

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS – PPGE3M

**MATHEUS HENRIQUE RIFFEL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE AÇO INOXIDÁVEL  
FERRÍTICO AISI 430 PARA ESTAMPAGEM DE UM COMPONENTE  
NÃO-AXISSIMÉTRICO**

Porto Alegre

2022

**MATHEUS HENRIQUE RIFFEL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE AÇO INOXIDÁVEL  
FERRÍTICO AISI 430 PARA ESTAMPAGEM DE UM COMPONENTE  
NÃO-AXISSIMÉTRICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre

2022

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E MATERIAIS (PPGE3M)

Coordenador: Afonso Reguly

Coordenador Substituto: Andréa Moura Bernardes

MATHEUS HENRIQUE RIFFEL

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO  
AISI 430 PARA ESTAMPAGEM DE UM COMPONENTE NÃO-AXISSIMÉTRICO**

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

---

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

---

Coordenador: Prof. Dr. Eng. Afonso Reguly

Aprovado em: 16 de fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Folle (CIMATEC/BA) \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eng. Halston José Mozetic (UFRGS) \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eng. João Henrique Souza (FURG) \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente, ao Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer pelo apoio, tempo dedicado ao ensinamento e conhecimento transmitidos, e a dedicação empregados na construção do presente trabalho.

A minha família, meu pai Airton, minha mãe Maria Simone, minha irmã Monique e minha namorada Ketlyn, que são os principais incentivadores de minha qualificação profissional.

Ao meu grande amigo e colega de laboratório, MSc. Eng. Rafael Pandolfo, pelo constante apoio técnico, amizade e dedicação empregado para cada etapa deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas do CBCM/UFRGS, Dr. Eng. Diego Wermuth, MSc. Eng. Diego Alba, MSc. Eng. André Rosiak e MSc. Eng. Thomas Gomes pela atenção, amizade, parceria e ajuda com a realização de experimento e de simulação numérica, dedicados a um melhor entendimento dos processos.

Aos técnicos de laboratório Cezar Henrique e Luiz Ribas, pelo apoio e parceria na execução dos ensaio de caracterização do material.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela concessão da sua infraestrutura para elaboração de cada etapa deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro recebido.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS .....	12
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS .....	13
<b>2.1.1 Embutimento</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.2 Estiramento</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.3 Dobramento</b> .....	<b>16</b>
2.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	17
<b>2.2.1 Diagrama de Engenharia</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.2 Curva de Escoamento</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2.3 Índice de Anisotropia</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.4 Curva Limite de Conformação (CLC)</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.5 Índice Erichsen</b> .....	<b>24</b>
2.3 CÁLCULO DA GERATRIZ DE PEÇAS NÃO-AXISSIMÉTRICAS .....	25
2.4 RELAÇÃO DE ESTAMPAGEM .....	28
2.5 MODELO ANÁLITICO PARA O CÁLCULO DE FORÇA MÁXIMA .....	30
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	38
3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	38
<b>3.2.1 Diagrama de Engenharia</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.2 Curva de Escoamento</b> .....	<b>41</b>
3.4 CURVA LIMITE CONFORMAÇÃO (CLC) .....	44
3.5 ÍNDICE ERICHSEN .....	48
3.6 DIMENSIONAMENTO DA GERATRIZ .....	50
3.7 ENSAIO EXPERIMENTAL DE ESTAMPAGEM DA PEÇA NÃO-AXISSIMÉTRICA .....	51

<b>3.7.1 Método para Definição das Deformações Principais</b> .....	<b>54</b>
<b>3.7.2 Determinação da Variação de Espessura</b> .....	<b>55</b>
<b>4. METODO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>56</b>
4.1 DEFINIÇÃO DO TIPO DE MALHA .....	56
4.3 DEFINIÇÃO DO ATRITO .....	57
4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL.....	61
<b>5. ANÁLISE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>62</b>
5.1 CÁLCULOS ANALÍTICOS .....	62
<b>5.1.1 Força Máxima de Estampagem</b> .....	<b>62</b>
5.2 RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	67
<b>5.2.1 Variação de Espessura</b> .....	<b>67</b>
<b>5.2.2 Deformações Principais Verdadeiras</b> .....	<b>69</b>
<b>5.2.3 Deformação Equivalente</b> .....	<b>75</b>
<b>5.2.4 Curva Limite Conformação (CLC)</b> .....	<b>78</b>
5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	80
<b>5.3.1 Determinação das Espessuras Medidas</b> .....	<b>80</b>
<b>5.3.2 Deformações Principais</b> .....	<b>82</b>
<b>5.3.3 Deformação Equivalente</b> .....	<b>89</b>
<b>5.3.4 Curva Limite Conformação (CLC)</b> .....	<b>92</b>
<b>6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>94</b>
6.1 FORÇA MÁXIMA DE ESTAMPAGEM.....	94
6.2 VARIAÇÃO DE ESPESSURA .....	95
6.3 DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS.....	95
6.4 DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE .....	96
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>97</b>
<b>8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>101</b>
<b>APÊNDICE A – MONTAGEM DAS FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM</b> .....	<b>107</b>
<b>APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO EM 2D DA MATRIZ</b> .....	<b>108</b>
<b>APÊNDICE C – DESENHO TÉCNICO EM 2D DO PRENSA-CHAPA</b> .....	<b>109</b>
<b>APÊNDICE D – DESENHO TÉCNICO EM 2D DO PUNÇÃO</b> .....	<b>110</b>

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é analisar o processo de estampagem de um componente não-axissimétrico, comparando os resultados obtidos experimentalmente com a simulação numérica das deformações principais, forças resultantes e variação de espessura. O material utilizado aço inoxidável ferrítico AISI 430, com espessura de 1mm. As propriedades mecânicas do material foram definidas por meio do ensaios de tração, anisotropia e de Nakazima modificado, foi feita a inserção no software de simulação numérica. No processo de estampagem das peças não-axissimétricas foram usadas 12 condições diferentes: variando-se duas forças de prensa-chapas, três condições de lubrificação e dois tamanhos de geratriz. Considerando os valores obtidos de força máxima de estampagem, foi possível identificar que a condição de lubrificação 1 foi a que apresentou menor coeficiente de atrito (quando comparadas com a condições de lubrificação 2 e 3), mesmo para a variação das 12 condições empregadas. Os resultados obtidos pela simulação numérica mostraram-se bastante semelhantes aos encontrados experimentalmente, sendo a direção de 45° em relação ao eixo central da peça, a crítica para a geometria do componente. Não foi encontrada variação expressiva para as 12 condições empregada neste estudo, em análise (três lubrificantes, duas forças de prensa chapas e dois tamanhos de geratrizes), tanto para os resultados de força máxima de estampagem, deformações principais máximas e variação de espessura. A variação de espessura da peça, obtidas pela simulação numérica se assemelha aos resultados obtidos experimentalmente, com valores entre 0.8 à 1,15mm. Os resultados de deformações principais e equivalentes na simulação numérica demonstrou uma possível zona crítica da peça na curva CLC (havendo pontos localizados acima da curva CLC), localizada na região de entrada da matriz, experimentalmente algumas peças apresentaram o início de trinca da peça.

**Palavras-chaves:** Estampagem profunda. Simulação numérica. Estampagem não-axissimétricas. Aço inoxidável ferrítico AISI 430.



## ABSTRACT

The main objective of the present study is to analyze the stamping process of a non-axisymmetric component, by comparing the results obtained in experiment with the numerical simulation of the maximum and minimum principal deformations, resultant forces and thickness variation. The AISI 430 ferritic stainless steel was the material used in the present study, with a thickness of 1mm. The results obtained through tensile tests, anisotropy and modified Nakazima tests were inserted into the numerical simulation software. In the stamping process of the non-axisymmetric parts, 12 different conditions were applied, including variations such as two blank press forces, three lubrication conditions and two generator sizes. Taking into account the results for maximum stamping force, it was possible to identify that condition 1 concerning lubrication presented the lowest coefficient of friction, even considering the variation of the 12 different employed conditions. The numerical simulation showed very similar results to those found experimentally, with the direction of 45° in relation to the axis proving critical for the geometry of the component. No expressive variation was identified for the conditions under analysis (three lubricants, two press plate forces and two sizes of generators), including results for maximum stamping force, maximum principal strains and thickness variation. The variation of thickness suffered by the material shown in the numerical simulation is similar to the results obtained experimentally, presenting values between 0.8 to 1.15mm. The results of principal and equivalent deformations in the numerical simulation demonstrated a possible critical zone of the part in the CLC curve (with points located above the CLC curve) located in the matrix entry region, and, during the experiment, some parts showed the beginning of cracking in the part.

**Keywords:** Deep drawing. Numerical simulation. Non-axisymmetric stamping. AISI 430 ferritic stainless steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais processos de estampagem de chapas.....	14
Figura 2 – Exemplo do processo de embutimento..	15
Figura 3 – Ferramental para processo de estiramento.....	15
Figura 4 – Exemplos de ferramental de dobramento..	16
Figura 5 – Representação de uma curva típica de engenharia para aços..)	18
Figura 6 – Comparação entre a curva engenharia ( $\sigma \times \epsilon$ ) e a curva verdadeira ( $k_f \times \phi$ ) para matérias dúcteis..	20
Figura 7 – Direção para os cortes dos corpos de prova, imagem das deformações. ....	21
Figura 8 - Dimensões e formato dos CP's para determinação da CLC.....	23
Figura 9 – Representação do esquemática do ensaio de Nakazima, em mm..	24
Figura 10 – Representação tridimensional em corte (a), e bidimensional (b) da geometria das ferramentas para o ensaio de Erichsen. ....	25
Figura 11 – Planificação de uma cuba para dimensionamento da geratriz..	26
Figura 12 – Representação do desenho da metade superior da geratriz.....	27
Figura 13 – Representação dos diâmetros equivalentes de punção e geratriz, para uma estampagem retangular.....	29
Figura 14 – Representação das forças durante o processo de estampagem. ....	30
Figura 15 – Geometrias do ferramental e do geratriz para o cálculo da força máxima.....	31
Figura 16 – Curva de escoamento do aço inoxidável AISI 430, obtida através do ensaio de tração. ....	39
Figura 17 – Curvas de escoamento do aço inoxidável AISI 430 para cada direção de laminação. ....	41
Figura 18 – Dimensões dos corpos de prova para obtenção do índice de Anisotropia. ....	43
Figura 19 – Ferramental do ensaio de Nakazima modificado, montado na máquina. ....	45
Figura 20 – Régua para a medição das deformações principais.....	46
Figura 21 – Curva CLC variando três condições de lubrificação, do aço inoxidável ferrítico AISI 430. ....	46
Figura 22 – Curva Limite Conformação para o aço inoxidável AISI 430. ....	47
Figura 23 – Curva Limite Conformação para o aço inoxidável AISI 430. ....	47
Figura 24 – Curva Limite Conformação para o aço inoxidável AISI 430. ....	48
Figura 25 – Ferramental do ensaio de Erichsen. ....	49
Figura 26 – Formato da geratrizes (a) menor, e (b) menor. ....	51
Figura 27 – Montagem dos componentes para a estampagem da cuba na Dan Press.....	52
Figura 28 – Demonstrativo da operação de estampagem da cuba, dividido em 4 etapas.....	53
Figura 29 – Método empregado para medição das deformações experimentais (a) e para a simulação numérica (b)..	55
Figura 30 – Gráfico de força máxima de estampagem x deslocamento do punção, obtidos experimentalmente e numericamente para a condição de lubrificação 1, variando a força do prensa chapas tamanho de geratriz. ....	58
Figura 31 - Gráfico de força máxima de estampagem x deslocamento do punção, obtidos experimentalmente e numericamente para a condição de lubrificação 2, variando a força do prensa chapas tamanho de geratriz .....	58
Figura 32 - Gráfico de força máxima de estampagem x deslocamento do punção, obtidos experimentalmente e numericamente para a condição de lubrificação 3, variando a força do prensa chapas tamanho de geratriz .....	59
Figura 33 – Variação de espessura na simulação numérica, aplicando a condição de lubrificação 1, e suas variações de prensa chapas e duas geratrizes. ....	67

Figura 34 – Variação de espessura na simulação numérica, aplicando a condição de lubrificação 2, e suas variações de prensa chapas e duas geratrizes. ....	68
Figura 35 - Variação de espessura na simulação numérica, aplicando a condição de lubrificação 3, e suas variações de prensa chapas e duas geratrizes. ....	68
Figura 36 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, nas condições de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.....	69
Figura 37 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem, para geratriz pequena, nas condições de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.....	70
Figura 38 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.....	70
Figura 39 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.....	71
Figura 40 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.....	71
Figura 41 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.....	72
Figura 42 – Comportamentos das deformações principais, na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.....	72
Figura 43 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.....	73
Figura 44 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.....	73
Figura 45 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.....	74
Figura 46 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.....	74
Figura 47 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.....	75
Figura 48 – Resultados das deformações equivalentes obtidas na simulação computacional para a condição de lubrificação 1, variando a força do prensa chapas e duas geratrizes.....	76
Figura 49 – Resultados das deformações equivalentes obtidas na simulação computacional para a condição de lubrificação 2, variando a força do prensa chapas e duas geratrizes.....	76
Figura 50 – Resultados das deformações equivalentes obtidas na simulação computacional para a condição de lubrificação 3, variando a força do prensa chapas e duas geratrizes.....	77
Figura 51 – Simulação numérica da cuba, com regiões de possível fratura da peça.....	78

Figura 52 – Resultado da curva CLC plotadas após a simulação numérica para a condição de lubrificação 1, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes. ....	79
Figura 53 – Resultado da curva CLC plotadas após a simulação numérica para a condição de lubrificação 2, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes. ....	79
Figura 54 – Resultado da curva CLC plotadas após a simulação numérica para a condição de lubrificação 3, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes. ....	80
Figura 55 – Resultados experimentais para as direções de 0° e 45°, variando a força do prensa-chapas, o tamanho de geratriz, condição de lubrificação 1. ....	81
Figura 56 – Resultados experimentais para as direções de 0° e 45°, variando a força do prensa-chapas, o tamanho de geratriz, condição de lubrificação 2. ....	81
Figura 57 – Resultados experimentais para as direções de 0° e 45°, variando a força do prensa-chapas, o tamanho de geratriz, condição de lubrificação 3. ....	82
Figura 58 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar. ....	83
Figura 59 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar. ....	83
Figura 60 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar. ....	84
Figura 61 – Comportamentos das deformações principais, no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar. ....	84
Figura 62 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena na condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar. ....	85
Figura 63 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar. ....	85
Figura 64 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, nas condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar. ....	86
Figura 65 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar. ....	86
Figura 66 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar. ....	87
Figura 67 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar. ....	87
Figura 68 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar. ....	88
Figura 69 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar. ....	88
Figura 70 – Resultados das deformações equivalentes obtidos experimentalmente para a condição de lubrificação 1, variando a força do prensa chapas e os dois tamanhos geratrizes. ....	90
Figura 71 – Resultados das deformações equivalentes obtidos experimentalmente para a condição de lubrificação 2, variando a força do prensa chapas e os dois tamanhos geratrizes. ....	90
Figura 72 – Resultados das deformações equivalentes obtidos experimentalmente para a condição de lubrificação 3, variando a força do prensa chapas e os dois tamanhos geratrizes. ....	91
Figura 73 – Resultado da curva CLC, plotadas após o experimento, para a condição de lubrificação 1, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes. ....	92
Figura 74 – Resultado da curva CLC, plotadas após o experimento, para a condição de lubrificação 2, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes. ....	93
Figura 75 – Resultado da curva CLC, plotadas após o experimento, para a condição de lubrificação 3, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mínima relação de estampagem ( $mR$ ) admitida para estampagem de peças não-axissimétricas em função de cada material.....	30
Tabela 2 – Composição química do material em estudo (em porcentagem), obtido experimentalmente, e comparando com a literatura.....	38
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430,.....	40
Tabela 4 – Índice de encruamento ( $n$ ) e constante ( $C$ ) do aço inox AISI 430. ....	42
Tabela 5 – Coeficientes de anisotropia médio ( $rm$ ) e anisotropia planar ( $\Delta r$ ) do aço inox AISI 430. ....	44
Tabela 6 – Os Índices de Erichsen e as respectivas forças máximas para cada condição de lubrificação, valores obtidos na literatura.....	49
Tabela 7 – Variáveis escolhidas para o cálculo das dimensões geratriz. ....	50
Tabela 8 – Parâmetros do processo de estampagem, e suas respectivas variáveis.....	54
Tabela 9 – Informações inseridas no software Simufact Forming 15. ....	60
Tabela 10 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430 para as três direções de laminação, inseridos no software Simufact Forming 15. ....	61
Tabela 11 – Variáveis necessárias para o cálculo de força máxima de estampagem por Rivas-Menchi et al. (2018).....	63
Tabela 12 – Variáveis para o cálculo de força máxima de estampagem, por Rodrigues e Martins (2008). ....	65
Tabela 13 – Resultados de força máxima obtidos analiticamente e ensaio experimentais. ....	94

## **ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – Instituto Americano do Ferro e do Aço (American Iron and Steel Institute)

CP's – Corpos de Prova.

CLC – Curva Limite Conformação

FEM – Método dos elementos finitos (Finite Element Method)

IE – Índice Erichsen

ISO – Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)

LdTM – Laboratório de transformação mecânica

LAFUN – Laboratório de fundição.

NBR – Norma Técnica Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_i$ = área instantânea	[mm <sup>2</sup> ]
$A_c$ = área do geratriz circular	[mm <sup>2</sup> ]
$A_r$ = área do geratriz retangular ou quadrado	[mm <sup>2</sup> ]
$A_{p,c}$ = área da superfície da cabeça do punção circular	[mm <sup>2</sup> ]
$A_{p,r}$ = área da superfície da cabeça do punção quadrado ou retangular	[mm <sup>2</sup> ]
$A_0$ = área inicial do corpo de prova	[mm <sup>2</sup> ]
$A, B$ = arestas planas do fundo do cuba	[mm]
$a, b$ = aresta da seção transversal do punção	[mm]
$b_0$ = largura inicial, dos corpos de prova	[mm]
$b$ = largura final, dos corpos de prova	[mm]
$b_i$ = largura externa, dos corpos de prova	[mm]
$b_u$ = largura útil, dos corpos de prova	[mm]
$C$ = coeficiente de resistência, $\varphi = 1$ na curva de escoamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$c$ = folga entre a punção e a matriz	[mm]
$D_b$ = diâmetro da geratriz para peças circulares	[mm]
$d_p$ = diâmetro do punção para peças circulares	[mm]
$D_{b,e}$ = diâmetro equivalente da geratriz	[mm]
$d_{p,e}$ = diâmetro equivalente do punção quadrado ou retangular	[mm]
$d_0$ = diâmetro inicial do círculo	[mm]
$d_l$ = altura final da elipse	[mm]
$d$ = deslocamento do punção	[mm]
$F_{bh}$ = força aplicada pelo prensa-chapas	[kN]
$F_{bh_c}$ = força aplicada pelo prensa-chapas nos cantos arredondados	[kN]
$F_{bh_l}$ = força aplicada pelo prensa-chapas nos cantos retos	[kN]
$F_i$ = força aplicada instantânea axialmente	[kN]
$F_p$ = força de estampagem	[kN]
$F_{p_c}$ = força de estampagem atuando nos cantos arredondados	[kN]
$F_{p_l}$ = força de estampagem atuando nas abas retas	[kN]
$F_{p,max}$ = força máxima de estampagem	[kN]
$F_N$ = força normal	[N]
$h$ = altura interna da cuba sem o raio do fundo	[mm]
$kf$ = tensão verdadeira de escoamento	[MPa]
$kf_{1,1}$ = tensão de escoamento na região do diâmetro externo do flange	[MPa]
$kf_{2,1}$ = tensão de escoamento na região de entrada e saída do raio da matriz	[MPa]
$kf_{1,2}$ = tensão de escoamento no momento da força máxima	[MPa]

$kf_{2,2}$ = tensão de escoamento no final do processo de estampagem	[MPa]
$kf_m$ = tensão de escoamento médio	[MPa]
$l_0$ = comprimento inicial	[mm]
$l$ = comprimento instantâneo do corpo de prova	[mm]
$l_a, l_b$ = comprimento auxiliares para o desenhos das geratrizes	[mm]
$m_r$ = coeficiente limite de estampagem para peça retangulares	[-]
$n$ = índice de encruamento	[-]
$p_B$ = perímetro do geratriz	[mm]
$p_m$ = perímetro médio da peça final	[mm]
$p_{bh}$ = pressão aplicada pelo prensa-chapas	[mm]
$Q_l$ = fator de correção para processo de dobramento em U	[-]
$R$ = raio de projeto da geratriz	[mm]
$R_1$ = raio corrigido de projeto da geratriz	[mm]
$R_a, R_b$ = raios dos arcos de arredondados das extremidades da geratriz	[mm]
$R_i$ = raio lateral	[mm]
$R_e$ = limite de escoamento	[MPa]
$R_m$ = limite de resistência	[MPa]
$r_0$ = raio de entrada do punção	[mm]
$r$ = coeficiente de anisotropia	[mm]
$r_{0^\circ}$ = coeficiente de anisotropia orientado a $0^\circ$ à direção de laminação	[-]
$r_{45^\circ}$ = coeficiente de anisotropia orientado a $45^\circ$ à direção de laminação	[-]
$r_{90^\circ}$ = coeficiente de anisotropia orientado a $90^\circ$ à direção de laminação	[-]
$r_m$ = coeficiente de anisotropia médio	[mm]
$r_b$ = raio do fundo da cuba	[mm]
$r_{cc}$ = raio da lateral da cuba	[mm]
$r_d$ = raio da entrada da matriz	[mm]
$r_{dc}$ = raio da lateral da matriz	[mm]
$r_{pb}$ = raio cabeça do punção	[mm]
$r_{pc}$ = raio da lateral do punção	[mm]
$r_l$ = raio do canto da matriz	[mm]
$r_2$ = raio do flange	[mm]
$s_0$ = espessura da chapa	[mm]
$s$ = espessura final da chapa	[mm]
$x$ = fator de correção para o cálculo da geratriz	[-]

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\Delta_l$ = deformação absoluta do comprimento do CP	[mm]
---	------



$\Delta_r$ = anisotropia planar	[-]
$\mu$ = coeficiente de atrito	[-]
$\eta$ = coeficiente de rendimento	[-]
$\sigma$ = tensão convencional ou de engenharia	[MPa]
$\delta$ = alongamento total	[%]
$\varphi_1$ = deformação verdadeira comprimento	[-]
$\varphi_s$ = deformação verdadeira espessura	[-]
$\varphi_b$ = deformação verdadeira largura	[-]
$\varepsilon$ = deformação relativa	[-]
$\varphi$ = deformação verdadeira	[-]
$\varphi_l$ = deformação verdadeira no comprimento	[-]
$\varphi_b$ = deformação verdadeira na largura	[-]
$\varphi_s$ = deformação verdadeira na espessura	[-]
$\varphi_1$ = deformação verdadeira máxima	[-]
$\varphi_2$ = deformação verdadeira mínima	[-]
$\varphi_3$ = deformação verdadeira perpendicular a superfície	[-]
$\varphi_{1,1}$ = deformação verdadeira na região do diâmetro externo do flange	[-]
$\varphi_{2,1}$ = deformação verdadeira na região do raio de entrada matriz	[-]
$\varphi_{3,1}$ = deformação verdadeira na região da parede da peça	[-]
$\varphi_{1,2}$ = deformação verdadeira no momento da força máxima	[-]
$\varphi_{2,2}$ = deformação verdadeira no final do processo de estampagem	[-]
$\varphi_{eq}$ = deformação equivalente	[-]

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de estampagem profunda pode ser considerado um dos processos mais importantes para a conformação de chapas metálicas, tendo uma vasta e variada aplicação desde utensílios de cozinha até componentes para naves espaciais. O processo configura aplicação de força exercida por punção, até a deformação permanente da peça dentro da cavidade (matriz), obtendo assim componentes de geometria simples e complexas (PADMANABHAN *et al*, 2007).

Durante a estampagem, um conjunto de operações (dobramento, estiramento e embutimento) podem ocorrer simultaneamente, cada uma delas sendo exercida em região especificada do componente estampado. O processo de estampagem profunda demonstra vantagens quando comparados aos demais processos de conformação, visto que para que se obtenha uma peça em perfeitas condições (acabamento final) é necessário o controle de uma variedade dos parâmetros (DWIVEDI; AGNIHOTRI; 2017).

Para quantificar o grau de conformabilidade de uma chapa metálica é preciso observar alguns parâmetros que afetam o processo de estampagem. Entre eles estão a força aplicada por punção, a força exercida pelo prensa chapas, o tipo de lubrificante utilizado, os tamanhos de raios tanto do punção quando da entrada da matriz, relação de estampagem e folga entre o punção e a matriz. Também deve-se levar em consideração as propriedades mecânicas do material, que por sua vez podem limitar o fluxo de material para a matriz, além do índice de encruamento, limite de escoamento, índice de anisotropia, limite de resistência, entre outros fatores (SHIM; YANG; 1997; PARK; KIM; 1995).

Um dos objetivos dos pesquisadores tem sido buscar a melhoria dos processos de estampagem com otimização, tendo em vista a melhoria de novas ferramentas e de produtos destinados ao processo de estampagem. Isto se deve à alta competitividade do mercado, com prazos mais curtos para desenvolvimento de produtos. Os novos métodos estudados incluem a digitalização do processo, a indústria 4.0 e a modelagem computacional, tendo em vista que eles possibilitam alta qualidade associada a estabilidade na produção de peça acabadas. Estes novos métodos substituem a metodologia atual empregada de “tentativa e erro”, uma vez que pela simulação numérica é possível fazer um planejamento do processo de estampagem e projeto de ferramentas pelo método de elementos finitos (FEM – Finite Element Method). Desta maneira, esta ferramenta tornou-se indispensável para a aplicação de qualquer processo de fabricação, com o intuito de ser possível obter peças com melhor qualidade no produto acabado, manter o controle no processo, atingir menos custo de produção evitando assim retrabalho com

peças, e ganhar tempo na realização de projetos e processos. (EVI; TOMÁS; VÝROSTEK, 2016; FAN; *et al.* 2006)

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é analisar três condições superficiais de lubrificação, duas condições de prensa-chapas e dois tamanhos de geratriz. Força máxima, deformações principais, variação de espessura representam os principais parâmetros a serem analisados para a estampagem de uma cuba. O material em análise é um aço inoxidável AISI 430 ferrítico, com espessura de 1 mm. O material foi selecionado devido às suas propriedades mecânicas, sua elevada resistência a corrosão e sua resistência a elevadas temperaturas. Para comparação com os resultados experimentais, foi feita simulação numérica no software da *Simufact Forming 15*®, com o intuito de encontrar as semelhanças entre os resultados.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem por objetivos específicos:

- Caracterizar a matéria prima afim de obter as propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430. Entre os fatores de análise estão a curva de engenharia, as curvas de escoamento, os coeficiente de anisotropia, índice de Erichsen e a curva limite de conformação;
- Analisar os resultados obtidos no processo de estampagem da cuba, para as três condições de lubrificação, as duas forças de prensa-chapas (5 e 10 MPa), e os dois tamanhos de geratriz. Foram analisadas também a força máxima e deformações principais;
- Realizar simulação numérica para as mesmas condições empregadas experimentalmente, no software *Simufact Forming 15*®;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os apresentados na simulação (força máxima, deformações e variações de espessura);

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS**

A conformação de metais consiste em deformar plasticamente o material em questão. As propriedades de deformação fazem com que o material alcance à forma desejada com a aplicação de uma força mecânica de trabalho, através do melhor método empregado. Além disso, são conduzidas modificações na estrutura do material como a diminuição do tamanho de grão e aumento da resistência ao escoamento, devido ao tamanho de grão (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

Conforme destacado por SCHAEFFER (2017), com o passar dos anos o processo de estampagem de chapas metálicas está ficando mais competitivo devido a diversos fatores. Entre eles estão a complexidade de peças estampadas, redução de custo de manufatura, peças com melhor acabamento superficial, com objeto de ganho na qualidade e redução de custos. A estampagem é aplicada principalmente para aços, mas pode ser empregada em matérias como alumínio, cobre, entre outros. O setor que possui uma aplicação mais extensa deste processo é o automobilístico, mas são incluídos também os setores de eletrodomésticos, eletrônicos, moveleiro, aeroespacial, entre outros, de aplicação em todo o mundo.

O processo de conformação aplicado por FERREIRA (2006) e DIETER (1981) apresenta dois métodos de conformação: conformação plástica e conformação por cisalhamento. Na conformação plástica, as tensões aplicadas durante o processo devem ser inferiores à tensão de escoamento do material para que não ocorram defeitos na peça, e o volume e a massa da peça são mantidos. Já na conformação por cisalhamento, as tensões aplicadas no processo devem ser superiores à tensão de escoamento, de maneira que seja possibilitada a remoção do material durante o processo, chegando ao formato da peça final.

A figura 1 demonstra os principais processos de estampagem de chapas metálicas, que são divididos em quatro áreas: embutimento, estiramento, dobramento e corte.

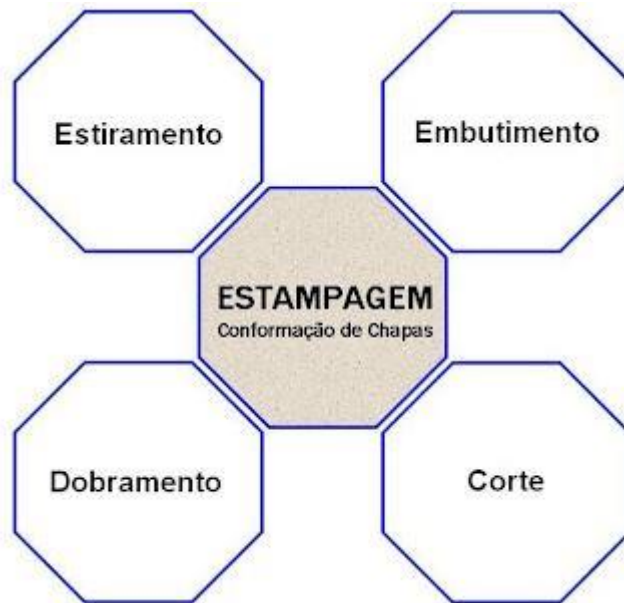


Figura 1 – Principais processos de estampagem de chapas. Fonte: SOUZA (2023).

### 2.1.1 Embutimento

O processo de estampagem profunda ou embutimento profundo são adotados amplamente na confecção de diversos produtos sem que haja a necessidade de remoção (processo de usinagem) ou ainda de união (processo de soldagem). Devido à alta produtividade de peça (dependendo da complexidade da peça), que pode chegar em torno de 5.000 peças/hora, e dependendo dos esforços envolvidos para que seja executado o processo de deformação plástica, se faz necessário o uso de ferramentas de aço de alta resistência. Os componentes para este método são constituídos de matriz, prensa-chapas e punção (DUDHTA, *et al.* 2017; TIWARI, RATHORE, BODJHE. 2022).

O processo de embutimento se dá quando ocorre deslocamento do punção e do prensa-chapas até a chapa metálica com geometria calculada (geratriz), que é apoiada na matriz. A função do punção é fazer com que a geratriz penetre no molde da matriz (figura 2). O prensa-chapas tem por finalidade o prensagem da geratriz sobre a matriz, transferindo uma determinada resistência para o fluxo do material, que está em deslocamento para dentro do molde, com o intuito de evitar defeitos na peça. O fluxo do material ocorre de forma radial para dentro da matriz, onde o deslocamento ocorre no prensa-chapas, ocasionando uma dobra e desdobra da chapa ocorrentes no raio da entrada da matriz e o estiramento na região da parede interna. O esforço necessário para a execução do processo de estampagem (deformação plástica) varia de acordo com a força aplicada pelo prensa-chapas e é somada ainda à força de atrito, resultante do contato entre as ferramentas e a geratriz (DUDHTA, *et al.* 2017; TIWARI, RATHORE, BODJHE. 2022).

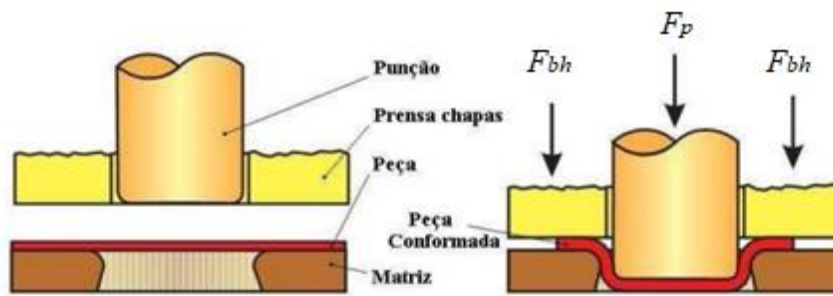


Figura 2 – Exemplo do processo de embutimento. Fonte: SCHULER (1998).

O processo de embutimento é classificado como um dos mais complexos (conformação mecânica), devido às tensões e deformações decorrentes do processo. Além disso, devem ser considerados os parâmetros que atuam entre si e que afetam também a qualidade final do produto acabado. Entre esses estes parâmetros estão a geometria (raio da matriz, raio do punção, espessura de chapa, folga entre ferramentas etc.), as propriedades da chapa (módulo de elasticidade, limite de resistência, tensão de escoamento etc.) e as especificações de processo (força de prensa-chapas, força máxima de estampagem, coeficiente de atrito, velocidade de deslocamento da máquina etc.). Através do conhecimento destas informações é possível que se alcance uma melhor qualidade na peça acabada, e ainda se evita o desgaste precoce das ferramentas (DUDHTA, *et al.* 2017; TIWARI, RATHORE, BODJHE. 2022).

### 2.1.2 Estiramento

O processo de estiramento é caracterizado por um estado biaxial de deformações, decorrentes de tensões trativas perpendiculares entre si, que atuam no plano da chapa (figura 3). No processo a chapa metálica é empurrada por uma força exercida pelo punção para adentro da cavidade da matriz, enquanto as suas extremidades ficam fixadas pela aplicação de força do prensa-chapas, atuando como freio da estampagem. O processo na região do raio de dobramento intercorre sobre posição de dobramento e estiramento (LUIZ, 2022).

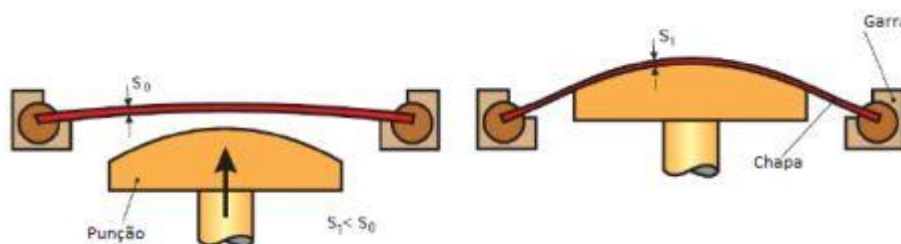


Figura 3 – Ferramental para processo de estiramento. Fonte: SCHULER (1998).

Para que se tenha um comportamento uniforme no processo de estiramento, é imprescindível que as deformações no processo ocorram de forma homogênea, retardando assim o início da estricção na peça (afinamento localizado), que posteriormente poderá levar à ruptura. Dependendo da complexidade da estampagem, elas sempre apresentam afinamento. Alguns componentes fabricados por estiramento são painéis externos de carros, partes com abaulamento, e reforços de alongamentos. (LUIZ, 2022)

### 2.1.3 Dobramento

O processo de dobramento possibilita a obtenção de uma ampla variedade de aplicações, incluindo geometria simples a complexas, que são inteiramente ligadas ao processo de fabricação. De acordo com Dieter (1981), no processo de dobramento é possível transformar arames, barras, tubos e chapas, de geometria retas em seções tubulares, quadradas, retangulares ou circulares. Para seja possível a obtenção das geometrias requeridas é necessário um ferramental dimensionado para o processo de maneira que ele exerça os esforços necessários de flexão, e também um determinado ângulo desejado em dobramento livre ou ainda a medida do ângulo fixo na matriz.

A figura 4 demonstra dois exemplos de dobramento – dobramento do tipo “U”, e o dobramento do tipo “V”. No dobramento do tipo “V” é exercida uma força pelo punção, que se desloca verticalmente até a chapa, transferindo uma deformação na chapa até o contato final da matriz. Já o dobramento do tipo “U” possui as mesmas características do dobramento em “V” – as principal mudança neste processo é o ângulo do punção. Em alguns casos ocorre a aplicação de um contra punção, atuado por molas, que exerce contra tensão (mesma função do prensa-chapas), auxiliando no deslocamento da chapa, e evitando assim possíveis defeitos de empenamento (CHO, *et al.*; 2003).

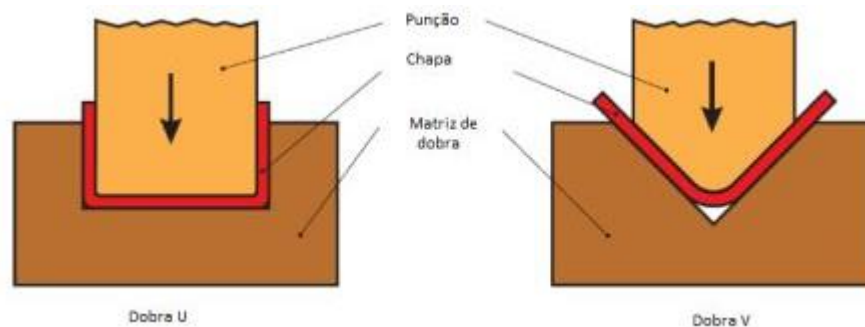


Figura 4 – Exemplos de ferramental de dobramento. Fonte: SCHULER (1998).

Os defeitos no processo de dobramento configuram variação da espessura, ruptura e variação dimensional no ângulo de dobra. Para Tsoupis (2014), os defeitos de trinca decorrentes no processo de dobramento são decorrentes na região onde se dá a tensão de tração do material, que fica disposta na parte externa da chapa (região oposta ao punção). É possível ainda minimizar este efeito quando o sentido de laminação da chapa é perpendicular a linha de dobra.

## 2.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Durante os processos de embutimento profundo, inicialmente a chapa metálica é submetida a deformações plásticas, com variáveis níveis de tensões e deformações, até que se obtenha o formato final da peça estampada. Sendo assim, é necessário que se tenha um conhecimento inicial das propriedades mecânicas do material, o que também facilita no projeto das ferramentas para o processo e na otimização dos processos de estampagem a serem executados. (BRUSCHI, *et al.* 2014)

As propriedades mecânicas têm por objetivo apresentar o desempenho que o material terá, quando exigido esforços externos manifestando assim a sua capacidade apresentar deformações reversíveis e irreversíveis, além da ocorrência de defeitos. E ainda temos o grau de estampabilidade, que apresenta o quanto o material poderá ser deformado plasticamente sem a ocorrência de ruptura. Cada material teria um comportamento específico, que normalmente pode ser identificado pelo início de um afinamento localizado, tendo assim uma fratura dúctil. (KEELER; 1966; BRUSCHI, *et al.* 2014)

### 2.2.1 Diagrama de Engenharia

O ensaio de tração possui uma ampla aplicação devido às informações que é possível ser retirado do ensaio como resistência do material, e ainda para que se tenha um controle das especificações que auxiliam no projeto e na fabricação de peças e componentes mecânicos. No ensaio de tração, o corpo de prova tem suas dimensões padronizadas, e é submetido a uma carga uniaxial crescente até a ruptura do corpo de prova. Durante o decorrer do ensaio é feita a medição dos valores de carga aplicada ( $F_i$ ) e de alongação da amostra ( $\Delta l$ ). Após a finalização do ensaio é realizado o tratamento dos dados coletados, obtendo-se resultados quantitativos do material, de suas propriedades mecânicas, como: Limite de Resistência ( $R_m$ ), Limite de



Escoamento ( $R_e$ ), Módulo de Elasticidade ( $E$ ), Alongamento total ( $\delta$ ), Índice de Encruamento ( $n$ ) e Coeficiente de Resistência ( $C$ ) (DAVIS, 2004).

Na curva tensão x deformação de engenharia (figura 5), é possível obter algumas das principais propriedades mecânicas do material. A curva é obtida através da plotagem das informações de tensão longitudinal desenvolvida pelo corpo de prova ( $\sigma$ ), pela função da deformação relativa no comprimento ( $\epsilon$ ). Quando aplicada a carga para o ensaio de tração, é ultrapassada a região 1 (figura 5) e o material fica permanentemente deformado. Com o avanço progressivo desta deformação elástica, aumenta-se o tensão para dar continuidade ao processo da deformação plástica. Este método é denominado encruamento (região 2) (figura 5). Com o aumento da tensão necessária por outro lado ocorre uma redução da área da seção do corpo de prova, por causa da alongação do corpo de prova. Quando se chega a uma de redução excessiva da área de seção, em decorrência das concentrações das tensões elevadas, é diminuída a resistência do material, e assim acontece um afinamento abrupto, conhecido como empescoçamento. Com o surgimento do empescoçamento, ocorre a aplicação de carga máxima aplicada para o ensaio, sendo assim definida a Resistência Máxima ( $R_m$ ). Conforme a continuidade do ensaio, a tensão e força do ensaio vão diminuir, até que se atinja a ruptura do corpo de prova (DIETER, 1981).

