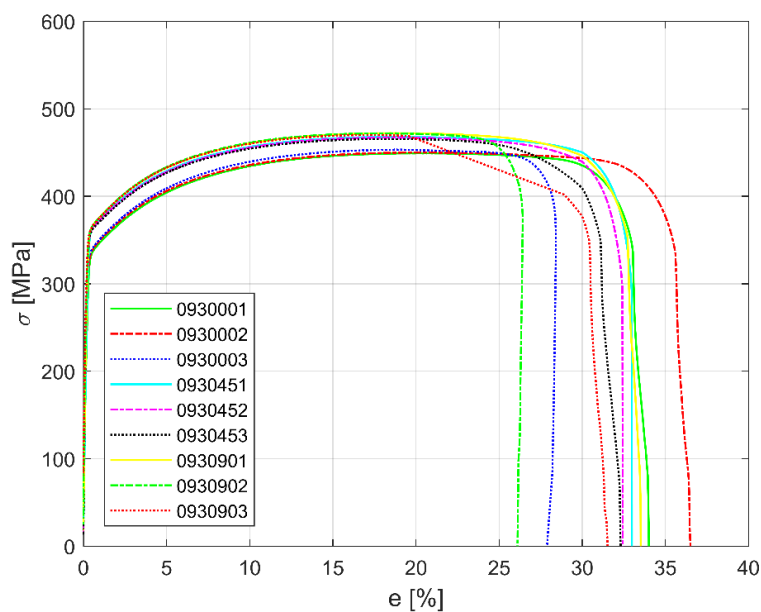


Figura 42 – Curvas de engenharia 1.4509 3mm.

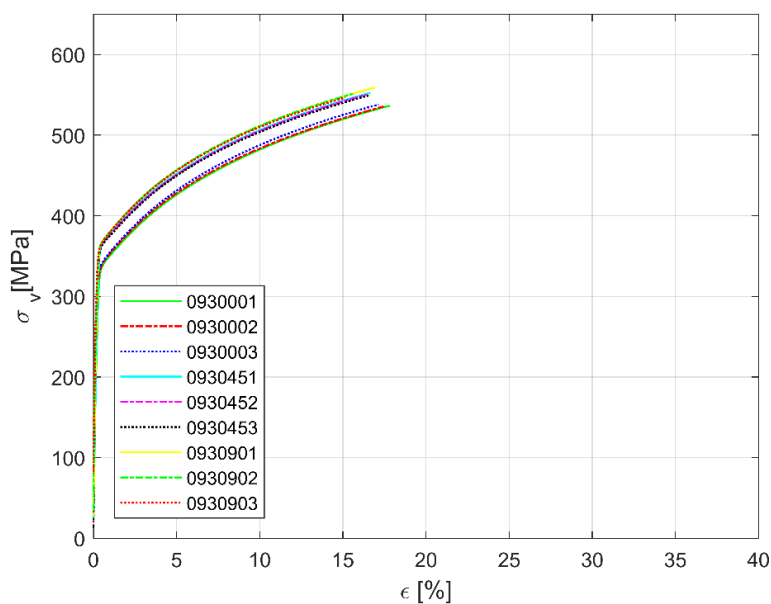


Figura 43 – Curvas de verdadeiras 1.4509 3mm.

Para este material, nitidamente é perceptível que a direção de laminação apresentou os menores valor para $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m . Ocorreu certa anomalia para a amostra 0930002, onde houve uma queda repentina após σ_m , tal ocorrência pode ser desconsiderada, já que os valores mais importantes estão considerados apenas até σ_m . Há nítida tendência para os valores do encruamento dos materiais, como ilustrado na Figura 44, onde os valores para a direção de 0° apresentam-se maiores que as demais direções

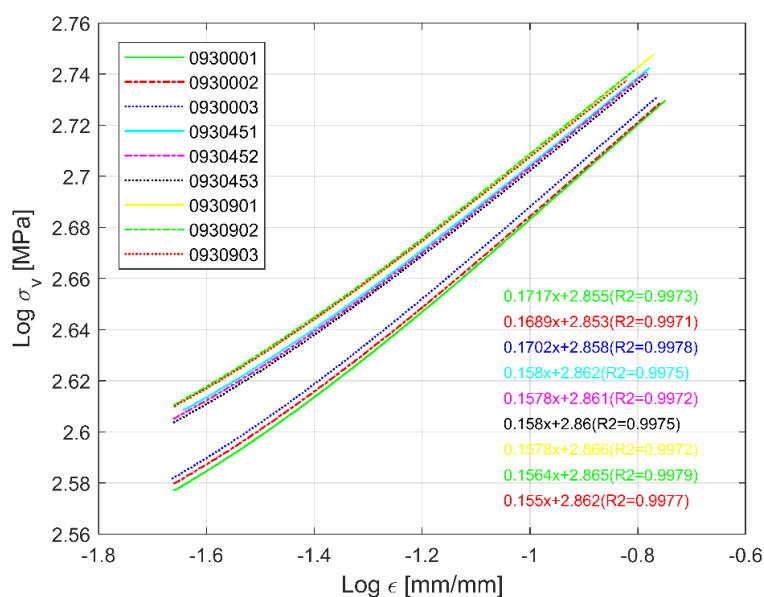


Figura 44 – Curvas verdadeiras 1.4509 3mm para o encruamento.

Partindo para a análise dos valores de anisotropia, percebe-se que, assim como no ensaio anterior, os valores apresentam um trecho de estabilidade entre 10% e 15% de deformação plástica, como pode ser visualizado na Figura 45. Concluindo as comparações, é observado que os valores para a anisotropia possuem tendência de queda, próximo do valor de deformação na tensão σ_m . Além de que os valores encontrados para a direção perpendicular a laminação, devem ser destacados pois estão muito superiores às demais direções, aproximadamente 100% maiores que os valores encontrados para a direção de 0° . Demais discussões sobre as propriedades, serão discutidas na comparação entre todos os ensaios.

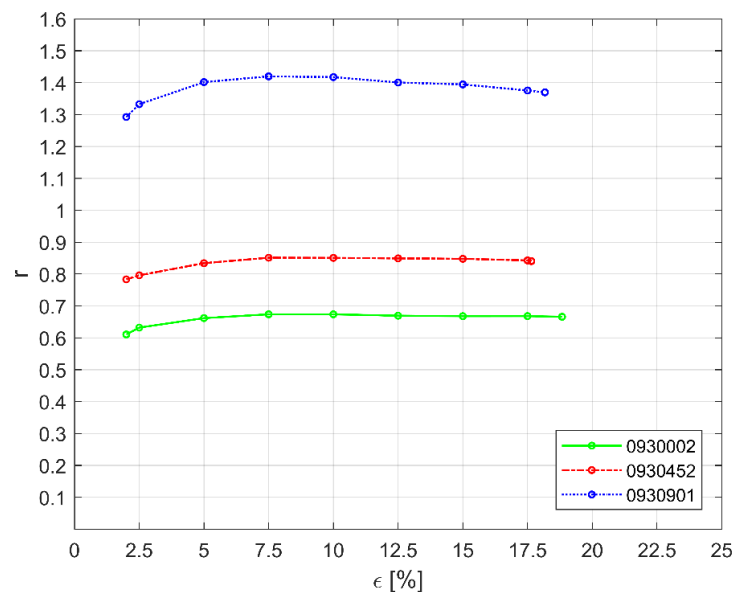


Figura 45 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4509 3mm.

A próxima sequência de ensaios descrita é para o material 1.4510 com 1,2mm de espessura, onde iniciando pela Figura 46, estão apresentadas a curvas tensão deformação para todos os corpos de prova desse ensaio. Já a Figura 47 ilustra as curvas tensão deformação verdadeiras para cada um dos ensaios.

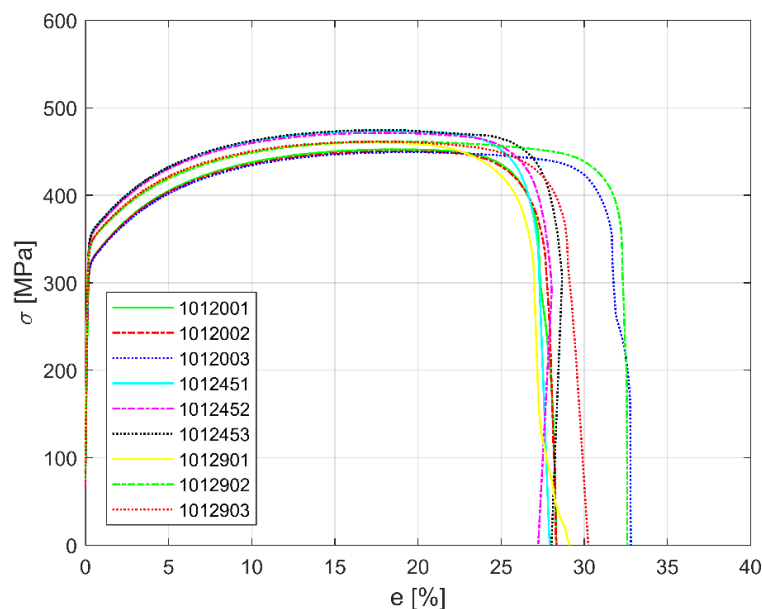


Figura 46 – Curvas de engenharia 1.4510 1,2mm.

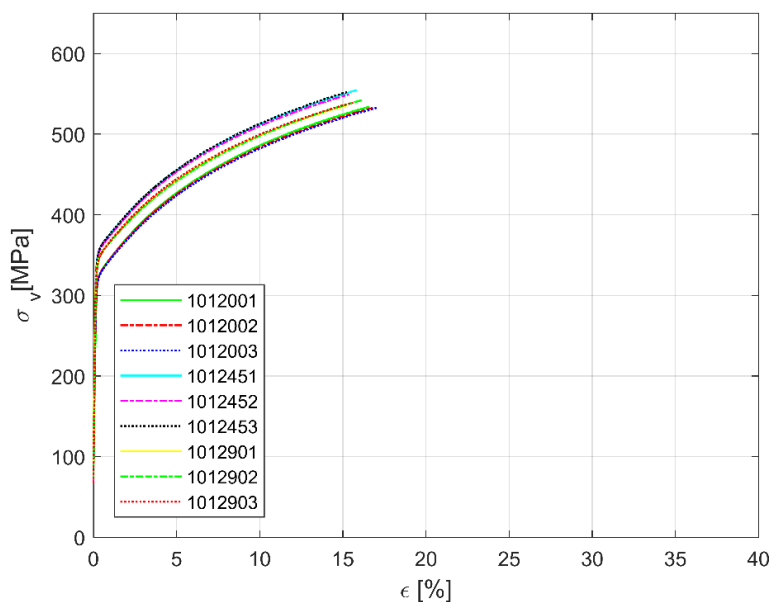


Figura 47 – Curvas de verdadeiras 1.4510 1,2mm.

É observado uma nítida separação entre cada uma das direções, apesar de os valores de $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m não se apresentarem distantes dos valores médios. Através da análise dos gráficos é notado que os valores de propriedades a 45° da direção de laminação apresentam os maiores

resultados para $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m . A Figura 48 apresenta as curvas verdadeiras em escala log para coeficiente de encruamento, onde novamente a direção de 0° apresentou maiores valores.

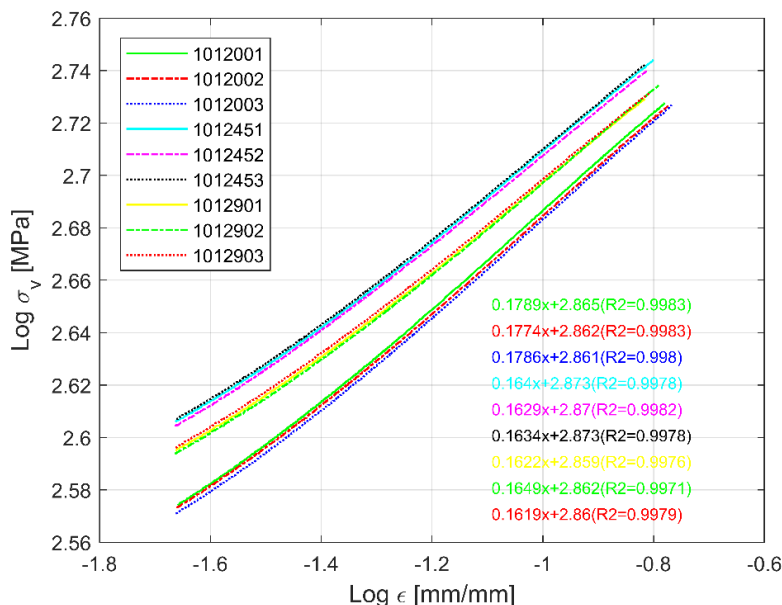


Figura 48 – Curvas verdadeiras 1.4510 1,2mm para o encruamento.

A Figura 49 apresenta o comportamento da anisotropia ao longo do ensaio de tração. Percebe-se que a direção de 90° mantém-se com os maiores valores de anisotropia, com certo destaque, apresentando uma queda repentina para valores próximos de 15% de deformação.

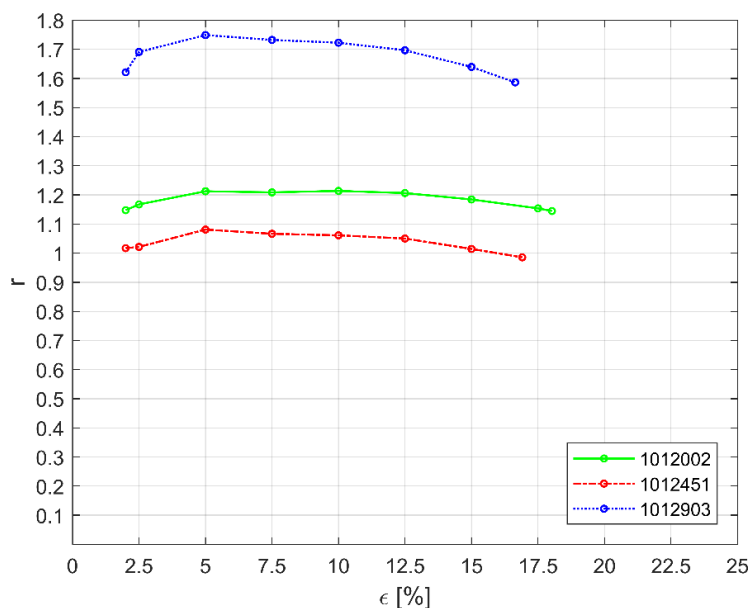


Figura 49 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4510 1,2mm.

Os próximos resultados discutidos são para o material 1.4512 com 1,0mm de espessura. A Figura 50 apresenta as curvas tensão x deformação de engenharia. Já a Figura 51 ilustra as curvas tensão x deformação verdadeiras.

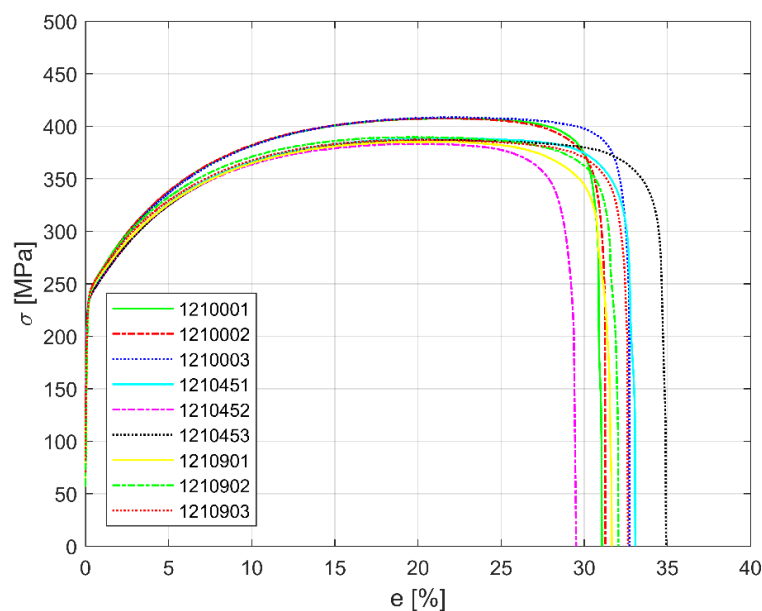


Figura 50 – Curvas de engenharia 1.4512 1,0mm.

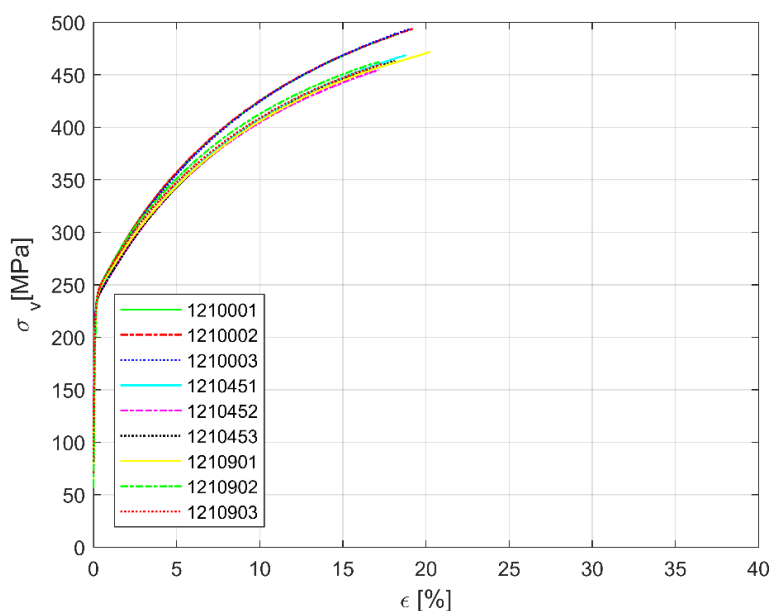


Figura 51 – Curvas de verdadeiras 1.4512 1,0mm.

Assim como para todos os ensaios anteriores, há homogeneidade entre os materiais de uma mesma direção pois as curvas estão sobrepostas. Ressaltando que os valores de $\sigma_{0,2\%}$ estão muito próximos para as três direções, diferenciando-se por σ_m que é maior para a direção de 0° .

Cabe ressaltar também que, as propriedades pertinentes ao aço 1.4510 estão inferiores ao aço 1.4512. A seguir, a Figura 52 ilustra as curvas verdadeiras em escala para o cálculo de n.

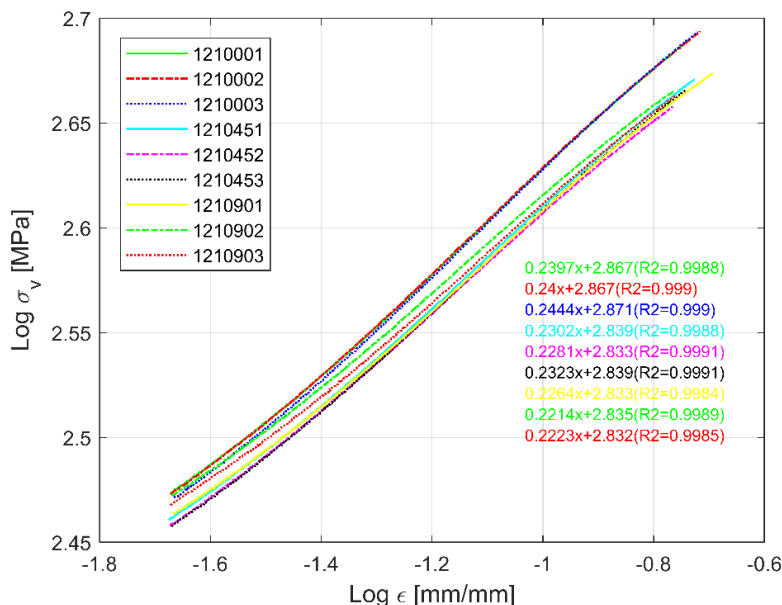


Figura 52 – Curvas verdadeiras 1.4512 1,0mm para o encruamento.

Comparando os valores do coeficiente de encruamento com as demais amostras, conclui-se que os valores para o material 1.4510 estão superiores a todos os demais, sendo que a direção de 0° possui os maiores valores. Para a anisotropia, um comportamento interessante é observado na Figura 53, onde os maiores valores ainda são observados para a direção de 90°, mas a diferença em relação aos valores para as demais direções é menor.

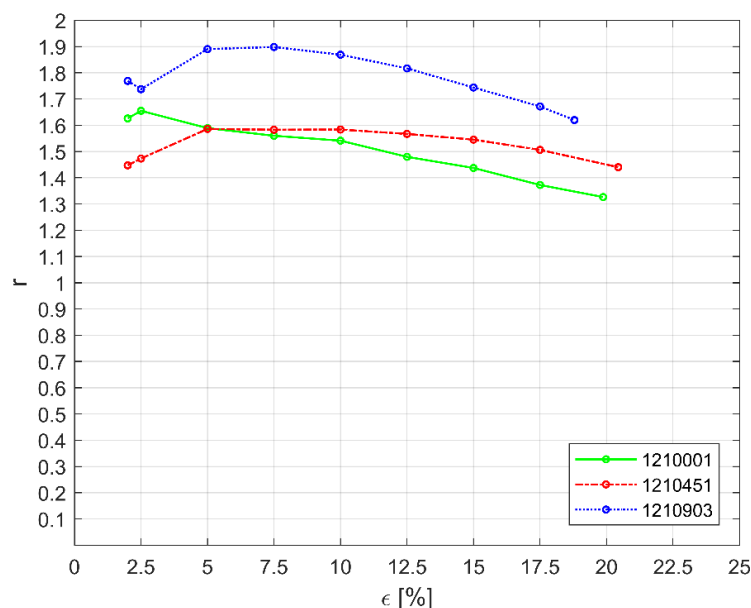


Figura 53 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4512 1,0mm.

Os próximos resultados são para o material 1.4512 com 1,2mm de espessura. A Figura 54 e Figura 55, apresentam as curvas de engenharia e verdadeiras, respectivamente.

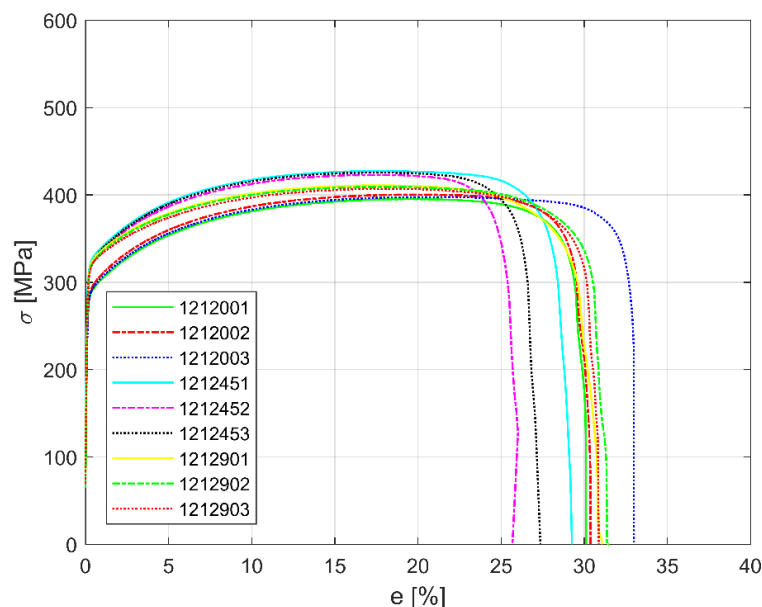


Figura 54 – Curvas de engenharia 1.4512 1,2mm.

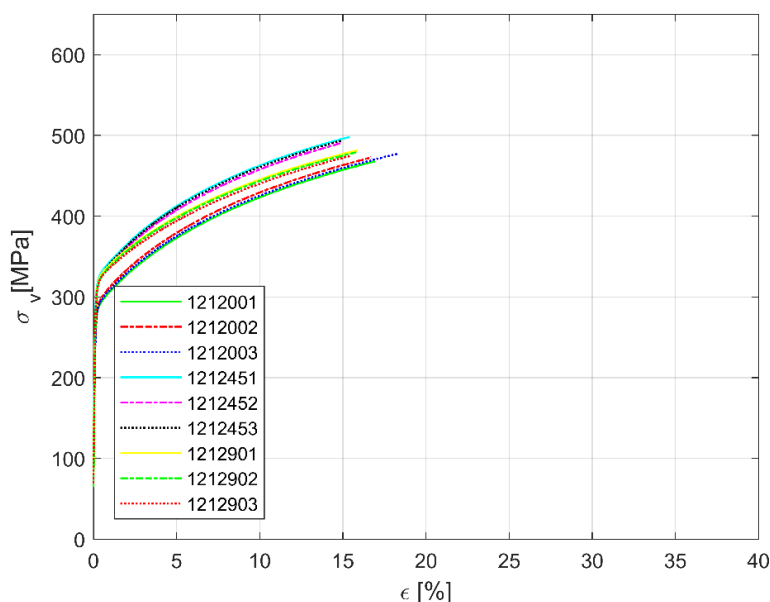


Figura 55 – Curvas de verdadeiras 1.4512 1,2mm.

Analisando os gráficos percebe-se que a direção de 45° apresentou os maiores valores para $\sigma_{0,2\%}$ e σ_m . Sendo que para todas as direções os valores estiveram próximos dos valores encontrados no ensaio anterior de 1.4512, exceto por $\sigma_{0,2\%}$ que é maior que o ensaio anterior. A Figura 56 ilustra as curvas verdadeira em escala log, para obtenção do coeficiente de encruamento n. Nota-se que os valores estão bem definidos para cada direção, sendo que a

direção de 0° se mantém com os maiores índices de encruamento.

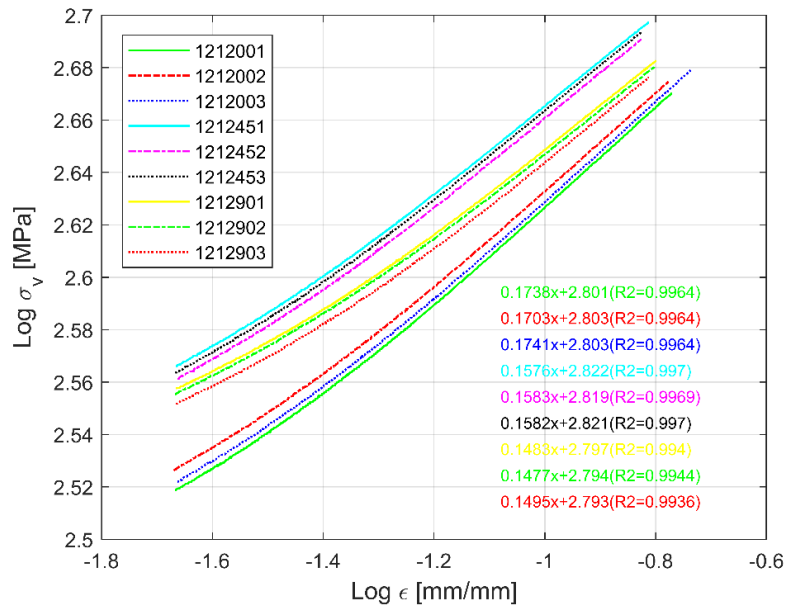


Figura 56 – Curvas verdadeiras 1.4512 1,2mm para o encruamento.

A Figura 57 ilustra o comportamento da anisotropia ao longo do ensaio de tração. Verifica-se que a direção perpendicular ao sentido de laminação ainda apresenta os maiores valores de anisotropia, com tendência de redução após σ_m . Outro ponto interessante a se mencionar é que, assim como para o ensaio 1.4510, 1,2mm, a direção de 0° apresentou valores de anisotropia maiores do que a direção de 45°.

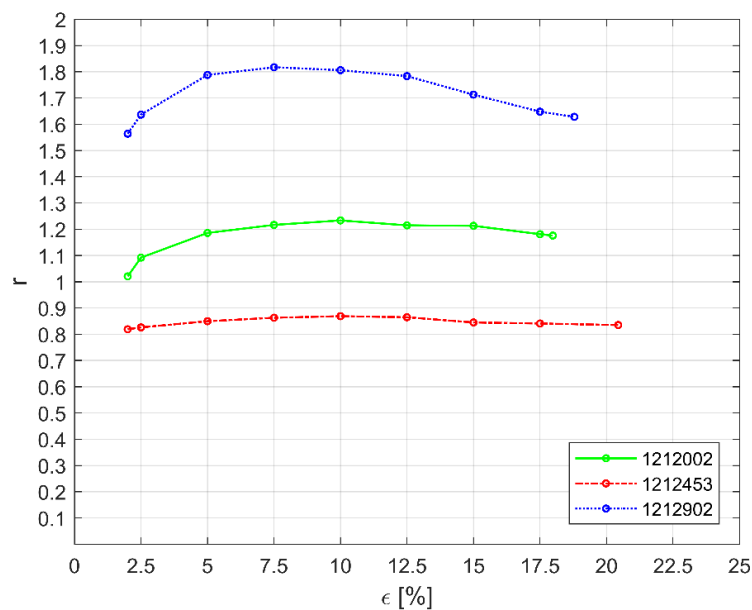


Figura 57 – Anisotropia para deformações plásticas 1.4512 1,2mm.

Após a avaliação de cada um dos ensaios, a Tabela 7 apresenta os valores médios para cada direção e amostra, onde $r_{xx/15}$ é o valor da anisotropia para as direções de 0°, 45° e 90° com a direção de laminação, a 15% de deformação plástica, seguindo o valor de deformação para medições de anisotropia mencionado pela literatura [66], [67].