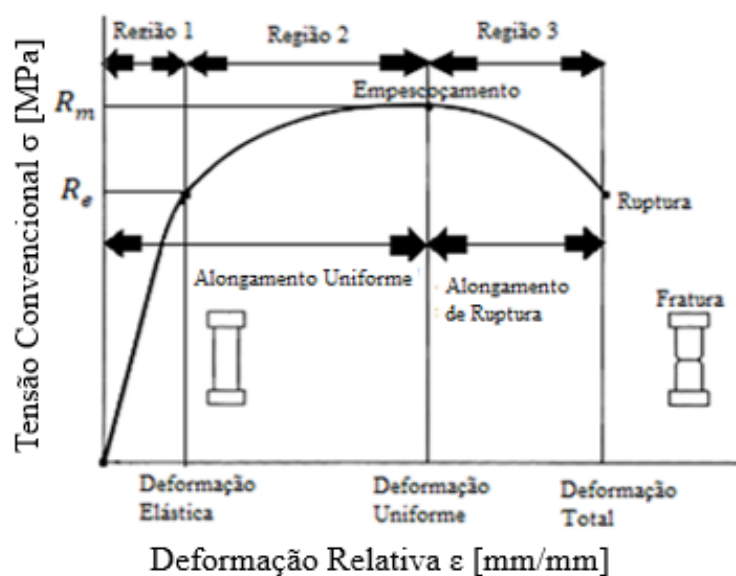


Figura 5 – Representação de uma curva típica de engenharia para aços. Adaptada DAVIS (2004).

A tensão convencional de engenharia ( $\sigma$ ) é definida pela força aplicada ( $F_i$ ) e área inicial da seção transversal ( $A_0$ ), a deformação relativa ( $\epsilon$ ), é determinada pela razão entre a

deformação absoluta do corpo de prova ( $\Delta l$ ), e pelo seu comprimento inicial ( $l_0$ ), estabelecida através das equação 1 e 2.

$$\sigma = \frac{F_i}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

### 2.2.2 Curva de Escoamento

A curva tensão – deformação relativa não demonstra os comportamentos corretos das tensões e deformações plástica do material. Isso se dá, pois as equações 1 e 2 levam em consideração as dimensões inicial do corpo de prova, visto que no decorrer do ensaio ela é alterada. Sendo assim, se faz necessário obter os dados de tensão verdadeiros através da área instantânea do corpo de prova. Desta maneira, são obtidas as características de escoamento do material por meio da Curva Tensão – Deformação Verdadeira, denominada também como Curva de Escoamento. A construção da Curva de Escoamento ocorre a partir dos dados de tensão e deformação verdadeiras dentro da região da deformação plástica. Quando comparada à curva engenharia, é possível observar que a curva de escoamento se diferencia pelo fato de que, mesmo com a redução repentina na área da seção transversal do corpo de prova por decorrência da formação do pescoço (após a  $F_{máx.}$ ), o material ainda permanece encruando até a ruptura do material. Desta maneira, não há a redução da tensão longitudinal. Mesmo havendo uma redução da força aplicada, a redução da área do pescoço compensa essa redução de força, fazendo assim com que a tensão permaneça em crescimento até a ruptura do material (figura 6) (DIETER, 1981; DAVIS, 2004)

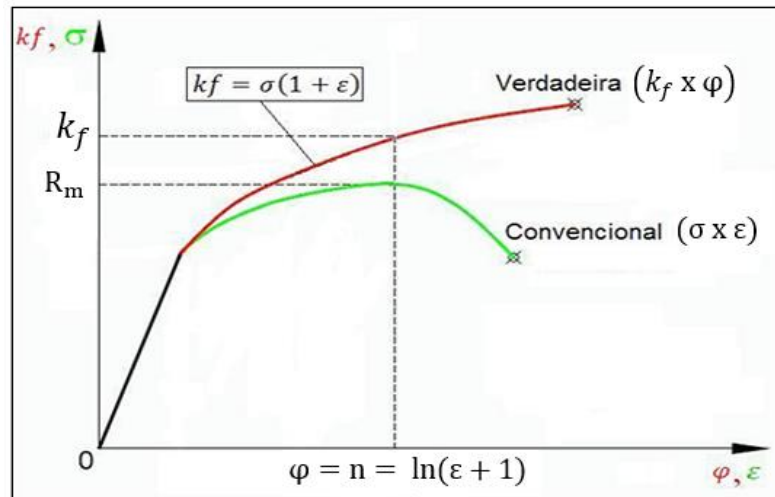


Figura 6 – Comparação entre a curva engenharia ( $\sigma \times \varepsilon$ ) e a curva verdadeira ( $k_f \times \varphi$ ) para matérias dúcteis.  
 Fonte: SCHAEFFER E ROCHA (2007).

Para que seja possível obter o valor da tensão verdadeiras ( $k_f$ ), a equação é expressa pela carga aplicada ( $F_i$ ) e pela área instantânea do corpo de prova ( $A_i$ ). Pode assim ser reescrita da mesma forma da tensão de engenharia ( $\sigma$ ) e a deformação relativa ( $\varepsilon$ ), descrita pelas equações 3 e 4. (DAVIS, 2004)

$$k_f = \frac{F_i}{A_i} \quad (3)$$

$$k_f = \sigma \cdot (\varepsilon + 1) \quad (4)$$

Já a deformação verdadeira ( $\varphi$ ) leva em consideração o comprimento instantâneo do corpo de prova ( $l$ ), e o comprimento inicial do corpo de prova ( $l_0$ ), também podendo ter uma relação com a deformação relativa ( $\varepsilon$ ), como descrito nas equações 5 e 6. Quando inicia-se o pescoço, as duas equações apresentadas anteriormente não possuem validade, uma vez que elas admitem um volume da amostra constante, bem como as distribuições das deformações ocorre uniformemente pelo comprimento que está sendo ensaiado. Para a região após a formação do pescoço deve ser analisada a equação 7, que leva em consideração a área inicial ( $A_0$ ) e a área instantânea no pescoço ( $A_i$ ) (DAVIS, 2004; DIETER, 1981).

$$\varphi = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (5)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (6)$$

$$\varphi = \ln\left(\frac{A_0}{A_i}\right) \quad (7)$$

A curva de escoamento pode ainda, ser descrita através da Lei de Ludwik-Hollomon (equação 8), que é expressa por uma relação de potencial simples.

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (8)$$

### 2.2.3 Índice de Anisotropia

O processo de laminação oferece heterogeneidade aos materiais, e com isto os grãos podem variar de valores quando variando a direção de laminação, em que são retirados os corpos de prova. E para quantificar essa variação da direção de laminação, calcula-se o Índice de Anisotropia ( $r$ ) (BANABIC, 2016). A figura 7 ilustra as direções de laminação e os índices de variação na altura, espessura e largura.

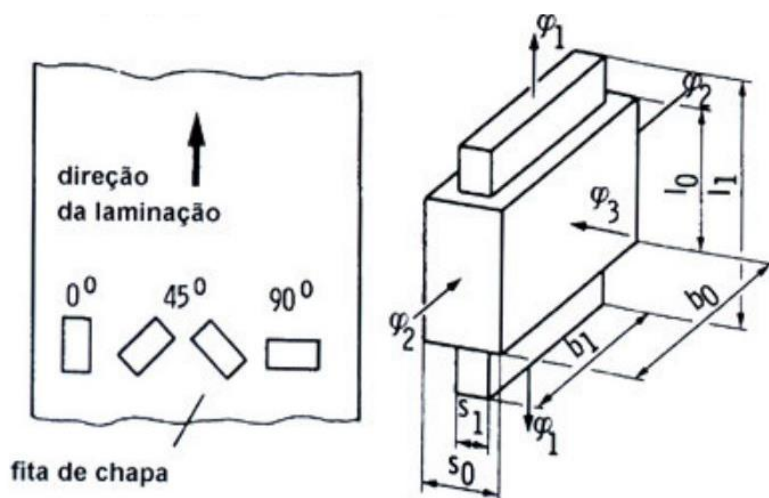


Figura 7 – Direção para os cortes dos corpos de prova, imagem das deformações. Fonte: SCHAEFFER (2017).

O coeficiente de anisotropia ( $r$ ) é utilizado para medição dos níveis anisotropia de uma determinada amostra. Devem ser retiradas amostras em três direções de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Após o ensaio, são obtidas as deformações verdadeiras na espessura ( $\varphi_s$ ) na largura ( $\varphi_b$ ) pela equação 10. (BANABIC, 2010)

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (10)$$

Devido à imprecisão na medição da espessura, o valor é encontrado pela lei da constância de volume, por isso o valor o deformação na espessura ( $\varphi_s$ ) é substituído por ( $\varphi_b + \varphi_l$ ), conforme equação 11.

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad (11)$$

O coeficiente de anisotropia médio ( $r_m$ ), é utilizado para quantificar o índice de anisotropia ( $r$ ). Os corpos de prova são retirados nas direções de laminação  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , que devem ser calculados pela equação 12. A anisotropia média é definida pela habilidade que chapa tende a resistir ao afinamento, sendo assim quanto maior for o valor de anisotropia médio, maior será a tendência ao afinamento (GROVEER, 2010).

$$r_m = \frac{(r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ})}{4} \quad (12)$$

Por este modo a variação do coeficiente da anisotropia, com relação a direção de laminação das chapas metálicas, é denominado de anisotropia plana ( $\Delta_r$ ), apresentada equação 13. Ela é indicada pela diferença de comportamento que o material pode apresentar nas diferentes direções de laminação. A qualificação se um material é isotrópico se dá para matérias que apresentarem  $r_m$  próximo de 1 e  $\Delta_r$ , próximo de 0 (BANABIC, 2016).

$$\Delta_r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2.r_{45^\circ}}{2} \quad (13)$$

#### 2.2.4 Curva Limite de Conformação (CLC)

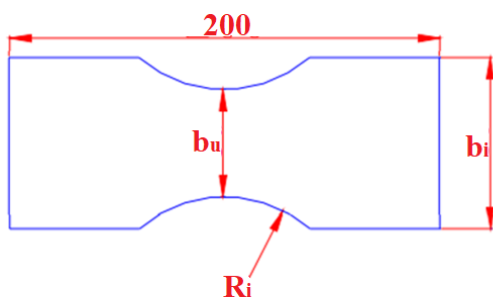
Uma das formas de se analisar os limites máximos de deformação de chapas estampadas é através da análise da Curva Limite Conformação (CLC). Através da curva é possível conhecer os limites de deformações principais do material e estes limites são definidos como limites permissíveis e catastróficos da chapa metálica. Este ensaio é qualificado como um critério de falha (HUSSAINI, 2015).

A curva CLC é composta pelos limites máximos de deformação que uma chapa consegue suportar sem a ocorrência de ruptura ou estricção, por meio de duas deformações principais máximas ( $\varphi_1$ ) e mínimas ( $\varphi_2$ ), e a partir das deformações é gerada uma curva. A curva associa as maiores deformações iniciadas na ruptura do material (plotadas no eixo das

ordenadas), e as menores deformações (plotadas no eixo das abcissas), como resultantes de tensões trativas ou compressivas do material. Salienta-se que qualquer combinação de deformações apresentadas abaixo desta curva, representa uma condição segura de estampagem. Entretanto, as deformações que ficarem acima da curva tendem à ruptura do material (BHADURI, 2018; ROCHA *et al.* 2022).

Para construção da curva CLC, Keller (1966) sugeriu a execução dos ensaios experimentais em que as deformações sofrem estiramento (decorrente das tensões trativas), sendo os dados constituintes limitados ao lado direito da curva CLC. Goodwin (1968), por outro lado, executou os ensaios obtendo as condições que são típicas de embutimento profundo (sendo atuantes de tensões trativas e compressivas), conseguindo assim as deformações críticas que constituem o lado esquerdo da curva CLC (BANABIC, *et al.* 2013; NETTO, 2018).

O método empregado atualmente é o de Nakazima (1968). Este autor compreende os dois lados da curva CLC, incluindo as deformações tanto de embutimento como de estiramento, descrevendo assim as deformações críticas para os dois lados da curva CLC. Em ensaio proposto por Nakazima (1968), os corpos de prova possuem uma geometria retangular, variando apenas as larguras das amostras. O ensaio foi aprimorado e foram feitos entalhes nos corpos de prova (figura 8), em que focassem a ruptura do material para a região central do corpo de prova, também aumentando as deformações na região no sentido da largura. O modo de deformações dos CP's é modificado pela variação de sua largura útil ( $b_u$ ), sendo as amostras com largura útil ( $b_u$ ) menores, que correspondem ao embutimento profundo. Com o aumento da largura útil, as deformações vão passando para embutimento profundo, tração uniaxial, deformações plana, estiramento e estiramento biaxial (HEIDARI, GHASSEMI, ATRIN; 2018; FOLLE, *et al.* 2008).



CP	$R_i$ [mm]	$b_u$ [mm]	$b_i$ [mm]
1	100	10	40
2	90	20	50
3	80	30	60
4	70	40	70
5	60	50	80
6	50	60	100
7	40	80	120
8	25	100	150

Figura 8 - Dimensões e formato dos CP's para determinação da CLC. Fonte: NETTO (2004).

O ensaio constitui no estiramento as amostras que possuem larguras diferentes até a ruptura do material, com uma forma uniaxial executada por um punção hemisférico de 100mm de diâmetro, contendo ainda um prensa chapas e uma matriz. O prensa chapas ainda contém um quebra rugas e uma carga elevada, para que não ocorra deslocamento da chapa durante o ensaio (figura 9). Para o obtenção da curva é feita a medição e para cada dimensão de amostras as deformações máximas e mínimas devem estar o mais próximo da região da estrição, feita através de círculos ou quadrados impressos na superfície do material antes da execução do ensaio.

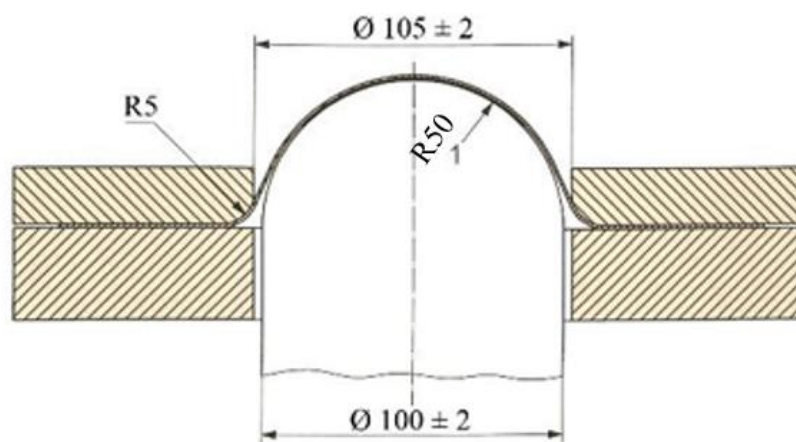


Figura 9 – Representação do esquemática do ensaio de Nakazima, em mm. Fonte: SLOTA, SPISAK (2015).

### 2.2.5 Ensaio Erichsen

O ensaio de Erichsen é utilizado na indústria e no meio acadêmico, a fim de avaliar o grau de estampabilidade de uma chapa. Devido à sua simplicidade e baixo custo, ele ainda pode ser realizado em equipamentos como prensas hidráulicas e máquinas universais de ensaios. (GIULIANO; SAMANI, 2013)

Ele consiste em uma força uniaxial, na qual o punção é esférico e tem com diâmetro de 20 mm, e faz o avanço contra a chapa (geratriz), que por sua vez está fixada sobre o prensa chapas e matriz, não podendo ocorrer deslizamento durante o ensaio (figura 10). O material quando em ensaio sofre um estiramento biaxial com o deslocamento do punção, ocasionando em redução na espessura devido à profundidade em que o punção se desloca. O término do ensaio se dá quando observado o início de uma estrição do material, ou quando ocorre uma redução drástica na força. (GARCÍA *et al*, 2006)

O deslocamento que o punção percorreu durante o ensaio (em milímetros) é indicado com o índice Erichsen (IE). O que indica este grau de estampabilidade do material são as condições superficiais da geratriz (condição de lubrificação) e as propriedades mecânicas do material (tensão de escoamento, encruamento, coeficiente de resistência). Quanto maior for o valor de IE, superior é a boa estampabilidade apresentada pelo material. Neste cenário, seus valores de índice de encruamento são altos, e sua condição de atrito entre as ferramentas e geratriz são baixas (BÖLLINGHAUS, 2009).

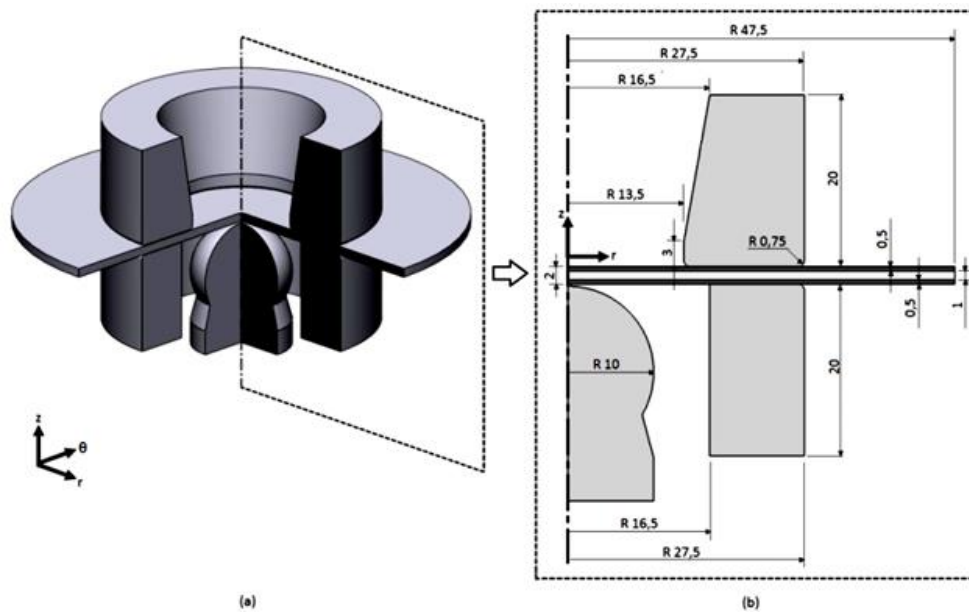


Figura 10 – Representação tridimensional em corte (a), e bidimensional (b) da geometria das ferramentas para o ensaio de Erichsen. Fonte: BAÚ, *et al.* (2012)

### 2.3 CÁLCULO DA GERATRIZ DE PEÇAS NÃO-AXISSIMÉTRICAS

Para o dimensionamento correto da geratriz é aplicado a metodologia Taschaethch (2006), onde consegue-se atingir a geometria final do componente, sem a necessidade de etapas posteriores, como por exemplo, para possíveis correções da geometria. O dimensionamento deve levar em consideração o volume da peça, chegando assim à uma completa obtenção da peça, evitando desperdício de material. Para que seja possível calcular as dimensões da geometria, deve-se levar em consideração o volume da peça. O volume é considerado constante do início da estampagem até o final do processo, desconsiderando assim o fenômeno de afinamento que ocorre nas paredes da peça, e ele deve ser desprezado. (TASCHAETHSCH, 2006)



Os cálculos geralmente utilizados pelas literaturas apresentam as equações para geometrias cilíndricas. Por outro lado (TASCHAETHSCH, 2006), elas apresentam para os cálculos de dimensionamento da geratriz em formato de cuba, que deve ser planificada todo o fundo da peça, levando em consideração o raio do fundo da ( $r_b$ ), fazendo com o que o formato fique relacionado a um retângulo A.B (conforme figura 11). Sendo assim, é feito o deslocamento das arestas A e B, com uma distância  $l_a$  e  $l_b$ , respectivamente, sendo o formato final da geometria assemelhado ao de uma cruz. Já para os arcos são traçados arcos de raios  $R_1$ .

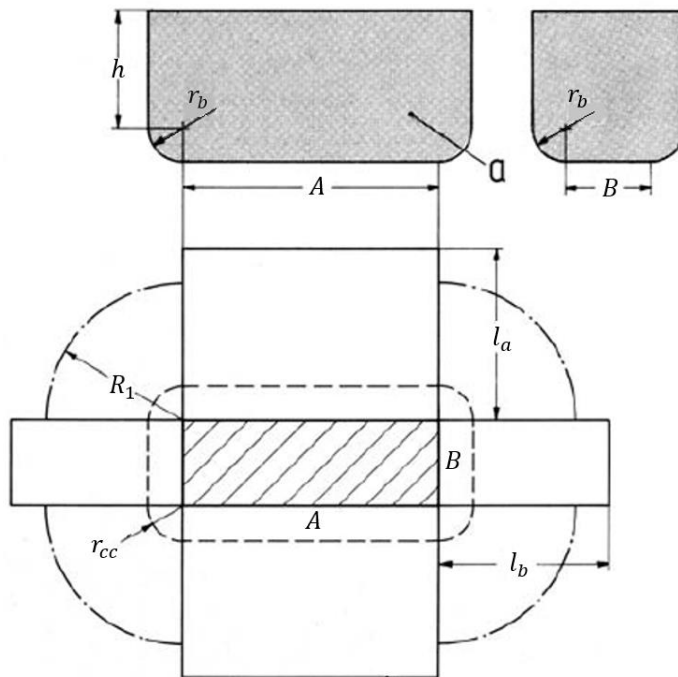


Figura 11 – Planificação de uma cuba para dimensionamento da geratriz. Fonte: TSCHAETSCH (2006).

Sendo assim, são traçados os arcos dos raios  $R_a$  e  $R_b$ , que apresentam uma distância de  $B/4$  e  $A/4$ , respectivamente, das extremidades dos retângulos A.B. (figura 12). Tem-se por objetivo principal proporcionar um arredondamento nas conexões dos raios  $R_1$  e das extremidades dos retângulos que são formados por  $l_a$  e  $l_b$ . A geometria final da geratriz tende a se assemelhar a um disco, mas com uma das diagonais estendidas, sendo ela referente ao diâmetro equivalente ( $D_{b,e}$ ). Também há viabilidade onde junta-se as extremidades dos retângulos formados por  $l_a$  e  $l_b$  com o raio  $R_1$  através de linhas retas, fazendo com que o perfil possua um aspecto mais grosseiro, o que pode acarretar posteriormente a falta ou excesso de material para algum determinado local da peça, e por consequência, fazendo assim que ocorra possíveis pontos de concentração de tensão. Pela ocorrência dos pontos de concentração de tensão, há a tendência de o sistema apresentar pontos de falhas em matérias, como trincas, durante o processo de embutimento. (TASCHAETHSCH, 2006).

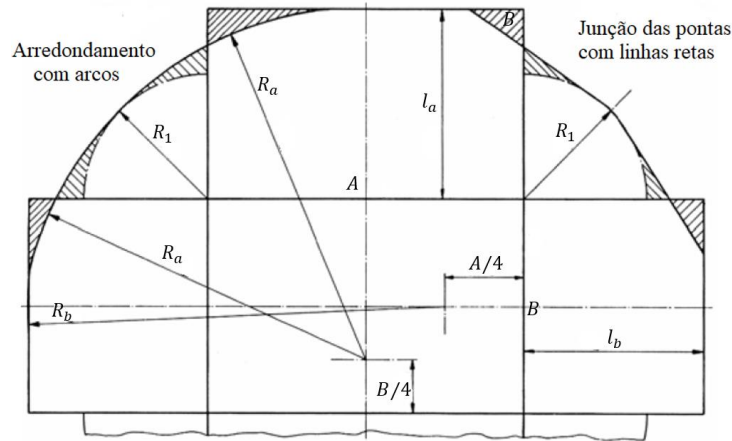


Figura 12 – Representação do desenho da metade superior da geratriz. Fonte: TSCHAETSCH (2006).

A equação 14 quantifica o raio corrigido de projeto ( $R_1$ ), e leva em consideração o raio de projeto ( $R$ ) e o seu respectivo fator de correção ( $x$ ), conforme TSCHAETSCH (2006).

$$R_1 = x \cdot R \quad (14)$$

Para Tschaetsch (2006), a resultante do fator de correção ( $x$ ) precisa levar em consideração o raio de projeto ( $R$ ) e o raio da lateral da peça ( $r_{cc}$ ), de acordo com a equação 15. O raio de projeto ( $R$ ) torna possível que o cálculo seja feito de duas maneiras: quando o raio da lateral da peça é igual ao raio do fundo da peça, descrito pela equação 16, ou quando esses raios são estimados pela equação 17.

$$x = 0,074 \cdot \left( \frac{R}{2 \cdot r_{cc}} \right)^2 + 0,982 \quad (15)$$

$$R = 1,42 \cdot \sqrt{r_{cc} \cdot h + r_{cc}^2} \quad (16)$$

$$R = \sqrt{1,012 \cdot r_{cc}^2 + 2 \cdot r_{cc} \cdot (h + 0,506 \cdot r_b)} \quad (17)$$

Para que seja possível estimar os valores de  $l_a$  e  $l_b$ , é feita uma relação direta com os valores do raio da lateral ( $r_{cc}$ ) e do fundo da peça ( $r_b$ ). Caso os valores utilizados sejam os mesmos para os dois termos, utilizam-se as equações 18 e 19. Sendo os raios distintos, para os cálculos de  $l_a$  e  $l_b$  são utilizadas as equações 20 e 21. Podemos observar que as equações necessitam diretamente dos valores do raio de projeto ( $R$ ) e do seu respectivo fator de correção ( $x$ ), bem como da altura interna da peça sem o raio de fundo ( $h$ ), de acordo com Tschaetsch (2006).

$$l_a = 1,57 \cdot r_{cc} + h - 0,785 \cdot (x^2 - 1) \cdot \frac{R^2}{A} \quad (18)$$

$$l_b = 1,57 \cdot r_{cc} + h - 0,785 \cdot (x^2 - 1) \cdot \frac{R^2}{B} \quad (19)$$

$$l_a = 0,57 \cdot r_b + h + r_{cc} - 0,785 \cdot (x^2 - 1) \cdot \frac{R^2}{A} \quad (20)$$

$$l_b = 0,57 \cdot r_b + h + r_{cc} - 0,785 \cdot (x^2 - 1) \cdot \frac{R^2}{B} \quad (21)$$

## 2.4 RELAÇÃO DE ESTAMPAGEM

Durante uma operação de embutimento, deve ser levada em consideração a relação de estampagem ( $m_r$ ). Esta relação é proporcional à redução na espessura, no diâmetro do componente estampado, sem que ocorra rompimento da chapa. A metodologia empregada para a relação de estampagem de uma geometria retangular, os cálculos se assemelham com os cálculos de peças cilíndricas (equação 22), mas limitando o valor ao máximo de 2. Acima deste valor, há ocorrência de rompimento, e neste caso se faz necessária a adoção de estampagem em múltiplos estágios, uma vez que cada relação de estampagem não ultrapasse o valor máximo da relação. (RIVAS – MENCHI *et al*, 2018)

$$m_r = \frac{D_b}{d_p} = \frac{D_{b,e}}{d_{p,e}} \quad (22)$$

Sabe-se que  $D_b$  e  $d_p$  correspondem aos diâmetros da geratriz e punção, respectivamente para peças circulares. Já  $D_{b,e}$  e  $d_{p,e}$  correspondem aos diâmetros equivalentes do geratriz e punção retangulares, respectivamente. Estes valores podem ser encontrados na figura 13, através do teorema de Pitágoras. Estes diâmetros correspondem às diagonais equivalentes das seções transversais de punção e do geratriz.

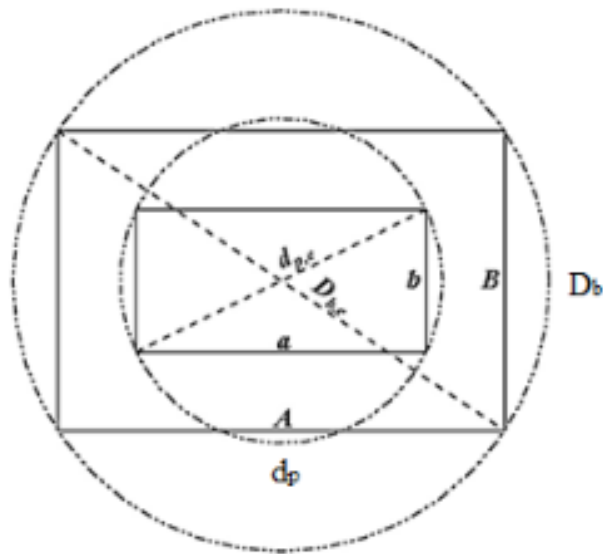


Figura 13 – Representação dos diâmetros equivalentes de punção e geratriz, para uma estampagem retangular.  
 Fonte: RIVAS – MENCHI *et al*, (2018)

Na maioria dos casos de estampagem de peça não-axissimétricas é possível a execução em apenas uma etapa. Propõe-se assim um grau de estampabilidade elevado, exercida pelos cantos da cuba, que, contudo, não é possível de ser calculado pelas equações convencionais. Durante ensaio é possível detectar que a relação de estampagem para a cuba devido aos cantos deve ser considerado um valor 50% maior que para peças circulares. A redução desta capacidade de embutimento se deve às forças que devem ser exercidas para a estampagem dos cantos retos, conduzida para os cantos da cuba. Para isso a relação de estampagem ( $m_R$ ) proposta por Rodrigues e Martins (2005b) deve ser calculada através do raio de canto da geratriz ( $r_1$ ), do raio do flange na fase intermediária ou final da estampagem ( $r_2$ ), conforme apresentado na equação (23).

$$m_R = \frac{r_2}{1,2 \cdot r_1} \quad (23)$$

Na tabela 1, são descritos valores de relação de estampagem que devem ser considerados para peças não-axissimétricas. É aconselhável que o valor calculado da relação de estampagem ( $m_R$ ) ultrapasse os valores da tabela, havendo assim a necessidade de múltiplos passes de estampagem. (RODRIGUES e MARTINS, 2005b)

Tabela 1 – Mínima relação de estampagem ( $m_R$ ) admitida para estampagem de peças não-axissimétricas em função de cada material. Fonte: RODRIGUES e MARTINS (2005).

Material	Relação de estampagem ( $m_R$ )
Aço para estampagem	0,37
Aço para estampagem profunda	0,36
Aço para carroceria de automóvel	0,35
Aço inoxidável	0,40
Folha de flanders	0,33
Cobre	0,32
Latão	0,31
Zinco	0,38
Alumínio	0,33
Duralumínio	0,34
Níquel	0,34

## 2.5 MODELO ANALÍTICO PARA O CÁLCULO DE FORÇA MÁXIMA

Um dos parâmetros mais importantes durante o processo de estampagem é a força máxima. Ela corresponde à força máxima que o punção deve desempenhar para que se consiga realizar o processo de estampagem (DIETER, 1981). O somatório de força necessária para a execução da estampagem, é representado na figura 14, e todos os esforços devem ser adicionados para o cálculo da força máxima.

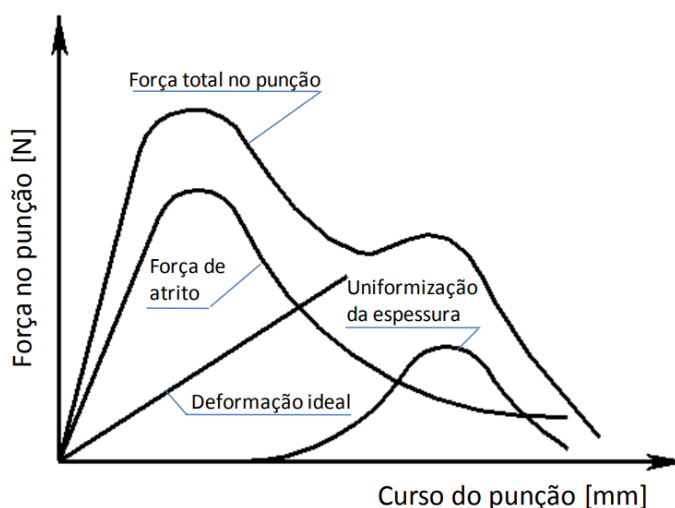


Figura 14 – Representação das forças durante o processo de estampagem. Fonte: FOLLE (2012).

Para os cálculos da força máxima de estampagem foram feitas adaptações nas equações de *Siebel*, *Siebel-Beisswanger*, *Lange*, *Tschaetsch* e Rodrigues e Martins, sendo elas típicas para peças axissimétricas (RIVAS-MENCHI, 2018). Elas podem ser adaptadas para as geometrias de uma cuba, e se assemelham a peças de geometrias axissimétricas. Na figura 15,

estão representadas algumas variáveis que devem ser conhecidas para que seja calculada a força máxima de estampagem. Entre estas variáveis estão a espessura de geratriz ( $s_0$ ), a folga entre o punção e a abertura da matriz ( $c$ ), o raio de entrada da matriz ( $r_d$ ), o raio lateral da matriz ( $r_{pb}$ ), o comprimento da geratriz ( $A$ ) e do punção ( $B$ ), e as suas respectivas larguras ( $a$ ) e ( $b$ ).

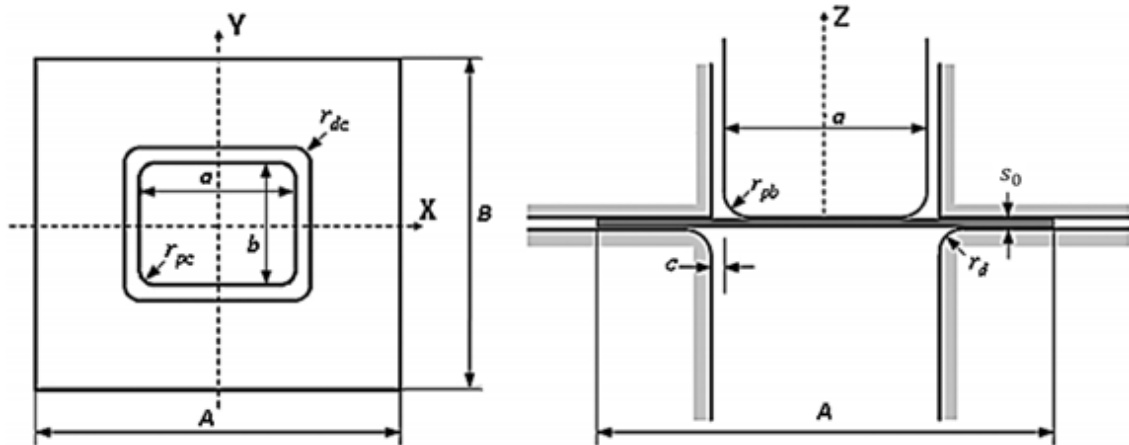


Figura 15 – Geometrias do ferramental e do geratriz para o cálculo da força máxima. Fonte: RIVAS – MENCHI (2018).

Para uma abrangência no conceito de diâmetro equivalente foi proposta uma maneira para estender as equações de estampagem de peças cilíndricas à peças não-axissimétricas. Os diâmetros equivalentes do geratriz ( $D_{b,e}$ ) e do punção ( $d_{p,e}$ ) são valores que consideram que a área do geratriz circular ( $A_c$ ) é igual a área da geratriz retangular ou quadrado ( $A_r$ ). Além disso, considera-se a área superficial da cabeça do punção circular ( $A_{pc}$ ) como sendo igual a área do punção quadrado ou retangular ( $A_{pr}$ ), fatores apresentados nas equações 24 e 25 (RIVAS – MENCHE, 2018; LANGE, 1985; DAXIN, 2008)

$$D_{b,e} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_r}{\pi}} \quad (24)$$

$$d_{p,e} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{pr}}{\pi}} \quad (25)$$

Como a relação de estampagem ( $\beta$ ) para o repuxo em uma cuba se assemelha à metodologia de cálculo das peças cilíndricas, emprega-se a equação do item 2.3.7.

### Equação de Siebel

Para Siebel (equação 26), a força máxima ( $F_{p, \text{máx.}}$ ) é alcançada quando se chega a um valor de cerca de 30% do deslocamento total do punção. Sendo assim, as variáveis da equação

estão voltadas para um diâmetro de flange cerca de 77% do diâmetro da geratriz. Siebel considera cinco esforços que atuam durante a estampagem: força para realizar a deformação plástica na chapa; força para dobrar a chapa no raio de entrada da matriz; força para desdobrar ou endireitar a chapas após a passagem pelo raio da matriz; força de atrito na região do prensa-chapas e a força de atrito no raio de entrada da matriz (SIEBEL, 1955).

$$F_{p,max} = P_m \cdot s_0 \cdot \left[ e^{\mu \frac{\pi}{2}} \cdot \left( 1,1 \cdot kf_1 \cdot \ln \frac{0,77 \cdot D_{b,e}}{d_{p,e} + s_0} + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_{pc}}{0,77 \cdot P_B \cdot s_0} \right) + kf_2 \cdot \frac{s_0}{2 \cdot r_d} \right] \quad (26)$$

Para o cálculo de força pela equação 26 de Siebel (1955) necessita-se conhecer os parâmetros: perímetro médio da peça final ( $P_m$ ), a espessura da chapa ( $s_0$ ), o coeficiente de atrito ( $\mu$ ), a tensão de escoamento na região do diâmetro externo do flange ( $kf_1$ ) e na região de entrada e saída do raio da matriz ( $kf_2$ ), o diâmetro equivalente do punção ( $d_{p,e}$ ) e do blank ( $D_{b,e}$ ), a força do prensa-chapa ( $F_{pc}$ ), o perímetro do blank ( $P_B$ ) e o raio de entrada da matriz ( $r_d$ ).

Por meio das equações 27 e 28, é possível encontrar os valores da tensão de escoamento na região do diâmetro externo do flange ( $kf_1$ ) e na região de entrada e saída do raio da matriz ( $kf_2$ ). Para tanto, são relacionados o coeficiente de resistência ( $C$ ) e o índice de encruamento do material ( $n$ ), e as deformações verdadeiras na região do diâmetro externo do flange ( $\varphi_1$ ), no raio de entrada da matriz ( $\varphi_2$ ) e na espessura da peça ( $\varphi_3$ ). (RIVAS-MENCHI, 2018; SIEBEL, 1955)

$$kf_1 = \frac{C \cdot (\varphi_1^n + \varphi_2^n)}{2} \quad (27)$$

$$kf_2 = \frac{C \cdot (\varphi_2^n + \varphi_3^n)}{2} \quad (28)$$

Os cálculos das deformações verdadeiras  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , e  $\varphi_3$  estão incluídos nas equações 29, 30 e 31. Elas levam em consideração o diâmetro equivalente do geratriz ( $D_{b,e}$ ), o diâmetro equivalente do flange no instante da força máxima ( $D_e$ ), o diâmetro equivalente do punção ( $d_{p,e}$ ), o raio de entrada da matriz ( $r_d$ ) e a espessura do material ( $s_0$ ) (RIVAS-MENCHI, 2018; SIEBEL, 1955).

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_{b,e}}{D_e} \quad (29)$$

$$\varphi_2 = \ln \sqrt{\frac{D_{b,e}^2 - D_e^2 + (d_{p,e} + 2.s_0 + 2.r_d)^2}{d_{p,e} + 2.s_0 + 2.r_d}} \quad (30)$$

$$\varphi_3 = \ln \left( 1 + \frac{s_0}{2.r_d + s_0} \right) + \varphi_2 \quad (31)$$

No momento de força máxima, o diâmetro equivalente do flange ( $D_e$ ) corresponde a uma porcentagem do valor total do diâmetro equivalente da geratriz ( $D_{b,e}$ ), como representado na equação 32. (RIVAS-MENCHI, 2018; SIEBEL, 1955).

$$D_e = 0,77 . D_{b,e} \quad (32)$$

Já o para o cálculo do Perímetro Médio da Peça Final ( $P_m$ ), é considerado o comprimento (a), a largura (b) e o raio lateral do punção ( $r_{pc}$ ), e a espessura da chapa ( $s_0$ ), conforme equação 33. (RIVAS-MENCHI, 2018).

$$P_m = (2a + 2b - 8 . r_{pc} + 2 . \pi . r_{pc} + \pi . s_0) \quad (33)$$

### **Equação de Siebel-Beisswanger**

A equação 34, de *Siebel-Beisswanger*, contempla o coeficiente de eficiência do processo de estampagem ( $\eta$ ), sendo o restante de suas variáveis representadas na equação anterior. O valor do rendimento é considerado de  $\eta = 0,75$  para estampagem de peças não-axissimétricas (SIEBEL, 1955).

$$F_{p,max} = P_m . s_0 . \left[ 1,1 . \frac{k_{f1}}{\eta} . \left( \ln \frac{D_{b,e}}{d_{p,e}} - 0,25 \right) \right] \quad (34)$$

### **Equação de Lange**

Na equação 35 de Lange, as variáveis são praticamente as mesmas apresentadas anteriormente, a diferença se dá no uso da tensão de escoamento média ( $k_{fm}$ ), pela equação 36. E do mesmo modo que apresentado na equação de *Siebel-Beisswanger*, ele utiliza a eficiência



do processo de estampagem ( $\eta$ ), que assume um valor de 0,75. (RIVAS-MENCHI, 2018; LANGE, 1985)

$$F_{p,max} = \frac{1}{\eta} \cdot P_m \cdot s_0 \cdot k f_m \cdot \ln \frac{D_{b,e}}{d_{p,e}} \quad (35)$$

Sendo a Tensão de Escoamento Média ( $k f_m$ ) calculado por:

$$k f_m = \left( \frac{k f_1 + k f_2}{2} \right) \quad (36)$$

### **Equação de *Tschaetsch***

A força máxima pela equação de *Tschaetsch* (equação 37) é dimensionada com base no comprimento ( $a$ ), na largura ( $b$ ), e no raio da cabeça ( $r_{pb}$ ) e da lateral do punção ( $r_{pc}$ ), e o limite de resistência da chapa metálica ( $R_m$ ) (TSCHAETSCH, 2006).

$$F_{p,max} = s_0 \cdot R_m \cdot \left( \frac{D_{b,e}}{d_{p,e}} - 0,9 \right) \cdot \left( 2 \cdot \pi \cdot r_{pc} + \frac{4 + (a + b - 4 \cdot r_{pb})}{2} \right) \quad (37)$$

### **Equação de Rodrigues e Martins**

Para Rodrigues e Martins (2008), o cálculo da força máxima ( $F_{p,max}$ ) para peças “quadradas” realiza uma adaptação da equação utilizada para o cálculo de peça circulares com cantos arredondados ( $F_{p_c}$ ), somando ainda as quatro abas retas ( $F_{p_l}$ ). Conforme demonstrado na equação 38.

$$F_{p,max} = F_{p_c} + F_{p_l} \quad (38)$$

Neste caso idealizado a estampagem de um copo, na qual o somatório dos cantos arredondados engloba a influência do atrito decorrente dos contatos entre as ferramentas e o material, localizado na região do prensa chapas e do raio da entrada da matriz. O processo é igual ao processo de dobramento da chapa metálica pelo movimento de deslizamento da chapa em contato com o raio de entrada da matriz, como também foi previsto por Siebel (1955). Para que seja encontrada a força máxima para a estampagem dos cantos arredondados (equação 39) se fazem necessários os dados de força do prensa chapas ( $F_{bh_c}$ ), o raio de entrada da matriz

( $r_d$ ), a espessura da chapa ( $s_0$ ), do raio inicial do canto da geratriz ( $r_1$ ), do raio da lateral da cuba ( $r_{cc}$ ), da tensão de escoamento no instante da força máxima ( $kf_{1,2}$ ) e da tensão de escoamento média ( $kf_m$ ), assim como o coeficiente de atrito desenvolvido entre o contato entre as ferramentas e a chapa. ( $\mu$ ) (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$F_{p_c} = 2 \cdot \pi \cdot r_{cc} \cdot s_0 \cdot \left[ e^{\frac{\mu\pi}{2}} \cdot \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot kf_m \cdot \ln \left( \frac{r_1}{r_{cc}} \right) + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_{bh_c}}{2 \cdot \pi \cdot r_{cc} \cdot s_0} \right) + kf_{1,2} \cdot \left( \frac{s_0}{2 \cdot r_d} \right) \right] \quad (39)$$

Para a obtenção da tensão de escoamento ( $kf_m$ ) aplica-se a equação 40, uma vez que ela calcula a tensão de escoamento considerando a força máxima ( $kf_{1,2}$ ) e para o escoamento no final do processo de estampagem ( $kf_{2,2}$ ), por meio da curva de escoamento de Ludwik-Hollomon (equações 41 e 42 respectivamente) (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$kf_m = \frac{kf_{1,2} + kf_{2,2}}{2} \quad (40)$$

$$kf_{1,2} = C \cdot \varphi_{1,2}^n \quad (41)$$

$$kf_{2,2} = C \cdot \varphi_{2,2}^n \quad (42)$$

Para a obtenção das deformações verdadeiras  $\varphi_{1,2}$  e  $\varphi_{2,2}$ , utiliza-se o método que indica que a força máxima de estampagem, quando o punção estiver com cerca de 20% do seu deslocamento máximo total. Sendo assim, são aplicadas as equações 43 e 44. (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$\varphi_{1,2} = \ln \sqrt{0,2 \cdot \left( \frac{r_1}{r_{cc}} \right)^2 + 0,8} \quad (43)$$

$$\varphi_{2,2} = \ln \left[ \frac{\left( \frac{r_1}{r_{cc}} \right)}{\sqrt{0,8 \cdot \left( \frac{r_1}{r_{cc}} \right)^2 + 0,2}} \right] \quad (44)$$

A obtenção da força do prensa chapas que se aplica nos cantos ( $F_{bh_c}$ ) deve ser encontrada por meio da equação 45. No cálculo deve ser considerada a pressão total aplicada pelo prensa chapas ( $p_{bh}$ ) do raio de canto da geratriz ( $r_1$ ), do raio de canto da cuba ( $r_{cc}$ ), do raio de entrada da matriz ( $r_d$ ) e da espessura da chapa ( $s_0$ ) (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$F_{bh_c} = p_{bh} \cdot [\pi \cdot (r_1^2 - (r_{cc} + r_d + s_0)^2)] \quad (45)$$

Por outro lado, para que seja encontrada a força máxima para a dobra da abas retas ( $F_{p_l}$ ) é conduzida a equação 45. São necessárias as informações da força exercida pelo prensa chapas nos lados retos ( $F_{bh_l}$ ), ao raio de entrada da matriz ( $r_d$ ), às arestas  $a$  e  $b$  e ao raio da lateral do punção ( $r_{pc}$ ), à espessura da chapa ( $s_0$ ), ao limite de resistência do material ( $R_m$ ), ao fator de correção para os processos de dobra ( $Q_l$ ) e ao coeficiente de atrito ( $\mu$ ), que deve ser considerado constante no processo de estampagem (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$F_{p_l} = 2 \cdot F_{bh_l} \cdot \mu \cdot (1 + 1,6 \cdot \mu) + \left\{ \frac{0,5 \cdot [2 \cdot (a - 2 \cdot r_{pc}) + 2 \cdot (b - 2 \cdot r_{pc})] \cdot s_0}{\frac{2 \cdot r_d}{s_0} + 1} \right\} \cdot Q_l \cdot R_m \cdot (2 + 1,6 \cdot \mu) \quad (46)$$

A força exercida pelo prensa chapas nas abas retas ( $F_{bh_l}$ ) deve ser obtida pela equação 47, que considera a pressão total aplicada pelo prensa-chapa ( $p_{bh}$ ), do raio lateral da cuba ( $r_{cc}$ ), do raio de entrada da matriz ( $r_d$ ), da espessura da chapa ( $s_0$ ), bem como dos lados  $a$  e  $b$  e das dimensões  $l_a$  e  $l_b$ , que devem considerar a planificação da geratriz (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$F_{bh_l} = p_{bh} \cdot [2 \cdot (a - 2 \cdot r_{cc}) + 2 \cdot (b - 2 \cdot r_{cc})] \cdot \left( \frac{l_a + l_b}{2} - r_{cc} - r_d - s_0 \right) \quad (47)$$

A obtenção do coeficiente de correção para o dobramento das laterais da cuba ( $Q_l$ ) se dá por meio da equação 48 (RODRIGUES; MARTINS, 2005b).

$$Q_l = 1,64 + 0,18 \cdot \log \left( \frac{s_0}{r_d} \right) \quad (48)$$

## 2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O software de simulação computacional é possível que se trabalhe de uma forma eficiente e ainda com redução de custos, pois com o auxílio dele é possível fazer a otimização do processo de manufatura de forma ágil e ainda sem custos de matéria prima (não havendo a necessidade do emprego do método de tentativa e erro), podendo variar assim os dados de entrada e conseguindo o resultados final esperado. (BATALHA, 2015)

Com o modelamento por meio dos elementos finitos é possível realizar melhorias nos produtos e nos processos, com redução no seu tempo de desenvolvimento de protótipo, conseguindo ainda uma redução nos gastos e ganhos na lucratividade e maior competitividade no mercado. Além é possível analisar os resultados é possível observar pontos de possíveis falhas nos materiais, possibilitando uma intervenção previa, e evitando gastos desnecessários com matéria prima e tempo. Podendo ainda melhor os processos com otimização e execução das fases finais, aumentando assim resultado do produto final. (SOUZA, 2013)

É possível definir os estágios, para análise dos elementos finitos, segundo FAN, *et al.* (2006), são:

- Criação de geometria;
- Definição das propriedades dos materiais utilizados;
- Definição do tipo, formato e dimensões de malha;
- Definição e aplicação das condições de contorno no modelo;
- Execução das análises computacionais;
- Interpretação dos resultados;

### 3. MATERIAIS E METÓDOS

#### 3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As chapas metálicas utilizadas em ensaios de estampagem conduzidos no presente estudo são de aço inoxidável ferrítico AISI 430, obtida através da espectrometria por emissão ótica Q2ION, da marca Bruker, disponível no Laboratório de Fundição (LAFUN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Sendo assim, os resultados obtidos em percentual de massa dos elementos estão apresentados na tabela 2, e apresentam os valores indicados pela literatura de IQUILIO *et al.*, (2019), KHORRAMI *et al.*, (2014) e CARNEIRO *et al.*, (2016).

Tabela 2 – Composição química do material em estudo (em porcentagem), obtido experimentalmente, e comparando com a literatura.

<i>Fonte</i>	<i>C</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Mo</i> [%]	<i>Ni</i> [%]
<b><i>Determinação Experimental</i></b>	0,05	0,37	0,42	0,003	0,015	16,10	0,078	0,170
<b><i>IQUILIO, et al (2019)</i></b>	0,042	0,24	0,52	0,009	0,005	16,81	-	0,095
<b><i>KHORRAMI et al. (2014)</i></b>	0,046	0,60	0,58	0,022	-	17,13	0,019	0,130
<b><i>CARNEIRO et al. (2016)</i></b>	0,029	0,40	0,44	0,036	0,002	15,54	0,006	0,18

Os valores obtidos de composição química se assemelham bastante aos valores encontrados na literatura, indicando assim que o material pode ser comparado com literatura internacional.

#### 3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O ensaio foi empregado segundo a norma NBR ISO 6892-1: 2013. As dimensões do corpo de prova são padronizadas pela norma em formatos retangulares com dimensões de 200 x 20 x 1 mm. Ademais, foram extraídos corpos de prova em três direções de laminação (0°, 45° e 90°).

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, na máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 60.000 com capacidade máxima de 600 kN, disponível no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM). Os corpos de prova foram fixados na máquina, por ação pneumática, e tracionados com uma velocidade constante de 5mm/min até ruptura do chapa. No decorrer do ensaio, a máquina era auxiliada por um software Tesc®, que coletava os dados

de força e deslocamento, essenciais para a construção da curva de engenharia e de escoamento do material.

### 3.2.1 Diagrama de Engenharia

Após a obtenção dos dados de força instantânea ( $F_i$ ) e a variação do comprimento ( $\Delta l$ ), estes dados foram convertidos em tensão convencional ( $\sigma$ ) e deformação relativa ( $\varepsilon$ ), respectivamente. Por meio das equações 1 e 2, considerando os dados iniciais do corpo de prova, comprimento inicial ( $l_0$ ) de 200 mm e uma área inicial ( $A_0$ ) de 20 mm<sup>2</sup>.

Apresentadas na figura 16 estão as curvas de engenharia obtidas no ensaio de tração, que demonstram as três direções de laminação (0°, 45° e 90°).

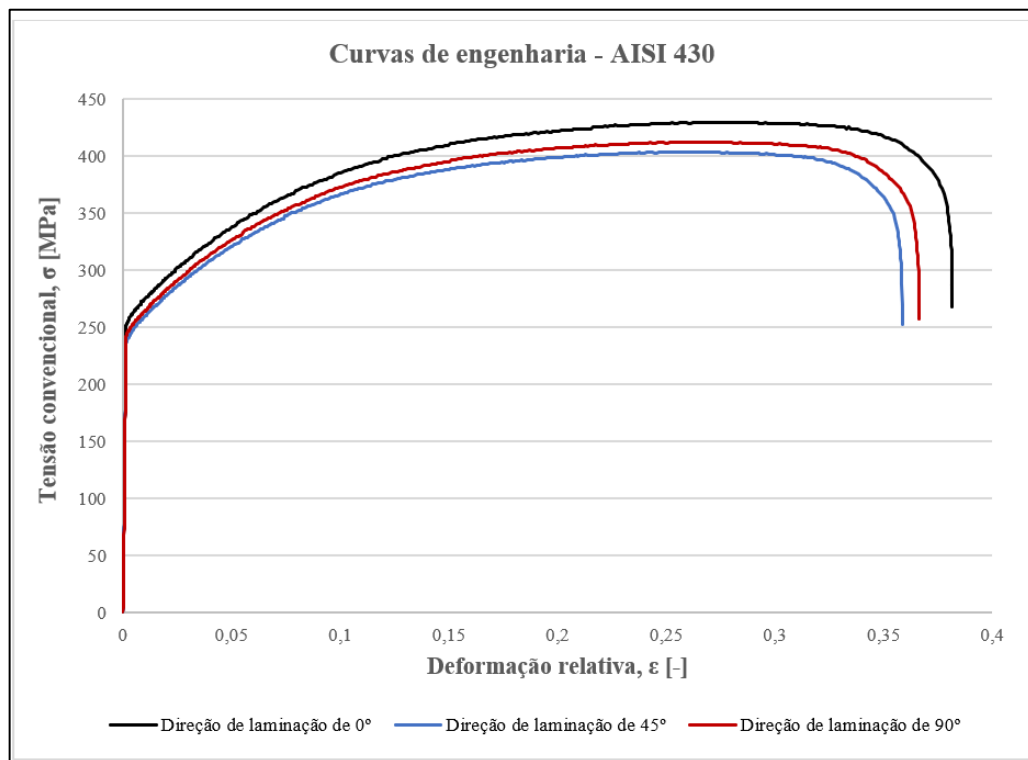


Figura 16 – Curva de escoamento do aço inoxidável AISI 430, obtida através do ensaio de tração.

Após ser gerada a curva de engenharia, é possível extrair as principais propriedades mecânicas do material: limite de escoamento ( $R_e$ ), limite de resistência ( $R_m$ ), alongamento total ( $\delta$ ) e módulo de elasticidade ( $E$ ). Como é apresentado na norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013, o valor do limite de escoamento é encontrado através de uma reta traçada paralelamente à zona elástica do material, sendo deslocada com um valor de 0,002 da deformação relativa. O ponto de cruzamento entre esta reta e a curva de engenharia é definido pelo limite de escoamento. Como pode ser visualizado na tabela 3, os valores obtidos das propriedades mecânicas do aço

inoxidável AISI 430 estão correlacionados com a literatura de IQUILIO *et al.*, (2019), PROMMAJUNE e CKAIJIT (2007) e FERRARINI (2014).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430,

<i>Fonte</i>	<i>Direção de laminação</i>	<i>Módulo de elasticidade, E [GPa]</i>	<i>Limite de escoamento, R<sub>e</sub> [MPa]</i>	<i>Limite de resistência, R<sub>m</sub> [MPa]</i>	<i>Alongamento total, δ [%]</i>
<i>Análise Experimental</i>	Direção 0°	200	253,7	429,6	38,13
	Direção 45°	200	239,5	403,8	35,85
	Direção 90°	200	244,6	412,4	36,61
<i>IQUILIO et al. [2019]</i>	Direção 0°	200	271	373	29,1
	Direção 45°	200	291	393	28,0
	Direção 90°	200	284	389	27,6
<i>PROMMAJUNE e CHAIJIT [2007]</i>	Direção 0°	200	307,1	486,8	32,5
	Direção 45°	200	316,6	488,0	30,3
	Direção 90°	200	315,1	489,8	31,6
<i>FERRARINI [2014]</i>	-	200	250	450	22

As propriedades obtidas, quando comparadas com a literatura Iquilio *et al.* (2019) e Ferrarini (2014), apresentam valores que se assemelham bastante, com uma variação em torno de 15%. Já os valores apresentados por Prommajune Chaijit (2007) a variação já ficou um pouco mais distante, em cerca de 20% para as 3 direções de laminação, como pode ser visto na tabela 3, para os dados de limite de escoamento ( $R_e$ ), do limite de resistência ( $R_m$ ) e do alongamento total ( $\delta$ ) para o aço inoxidável AISI 430. A partir destes valores é possível afirmar que as propriedades obtidas pelo ensaio de tração se assemelham com as referências internacionais. Ademais, é possível afirmar que o material possui uma deformabilidade plasticamente, e um aumento gradativo da resistência mecânica em decorrência da conformação a frio (encruamento).

### 3.2.2 Curva de Escoamento

As curvas de escoamento do material foram determinadas para as três direções de laminação (0°, 45° e 90°), utilizando apenas a região plástica da curva de engenharia, sendo a parte do limite de escoamento até o limite de resistência do material (figura 8). Os valores da tensão convencional e da deformação relativa foram transformados em curva tensão verdadeira ou de escoamento ( $k_f$ ) e deformação verdadeira ( $\varphi$ ), respectivamente, através das equações (3 e 7). A figura 17 demonstra a curva de escoamento do aço inoxidável ferrítico AISI 430.

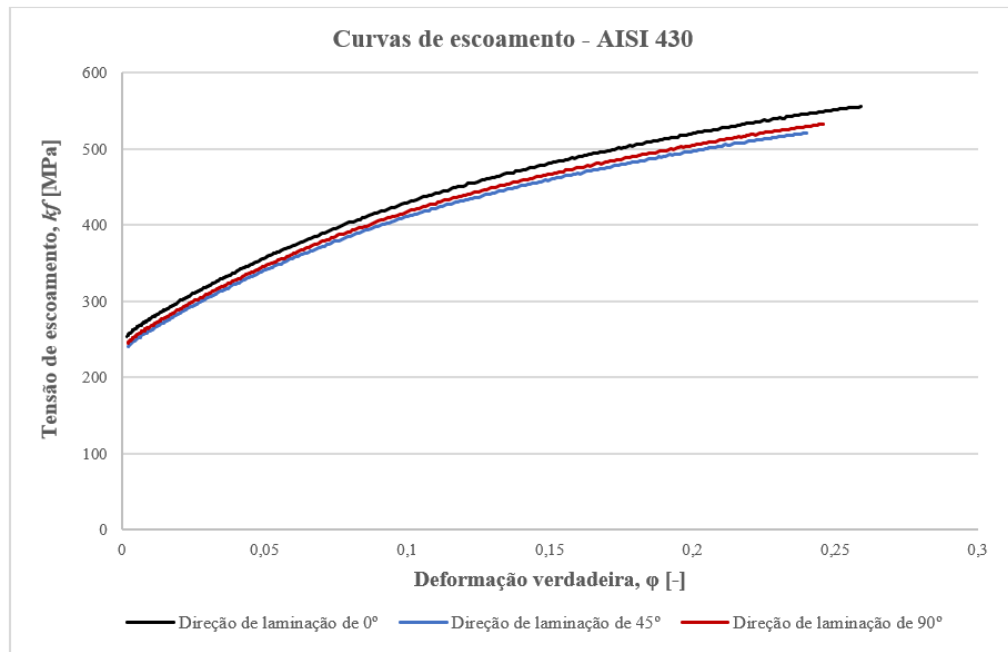


Figura 17 – Curvas de escoamento do aço inoxidável AISI 430 para cada direção de laminação.

Para descrever as curvas de escoamento do material foi utilizada a equação de Ludwik-Hollomon (equação 7), fazendo uso dos dados de tensão de escoamento ( $k_f$ ) e da deformação verdadeira ( $\varphi$ ), obtidos através do ensaio de tração axial. Os resultados foram inseridos no software MS Excel, sendo encontradas as linhas de tendência e de potência que descrevem analiticamente o comportamento das curvas de escoamento para cada direção de laminação. O número base e o expoente destas equações de potência são relacionados à constante  $C$  quando  $\varphi = 1$  e ao índice de encruamento do material ( $n$ ).

As equações 49, 50 e 51 apresentam os valores de  $k_f$  das curvas de escoamento do aço inoxidável AISI 430 para as três direções de laminação de 0°, 45° e 90°, respectivamente.

$$k_f = 697,5 \cdot \varphi^{0,20} \quad (49)$$

$$k_f = 663,9 \cdot \varphi^{0,20} \quad (50)$$



$$kf = 675,1 \cdot \varphi^{0,20} \quad (51)$$

Com as equações definidas, a tabela 4 apresenta os valores do índice de encruamento ( $n$ ) e da constante ( $C$ ), que foram obtidas através do ensaio de tração para o aço inoxidável AISI 430, e algumas respectivas literaturas para comparação dos resultados.

Tabela 4 – Índice de encruamento ( $n$ ) e constante ( $C$ ) do aço inox AISI 430.

<i>Fonte</i>	<i>Orientação</i>	<i>Índice de encruamento, n [-]</i>	<i>Constante C [MPa]</i>
<i>Equação de potência do MS Excel</i>	Direção de laminação 0°	0,20	697,5
	Direção de laminação 45°	0,20	663,9
	Direção de laminação 90°	0,20	675,1
<i>PROMMAJUN e CHAJIT [2007]</i>	Direção de laminação 0°	0,26	891,17
	Direção de laminação 45°	0,25	889,68
	Direção de laminação 90°	0,25	894,71
<i>IQUILIO et al. [2019]</i>	Direção de laminação 0°	0,19	621
	Direção de laminação 45°	0,18	651
	Direção de laminação 90°	0,18	638
<i>FERRARINI [2014]</i>	Direção de laminação 0°	0,16	738,5
	Direção de laminação 45°	0,14	743,3
	Direção de laminação 90°	0,14	724,4

Os resultados assemelham-se muito com os apresentados por Iquilio *et al* (2019), com cerca de 5% de variação. Os valores apresentados por Prommanjun e Chajit (2007) tem uma taxa de variação de cerca 20%, e quando relacionados a Ferrarini (2014), os resultados tiveram cerca de 10% de diferença. Já o índice de encruamento para todos as literaturas ficou em uma porcentagem em cerca de 20%

### 3.3 ÍNDICE DE ANISOTROPIA

O ensaio de anisotropia foi executado para obtenção dos dados de coeficiente de anisotropia médio ( $r_m$ ) e planar ( $\Delta_r$ ) para o aço inoxidável AISI 430. Os ensaios foram realizados para as três direções de laminação (0°, 45° e 90°), sendo três amostras para cada

direção de laminação. As dimensões dos corpos de prova foram as mesmas utilizadas nos ensaios de tração, assim como a velocidade de tração de 5 mm/min, aplicada nas garras pneumáticas da máquina universal de ensaios. Com a utilização da norma ABNT NBR 16282:2014, a partir do deslocamento máximo obtido através do ensaio de tração, foram realizados os ensaios utilizando cerca de 50% do deslocamento máximo obtido no ensaio de tração, com o intuito de obter o grau de confiável de deformação plástica, sem a ocorrência de ruptura.

A partir das medidas utilizadas para a obtenção do índice de anisotropia, descritas na figura 18, são feitas as medições das dimensões iniciais e finais, do comprimento útil e da largura das amostras. Os corpos de prova possuem inicialmente dimensões de comprimento de 80 mm, por 20 mm de largura. Com isto são feitas marcações e medições das larguras iniciais  $b_{01}$ ,  $b_{02}$  e  $b_{03}$ , e do comprimento  $L_0$ , e após o término do ensaio é feita a medição dos novos valores de  $L_1$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{12}$  e  $b_{13}$ , a fim de calcular a anisotropia. Devido à imprecisão na medição dos valores da espessura, para a obtenção deste valor deve ser utilizada a Lei da Constância de Volume (equação 11), obtendo os valores do coeficiente anisotropia através das deformações do comprimento útil e largura dos corpos de prova. (SCHAEFFER, 2017)

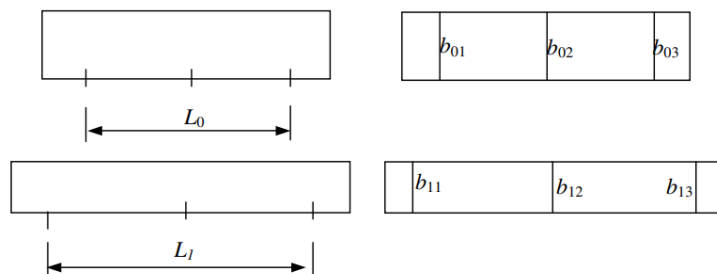


Figura 18 – Dimensões dos corpos de prova para obtenção do índice de Anisotropia.

Foram obtidos o índice de anisotropia médio ( $r_m$ ) e planar ( $\Delta_r$ ) conforme visto na tabela 5, que foram obtidos através das equações 12 e 13. Para isso foram calculados os coeficientes de anisotropia para as três direções de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ) por meio da equação 11 para o aço inoxidável AISI 430. Foram consultados alguns resultados de literatura para comparação, e comparados com valores do índice de anisotropia, também encontrados na literatura.

Tabela 5 – Coeficientes de anisotropia médio ( $r_m$ ) e anisotropia planar ( $\Delta_r$ ) do aço inox AISI 430.

<i>Fonte</i>	$r_{0^\circ}$ [-]	$r_{45^\circ}$ [-]	$r_{90^\circ}$ [-]	$r_m$ [-]	$\Delta_r$ [-]
<b><i>Determinação Experimental</i></b>	1,37	1,10	1,31	1,22	0,29
<b><i>IQUILIO et al. [2019]</i></b>	0,91	0,58	1,48	0,89	0,61
<b><i>PROMMAJUN e CHAJIT [2007]</i></b>	0,98	1,02	1,10	1,05	0,37
<b><i>FERRARINI [2014]</i></b>	0,96	0,79	1,30	0,94	0,58

Com os valores apresentados na tabela 5, dos Coeficientes de anisotropia médio ( $r_m$ ) e anisotropia planar ( $\Delta_r$ ) do aço inox AISI 430, os valores se aproximam dos necessários para que ele seja considerado um material anisotrópico ( $r_m$  maior de 1 e  $\Delta_r$  próximo de 0). Quando o material é submetido ao processo de embutimento, ele sofre um uma diminuição na espessura menor que na largura, e assim podendo acarretar um afinamento na largura da chapa (SCHAEFFER, 2017).

### 3.4 CURVA LIMITE CONFORMAÇÃO (CLC)

Para construir a Curva Limite Conformação (CLC's), foi utilizado o ensaio de Nakazima modificado, utilizando as ferramentas padronizadas (figura 8) pelas normas ISO 12004: 2008, assim como as geometrias dos corpos de prova. Foram utilizados oito corpos de prova com espessura de 1 mm, trocando os valores de largura útil ( $b_u$ ), tendo por objetivo prover os diferentes modos de deformações plásticas que ocorrem na estampagem, e assim poder determinar as deformações permissíveis.

Para que fossem possíveis as medições das deformações após o ensaio, foram realizadas gravações com o auxílio de uma malha, com 2,5 mm de diâmetro, por meio de um processo eletroquímico. A gravação é conduzida com o auxílio de uma fonte de 12V, um cabeçote gravador, um feltro, um eletrólito (específico para aços inoxidáveis) e uma tela de Nylon com os círculos marcados. A fonte possui saída para dois polos, um deles positivo que está conectado ao cabeçote, coberto com o feltro, e a saída negativa que está conectada com uma garra na chapa que sofrerá o processo químico. A tela de Nylon é sobreposta na chapa, conectada ao polo negativo, fechando assim o circuito. O processo é feito aplicado do eletrólito, e após é realizada

a passagem do cabeçote sobre a tela, ocorrendo o processo químico, e assim a formação dos círculos.

Com a gravação da malha, o ensaio Nakazima modificado é executado, com as amostras fixadas com uma força bem elevada, para que não ocorra deslizamento da chapa durante o ensaio, entre o prensa-chapas e matriz (figura 19). O punção faz o deslocamento em direção a chapa, com uma velocidade constante de 5 mm/min, ocasionando assim no estiramento, como descrito pela norma ISO 12004:2008. Para que não ocorra força de atrito entre punção e a chapa, foram empregadas três condições de lubrificação nos experimentos (lubrificante 1, lubrificante 2 e lubrificante 3) sendo os lubrificantes específicos para estampagem, composto a base mineral, do mesmo fabricante. Foram aplicados três ensaios para cada tipo de amostra, e sua condição de lubrificação, totalizando assim 72 amostras.

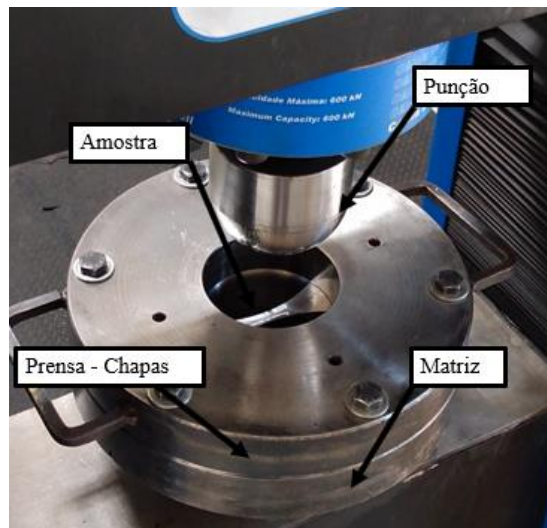


Figura 19 – Ferramental do ensaio de Nakazima modificado, montado na máquina.

O ensaio foi finalizado assim que observado uma queda de força do punção e o surgimento de estrição do corpo de prova localizadas nas amostras do aço inoxidável AISI 430. Com o término dos ensaios, os círculos gravados acabaram se tornando elipses na superfície dos corpos de prova. A medição das elipses ao lado da estrição (para ambos os lados) deve ser conduzida desde que as elipses estejam completas, sendo assim construídas as linhas de contorno.

Para que sejam feitas as medições das deformações nas elipses, são utilizados uma régua flexível, graduada com uma escala de deformações relativas ( $\epsilon$ ) e verdadeira ( $\phi$ ) para a grade de 2,5 mm de diâmetro inicial. Com o auxílio da régua é possível fazer a leitura das deformações, por ela ser transparente e flexível, o que facilita na medição, pois é possível

acompanhar o formato dos corpos de prova para o ensaio de Nakazima, podendo assim fazer as medições das deformações (figura 20). A leitura deve ser feita a partir das linhas transversais da régua, que possuem as mesmas dimensões tanto da largura quanto comprimento das elipses, e equivalem assim às deformações principais máximas ( $\varphi_1$ ) e mínima ( $\varphi_2$ ), respectivamente (FOLLE *et al.*, 2008).

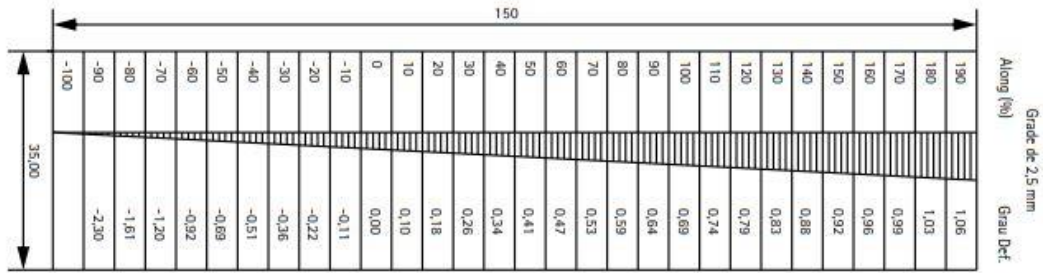


Figura 20 – Régua para a medição das deformações principais. Fonte: LORA (2014).

Na figura 21, são apresentados os dados das curvas CLC's para as três diferentes condições de lubrificação. O ensaio de Nakazima modificado considera que as curvas formam as linhas de tendência para os pares de deformações principais ( $\varphi_1$ ) e mínimas ( $\varphi_2$ ). Elas foram convertidas por meio do software MS Excel. Nas figuras 22, 23 e 24 são apresentados valores encontrados na literatura para possível comparação da curva CLC.

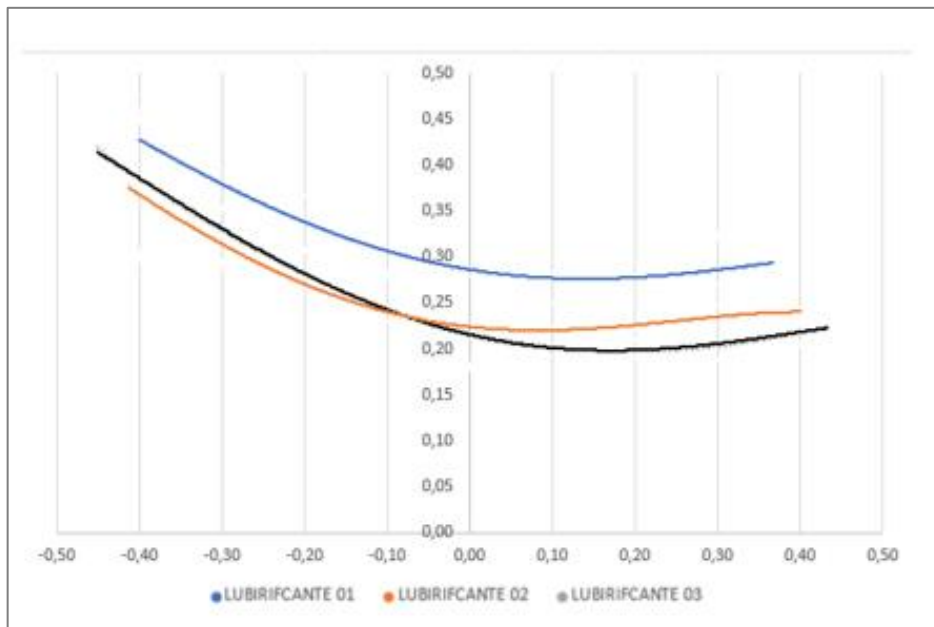


Figura 21 – Curva CLC variando três condições de lubrificação, do aço inoxidável ferrítico AISI 430.

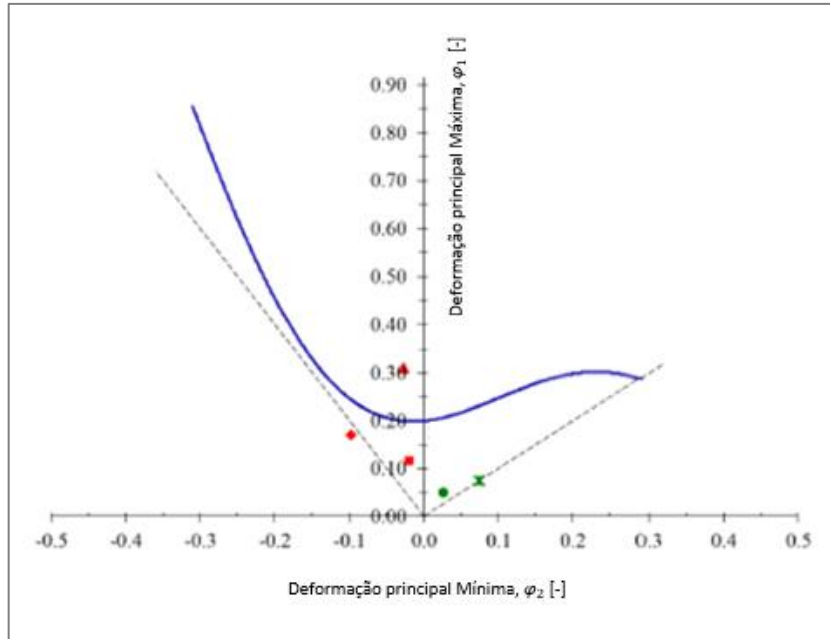


Figura 22 – Curva Limite Conformação para o aço inoxidável AISI 430. Fonte: LUIZ *et al*, (2022)

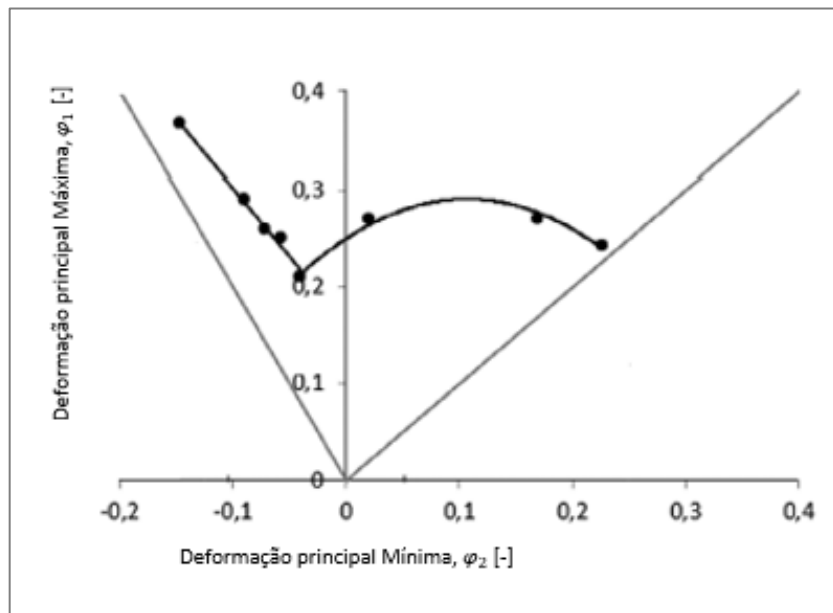


Figura 23 – Curva Limite Conformação para o aço inoxidável AISI 430. Fonte: IQUILIO, *et al*. (2022)

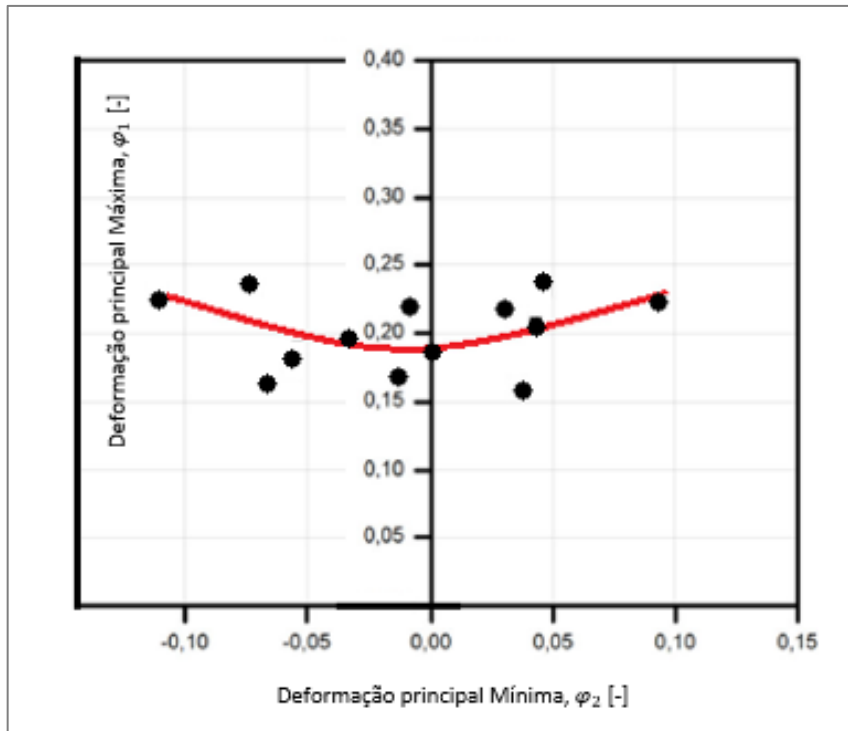


Figura 24 – Curva Limite Conformação para o aço inoxidável AISI 430. Fonte: CARNEIRO, *et al.* (2016)

As pequenas diferenças apresentadas entre as curvas da literatura e as obtidas para o aço inoxidável AISI 430 podem ser em decorrência da aplicação do uso de lubrificação durante os ensaios. Isso se dá uma vez que a variação das viscosidades dos lubrificantes interfere nos resultados obtidos e o ensaio de Nakazima modificado é regido pela norma ISO 12004: 2008. Além disso, deve-se considerar a discrepância nos valores das propriedades mecânicas, que contribuem diretamente na formação da curva CLC.

### 3.5 ÍNDICE ERICHSEN

O índice Erichsen foi realizado seguindo os requisitos da norma ABNT NBR 16281: 2014, com o uso da máquina universal de ensaio mecânicos EMIC do LdTM da UFRGS (figura 25). O punção faz o deslocamento na direção da amostra que está fixada entre o prensa chapas e matriz, com uma velocidade de 5 mm/min. Para que não ocorra deslizamento da chapa durante o ensaio, a força exercida deve ser deveras alta, visando apenas a obtenção do estiramento da chapa até a ruptura. Os ensaios foram conduzidos para três condições de lubrificação.

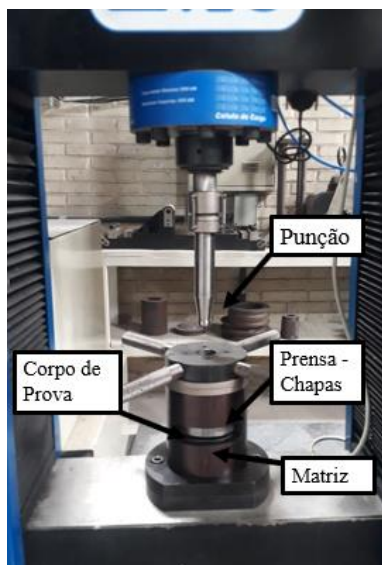


Figura 25 – Ferramental do ensaio de Erichsen.

Na figura 8, apresenta as dimensões do ferramental de Erichsen, sendo o ensaio regido pelo normal e amplamente utilizado na indústria, tanto na literatura nacional quando internacional, com o intuito de avaliar o grau de estampabilidade das chapas metálicas. Os corpos de prova possuem dimensões de 90 mm de diâmetro, e espessura de 1 mm, CP's foram cortados por corte a laser. Na ocorrência de uma queda brusca na força, o ensaio era finalizado, e observado o surgimento da ruptura do material.

A tabela 6 apresenta os valores médios de Índice de Erichsen (IE) e a força máxima que foi obtida para cada condição de lubrificação empregado, com valores encontrados na literatura.

Tabela 6 – Os Índices de Erichsen e as respectivas forças máximas para cada condição de lubrificação, valores obtidos na literatura.

<i>Fonte</i>	<i>Lubrificante</i>	<i>Índice Erichsen, IE [mm]</i>	<i>Força máxima, <math>F_{máx.}</math> [kN]</i>
<i>Determinação Experimental</i>	Lubrificante 1	10,50	12,58
	Lubrificante 2	9,98	13,06
	Lubrificante 3	9,86	13,99
<i>LUIZ (2022)</i>	-	10,3	12,72
<i>FILHO, et al (2007)</i>	-	10	12,90

Observa-se que a aplicação de condição de lubrificação influencia tanto nos valores de IE quanto na força exercida para a realização do experimento, e os valores encontrados na literatura condizem com os obtidos experimentalmente.