Tabela 7 – Resultados médios para cada material x espessura x direção.

Material	t (mm)	Dir (°)	E (GPa)	$\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	σ_m (MPa)	A_g (%)	A_{gt} (%)	A (%)	A_t (%)	n (-)	$r_{xx/15}$
1.4509	1,2	0	202.08	336.62	497.26	17.36	17.61	29.14	29.24	0.20	0,95
		45	194.97	361.96	499.04	17.09	17.35	28.06	28.15	0.18	1,34
		90	197.02	368.63	510.58	15.89	16.15	26.54	26.59	0.18	1,40
	2,0	0	196.16	303.06	437.59	19.00	19.22	31.45	31.47	0.19	0,91
		45	202.94	321.81	454.84	19.83	20.05	32.35	32.49	0.19	1,04
		90	201.13	318.88	446.91	17.81	18.03	31.37	31.42	0.18	1,26
	3,0	0	184.83	329.09	450.82	18.85	19.10	32.89	32.96	0.17	0,67
		45	171.84	356.81	466.87	17.72	18.00	32.43	32.56	0.16	0,85
		90	185.06	359.77	471.32	16.97	17.22	30.38	30.46	0.16	1,39
1.4510	1,2	0	173.33	325.37	450.92	18.05	18.31	29.63	29.71	0.18	1,18
		45	199.16	356.20	473.15	16.51	16.75	28.10	28.20	0.16	1,01
		90	194.87	346.94	461.15	16.74	16.97	30.33	30.40	0.16	1,64
1.4512	1,0	0	185.73	243.09	407.93	20.49	20.71	31.56	31.66	0.24	1,44
		45	194.89	239.97	386.30	19.53	19.72	32.37	32.44	0.23	1,55
		90	174.30	244.43	387.41	19.85	20.07	32.03	32.09	0.22	1,74
	1,2	0	190.14	290.38	397.79	18.70	18.91	31.07	31.15	0.17	1,21
		45	192.67	322.19	425.24	16.03	16.25	27.48	27.51	0.16	0,84
		90	197.72	319.94	409.17	16.77	16.98	31.25	31.27	0.15	1,71

Comparando as propriedades com os valores indicados pelos fornecedores (Anexo III), todos os resultados dos testes estão de acordo com as propostas. É possível verificar a direção os corpos de prova que seguiram a direção de laminação, apresentaram menores valores em termos de escoamento e resistência à tração, exceto a amostra 1.4512 com 1mm de espessura, que apresentou a direção de 0° como a mais resistente. Para os resultados do encruamento dos materiais é observada uma tendência, onde a direção perpendicular à laminação apresenta os menores valores, que são maiores à medida que o ângulo com a direção de laminação diminui, resultando assim, em valores maiores para a direção de 0°. Para a avaliação da uniformidade das propriedades do material deve-se atentar aos valores de anisotropia, os quais estão apresentam tendência inversa aos resultados do coeficiente de encruamento, ou seja, percebe-se um aumento dos valores de anisotropia junto como aumento da direção dos corpos de prova em relação a direção de laminação.

Para efetuar uma comparação mais detalhada de anisotropia, pode-se utilizar a Tabela 8 como referência, onde estão apresentados os valores de anisotropia para cada direção, além dos valores de anisotropia normal e planar. Os valores de referência para os cálculos de anisotropia estão apresentados no Anexo V.

Tabela 8 – Anisotropia normal e planar para 15% de deformação.

Material	t (mm)	r_{00/15} (-)	r_{45/15} (-)	r_{90/15} (-)	r_m (-)	Δr (-)
1.4509	1,2	0.95	1.34	1.40	1.26	-0.16
	2,0	0.91	1.04	1.26	1.06	0.05
	3,0	0.67	0.85	1.39	0.94	0.18
1.4510	1,2	1.18	1.01	1.64	1.21	0.40
1.4512	1,0	1.44	1.55	1.74	1.57	0.05
	1,2	1.21	0.84	1.71	1.15	0.62

Avaliando a anisotropia existem alguns pontos interessantes. Primeiramente, como já mencionado anteriormente, há um comportamento de aumento da anisotropia com o aumento da direção em relação a laminação. Um segundo ponto é a redução dos valores de anisotropia com o aumento da espessura do material, visualizado para os materiais 1.4509 e 1.4512. Esta redução de anisotropia representa um aumento da tendência de redução da espessura em relação às demais dimensões. Percebe-se que há grande variação entre os valores de anisotropia para cada direção e entre cada material também. Partindo para os resultados de anisotropia normal é nítida a tendência de aumento do risco de afinamento da chapa quando é incrementado o valor da espessura, sendo que nessa questão, o aço 1.4510 apresenta valores mais interessantes em termos médio de anisotropia. Para a anisotropia planar nota-se que as chapas de 1.4509 2mm e 1.4512 1mm apresentaram valores muito próximos a zero, o que significa que há pouca tendência de orelhamento. Para a amostra de 1.4509 1,2mm, o valor foi $\Delta r < 0$ o que significa que o orelhamento vai acontecer próximo à direção de 45° em relação à laminação, tendência contrários às demais amostras, onde $\Delta r > 0$, o que significa que orelhamento deve ocorrer a 90° em relação à direção de laminação [13]. Comparando com a literatura, os valores de anisotropia do aço 1.4509 apresentaram comportamento semelhante que o encontrado por Pisano [1] para a direção de 90°, apesar de apresentar valores mais baixos, as demais direções seguem uma tendência semelhante. O mesmo é apresentado para o aço 1.4510, que foi apresentado por Velho [22]. Para o aço 1.4512, os valores de anisotropia se apresentaram inferiores aos que foram encontrados por Xu [28], entretanto houve a mesma tendência, onde a direção de 90° apresentou os maiores valores para anisotropia.

3.3 ENSAIO DE NAKAJIMA

3.3.1 METODOLOGIA E SETUP EXPERIMENTAL

Devido à limitação de disponibilidade de materiais, foram utilizados para o ensaio de Nakajima, os aços: 1.4510 com 1,2mm de espessura, e o aço 1.4512 com 1,0mm de espessura.

O corpo principal de ferramentas para o ensaio de Nakajima consiste em três componentes, sendo eles: punção, prensa chapas e matriz inferior. Tais equipamentos estão apresentados na Figura 58 e na Figura 59.



Figura 58 – Punção para ensaio de Nakajima.



Figura 59 – Prensa chapas (esquerda) e matriz inferior (direita).

Os corpos de prova para o ensaio de Nakajima foram obtidos seguindo a norma ISO 12004-2-2008 [37], visando a realização dos ensaios para que cada amostra de chapa se comportasse ao menos uma em cada tipo de deformação, de acordo com o DLC. Foram utilizadas 6 geometrias diferentes, atendendo à proposta da norma ISO 12004, onde ao menos 5 geometrias diferentes devem ser utilizadas, [37]. As dimensões dos corpos de prova estão apresentadas na Tabela 9, com as dimensões referenciadas à Figura 14.

Tabela 9 – Dimensões dos corpos de prova ensaio de Nakajima (mm).

1- Eixo (mm)	2-Largura do Eixo (mm)	3-Raio Filete (mm)
50	20/ 40/ 60/ 80/ 100/ chapa completa	25

O comprimento do eixo central foi 50mm, pois a norma determina que para um punção com 100mm de diâmetro, o eixo deve possuir o comprimento entre 20mm e 50mm. Definindo o valor igual a 50mm é possível obter uma maior região útil para avaliação das deformações. O raio do filete que foi escolhido com 25mm, para evitar concentrações de tensão devido às arestas, e tornando comprimento total do corte igual ao valor do diâmetro do punção utilizado. Os corpos de prova foram obtidos através de corte a plasma e estão ilustrados na Figura 60.

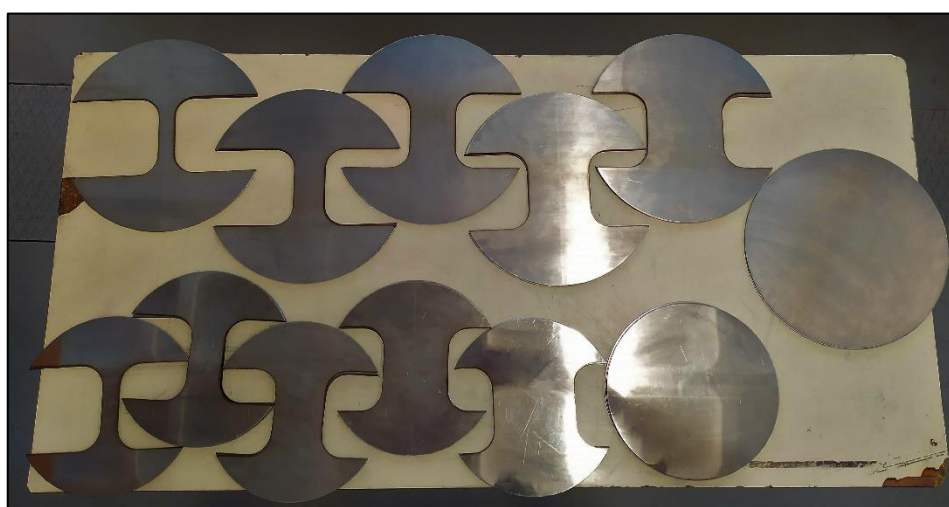


Figura 60 – Corpos de prova para o ensaio de Nakajima.

Como discutido anteriormente, há diversas formas e métodos para realizar as marcação das grades para medição das deformações dos corpos de prova. Entre elas, foi selecionada a marcação a laser, pois tal método possui boa precisão, além de fácil aplicação. A máquina utilizada foi a Portlaser – X252. Os parâmetros foram definidos após pequenos testes de gravação, sendo que o melhor resultado foi obtido para 25% para velocidade e 70% para potência da máquina. Seguindo orientações da norma e a partir da avaliação de diversos trabalhos elaborados, foi selecionada uma malha mista, utilizando círculos acoplados e linhas transversais de marcações, sendo que os círculos possuíam diâmetro de 2mm, respeitando a recomendação de que a malha deve possuir ao menos a dimensão da espessura da chapa, e o máximo de diâmetro de 2,54mm. Tal dimensão de malha foi selecionada para evitar erros de falta de precisão que tamanhos pequenos para de malhas podem causar, [37]. A Figura 61 ilustra o tipo de malha que foi aplicada.

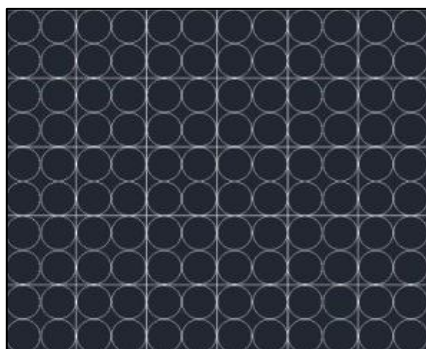


Figura 61 – Malha aplicada nos corpos de prova.

A gravação das malhas nos corpos foi realizada de acordo com a ilustração na Figura 62, seguindo os seguintes passos:

1. Preparação da Superfície: Lixamento, limpeza a seco com papel toalha e posterior limpeza da superfície com acetona, buscando eliminar toda graxa e impurezas para a melhor marcação do laser.
2. Aplicação do material de base: *Spray* de marcação a laser de superfícies metálicas, marca markSolid 114.M9AS, cor preto, aguardando 2 minutos até a completa secagem da tinta.
3. Gravação a laser: Posicionamento do corpo de prova na máquina de gravação a laser e posterior impressão das malhas sobre a superfície do corpo de prova.
4. Limpeza pós gravação: Após a gravação das malhas foi efetuada a remoção de toda a tinta e impurezas da superfície do corpo de prova.



Figura 62 – Resultados das operações de marcação.

Cabe mencionar que as marcações foram realizadas em uma região de 120mm de diâmetro, no centro do corpo de prova, pois regiões maiores são desnecessárias, já que a medição de deformações dessas regiões não seria válida para os ensaios.

Inicialmente para o lixamento foi utilizada lixa d'água granulometria 320. Então foi realizada a aplicação da tinta spray sobre a superfície e a seguir a marcação a laser da grelha de medição. Ocorreu que, após a aplicação a qualidade da grelha não foi boa pois parecia estar desfocada. Por último, ao realizar a limpeza da superfície com uma espuma sensível, as marcações começaram a se soltar, como pode visto na imagem a seguir.

Para conferir mais de perto o que estava acontecendo, foi utilizada uma câmera com zoom óptico de 250x, e percebeu-se que não podiam ser vistos os círculos da grelha, pois a tinta das suas bordas estava se soltando, como apresentado na Figura 63. Isso ocorreu porque a tinta não aderiu corretamente à superfície do metal e ao realizar a marcação não houve a reação de marcação corretamente.

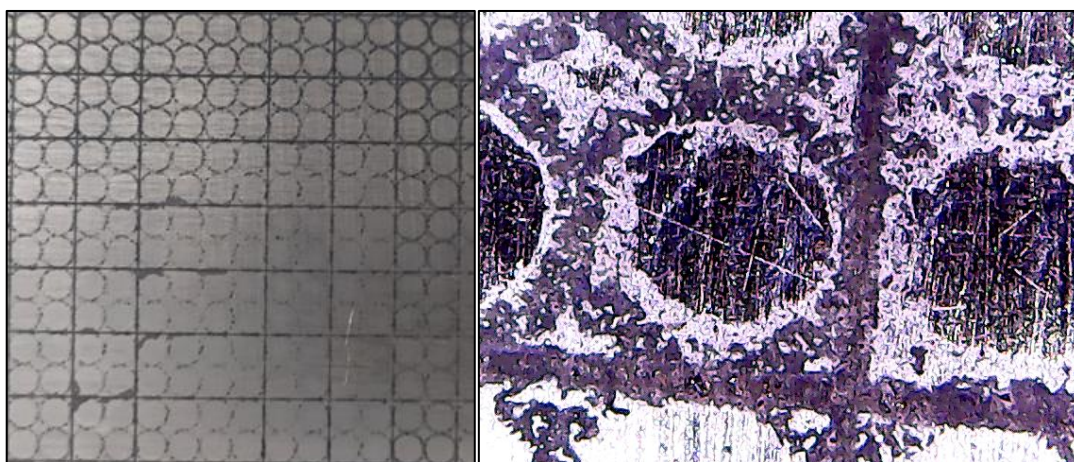


Figura 63 – Falhas na marcação da malha.

Buscando solucionar esse problema a amostra foi lixada novamente, dessa vez com lixa 1000. Após o lixamento foi realizado todo o procedimento de limpeza novamente. Com isso foi realizada uma nova marcação a laser e foi obtido um ótimo resultado, pois a qualidade da marcação foi visivelmente superior a primeira vez, como pode ser visto na Figura 64. Depois foi realizada a limpeza da tinta para verificação da qualidade microscópica da grelha marcada e realmente foi melhor, como pode ser visualizado na imagem a seguir.

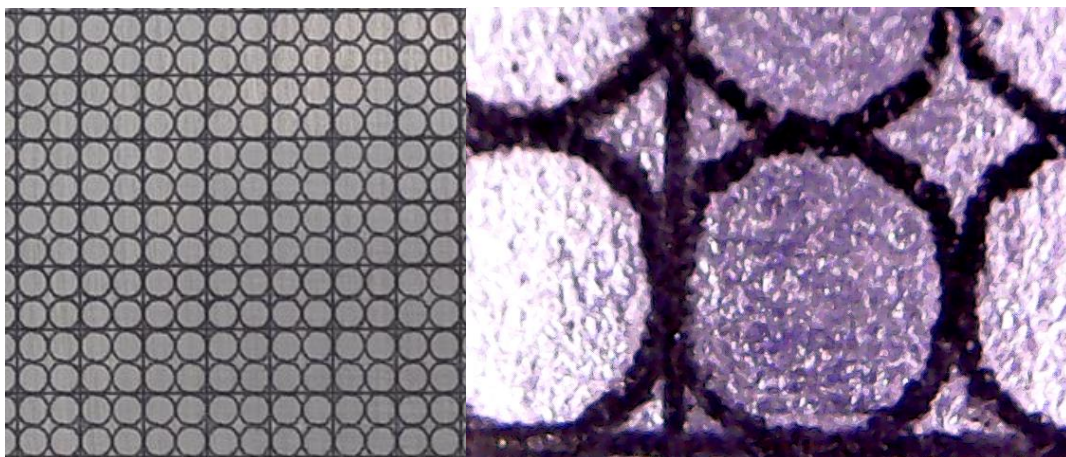


Figura 64 – Marcação final da malha.

Para a lubrificação, a aplicação está de acordo com o caso da norma ISO 12004-2 [37] para altas forças do punção, devido aos aços em questão possuírem maior resistência à ruptura. Devido a esse fato, foi utilizado óleo mineral com um filme plástico fino (*Seal View* - marca Norton, 0,05mm de espessura). Esse sistema de lubrificação foi aplicado na superfície de contato entre o punção e o corpo de prova. Como já citado anteriormente, é importante garantir uma boa lubrificação e baixa influência do atrito, para buscar um caminho mais uniforme no traçado das curvas limites de conformação.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron modelo 4485, com os parâmetros definidos seguindo as orientações da norma ISO 12004-2 [37], os quais estão ilustrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros para o Ensaio de Nakajima.

PARÂMETRO	VALOR
Velocidade do Punção	1,0 mm/s
Temperatura de teste	(23 ± 5) °C
Direção do corte do eixo central do corpo de prova	Aço: Eixo da chapa perpendicular à direção de laminação
Rugosidade Superficial	A área de contato entre o punção e a peça deve possuir a menor rugosidade possível, para evitar efeitos do atrito
Material das Matrizes	Aço inoxidável
Critério de parada do ensaio	Ocorrência de falha
Deteção da falha	Visualização da falha em vídeo

O procedimento definido para os ensaios foi preciso levar em conta a quina das chapas, para que não houvesse o enrugamento ou escorregamento da chapa. Com isso, o procedimento foi definido e está apresentado no Anexo VI.

Foram realizadas marcações na parte de trás das amostras de Nakajima, para que fosse possível posicioná-las no centro da matriz inferior, como ilustrado na Figura 65. Então essas marcações do diâmetro foram alinhadas com a matriz inferior.

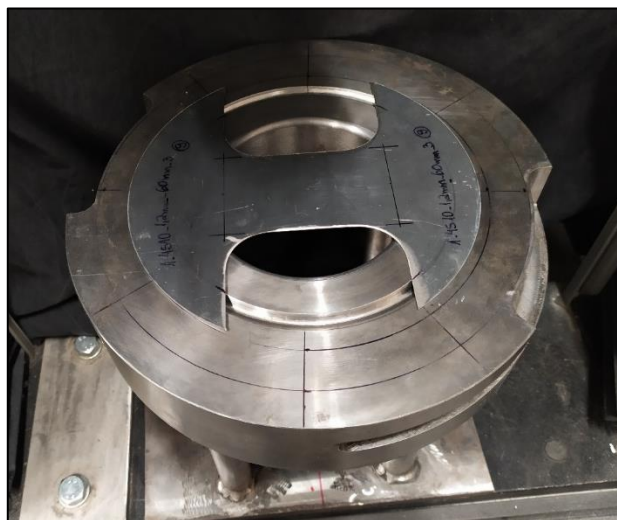


Figura 65 – Posicionamento do corpo de prova.

Seguindo para análise dos resultados dos testes, a deformação do corpo de prova é determinada e processada de forma que a área com a falha seja eliminada dos resultados. A deformação máxima que pode ser imposta ao material sem falhar é então determinada por interpolação. Para esta medição, como mencionado nas seções anteriores, podem ser utilizados diversos métodos, entre eles estão a correlação por imagem digital e a medição através da câmera digital. A metodologia de medição que seria utilizada nos ensaios foi definida através da realização de pré-testes.

Visando a medição de deformações utilizando a CDI, foi desenvolvido um *setup* experimental para a aquisição de imagens das deformações ao longo do ensaio. O objetivo do *setup* é que este seja posicionado de maneira que as câmeras utilizadas estejam focando a região que irá se deformar ao longo do ensaio. Então é gravado o vídeo do ensaio, onde as imagens capturadas pelas câmeras são tratadas e então é verificado o instante de ruptura do corpo de prova, onde é utilizada a imagem anterior para a medição das deformações. Nesta imagem é então realizada a medição das grades circular, identificando as deformações maiores e menores na região onde deve ocorrer a fratura. Essas deformações são convertidas em verdadeiras através das Equações (20) e (21), como indicado na Figura 18. Com o conhecimento dessas deformações é então plotado o DLC em conjunto com a CLC daquele ensaio. Como devem ser realizados ao menos 3 ensaios válidos para cada corpo de prova, ao final destes, é realizado o

cálculo do valor médio das 3 curvas limites de conformação encontradas, esta curva média é a representativa para este conjunto de ensaios.

O procedimento descrito anteriormente depende de boa qualidade das imagens capturadas, além de um *software* específico para a correta medição das deformações através das imagens. Ao longo desta seção será discutido sobre a concepção do *setup* experimental de aquisição de imagens, além da pesquisa do melhor *software* para medição das deformações.

Como já mencionado na seção sobre o ensaio de tração, as câmeras utilizadas são modelo Laia FULL HD 1080P, sendo capazes de adquirir imagens de vídeo em até 50fps.

Inicialmente as câmeras foram posicionadas abaixo da matriz inferior, para verificar a qualidade das imagens, neste momento foi notada a presença de reflexos na base da matriz inferior, situação que poderia influenciar na qualidade das imagens que seriam capturadas. A presença de tais reflexos foi eliminada, como ilustrado na Figura 66, através da aplicação de um adesivo, de cor preto fosco, na base da matriz.

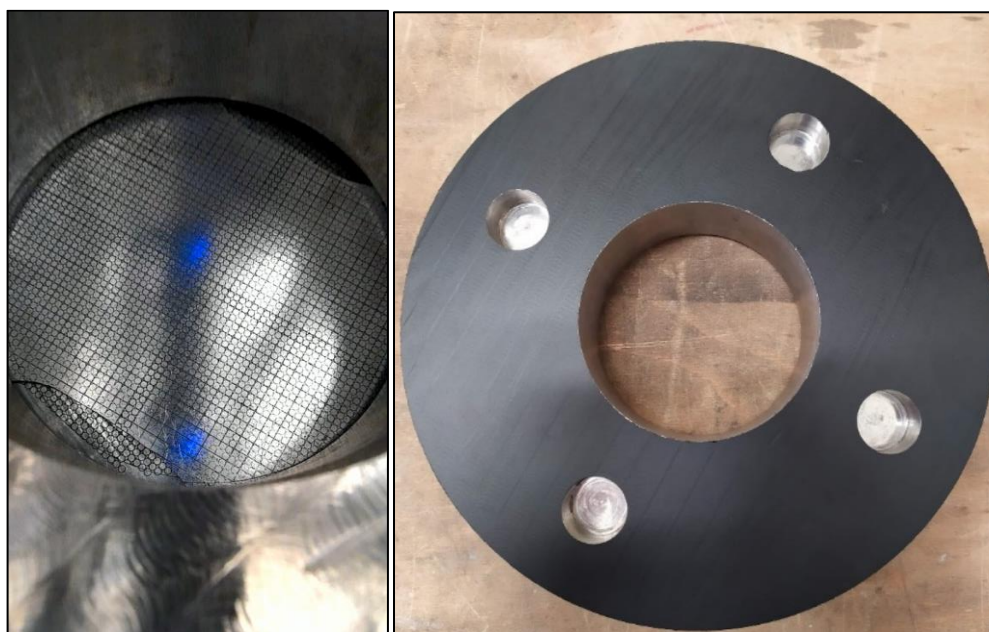


Figura 66 – Reflexos e matriz inferior com adesivo.

Retornando ao *setup* para aquisição de imagens, o objetivo principal era obter a captura de imagens com a melhor resolução possível e com o *frame rate* acima do informado pela norma ISO 12004. Tal frequência de aquisição de imagens deve ser de no mínimo 10Hz, sendo assim, deveria ser gravado um vídeo de todo o ensaio de Nakajima. Foram realizadas pesquisas de códigos disponíveis e quais as possíveis plataformas poderiam ser utilizadas para realizar a aquisição de imagens, pois as câmeras devem capturar o vídeo em simultâneo, com o mesmo instante de tempo para as duas câmeras.

O código mais próximo do que era necessário foi Webcam Video Recorder GUI [68], desenvolvido em Matlab®, onde o autor criou uma interface gráfica intuitiva para realizar a aquisição de imagens. O problema está no ponto desse código realizar a aquisição de imagens apenas para uma câmera, não para duas. Existem empresas que desenvolveram *setups* e *softwares* próprios para a aquisição de imagens para avaliação de deformações (tal como Gom correlate®, VIC 3D® *measurements*) além de outros *softwares* open-source. Apesar da praticidade dos *softwares* particulares, pois além de fornecer a aquisição de imagens é possível avaliar também a deformação dos corpos de prova e traçar as CLC's, o custo de aquisição de tais ferramentas é muito alto. Já para os *softwares open-source* não foi possível utilizar nenhum, isso deve-se a fatores de custos e facilidade de implementação que são desejados para o *setup* deste trabalho.

Portanto, foi necessária a criação de um programa para aquisição de imagens em simultâneo e em tempo real, tal programação foi realizada em linguagem python, em parceria com MSc. Eduardo Carvalho Nunes, [69]. A partir deste momento foram realizados testes para verificar a precisão e frequência da aquisição de imagens.

Houveram problemas iniciais, onde mesmo as câmeras sendo capazes de adquirir imagens de vídeo em até 50fps, isso não estava acontecendo através do programa criado em python, pois o *frame rate* estava variando entre 20 a 21fps, distante da capacidade máxima das câmeras.

Para entender melhor sobre esta situação e verificar também a sincronia entre as câmeras na aquisição das imagens, foram realizados testes através da gravação de vídeo de um cronômetro de celular, onde, após a implementação de alterações no código, os resultados atendiam a proposta da norma ISO 12004-2. O programa também permitia a definição de propriedades como: resolução de aquisição de imagens, modo de foco (ativado para automático) e definição do *frame rate* de aquisição e salvamento do vídeo. Também foi inserida a legenda instantânea que mostra as informações sobre o nome da câmera, data e hora (do computador) da gravação do vídeo. O vídeo resultante é gravado em formato mp4, salvo com nome de acordo com a câmera que o obteve, além de que, em cada frame é registrado o nome da câmera, data e hora real (Fuso horário de Portugal) do momento da aquisição daquele Frame, com precisão em milésimos de segundo.

Seguindo a montagem da parte experimental, foi projetado e desenvolvido um suporte de câmeras para a aquisição dos vídeos. Foram utilizadas duas barras roscadas M10 com comprimento de igual a 170mm; 2 barras maciças de aço inox, com diâmetro 36mm e altura 50mm; 1 perfil calha quadrado 20mmX20mm e 220mm de comprimento, 2 arruelas M10

diâmetro externo 29,7mm e espessura 2,25mm, 6 porcas M10 com 7,8mm de espessura, dois parafusos e porcas M6, resultando no suporte ilustrado na Figura 67.



Figura 67 – Suporte de fixação para câmeras.

Com o suporte preparado, foi realizada uma marcação no centro da face superior da calha, para que esta fosse utilizada como referência para o posicionamento das câmeras. Primeiramente o suporte das câmeras foi posicionado de maneira que o meio da calha estivesse alinhado com o centro do furo da matriz inferior. Esta verificação foi realizada através da utilização da régua, paquímetro e nível. Essa posição foi marcada para que não fosse perdida a sua referência.

A seguir, o posicionamento das câmeras e parâmetros foram definidos através de diversos testes, sendo o posicionamento primeiramente estudado a partir do *software* Solidworks®, buscando que o centro de foco de ambas as câmeras fosse o centro do corpo de prova antes do teste. Foram verificados iterativamente os parâmetros de distância entre câmeras (mantendo essa distância simétrica em relação ao centro da calha), altura e o ângulo de direcionamento das câmeras.

Após encontrar a posição ideal através do Solidworks®, como ilustrado na Figura 68, foi realizado o posicionamento real do setup de suporte na máquina de ensaios, como ilustrado na Figura 69 e Figura 70. Com o *setup* posicionado foram realizados diversos testes para avaliar a questão de foco, brilho, saturação, distância de foco, entre outros. Ao longo dos testes foram evidenciadas boas práticas para o posicionamento do *setup*, tal como evitar o posicionamento que realce as bordas internas da matriz, pois dificulta a focagem por parte das câmeras.

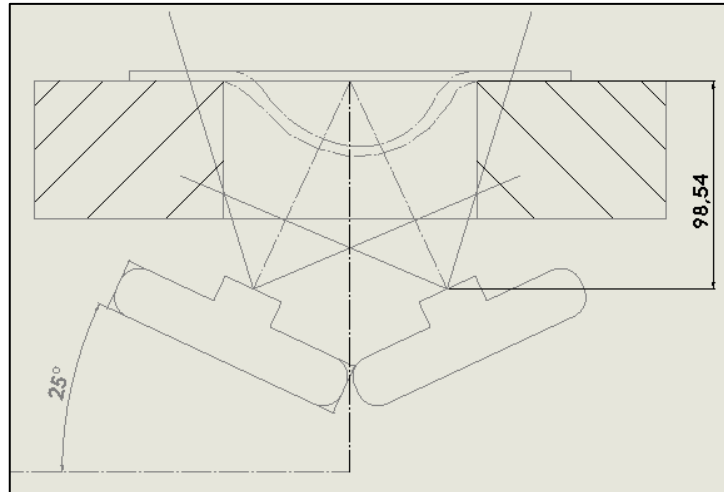


Figura 68 – Estudo do posicionamento das câmeras.