### 3.6 DIMENSIONAMENTO DA GERATRIZ

Em relação às dimensões iniciais da geratriz, foi considerado que a geometria da cuba estampada deveria ter altura de 17,5 mm. Calculado através da equação 19, é a relação de estampagem mínima ( $m_R$ ) com relação a tabela 1, recomendada para aços inoxidáveis, de acordo com Rodrigues e Martins (2005b). Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar a influência do tamanho das geratrizes, e os respectivos comportamentos das deformações principais e variação de espessura, durante o processo de estampagem. Foi dimensionado dois tamanhos de geratrizes: para uma cuba com uma profundidade de 17,5 mm e uma com a altura de 22 mm de profundidade, sendo todos os experimentos com uma altura de embutimento de 17,5 mm, para que se mantivesse constante a relação de estampagem em 0,4, exemplificado pela metodologia de Rodrigues e Martins (2005b).

Para o cálculo nas equações 14, 15, 17, 20 e 21, foram relacionadas as dimensões finais da geratriz, os valores estão apresentados na tabela 7, que foram apresentados anteriormente na figura 15, para o método de Tschaetsch (2006).

Tabela 7 – Variáveis escolhidas para o cálculo das dimensões geratriz.

<i>Variáveis</i>	<i>Geratriz Menor</i>	<i>Geratriz Maior</i>
<i>Raio de fundo da cuba, <math>r_b</math></i>	6,5 mm	6,5 mm
<i>Raio lateral da cuba, <math>r_{cc}</math></i>	10 mm	10 mm
<i>Altura interna sem o raio, <math>h</math></i>	11 mm	11 mm
<i>Arestas de fundo da cuba, <math>A</math> e <math>B</math></i>	31 mm	31 mm
<i>Raio de projeto, <math>R</math></i>	19,67 mm	21,84 mm
<i>Fator de correção, <math>x</math></i>	1,05	1,07
<i>Raio de projeto corrigido, <math>R_1</math></i>	20,73 mm	23,37 mm
<i>Abas retas da geratriz, <math>l_a</math> e <math>l_b</math></i>	23,63 mm	27,45 mm

O formato final das geratrizes pode ser visto na figura 26, considerando o experimento conduzido em aço inoxidável AISI 430, com 1 mm de espessura. Este foi o formato utilizado para execução dos ensaios e experimentos deste estudo. A configuração adotada para a geratriz assemelha-se muito a um disco de diâmetro de 78,26 mm e de 85,9 mm, mas com suas diagonais mais longas com valores de 85,24 mm e de 90,58 mm. Estas diagonais correspondem ao diâmetro equivalente da geratriz ( $D_{b,e}$ ). O desenho final da geratriz foi desenhado no software SolidWorks 2017, a partir dos valores que foram apresentados na tabela 7. Para a obtenção dos cantos arredondados, foi feita a aplicação de arcos sobrepostos aos raios de projeto corrigidos ( $R_1$ ) e que, ocasionaram nas tangenciais das extremidades as arestas  $l_a$  e  $l_b$ .

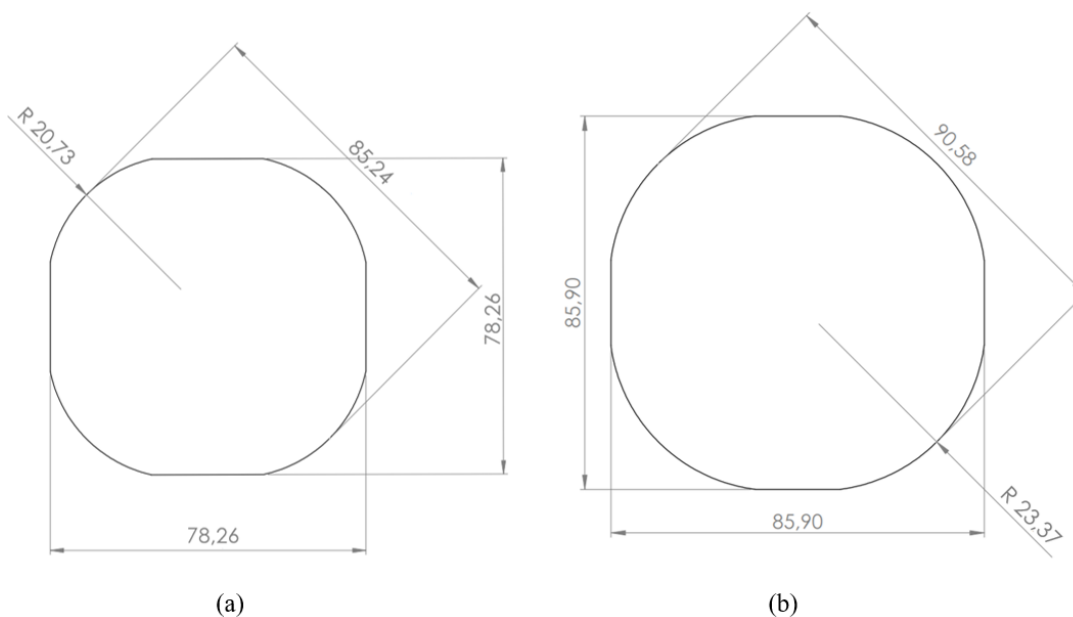


Figura 26 – Formato da geratrizes (a) menor, e (b) menor.

### 3.7 ENSAIO EXPERIMENTAL DE ESTAPAGEM DA PEÇA NÃO-AXISSIMÉTRICA

Para os ensaios de estampagem da cuba, o equipamento utilizado foi uma prensa de duplo efeito da marca Dan Press, com uma velocidade máxima de 19,5 mm/s, a uma capacidade máxima de 178kN, para o cilindro principal e de 53kN para o cilindro secundário (exerce força de contra tensão). Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente, e o equipamento está disponível no LdTM da UFRGS.

Para a coleta de dados como deslocamento e força durante a estampagem, foi utilizada uma célula de carga, com capacidade de 178 kN, localizada logo abaixo da fixação do punção e o deslocamento por meio de transdutor de deslocamento linear (LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*). Os dados processados pelos sensores são transferidos para um sistema de aquisição de dados da marca HBM, da marca *Spider 8*, que estava conectado a um computador, e os dados obtidos foram processados no software *Catman*. No processo de estampagem, a matriz fazia o deslocamento (localizado no cilindro principal) e o prensa chapas (cilindro secundário) permanecia exercendo a força de contra tensão (quando a matriz fazia o contato) e punção permanece estático, com a célula de carga disposta logo abaixo dele, fazendo assim a coleta dos dados, instantaneamente da força de estampagem, como pode ser visto na figura 27. O conjunto de ferramentas do experimento pode ser visto no APÊNDICE A, como ele fica disposto no equipamento.

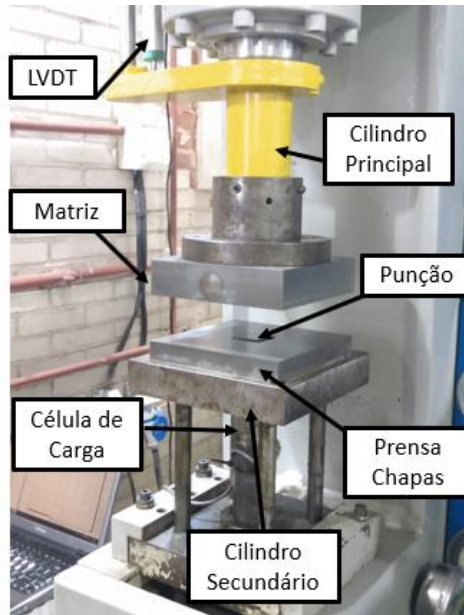


Figura 27 – Montagem dos componentes para a estampagem da cuba na Dan Press.

Na figura 28 podemos observar as divisões o processo de estampagem da cuba, sendo:

- (A) peça preparada para estampagem (com à gravação eletroquímicas) e aplicação da lubrificação;
- (B) peça posicionada na prensa, aguardando o processo de estampagem;
- (C) peça estampada, aguardando a retida na máquina e;
- (D) peça concluída após o processo de estampagem, em aço inoxidável AISI 430.

O ferramental foi confeccionado em Aço carbono SAE 1045, que passou por um processo de usinagem, e posteriormente por tratamento térmico de Nitretação, que ocasionou em endurecimento superficial das ferramentas . Os desenhos dos componentes podem ser vistos no APÊNDICE B, C e D em 2D, da matriz, prensa chapas e punção.

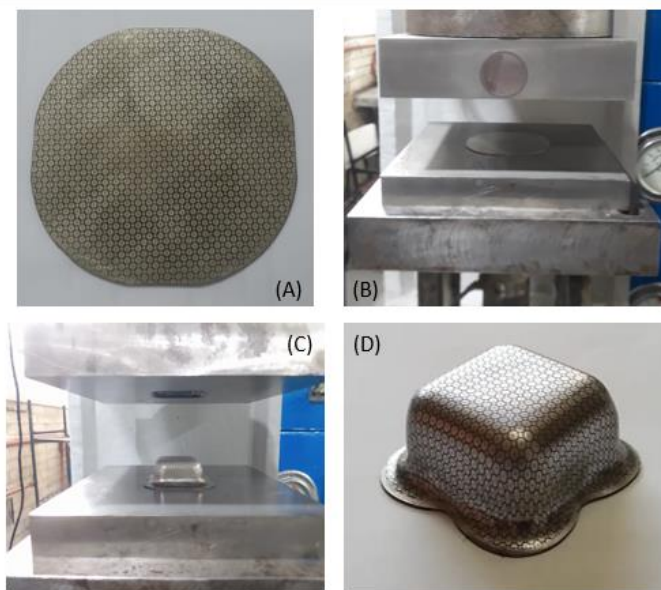


Figura 28 – Demonstrativo da operação de estampagem da cuba, dividido em 4 etapas.

Antes de iniciado o experimento, foram feitas as marcações de círculos de 2,5 mm de diâmetro por meio eletroquímico nas superfícies das amostras, nos mesmos modelos que foram executadas nos ensaios de Nakazima modificado. Assim, seria possível uma posterior comparação das deformações máximas ( $\varphi_1$ ) e mínimas ( $\varphi_2$ ), em locais específicos da cuba.

A quantidade de ensaios realizados de estampagem da cuba foram de 12 condições distintas, utilizando 3 CP's para cada condição empregada, totalizando assim 36 ensaios experimentais, onde foram envolvidas duas condições de prensa chapas, três condições de lubrificação e duas geratrizes com tamanhos diferentes, como pode ser visto na tabela 8. O meio de obtenção dos resultados foi pela força de prensa chapas, pelo método empírico, e ainda foi realizada uma variação na força de pressão, sendo assim escolhidas as condições em que não houve ocorrência de ruptura do material. Com isso foi possível observar que com os valores que foram testados abaixo de 50 bar (5 MPa), houve a ocorrência de rugas nas peças, em decorrência dos valores baixos de pressão do prensa chapas. Já nos valores que ficaram acima de 100 bar (10MPa) foi observado o surgimento de trincas nas regiões do raio da cabeça do punção, devido à pressão (prensa chapas e matriz) ser muito elevada, fazendo com que o material não conseguisse se deslizar para dentro da matriz. Por estes motivos na presente pesquisa optou-se pelo estudo das forças máximas de estampagem, variação de espessura e das deformações, a fim de que se utilizassem os maiores valores destas faixas de pressão do prensa chapas, sem a ocorrência de qualquer tipo de defeito.

Tabela 8 – Parâmetros do processo de estampagem, e suas respectivas variáveis.

<i>Ensaio</i>	<i>Geratriz</i>	<i>Pressão do prensa-chapa, <math>p_{bh}</math> [MPa]</i>	<i>Lubrificante</i>	<i>Espessura do material, <math>s_0</math> [mm]</i>	<i>Velocidade da prensa, <math>v</math> [mm/s]</i>	<i>Deslocamento do punção, <math>d</math> [mm]</i>
<i>CP 01</i>	Pequena	5	Lubrificante 1	1	19,5	17,5
<i>CP 02</i>	Pequena	10	Lubrificante 1	1	19,5	17,5
<i>CP 03</i>	Pequena	5	Lubrificante 2	1	19,5	17,5
<i>CP 04</i>	Pequena	10	Lubrificante 2	1	19,5	17,5
<i>CP 05</i>	Pequena	5	Lubrificante 3	1	19,5	17,5
<i>CP 06</i>	Pequena	10	Lubrificante 3	1	19,5	17,5
<i>CP 07</i>	Grande	5	Lubrificante 1	1	19,5	17,5
<i>CP 08</i>	Grande	10	Lubrificante 1	1	19,5	17,5
<i>CP 09</i>	Grande	5	Lubrificante 2	1	19,5	17,5
<i>CP 10</i>	Grande	10	Lubrificante 2	1	19,5	17,5
<i>CP 11</i>	Grande	5	Lubrificante 3	1	19,5	17,5
<i>CP 12</i>	Grande	10	Lubrificante 3	1	19,5	17,5

### 3.7.1 Método para Obtenção das Deformações Principais

Quando feita uma estampagem há uma variação muito grande nas deformações decorrentes no processo, como pode ser visto no item 2.7. É possível mensurar as deformações principais por meio de círculos impressos na superfície da peça que após o processo de estampagem se tornam elipses. ROCHA (2022) definiu que uma maneira de avaliar as variações das deformações foi observando duas orientações de  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , com relação ao eixo central da peça, com o objetivo de demonstrar, por meio de gráficos o comportamento das deformações principais  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$ , com a complementação que são decorrentes no processo de estampagem de uma cuba: estampagem cilíndrica dos cantos arredondados e dobramento dos lados retos.

Para a obtenção das deformações por meio das elipses foram traçadas duas retas perpendiculares, uma na direção de  $0^\circ$  e outra na direção de  $45^\circ$  (figura 29). A linha traçada a  $0^\circ$  apresenta os valores de deformações que são obtidos pelo processo de dobramento das abas da cuba, e a linha traçada a  $45^\circ$  e possível encontrar os valores de deformação dos cantos arredondados. A mensuração dos valores de deformação das elipses através das duas retas se

dá após os ensaios experimentais. Já os resultados da simulação numérica para o método experimental é o mesmo já detalhado no processo de Nakazima, para ambas as deformações principais máxima ( $\varphi_1$ ) e mínima ( $\varphi_2$ ).

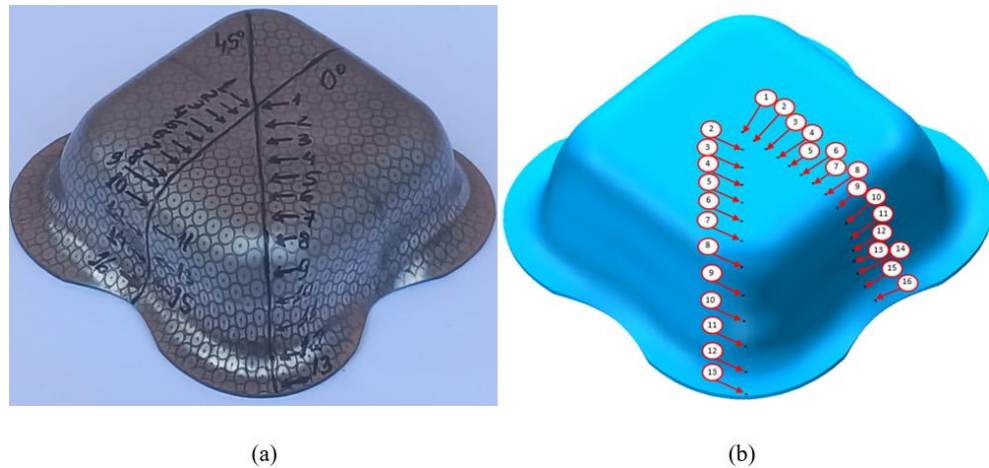


Figura 29 – Método empregado para medição das deformações experimentais (a) e para a simulação numérica (b). Fonte: ROCHA (2022).

Para a direção de  $0^\circ$  com relação ao eixo central da cuba, os pontos identificados podem ser descritos da seguinte maneira: fundo da cuba (pontos 1 ao 8), raio da cabeça do punção (pontos 9 e 10), parede (pontos 11 ao 14), raio de entrada da matriz (ponto 15) e flange (ponto 16), como pode ser visto na figura 29. Para a direção de  $45^\circ$  com relação ao eixo central da cuba, os pontos podem ser descritos da seguinte maneira: fundo da cuba (pontos 1 ao 6), raio da cabeça do punção (pontos 7 ao 9), parede (pontos 10 e 11), raio de entrada da matriz (ponto 12) e flange (ponto 13).

### 3.7.2 Determinação da Variação de Espessura

O método empregado para a avaliação da variação de espessura utilizou um microscópio invertido OLYMPUS DP-GX-51, com o auxílio do software de captura de imagem, AnalySIS. Houve a necessidade de um corte na peça nas duas direções em análise de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  com relação ao eixo central da cuba. Anteriormente, foi analisado o processo de corte da peça, embutimento, lixamento e polimento na peça, a fim de garantir uma melhor visualização. Por meio da microscopia óptica aumentou-se em 50x a resolução do microscópio. Sendo assim, foi possível analisar as regiões das variações de espessura para as duas direções de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  com relação ao eixo da peça.

## 4. METODO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O software utilizado neste estudo foi o *Simufact Forming 15*®, comercializado pela empresa Msc Software Company, baseada na teoria de elementos finitos (FEM). Devido ao uso de geometria não-axissimétrica, a simulação foi realizada em 3D.

Através do software utilizado se torna possível executar análises com variações na temperatura, variando desde temperaturas ambiente até temperatura mais elevadas. Além disso, também podem ser empregados vários processos de conformação mecânica, como: forjamento, trefilação, extrusão, estampagem etc. O software de análise finitas foi utilizado para conduzir a comparação dos resultados analíticos e experimentais. As informações analisadas foram: força máxima de estampagem, deformações principais, e variação de espessura da peça.

Existe um banco de dados disponíveis no software com diversos materiais, mas com algumas restrições de propriedades mecânicas, incluindo variação elevada quando comparada com os resultados experimentais. Devido a esta limitação, foram inseridas na plataforma as propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430, (limite de escoamento, limite de resistência, modulo de elasticidade etc.) com espessura de 1mm. Além disso, também foram incluídos os parâmetros relativos à prensa hidráulica, como velocidade de deslocamento, força exercida pelo prensa-chapas, coeficiente de atrito, e temperatura, entre outros.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO TIPO DE MALHA

O software disponibiliza alguns tipos de malha que podem ser escolhidas conforme melhor se adaptam à geratriz, para que se consiga informação mais precisa dos resultados. Como a geratriz possui uma geometria não-axissimétrica, é aconselhável que seja usada a do tipo *Sheetmesh*. O gerador de malha cria na superfície da peça os elementos quadrados, em decorrência das geometrias iniciais e finais da peça. Com o decorrer do processo, esses quadrados formam um hexaedro, para assim ter uma distribuição mais homogênea da malha no volume da peça. Desta maneira, evita-se uma série de problemas como sobreposição dos elementos da malha, fissuras entre os elementos, e possíveis pontos de contração de tensão.

Com a geração de malha do tipo *Sheetmesh*, se torna possível ainda uma opção de simulação mais rápida, com menor tempo de processamento, na qual é possível gerar uma malha do tipo casca *solid-shell*. Esta opção de malha *solid-shell* faz uma ligação entre plano da casca com uma quantidade definida pelo usuário de elementos ao longo da espessura da chapa.

O fabricante do software especifica que seja utilizado ao menos quatro elementos ao longo da espessura do material.

Para a geratriz em análise foi utilizada a malha do tipo *solid-shell*, com o tamanho das arestas de 1 mm. Com a malha gerada, havendo um total de 26.338, para a geratriz pequena, e um total de 32.213, para a geratriz grande. Para que se chegasse a este valor, assegurou-se os valores de 1 mm de valor nas arestas, verificando assim que os valores não se distanciaram dos apresentados no presente estudo.

#### 4.3 DEFINIÇÃO DO ATRITO

Para que seja definido o atrito entre as ferramentas e a geratriz é necessário verificar o que melhor se adapta ao processo de embutimento. Desta maneira, a Lei de Atrito Coulomb foi selecionada, pois ela demonstra uma dependência permanente da força de atrito presente no processo. A definição dos valores de atrito ( $\mu$ ) foram obtidos através de simulações numéricas, fazendo comparação no gráfico força de estampagem x deslocamento do punção. Estes resultados foram encontrados mediante ensaios experimentais de estampagem da cuba. Para a definição do critério foi adotada a força máxima de estampagem, e as demais variáveis foram mantidas apenas variando o atrito. Definiu-se o valor de coeficiente de atrito para as doze condições de estampagem igualando-se as forças máximas de estampagem, experimental e da simulação, era definido assim o valor do coeficiente de atrito, como pode ser visto nas figuras 30, 31 e 32, os valores de força máxima de estampagem x deslocamento do punção.

Os valores apresentados na tabela 9 definem o atrito encontrado para cada condição de lubrificação. Na tabela 9 pode ser observado que o lubrificante 1 apresentou uma menor interferência entre as ferramentas e geratriz. Por outro lado os valores de atrito ficaram mais elevados com o lubrificante 3, variando mais ainda quando se altera a força do prensa-chapas. É possível ainda observar na tabela os valores que foram inseridos no software de parâmetros do processo de estampagem da cuba.



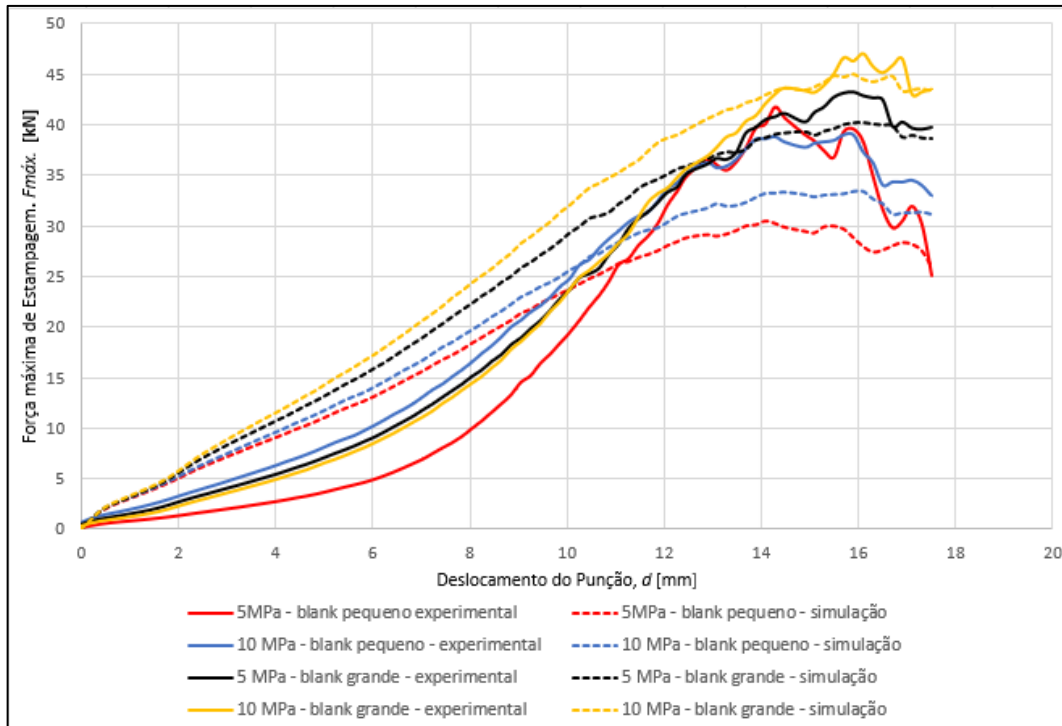


Figura 30 – Gráfico de força máxima de estampagem x deslocamento do punção, obtidos experimentalmente e numericamente para a condição de lubrificação 1, variando a força do prensa chapas tamanho de geratriz.

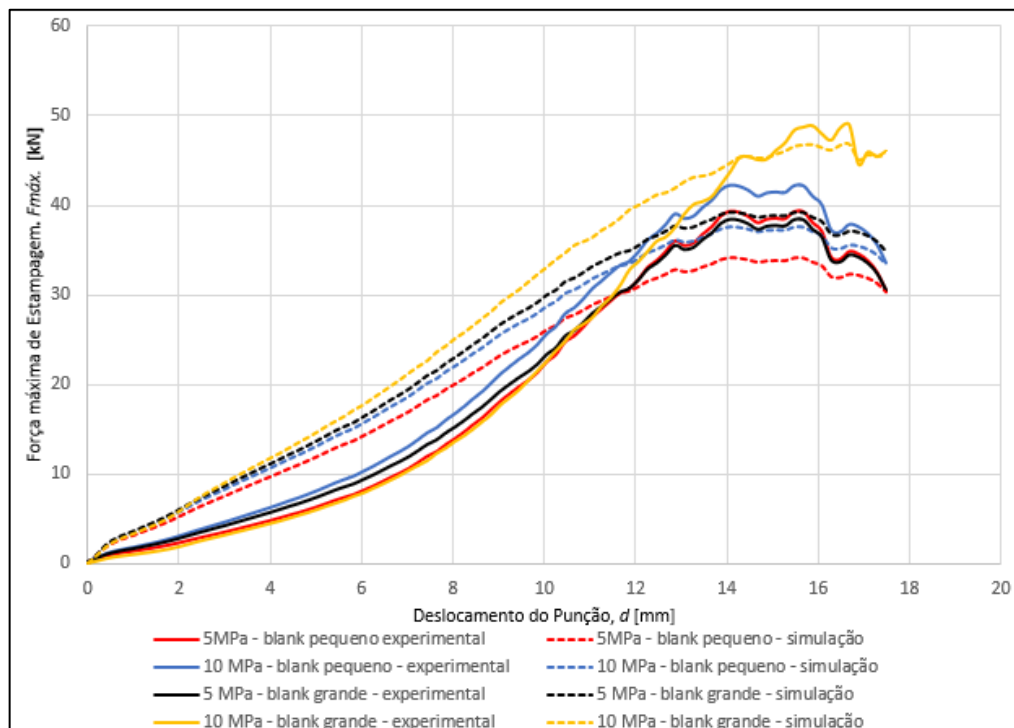


Figura 31 - Gráfico de força máxima de estampagem x deslocamento do punção, obtidos experimentalmente e numericamente para a condição de lubrificação 2, variando a força do prensa chapas tamanho de geratriz

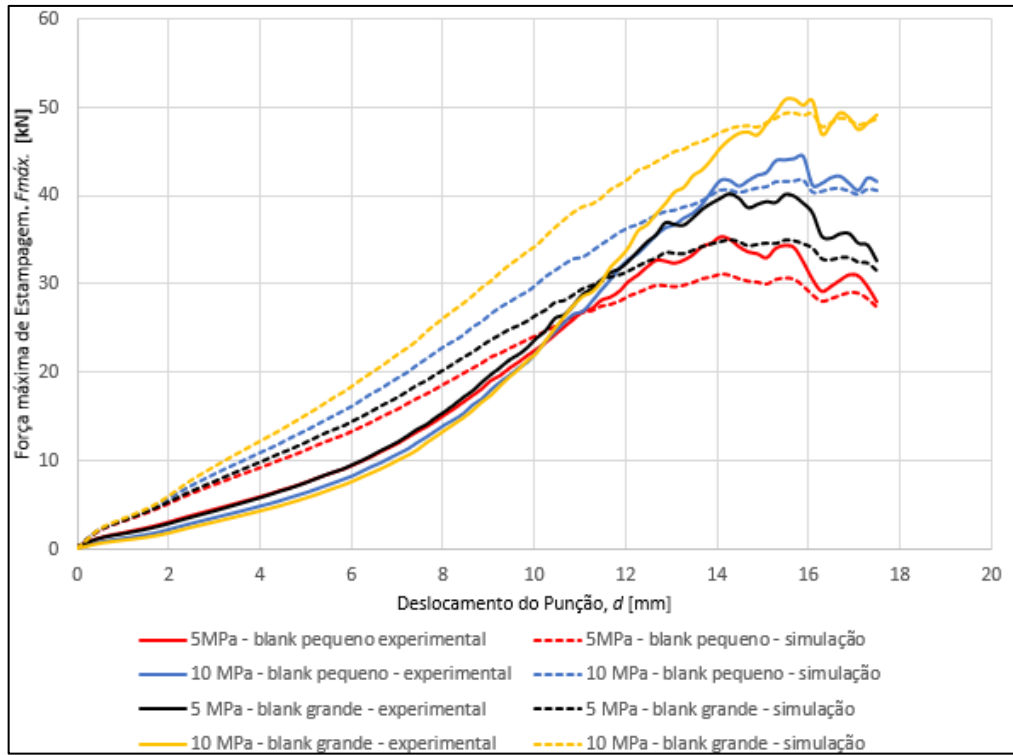


Figura 32 - Gráfico de força máxima de estampagem x deslocamento do punção, obtidos experimentalmente e numericamente para a condição de lubrificação 3, variando a força do prensa chapas tamanho de geratriz

Tabela 9 – Informações inseridas no software *Simufact Forming 15*.

<i>Parâmetros</i>	<i>CP 01</i>	<i>CP 02</i>	<i>CP 03</i>	<i>CP 04</i>	<i>CP 05</i>	<i>CP 06</i>	<i>CP 07</i>	<i>CP 08</i>	<i>CP 09</i>	<i>CP 10</i>	<i>CP 11</i>	<i>CP 12</i>
<i>Material das ferramentas</i>	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13	AISI H13
<i>Material da geratriz</i>	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430	AISI 430
<i>Tamanho da Geratriz</i>	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
<i>Elementos de malha da geratriz</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>	<i>solid-shell</i>
<i>Tamanho dos elementos</i>	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
<i>Quantidade de elementos</i>	26.338	32.213	26.338	32.213	26.338	32.213	26.338	32.213	32.213	32.213	26.338	32.213
<i>Pressão do prensa-chapa, <math>p_{bh}</math></i>	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa
<i>Força do prensa-chapa, <math>F_{bh}</math></i>	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN
<i>Lubrificante</i>	LUB.1	LUB.1	LUB.2	LUB.2	LUB.3	LUB.3	LUB.1	LUB.1	LUB.2	LUB.2	LUB.3	LUB.3
<i>Coefficiente de atrito, <math>\mu</math></i>	0,09	0,12	0,1	0,14	0,11	0,15	0,09	0,12	0,1	0,14	0,11	0,15
<i>Deslocamento do punção, <math>d</math></i>	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm	17,5 mm
<i>Velocidade da prensa</i>	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s	19,5 mm/s

#### 4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

O material das ferramentas (matriz, prensa-chapas e punção) foram considerados ferramentas rígidas e não deformáveis. As ferramentas foram fabricadas em aço AISI 1045, que passaram por tratamento térmico de nitretação. Este tratamento foi necessário pois não foi realizada a caracterização do material para inserção no banco de dados do software. O material então foi definido como aço ferramentas H13, pois o software não disponibilizava das propriedades mecânicas do aço AISI 1045 para ferramenta.

Os dados apresentados do aço inoxidável AISI 430 de anisotropia média e planar se aproximaram da condição anisotropia ( $r_m = 1$  e  $\Delta_r = 0$ ), como demonstra a tabela 5. Para que os resultados se assemelhem mais aos ensaios experimentais foi inserido no banco de dados do software as propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430. Utilizou-se o valor médio obtido entre as três direções de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ), apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430 para as três direções de laminação, inseridos no software *Simufact Forming 15*.

<i>Propriedade mecânica</i>	<i>Direção de laminação 0°</i>	<i>Direção de laminação 45°</i>	<i>Direção de laminação 90°</i>	<i>Média</i>
<i>Limite de escoamento, <math>R_e</math></i>	253,7 MPa	239,5 MPa	244,6 MPa	245,6 MPa
<i>Limite de resistência, <math>R_m</math></i>	429,6 MPa	403,8 MPa	412,4 MPa	415,3 MPa
<i>Módulo de Elasticidade, <math>E</math></i>	200 GPa	200 GPa	200 GPa	200GPa
<i>Coefficiente de resistência, <math>C</math></i>	697,5 MPa	663,9 MPa	675,1 MPa	678,8 Mpa
<i>Índice de encruamento, <math>n</math></i>	0,20 [-2]	0,20 [-]	0,20 [-]	0,20 [-]
<i>Coefficiente de anisotropia, <math>r</math></i>	1,37 [-]	1,10 [-]	1,13 [-]	1,22 [-]
<i>Densidade, <math>\rho</math></i>	8 g/cm <sup>3</sup>	8 g/cm <sup>3</sup>	8 g/cm <sup>3</sup>	8 g/cm <sup>3</sup>
<i>Coefficiente de Poisson, <math>\nu</math></i>	0,3 [-]	0,3 [-]	0,3 [-]	0,3 [-]

## 5. ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 5.1 CÁLCULOS ANALÍTICOS

#### 5.1.1 Força Máxima de Estampagem

A força máxima de estampagem ( $F_{p,max}$ ) foi calculada por meio de uma estimativa a partir das condições empregadas na estampagem, realizadas na simulação numérica e experimentalmente. As devidas equações levam incógnitas, como os dados de propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430, as dimensões das ferramentas e o atrito obtido pela condições de estampagem. A metodologia de cálculo aplicada para a obtenção da força máxima de estampagem foi fornecida por Rivas-Menchi *et al.* (2018) e Rodrigues e Martins (2005b), com o objetivo de validar a metodologia de cálculo que melhor se adapta às condições de estampagem de peças não-axissimétricas, comparados com os ensaios experimentais.

Rivas-Menchi *et al.* (2018) aplica as equações para o cálculo de força máxima de estampagem de Siebel (1955), explicitada na equação 26, Siebel-Beisswanger (1955) explicitada na equação 34, Lange (1985) explicitada na equação 35 e Tschachtsch (2006) explicitada na equação 37. Originalmente, estas equações eram definidas para cálculos de peças axissimétricas e foram adaptadas pelos autores para cálculo de peças não-axissimétricas. Na tabela 11, são apresentadas as informações das propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430, as geometrias das ferramentas, variáveis do processo de embutimento, e as respectivas variáveis.

Considerando a metodologia de obtenção da força máxima de estampagem por Rodrigues e Martins (2008 b) (explicitada na equação 38), na tabela 12, são apresentadas as informações das propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 430, as geometrias das ferramentas, variáveis do processo de embutimento, e as respectivas variáveis. Sendo assim os valores obtidos analiticamente, são apresentados na tabela 14 .

Tabela 11 – Variáveis necessárias para o cálculo de força máxima de estampagem por Rivas-Menchi *et al.* (2018).

<i>Parâmetros</i>	<i>CP 01</i>	<i>CP02</i>	<i>CP03</i>	<i>CP 04</i>	<i>CP 05</i>	<i>CP 06</i>	<i>CP 07</i>	<i>CP 08</i>	<i>CP 09</i>	<i>CP 10</i>	<i>CP 11</i>	<i>CP 12</i>
<i>Limite de resistência, R<sub>m</sub></i>	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa
<i>Índice de encruamento, n</i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Constante C</i>	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa
<i>Espessura da chapa, s<sub>0</sub></i>	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
<i>Tamanho do blank</i>	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Maior	Maior	Maior	Maior	Maior	Maior
<i>Lubrificante</i>	LUB. 1	LUB. 1	LUB. 2	LUB. 2	LUB. 3	LUB. 3	LUB. 1	LUB. 1	LUB. 2	LUB. 2	LUB. 3	LUB. 3
<i>Coefficiente de atrito, μ</i>	0,12	0,15	0,08	0,10	0,07	0,13	0,11	0,09	0,18	0,14	0,15	0,17
<i>Pressão do prensa-chapa, p<sub>bh</sub></i>	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa
<i>Força do prensa-chapa, F<sub>bh</sub></i>	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN	5,74 kN	11,48 kN	9,94 kN	19,87 kN	9,94 kN	19,87 kN	9,94 kN	19,87 kN
<i>Coefficiente de eficiência, η<sub>li</sub></i>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<i>Diâmetro equivalente blank, D<sub>b,e</sub></i>	85,24 mm	85,24 mm	85,24 mm	85,24 mm	85,24 mm	85,24 mm	90,58 mm	90,58 mm	90,58 mm	90,58 mm	90,58 mm	90,58 mm
<i>Diâmetro equivalente do flange, D<sub>e</sub></i>	65,64 mm	65,64 mm	65,64 mm	65,64 mm	65,64 mm	65,64 mm	69,75 mm	69,75 mm	69,75 mm	69,75 mm	69,75 mm	69,75 mm
<i>Diâmetro equivalente do punção, d<sub>p,e</sub></i>	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm	53,94 mm
<i>Raio de entrada da matriz, r<sub>d</sub></i>	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm
<i>Raio lateral do punção, r<sub>pc</sub></i>	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
<i>Raio da cabeça do punção, r<sub>pb</sub></i>	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm
<i>Arestas do punção, a e b</i>	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm

<i>Perímetro do blank, <math>P_B</math></i>	261,56 mm	261,56 mm	261,56 mm	261,56 mm	261,56 mm	261,56 mm	280,1 mm	280,1 mm	280,1 mm	280,1 mm	280,1 mm	280,1 mm
<i>Perímetro médio da peça, <math>P_m</math></i>	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm	161,97 mm
<i>Deformação verdadeira no diâmetro externo do flange, <math>\varphi_{1,1}</math></i>	0,26 [-]	0,26 [-]	0,26 [-]	0,26 [-]	0,26 [-]	0,26 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]
<i>Deformação verdadeira no raio de entrada da matriz, <math>\varphi_{2,1}</math></i>	0,24 [-]	0,24 [-]	0,24 [-]	0,24 [-]	0,24 [-]	0,24 [-]	0,27 [-]	0,27 [-]	0,27 [-]	0,27 [-]	0,27 [-]	0,27 [-]
<i>Deformação verdadeira na parede da peça, <math>\varphi_{3,1}</math></i>	0,31 [-]	0,31 [-]	0,31 [-]	0,31 [-]	0,31 [-]	0,31 [-]	0,34 [-]	0,34 [-]	0,34 [-]	0,34 [-]	0,34 [-]	0,34 [-]
<i>Tensão de escoamento na região do diâmetro externo do flange, <math>kf_{1,1}</math></i>	822,3 MPa	822,3 MPa	822,3 MPa	822,3 MPa	822,3 MPa	822,3 MPa	878 MPa	878 MPa	878 MPa	878 MPa	878 MPa	878 MPa
<i>Tensão de escoamento na região de entrada e saída do raio da matriz, <math>kf_{2,1}</math></i>	852,7 MPa	852,7 MPa	852,7 MPa	852,7 MPa	852,7 MPa	852,7 MPa	889,2 MPa	889,2 MPa	889,2 MPa	889,2 MPa	889,2 MPa	889,2 MPa
<i>Tensão de escoamento média, <math>kf_m</math></i>	837,5 MPa	837,5 MPa	883,6 MPa	883,6 MPa	837,5 MPa	837,5 MPa	883,6 MPa	883,6 MPa	837,5 MPa	837,5 MPa	883,6 MPa	883,6 MPa
<b>Resultados de força máxima de estampagem, <math>F_{p,max}</math></b>												
<i>Siebel (1955) equação 26</i>	24,54 kN	25,63 kN	23,00 kN	23,80 kN	22,58 kN	24,82 kN	34,68 kN	33,80 kN	38,80 kN	36,45 kN	37,03 kN	38,21 kN
<i>Siebel-Beisswanger (1955) equação 34</i>	23,73 kN	23,73 kN	23,73 kN	23,73 kN	23,73 kN	23,73 kN	34,33 kN	34,33 kN	34,33 kN	34,33 kN	34,33 kN	34,33 kN
<i>Lange (1985) equação 35</i>	46,66 kN	46,66 kN	46,66 kN	46,66 kN	46,66 kN	46,66 kN	60,84 kN	60,84 kN	60,84 kN	60,84 kN	60,84 kN	60,84 kN
<i>Tschaetsch (2006) equação 37</i>	27,06 kN	27,06 kN	27,06 kN	27,06 kN	27,06 kN	27,06 kN	31,01 kN	31,01 kN	31,01 kN	31,01 kN	31,01 kN	31,01 kN

Tabela 12 – Variáveis para o cálculo de força máxima de estampagem, por Rodrigues e Martins (2008).

<i>Parâmetros</i>	<i>CP 01</i>	<i>CP02</i>	<i>CP03</i>	<i>CP 04</i>	<i>CP 05</i>	<i>CP 06</i>	<i>CP 07</i>	<i>CP 08</i>	<i>CP 09</i>	<i>CP 10</i>	<i>CP 11</i>	<i>CP 12</i>
<i>Limite de resistência, <math>R_m</math></i>	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa	415,3 MPa
<i>Índice de encruamento, <math>n</math></i>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Constante <math>C</math></i>	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa	678,8 MPa
<i>Espessura da chapa, <math>s_0</math></i>	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
<i>Tamanho do blank</i>	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Menor	Maior	Maior	Maior	Maior	Maior	Maior
<i>Lubrificante</i>	LUB. 1	LUB. 1	LUB. 2	LUB. 2	LUB. 3	LUB. 3	LUB. 1	LUB. 1	LUB. 2	LUB. 2	LUB. 3	LUB. 3
<i>Coefficiente de atrito, <math>\mu</math></i>	0,15	0,10	0,18	0,08	0,09	0,13	0,11	0,12	0,13	0,16	0,17	0,14
<i>Pressão do prensa-chapa, <math>p_{bh}</math></i>	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa	5 MPa	10 MPa
<i>Raio de entrada da matriz, <math>r_d</math></i>	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm
<i>Raio lateral do punção, <math>r_{pc}</math></i>	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
<i>Raio da cabeça do punção, <math>r_{pb}</math></i>	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm	6,5 mm
<i>Raio lateral da cuba, <math>r_{cc}</math></i>	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
<i>Raio inicial do canto do blank, <math>r_1</math></i>	20,73 mm	20,73 mm	20,73 mm	20,73 mm	20,73 mm	20,73 mm	23,37mm	23,37 mm	23,37 mm	23,37 mm	23,37mm	23,37 mm
<i>Arestas do punção, <math>a</math> e <math>b</math></i>	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm	44 mm
<i>Comprimento das abas auxiliares para desenho do blank, <math>l_a</math> e <math>l_b</math></i>	23,63 mm	23,63 mm	23,63 mm	23,63 mm	23,63 mm	23,63 mm	27,45 mm	27,45 mm	27,45 mm	27,45 mm	27,45 mm	27,45 mm
<i>Deformação verdadeira no momento da força máxima, <math>\varphi_{1,2}</math></i>	0,25 [-]	0,25 [-]	0,25 [-]	0,25 [-]	0,25 [-]	0,25 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]	0,32 [-]
<i>Deformação verdadeira no final do processo de estampagem, <math>\varphi_{2,2}</math></i>	0,08 [-]	0,08 [-]	0,08 [-]	0,08 [-]	0,08 [-]	0,08 [-]	0,09 [-]	0,09 [-]	0,09 [-]	0,09 [-]	0,09 [-]	0,09 [-]
<i>Tensão de escoamento no momento da força máxima, <math>kf_{1,2}</math></i>	514,4 MPa	514,4 MPa	514,4 MPa	514,4 MPa	514,4 MPa	514,4 MPa	540,4 MPa	540,4 MPa	540,4 MPa	540,4 MPa	540,4 MPa	540,4 MPa



<i>Tensão de escoamento no final do processo de estampagem, <math>kf_{2,2}</math></i>	409,6 MPa	409,6 MPa	409,6 MPa	409,6 MPa	409,6 MPa	409,6 MPa	409,6 MPa	419,4 MPa	419,4 MPa	419,4 MPa	419,4 MPa	419,4 MPa	419,4 MPa
<i>Tensão de escoamento média, <math>kf_m</math></i>	462,0 MPa	462,0 MPa	462,0 MPa	462,0 MPa	462,0 MPa	462,0 MPa	462,0 MPa	478,0 MPa	478,0 MPa	478,0 MPa	478,0 MPa	478,0 MPa	478,0 MPa
<i>Coefficiente de correção para o dobramento dos lados retos, <math>Q_l</math></i>	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]	1,49 [-]
<i>Força do prensa-chapa aplicada nos cantos arredondados, <math>F_{bh_c}</math></i>	1,94 kN	3,88 kN	1,94 kN	3,88 kN	1,94 kN	3,88 kN	3,77 kN	7,54 kN	3,77 kN	7,54 kN	3,77 kN	7,54 kN	7,54 kN
<i>Força do prensa-chapa aplicada nos lados retos, <math>F_{bh_l}</math></i>	2,95 kN	5,9 kN	2,95 kN	5,9 kN	2,95 kN	5,9 kN	4,77 kN	9,54 kN	4,77 kN	9,54 kN	4,77 kN	9,54 kN	9,54 kN
<i>Força de estampagem dos cantos arredondados, <math>F_{p_c}</math></i>	33,19 kN	33,80 kN	34,65 kN	30,02 kN	29,29 kN	32,21 kN	31,07 kN	31,56 kN	32,05 kN	33,81 kN	34,00 kN	32,53 kN	32,53 kN
<i>Força de estampagem das abas retas, <math>F_{p_l}</math></i>	9,50 kN	9,16 kN	9,70 kN	9,03 kN	9,09 kN	9,36 kN	9,21 kN	9,28 kN	9,34 kN	9,55 kN	9,62 kN	9,36 kN	9,36 kN
<i>Força máxima de estampagem, <math>F_{p,max}</math></i>	42,6 kN	42,9 kN	44,3 kN	39,0 kN	38,4 kN	41,6 kN	40,3 kN	40,8 kN	41,4 kN	43,4 kN	43,6 kN	41,9 kN	41,9 kN

## 5.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

### 5.2.1 Variação de Espessura

Para a obtenção da variação da espessura na simulação, os pontos em análise foram identificados no item 3.7.1 deste estudo. Eles são os mesmos analisados para a obtenção da variação de espessura experimentalmente.

A coleta dos dados foi feita manualmente dentro do software, onde foram feitas marcações dos pontos em análise, e plotados no software MS Excel, para que fosse gerada o perfil de análise dos pontos. Na figura 33, 34 e 35 apresentam as variações de espessura nas condições de lubrificação empregadas (Lub.1, Lub.2 e Lub.3), com 5 e de 10 bar de pressão do prensa chapas, e os dois tamanhos geratrizes, para as direções de 0° e 45°.

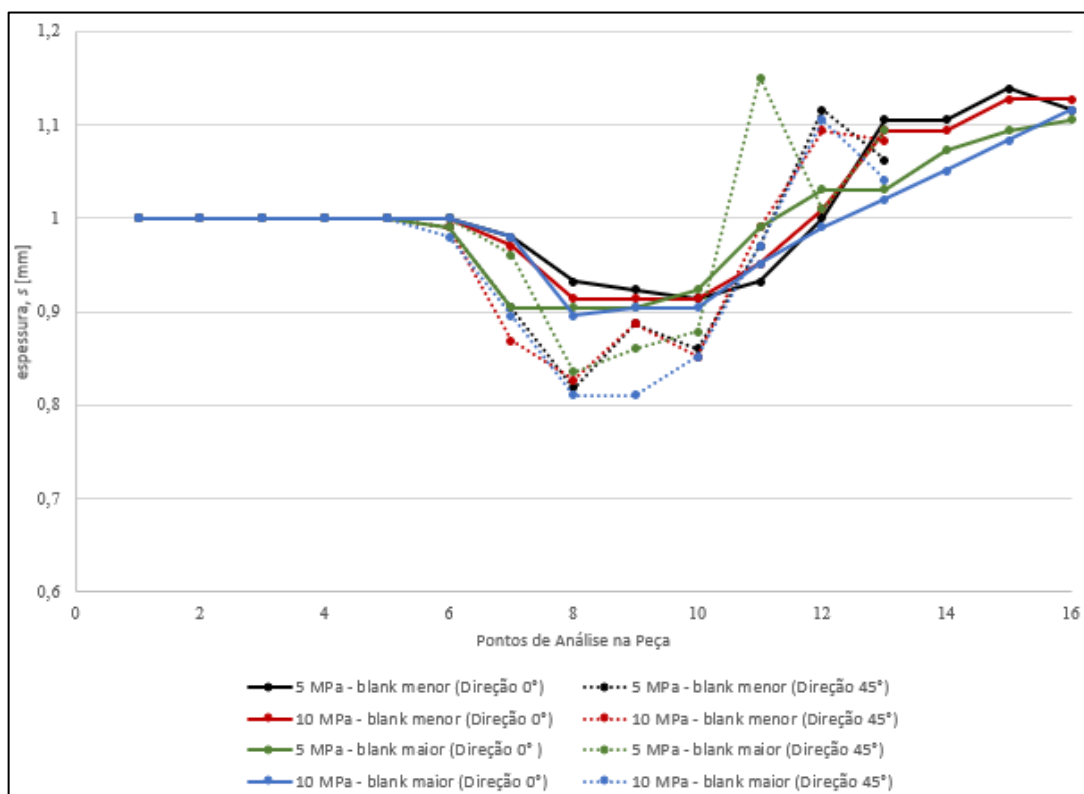


Figura 33 – Variação de espessura na simulação numérica, aplicando a condição de lubrificação 1, e suas variações de prensa chapas e duas geratrizes.

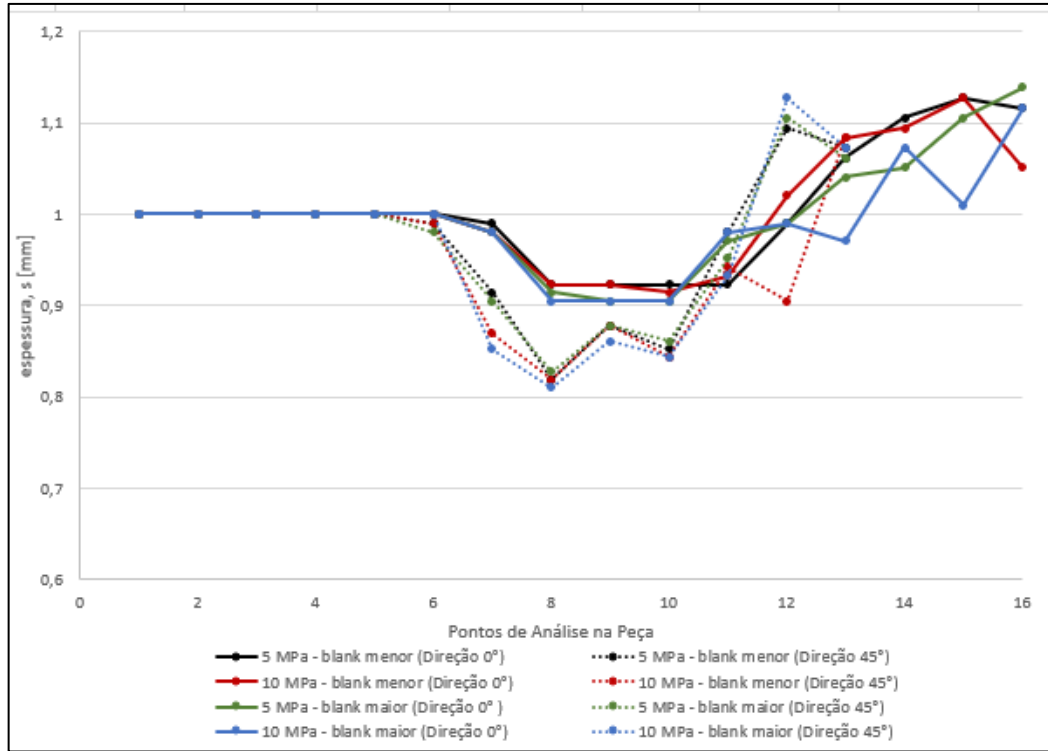


Figura 34 – Variação de espessura na simulação numérica, aplicando a condição de lubrificação 2, e suas variações de prensa chapas e duas geratrizes.

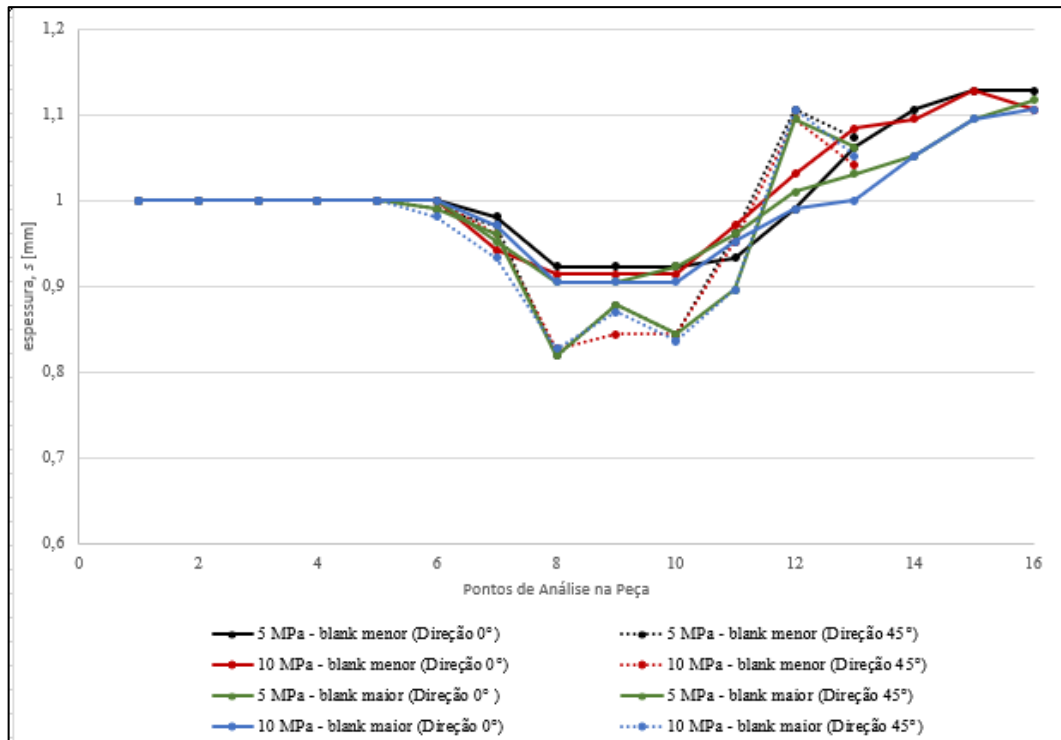


Figura 35 - Variação de espessura na simulação numérica, aplicando a condição de lubrificação 3, e suas variações de prensa chapas e duas geratrizes.

Como possível observar, não houve uma redução muito expressiva nos valores encontrados da variação de espessura, ficando em torno de 0,8 a 1,15 máximo. Leva-se em consideração que a espessura inicial da chapa era de 1 mm, para as direções de 0° e 45°, com relação ao eixo central da peça. Conforme observado, a variação de espessura demonstrou alguns picos nos pontos 7, 8, 9, 10 e 11, e na região localizada na cabeça do punção houve uma redução da espessura. Já os pontos 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 tendem a aumentar a espessura da chapa, localizado na região do raio de entrada matriz e no flange, pela Lei da Constância de Volume.

### 5.2.2 Deformações Principais Verdadeiras

Em relação às deformações principais  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , os pontos analisados foram apresentados no item 3.7.1 deste estudo, sendo os mesmos pontos analisados experimentalmente. Os valores foram coletados através da simulação computacional.

A plotagem dos valores das deformações principais será apresentada nas figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 e 47 ressaltando a análise que foi feita nas duas direções de 0° e 45°, a partir do eixo.

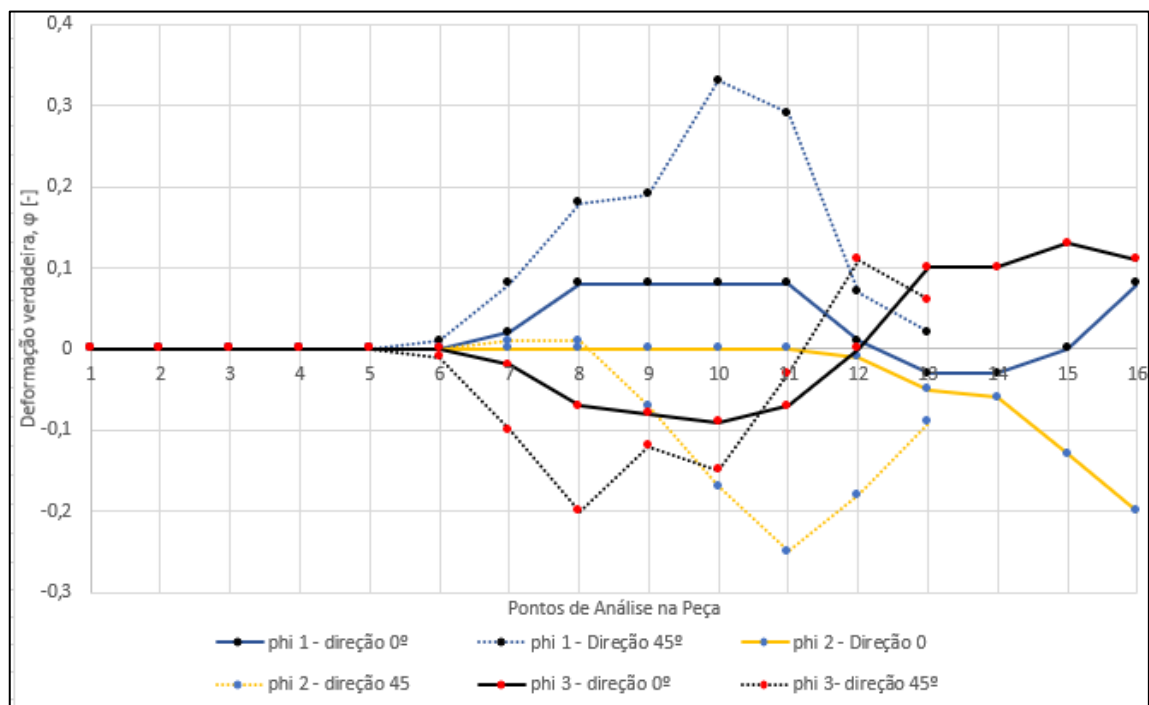


Figura 36 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, nas condições de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

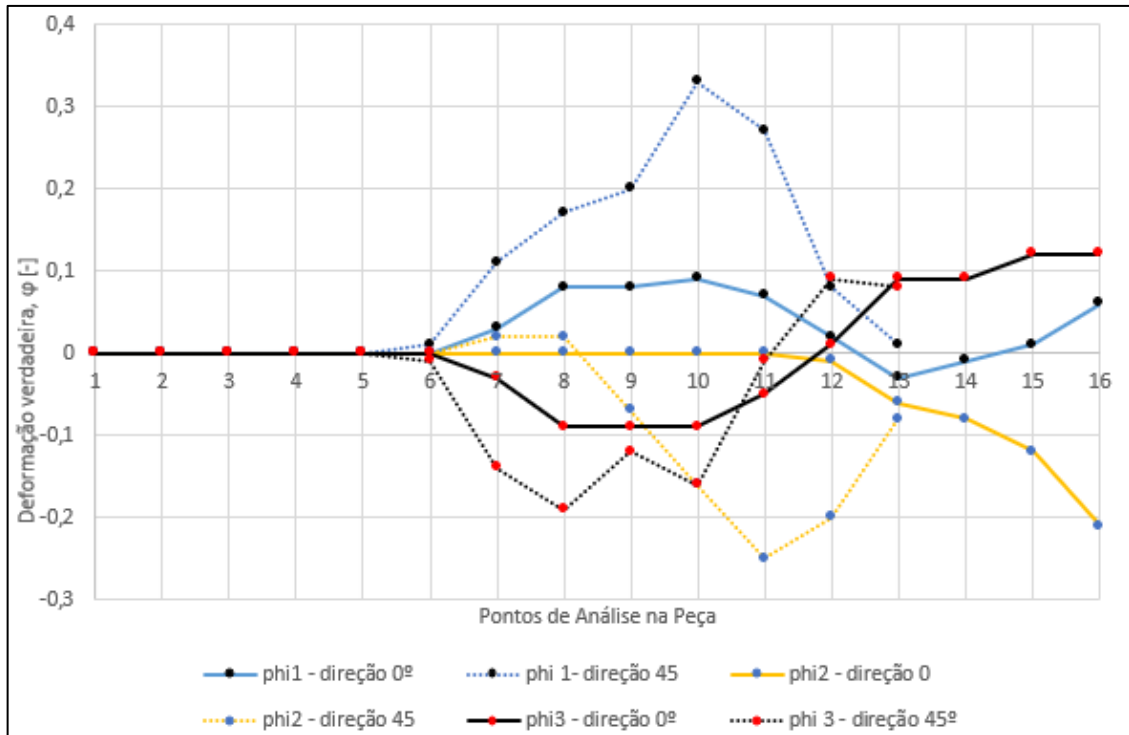


Figura 37 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem, para geratriz pequena, nas condições de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

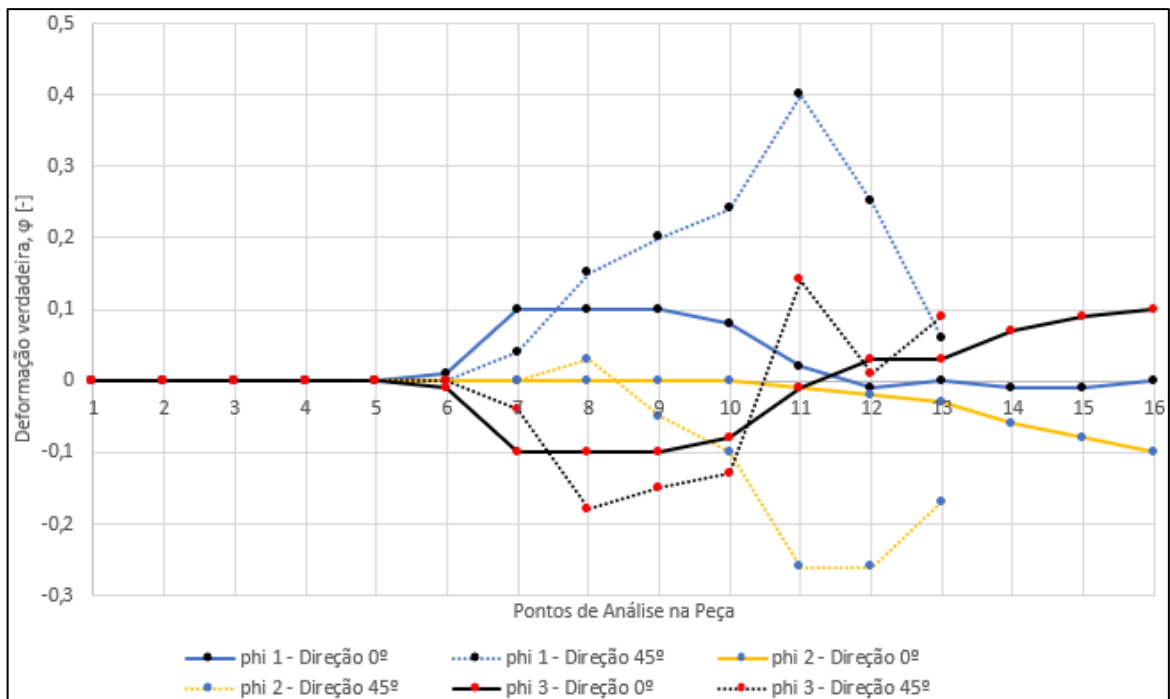


Figura 38 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

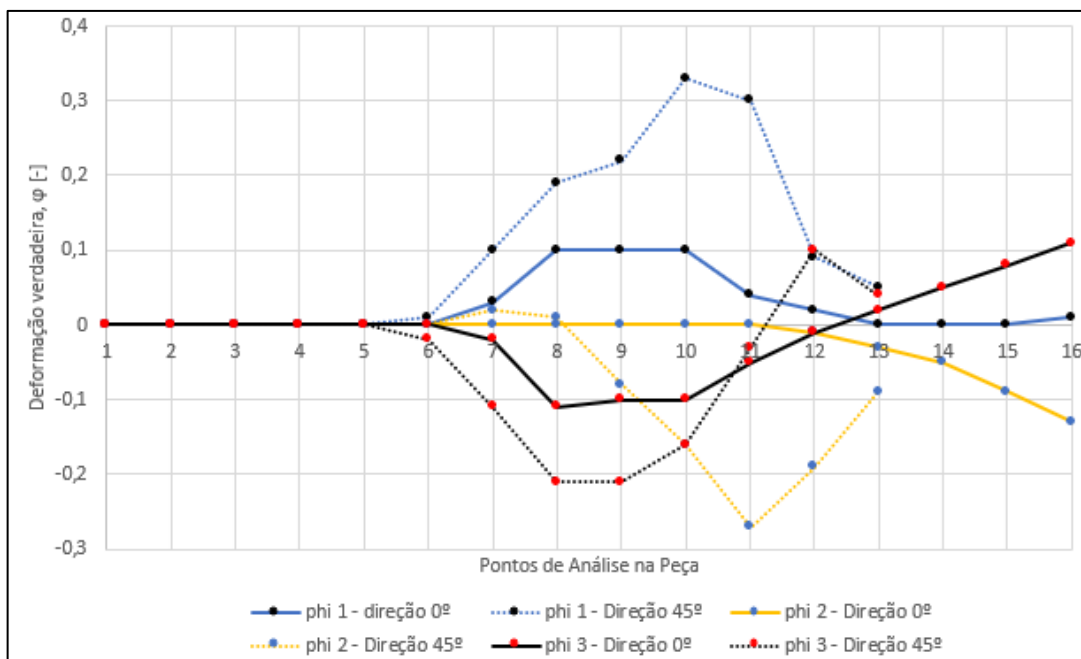


Figura 39 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

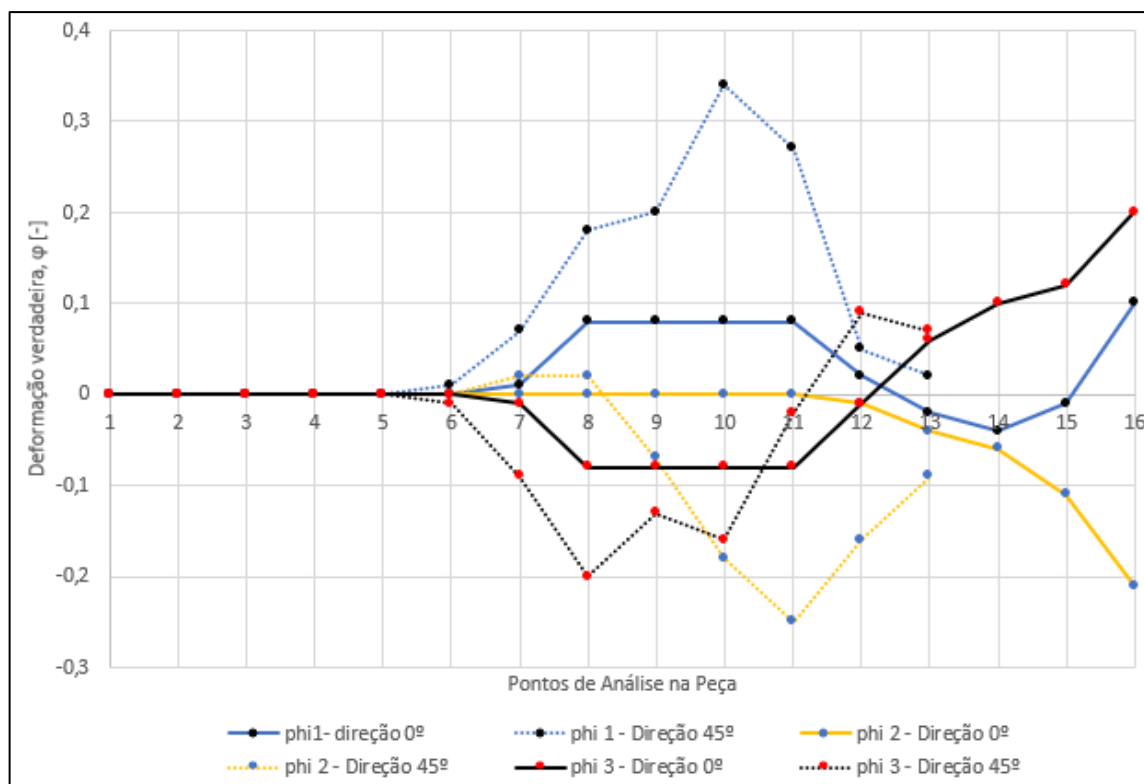


Figura 40 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

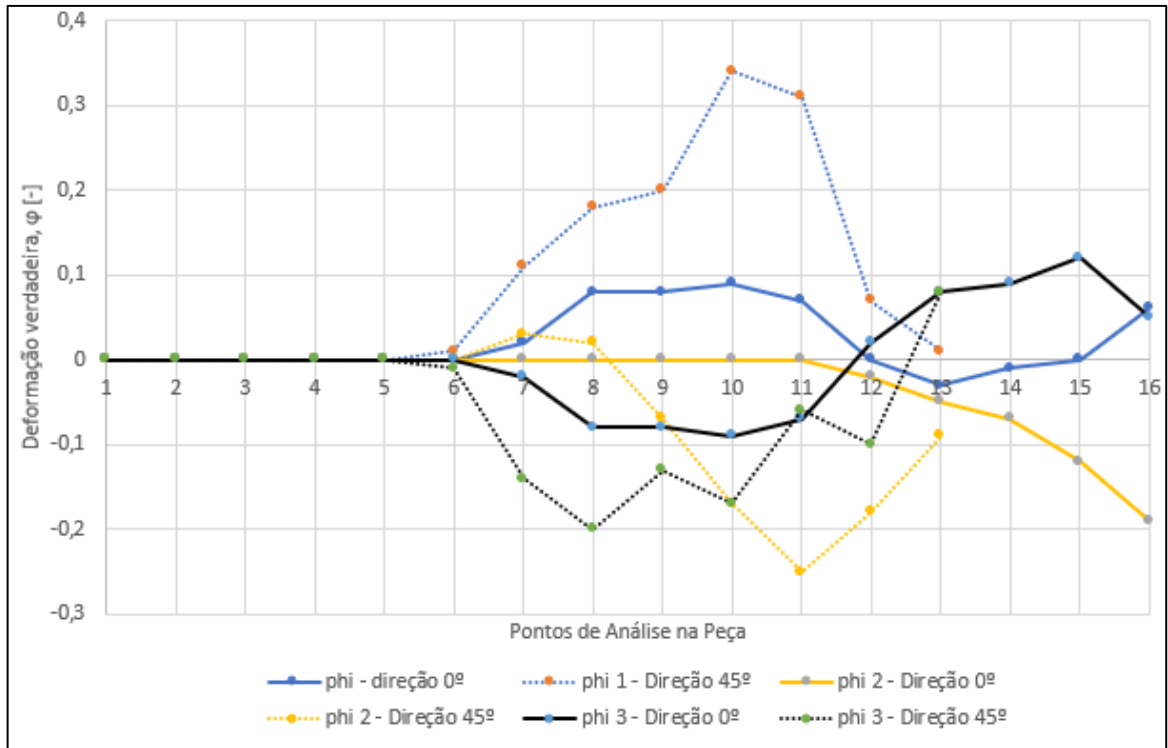


Figura 41 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

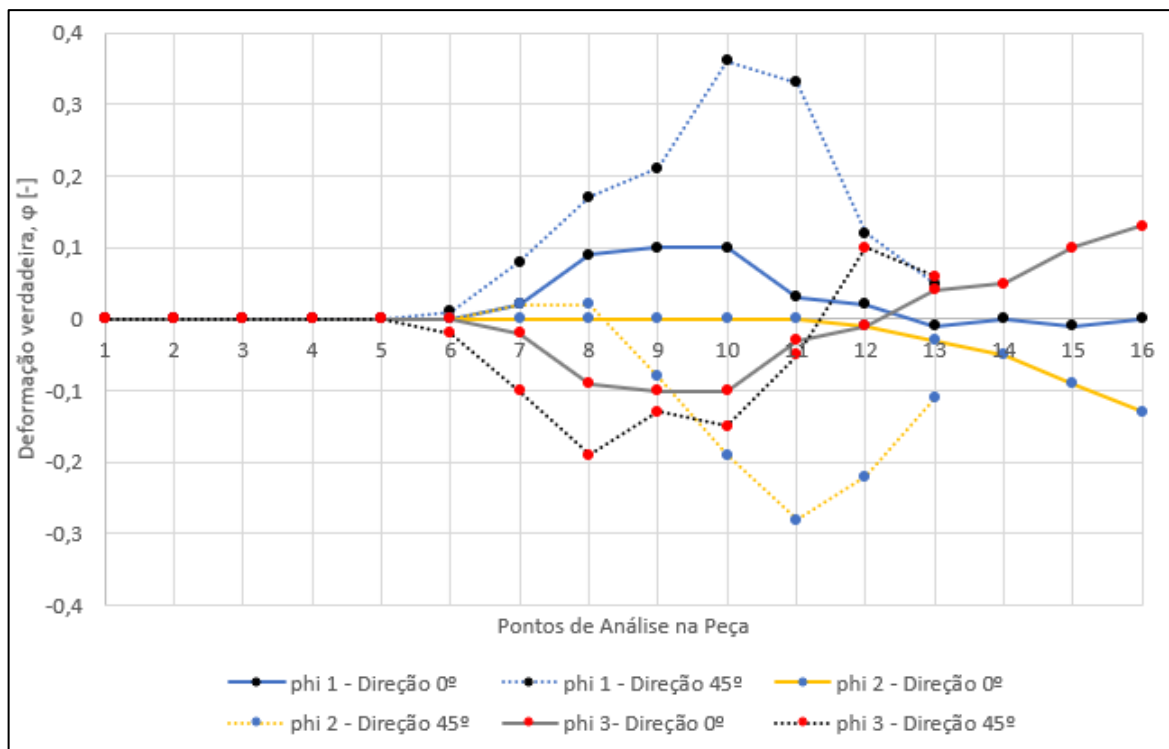


Figura 42 – Comportamentos das deformações principais, na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

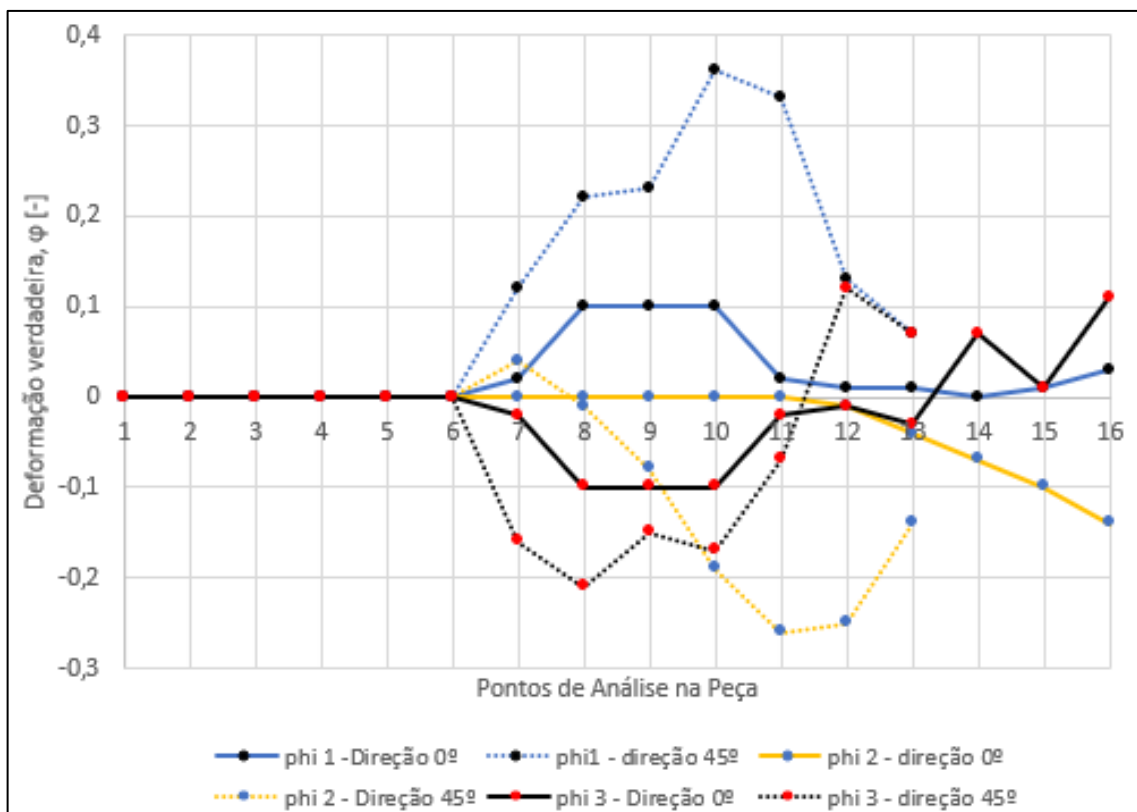


Figura 43 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

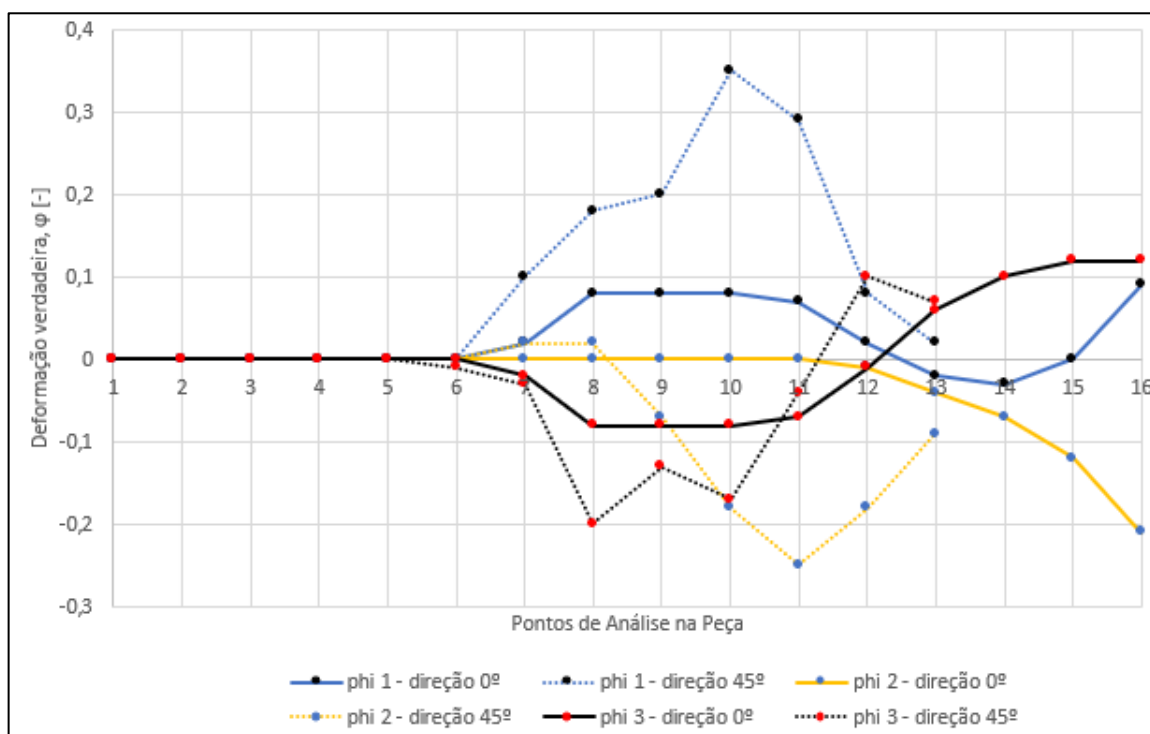


Figura 44 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.