Figura 69 – Suporte e posicionamento das câmeras.

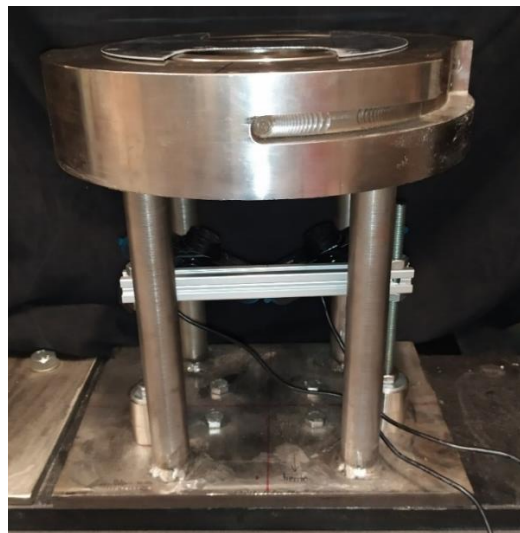


Figura 70 – Posicionamento das câmeras.

Os testes de Nakajima foram realizados seguindo os seguintes procedimentos descritos anteriormente e o *setup* final está ilustrado na Figura 71.

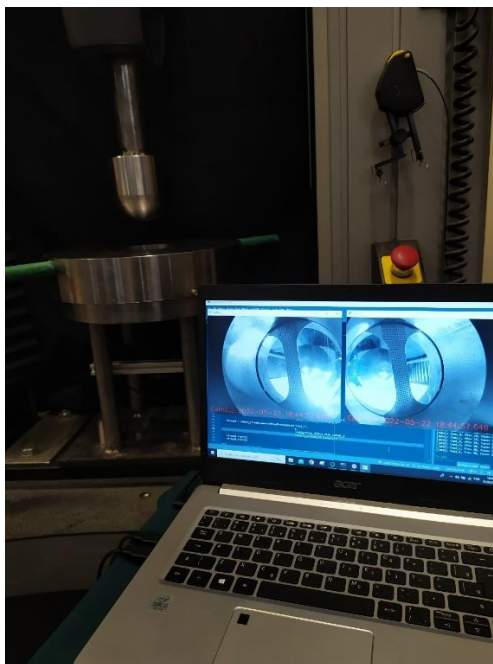


Figura 71 – Setup final.

Após o fim dos ensaios, foi utilizado o algoritmo em Matlab® para realizar a estratificação dos *frames* de cada vídeo, assim como foi feito no ensaio de tração. Essa estratificação é importante para o momento da análise da deformação instantânea do material ao longo dos testes.

Partindo para a realização das medições, um ponto de extrema importância é a calibração das câmeras. Como citado anteriormente, a calibração é importante para melhorar a qualidade das imagens capturadas pelas câmeras, através da correção da distorção das lentes e definição da posição das câmeras em relação aos objetos de estudo. Para isso, foi impresso em folha de papel A4 um padrão de calibração xadrez, com 53 colunas X 36 linhas, sendo as dimensões dos quadrados são de 5mmx5mm. Este padrão foi colado em uma placa de madeira para garantir total planicidade e rigidez da do padrão no momento da aquisição de imagens para calibração das câmeras.

O próximo passo foi definir qual *software* seria utilizado para medição das deformações. Inicialmente foi verificada a possibilidade de utilizar a toolbox MultiDIC® para a medição de deformações em 3D, pois é uma biblioteca de *software* de código aberto e gratuito, sendo muito útil para análise de imagens estéreo multivisão e obtenção de formas e deslocamentos 3D [53]. Este código utiliza dois algoritmos de calibração, sendo o *Bundle Adjustment* (BA), incluído na caixa de ferramentas de visão computacional Matlab, onde os parâmetros de distorção e inclinação são calculados em várias imagens de um padrão xadrez plano. O segundo algoritmo é o *Direct Linear Transformation* (DLT), implementado para realizar a reconstrução de

superfícies 3D a partir de vários pares de imagens estéreo de um objeto de calibração 3D, visto simultaneamente de todas as vistas. A seguir, utiliza um *software* de código aberto, o 2D-DIC Ncorr [70], para a verificação da correlação de imagens e posterior medição de deslocamentos e deformações. Apesar de ser uma biblioteca muito interessante, não foi possível utilizá-la para a medição dos deslocamentos e deformações no ensaio de Nakajima, pois para a calibração DLT são utilizadas imagens de um objeto de calibração não plano com pontos de controle cujas posições 3D em um sistema de referência global são perfeitamente conhecidas, ou seja, é preciso criar um objeto, cilíndrico no caso da pesquisa da autora, com marcações de pontos precisos com todas as distâncias até o foco da câmera conhecidas. Portanto, tal calibração se torna complicada quando comparada a aplicação apenas do tabuleiro de xadrez, podendo resultar em erros não avaliados na criação do MultiDIC. Não foi encontrado outro *software open source* para medição 3D, que atendesse as necessidades deste trabalho, portanto, neste momento, para este trabalho, não foi possível utilizar a CDI 3D para a medição dos deslocamentos e deformações no ensaio de Nakajima.

A alternativa proposta foi a utilização de CDI 2D para avaliação das deformações dos ensaios, utilizando uma câmera com zoom de 1000x. Como mencionado anteriormente, um ponto de extrema importância na CDI é a calibração do sistema de aquisição de imagens. Para isso, a câmera foi posicionada sobre uma amostra, com a ponta encostada na superfície de uma folha de papel com um tabuleiro de calibração xadrez (com quadrados de 2mmX2mm de largura).

A vantagem da utilização desta câmera em específico está relacionada ao led embutido nela, o qual proporciona ótima iluminação, além de uniformizar a iluminação sobre a superfície da amostra. Com a câmera totalmente encostada sobre a amostra, foram realizados testes para definição das propriedades da câmera para a realização da aquisição de imagens, onde foram selecionadas as seguintes, que apresentaram melhor resolução e foco da imagem, sendo: *Backlight=0, Brightness=0, Contrast=50, Gain=30, Gamma=1, Hue=0, Saturation=100, Sharpness=10, WhiteBalanceMode='auto'*.

Com as propriedades definidas, partiu-se para a calibração do sistema, portanto, após a calibração as propriedades foram mais alteradas. Para a calibração foi desenvolvido um algoritmo para identificar os quadrados e definir assim a relação entre o número de pixels que continham em 2mm de distância, como pode ser visualizado na Figura 72.

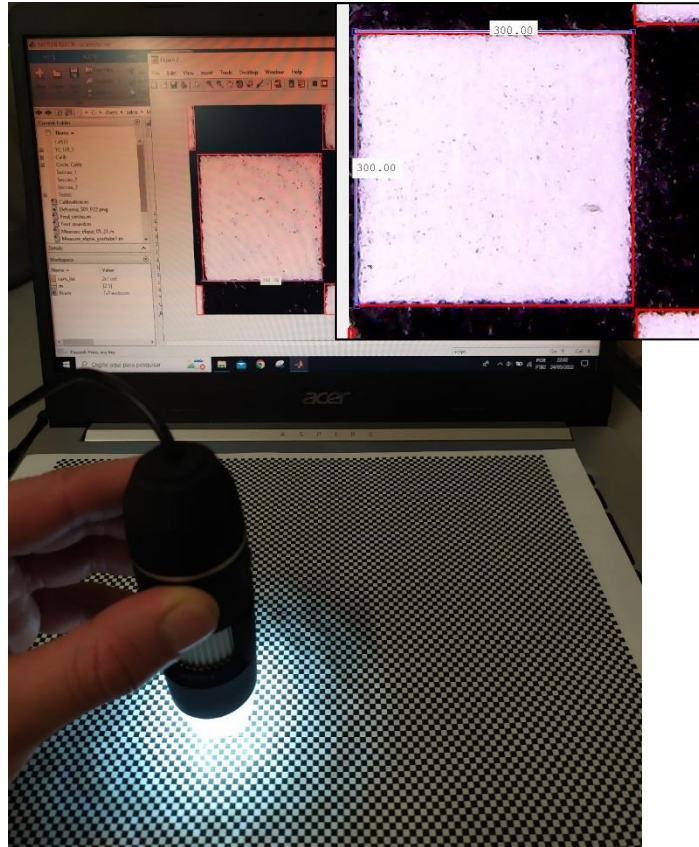


Figura 72 – Calibração xadrez.

Após a calibração através dos quadrados, foi corroborado esse valor através da medição de um paquímetro, como pode visualizado na Figura 73.

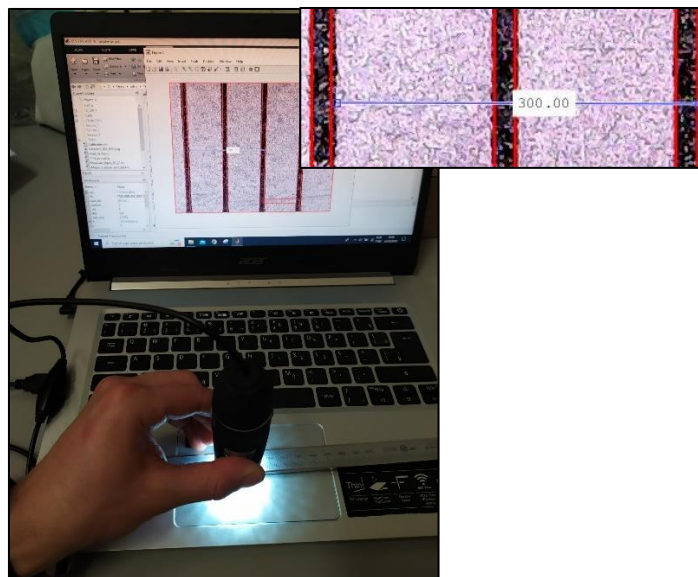


Figura 73 – Medição paquímetro.

Portanto, ficou definido que para uma resolução de 640X480 pixels (largura x altura da imagem), para as propriedades relacionadas anteriormente, uma 300pixels são equivalentes a uma distância de 2mm.

O segundo passo foi a definição da dimensão inicial dos círculos, para o cálculo das deformações. Para isso, foram realizadas aquisições de imagens de círculos de referência para definir a dimensão inicial destes. Após esta definição o sistema estava calibrado e pronto para a execução das medições.

O método definido para avaliação das deformações é o método das secções, já mencionado no capítulo 2 deste trabalho e descrito através da norma ISO 12004 [37]. Através dos vídeos de cada ensaio, foi identificado início da fratura e a seguir, foram definidas as 3 secções de interesse de medição perpendiculares a direção da fratura. A primeira secção é posicionada ao centro da falha e as outras duas, uma em cada da primeira, posicionadas com distância 2mm entre elas. Cada secção deve conter no mínimo 10 círculos para cada lado da falha, ou seja, 20 círculos no total. A Figura 74 ilustra esse procedimento.

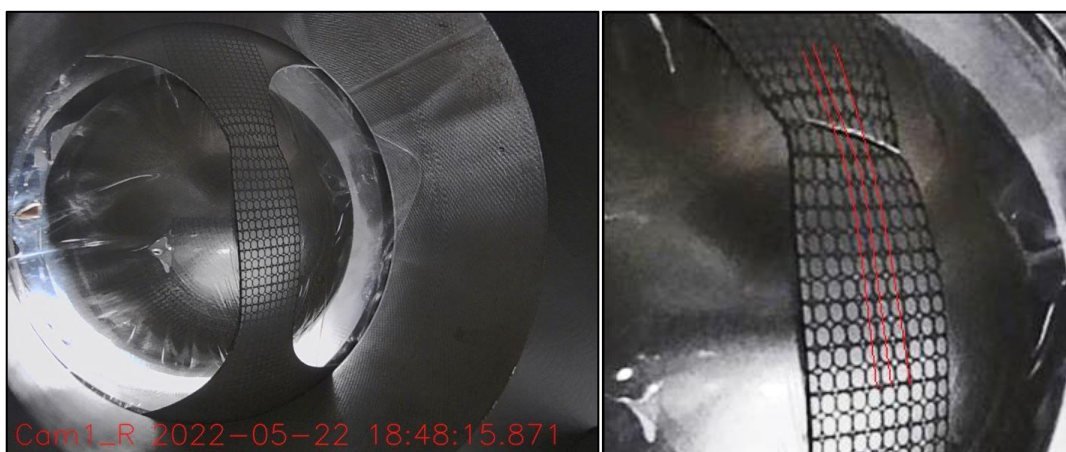


Figura 74 – Instante de início da fratura/marcação das 3 secções de interesse.

Com as secções definidas, deve ser realizada a medição das deformações de cada círculo em cada uma das secções. Para isso é necessária a aquisição de imagens, onde foi desenvolvido um algoritmo em Matlab®, para a aquisição de 20 imagens, ou seja, cada execução tem como objetivo identificar todos os círculos para cada secção de medição. A captura é realizada individualmente para cada círculo das secção de interesse, como ilustrado na Figura 75, partindo da posição 0 (10 círculos de distância da falha) até o último círculo completo antes da falha, seguindo para o primeiro círculo completo após a falha até 10 círculos de distância após a falha.

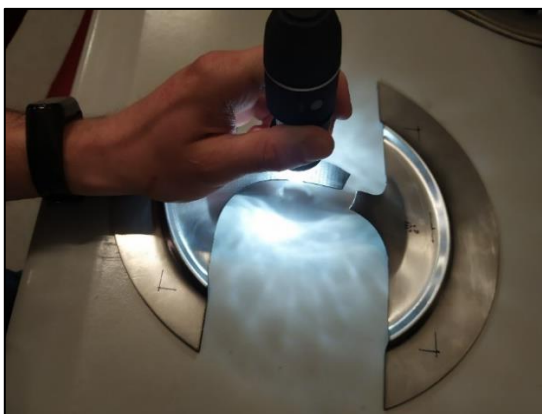


Figura 75 – Captura de imagens para medição de deformações.

Ao longo do algoritmo é necessária a conversão da imagem em escala de preto e branco, para que seja possível a identificação do da elipse de interesse. Após essa conversão em escala de preto e branco, é realizado um tratamento da imagem, para desconsiderar qualquer ruído que não seja de interesse para a medição. No próximo passo é mapeada a região interna do círculo deformado, onde é identificado o número de pixels da dimensão maior e menor e a seguir, é realizada a plotagem de uma elipse demarcando a região de interesse reconhecida na imagem. Junto com a marcação da elipse reconhecida, são apresentados os valores de deformações verdadeiras, maior e menor, calculados para aquele ponto de interesse. Todo o procedimento descrito está ilustrado na Figura 76, sendo que a Figura 77 ilustra o resultado da medição.



Figura 76 – Procedimento de tratamento da imagem.

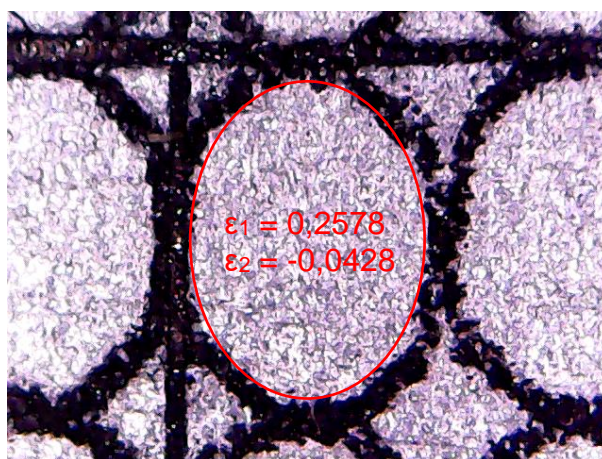


Figura 77 – Resultado final da medição.

Após a verificação das deformações, é gerado, para cada corpo de prova, um arquivo em formato .xls, contendo os resultados para a posições dos círculos e as deformações ε_1 e ε_2 para as três secções da amostra. Em posse dessas informações, utilizando um algoritmo desenvolvido em MatLab®, foi aplicado o método de medição descrito na ISO 12004, para encontrar o valor de ε_1 e ε_2 que representam o ponto de deformação máxima de cada secção. Portanto, para cada seção é encontrado um par $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$, contudo, cada amostra possui 3 secções, conclui-se que para cada amostra são encontrados 3 pares de $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$. Enfim, como foram ensaiadas 2 amostras para cada geometria, foram encontrados 6 pares de $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ representativos de cada geometria. De posse destes valores é realizado o cálculo do valor médio deles, resultando assim, no par $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ que representa aquela geometria de corpo de prova, portanto é este par que deve ser inserido para a representação da curva limite de conformação.

3.3.2 RESULTADOS

Os testes foram realizados seguindo os procedimentos descritos anteriormente, onde a Figura 78 ilustra os corpos de prova após a realização dos ensaios.

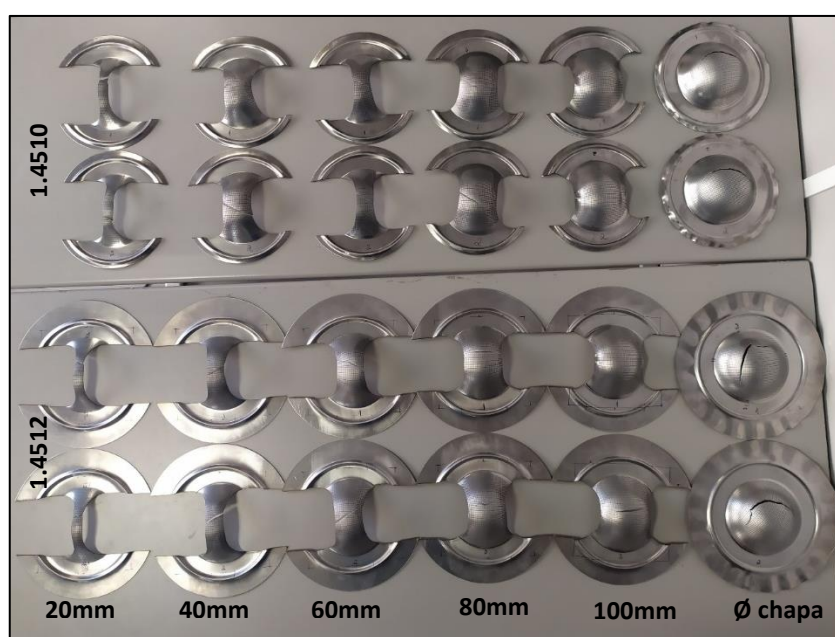


Figura 78 – Deformação corpos de prova Nakajima.

Primeiramente foi realizada a avaliação da curva força x deslocamento de cada ensaio, como pode ser visto na Figura 79 e na Figura 80, referentes aos aços 1.4510 e 1.4512, respectivamente.

O desenvolvimento em geral das curvas foi semelhante para ambos os materiais, onde a amostra que apresentou o menor deslocamento do punção e a menor força máxima para a

ruptura, foi a amostra com eixo de 20mm de largura, seguido pelas demais amostras em ordem crescente de largura de eixo e força máxima. Em relação ao deslocamento máximo, todas as amostras apresentaram um valor semelhante para o aço 1.4510, exceto as amostras com largura de eixo de 20mm e também as amostras biaxiais. Situação semelhante se repetiu para o aço 1.4512.

Em relação à força máxima, as amostras do aço 1.4510 apresentaram valores mais elevados do que as amostras do aço 1.4512, chegando a 40% de superioridade para as amostras biaxiais, o que indica maior resistência para a conformação desse material.

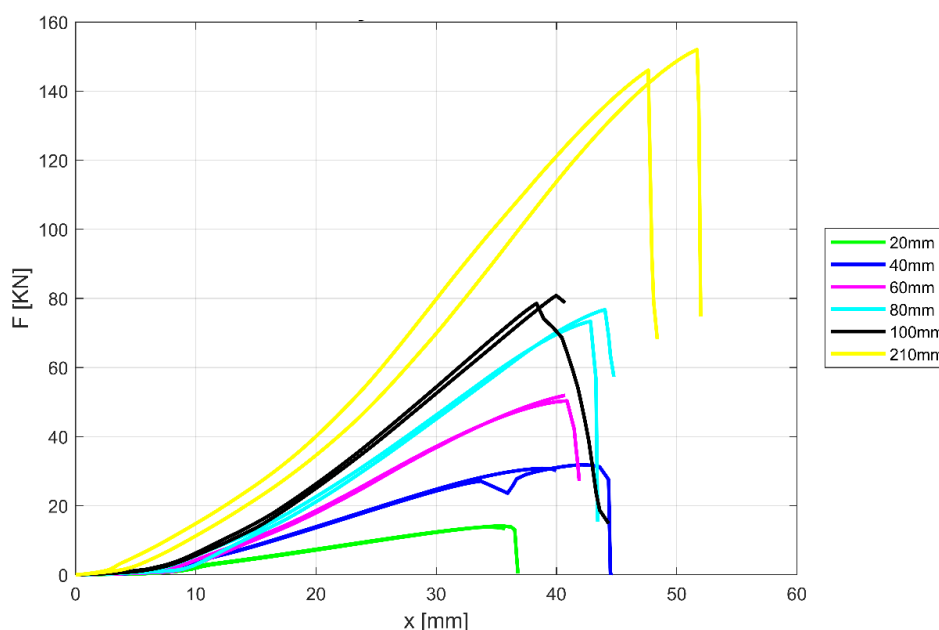


Figura 79 – Força x deslocamento 1.4510 1,2mm – Nakajima.

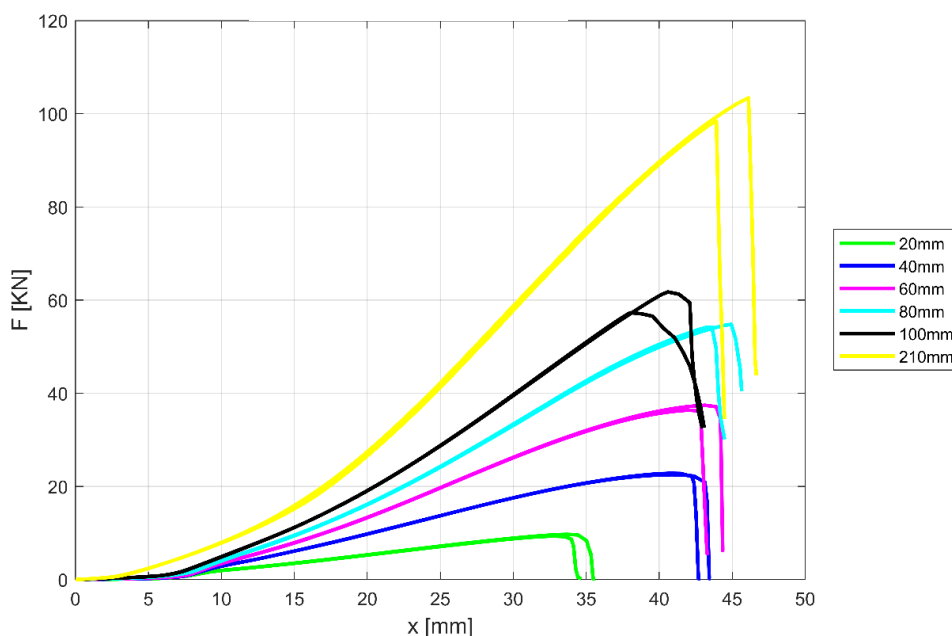


Figura 80 – Força x deslocamento 1.4512 1,0mm – Nakajima.

Iniciando a avaliação das deformações apresentadas pelas elipses e também, a posição das em que ocorreram as fraturas para cada geometria, percebe-se um grande alongamento das elipses junto à falha para a geometria de 20mm, como ilustrado na Figura 81. Apesar desse grande alongamento junto à falha, as demais elipses não apresentam uma tendência como era esperado, pois estão muito menores do que era proposto. Observa-se que a fratura para as amostras de 20mm ocorreram um pouco mais distante da região central do eixo, o que pode indicar que uma maior quantidade de lubrificante era necessária. Este pode ser o motivo de deformações menores do que o esperado, [12], [20], [25].



Figura 81 – Fratura geometria 20mm (1.4512 – amostra 2).

Para as geometrias com eixo de largura 40mm, as elipses apresentaram, visualmente, grandes deformações junto à falha, com certa tendência de aumento constante de suas deformações, como ilustrado na Figura 82. É perceptível que há um eixo da elipse que aumentou sua dimensão e outro que sofreu uma redução em sua medida. As fraturas ocorreram mais próximo da região central, o que deve apresentar bons resultados para a deformação medida, além de que as deformações ocorreram de maneira idêntica em ambas as amostras.



Figura 82 – Fratura geometria 40mm (1.4512 – amostra 2).

Para a geometria de 60mm as fraturas ocorreram de maneira igual para ambas as amostras, iniciando próximo à região central do eixo, se desenvolvendo de maneira inclinada até à borda do eixo central, como apresentado na Figura 83. As deformações das elipses são

semelhantes às apresentadas pela geometria de 40mm, o que indica que as duas geometrias têm um comportamento semelhante para as deformações.

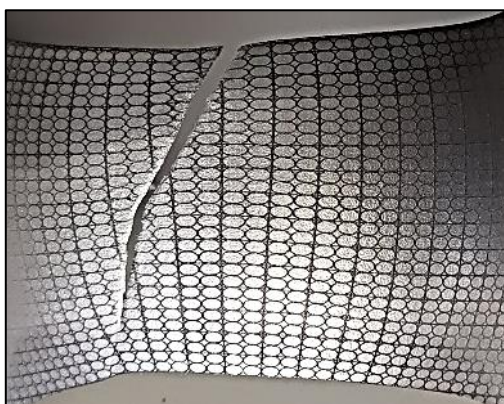


Figura 83 – Fratura geometria 60mm (1.4512 – amostra 1).

Para a geometria de 80mm, as fraturas ocorreram de maneira diferente em cada amostra, sendo que em uma delas apresentou um formato em N na porção central do eixo, já para a primeira amostra houve uma fratura linear próxima à região central do eixo do corpo de prova, como apresentado na Figura 84. Para essas amostras a dimensão do eixo menor das elipse parece muito próxima à dimensão do círculo inicial, o que pode indicar um comportamento próximo a tensão plana.

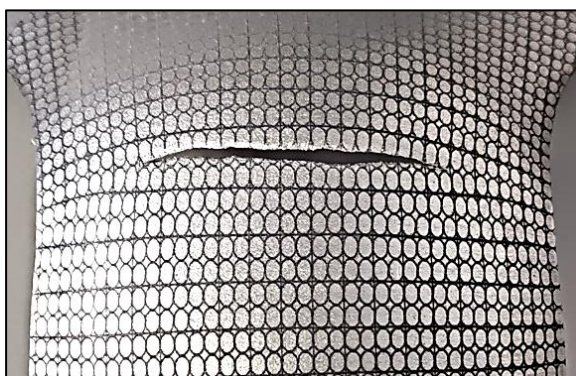


Figura 84 – Fratura geometria 80mm (1.4512 – amostra 1).

Após os testes verificou-se que, para a geometria de 100mm de largura do eixo, a fratura ocorreu fora da região da grelha de círculos, o que impossibilita a avaliação das deformações dessas geometrias. As fraturas ocorrem na região que esteve em contato com o raio da matriz inferior, como pode ser visualizado na Figura 85. Avaliando como as fraturas ocorreram, é observado um orelhamento na região lateral do eixo dos corpos de prova, este pode ser um indicativo de que o teste não correu como deveria, seja por questão de concentração de tensão devido à geometria em si, seja devido à possíveis falhas de fabricação.

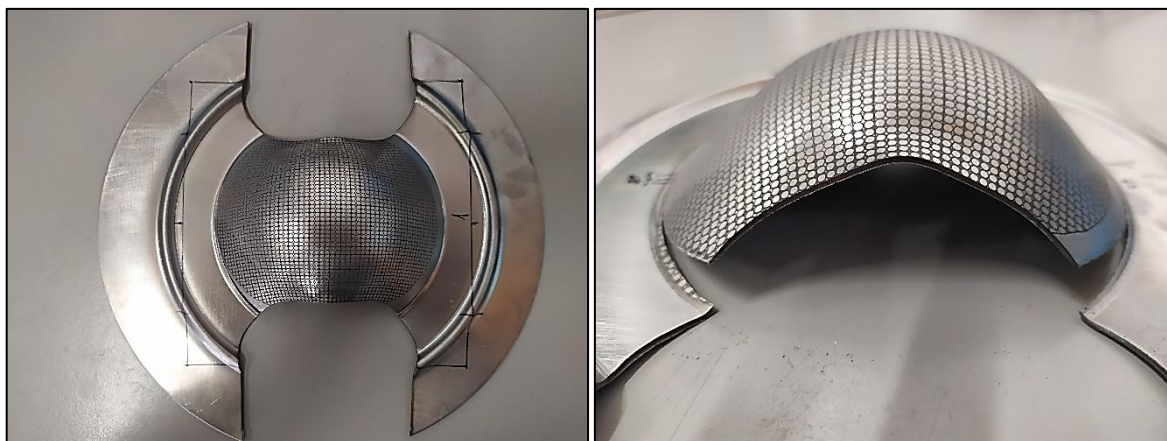


Figura 85 – Fratura fora da região de interesse (1.4512 – 100mm).

Para última geometria avaliada foi utilizada a chapa inteira, visando o estado biaxial de tensões. As fraturas em todas as amostras foram semelhantes, onde elas se desenvolveram ao longo de duas direções, sendo que ao avaliar o vídeo dos ensaios, é perceptível que a fratura inicia o seu desenvolvimento apontando para uma única direção. Portanto, caso houvesse uma parada automática do ensaio, não haveria a ocorrência da segunda direção de desenvolvimento da falha. Sendo assim, a posição avaliada para o cálculo das deformações é aquela onde se inicia a falha. A partir da Figura 86 é perceptível que houve alongamento dos círculos em ambas as direções, ou seja, esta geometria realmente se comportou para um estado biaxial de tensões.

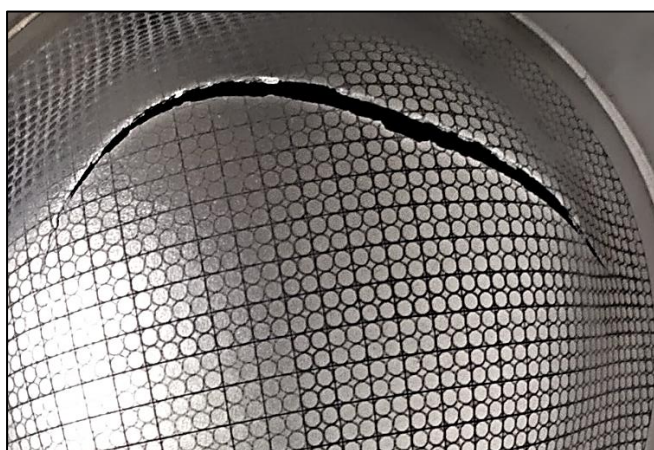


Figura 86 – Fratura geometria equibiaxial (1.4512 – amostra 1).

Para finalizar a análise, a Figura 87 ilustra uma das principais dificuldades para a medição das deformações, o descolamento da tinta de marcação da superfície do corpo de prova. Isso não ocorreu em todos os corpos de prova, mas representou uma dificuldade para a correta identificação das elipses. Tal descolamento ocorreu em regiões de grandes deformações, principalmente em regiões mais próximas da fratura do corpo de prova. Apesar dessas

dificuldades, foi possível realizar as medições das deformações e seguir para a análise das curvas limites de conformação.

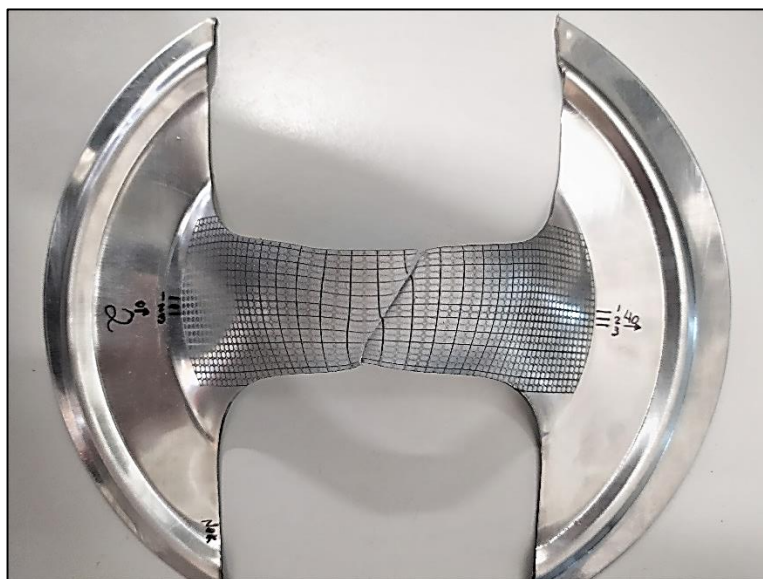


Figura 87 – Descolamento das marcações.

3.4 OBTENÇÃO DAS CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC)

Após os ensaios, foi executado o procedimento para obtenção das CLC's, seguindo a metodologia apresentada anteriormente.

Um momento muito importante é a obtenção da curva em formato de sino, obtida através da suavização dos resultados utilizando a parábola inversa. Nesse momento houveram casos onde o ápice da curva não esteve coincidente com a posição da falha, como ilustrado na Figura 88. A norma ISO 12004 [37] descreve que a lubrificação insuficiente é uma possível causa para a ocorrência deste fenômeno. Ainda segundo a norma, a utilização dos valores encontrados para a curva da maneira descrita, podem levar a conclusões incorretas para a CLC. Portanto é recomendado que seja realizado a correção dos limites das janelas de ajuste utilizadas para a criação da parábola inversa.

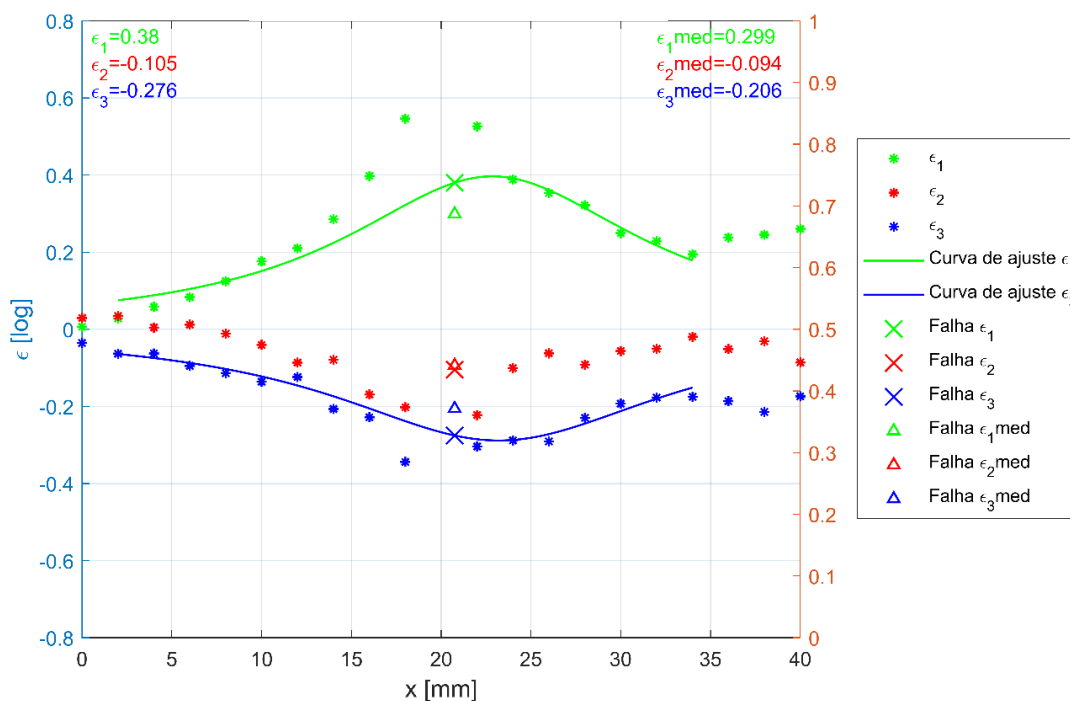


Figura 88 – Parábola inversa descentralizada.

Na Figura 88, estão apresentados os valores obtidos experimentalmente para ϵ_1 e ϵ_2 para a secção 1 - amostra 2 – geometria 20mm do aço 1.4510. Também está ilustrada a obtenção dos valores de deformação para a espessura (ϵ_3), através da lei do volume constante. Sobre esses valores, é plotada a curva de suavização da espessura, utilizando as mesmas janelas de ajuste que foram aplicadas para a parábola inversa na obtenção de ϵ_1 . Sendo assim esse mesmo procedimento foi realizado para a obtenção de ϵ_3 máximo. Por último é obtido o valor de ϵ_2 máximo, através da lei do volume constante, seguindo as orientações propostas pela norma ISO 12004 [37]. Também estão ilustrados os valores máximos obtidos através do cálculo da média entre os valores de deformação para os limites internos da janela de ajuste, método que pode ser utilizado caso a suavização através da parábola inversa não seja possível. Percebe-se que apesar de permitido pela norma, o método de cálculo através da média das deformações dos limites internos leva a subestimar os valores de deformação máxima, principalmente para amostras onde houve embutimento ou épsilon é menor que zero.

Retornando a questão da descentralização da parábola inversa, foi realizado o reposicionamento das janelas de ajuste nos casos onde o ápice da curva não coincidiu com a posição da falha. Em tal ajuste foram mantidos 5 pontos para cada janela, respeitando a recomendação proposta na norma. A Figura 89 apresenta a correção da parábola inversa apresentada na Figura 88.

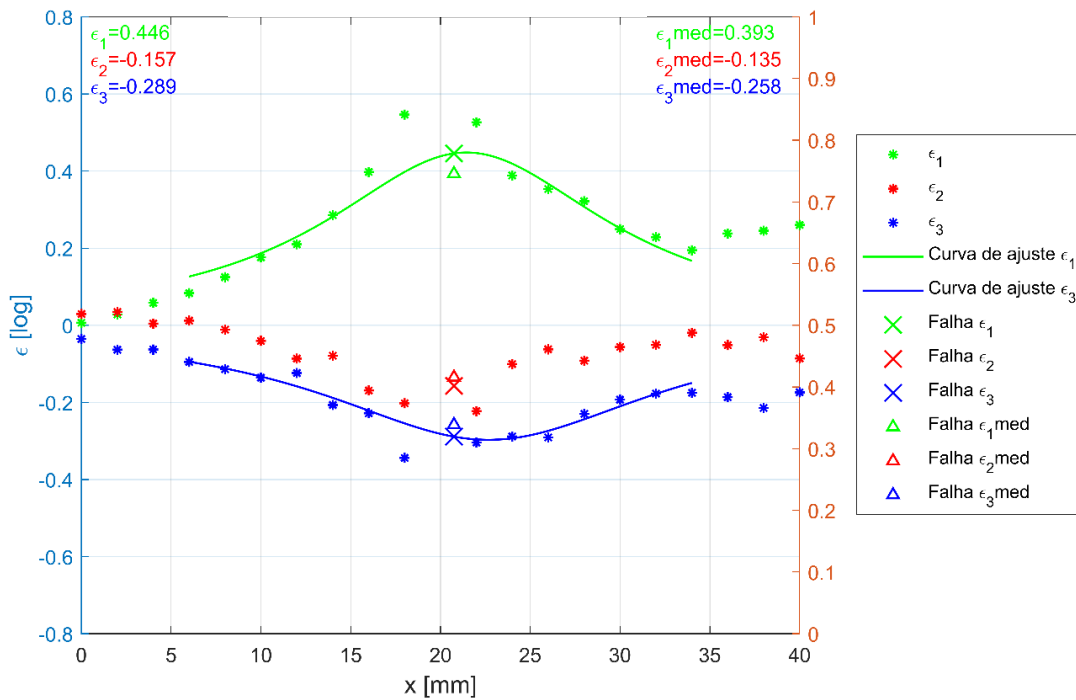


Figura 89 – Parábola inversa corrigida.

Inicialmente, a curva estava deslocada mais para a direita, com o intervalo das janelas definidos entre 2 a 12mm para o lado direito e 24 a 34mm para o lado esquerdo. Dessa maneira o valor máximo para ϵ_1 foi igual a 0,38, e para ϵ_2 foi igual a -0,105. Ao verificar os gráficos, nota-se que estes valores não são condizentes com a distribuição de deformações apresentadas. Após a realização de um processo iterativo de ajuste das janelas para a suavização, foram encontrados os valores para janela sendo 6mm a 16mm para o lado esquerdo e 24mm a 34mm para o lado direito, levando o ápice da parábola o mais próximo possível da falha, resultando em valores de ϵ_1 e ϵ_2 iguais a 0,446 e -0,157, respectivamente.

Após os tratamentos pertinentes, foram obtidas as curvas limites de conformação para os aços 1.4510 e 1.4512. Além de apresentar as curvas limites de conformação características, outro aspecto muito importante é a intersecção entre a CLC e o eixo de tensão plana. Este ponto, denominado CLC_0 , é intrinsecamente dependente do valor do coeficiente de encruamento e da espessura da chapa. Dessa maneira Keeler e Brazier [71], [72] descreveram a para obtenção do ponto CLC_0 , apresentada na Equação (35).

$$CLC_0 = \ln \left[1 + \left(\frac{23,3 + 14,13t}{100} \right) \frac{n}{0,21} \right] \quad (35)$$

Onde: t é espessura da chapa [mm]; n é coeficiente de encruamento do material [adimensional].

Além deste ponto, existem diversos modelos para a previsão teórica da CLC, baseados em dois momentos. Primeiramente é determinado o lado do embutimento (lado esquerdo) da curva, através da Equação (36) [73].

$$\varepsilon_1 = CLC_0 - \varepsilon_2 \quad (36)$$

O segundo momento é a obtenção do lado direito da curva. Existem diversos métodos analíticos desenvolvidos para a obtenção do lado direito do diagrama limite de conformação, onde os métodos mais precisos são mais complexos e exigem um conhecimento mais detalhado das propriedades e comportamento dos materiais. Surajit [74] propôs um modelo simples, mas que descreve de maneira interessante o comportamento da CLC para o lado de estiramento do DLC, tal equação é dada através da Equação (37) e da Equação (38). Dessa maneira pôde ser obtida uma representação teórica das CLC's.

$$\varepsilon_1 = (1 + CLC_0)(1 + \varepsilon_2)^p - 1 \quad (37)$$

$$p = 1,0834Exp(-1,4114CLC_0) - 0,361 \quad (38)$$

Primeiramente, na Figura 90, está apresentado o diagrama limite de conformação obtido para o aço 1.4510. Estão apresentados pontos representando os limites de conformação para cada secção. Além dos pontos para cada secção, foram plotados os pontos referentes às deformações máximas em cada amostra para cada geometria, sendo esses pontos calculados a partir da média entre os valores encontrados para as secções daquela mesma amostra. Também estão representadas as retas para os estados de tensão mais importantes no DLC, sendo que há o ajuste da tração uniaxial através da anisotropia, dado através da Equação (39). Este ajuste está relacionado diretamente com os aspectos de influência da anisotropia sobre a deformação dos materiais, como já descrito anteriormente, [37].

$$\varepsilon_2 = - \left[\frac{r}{(r + 1)} \right] \varepsilon_1 \quad (39)$$

Além das retas características, está ilustrada a CLC obtida através de um polinômio de segundo grau.

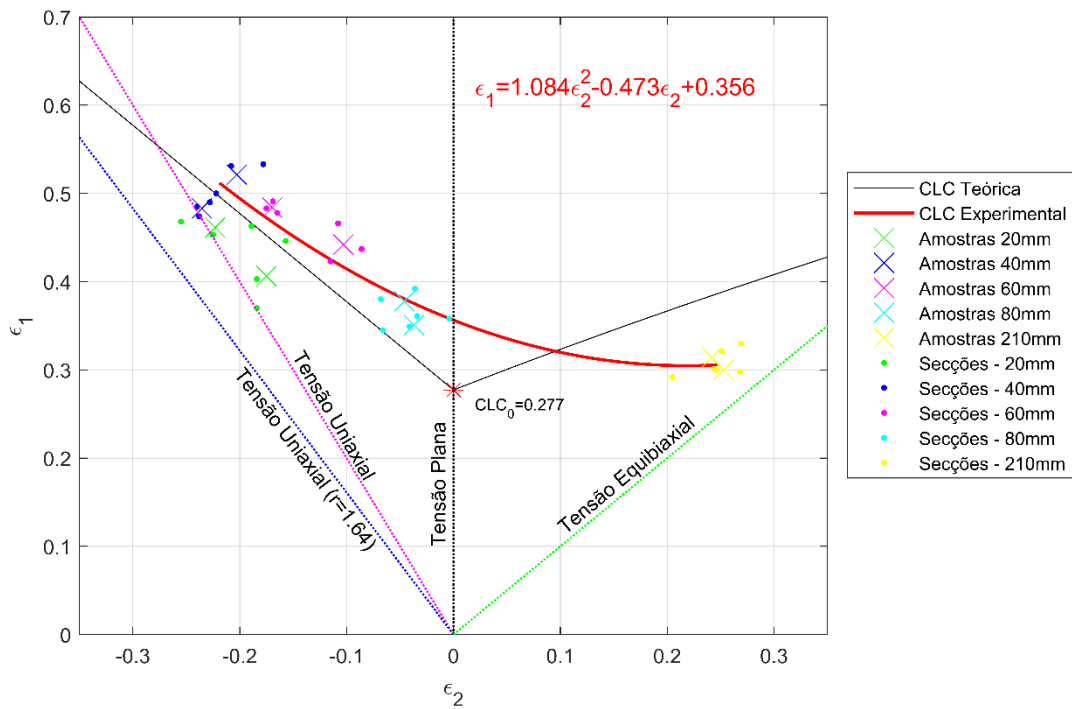


Figura 90 – CLC aço 1.4510.

Comparando com a Figura 22, percebe-se que há coerência nos resultados e no caminho traçado para a CLC do aço 1.4510. É perceptível que sua capacidade de conformação é mais interessante para aplicações para o embutimento, pois seu braço da curva é mais desenvolvido para aquele sentido. Já para o estiramento (deformações biaxiais) não há grande desenvolvimento do braço da curva limite de conformação, o que indica que o material não apresenta grandes resistências para processo que envolvam o estiramento.

Apesar de haver semelhança entre os resultados e a literatura, percebe-se que as deformações para a geometria de 20mm estão abaixo do que seria esperado na distribuição de deformações ao longo da CLC, situação já proposta ao analisar visualmente a deformação das elipses. Percebe-se que houve certa dispersão nos resultados dessa geometria. Nota-se que houve, provavelmente, uma fratura prematura para os testes com essas geometrias. A possível justificativa para essa fratura prematura é apresentada na lubrificação, pois, como já mencionado anteriormente, pouca lubrificação resulta em maior atrito, que causa grande influência no desenvolvimento das deformações ao longo dos ensaios, resultando em baixas deformações. Por esses motivos, a geometria de 20mm não foi considerada para o cálculo do polinômio que deu origem à CLC. Contudo, é perceptível que esse ponto se aproximou bastante da reta de tração uniaxial, que como já mencionado anteriormente, é uma das principais aplicações dos processos de conformação, o embutimento.

A segunda análise é realizada sobre o aço 1.4512, onde a CLC experimental encontrada para este material está apresentada na Figura 91.

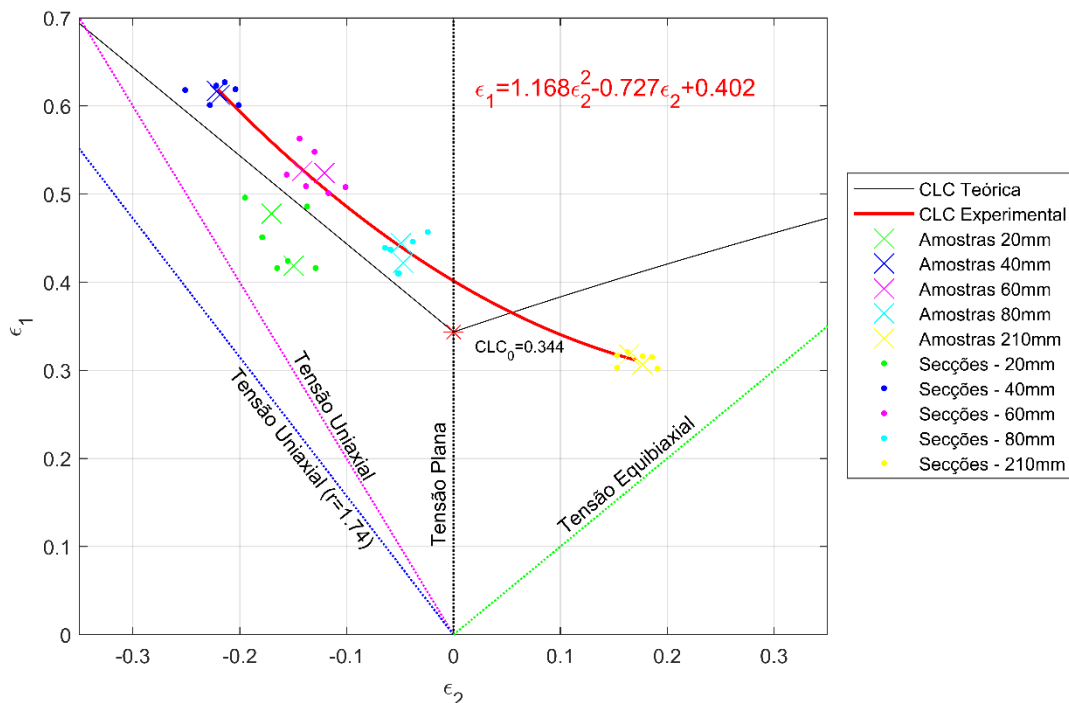


Figura 91 – CLC aço 1.4512.

Uma situação importante de se mencionar é a apresentação da reta uniaxial ajustada pela anisotropia, para ambos os materiais. Para os dois casos, a anisotropia é maior que 1, deste modo, houve um aumento da inclinação da reta para o sentido negativo de ϵ_2 . Efetuando uma análise sobre o significado de tal inclinação, pode-se concluir que há uma redução da tendência de redução de espessura do material, pois tal reta sinaliza a fronteira para o risco de redução de espessura do material, quando submetido a deformações daquela magnitude.

Realizando uma comparação entre as CLC's obtidas para ambos os materiais, observa-se que, em média, o aço 1.4512 apresenta maior conformabilidade que o aço 1.4510, pois sua curva se desenvolve ao longo de valores mais altos de ϵ_1 , comportamento justificado pelo alto valor do coeficiente de encruamento. Realizando a comparação independente para cada lado das CLC's, percebe-se que o aço 1.4512 apresenta maior conformabilidade para o embutimento (lado esquerdo da curva). Para o estiramento (lado direito) apresenta menor conformabilidade que o aço 1.4510, apesar de que o comportamento para ambos os materiais é muito semelhante nessa região.

Capítulo 4: Simulação Numérica

4.1 METODOLOGIA

Para a realização da simulação numérica foi desenvolvido o ensaio de Nakajima, utilizando o *software* Ansys® versão 2021.R2. Inicialmente, foi reproduzido o modelo CAD dos componentes do ensaio de Nakajima, sendo eles a matriz inferior, o prensa chapas e o punção. Nessa modelagem foram aplicadas simplificações quando comparados com os componentes reais, tal como retirada de furos e cunhas do prensa chapas, pois estes não têm influência nos resultados de interesse. A construção do modelo se deu a partir do *software* Solidworks® versão 2021.

Após a modelagem dos componentes do ensaio, a montagem CAD foi exportada em formato IGES, o qual foi inserido posteriormente no *software* Ansys®, para que fosse realizado o desenho do corpo de prova para as simulações, onde este foi parametrizado em função da largura do eixo e da espessura também, reproduzindo as dimensões geométricas dos materiais utilizados nos ensaios experimentais. Dentro desta modelagem final, foram geradas as superfícies da matriz, prensa chapas e punção que poderiam entrar em contato com o corpo de prova, pois estes são considerados como corpos rígidos nesta análise, simplificando a complexidade das simulações. O modelo final gerado encontra-se no Anexo VII.

Após a modelagem geométrica, foram inseridas as propriedades de cada material obtidas na direção de 90°, nomeadamente aço 1.4510 e aço 1.4512, no Ansys®. Para região elástica foi utilizado o módulo de elasticidade E encontrado através dos ensaios de tração, além do coeficiente de Poisson ν , considerado 0,3. Para a região plástica foi utilizado o modelo MISO, *Multilinear Isotropic Hardening*, o qual representa o encruamento do material através de inúmeras retas que são obtidas através da inserção da curva tensão x deformação plástica verdadeira de cada material, ou seja, curva tensão x deformação verdadeira subtraído a deformação elástica.

Como critério de falha, foi utilizado o critério de Hill 48, onde os dados de entrada no Ansys são os coeficientes R_{xx} , R_{yy} , R_{zz} , R_{xy} , R_{xz} e R_{yz} , que são equivalentes a R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} , R_{13} e R_{23} podem ser encontrados através das Equações (24) a (27), através dos coeficientes de anisotropia de cada material, resultando nos valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades dos materiais para a simulação.

Material	E (GPa)	R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
1.4510	195,58	1	1,0713	1,1260	1,1222	1	1
1.4512	186,05	1	1,0373	1,1554	0,9884	1	1

Com as propriedades definidas, foi a vez de inserir as configurações da simulação sendo primeiramente a consideração dos elementos como a matriz inferior, prensa chapas e punção como corpos rígidos e de superfícies, com o corpo de prova como elemento elástico. Após este procedimento foi realizada a definição das malhas que deveriam ser aplicadas em cada componente.

Para os componentes rígidos, que são a matriz, prensa chapas e punção, adotou-se o tamanho máximo de elemento de 5 mm. Onde o refinamento da malha foi executado e, caso necessário, foram realizadas correções. No caso do corpo de prova, utilizando a geometria com eixo de 20mm, aço 1.4510, o tamanho máximo da malha foi estabelecido através de 3 simulações, onde os resultados encontrados estão apresentados em termos da força máxima, tensão máxima principal (σ_{max}), deformação equivalente total ($\epsilon_{eq\ total}$), deformações plásticas maior (ϵ_1) e menor (ϵ_2), e tempo total de simulação, como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados para cada tamanho de malha.

Malha(mm)	F_{max} (KN)	σ_{max} (MPa)	$\epsilon_{eq\ total}$	ϵ_1	ϵ_2	Tempo
1	8,04	641	0,211	0.127	-0.089	8h17min
2	8,79	633	0,207	0.138	-0.081	3h46min
3	8,57	625	0,207	0.149	-0.109	00h45min

Ressaltando que para este teste, foi considerado coeficiente de atrito (μ) nulo entre o punção e o corpo de prova, e atrito igual a 0,3 entre o corpo de prova e os demais componentes. Efetuando a análise percebe-se que houve diferença de aproximadamente 5% entre os resultados de cada simulação, com ressaltos sobre o tempo total, que aumentou significativamente com a redução do tamanho da malha. Após a análise dos resultados anteriores, visando obter um mapeamento interessante e buscando um tempo não muito longo de simulação, foi utilizada a malha de 2mm.

Em seguida são definidos os contatos entre os elementos podem se tocar ao longo do

ensaio. Para isso foram definidos 3 pares de contatos, sendo eles: corpo de prova – matriz inferior, corpo de prova – prensa chapas e corpo de prova – punção. Sendo que entre o corpo de prova e a matriz inferior e entre o corpo de prova e o prensa chapas, o atrito foi considerado com 0,3, como proposto por Situ [75]. Já o atrito entre o punção e o corpo de prova foi estudado em 4 situações diferentes, sendo elas: atrito nulo, 0,05, 0,010 e 0,015. Tais situações envolveram contato ideal (sem atrito), contato bem lubrificado com utilização de teflon e óleo, as duas últimas envolvem contatos com lubrificantes em geral. Os valores de atrito estão de acordo com as propostas estudadas por Situ [75]. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 13, assim como as imagens das simulações no Anexo VIII.

Tabela 13 – Resultados para cada valor de atrito.

μ	F_{\max} (KN)	σ_{\max} (MPa)	$\epsilon_{eq\ total}$	ϵ_1	ϵ_2
0	8,79	633	0,207	0.138	-0.081
0,05	8,56	638	0.347	0.208	-0.122
0,10	8,33	646	0.368	0.221	-0.125
0,15	8,23	651	0.371	0.222	-0.123

Observou-se que com o aumento do atrito, houve a ocorrência do aumento da concentração de tensões em regiões mais distantes do centro do corpo de prova, assim como apresentado por Zhang [19]. Verificando os resultados foi observada uma situação que não era esperada, pois com o aumento do coeficiente de atrito, houve o aumento da deformação máxima observada, o que está em desacordo com as propostas da literatura, [19], [20]. Tal situação deve ser estudada com mais detalhes em próximas pesquisas. Visando equiparar a simulação a situação dos ensaios experimentais, para as simulações numéricas seguintes, foi selecionado o coeficiente de atrito igual 0,15, considerando que os problemas de ruptura que ocorreram foram devido ao atrito.

As condições de contorno, foram definidas com a matriz inferior fixa, o prensa chapas que se desloca 3mm para fixar o corpo de prova sobre a matriz inferior e por último o punção se desloca com velocidade constante de 1mm/s, ao longo de 66mm. O deslocamento total é superior a todas os deslocamentos máximos obtidos nos ensaios experimentais, garantindo assim, o rompimento do corpo de prova. Para a análise dos resultados, a força máxima foi considerada como critério de ruptura.

Após a realização das simulações, os resultados foram analisados seguindo a norma ISO 12004 [37]. Para isso foram inseridas 3 secções, onde foram verificados os resultados de deformação maior e menor. Os procedimentos seguintes foram os mesmos que foram aplicados para os resultados experimentais.

4.2 RESULTADOS

Após a realização da simulação numérica, os resultados foram avaliados com o objetivo de construir as curvas limites de conformação para os materiais dos ensaios. Como mencionado anteriormente, foi realizada a avaliação da questão do atrito em amostras de com eixo de 20mm largura. Para a avaliação dos resultados foi realizada uma segunda consideração do atrito, desta vez, utilizando a amostra com 60mm de largura de eixo e coeficientes de atrito igual a 0 e 0,15, pois esta é uma amostra que esteve em uma região intermediária de deformação, em relação as demais no ensaio experimental. A Figura 92 ilustra os resultados obtidos para a tensão principal máxima, imagens à esquerda, além das deformações maiores sobre o corpo de prova, imagens à direita.