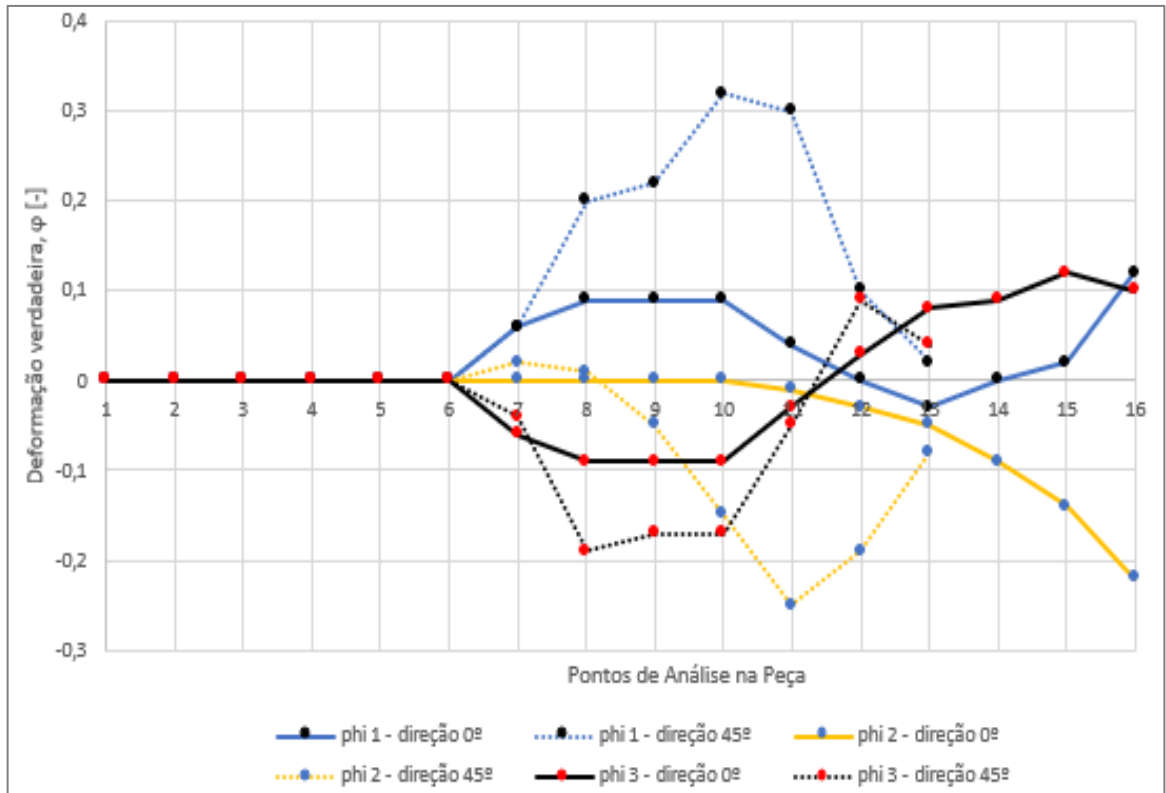


Figura 45 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz pequena, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

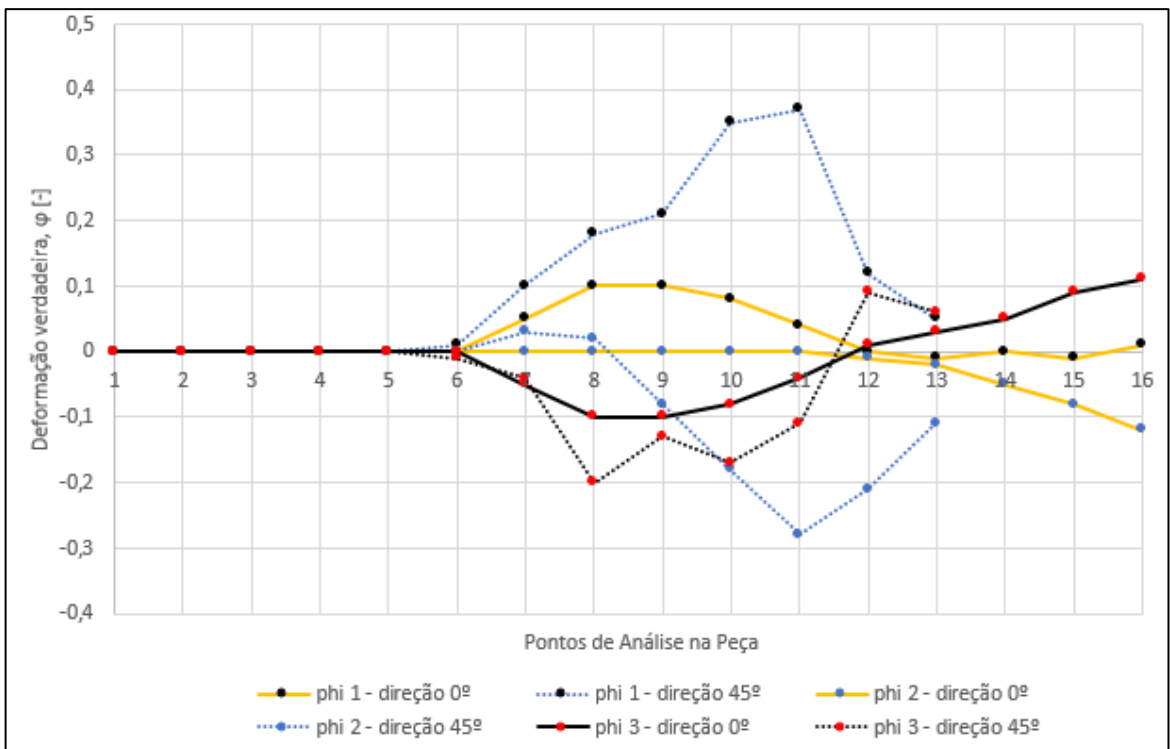


Figura 46 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

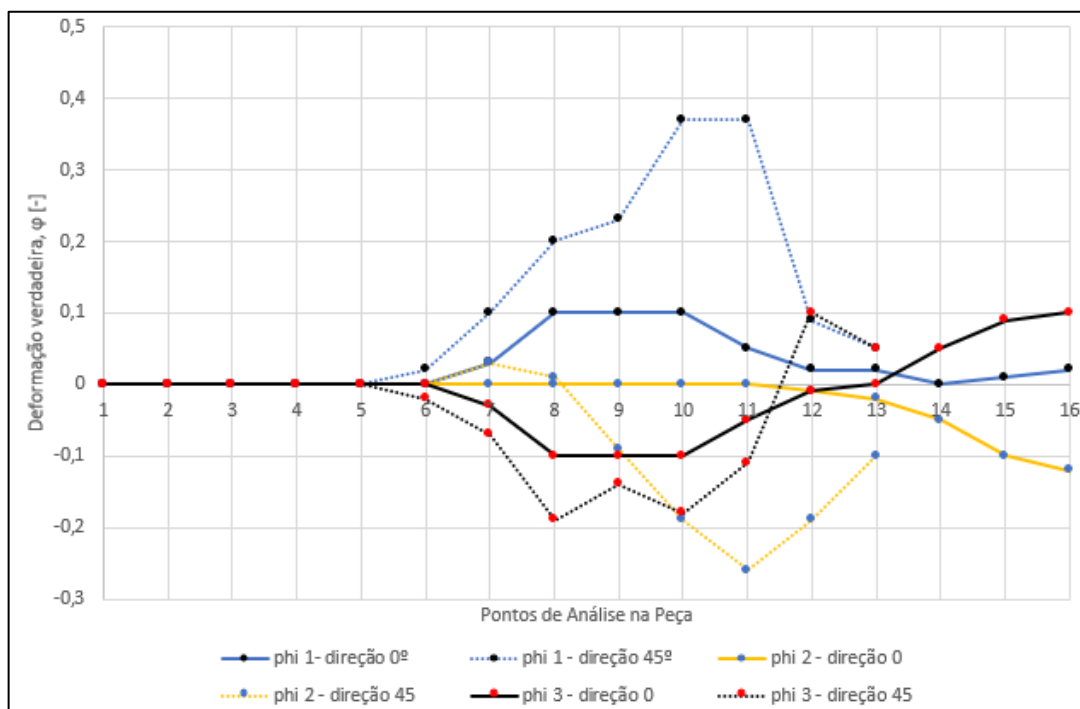


Figura 47 – Comportamentos das deformações principais na simulação numérica do processo de estampagem para geratriz grande, para a condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

A alteração expressiva nos valores de deformação é decorrente da direção de 45°, com relação ao eixo da peça, quando comparado à direção de 0°. Mesmo para as 12 condições empregadas (duas forças de prensa-chapas, três condições de lubrificação e duas geratrizes), os valores ficaram muito próximos. As partes da peça com maiores alterações nas deformações ficam na região da cabeça do punção (pontos 6 a 8), onde os valores de  $\varphi_3$  ficam negativos tendendo ao afinamento da peça, com aumento nos valores de  $\varphi_1$ . Na região do raio de entrada matriz (ponto 12), onde os valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_3$  aumentaram, as deformações ficam muito próximas (com um aumento na espessura da chapa devido a  $\varphi_3$ ), e o valor de  $\varphi_2$  diminui, com sua deformação com valor baixo.

### 5.2.3 Deformação Equivalente

Em relação às deformações principais  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , os pontos analisados foram apresentados no item 3.7.1 deste estudo, sendo os mesmos pontos analisados experimentalmente. Os valores foram coletados através da simulação computacional.

A deformação equivalente  $\varphi_{eq}$  será apresentada graficamente, e foi obtida pela simulação numérica, demonstrada nas figuras 48, 49 e 50. Sendo os valores para as duas

direções de 0° e 45°, a partir do eixo, as respectivas variações foram analisadas: duas forças de prensa chapas, três condições de lubrificação e dois tamanhos de geratrizes.

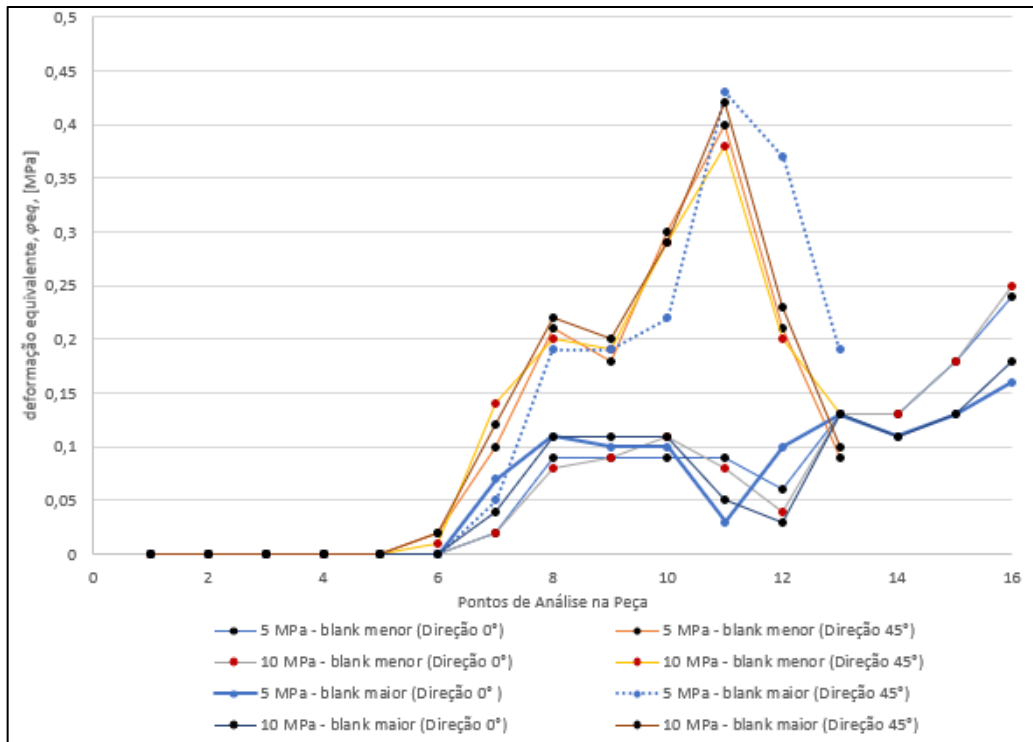


Figura 48 – Resultados das deformações equivalentes obtidas na simulação computacional para a condição de lubrificação 1, variando a força do prensa chapas e duas geratrizes.

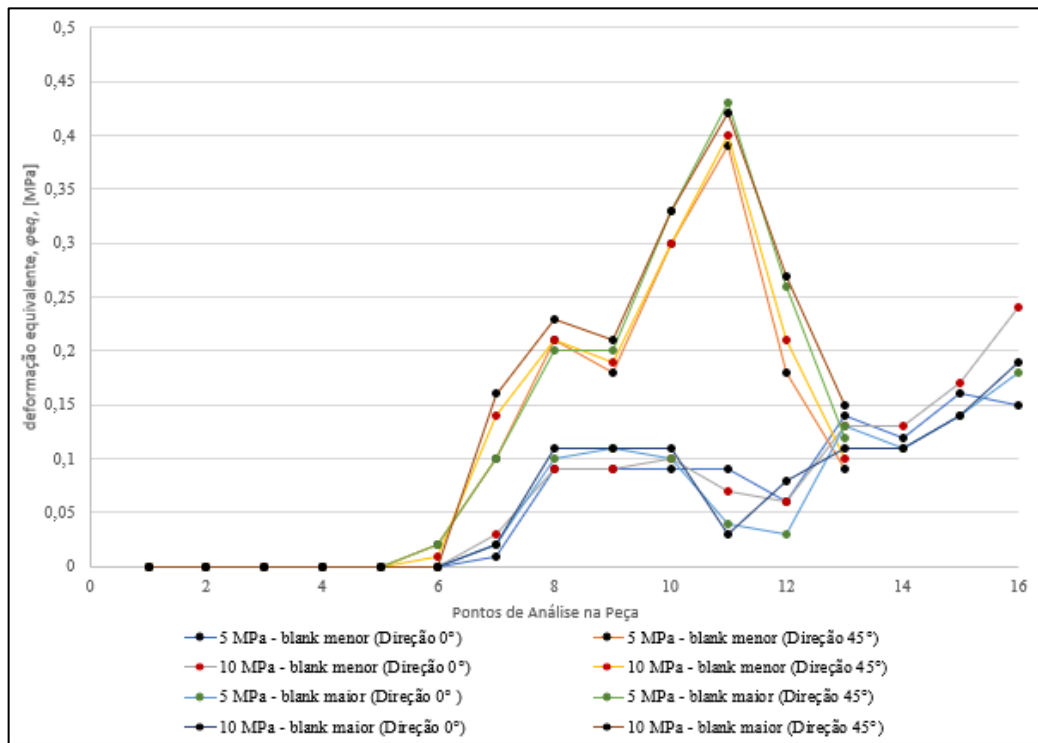


Figura 49 – Resultados das deformações equivalentes obtidas na simulação computacional para a condição de lubrificação 2, variando a força do prensa chapas e duas geratrizes.

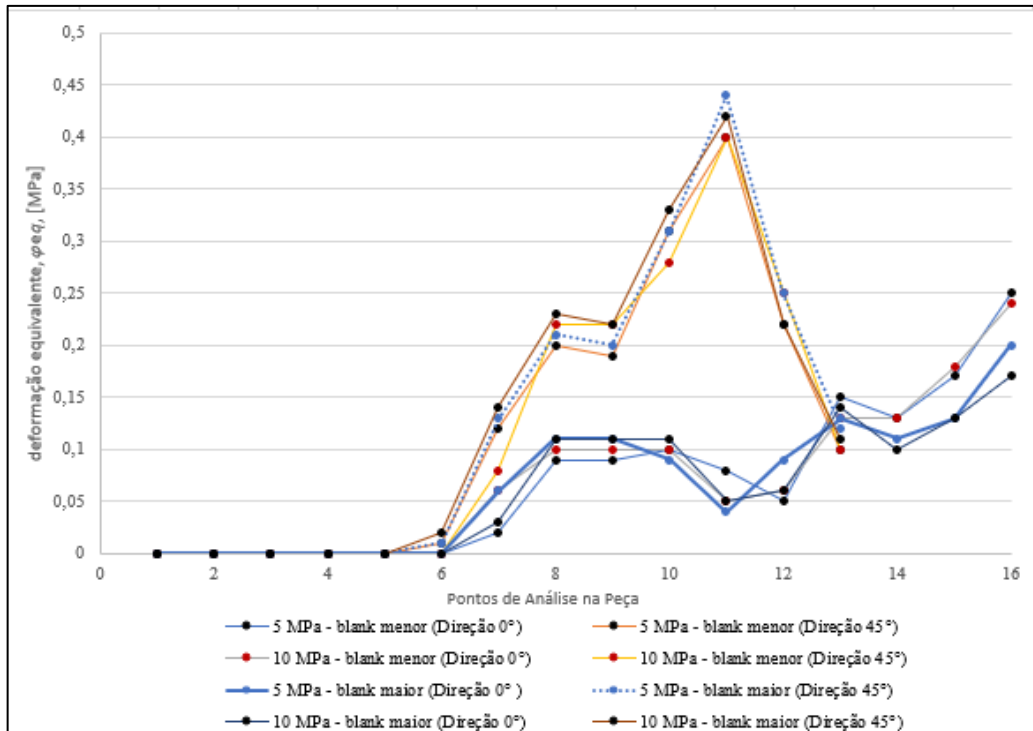


Figura 50 – Resultados das deformações equivalentes obtidas na simulação computacional para a condição de lubrificação 3, variando a força do prensa chapas e duas geratrizes.

Por meio das figuras 45, 46 e 47 é possível afirmar que a tensão equivalente ( $\varphi_{eq}$ ) demonstrou variação dos valores para as duas direções de análise de 0° e 45°, em relação ao eixo central da peça. As demais condições do estudo (força do prensa chapas e condição de lubrificação) não demonstraram variação considerável. Observando a trajetória das deformações para a direção 0° para os dois tamanhos de geratrizes, a deformação permanece sem valores expressivos no fundo da cuba (pontos 1 a 6). Entretanto, percebe-se um acréscimo relevante quando o perfil encontra o raio do punção (pontos 7 a 10), e desloca-se para a parede da peça, sem acréscimo expressivo na deformação (pontos 11 a 14), ocorrendo um aumento elevado da deformação no raio de estrada da matriz (ponto 15). Entretanto, deve-se salientar que as geratrizes apresentaram o mesmo perfil de deformações, sendo a direção de 45°, com relação ao eixo, onde se apresentou os maiores valores de deformação.

Para a direção de 45°, a trajetória das deformações no fundo da cuba não demonstrou valores expressivos (pontos 1 a 6), mas teve um aumento demasiado nos valores de deformação no raio do punção (pontos 7 a 9), que deslocou para a parede da peça, com acréscimo elevado nas deformações (pontos 10 a 11). Na região da entrada da matriz ocorreu um decréscimo nos valores de deformação (pontos 12) e na região do flange decorre diminuição nos valores de deformação (ponto 13).

## 5.2.4 Curva Limite Conformação (CLC)

O software *Simufact Forming 15* não permite gerar o gráfico com a CLC do material e suas deformações principais decorrentes no processo. Portanto, a partir da coleta dos pares de deformações principais, para as direções de 0° e 45°, com relação ao eixo da peça e plotas, o gráfico foi gerado no software MSC Excel. Pelo software de simulação é possível verificar a CLC por meio de uma variação de cores, que indica a possibilidade de ruptura do material (figura 51).

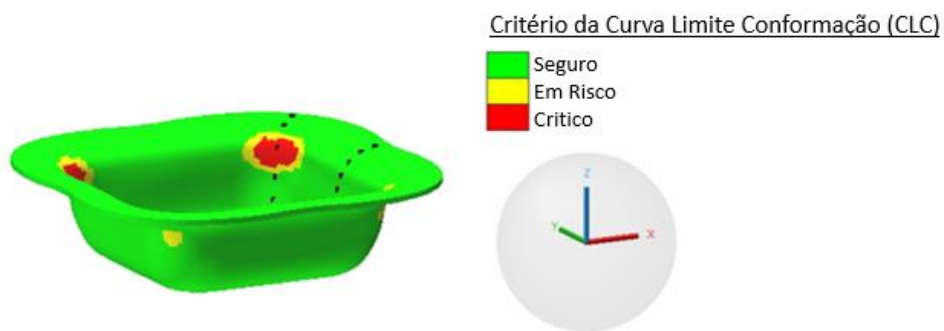


Figura 51 – Simulação numérica da cuba, com regiões de possível fratura da peça.

As figuras 52, 53 e 54 apresentam os resultados das deformações principais máxima ( $\varphi_1$ ) e mínima ( $\varphi_2$ ), variando para cada condição de lubrificação, prensa-chapas e tamanho de geratriz.

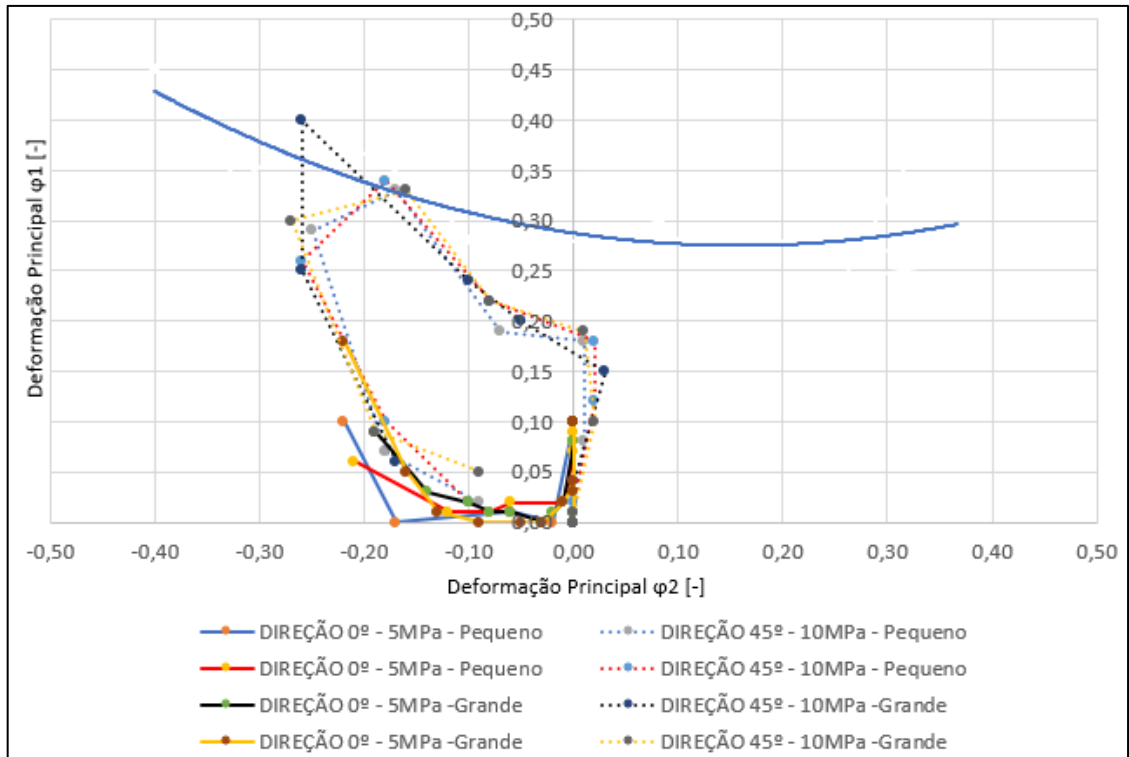


Figura 52 – Resultado da curva CLC plotadas após a simulação numérica para a condição de lubrificação 1, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes.

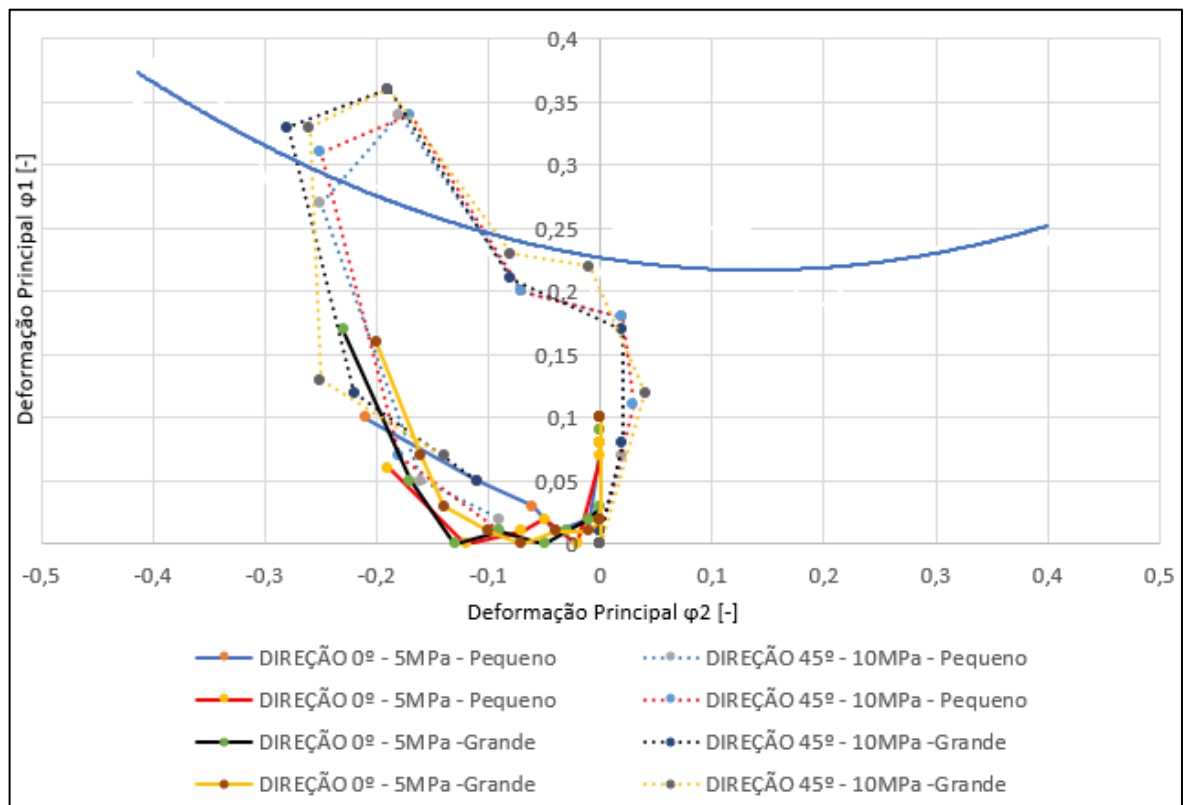


Figura 53 – Resultado da curva CLC plotadas após a simulação numérica para a condição de lubrificação 2, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes.

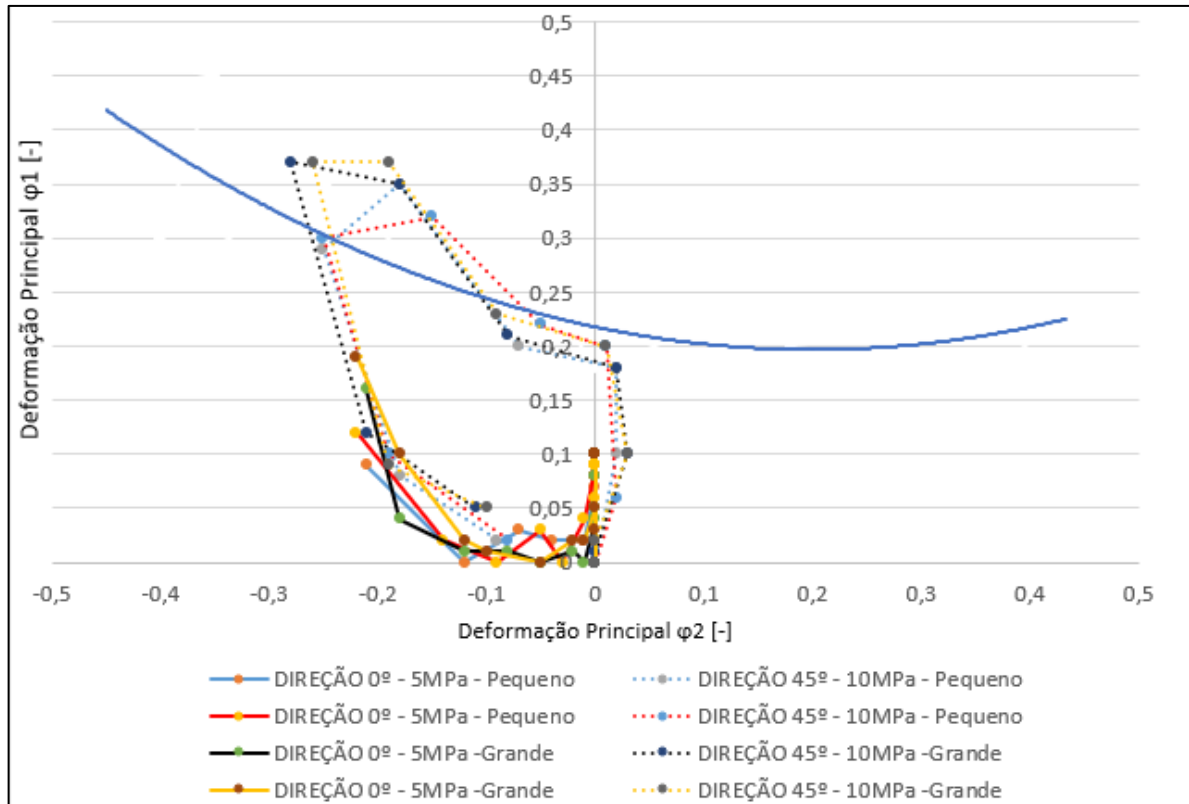


Figura 54 – Resultado da curva CLC plotadas após a simulação numérica para a condição de lubrificação 3, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes.

Conforme a figura 48, a simulação demonstra que a peça possui uma região crítica (localizada no raio de entrada da matriz). Pelas curvas limites conformação (CLC) verifica-se que as deformações principais se aproximam bastante da CLC, ocorrente para as 12 condições empregadas. Elas demonstram que é possível a ruptura da chapa quando estampado para esta profundidade.

### 5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 5.3.1 Determinação das Espessuras Medidas

Nas figuras 55, 56 e 57 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente para a variação de espessura nas condições nas condições de lubrificação empregadas (Lub.1, Lub.2 e Lub.3), com 5 e de 10 MPa de pressão do prensa chapas, e os dois tamanhos geratrizes, para as direções de 0° e 45° a partir do eixo da peça. O método foi empregado para a retirada dos valores da variação de espessura, que são apresentados no item 3.7.1.

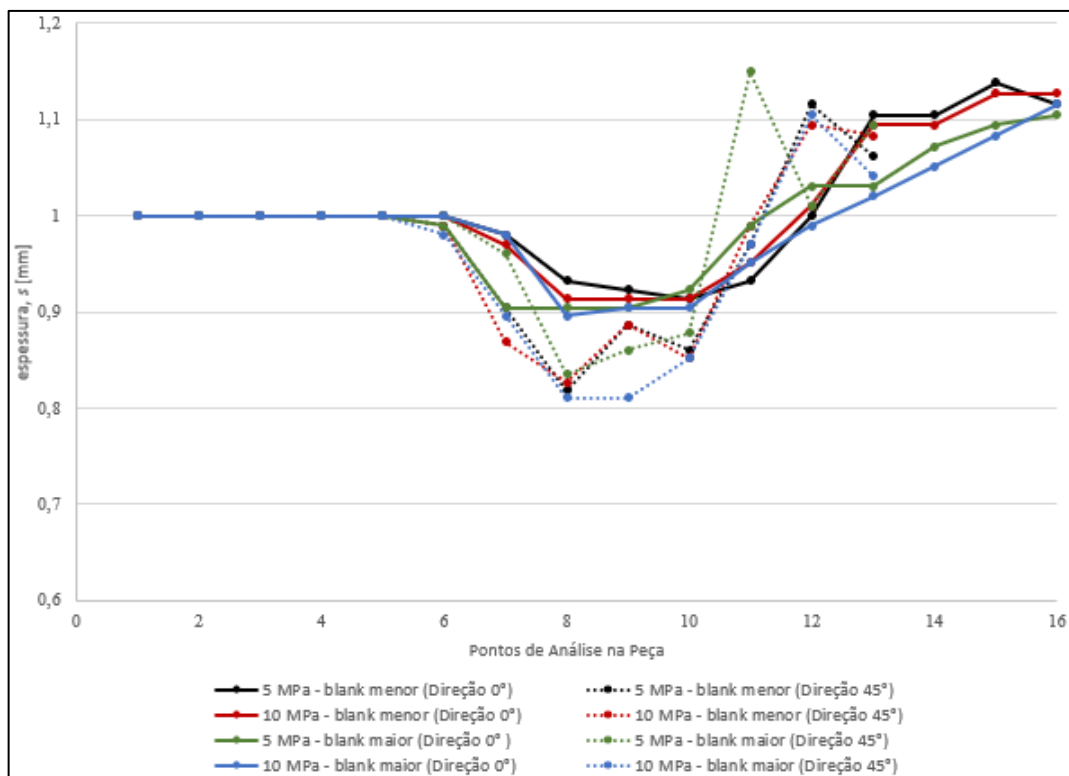


Figura 55 – Resultados experimentais para as direções de 0° e 45°, variando a força do prensa-chapas, o tamanho de geratriz, condição de lubrificação 1.

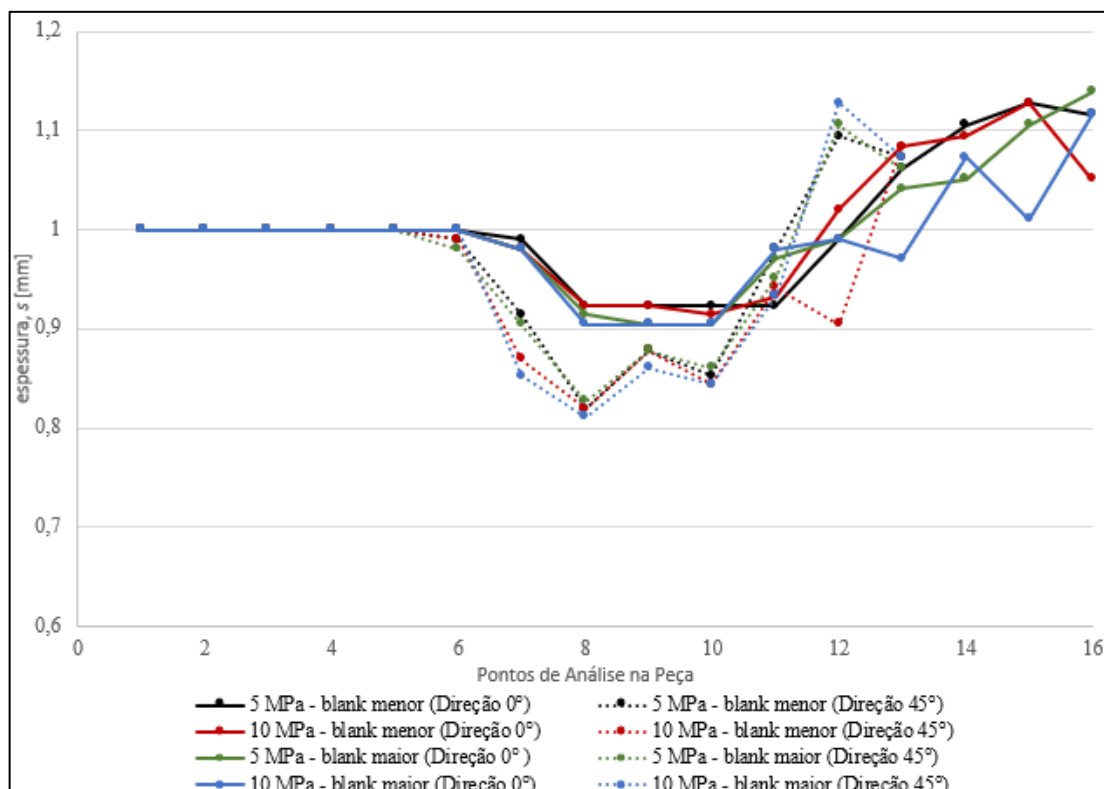


Figura 56 – Resultados experimentais para as direções de 0° e 45°, variando a força do prensa-chapas, o tamanho de geratriz, condição de lubrificação 2.



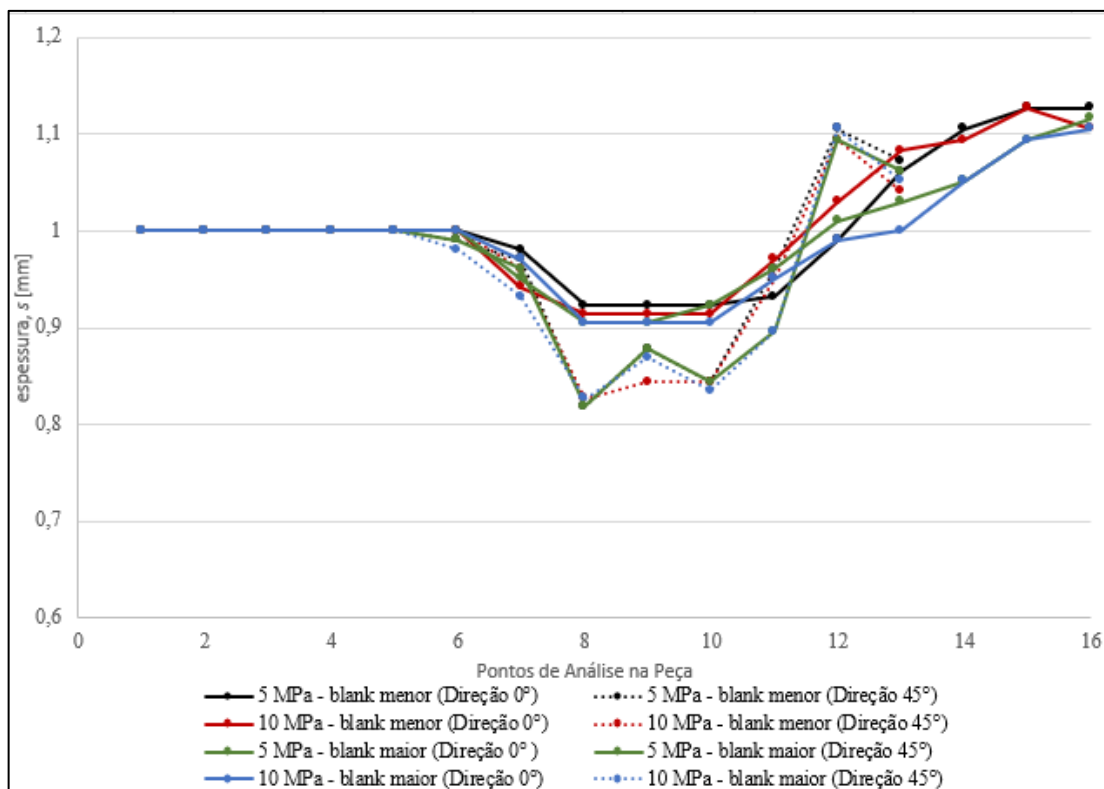


Figura 57 – Resultados experimentais para as direções de 0° e 45°, variando a força do prensa-chapas, o tamanho de geratriz, condição de lubrificação 3.

É observado, não houve uma redução muito expressiva nos valores encontrados da variação de espessura, assim como os apresentados na simulação numérica, ficando com valores próximos de 0,8 a 1,15 no máximo. Leva-se em consideração que a espessura inicial da chapa era de 1 mm, para as direções de 0° e 45°, com relação ao eixo central da peça. Conforme já observado, a variação de espessura teve alguns picos nos pontos 7, 8, 9, 10 e 11. Na região localizada na cabeça do punção houve uma redução da espessura, e o mesmo ocorre nos resultados de simulação numérica. Já os pontos 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 tendem a aumentar a espessura da chapa, o que também foi apresentado na simulação numérica, localizado na região do raio de entrada matriz e no flange, pela Lei da Constância de Volume.

### 5.3.2 Deformações Principais Máximas

As deformações principais  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ , sendo os pontos analisados apresentados no item 3.7.1 deste estudo, foram os mesmos pontos analisados experimentalmente. Para a obtenção dos valores das deformações, foi utilizada a régua de deformações (figura 20).

A plotagem dos valores das deformações principais é apresentada nas figuras 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68 e 69 apresentam a análise foi feita nas duas direções de 0° e 45°, a partir do eixo.