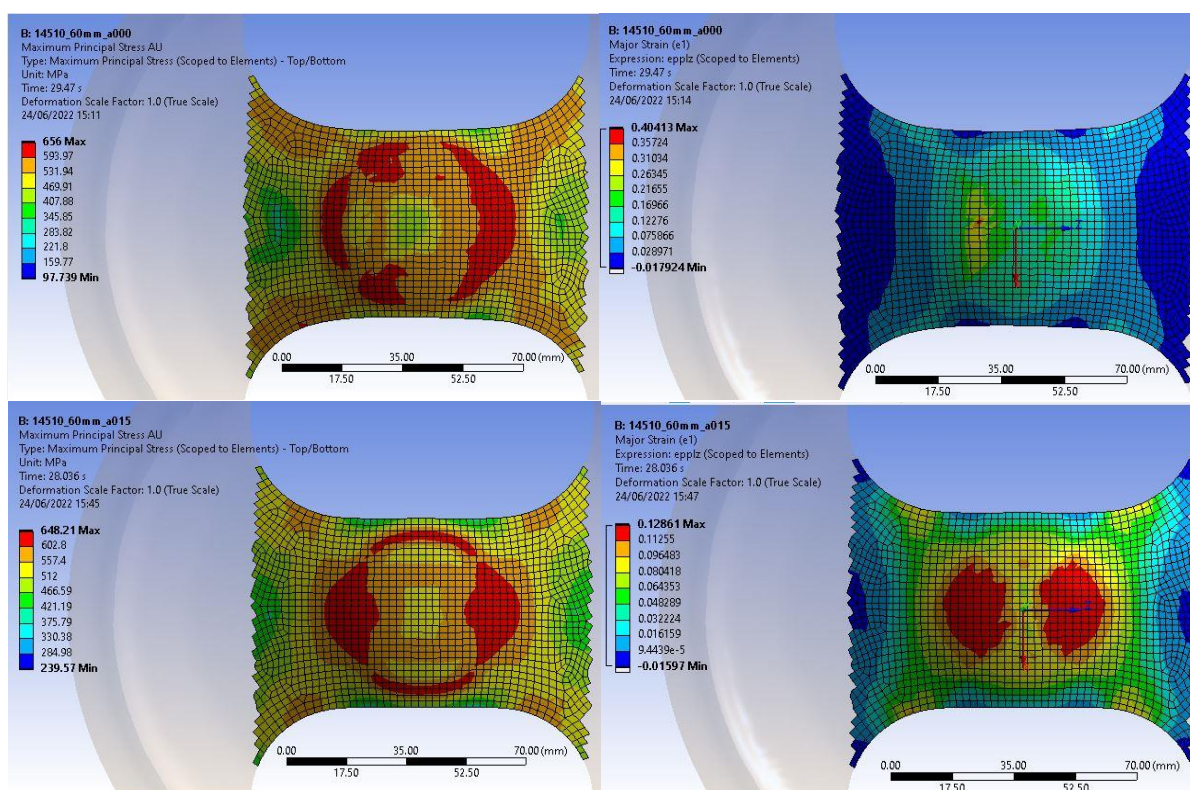


Figura 92 – Tensões e deformações principais – amostra de 60mm.

Verificando os valores de deformações e tensões máximas, observa-se que, desta vez, houve um aumento da concentração de deformações maiores nas regiões afastadas do centro do corpo de prova, apresentando uma condição de simetria para a falha, o que é mencionado na norma ISO 12004 [37] e em outros trabalhos, tal como Zhang [19] e Manikandan [20] como resultado de lubrificação insuficiente.

Um segundo momento importante é a avaliação do comportamento da força máxima na ruptura do corpo de prova em relação ao deslocamento do punção. A Figura 93 ilustra os

resultados para o aço 1.4510, e a Figura 94 ilustra os resultados encontrados para o aço 1.4512.

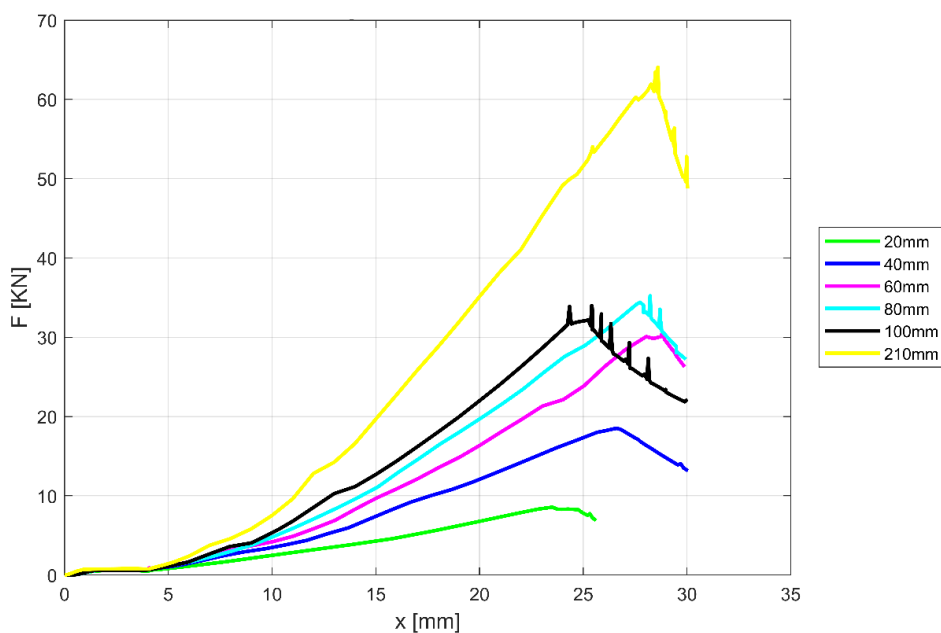


Figura 93 – Força x deslocamento 1.4510 1,2mm – Simulação.

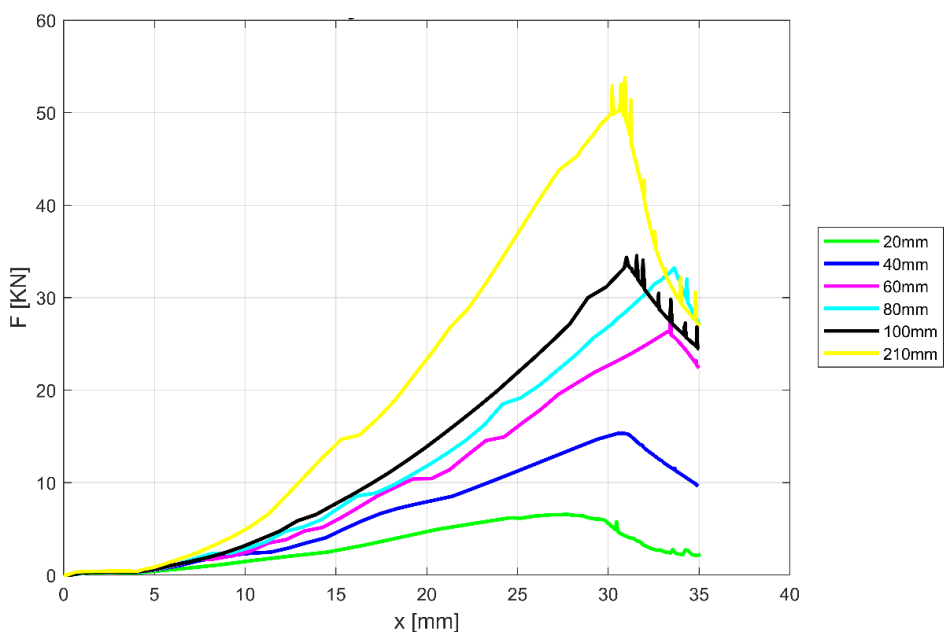


Figura 94 – Força x deslocamento 1.4512 1,0mm – Simulação.

Ao verificar os gráficos é possível notar que a amostra biaxial do aço 1.4510, apresenta os maiores valores de deslocamento e força máxima no instante de ruptura, assim como verificado para os ensaios experimentais. O que se repetiu também, foi a questão da amostra de 20mm que para o instante de ruptura, apresentou os menores valores para deslocamento e força.

Um ponto interessante que se repetiu também é em relação ao instante de ruptura das amostras de 100mm, que é, apesar de próximo, inferior às demais amostras, situação semelhante

aos ensaios experimentais, onde não foi possível realizar a medição das deformações. Outra observação interessante é a questão da comparação entre os resultados apresentados para as amostras de aço 1.4510 contra o aço 1.4512, percebe-se que o aço 1.4510 apresenta maiores valores de força, com deslocamento máximo muito semelhante às amostras do aço 1.4512, com a ressalve que as diferenças entre os valores são menores do que as obtidas nos ensaios experimentais.

Seguindo para as CLC's, o Anexo IX apresenta as deformações máximas que foram encontradas para cada secção, dando origem a curva para o aço 1.4510, Figura 95, e para aço 1.4512, Figura 96.

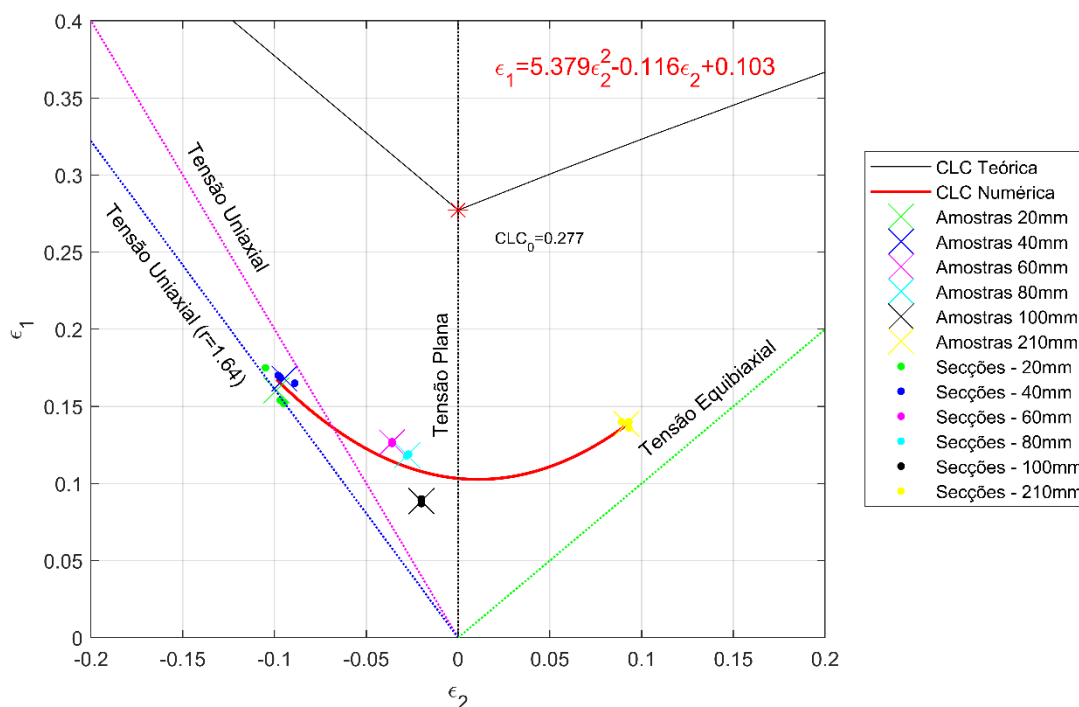


Figura 95 – CLC numérica aço 1.4510.

Analisando os resultados encontrados para o aço 1.4510, percebe-se que tanto a geometria de 20mm quanto a de 40mm, se aproximaram muito da reta de estado uniaxial de tensões, considerando a anisotropia do material. Tal comportamento indica ótima capacidade para operações de embutimento do material, mas com baixos valores de deformação. É observado que a curva simulada se apresentou muito distante da curva teórica, indicando um comportamento de com menor resistência para quaisquer operações de conformação. Outra maneira de se analisar a curva obtida é que este comportamento representa uma abordagem mais conservadora para as operações de conformação do material nas situações propostas.

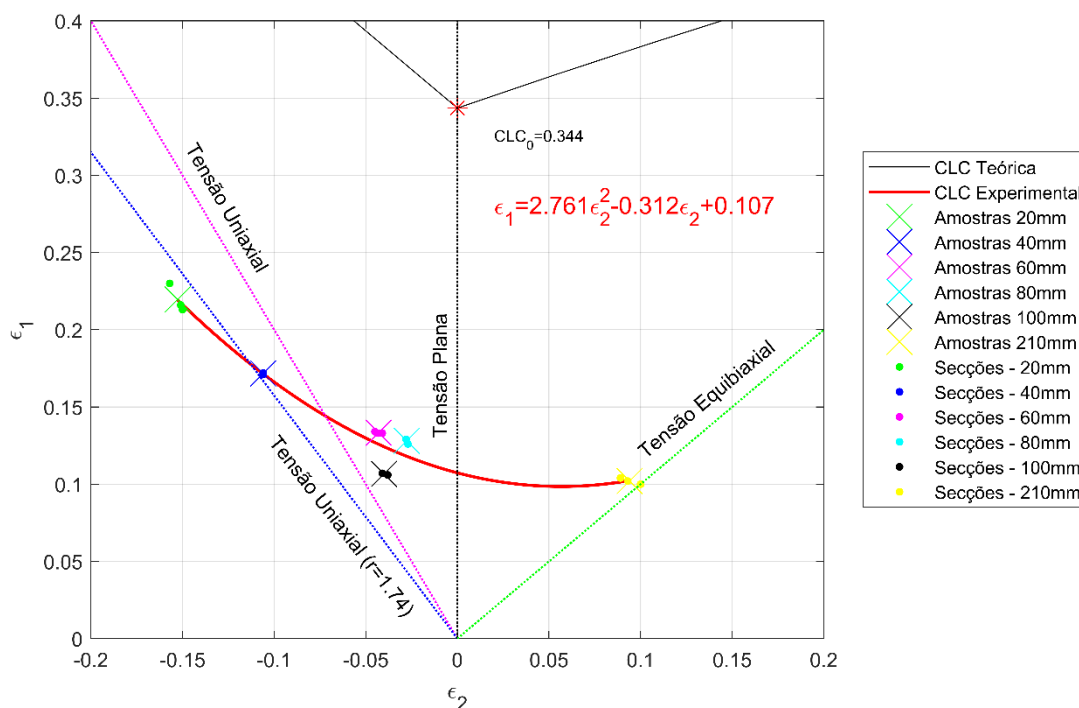


Figura 96 – CLC numérica aço 1.4512.

De maneira semelhante ao aço 1.4510, a CLC da simulação para o aço 1.4512 apresentou-se inferior a curva teórica. Diferente do material anterior, as amostras de 20mm e 40mm do aço 1.4512, apresentaram comportamento de deformações mais distantes uma da outra, sendo que a primeira ultrapassou a reta de tração uniaxial, o que um início da ocorrência de enrugamento da chapa, ainda assim há boa capacidade de conformação para operações que envolvem embutimento, sendo esta superior ao aço 1.4510. Entretanto, para operações que envolvem o estiramento (tensões biaxiais), o material não apresenta bom comportamento, situando-se em capacidades de conformação inferiores ao aço 1.4510.

4.3 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

Quando se compara a relação entre as forças máximas obtidas para os ensaios experimentais e para as simulações, é perceptível uma grande diferença, como pode ser visualizado na Figura 79 e Figura 80, para os resultados experimentais e para as simulações na Figura 93 e Figura 94.

Assim como a questão das forças máximas, as curvas limites de conformação apresentaram grande diferença entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas.

Verificando as CLC's apresentadas anteriormente e realizando a sobreposição delas, obtêm-se a Figura 97.

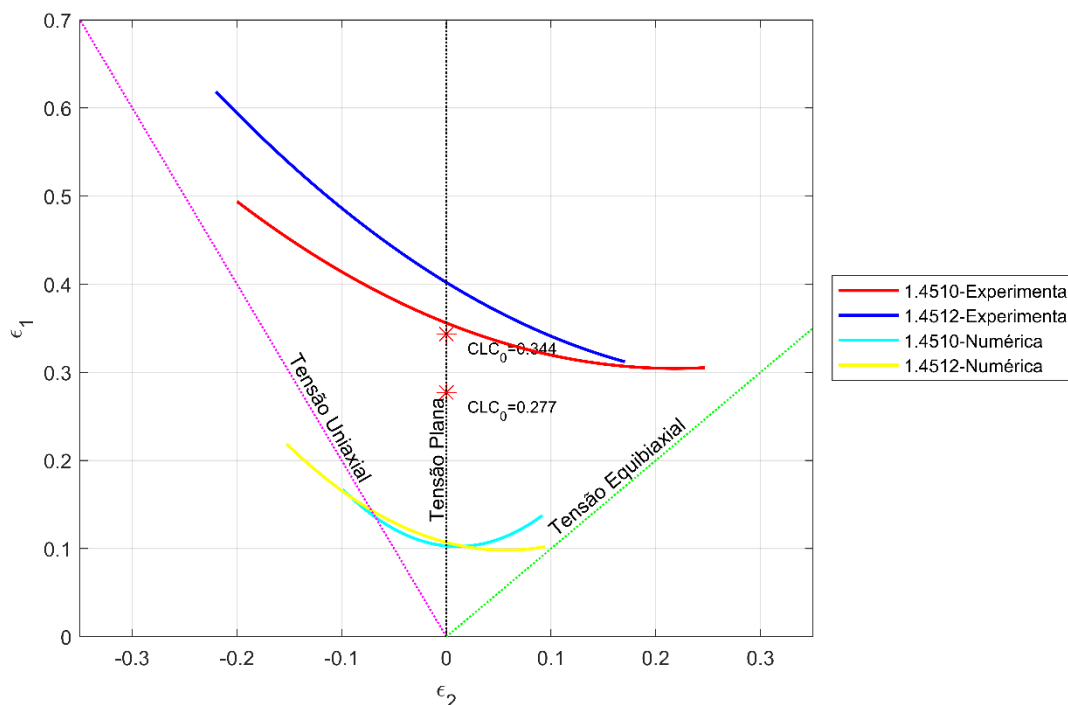


Figura 97 – CLC experimental X CLC numérica ($\mu=0,15$).

Analisando o diagrama limite de conformação com todos os materiais e ensaios, percebe-se que realmente há grande diferença entre os resultados encontrados experimentalmente contra as simulações. Tal diferença é inesperada, pois as propriedades inseridas para simulação estão de acordo com as encontradas em ensaios de tração, além de ser próximas de valores propostos por fabricantes de chapas. Este comportamento deve ser estudado com mais atenção, seja relacionado as propriedades inseridas para a simulação, seja relacionado a questão de modelagem de coeficiente de atrito, malha, entre outros parâmetros de extrema importância na simulação.

Sobre os resultados, segundo os ensaios experimentais, os dois materiais apresentaram boa capacidade de embutimento, resultado apresentado por Velho [22] para aços ferríticos, sendo que o aço 1.4512 apresentou melhor comportamento. Já para os ensaios simulados, o aço 1.4510 é o que apresenta valores mais interessantes para processos que envolvem estiramento.

Verifica-se que o modo em que uma chapa se comporta em um processo de conformação depende de uma ou mais propriedades e parâmetros gerais. Qual deles é o importante depende do processo em particular e conhecendo as limitações dos materiais e solicitações do processo, é possível prever as os parâmetros serão importantes, [32].

Para a questão da influências dos parâmetros envolvidos na estampagem de chapas de aço, percebe-se que, através da análise dos resultados encontrados, com o aumento do coeficiente de encruamento há um aumento da capacidade de conformação do material, dado pela relação determinada para a curva limite de conformação teórica dos materiais.

Como verificado após os ensaios de tração, era esperado que o material que apresentasse maior valor de anisotropia normal, os ensaios experimentais de Nakajima comprovaram esta situação, pois a razão de anisotropia normal maior que 1 indica que deformação de largura é maior que a deformação de espessura. Tal comportamento representa que os materiais apresentam boa resistência na a redução de espessura. Um valor mais alto de r também reduz a probabilidade de enrugamento ou ondulações na peça, pois a reta de tração uniaxial é inclinada mais para o sentido negativo das deformações menores, [72].

A falta de lubrificante tem grande influência sobre o comportamento das CLC, como mencionado por Manikandan [20] e Bastos [12]. Tal situação pode ser verificada nas simulações numéricas, onde houve maior contração de deformações e falhas fora do topo do punção na chapa [19]. Segundo Keeler [29], uma lubrificação adequada faz com valores da deformação menor, ϵ_2 , que a deformação se torne mais homogênea, reduzindo a amplitude entre as maiores e menores deformações e suavizando o crescimento dos picos de deformação.

Por último, avaliando a questão da espessura, assim como para o coeficiente de encruamento, é esperado que um aumento da espessura resulte em maiores limites de conformação, devido à maior disponibilidade do material em resistir a deformações, dificultando o surgimento da estrição e posterior ruptura da peça. Tal situação não pode ser descrita com clareza para os ensaios de Nakajima realizados para ambos os materiais, pois foi realizada a simulação para uma espessura de cada material.

Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 CONCLUSÕES

Os processos de conformação, mais especificamente, a estampagem de chapas metálicas, é utilizada em inúmeras indústrias onde são necessários a produção em larga escala aliada à qualidade dos produtos finais. A correta definição do processo de estampagem requer o ajuste de um conjunto de parâmetros, como foi descrito ao longo deste trabalho. Esses parâmetros envolvem principalmente as características e propriedades dos materiais. Com isso foram obtidas propriedades mecânicas para dois aços inoxidáveis ferríticos. Sendo eles o aço 1.4510 e o aço 1.4512.

Para a obtenção das propriedades foram utilizados o ensaio de tração, onde foram caracterizados a tensão de escoamento, módulo de elasticidade, tensão máxima, alongamentos total e uniforme, além do coeficiente de encruamento dos materiais. Também foi utilizada a técnica de correlação digital de imagem, onde foi desenvolvido o setup experimental para aquisição e tratamento de imagens, através da qual foi possível efetuar a análise dos coeficientes de anisotropia de cada material. Foi observado que o aço 1.4509 apresentou os maiores valores para a tensão de escoamento e tensão máxima, onde o aço 1.4512 apresentou os menores valores dessas propriedades. Foi observada certa tendência em relação à anisotropia, onde há um aumento da anisotropia com o aumento da direção em relação à laminação, seguido da redução dos valores de anisotropia com o aumento da espessura do material.

Após os ensaios de tração, foi realizado o ensaio de Nakajima, para obtenção das curvas limites de conformação dos aços 1.4510 e 1.4512. Para a medição das deformações também foi utilizada a correlação digital de imagem, onde os valores obtidos são interessantes para processos que envolvem operações de embutimento, como já previsto na literatura.

Finalizando as análises, foram realizadas simulações numéricas para comparação dos resultados obtidos experimentalmente no ensaio de Nakajima contra os valores encontrados nos

ensaios de tração, para validar os comportamentos e influência dos parâmetros de estampagem avaliados ao longo do trabalho. De maneira geral, as curvas limites de conformação experimentais e simuladas apresentaram grande diferença entre elas, não sendo possível definir o exato motivo desta diferença. A expectativa em relação aos resultados experimentais e simulados não foi atendida, entretanto, foi possível avaliar e comparar a influência da mudança de material, envolvendo coeficiente de encruamento, anisotropia e demais propriedades, sobre resultados para um processo de estampagem.

As contribuições deste estudo estão muito ligadas à importância do conhecimento de propriedades mecânicas e capacidade de conformação de metais, principalmente os aços inoxidáveis. Percebe-se que é possível prever o comportamento de um material em relação a um processo de estampagem, desde que sejam utilizadas as ferramentas de maneira correta.

Concluindo a citação dos materiais deste estudo, foi observado que o aço 1.4512 com espessura de 1mm apresentou o melhor comportamento para estampagem, muito relacionado com as propriedades de anisotropia e encruamento, obtidas no ensaio de tração.

Em relação às limitações, a região de estiramento das curvas limites de conformação precisa de melhor definição, pois foi obtido comportamento apenas para uma amostra nessa região. Também, houve a questão da influência do atrito, tanto para resultados experimentais quanto para a simulação numérica, o qual é um causador da redução da capacidade de conformação dos materiais. Dessa maneira, pode ser realizado um desenvolvimento e estudo mais detalhado sobre a influência de fatores como esse, sobre a estampagem de chapas.

Sintetizando todos o desenvolvimento deste trabalho, os objetivos principais foram cumpridos, com ressalvas em relação a fatores que não foi possível obter o controle, que podem ter influência sobre os resultados finais.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão deste estudo se abrem possibilidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros que podem contribuir para a melhoria e maior conhecimento dos resultados de peças produzidas através de processos de estampagem e conformação.

O primeiro ponto que pode ser citado é a avaliação mais detalhada da influência do atrito sobre os processos de estampagem, além da sua correta mensuração e aplicação em simulações numéricas.

O segundo ponto é o desenvolvimento complementar da região de estiramento dos aços objetos deste estudo. Através da utilização de um maior número de geometrias para o ensaio de Nakajima, buscar discretizar este trecho tão importante das curvas limites de conformação.

Podem ser desenvolvidos trabalhos aplicando as simulações numéricas sobre processos de fabricação de peças através de processos de estampagem, através das CLC's propostas por este trabalho.

Uma grande oportunidade se dá para o desenvolvimento da medição de deformações em 3D, em tempo real, visando realizar a comparação entre os resultados obtidos através da medição de deformações após a fratura dos corpos de prova.

Referências

- [1] C. de P. C. Pisano, “Caracterização e comparação dos procedimentos de obtenção da curva limite de conformação e das características de estampagem dos aços inoxidáveis DIN 1.4509 e AISI 321,” Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2017.
- [2] M. Kleiner, M. Geiger, and A. Klaus, “Manufacturing of lightweight components by metal forming,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 521–542, 2003, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60202-9.
- [3] V. H. M. da Silveira and L. Schaeffer, “Estampagem De Chapas De Alta Resistência Para Uso Automotivo – Uma Revisão,” *Sider. Bras.*, vol. 71, 2011.
- [4] L. Faivre, P.-O. Santacreu, and A. Acher, “A new ferritic stainless steel with improved thermo-mechanical fatigue resistance for exhaust parts,” *Mater. High Temp.*, vol. 30, no. 1, pp. 36–42, Mar. 2013, doi: 10.3184/096034013X13637176323444.
- [5] W. F. Hosford and J. L. Duncan, “Sheet Metal Forming: A Review,” *Jom*, vol. 51, no. 11, pp. 39–44, 1999, doi: 10.1007/s11837-999-0221-5.
- [6] W. Chen, H. Song, L. Lazarescu, Y. Xu, S.-H. Zhang, and D. Banabic, “Formability analysis of hot-rolled dual-phase steel during the multistage stamping process of wheel disc,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 110, no. 5–6, pp. 1563–1573, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05963-x.
- [7] M. Nurcheshmeh and D. E. Green, “On the use of effective limit strains to evaluate the forming severity of sheet metal parts after nonlinear loading,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–18, Mar. 2014, doi: 10.1007/s12289-012-1104-9.
- [8] P. Balon and A. Swiatoniowski, “Springback compensation in cold forming process for high strength steel,” *Arch. Metall. Mater.*, vol. 60, no. 4, pp. 2471–2478, 2015, doi: 10.1515/amm-2015-0401.
- [9] M. A. F. De Carvalho, “Eliminação das orelhas de estampagem na produção de componentes axissimétricos,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2020.
- [10] L. Schaeffer, *Conformação Mecânica*, 2ª. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [11] C. W. Hsu, A. G. Ulsoy, and M. Y. Demeri, “Development of process control in sheet

- [12] A. L. Bastos, “Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2009.
- [13] L. C. Dos Reis, “Estudo dos parâmetros de influência na simulação numérica de estampagem de chapas,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2002.
- [14] L. SCHAEFFER, “Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de estampagem,” *Corte e Conformação, Porto Alegre*. 2006.
- [15] W. G. Cha, T. Hammer, F. Gutknecht, R. Golle, A. E. Tekkaya, and W. Volk, “Adaptive wear model for shear-cutting simulation with open cutting line,” *Wear*, vol. 386–387, no. May, pp. 17–28, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.05.019.
- [16] K. Ersoy-Nürnberg, G. Nürnberg, M. Golle, and H. Hoffmann, “Simulation of wear on sheet metal forming tools-An energy approach,” *Wear*, vol. 265, no. 11–12, pp. 1801–1807, 2008, doi: 10.1016/j.wear.2008.04.039.
- [17] E. Bresciani Filho, I. B. Da Silva, G. F. Batalha, and S. T. Button, *Conformação Plástica dos Metais*, 1^a ed. São Paulo, 2011.
- [18] R. Lazzarotto, “Determinação Experimental e Numérica da Curva Limite de Conformação via Ensaio de Nakajima,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, Brasil, 2017.
- [19] L. Zhang, J. Min, J. E. Carsley, T. B. Stoughton, and J. Lin, “Experimental and theoretical investigation on the role of friction in Nakazima testing,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 133, no. August, pp. 217–226, 2017, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.08.020.
- [20] G. Manikandan, R. K. Verma, and P. Biswas, “Effect of friction in stretch forming and its influence on the forming limit curve,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, no. 6, pp. 973–981, 2015, doi: 10.1177/0954405414534434.
- [21] P. S. Hiremath, S. Kurse, H. V. Laxminarayana, M. Vasantha, and J. L. Ravindra, “Finite Element Modeling for Numerical Simulation of Multi Step Forming of Wheel Disc and Control of Excessive Thinning,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 9, pp. 73–82, 2014.
- [22] T. de A. Velho, “Estampabilidade de aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, Brasil, 2020.
- [23] B. ŞANAY, “Prediction of plastic instability and forming limits in sheet metal forming,” Dissertação de Mestrado, Middle East Technical University, Amã, Jordânia, 2010.
- [24] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Callister’s materials science and engineering*,

- [25] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [26] W. F. Hosford, *Mechanical behavior of materials*. New York: Cambridge university press, 2010.
- [27] International Standard Organization, *ISO 10113 - Metallic materials — Sheet and strip — Determination of plastic strain ratio Matériaux*. 2020, p. 24.
- [28] L. Xu, F. Barlat, D. C. Ahn, and J. D. Bressan, “Forming limit and fracture mechanism of ferritic stainless steel sheets,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 7–8, pp. 3113–3121, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.01.011.
- [29] S. P. Keeler, “Plastic instability and fracture in sheets,” *ASM Trans*, vol. 56, pp. 25–48, 1961.
- [30] G. M. Goodwin, “Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop,” *SAE Trans.*, vol. 77, no. 1, pp. 380–387, 1968.
- [31] H. J. Bong, F. Barlat, M. G. Lee, and D. C. Ahn, “The forming limit diagram of ferritic stainless steel sheets: Experiments and modeling,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.08.009.
- [32] Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Londres: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [33] G. Huang, S. Sadagopan, and H. Schreier, “Determination of Forming Limit and Fracture Limit Curves Using Digital Image Correlation,” *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 7, no. 3, pp. 574–582, Apr. 2014, doi: 10.4271/2014-01-0982.
- [34] E. Billur, “Digital Image Correlation for Creating FLCs,” *Metal Forming Magazine*, p. 1, 2020.
- [35] G. Chinouilh, F. Toscan, P. O. Santacreu, and J. Leseux, “Forming Limit Diagram Prediction of Stainless Steels Sheets,” in *SAE World Congress & Exhibition*, Apr. 2007, vol. 01, no. 338, doi: 10.4271/2007-01-0338.
- [36] ASTM, “ASTM E2218 - Standard test method for determining forming limit curves.” 2002.
- [37] International Standard Organization, *ISO 12004-2 - Metallic materials — Sheet and strip — Determination of forming-limit curves — Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory*. Switzerland, 2008, p. 34.
- [38] GOM Metrology, “Determination of Forming Limit Curves in ARAMIS,” 2017. https://www.youtube.com/watch?v=U4zjAXVwgSo&t=424s&ab_channel=GOMMetrology (accessed Sep. 13, 2021).
- [39] F. Ozturk, M. Dilmeç, M. Turkoz, R. E. Ece, and H. S. Halkacı, “Grid Marking and

- Simulação numérica e avaliação experimental dos parâmetros envolvidos na estampagem de chapas de aço*
Measurement Methods for Sheet Metal Formability,” *5th Int. Conf. Exhib. Des. Prod. Mach. Dies/Molds*, no. June, pp. 1–10, 2009.
- [40] D. Schaffler, “Introduction to Strain Analysis: Measuring Strains,” *Metal Forming Magazine*, p. 1, 2019.
- [41] S. D. Kumar, T. R. Amjith, and C. Anjaneyulu, “Forming Limit Diagram Generation of Aluminum Alloy AA2014 Using Nakazima Test Simulation Tool,” *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 386–393, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.053.
- [42] M. Merklein, A. Kuppert, and M. Geiger, “Time dependent determination of forming limit diagrams,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 1, pp. 295–298, 2010, doi: 10.1016/j.cirp.2010.03.001.
- [43] A. Bragard, J. C. Baret, and H. Bonnarens, “A Simplified Technique to Determine the FLD on the Onset of Necking,” *C.R.M.*, vol. 33, pp. 53–63, 1972.
- [44] C. Jaremenko, E. Affronti, A. Maier, and M. Merklein, “Analysis of Forming Limits in Sheet Metal Forming with Pattern Recognition Methods. Part 2: Unsupervised Methodology and Application,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 10, p. 1892, Oct. 2018, doi: 10.3390/ma11101892.
- [45] K.-H. Chang, “Sheet Metal Forming Simulation,” in *Product Manufacturing and Cost Estimating Using Cad/Cae*, K.-H. Chang, Ed. Elsevier, 2013, pp. 133–190.
- [46] A. A. Filho, *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE: Análise Não linear*. 2012.
- [47] G. Ma and B. Huang, “Optimization of process parameters of stamping forming of the automotive lower floor board,” *J. Appl. Math.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/470320.
- [48] J. H. Wiebenga, M. Weiss, B. Rolfe, and A. H. Van Den Boogaard, “Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 6, pp. 978–986, 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.01.006.
- [49] T. Trzepieciniski and H. G. Lemu, “Study of material anisotropy in metal forming using finite element methods,” *Anisotropy Res. New Dev.*, no. November 2012, pp. 1–24, 2012.
- [50] M. C. Oliveira, “Algoritmos e Estratégias de Gestão do Problema de Contacto com Atrito em Grandes Deformações Aplicação à Estampagem de Chapas Metálicas,” Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2005.
- [51] N. McCormick and J. Lord, “Digital image correlation,” *Mater. Today*, vol. 13, no. 12, pp. 52–54, 2010, doi: 10.1016/S1369-7021(10)70235-2.
- [52] S. Yoneyama, “Digital Image Correlation,” *Exp. Mech.*, vol. 207, 2009.
- [53] D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese, and H. M. Herr, “MultiDIC: An Open-Source Toolbox for Multi-View 3D Digital Image Correlation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30520–30535, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843725.

- [54] S. C. A. Beleza, “Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem,” Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2017.
- [55] B. Standard, *EN-10088-1-stainless-steels- List-1995*. 1995.
- [56] Outokumpu, “Stainless Steel Finder - Core 441/4509,” *Outokumpu Site*, 2020. <https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OKGrade=4509&Category=Core> (accessed Jun. 23, 2021).
- [57] Outokumpu, “Stainless Steel Finder - Moda 439/4510,” *Outokumpu Site*, 2020. <https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OKGrade=4510&Category=Moda> (accessed Jun. 23, 2021).
- [58] Outokumpu, “Stainless Steel Finder - Moda 409/4512,” *Outokumpu Site*, 2020. <https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OKGrade=4512&Category=Moda> (accessed Jun. 23, 2021).
- [59] European Standard, *EN 10088-1:2014 - Stainless steels - Part 1: List of stainless steels*. 2014, pp. 1–67.
- [60] Amperam, “Inox é a solução para a Indústria Automotiva.” Amperam, São Paulo, pp. 1–6, 2019.
- [61] E. L. A. Mesquita and L. L. Rugani, “Estampagem dos aços inoxidáveis.” Acesita, São Paulo, 1997.
- [62] Amperam, “O elemento X dos inoxidáveis 441, 439 e 409,” 2019. <https://brasil.aperam.com/blog/o-elemento-x-dos-inoxidaveis-441-439-e-409/> (accessed Jun. 23, 2021).
- [63] P. Juntunen, “Estudo sobre a formabilidade Final do aço 1.4512,” Trabalho de Conclusão de Curso, Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulu, Kemi, 2010.
- [64] International Standard Organization, “ISO 6892-1:2009(E) Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature 1,” *Met. Mater.*, vol. 2009, p. 64, 2009.
- [65] International Standard Organization, “ISO 10275 - Metallic materials — Sheet and strip — Determination of tensile strain hardening exponent.” p. 10, 2007.
- [66] L. de Almeida and C. G. Schön, “Influencia da deformação na obtenção do coeficiente de anisotropia normal r e do coeficiente de anisotropia planar Δr para chapas da liga C22000,” in *Anais do Seminário de Laminação e Conformação*, Sep. 2017, pp. 179–184, doi: 10.5151/1983-4764-27658.
- [67] S. Kodukula, T. Manninen, and D. Porter, “Estimation of lankford coefficients of austenitic and ferritic stainless steels using mean grain orientations from micro-texture measurements,” *ISIJ Int.*, vol. 61, no. 1, pp. 401–407, 2021, doi:

- [68] GKalliatakis, “Webcam Video Recorder GUI,” *GitHub*, 2017. <https://github.com/GKalliatakis/Video-Recording-using-Matlab-GUIDE-> (accessed Mar. 05, 2022).
- [69] E. C. Nunes, “Synchronize Two Cameras in Real Time using Multiprocessing,” 2021. https://github.com/eduardocarnunes/multiprocessing_synchronous_camera (accessed Mar. 05, 2022).
- [70] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, “Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software,” *Exp. Mech.*, vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122, 2015, doi: 10.1007/s11340-015-0009-1.
- [71] S. P. Keeler and W. G. Brazier, “Relationship between Press-Shop, Laboratory Material Characterization and Formability,” *Microalloying*, vol. Vol. 75, pp. 517–530, 1975.
- [72] B. S. Levy and C. J. Van Tyne, “An approach to predicting the forming limit stress components from mechanical properties,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 229, pp. 758–768, 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.027.
- [73] S. K. Paul, “Controlling factors of forming limit curve: A review,” *Adv. Ind. Manuf. Eng.*, vol. 2, no. October 2020, p. 100033, 2021, doi: 10.1016/j.aime.2021.100033.
- [74] S. K. Paul, “Path independent limiting criteria in sheet metal forming,” *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 291–303, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.06.025.
- [75] Q. Situ, “A new approach to obtain forming limits of sheet materials,” Tese de Doutorado, McMaster University, Hamilton, Canadá, 2008.

Anexos

Anexo I – Procedimento para obtenção da curva em formato de sino

Anexo II – Descrição das amostras cedidas pela empresa Catraport

Anexo III – Descrição das propriedades dos materiais cedidos pela empresa Catraport

Anexo IV – Procedimento para realização e avaliação de ensaios de tração

Anexo V – Resultados das medições para os cálculos de Anisotropia

Anexo VI – Procedimento para realização de ensaios de Nakajima

Anexo VII – Simulações numéricas: Superfícies

Anexo VIII – Simulações numéricas: Avaliação da influência do atrito

Anexo IX – Simulações numéricas: Cálculos de deformações

Anexo I – Procedimento para obtenção da curva em formato de sino

Segundo a norma ISO 12004-2, o segundo passo para a extração da curva em formato de sino pode ser dividido em 5 sub etapas, sendo elas:

- a) Seguindo as informações anteriormente apresentadas, a marcação da trinca e a direção das linhas de interseção são definidas na primeira imagem logo após o início da rachadura e então, são transferidas para a imagem capturada imediatamente antes da fissura acontecer. Essa imagem, antes do início da fissura, com linhas de e seções marcadas, é usada para determinar os limites de conformação do corpo de prova. Seguindo para o final da determinação da posição da fissura, deve ser utilizado o método do melhor ajuste para uma parábola ($f(x) = ax^2 + bx + c$). O centro da faixa é dado pelo maior valor de ϵ_1 dos dados da seção. A largura do intervalo é de 8 mm, com ao menos 5 pontos. O máximo da parábola define a posição da fissura;
- b) Então, é calculado o valor da segunda derivada (Anexo A da norma ISO 12004-2) dos dados ϵ_1 sem suavização e sem filtro, separadamente para ambos os lados da fissura (para determinar os limites internos necessários para a regressão da curva subsequente);
- c) Na terceira sub etapa deve-se determinar a posição do mais alto de todos os picos da segunda derivada dentro de um intervalo de 6 mm, contendo pelo menos 4 pontos.
- d) A seguir deve-se repetir o cálculo da segunda derivada para, mas utilizando um intervalo de 5 pontos para o ajuste de curva.
- e) Por último, é verificado, para ambos os lados da posição da trinca, se a posição do máximo correspondente da segunda derivada com um intervalo de 5 pontos (discutida em d) está dentro de ± 1 ponto da posição original de acordo com c).
 - a. Caso sim, o limite interno naquele lado da fissura é definido por c).
 - b. Se não, o limite interno é definido como 3 mm de distância da posição da fissura, sendo que esta posição deve estar a pelo menos 1 ponto de distância da trinca.

O terceiro, e último passo para traçar a curva limite de conformação, consiste em definir os limites externos para as janelas de melhor ajuste e também, avaliação da inversa da parábola de melhor ajuste da “curva em forma de sino”. Este passo é dividido em 3 sub etapas. São elas:

- a) As duas posições marcadas no passo dois são os limites internos de duas janelas de ajuste. A largura da janela w é dada através dos limites externos, devendo conter ao menos 5 pontos, com determinação conforme descrito no anexo B da norma ISO 12004-2. A seguir, fazendo uso das janelas de ajuste, as deformações limite (ϵ_1 e ϵ_2) são determinadas conforme o Anexo C da norma.
- b) Então, para cada "curva em forma de sino", um par $\epsilon_1 - \epsilon_2$ é determinado.
- c) Por último, para cada corpo de prova ensaiado, todos os valores de ϵ_1 e ϵ_2 das diferentes seções transversais são tomados. Isso significa que, para atender a norma, com 3 corpos de prova ensaiados por geometria e 3 seções transversais marcadas, serão encontrados 9 pares de deformação $\epsilon_1 - \epsilon_2$.

A Figura AI.1 ilustra os principais pontos descritos anteriormente.

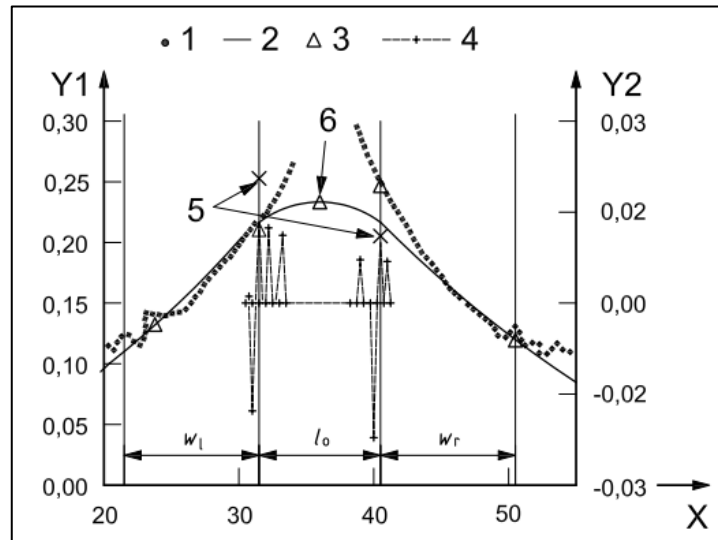


Figura AI.1 – Principais componentes da curva ajuste de deformação principal, [37].

Onde:

X – Comprimento de arco X desde o início da seção [mm];

Y1 – Deformação verdadeira principal ε_1 [adimensional];

Y2 – Segunda derivada da deformação ε_1 para o comprimento do arco [adimensional];

1 – Distribuição da deformação medida [adimensional];

2 – Parábola inversa sobre as janelas de ajuste 5, 7 e 9 [adimensional].

3 – Pontos marcados da janela de ajuste na distribuição de deformação [adimensional];

4 – Segunda derivada a distância de 6 vezes a espessura original [adimensional];

5 – Pontos máximos da segunda derivada, pontos internos do ajuste [adimensional];

6 – Deformação limite de conformação principal ε_1 [adimensional];

w_l – Largura da janela de ajuste esquerda [mm];

l_0 – Comprimento omitido entre os limites de ajuste interno (direito e esquerdo) [mm];

w_r – Largura da janela de ajuste direita [mm];

Para definir um valor limite de conformação para a CLC, o valor médio de três avaliações da mesma geometria de amostra é usado. A CLC completa é avaliada considerando os resultados da medição de deformação de todas as geometrias de amostra testadas.

Anexo II - Descrição das amostras cedidas pela empresa Catraport

Liga	Diâmetro (mm)	Espessura dita (mm)	Espessura real (mm)	L/N	Amostra	Observação
1,4512	254	1,00	0,98	1595697X-Disc_P	1	-
1,4512	254	1,00	0,98	1595697X-Disc_P	2	Espessura pouco menor que 0,98mm
1,4512	254	1,00	0,98	1595697X-Disc_P	3	-
1,4512	254	1,00	0,98	1595697X-Disc_P	4	Espessura pouco maior que 0,98mm
1,4512	254	1,00	0,98	1595697X-Disc_P	5	Espessura pouco menor que 0,98mm
1,4512	254	1,00	0,98	1595697X-Disc_P	6	Espessura pouco maior que 0,98mm
1,4512	210	1,20	1,19	2450479X - Disc	1	Espessura pouco menor que 1,19mm, Chapa levemente empenada
1,4512	210	1,20	1,20	2450479X - Disc	2	Espessura pouco menor que 1,20mm
1,4512	210	1,20	1,19	2450479X - Disc	3	-
1,4512	210	1,20	1,19	2450479X - Disc	4	-
1,4512	210	1,20	1,19	2450479X - Disc	5	-
1,4512	210	1,20	1,20	2450479X - Disc	6	-
1,4510	210	1,20	1,20	2331158X-Disc	1	-
1,4510	210	1,20	1,20	2331158X-Disc	2	Espessura pouco menor que 1,20mm
1,4510	210	1,20	1,20	2331158X-Disc	3	Chapa levemente empenada
1,4510	210	1,20	1,20	2331158X-Disc	4	-
1,4510	210	1,20	1,20	2331158X-Disc	5	Espessura pouco maior que 1,20mm, Chapa levemente empenada
1,4510	210	1,20	1,20	2331158X-Disc	6	Espessura pouco menor que 1,20mm
1,4509	217	1,20	1,20	2542381X-Disc	1	Espessura pouco maior que 1,20mm
1,4509	217	1,20	1,20	2542381X-Disc	2	Espessura pouco maior que 1,20mm
1,4509	217	1,20	1,20	2542381X-Disc	3	-
1,4509	217	1,20	1,20	2542381X-Disc	4	-
1,4509	217	1,20	1,20	2542381X-Disc	5	Espessura pouco maior que 1,20mm
1,4509	217	1,20	1,20	2542381X-Disc	6	Espessura pouco maior que 1,20mm
1,4509	200	2,00	1,95	Disco 9061X-7700X	1	-
1,4509	200	2,00	1,95	Disco 9061X-7700X	2	-
1,4509	200	2,00	1,95	Disco 9061X-7700X	3	Espessura pouco maior que 1,95mm

Liga	Diâmetro (mm)	Espessura dita (mm)	Espessura real (mm)	L/N	Amostra	Observação
1,4509	200	2,00	1,94	Disco 9061X-7700X	4	-
1,4509	200	2,00	1,95	Disco 9061X-7700X	5	Espessura pouco menor que 1,95mm
1,4509	200	2,00	1,95	Disco 9061X-7700X	6	Espessura pouco maior que 1,95mm
1,4509	240	3,00	2,85	Disco 7143X-2683X	1	Espessura pouco menor que 2,85mm
1,4509	240	3,00	2,84	Disco 7143X-2683X	2	Espessura pouco maior que 2,84mm
1,4509	240	3,00	2,85	Disco 7143X-2683X	3	Espessura pouco menor que 2,85mm
1,4509	240	3,00	2,85	Disco 7143X-2683X	4	Espessura pouco menor que 2,85mm
1,4509	240	3,00	2,85	Disco 7143X-2683X	5	-
1,4509	240	3,00	2,84	Disco 7143X-2683X	6	Espessura pouco maior que 2,84mm

Anexo III – Descrição das propriedades dos materiais cedidos pela empresa Catraport

Liga	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	$\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	σ_m (MPa)	A ₈₀ (%)	Dureza (HRB)
1.4509	200	2,00	326	489	32,5	78,0
1.4509	217	1,20	343	541	28,1	81,0
1.4509	240	3,00	320	495	31	80,0
1.4510	210	1,20	353	493	28,2	78,0
1.4512	254	1,00	232	402	35,1	-
1.4512	210	1,20	286	454	33,5	72,0

Anexo IV – Procedimento para realização e avaliação de resultados de ensaios de tração

1. Posicionar o corpo de prova na máquina de tração, fixando-o primeiramente na garra inferior, garantindo que este esteja na vertical;
2. Realizar o zero da carga;
3. Realizar o posicionamento e aperto da garra superior;
4. Com as garras posicionadas, inserir o extensômetro nas marcas do comprimento útil e realizado o zero da deformação e extensão;
5. Definir os parâmetros de teste na máquina de ensaios e a seguir, a parametrização do setup de aquisição de imagens - Os parâmetros da câmera definidos para a gravação dos vídeos foram: exposição manual (1/40s), foco (22), modo de foco (horizontal largo), compensação de iluminação (AWB), ISO (5000), abertura da lente objetiva (80mm), resolução (1920x1080p) com compressão para 25 fps (intervalo de captura reduzido na câmera).
6. Calibração da posição da câmera, usando a referência do próprio software de aquisição de imagens. Inclinando a câmera de maneira que a linha azul seja sobreposta pela linha vermelha ao centro da imagem. Sobreposição da linha amarela sobre a linha vermelha na escala lateral direita. Buscar que o corpo de prova esteja no centro das grades cinzas apresentadas no software;
7. Ajustar o foco da câmera, assim como exposição, brilho, entre outras propriedades (A exposição pode ser ajustada automaticamente, buscando o maior reconhecimento de área possível, representado pela grade de quadrados verdes na área de interesse);
8. Após a calibração da câmera, iniciar a captura de imagens e logo em seguida, iniciar o ensaio de tração, marcando o exato instante de tempo de início do ensaio;
9. Quando o corpo de prova se romper, parar o deslocamento da garra e encerrar o ensaio no computador;
10. Interromper a aquisição de vídeo;
11. Realizado o *download* do vídeo da câmera para o computador;
12. Exportar os resultados do ensaio da máquina de tração em ficheiro .mad;
13. Converter os dados em ficheiro .csv;
14. Salvar todos os ficheiros .csv dos ensaios de interesse que serão comparados, pois as curvas tensão x deformação são geradas para todos os arquivos .csv que estão na mesma pasta;
15. Rodar o algoritmo em Matlab®, sendo calculas as deformações totais equivalentes as deformações plásticas de interesse para os cálculos de anisotropia. Neste instante já são calculadas todas as propriedades mecânicas de interesse (curvas tensão, deformação e encruamento), exceto a anisotropia, já que os valores dependem dos resultados apresentados no Gom correlate®;
16. Verificar os resultados dos de saída do Matlab® e comparar com as fichas técnicas dos materiais e também, com informações existentes na literatura;
17. Verificar a duração do vídeo gravado no ensaio e definir os instantes de tempo inicial e final de interesse;
18. Importar o vídeo para o algoritmo no software MatLab®;
19. Estratificar e tratar (se necessário) os *frames*;
20. Após a execução do código é criada uma pasta com a estratificação dos frames, então é possível verificar a qualidade e número de imagens obtidas;
21. Com o Gom Correlate® aberto, arrastar a pasta que contém as imagens tratadas e selecionar a opção “*Image Deformation*”;

22. Definir a Superfície de interesse: No menu superior, selecionar a opção “Definir Componente” e então selecionar “Criar Componente de Superfície”;
23. Então é aberta uma caixa de diálogo, onde o software encontra facetas quadradas nas imagens adquiridas. O software identifica as facetas pela estrutura do padrão estocástico. Primeiramente deve-se restringir a área de interesse utilizando o comando “Selecionar/Desmarcar Polígono” da barra de ferramentas 3D (menu inferior). Esta área deve conter apenas a zona útil do corpo de prova;
24. Então deve-se editar o “Tamanho da Faceta” e a “Distância de Ponto” deixando o maior número de combinações de quadrados possível, posicionados da maneira mais uniforme possível ao longo da área de interesse. A sobreposição de facetas através da “Distância de Ponto” deve estar dentro de uma área de sobreposição de 20% a no máximo 50%. Após essas definições deve-se verificar a Qualidade do padrão, clicando na opção do canto inferior esquerdo da caixa de diálogo das propriedades e selecionando a opção “Qualidade do Padrão”. A qualidade deve estar o máximo possível dentro da região verde da escala, para isso podem ser alterados os valores de “tamanho de faceta” e “distância entre pontos”, buscando um ponto ótimo entre a qualidade do padrão e o número de facetas mapeadas na superfície de interesse. Por fim, deve-se clicar na opção “Criar e Fechar” para que o software faça o reconhecimento da área e dos pontos de interesse em todas as imagens. O tamanho de faceta foi definido como 20 pixels e a distância de ponto foi definida com 16 pixels, com método de cálculo selecionado em alta precisão;
25. Neste momento é possível verificar a adesão da área de interesse e sua progressão ao longo da passagem dos frames, basta, no menu inferior, selecionar a opção de vista de medição 3D e então arrasta “andar” ao longo da linha do tempo para verificar se a área se comporta corretamente (sem perda de espaços internos ou se há estagnação ao longo da passagem dos frames);
26. O próximo passo é a definição de escala, para calibração dos pixels em relação à distância. Para isso, basta selecionar a opção “Definir Escala” que se encontra no menu superior. Neste momento é aberta uma caixa de diálogo, onde selecionam-se os pontos de referência 1 e 2 em uma posição onde a distância entre esses pontos é conhecida. A seguir é inserido o valor dessa distância na caixa “Distância do ponto” e pode-se clicar na opção “OK”. Agora é possível realizar a medição de distâncias em qualquer instante do ensaio;
27. Neste momento é possível inserir os extensômetros digitais através da opção “Construir >Distância> Extensômetro” no menu superior do software. Assim é aberta uma caixa de diálogo “Construir Extensômetro”, onde deve ser selecionado um ponto de referência na opção “Ponto” e a seguir uma “Direção” de posicionamento do extensômetro. Esta direção pode ser de acordo com o sistema de coordenadas global ou um novo, caso o corpo de prova não esteja totalmente alinhado com o eixo de coordenadas global. Também é possível definir um tamanho de faceta para as extremidades do extensômetro, para melhor reconhecimento dos pontos desejados. Por último, basta clicar em “Criar e Fechar”, para que o extensômetro seja inserido;
28. O próximo passo consiste em inserir a representação dos valores medidos de deslocamento e deformação pelos extensômetros. Para os deslocamentos, com os extensômetros 2,3 e 4 selecionados, basta clicar na opção “Inspeção> Verificar Dimensões> Distância>Distância (Y)” no menu superior. Ao clicar nessa opção é aberta uma caixa de diálogo onde deve-se selecionar qual a referência para medição do extensômetro, deve-se selecionar a opção “Contra um estágio de referência”, onde o software geralmente reconhece a primeira imagem como frame de referência (identificado com uma bandeira na linha do tempo). A deformação deve ser apresentada no extensômetro 1, através da opção “Inspeção> Verificar Dimensões> Deformação>Deformação(X)”;
29. Assim, são apresentados os valores de distância e deformação medidos pelos extensômetros, tendo como referência o estágio inicial demarcado. A seguir deve-se encontrar os estágios de interesse para os cálculos desejados. Após tomar nota dos valores encontrados, deve se inserir estes no algoritmo Matlab® para o cálculo dos valores de anisotropia

Anexo V - Resultados das medições para os cálculos de Anisotropia

Liga	Direção	Espessura	Deformação plástica	Deformação Total	Ext1 (mm)	Ext2 (mm)	Ext3 (mm)	Ext4 (mm)	r
1.4509	0°	1,2mm	2.000%	2.199%	1.092	-0.098	-0.108	-0.106	0.938
1.4509	0°	1,2mm	2.500%	2.701%	1.342	-0.121	-0.135	-0.133	0.971
1.4509	0°	1,2mm	5.000%	5.216%	2.609	-0.237	-0.272	-0.256	1.032
1.4509	0°	1,2mm	7.500%	7.715%	3.869	-0.347	-0.395	-0.370	1.027
1.4509	0°	1,2mm	10.000%	10.241%	5.111	-0.438	-0.510	-0.474	0.996
1.4509	0°	1,2mm	12.500%	12.725%	6.374	-0.524	-0.632	-0.572	0.978
1.4509	0°	1,2mm	15.000%	15.268%	7.625	-0.596	-0.748	-0.660	0.950
1.4509	0°	1,2mm	17.349%	17.349%	8.869	-0.650	-0.872	-0.736	0.920
1.4509	0°	1,2mm	17.500%	17.731%	8.680	-0.642	-0.852	-0.725	0.923
1.4509	45°	1,2mm	2.000%	2.207%	1.119	-0.120	-0.123	-0.121	1.230
1.4509	45°	1,2mm	2.500%	2.718%	1.343	-0.143	-0.145	-0.150	1.247
1.4509	45°	1,2mm	5.000%	5.238%	2.624	-0.284	-0.306	-0.293	1.404
1.4509	45°	1,2mm	7.500%	7.764%	3.898	-0.410	-0.450	-0.429	1.410
1.4509	45°	1,2mm	10.000%	10.275%	5.147	-0.526	-0.595	-0.552	1.413
1.4509	45°	1,2mm	12.500%	12.745%	6.370	-0.626	-0.733	-0.659	1.385
1.4509	45°	1,2mm	15.000%	15.268%	7.650	-0.713	-0.876	-0.759	1.339
1.4509	45°	1,2mm	17.500%	17.772%	8.902	-0.777	-1.035	-0.834	1.291
1.4509	45°	1,2mm	17.814%	18.074%	9.020	-0.780	-1.051	-0.841	1.285
1.4509	90°	1,2mm	2.000%	2.207%	1.101	-0.125	-0.133	-0.127	1.457
1.4509	90°	1,2mm	2.500%	2.717%	1.364	-0.153	-0.166	-0.156	1.457
1.4509	90°	1,2mm	5.000%	5.216%	2.628	-0.297	-0.318	-0.294	1.504
1.4509	90°	1,2mm	7.500%	7.764%	3.878	-0.429	-0.469	-0.418	1.503
1.4509	90°	1,2mm	10.000%	10.235%	5.102	-0.549	-0.614	-0.539	1.507
1.4509	90°	1,2mm	12.500%	12.778%	6.377	-0.652	-0.774	-0.635	1.457
1.4509	90°	1,2mm	15.000%	15.268%	7.637	-0.741	-0.937	-0.712	1.404
1.4509	90°	1,2mm	15.954%	16.208%	8.881	-0.802	-1.137	-0.763	1.366
1.4509	90°	1,2mm	17.500%	17.731%	8.097	-0.767	-1.004	-0.732	1.384