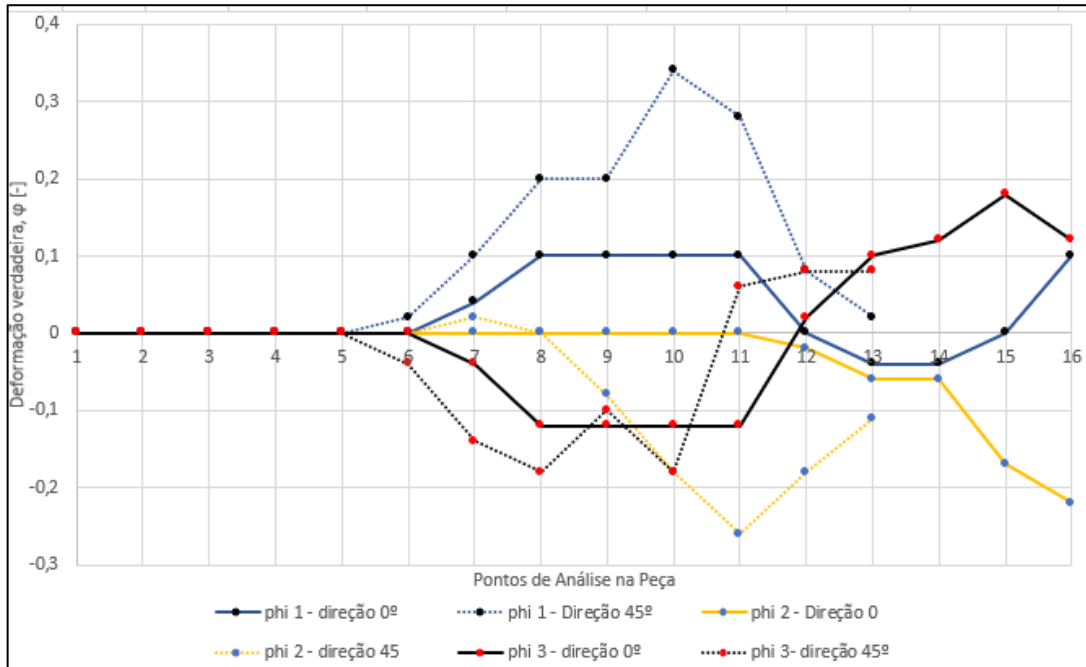


Figura 58 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

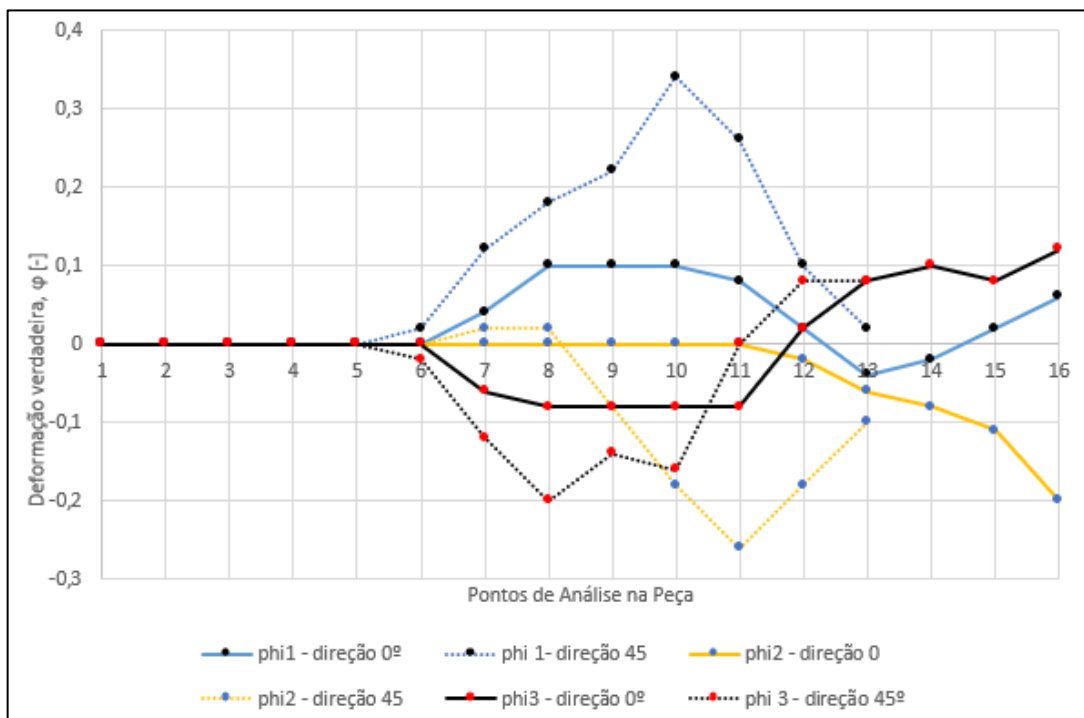


Figura 59 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

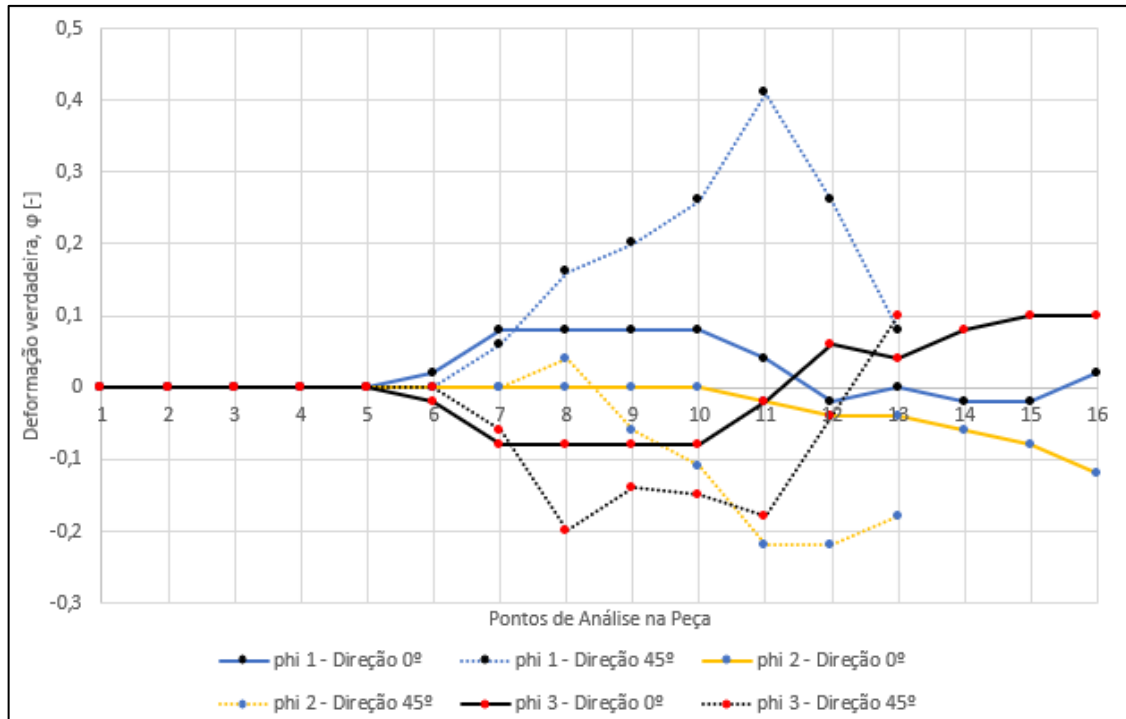


Figura 60 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

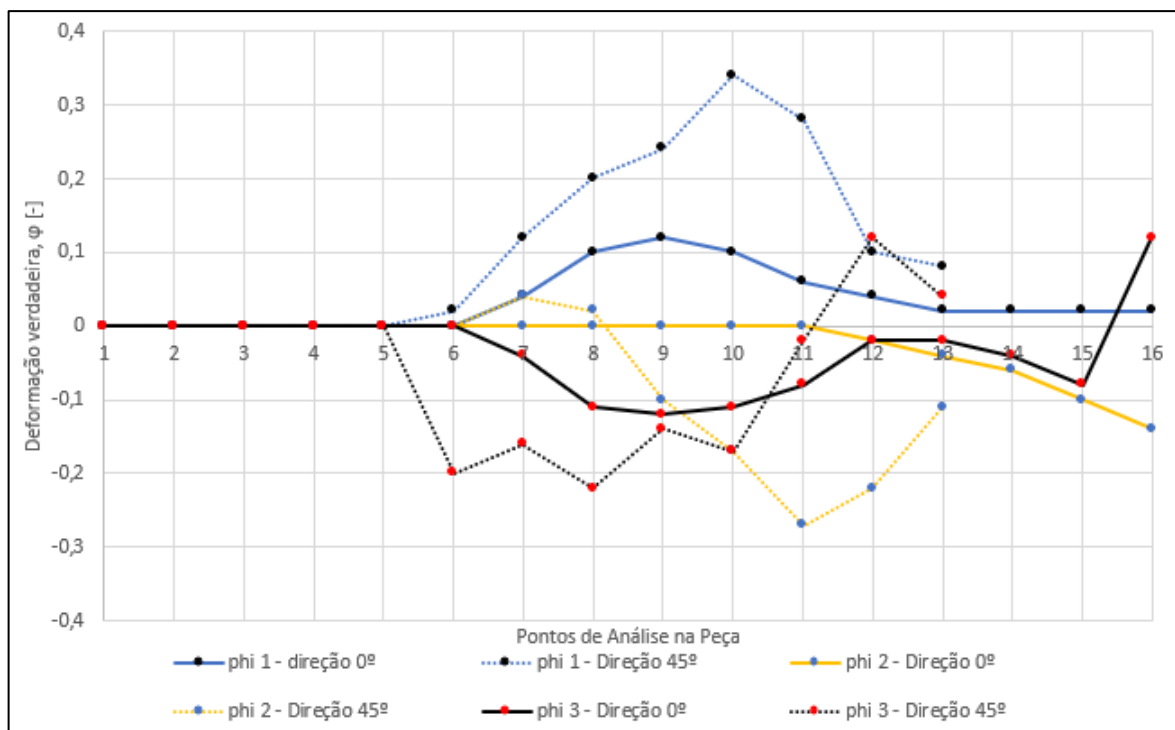


Figura 61 – Comportamentos das deformações principais, no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 1 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

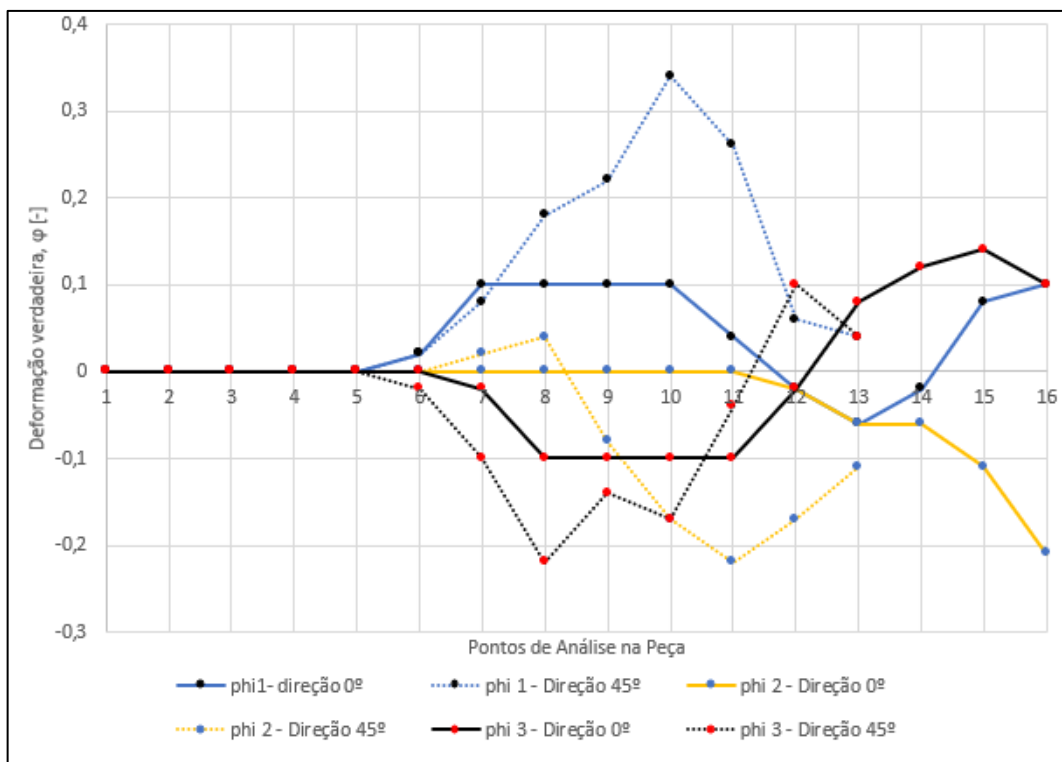


Figura 62 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena na condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

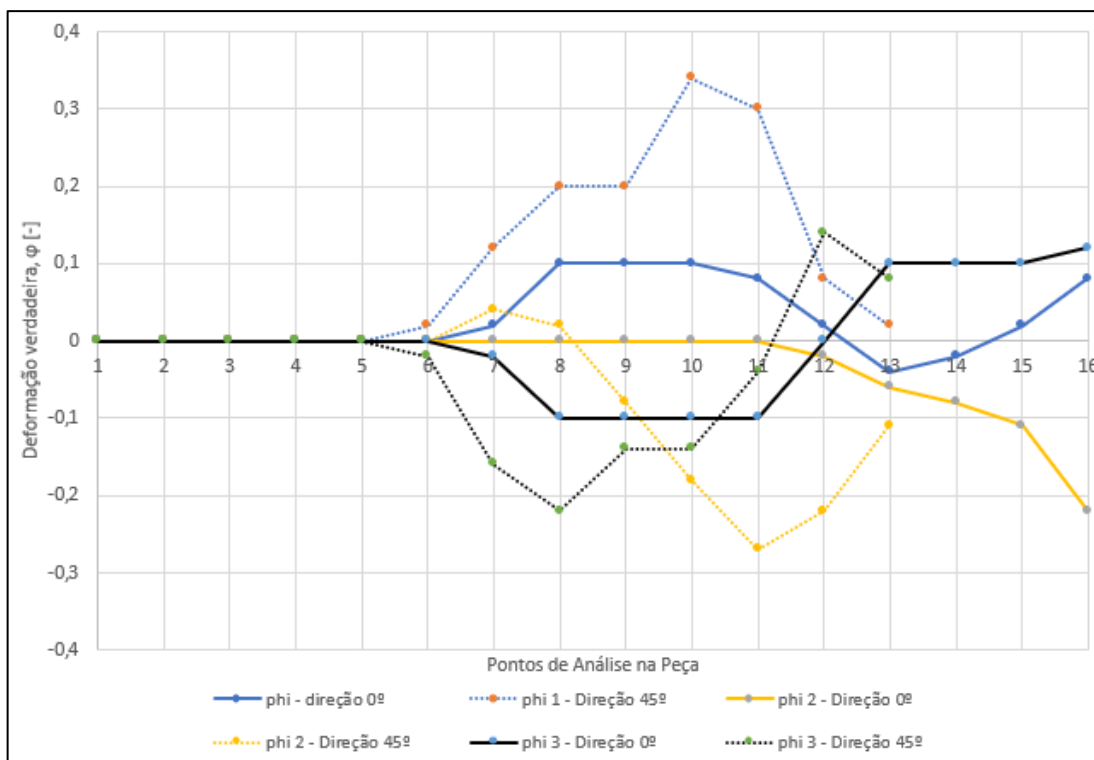


Figura 63 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

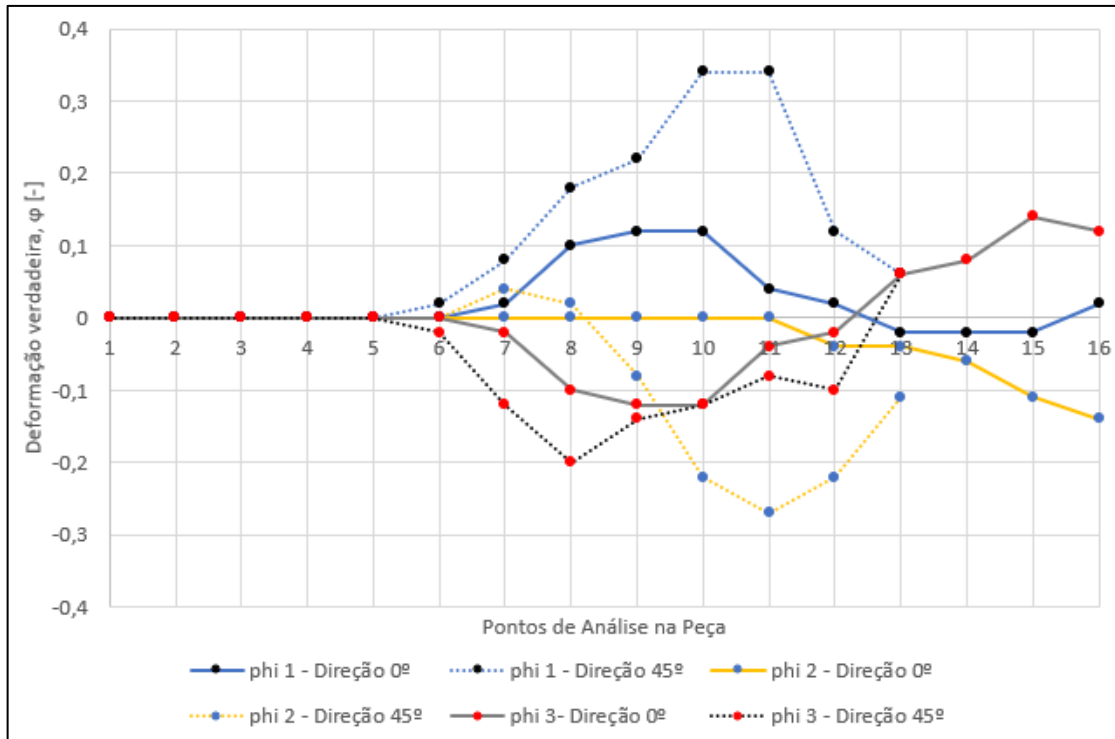


Figura 64 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, nas condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

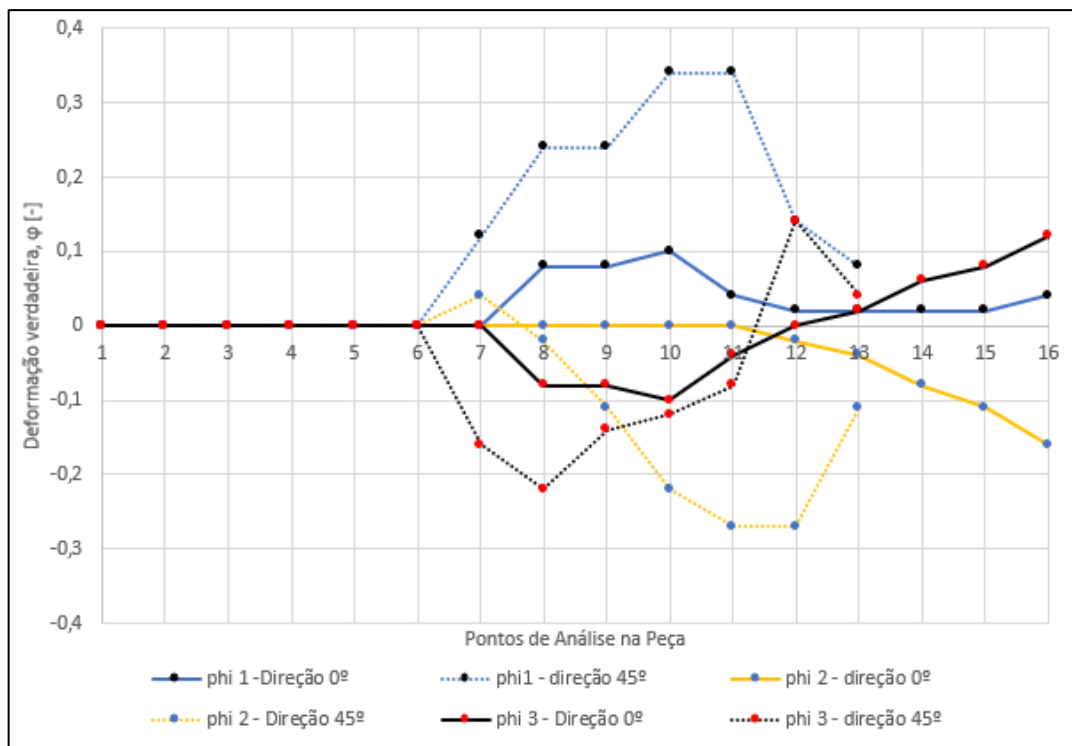


Figura 65 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 2 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

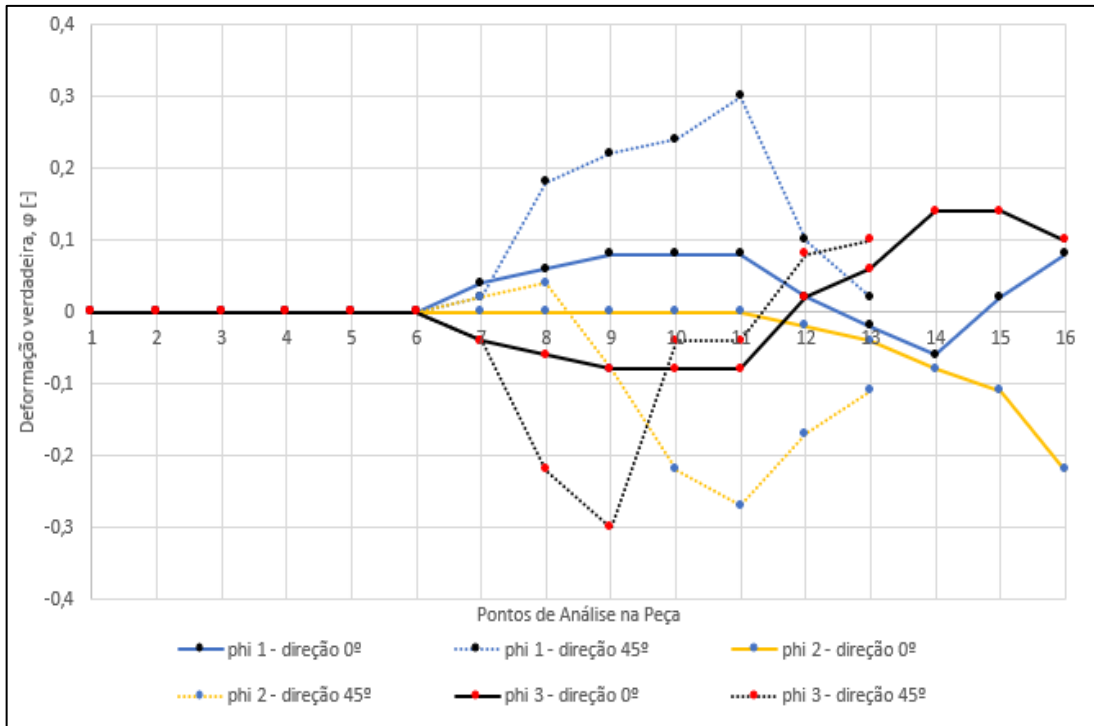


Figura 66 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

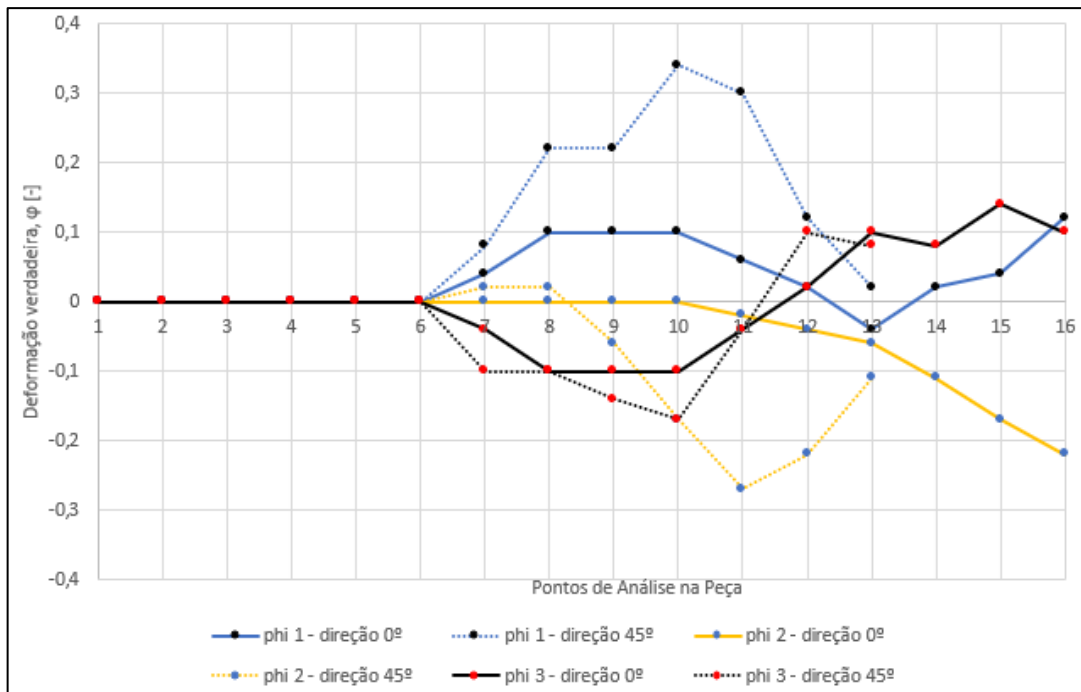


Figura 67 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz pequena, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

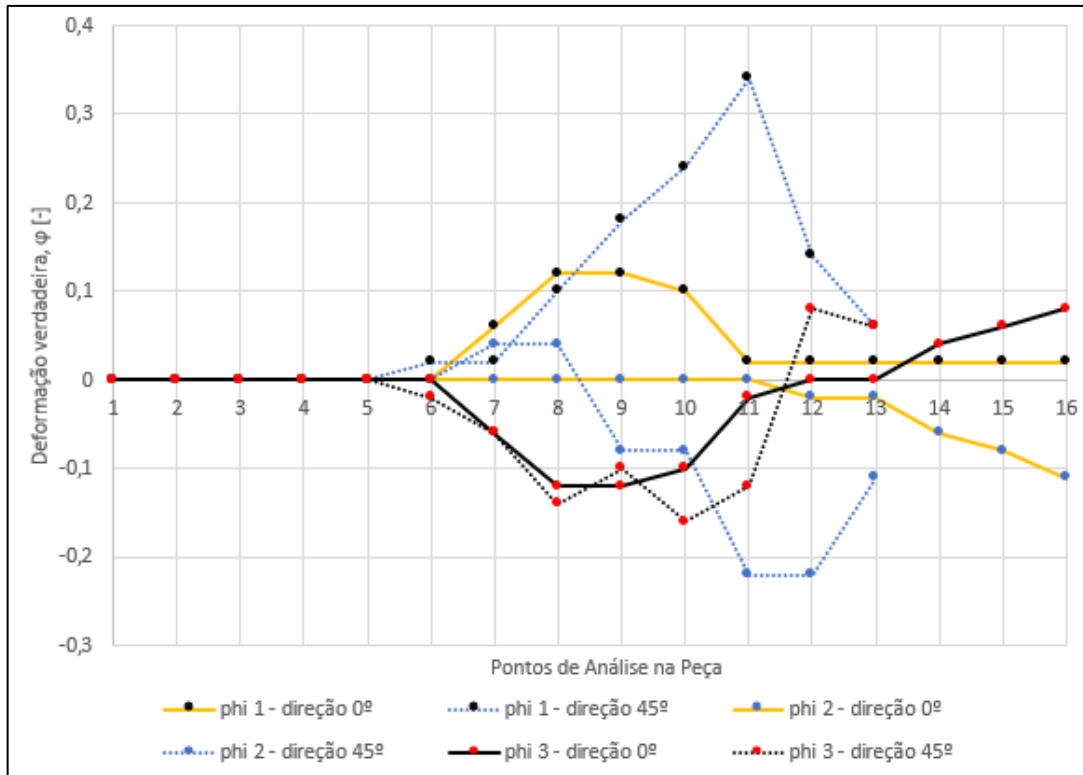


Figura 68 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 5 bar.

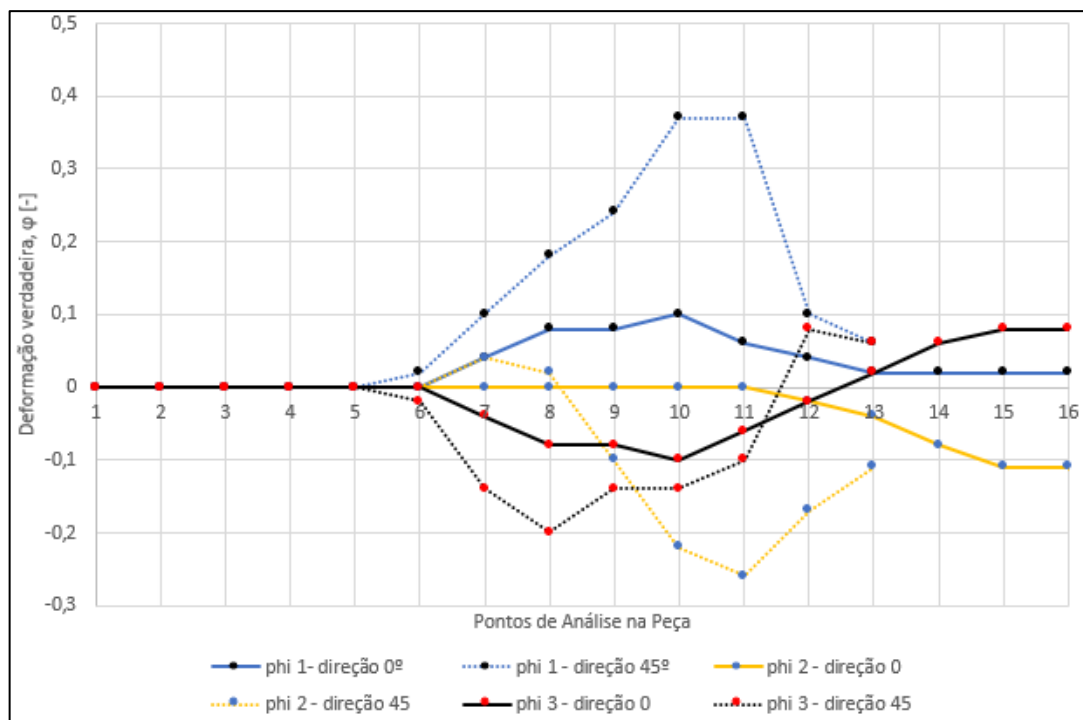


Figura 69 – Comportamentos das deformações principais no processo de estampagem experimental para geratriz grande, na condição de lubrificação 3 e com pressão no prensa chapas de 10 bar.

A alteração expressiva nos valores de deformação obtidos experimentalmente foi decorrente da direção de 45°, sendo o mesmo ocorrido na simulação numérica, com relação ao eixo da peça, quando comparado a direção de 0°. Mesmo para a variação das 12 condições empregadas (duas forças de prensa-chapas, três condições de lubrificação e duas geratrizes), os valores ficaram muito próximos. As regiões da peça com maiores alterações nas deformações foi a região da cabeça do punção (pontos 6 a 8), onde os valores de  $\varphi_3$  ficam negativos tendendo ao afinamento da peça, e os valores de  $\varphi_1$ , com um aumento nos valores de deformação (em decorrência do material ser anisotrópico, maiores deformações na largura). Na região do raio de entrada matriz (ponto 12), onde os valores de  $\varphi_1$  e  $\varphi_3$ , as deformações ficam muito próximas (com um aumento na espessura da chapa devido a  $\varphi_3$ ), e o valor de  $\varphi_2$ , com sua deformação com valor baixo. Ainda pode ser visto que os valores de deformação  $\varphi_1$  ficaram com valores bem elevados, próximos de 0,35, sendo agravados no pontos 10 e 11, que fica localizado na lateral da peça.

### **5.3.3 Deformação Equivalente**

Em relação às deformações principais  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , os pontos analisados foram apresentados no item 3.7.1 deste estudo, sendo os mesmos pontos analisados experimentalmente. Os valores foram coletados através da estampagem das peças.

A deformação equivalente  $\varphi_{eq}$  será apresentada graficamente nas figuras 70, 71 e 72 obtidas experimentalmente. Sendo os valores para as duas direções de 0° e 45°, a partir do eixo, variando as três condições de lubrificação, duas forças de prensa-chapas e dois tamanhos de geratrizes.



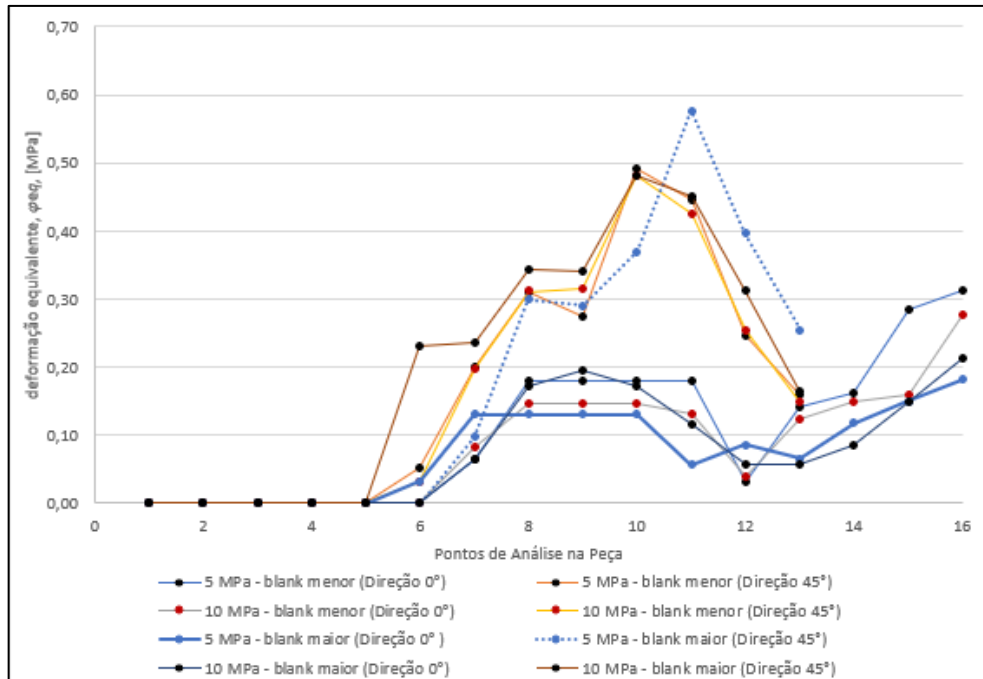


Figura 70 – Resultados das deformações equivalentes obtidos experimentalmente para a condição de lubrificação 1, variando a força do prensa chapas e os dois tamanhos geratrizes.

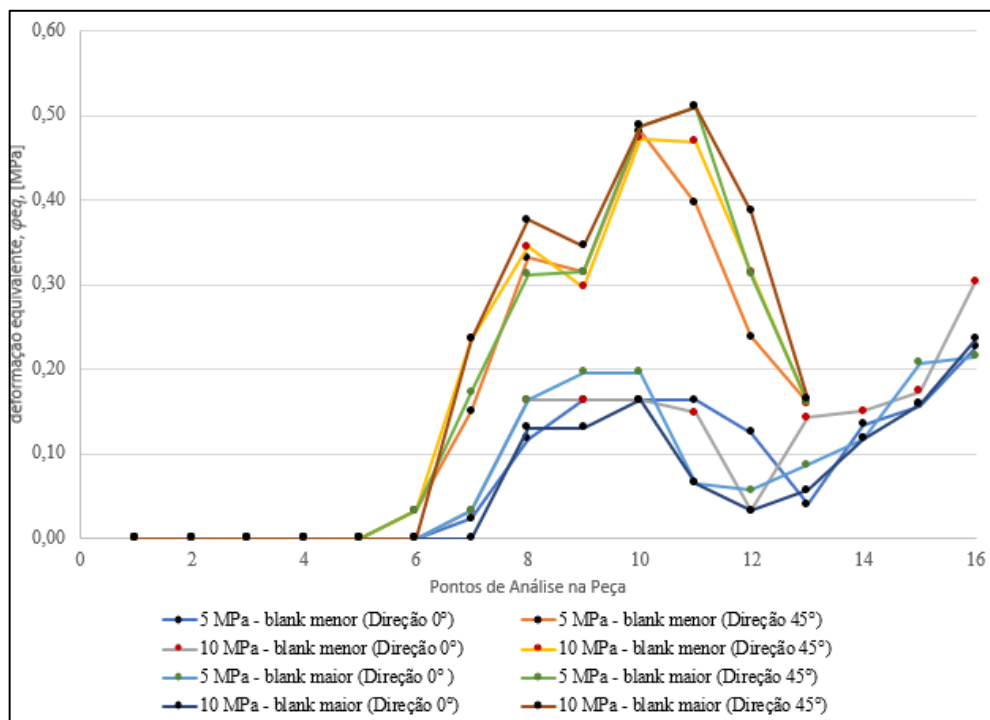


Figura 71 – Resultados das deformações equivalentes obtidos experimentalmente para a condição de lubrificação 2, variando a força do prensa chapas e os dois tamanhos geratrizes.

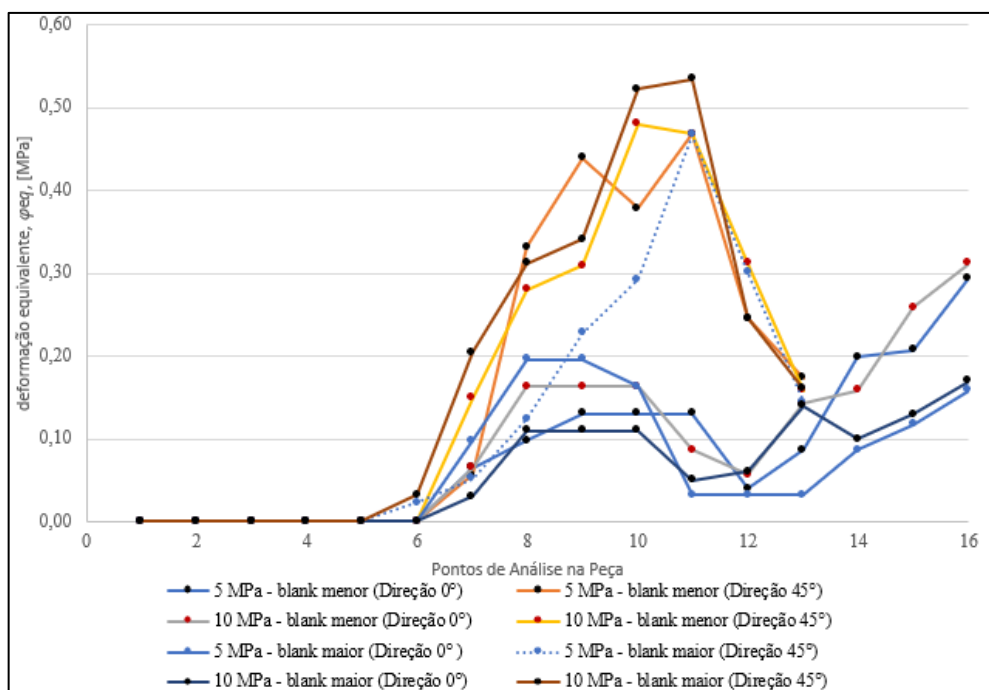


Figura 72 – Resultados das deformações equivalentes obtidos experimentalmente para a condição de lubrificação 3, variando a força do prensa chapas e os dois tamanhos geratrizes.

Por meio das figuras 70, 71 e 72 é possível afirmar que a tensão equivalente ( $\varphi_{eq}$ ) demonstrou uma variação dos valores nas duas direções de análise de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  em relação ao eixo central da peça, e o mesmo ocorreu com os resultados obtidos pela simulação numérica. Não foi identificada variação considerável para as demais condições em estudo (força do prensa chapas e condição de lubrificação), o mesmo que foi apresentado na simulação computacional. Observando a trajetória das deformações para a direção  $0^\circ$  nos dois tamanhos de geratrizes, a deformação permanece sem valores expressivos no fundo da cuba (pontos 1 a 6), havendo um acréscimo relevantes, quando o perfil encontra o raio do punção (pontos 7 a 10), desloca-se para a parede da peça, sem acréscimo expressivo na deformação (pontos 11 a 14), acarretando um aumento elevado da deformação no raio de entrada da matriz (ponto 15). Para a direção de  $45^\circ$ , a trajetória das deformações no fundo da cuba permaneceu sem valores expressivos (pontos 1 a 6), com um aumento nos valores de deformação no raio do punção (pontos 7 a 9), e deslocamento para a parede da peça, com acréscimo elevado nas deformações (pontos 10 a 11). E na região da entrada da matriz ocorreu um decréscimo nos valores de deformação (pontos 12) e na região do flange decorre diminuição nos valores de deformação (ponto 13) idêntico ao ocorrido na simulação numérica.

### 5.3.4 Curva Limite Conformação (CLC)

Para a obtenção das deformações principais máximas ( $\varphi_1$ ) e mínimas ( $\varphi_2$ ) foi feita a medição dos pares de deformações nas direções de  $0^\circ$  e  $45^\circ$  com relação ao eixo da peça. Após foram inseridas na curva CLC, nas condições de lubrificação, no software MSC Excel, variando as duas forças de prensa chapas e dois tamanhos de geratrizes (figuras 73, 74 e 75).

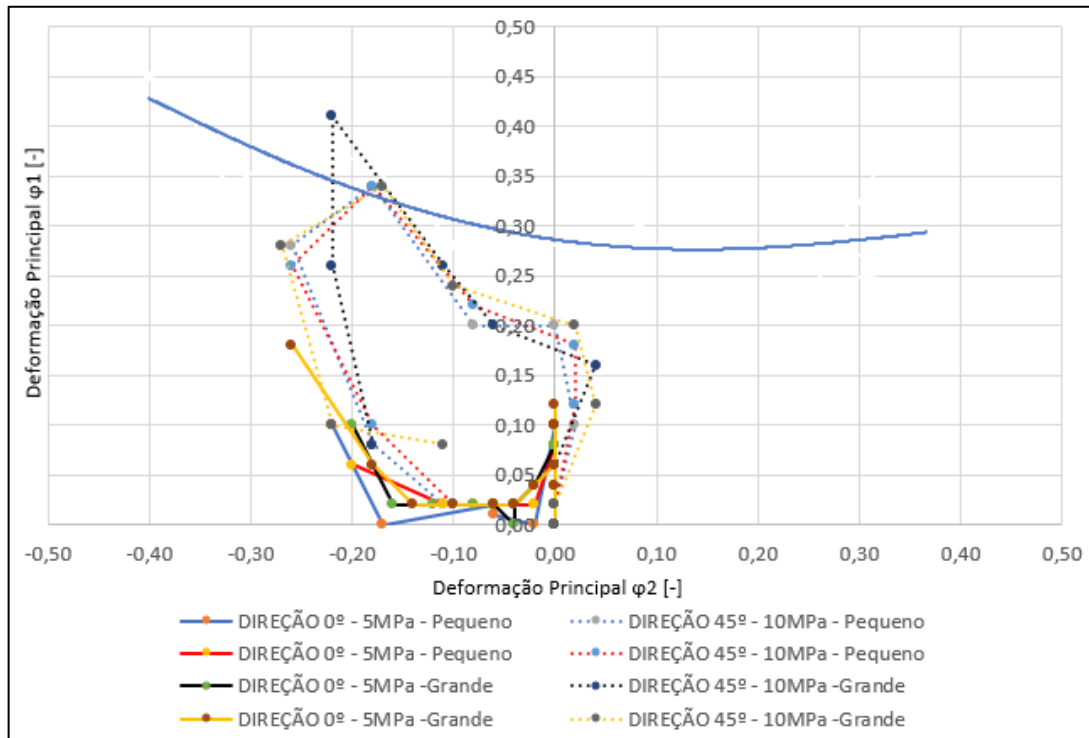


Figura 73 – Resultado da curva CLC, plotadas após o experimento, para a condição de lubrificação 1, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes.

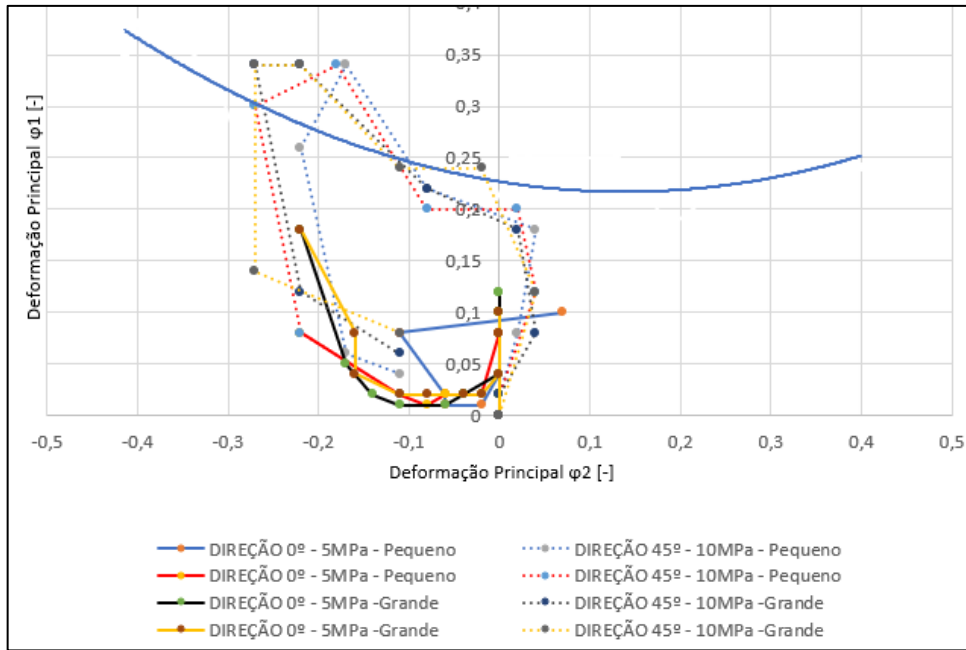


Figura 74 – Resultado da curva CLC, plotadas após o experimento, para a condição de lubrificação 2, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes.