Liga	Direção	Espessura	Deformação plástica	Deformação Total	Ext1 (mm)	Ext2 (mm)	Ext3 (mm)	Ext4 (mm)	r
1.4509	0°	2,0mm	2.000%	2.185%	1.109	-0.109	-0.096	-0.085	0.795
1.4509	0°	2,0mm	2.500%	2.681%	1.327	-0.133	-0.120	-0.108	0.859
1.4509	0°	2,0mm	5.000%	5.200%	2.600	-0.258	-0.240	-0.219	0.913
1.4509	0°	2,0mm	7.500%	7.731%	3.862	-0.369	-0.357	-0.330	0.929
1.4509	0°	2,0mm	10.000%	10.201%	5.108	-0.480	-0.465	-0.426	0.926
1.4509	0°	2,0mm	12.500%	12.705%	6.345	-0.581	-0.569	-0.518	0.919
1.4509	0°	2,0mm	15.000%	15.241%	7.600	-0.675	-0.677	-0.604	0.910
1.4509	0°	2,0mm	17.500%	17.711%	8.841	-0.762	-0.774	-0.674	0.887
1.4509	0°	2,0mm	18.350%	18.577%	9.307	-0.797	-0.812	-0.695	0.880
1.4509	45°	2,0mm	2.000%	2.181%	1.084	-0.107	-0.103	-0.115	1.032
1.4509	45°	2,0mm	2.500%	2.690%	1.354	-0.133	-0.130	-0.141	1.030
1.4509	45°	2,0mm	5.000%	5.208%	2.596	-0.249	-0.253	-0.260	1.034
1.4509	45°	2,0mm	7.500%	7.726%	3.852	-0.362	-0.367	-0.381	1.033
1.4509	45°	2,0mm	10.000%	10.223%	5.107	-0.463	-0.486	-0.498	1.034
1.4509	45°	2,0mm	12.500%	12.739%	6.366	-0.569	-0.599	-0.610	1.040
1.4509	45°	2,0mm	15.000%	15.236%	7.607	-0.666	-0.706	-0.716	1.038
1.4509	45°	2,0mm	17.500%	17.760%	8.895	-0.749	-0.817	-0.820	1.025
1.4509	45°	2,0mm	20.225%	20.458%	10.239	-0.826	-0.929	-0.921	1.006
1.4509	90°	2,0mm	2.000%	2.181%	1.084	-0.111	-0.119	-0.105	1.099
1.4509	90°	2,0mm	2.500%	2.679%	1.334	-0.140	-0.147	-0.133	1.153
1.4509	90°	2,0mm	5.000%	5.195%	2.592	-0.273	-0.287	-0.266	1.234
1.4509	90°	2,0mm	7.500%	7.710%	3.851	-0.400	-0.428	-0.391	1.268
1.4509	90°	2,0mm	10.000%	10.235%	5.101	-0.519	-0.566	-0.506	1.278
1.4509	90°	2,0mm	12.500%	12.731%	6.367	-0.628	-0.694	-0.620	1.264
1.4509	90°	2,0mm	15.000%	15.208%	7.613	-0.729	-0.831	-0.719	1.260
1.4509	90°	2,0mm	17.500%	17.718%	8.874	-0.813	-0.970	-0.808	1.236
1.4509	90°	2,0mm	18.510%	18.731%	9.368	-0.844	-1.025	-0.837	1.224
1.4509	0°	3,0mm	2.000%	2.208%	1.100	-0.138	-0.143	-0.138	0.611
1.4509	0°	3,0mm	2.500%	2.711%	1.367	-0.176	-0.180	-0.174	0.632
1.4509	0°	3,0mm	5.000%	5.235%	2.631	-0.347	-0.345	-0.339	0.662

Liga	Direção	Espessura	Deformação plástica	Deformação Total	Ext1 (mm)	Ext2 (mm)	Ext3 (mm)	Ext4 (mm)	r
1.4509	0°	3,0mm	7.500%	7.715%	3.849	-0.503	-0.502	-0.495	0.674
1.4509	0°	3,0mm	10.000%	10.275%	5.124	-0.659	-0.659	-0.646	0.674
1.4509	0°	3,0mm	12.500%	12.738%	6.378	-0.806	-0.802	-0.789	0.669
1.4509	0°	3,0mm	15.000%	15.255%	7.646	-0.952	-0.948	-0.925	0.668
1.4509	0°	3,0mm	17.500%	17.751%	8.885	-1.092	-1.083	-1.059	0.668
1.4509	0°	3,0mm	18.834%	19.087%	9.531	-1.159	-1.152	-1.125	0.666
1.4509	45°	3,0mm	2.000%	2.203%	1.118	-0.165	-0.174	-0.154	0.783
1.4509	45°	3,0mm	2.500%	2.706%	1.353	-0.201	-0.211	-0.188	0.796
1.4509	45°	3,0mm	5.000%	5.219%	2.604	-0.389	-0.404	-0.371	0.834
1.4509	45°	3,0mm	7.500%	7.713%	3.840	-0.569	-0.593	-0.544	0.851
1.4509	45°	3,0mm	10.000%	10.262%	5.115	-0.751	-0.775	-0.707	0.851
1.4509	45°	3,0mm	12.500%	12.738%	6.379	-0.922	-0.955	-0.859	0.849
1.4509	45°	3,0mm	15.000%	15.221%	7.629	-1.091	-1.130	-0.996	0.848
1.4509	45°	3,0mm	17.500%	17.725%	8.869	-1.254	-1.295	-1.121	0.843
1.4509	45°	3,0mm	17.647%	17.886%	8.954	-1.266	-1.303	-1.127	0.841
1.4509	90°	3,0mm	2.000%	2.244%	1.138	-0.215	-0.224	-0.204	1.292
1.4509	90°	3,0mm	2.500%	2.748%	1.378	-0.262	-0.273	-0.251	1.333
1.4509	90°	3,0mm	5.000%	5.262%	2.613	-0.493	-0.518	-0.483	1.402
1.4509	90°	3,0mm	7.500%	7.756%	3.861	-0.724	-0.753	-0.701	1.420
1.4509	90°	3,0mm	10.000%	10.288%	5.152	-0.947	-0.986	-0.917	1.418
1.4509	90°	3,0mm	12.500%	12.758%	6.394	-1.146	-1.208	-1.104	1.401
1.4509	90°	3,0mm	15.000%	15.309%	7.637	-1.339	-1.426	-1.287	1.395
1.4509	90°	3,0mm	17.500%	17.765%	8.877	-1.511	-1.645	-1.449	1.376
1.4509	90°	3,0mm	18.171%	18.456%	9.205	-1.553	-1.703	-1.490	1.370
1.4510	0°	1,2mm	2.000%	2.212%	1.107	-0.104	-0.122	-0.123	1.148
1.4510	0°	1,2mm	2.500%	2.718%	1.368	-0.131	-0.149	-0.153	1.167
1.4510	0°	1,2mm	5.000%	5.229%	2.610	-0.252	-0.282	-0.291	1.213
1.4510	0°	1,2mm	7.500%	7.729%	3.869	-0.368	-0.411	-0.420	1.209
1.4510	0°	1,2mm	10.000%	10.228%	5.122	-0.475	-0.534	-0.553	1.214
1.4510	0°	1,2mm	12.500%	12.752%	6.378	-0.572	-0.659	-0.675	1.206

Liga	Direção	Espessura	Deformação plástica	Deformação Total	Ext1 (mm)	Ext2 (mm)	Ext3 (mm)	Ext4 (mm)	r
1.4510	0°	1,2mm	15.000%	15.248%	7.640	-0.658	-0.774	-0.794	1.184
1.4510	0°	1,2mm	17.500%	17.772%	8.878	-0.725	-0.877	-0.913	1.154
1.4510	0°	1,2mm	18.023%	18.282%	9.147	-0.739	-0.898	-0.936	1.145
1.4510	45°	1,2mm	2.000%	2.196%	1.085	-0.102	-0.105	-0.116	1.017
1.4510	45°	1,2mm	2.500%	2.698%	1.346	-0.126	-0.133	-0.141	1.021
1.4510	45°	1,2mm	5.000%	5.213%	2.622	-0.255	-0.264	-0.267	1.081
1.4510	45°	1,2mm	7.500%	7.707%	3.858	-0.366	-0.381	-0.382	1.066
1.4510	45°	1,2mm	10.000%	10.255%	5.129	-0.472	-0.501	-0.498	1.061
1.4510	45°	1,2mm	12.500%	12.711%	6.365	-0.573	-0.612	-0.601	1.050
1.4510	45°	1,2mm	15.000%	15.255%	7.611	-0.661	-0.716	-0.689	1.014
1.4510	45°	1,2mm	16.906%	17.141%	8.554	-0.715	-0.796	-0.751	0.986
1.4510	45°	1,2mm	17.500%	17.718%	8.682	-0.732	-0.820	-0.770	1.013
1.4510	90°	1,2mm	2.000%	2.199%	1.097	-0.127	-0.143	-0.130	1.621
1.4510	90°	1,2mm	2.500%	2.703%	1.336	-0.156	-0.174	-0.163	1.691
1.4510	90°	1,2mm	5.000%	5.219%	2.611	-0.304	-0.334	-0.318	1.749
1.4510	90°	1,2mm	7.500%	7.745%	3.882	-0.437	-0.495	-0.457	1.732
1.4510	90°	1,2mm	10.000%	10.255%	5.112	-0.560	-0.644	-0.588	1.723
1.4510	90°	1,2mm	12.500%	12.725%	6.376	-0.676	-0.794	-0.712	1.697
1.4510	90°	1,2mm	15.000%	15.228%	7.606	-0.767	-0.941	-0.818	1.640
1.4510	90°	1,2mm	16.643%	16.879%	8.450	-0.817	-1.044	-0.879	1.586
1.4510	90°	1,2mm	17.500%	17.718%	8.842	-0.840	-1.091	-0.905	1.563
1.4512	0°	1,0mm	2.000%	2.142%	1.079	-0.128	-0.139	-0.127	1.626
1.4512	0°	1,0mm	2.500%	2.647%	1.319	-0.157	-0.170	-0.156	1.655
1.4512	0°	1,0mm	5.000%	5.162%	2.591	-0.295	-0.324	-0.297	1.589
1.4512	0°	1,0mm	7.500%	7.672%	3.838	-0.425	-0.468	-0.429	1.560
1.4512	0°	1,0mm	10.000%	10.195%	5.093	-0.548	-0.611	-0.555	1.541
1.4512	0°	1,0mm	12.500%	12.671%	6.344	-0.654	-0.744	-0.666	1.480
1.4512	0°	1,0mm	15.000%	15.194%	7.601	-0.757	-0.878	-0.767	1.437
1.4512	0°	1,0mm	17.500%	17.704%	8.842	-0.839	-1.006	-0.852	1.373
1.4512	0°	1,0mm	19.873%	20.074%	10.035	-0.911	-1.133	-0.927	1.327

Liga	Direção	Espessura	Deformação plástica	Deformação Total	Ext1 (mm)	Ext2 (mm)	Ext3 (mm)	Ext4 (mm)	r
1.4512	45°	1,0mm	2.000%	2.133%	1.072	-0.114	-0.130	-0.130	1.447
1.4512	45°	1,0mm	2.500%	2.642%	1.314	-0.144	-0.158	-0.158	1.473
1.4512	45°	1,0mm	5.000%	5.165%	2.596	-0.290	-0.317	-0.310	1.586
1.4512	45°	1,0mm	7.500%	7.672%	3.843	-0.426	-0.462	-0.443	1.583
1.4512	45°	1,0mm	10.000%	10.174%	5.094	-0.557	-0.603	-0.572	1.584
1.4512	45°	1,0mm	12.500%	12.678%	6.335	-0.678	-0.739	-0.690	1.567
1.4512	45°	1,0mm	15.000%	15.168%	7.598	-0.787	-0.876	-0.806	1.545
1.4512	45°	1,0mm	17.500%	17.664%	8.850	-0.892	-1.006	-0.901	1.506
1.4512	45°	1,0mm	20.440%	20.630%	10.312	-0.991	-1.157	-0.995	1.440
1.4512	90°	1,0mm	2.000%	2.152%	1.086	-0.133	-0.144	-0.132	1.769
1.4512	90°	1,0mm	2.500%	2.660%	1.339	-0.162	-0.176	-0.161	1.737
1.4512	90°	1,0mm	5.000%	5.178%	2.577	-0.316	-0.338	-0.316	1.890
1.4512	90°	1,0mm	7.500%	7.697%	3.848	-0.461	-0.500	-0.461	1.898
1.4512	90°	1,0mm	10.000%	10.208%	5.093	-0.595	-0.647	-0.595	1.869
1.4512	90°	1,0mm	12.500%	12.718%	6.358	-0.721	-0.792	-0.716	1.817
1.4512	90°	1,0mm	15.000%	15.201%	7.616	-0.831	-0.933	-0.821	1.744
1.4512	90°	1,0mm	17.500%	17.691%	8.842	-0.931	-1.064	-0.911	1.672
1.4512	90°	1,0mm	18.792%	19.000%	9.485	-0.976	-1.127	-0.952	1.620
1.4512	0°	1,2mm	2.000%	2.162%	1.073	-0.101	-0.109	-0.110	1.020
1.4512	0°	1,2mm	2.500%	2.660%	1.339	-0.128	-0.143	-0.140	1.092
1.4512	0°	1,2mm	5.000%	5.176%	2.594	-0.252	-0.284	-0.276	1.186
1.4512	0°	1,2mm	7.500%	7.680%	3.830	-0.373	-0.420	-0.398	1.217
1.4512	0°	1,2mm	10.000%	10.195%	5.090	-0.488	-0.555	-0.521	1.234
1.4512	0°	1,2mm	12.500%	12.678%	6.349	-0.592	-0.685	-0.627	1.215
1.4512	0°	1,2mm	15.000%	15.168%	7.570	-0.694	-0.811	-0.726	1.213
1.4512	0°	1,2mm	17.500%	17.691%	8.830	-0.782	-0.930	-0.817	1.181
1.4512	0°	1,2mm	17.981%	18.174%	9.092	-0.801	-0.956	-0.833	1.176
1.4512	45°	1,2mm	2.000%	2.177%	1.102	-0.098	-0.108	-0.087	0.819
1.4512	45°	1,2mm	2.500%	2.685%	1.337	-0.121	-0.128	-0.107	0.826
1.4512	45°	1,2mm	5.000%	5.200%	2.602	-0.230	-0.251	-0.210	0.850

Liga	Direção	Espessura	Deformação plástica	Deformação Total	Ext1 (mm)	Ext2 (mm)	Ext3 (mm)	Ext4 (mm)	r
1.4512	45°	1,2mm	7.500%	7.697%	3.853	-0.335	-0.367	-0.312	0.863
1.4512	45°	1,2mm	10.000%	10.201%	5.094	-0.441	-0.484	-0.398	0.869
1.4512	45°	1,2mm	12.500%	12.725%	6.380	-0.539	-0.606	-0.480	0.865
1.4512	45°	1,2mm	15.000%	15.221%	7.594	-0.624	-0.712	-0.545	0.845
1.4512	45°	1,2mm	15.834%	16.047%	8.007	-0.652	-0.750	-0.566	0.841
1.4512	45°	1,2mm	17.500%	17.691%	8.849	-0.707	-0.835	-0.602	0.835
1.4512	90°	1,2mm	2.000%	2.176%	1.087	-0.114	-0.139	-0.138	1.564
1.4512	90°	1,2mm	2.500%	2.675%	1.333	-0.143	-0.172	-0.171	1.637
1.4512	90°	1,2mm	5.000%	5.184%	2.587	-0.288	-0.340	-0.327	1.788
1.4512	90°	1,2mm	7.500%	7.713%	3.851	-0.424	-0.503	-0.475	1.817
1.4512	90°	1,2mm	10.000%	10.215%	5.103	-0.544	-0.661	-0.614	1.806
1.4512	90°	1,2mm	12.500%	12.698%	6.349	-0.652	-0.815	-0.745	1.783
1.4512	90°	1,2mm	15.000%	15.194%	7.600	-0.741	-0.964	-0.859	1.713
1.4512	90°	1,2mm	16.915%	17.121%	8.567	-0.797	-1.081	-0.934	1.648
1.4512	90°	1,2mm	17.500%	17.711%	8.843	-0.812	-1.113	-0.954	1.628

Anexo VI – Procedimento para realização de ensaios de Nakajima

1. Posicionar o suporte e a matriz inferior na máquina de ensaios de tração;
2. Posicionar o punção na garra superior da máquina;
3. Descer o punção até o centro da matriz inferior e centrá-lo alinhado com o centro da matriz inferior;
4. Fixar definitivamente o punção;
5. Posicionar o corpo de prova com o eixo centrado na matriz inferior;
6. Aplicar uma camada de óleo lubrificante mineral, sobre o óleo é inserida uma película de filme de selagem transparente e sobre o filme é inserido mais uma camada de óleo lubrificante;
7. Posicionar cuidadosamente o prensa chapas sobre o corpo de prova, com as cunhas de fixação alinhadas com os rasgos da matriz inferior. Após esse posicionamento, girar prensa chapas o máximo possível, para fixar o corpo de prova;
8. A força aplicada manualmente não é suficiente para realizar a quina do corpo de prova, portanto, após a fixação manual deve-se realizar a aplicação de uma carga sobre o prensa chapas (aproximadamente 100kN);
9. Retirar a carga do prensa chapas e girar novamente, até travar o curso;
10. Posicionar o punção em contato com o corpo de prova, nesse instante é realizado o zero da carga e da extensão.
11. Habilitar a comunicação entre máquina e o computador de controle, onde é realizado o set da velocidade do ensaio para 1mm/s. Foram realizados testes anteriores com velocidade de 1,5mm/s, mas o controle de parada do teste é mais difícil, podendo exceder muito o ponto de parada.
12. Iniciar a aquisição de imagens para acompanhar o desenvolvimento da deformação do corpo de prova e principalmente, perceber o momento do início da fratura, para que seja feita a parada do ensaio no momento imediato ao aparecimento da falha. O método de parada selecionado foi este pois o controle através da queda força é complicado, pois a queda de força é muito repentina, podendo haver um atraso grande entre o aparecimento da ruptura e o momento de parada do ensaio.

Anexo VII – Simulações numéricas: Superfícies

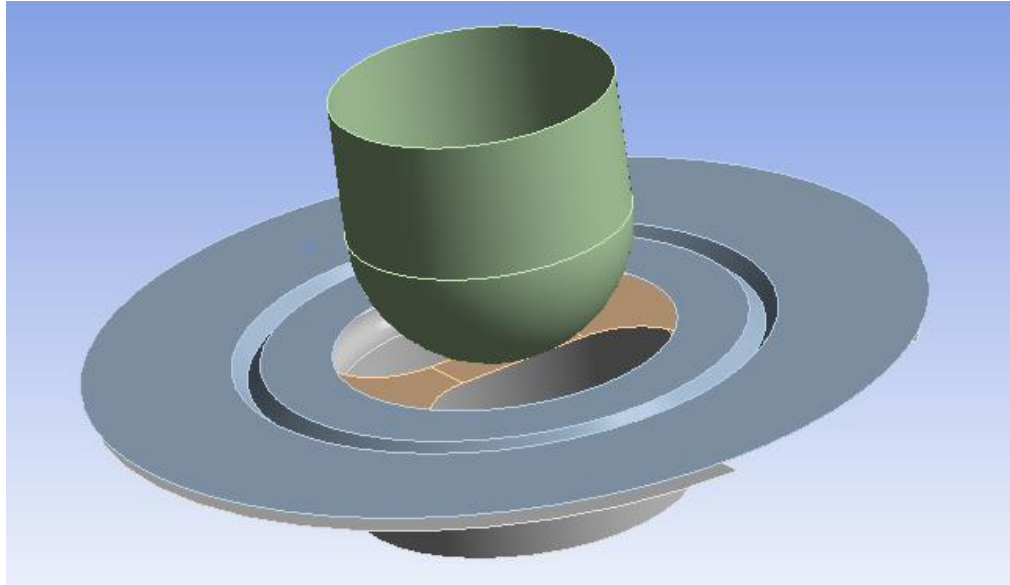


Figura AVII.1 – Superfícies extraídas do modelo CAD para as simulações

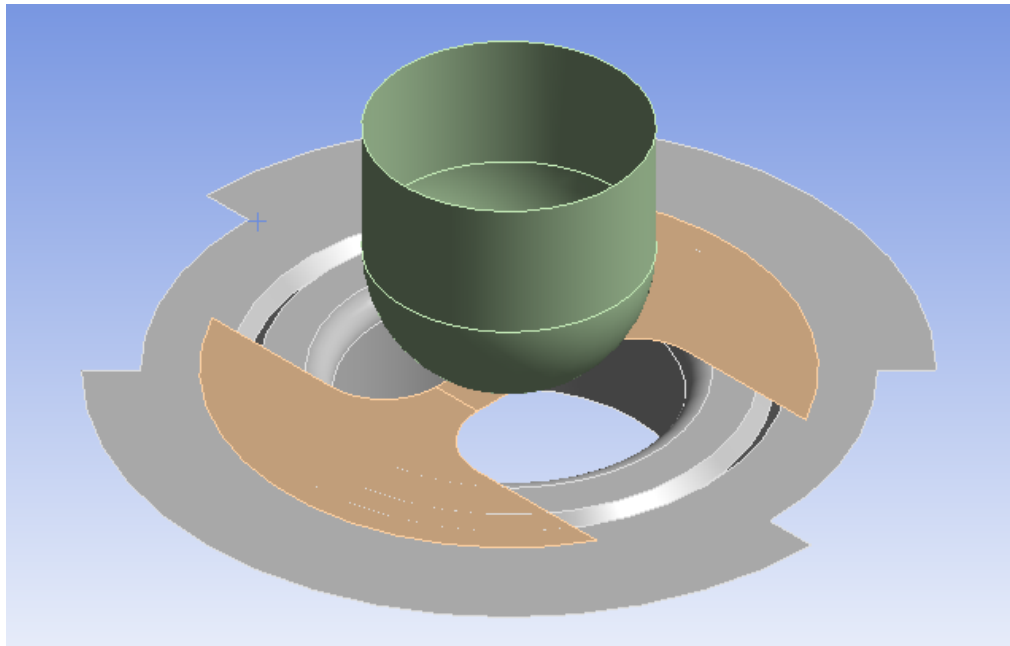


Figura AVII.2 – Superfícies extraídas do modelo CAD para as simulações (Corpo de Prova)

Anexo VIII – Simulações numéricas: Avaliação da influência do atrito

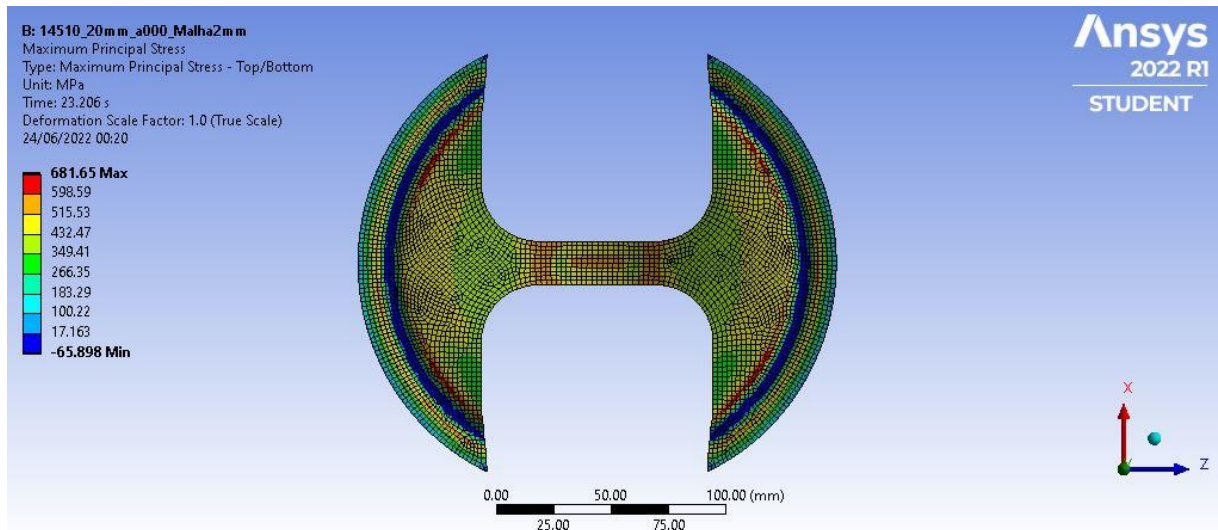


Figura AVIII.1 – Distribuição de tensões amostra 20mm, $\mu=0,00$ (Vista Superior)

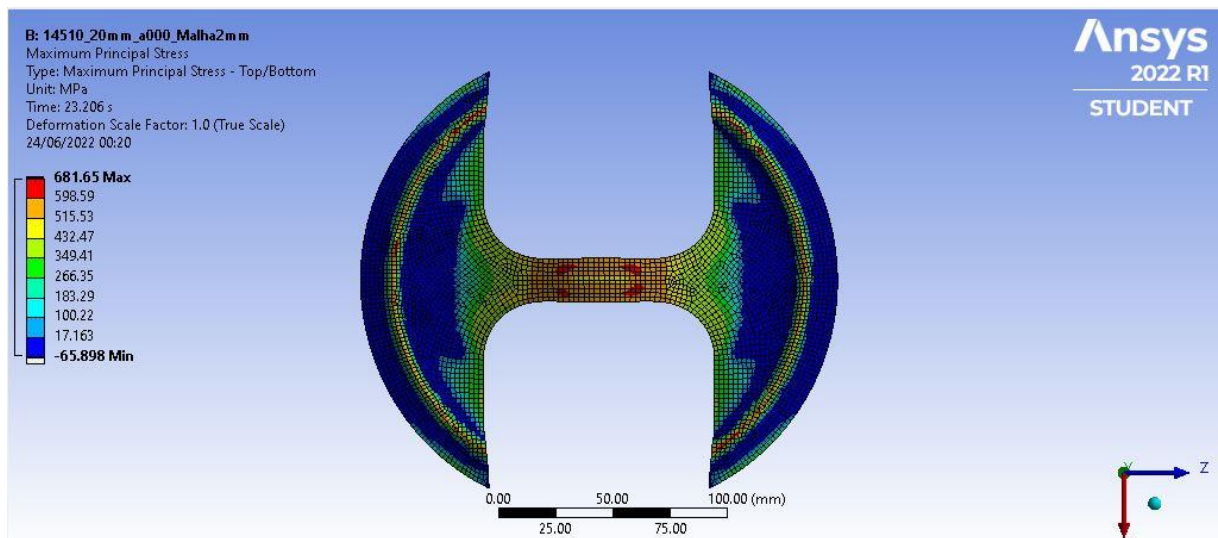


Figura AVIII.2 – Distribuição de tensões amostra 20mm, $\mu=0,00$ (Vista Inferior)

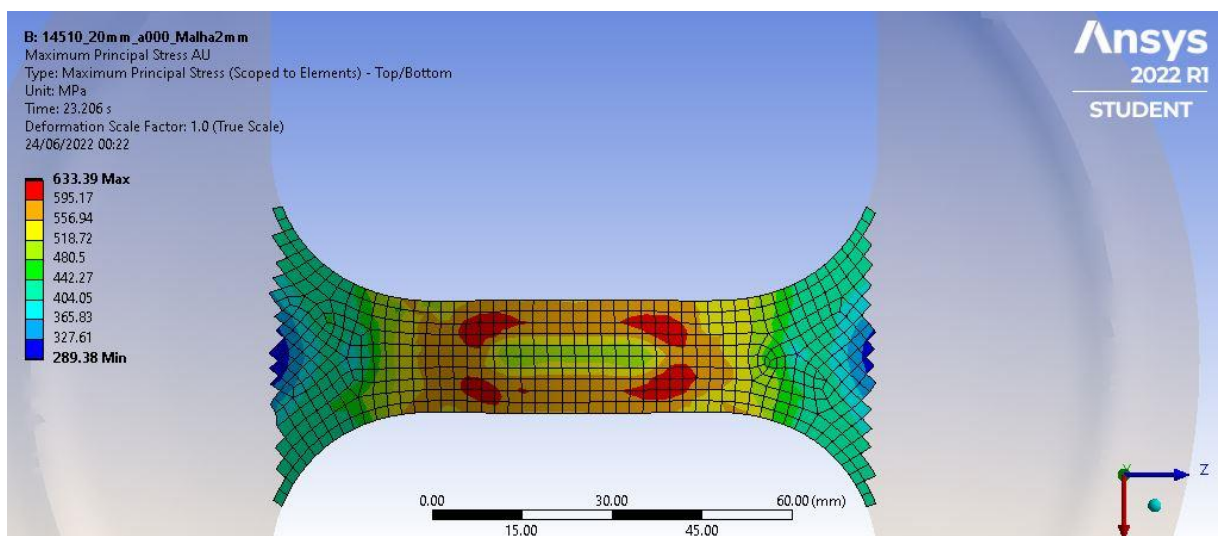


Figura AVIII.3 – Distribuição de tensões área útil amostra 20mm, $\mu=0,00$ (Vista Inferior)