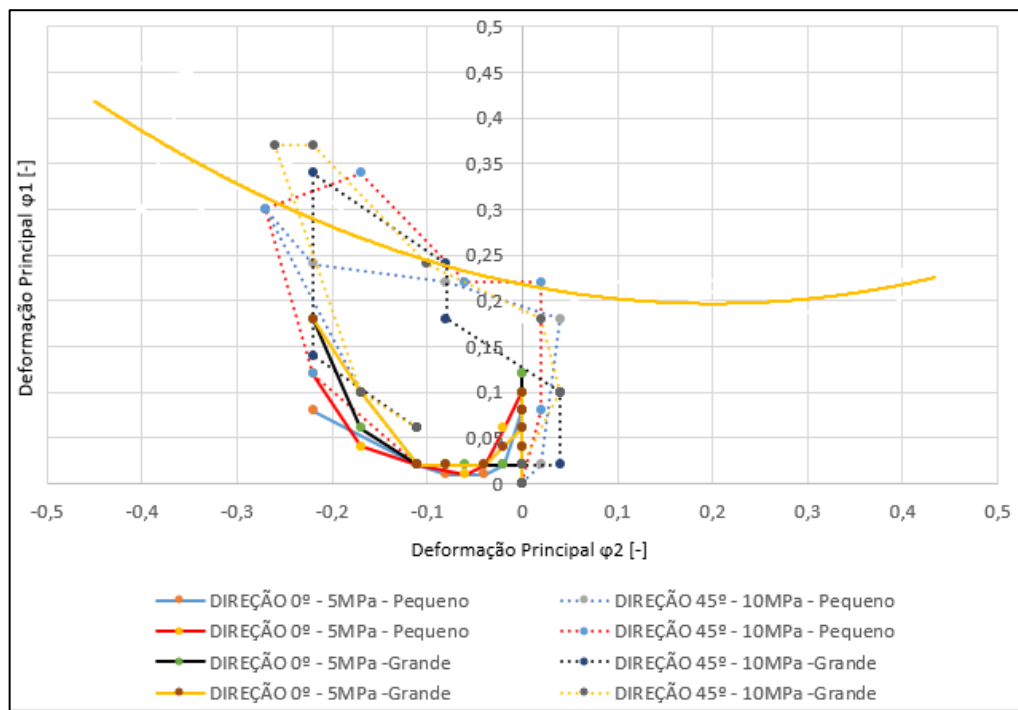


Figura 75 – Resultado da curva CLC, plotadas após o experimento, para a condição de lubrificação 3, duas forças de prensa chapas e duas geratrizes.

Como apresentado na simulação numérica (figura 48), nos ensaios experimentais as deformações principais, decorrentes na superfície do material, tendem à ruptura do material aço inoxidável AISI 430. A direção de 45° com relação ao eixo possui os valores excedentes acima da curva.

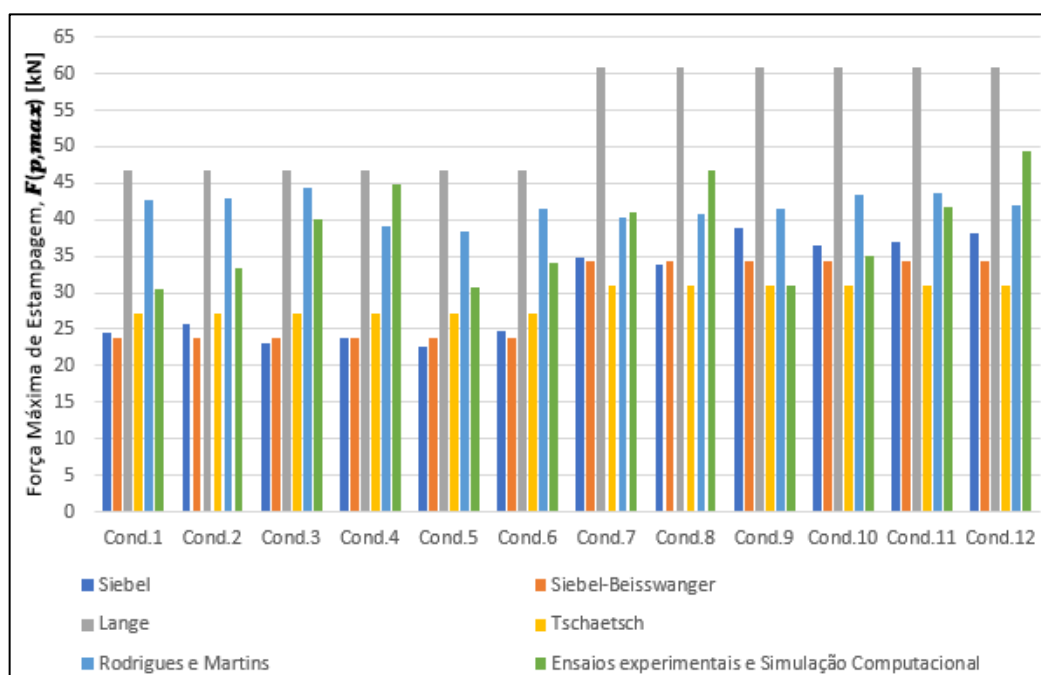
## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 FORÇA MÁXIMA DE ESTAMPAGEM

É válido afirmar que tanto para os ensaios experimentais quanto para a simulação numérica do processo de estampagem da cuba, mesmo variando as condições de estampagem empregadas, a força não teve um decréscimo significativo, no fim do percurso do punção, como nos trabalhos de Mammalis, Manolakos, Baldoukas (1997); Tommerup, Endelt (2012); Hassan, Ahmed, Takakura (2012); Candra, Batan (2013). Isto se deve aos cantos arredondados da geratriz não se deslocarem (adentro da matriz) com a mesma intensidade que as parte retas, fazendo assim que ocorra uma maior restrição, esta decorrente da força de atuação do prensa chapas. Com isto a força de atuação continua crescendo até o fim do deslocamento, de 17,5 mm.

Fazendo um comparativo dos resultados experimentais e da simulação numérica, os valores de força máxima são dependentes da força de atuação do prensa chapas e da variação das condições de lubrificação empregadas, entre as ferramentas e geratriz (tabela 14). Sendo assim a condição de lubrificação indicada é a que apresenta o menor coeficiente de atrito, e por consequência, uma menor força de atuação do punção, como apresentados pelas literaturas Siegert, *et al* (1995); Zhang, *et al* (2000); Rodrigues e Martins (2005); Folle (2012); Tiwari, Rathore, Bodkhe (2022).

Tabela 13 – Resultados de força máxima obtidos analiticamente e ensaio experimentais.



Observando os valores apresentados de força máxima de estampagem, é possível afirmar que eles apresentam valores muito próximos entre si, destoando apenas dos resultados de *Lange* (2006) e *Rodrigues e Martins* (2005), que os valores foram mais altos, para as condições de geratriz pequena. Os resultados apresentados por *Sibel-Beisswanger* (1955) e *Taschaetsch* (2006), tiveram um afastamento de 10%, daqueles obtidos por *Sibel* (1955). Para a condição de geratriz grande, os valores encontrados por *Rodrigues e Martins* (2005) se aproximaram bastante dos encontrados experimentalmente, com uma variação, para alguns dos métodos, com menos de 6%. Mas as demais equações devem ser desconsideradas devido a não comiserarem o uso do coeficiente de atrito, que é imprescindível para o método de estampagem profunda.

## 6.2 VARIAÇÃO DE ESPESSURA

Os resultados obtidos de variação de espessura apresentaram uma discrepância muito baixa, variando de 0,8 a 1,15 mm para as direções de 0° e 45°, com relação ao eixo central da peça, considerando as 12 condições empregadas no estudo (três condições de lubrificação, duas forças de prensa chapas e dois tamanhos de geratrizes.)

Como visto nos resultados, as zonas mais críticas no estudo se localizavam na região da cabeça do punção e no flange. Na região do raio do punção, ocorria uma redução espessura que era transmitida para a parede lateral da peça, na região do flange, onde ocorria um aumento demasiado na espessura da chapa, superando o valor inicial da peça de 1 mm. O mesmo ocorreu nos trabalhos *Danckert* (1995); *Chen, Lin* (2007); *Gavas e Izciler* (2007); *Ozek, Unal* (2011) *Hassan, Ahmed, Takakura* (2012); *Lazarescu, Nicodim, Banabic* (2015); *Modi, Kumar* (2019). Ainda ressalta-se que a direção de 45° de relação ao eixo da peça foi onde localizaram-se as maiores variações nas espessuras tanto para os resultados experimentais, quanto para a simulação numérica.

## 6.3 DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS

Os resultados obtidos para as deformações principais dispuseram de valores muito próximos para as condições utilizadas neste estudo (três condições de lubrificação, duas de prensa chapas e duas geratrizes) tanto para os experimentos quanto as de simulação numérica, que pode explicar os baixos resultados de atrito encontrados.

Comparando com as literaturas de Majlessi, Lee (1993); Chen e Lin (2007); e Demirci, Esner e Yasar (2008), os resultados arrecados de deformações principais demonstram os mesmos comportamentos para a estampagem de uma cuba. Quando comparados os resultados experimentais com a simulação numérica, ocorreu uma pequena variação nos resultados, uma vez que os valores experimentais ficaram um pouco elevados, principalmente na direção de 45° em relação ao eixo da peça. Já para os valores da deformação na espessura ( $\varphi_3$ ), esses ficaram mais evidentes nas regiões da cabeça do punção (pontos 6 a 8) e no raio de entrada da matriz (ponto 12). E, por fim, os valores da deformações  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  apresentaram resultados semelhantes para os resultados experimentais e de simulação numérica, com algumas variações, por decorrência da imprecisão na coleta de dados pelo uso da régua de deformação.

#### 6.4 DEFORMAÇÃO EQUIVALENTE

Os valores extraídos da simulação numérica apresentaram valores inferiores aos encontrados através da equação (experimentalmente), método empregado para obter as deformações principais ( $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$ ). Esta possível variação é decorrência do modo de coletados os resultados das deformações principais, com a régua de deformação.

Em relação às curvas limites de conformação, plotadas para cada condição de lubrificação, tanto para a simulação numérica (secção 5.2.4) como experimental (secção 5.3.4), os valores de deformação máximos ( $\varphi_1$ ) e mínimas ( $\varphi_2$ ) ficaram muito próximos das CLC do material. Isso demonstra que as peças podem ser estampadas, mas que seus limites de conformação estão no limite máximo para a estampagem da cuba, e portanto qualquer variação além da empregada pode acarretar na ruptura do material.

## 7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar experimentalmente as condições da lubrificação, variação da força do prensa chapas e dois tamanhos de geratrizes, no processo de estampagem para uma cuba. Incluíram-se fatores como a força máxima de estampagem, variação da espessura e deformações principais e equivalentes, para a estampagem de uma geometria não-axissimétrica, no material aço inoxidável ferrítico AISI 430, com 1 mm de espessura. Os resultados encontrados foram validados via simulação numérica, e as forças máximas foram ainda analisadas analiticamente, por meio de equações pertinentes.

Para que as simulações numéricas apresentem resultados mais aproximados do experimental, foi feita a inserção das características mecânicas do aço inoxidável ferrítico AISI 430 no banco de dados do software *Simufact Forming 15*. Os dados foram coletados após ensaios de caracterização mecânica (de tração, de anisotropia, de Erichsen e Nakazima modificado).

Através da caracterização do aço inoxidável ferrítico AISI 430, pelo ensaio de tração, foram obtidos resultados que seriam introduzidos no banco de dados do software. Além disso, foi possível comparar com resultados apresentados na literaturas e poder validar o material. Para a anisotropia, o material teve valores maiores que a literatura, o que indica uma tendência de preservação da espessura. Os valores encontrados para o índice Erichsen apresentam informações importantes sobre a ductilidade das chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 430. Este material, ao ser aplicado em diferentes condições de lubrificação, demonstrou que as condições de lubrificação 1 foi a que apresentou melhores resultados, com valor de IE 10,5 mm, superior para as 3 condições empregadas, e uma menor força necessária (12,58 kN), o que pode ser encontrado nos resultados experimentais e de simulação numérica. Para o ensaio de “Nakazima modificado”, item 3.4, foram empregadas também 3 condições de lubrificação, e foi possível conferir que o lubrificante 1 foi o que apresentou melhores resultados quando comparados com os demais, uma possível variação nas curvas CLC, pode ter ocorrido ao método empregado (régua de deformação, ou também pela variação (na viscosidade) entre os lubrificantes empregados, proporcionando uma CLC com maiores deformações, posteriormente inseridas no software, que serviram de critério de falha para o material.



Com os resultados de força máxima para as variadas condições empregadas de estampagem da cuba, é possível afirmar que as variações das condições superficiais de lubrificação, influenciam nos resultados obtidos (com valores variando entre 30,54 à 49,29), assim como as condições de variação do prensa chapas e de tamanho de geratriz. É possível afirmar que a condição de lubrificação 1 foi a que apresentou resultados mais satisfatórios de coeficiente de atrito para as várias condições empregadas, (30,54 kN), enquanto os resultados obtidos pela condição de lubrificação 3 foi o cenário que apresentou valores de coeficiente de atrito mais altos (49, 29 kN).

Para o procedimento de cálculos aplicados da força máxima de estampagem da cuba, foram utilizadas equações disponíveis na literatura. Comparando os resultados encontrados pelo experimento e simulação numérica, as equações empregadas demonstram, para a geratriz pequena, variação de valor de 10 a 20 % (para as equações de *Sibel*, *Siebel-Beisswanger* e *Tschaetsch*) (tabela 13), e as equações de *Lange* e *Rodrigues e Martins* apresentaram uma discrepância ainda maior que as mencionadas anteriormente, passando de 30%. Já para a geratriz grande a variação dos resultados possui algumas discrepâncias: a equação de *Rodrigues e Martins* apresentou valores muito semelhantes ao encontrados experimentalmente com variação de apenas 5%, enquanto para as equações de *Sibel*, *Siebel-Beisswanger* a variação ficou em uma faixa de 15%, *Tschaetsch* ficou em torno de 20% e *Lange* com valores superiores a 45% (tabela 13), sendo assim as equações que devem ser utilizadas para a geratriz menor (figura 26 - a), são de *Tschaetsch* foi que apresentou melhores resultados para o material em estudo, mesmo desconsiderando o coeficiente de atrito, já para a geratriz grande (figura 26 -b), a equação de *Rodrigues e Martins*, onde apresentou uma variação muito pequena com apenas 5%.

Para a variação de espessura, cada ponto analisado tanto para os ensaios experimentais e simulação numérica, não apresentou uma variação muito elevada, mesmo para as 12 condições de estampagem empregadas, com valores máximo de 0,8 à 1,15 mm. Contudo foi possível perceber uma variação maior na região da cabeça do punção, no raio de entrada da matriz e no flange.

As deformações principais  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  apresentaram uma pequena variação dos resultados obtidos pela simulação numérica, com os experimentais. Observando os resultados experimentais, o valor da deformações principais largura ( $\varphi_1$ ) e da espessura ( $\varphi_3$ ) foi o que apresentou comportamento mais expressivo, principalmente na região da cabeça do punção,

raio de entrada da matriz e no flange, para a direção de 45° ao eixo central da peça (pois o material anisotrópico possui um afinamento na largura maior que na espessura). A deformação principal  $\varphi_2$  teve comportamento similar considerando os resultados experimentais, com algumas variações específicas, que podem ser justificadas pelo método empregado no estudo, da régua de deformação. Foram averiguadas também as deformações equivalentes fornecidas pela simulação numérica e os resultados encontrados experimentalmente apresentaram valores superiores a simulação numérica. É possível ainda afirmar que a simulação numérica indicou que haveria uma possível ruptura do material, devido aos resultados apresentados ficarem acima da curva CLC do material, mesmo para a variação da condição de lubrificação, mas no experimento apresentou em algumas peças, o início de trinca do material.

Para as três condições de lubrificação empregadas, é possível observar que a condição de lubrificação 1, foi a que apresentou resultados mais satisfatórios, quando comparada com as demais, reduzindo o coeficiente de atrito, existente entre as ferramenta e chapa, durante os ensaios experimentais e de caracterização do material.

## 8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de trabalhos futuros, para complementação deste estudo:

- Obtenção dos coeficientes de atrito, através do ensaio de DST (dobramento sob tensão), para as condições diferentes condições de lubrificação, para a inserção nas equações analíticas e nas simulações numéricas, na validação do atrito para peças de geometrias não-axissimétricas;
- Realização da estampagem da cuba, variando a dimensão da geratriz, para geometrias circulares, verificando assim a possível variação das deformações e variação da espessura;
- Execução da estampagem a quente, com aços de alta resistência, a fim de averiguar as possíveis velocidades de deformação, variação de espessura, tensões e deformações, para peças não-axissimétricas;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, T., TEKKAYA, A. E. **Sheet Metal Forming – Fundamentals**. ASM Internaional. Book. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1**: Materiais Metálicos - Ensaio de Tração. Parte 1: Método de Ensaio à Temperatura Ambiente. Rio de Janeiro. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16281**: Determinação do Índice de Embutimento em Chapas de Aço Pelo Método de Erichsen Modificado. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16282**: Folhas e Chapas de Aço de Baixo Carbono - Determinação de Anisotropia Plástica e do Expoente de Encruamento - Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2014.

BANABIC, D. *et al.* **Formability of Metallic Materials**. ed. Springer, book. Germany, 2010.

BANABIC, D. *et al.* Development of a New Procedure for the Experimental Determination of the Forming Limit Curves. **Cirp Annals: Manufacturing Technology**. Cluj-Napoca, p. 255-258, 2013.

BANABIC, D. **Multiscale Modeling in Sheet Metal Forming**. ed. Springer, book. p 1- 46. Romênia. 2016.

BATALHA, M.H.F., **Estudo da Estampabilidade a Quente de Aço ao Boro em Conformação com Redução de Espessura Controlada**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BAÚ, A. R., *et al.* Análise da Conformabilidade do Aço Inoxidável AISI 304 e AISI 201. **16ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, SENAFOR**. 2012.

BHADURI, A. Deep Drawing In: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. **Springer Series in Materials Science**. Vol. 264. 2018.

BRUSCHI, S., *et al.* Testing and Modelling of Material Behaviour and Formability in Sheet Metal Forming. **CIRP Annals**. Vol. 63. p. 727 – 749. 2014.

BÖLLINGHAUS, T.; *et al.* **Manufacturing Engineering**. Berlin : Springer, 2009.

CANDRA, S., BATAN, M. D. Experimental Study and Analysis of The Influence of Drawbead Against Restriction and Deep Drawing Force of Rectangular Cup-Cans With Tin Plate Material. **Applied Mechanic and Materials**. Vol. 315. p. 246 – 251. 2013.

CARNEIRO, J. P. S. *et al.* Comparative Study of Formability and Mechanical Properties of AISI 316 and AISI 430 Stainless Steel. **5Th International Conference On Integrity-Reliability-Failure**. Brasil. p. 213-220. 2016.

CHEN, F. K., LIN, S. Y. A Formability Index for the Deep Drawing of Stainless Steels Rectangular Cups. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**. Vol. 34. p. 878 – 888. 2007.

CHO, J. R. *et al.* Finite Element Investigation on Spring-Back Characteristics in Sheet Metal U-Bending Process. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 141. p. 109 – 116. 2003.

DANCKERT, J. Experimental Investigation of a Square-Cup Deep Drawing Process. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 50. p. 375 – 384. 1995

DAVIS, J. R. **Tensile Testing**. 2ª Ed. ASM International. Book. pp. 33 – 53. 2004

DAXIN, E.; MIZUNO, T.; LI, Z. Stress Analysis of Rectangular Cup Drawing. **Journal of materials processing technology**, Vol. 205, n. 1-3, p. 469-476, 2008.

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

DEMIRCI, H. I.; ESNER, C.; YASAR, M. Effect of The Blank Holder Force on Drawing of aluminum Alloy Square Cup: Theoretical and Experimental Investigation. **Journal of Materials Processing Technology. Elsevier B**. Vol. 206. p. 152 - 160,.2007.

DUDHAT, P., *et al.* Study of Deep Drawing Process – a Review. **International Journal for Innovative Research in Science e Technology**. Vol. 3. p 103 – 106. 2017.

DWIVEDI, R., AGNIHOTRI, G. Study of Deep Drawing Process Parameters. **Materials Today: Proceedings**. Vol. 4 p. 820 – 826. 2017.

EVIN, E., TOMÁS, M., VÝROSTEK, M. Verification the Numerical Simulation of the Strip Drawing Test its Physical Model. **Acta Mechanical Slovaca**. Vol. 20 (1). p. 14 – 21. 2016.

FAN, J.P., *et al.* 3D Finite Element Simulation of Deep Drawing With Damage Development. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 46. p. 1035 – 1044. 2006.

FERRARINI, J. L. **Análise e Determinação do Coeficiente de Atrito no Processo de Estampagem Profunda**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. p. 107 2014.

FERREIRA, R. A. S. **Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos**. p. 245. Book. Editora Universitária – UFPE. Recife. 2006

FILHO, A. F., *et al.* Texture Evolution of Ferritic (AISI 430) Stainless Steel Strips During Cold Rolling Annealing and Drawing. **Materials Science Forum**. Vol. 539 – 543. p. 4926 – 4931. 2007.

FOLLE, L.F.: **Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem**. Tese de Doutorado. PPG3M – Programa de Pós-Graduação em Metalurgia, Minas e Matérias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Posto Alegre. p. 131. 2012.

FOLLE, L. F.; *et al.* Escolha do Lubrificante Correto Torna Mais Precisa a Curva-limite de Conformação. **Corte e Conformação de Metais**. p. 64 - 76, 2008.

GARCÍA, C., *et al.* Numerical Modelling and Experimental Validation of Steel Deep Drawing Processes: Part. II. Applications. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 172. p. 461 – 471. 2006.

GIULIANO, G., SAMANI, F. Effect of Lubrification on the Erichsen Test. **Applied Mechanics and Materials**. Vol. 365-366. p. 425 – 428. 2013.

GOODWIN, G. Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. **SAE Transactions**. p. 380 – 387. 1968.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems**. 4<sup>th</sup> Ed. Hoboken : John Wiley & Sons Inc., 2010.

HASSAN, M. A., AHMES, K. I. E, TAKAKURA, N. A Developed Process for Deep Drawing of Metal Foil Square Cups. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 212. p. 295 – 307. 2012.

HUSSAINI, S. M., *et al.* Development of Experimental and Theoretical Forming Limit Diagrams for Warm of Austenitic Stainless Steels 316. **Journal of Manufacturing Processes**. Vol. 18. p. 151 – 158. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12004 - 1**; Metallic Materials: Determination on Forming - Limit Curves for Sheet and Strip - Part 1: Measurement and Application of Forming-Limit Diagrams in the Press Shop, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12004 - 2**; Metallic Materials: Determination on Forming - Limit Curves for Sheet and Strip - Part 2: Determination of Forming-Limit in the laboratory, 2021.

IQUILIO, R. A., *et al.* Novel Experimental Method to Determine The Limit Strain by Means of Thickness Variation. International. **Journal of Mechanical Science**. Vol. 154. p. 208 – 218. 2019.

IQUILIO, R. A., *et al.* Microstructure, Anisotropy and Formability Evolution of an Annealed AISI 430 Stainless Steels Sheet. **Steel Research International**. Vol. 93. p. 2100114 (1 - 13). 2022.

KHORRAMI, M. S. MOSTAFAEI, M. A., POURALIAKBAR, H. Study on Microstructure and Mechanical Characteristics of Low- Carbon Steel and Ferritic Stainless Steels Joints. **Materials Science e Engineering A**. Vol. 608. p. 35 – 45. 2014.

LANGE, K.: **Handbook of Metal Forming**. McGraw-Hill Book Company. p. 1216. 1985.

LAZARESCU, L., NICODIM, I., BANABIC, B. Evaluation of Drawing Force and Thickness Distribution in the Deep-Drawing Process with Variable Blank-Holding. **Key Engineering Materials**. Vol. 639. p. 33 – 40. 2015.

LORA, Fábio André. **Avaliação das Deformações no Aço DC04 Quando Submetido ao Processo Híbrido de Estampagem Incremental Posterior ao Processo Convencional**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, 2014.

LUIZ, V. D. **Estudo do Comportamento Mecânico, Tribológico e Fratura da Chapa de Aço AISI 430 Sob Dobramento e Estiramento**. Tese de Doutorado. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. p. 202. 2022.

LUIZ, V. D., *et al.* Influência da Velocidade de Estampagem e Anisotropia no Comportamento Tribológico e Fratura de uma Chapa de Aço AISI 430 Nb. **Revista Matéria**. Vol. 27. Nº 1. 2022.

KEELER, S. Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. **SAE Transactions**. Vol. 74. p. 1 - 9, 1966.

KHORRAMI, M. S., *et al.* Study on Microstructure and Mechanical Characteristics of Low-Carbon Steel and Ferritic Stainless-Steel Joints. **Materials Science and Engineering: A**. Vol. 608. p. 35 – 45. 2014.

MAJLESSI, S. A., LEE, D. Deep Drawing of Square-Shape Sheet Metal Parts, Part 2: Experimental Study. **Transaction of the ASME**. Vol. 115. p. 110 – 117. 1993.

MAMMALIS, A.G., MANOLAKOS, D. E., BALDOUKAS, A. K. On the Finite-Elements Modelling of the Deep-Drawing of Square Section of Coated Steels. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 58. p. 153 – 159. 1996.

MODI, B., KUMAR, D. R. Optimization of Process Parameters to Enhance Formability of AA 5182 Alloy in Deep Drawing of Square Cups by Hydroforming. **Journal of Mechanical Science and Technology**. Vol. 33. p. 5337 – 5346. 2019.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUDA K. Study on the Formability of Steels Sheets. **Science Research as Academic Publisher**. Yamata Technical Report, 1968.

NETTO, S. E. S. **Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação**. Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. p. 90. 2018.

OZEK, C., UNAL, E. Optimization and Modelling of Angular Deep Drawing Process for Square Cups. **Materials and Manufacturing Process**. Vol. 26. p. 1117 – 1125. 2011.

PADMANABHAN, R., *et al.* Influence of Process Parameters of the Deep Drawing of Stainless Steel. **Finite Elements in Analysis and Design**. Vol.43. p. 1062 – 1067. 2007.

PARK, K., KIM, Y. The Effect of Material and Process Variable on the Stamping Formability of Sheets Materials. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 51. p. 64 – 78. 1995.

PROMMAJUN, N.; CHAJIT, S. Optimization of Drawbead Shape Design for Single Step Deep Drawing of Stainless-Steel Rice Bowl. **The 6Th TSME International Conference On Mechanical Engineering**. Thailand, p. 1-7. 2015.

RIVAS-MENCHI, A. *et al.* Performance Evaluation of Analytical Expressions for Cylindrical and Rectangular Deep Drawing Force Estimation. **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 36, p. 340 - 350, 2018.

ROCHA, R. P. **Análise Experimental e Validação Numérica do Processo de Estampagem de Peças Não-Axissimétricas em Aço Inoxidável AISI 304**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M. UFRGS, 2022.

ROCHA, R. P., *et al.* Determinação das Curvas Limite de Conformação dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 430 Para Diferentes Condições de Superficiais de Lubrificação. **24ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, SENAFOR**. 2022.

RODRIGUES, J. MARTIN, P. **Tecnologia Mecânica – Tecnologia da deformação plástica**. Ed. 2ª. Escolar Editora, Lisboa, Portugal 2005.

SCHAEFFER, L., ROCHA, A. da S. **Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação**. 1ª Edição. Imprensa Livre. 2007.

SCHAEFFER, L. NUNES, R M., BRITO, A. M. G. **Tecnologia da Estampagem de Chapas Metálicas**. Ed. Imprensa Live. Porto Alegre, 2017.

SCHULER, **Metal Forming Handbook**, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 1998

SHIM, H. B., YANG, D. Y. Elastic-Plastic Finite Elements Analysis of Deep Drawing Processes by and Shell Elements. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. Vol. 119. p. 341 – 349. 1997.



SIEBEL, E.: **Tiefziehen: Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Tiefziehens im Auftrage der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung**. Bücher: C. Hanser, 1955.

SIEBEL, E.; BEISSWÄNER, H.: **Tiefziehen**. München: Carl Hanser Verlag, 1955.

SIEGERT, K., *et al.* Closed-Loop Control System for Blank Holder Forces in Deep Drawing. **Annals of The CIRP**. Vol. 44. p. 251 – 254. 1995.

SLOTA, J., SPISAK, E. Experimental FLC Determination on High Strength Steel Sheet Metal. **Acta Metallurgica Slovaca**. Vol. 21. n°. 4. p. 269 – 277.

SOUZA, J. H. C. de. **The Metal + Forma Blog**. Site disponível em: <http://metal-e-forma.blogspot.com/p/conformacao-de-chapas.html>. Acessado em: 21 de fevereiro de 2023.

SOUZA, F. B. P. **Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço USIBOR 1500P**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

TOMMERUP, S., ENDELF, B. Experimental Verification of a Deep Drawing Tool System for Adaptive Blank Holder Pressure Distribution. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 212. p. 2529 – 2540. 2012.

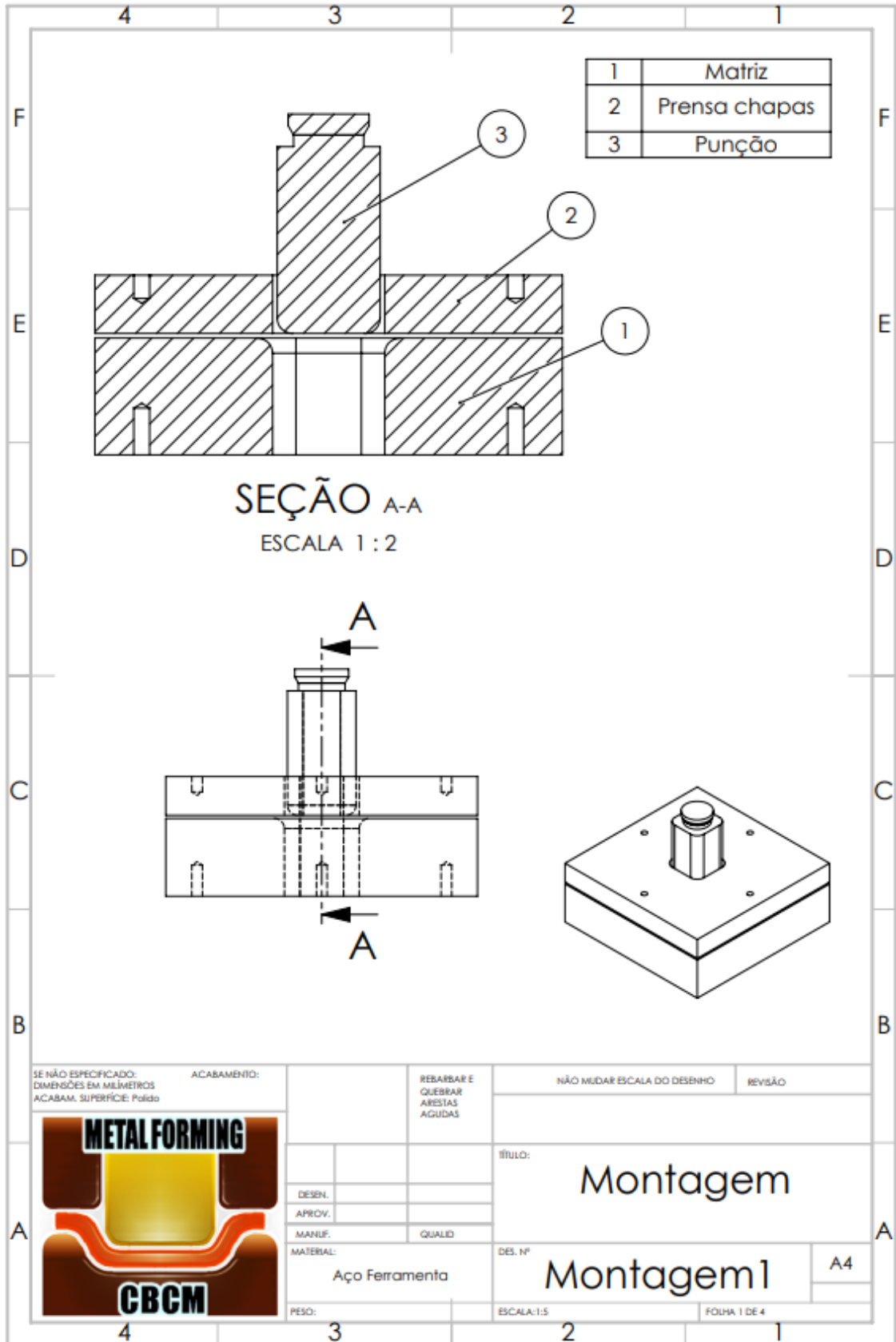
TSOUPIS, L., HILDERING, S., MERKLEIN, M. Bending of High-Strength Low-Alloyed Steel With Respect to Edge Crack Sensitivity Caused by Shearing Operations. **Procedia Engineering**. Vol. 81, p. 712–717, 2014.

TIWARI, P. R., RATHORE, A., BODKHE, M. G. Factors Affecting the Deep Drawing Process – a Review. **Material Today: Proceedings**. Vol. 56. p. 2902 – 2908. 2022.

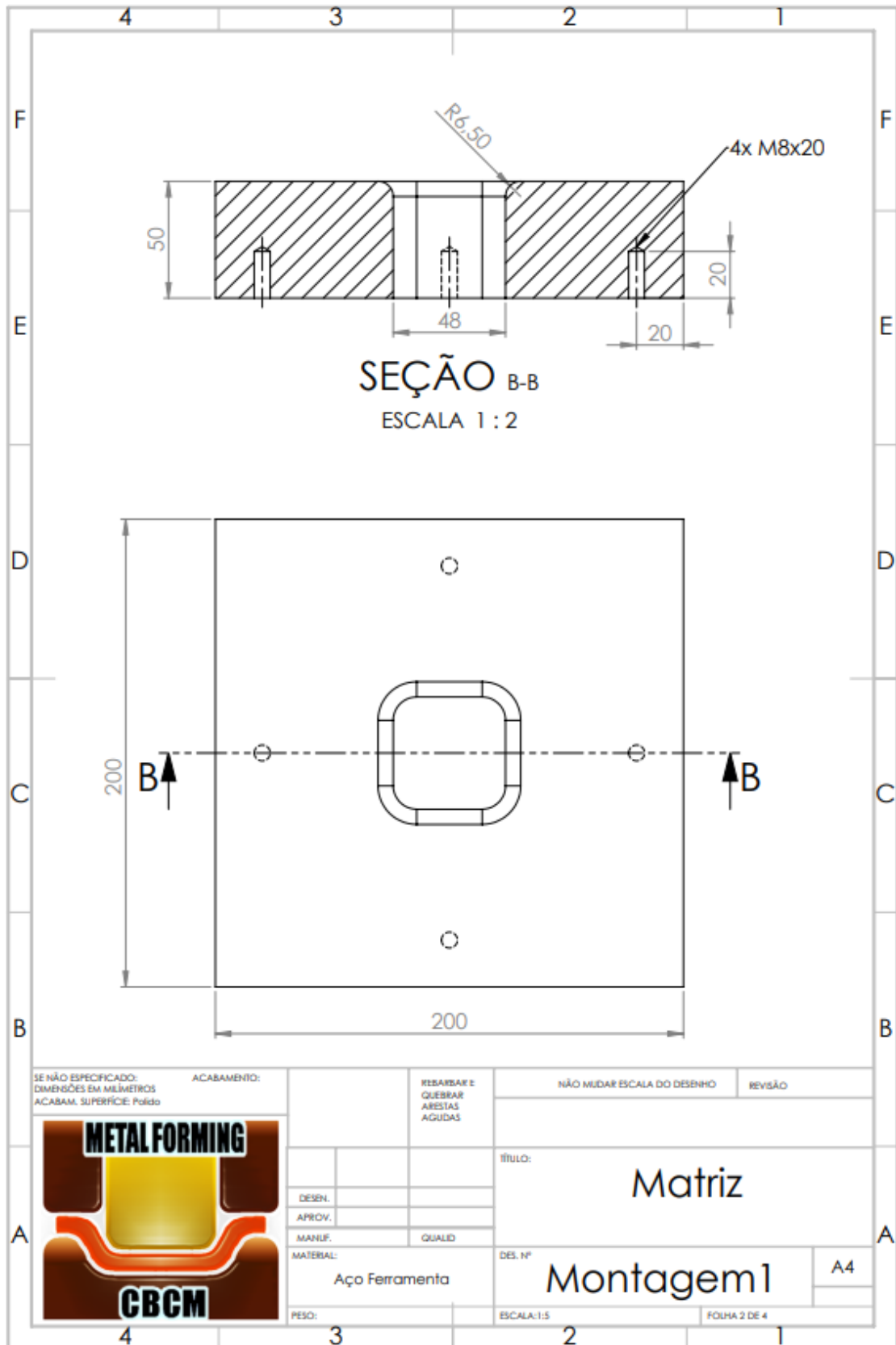
TSCHATSCH, H., **Metal Forming Practice: Processes, Machines, Tools**. Springer, 2006.

ZHANG, S. H., *et al.* Finite Element Analysis of The Hydromechanical Deep-Drawing Process of Tapered Rectangular Boxes. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 102. p 1 – 8. 2000.

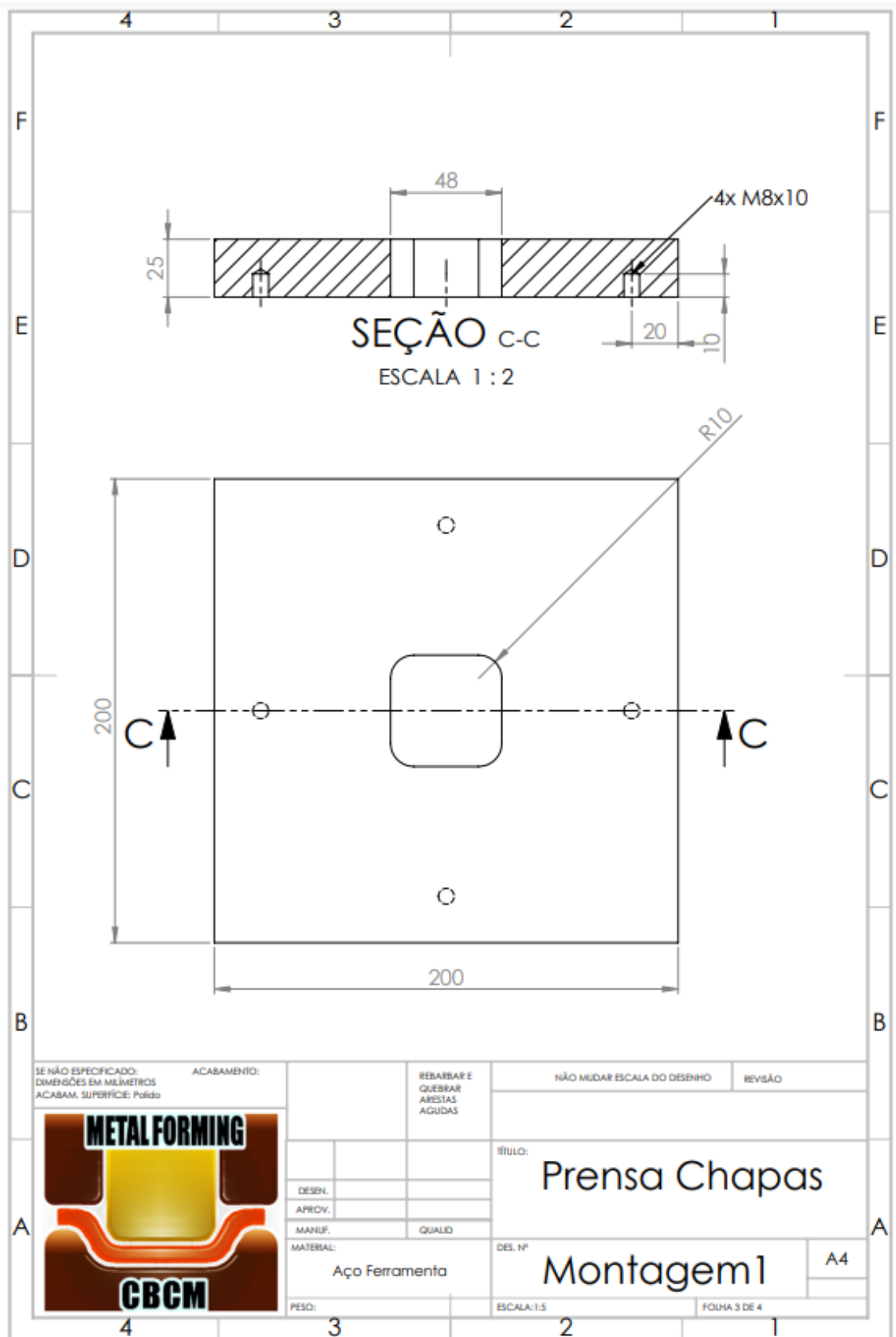
## APÊNDICE A – MONTAGEM DAS FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM



APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO EM 2D DA MATRIZ



APÊNDICE C – DESENHO TÉCNICO EM 2D DO PRENSA-CHAPA



## APÊNDICE D – DESENHO TÉCNICO EM 2D DO PUNÇÃO