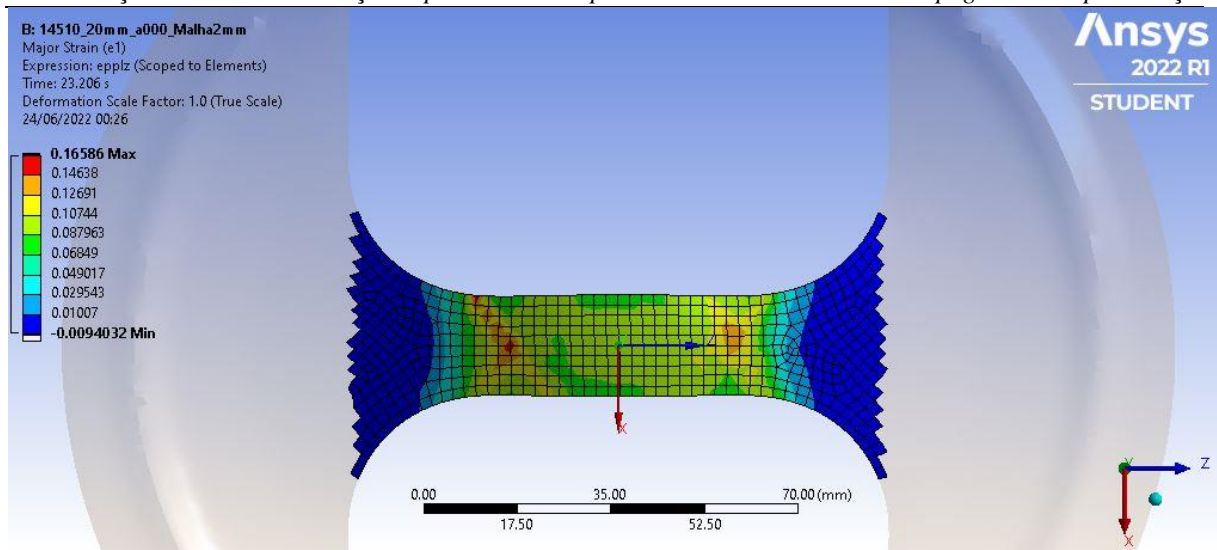


Figura AVIII.4 – Deformação ϵ_1 área útil amostra 20mm, $\mu=0,00$ (Vista Inferior)

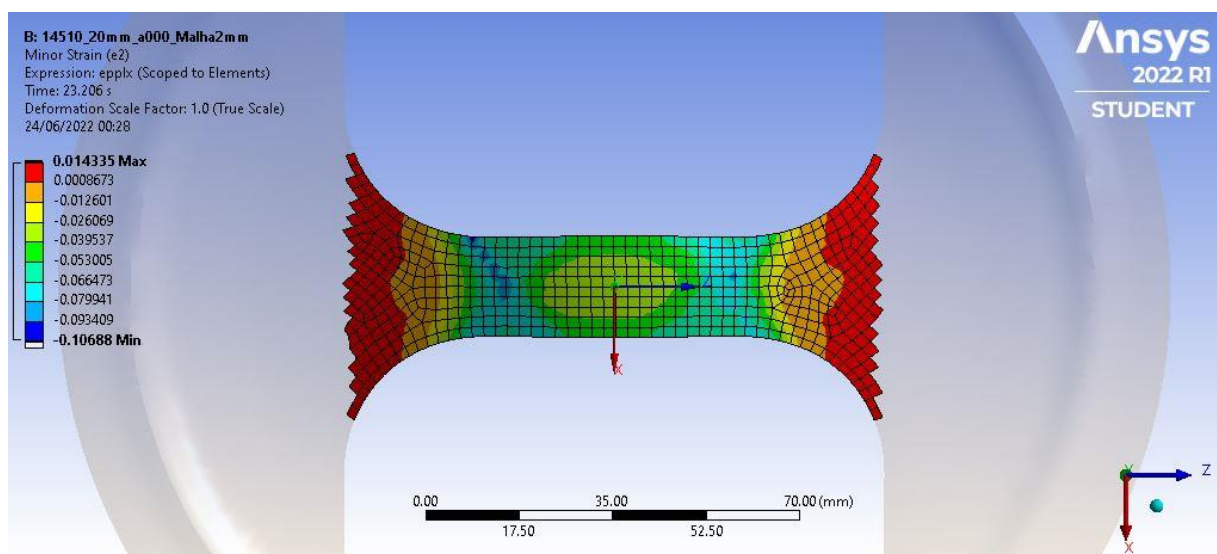


Figura AVIII.5 – Deformação ϵ_2 área útil amostra 20mm, $\mu=0,00$ (Vista Inferior)

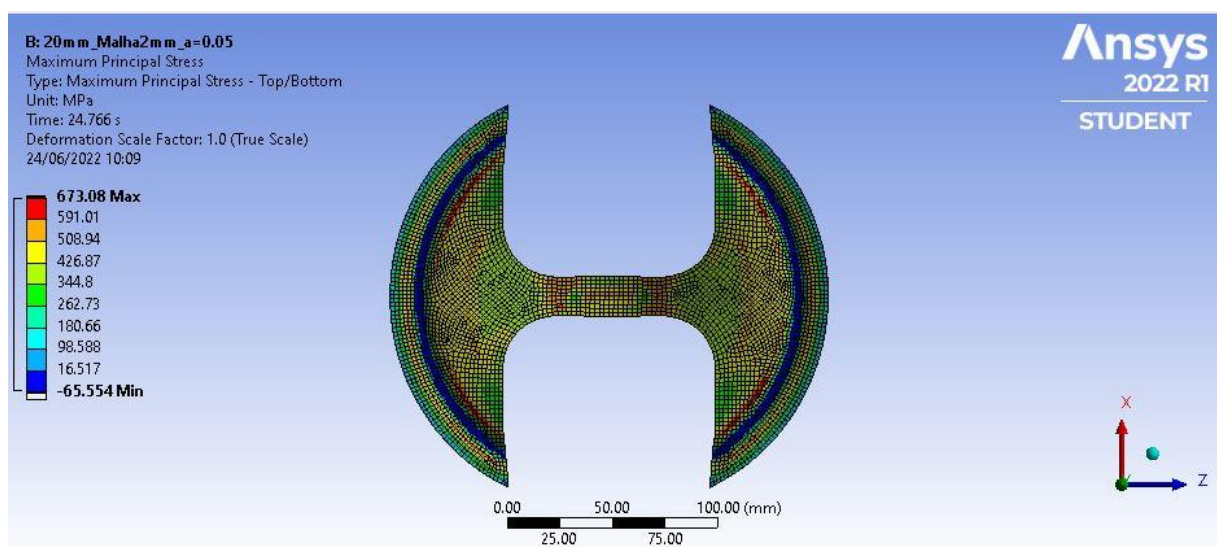


Figura AVIII.6 – Distribuição de tensões amostra 20mm, $\mu=0,05$ (Vista Superior)

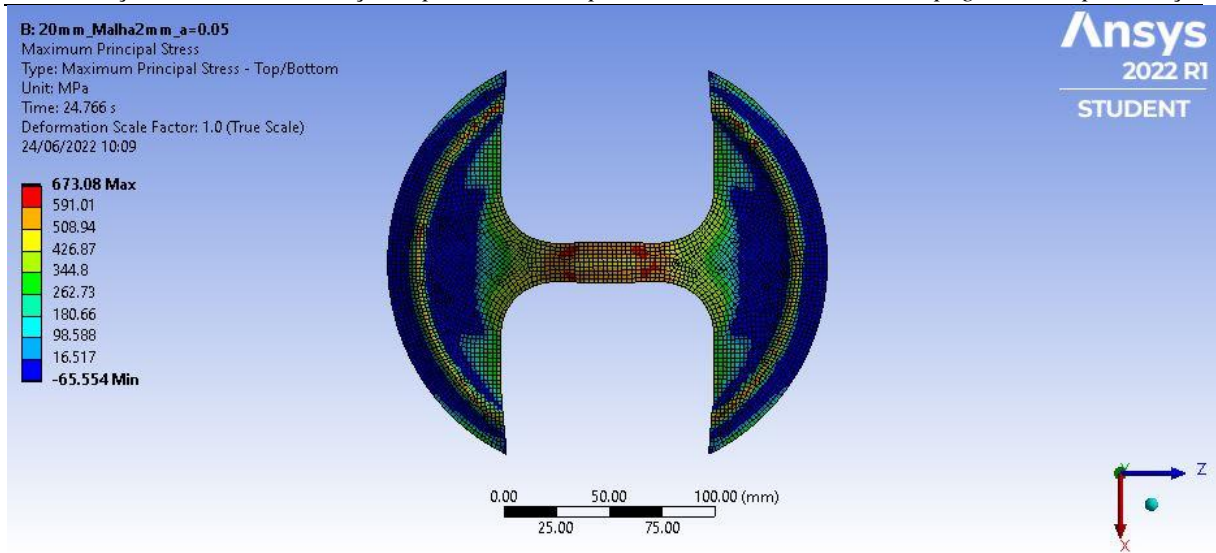


Figura AVIII.7 – Distribuição de tensões amostra 20mm, $\mu=0,05$ (Vista Inferior)

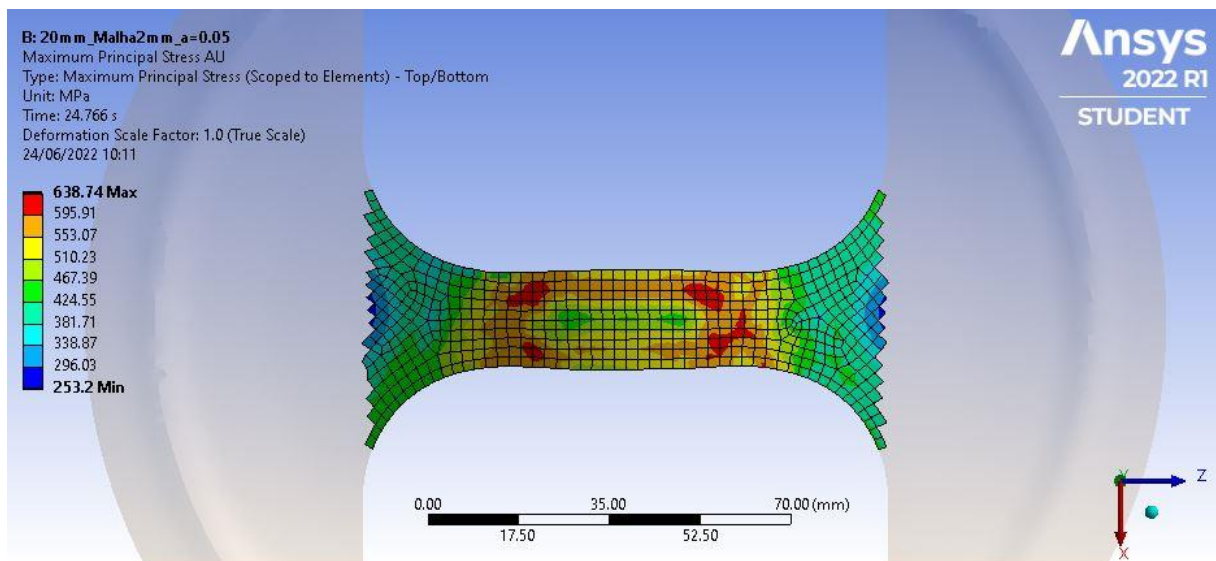


Figura AVIII.8 – Distribuição de tensões área útil amostra 20mm, $\mu=0,05$ (Vista Inferior)

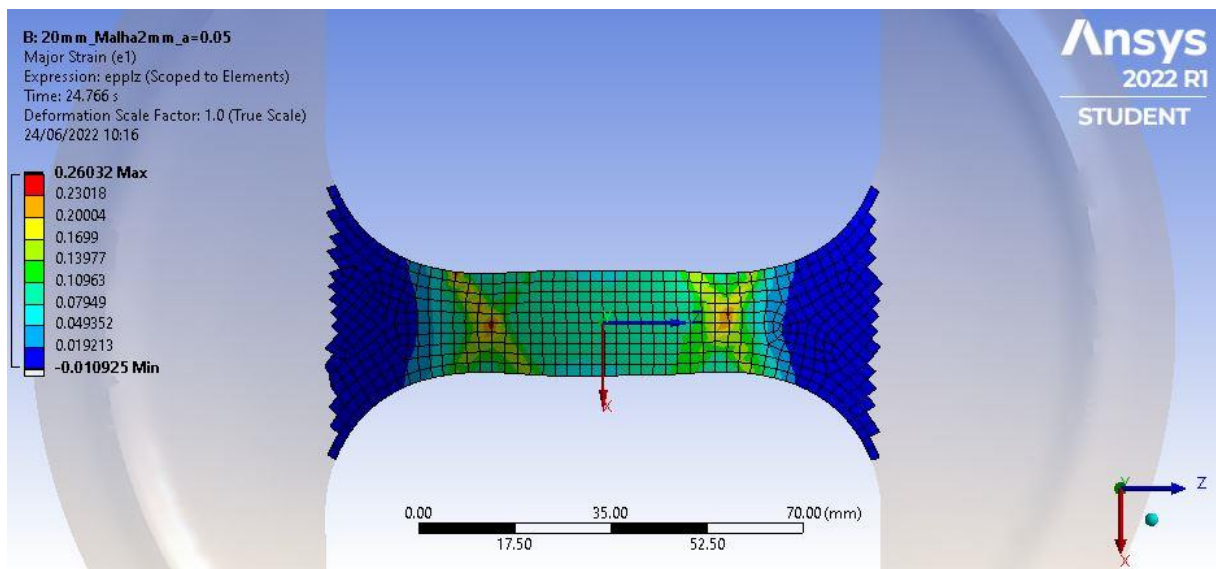


Figura AVIII.9 – Deformação ϵ_1 área útil amostra 20mm, $\mu=0,05$ (Vista Inferior)

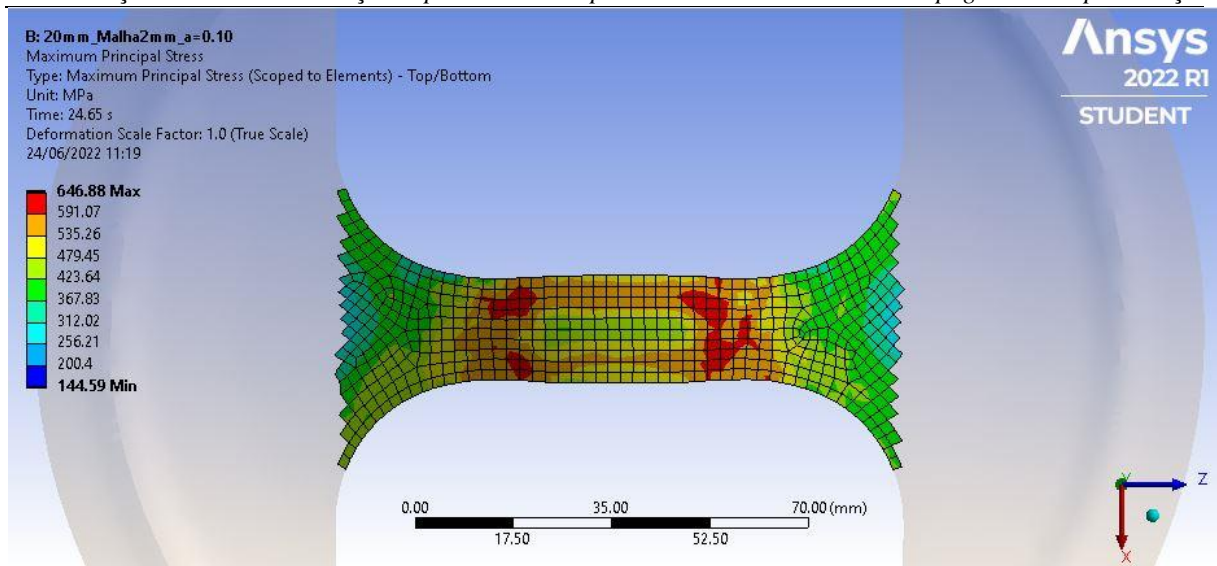


Figura AVIII.13 – Distribuição de tensões área útil amostra 20mm, $\mu=0,10$ (Vista Inferior)

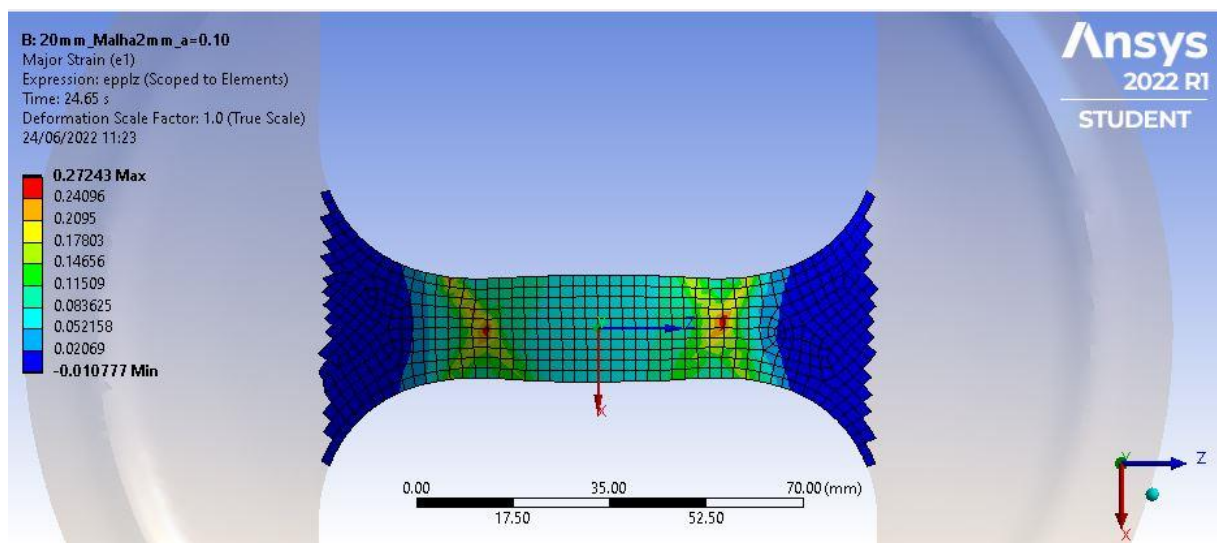


Figura AVIII.14 – Deformação ε_1 área útil amostra 20mm, $\mu=0,10$ (Vista Inferior)

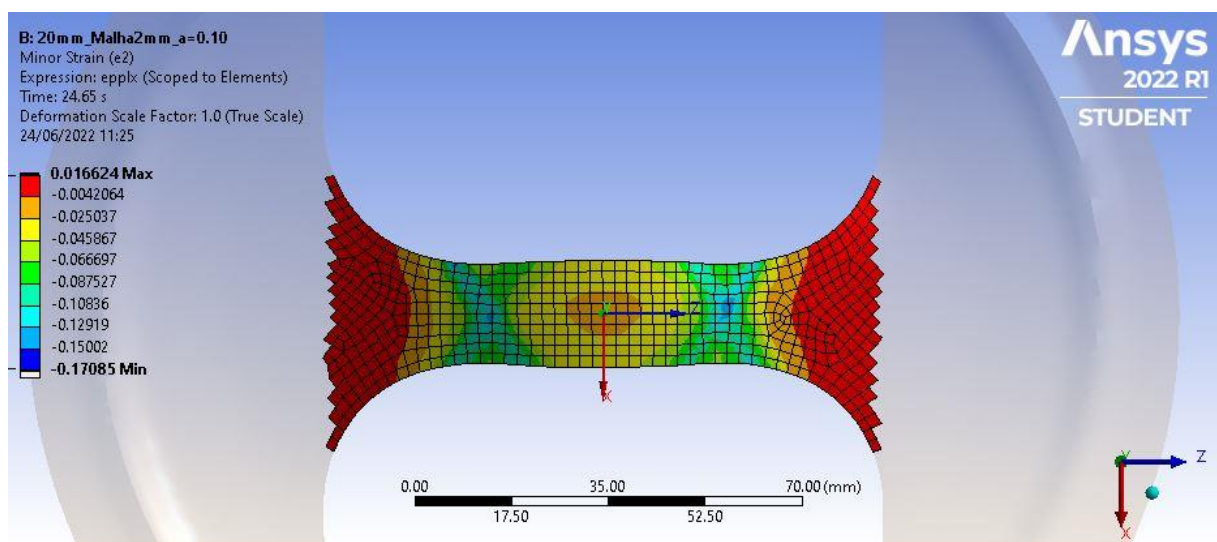


Figura AVIII.15 – Deformação ε_2 área útil amostra 20mm, $\mu=0,10$ (Vista Inferior)

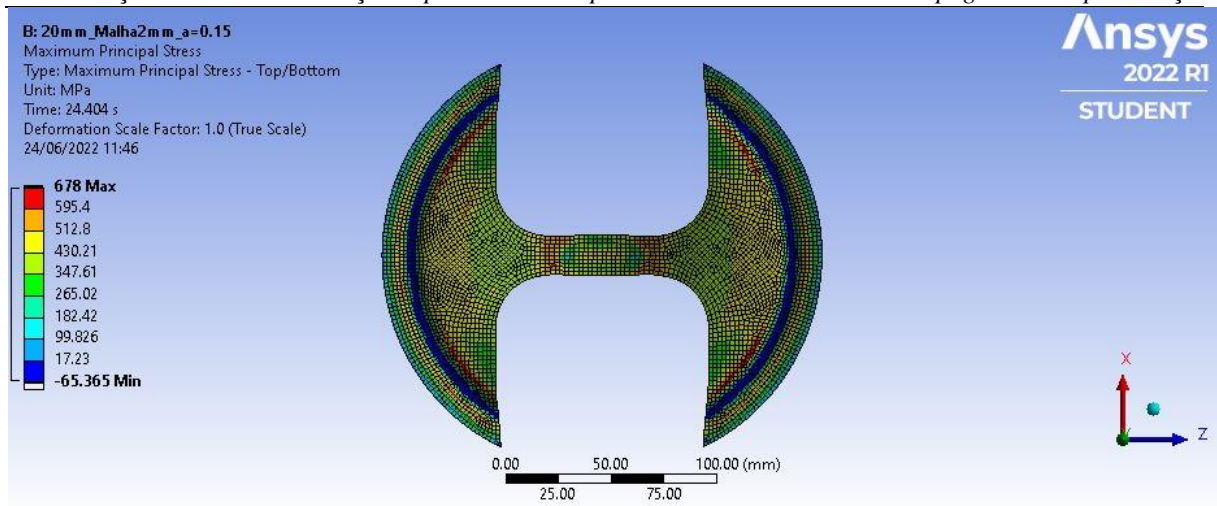


Figura AVIII.16 – Distribuição de tensões amostra 20mm, $\mu=0,15$ (Vista Superior)

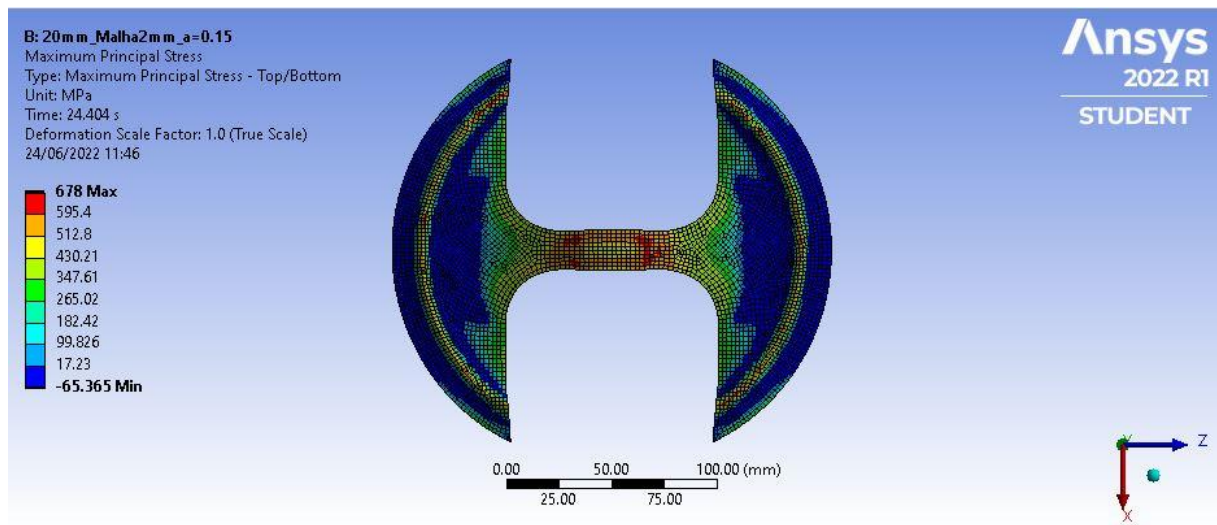


Figura AVIII.17 – Distribuição de tensões amostra 20mm, $\mu=0,15$ (Vista Inferior)

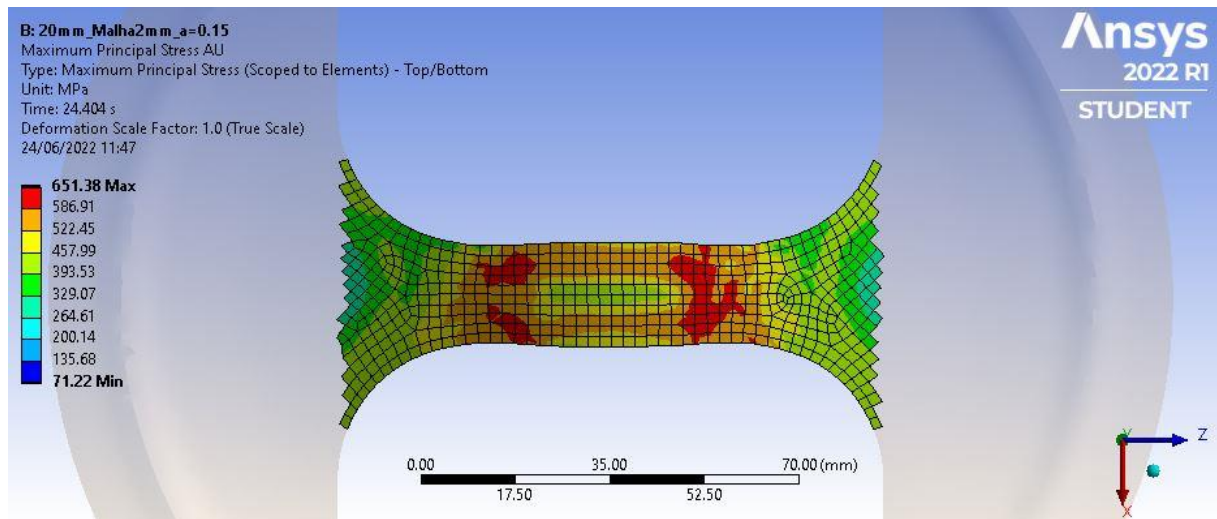


Figura AVIII.18 – Distribuição de tensões área útil amostra 20mm, $\mu=0,15$ (Vista Inferior)

Anexo IX – Simulações numéricas: Cálculos de deformações

Material	Eixo (mm)	Tempo (s)	F _{max} (N)	σ _{max pr} (Mpa)	X (mm)	ε _{eq max}	ε _{1 S1}	ε _{2 S1}	ε _{1 S2}	ε _{2 S2}	ε _{1 S3}	ε _{2 S3}
14510	20	24.404	8.24	651.38	20.43	0.372	0.175	-0.105	0.152	-0.095	0.154	-0.097
14510	40	26.637	18.51	628.17	22.65	0.235	0.170	0.169	-0.097	-0.080	0.165	-0.089
14510	60	28.036	30.08	648.21	24.04	0.183	0.127	-0.036	0.126	-0.036	0.127	-0.036
14510	80	27.735	34.41	657.52	23.73	0.234	0.119	-0.027	0.118	-0.028	0.118	-0.028
14510	100	25.409	34.00	656.13	21.39	0.420	0.089	-0.020	0.087	-0.020	0.090	-0.020
14510	210	28.262	61.91	684.13	24.26	0.354	0.140	0.093	0.136	0.093	0.140	0.089
14512	20	27.727	65.56	550.28	23.74	0.410	0.216	-0.151	0.230	-0.157	0.213	-0.150
14512	40	30.843	15.34	541.99	26.86	0.284	0.171	-0.106	0.172	-0.106	0.172	-0.106
14512	60	33.26	26.31	572.43	29.26	0.224	0.133	-0.041	0.134	-0.045	0.133	-0.043
14512	80	33.638	33.19	573.60	29.64	0.268	0.129	-0.028	0.129	-0.028	0.126	-0.027
14512	100	31.005	34.34	578.43	27.00	0.216	0.107	-0.041	0.106	-0.038	0.107	-0.041
14512	210	30.279	50.70	586.64	26.27	0.285	0.104	0.089	0.102	0.093	0.100	0.100