

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Izabella Luiza Santos Almeida

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA CONFORMABILIDADE DO AÇO
SAE 1010 EM CHAPAS FINAS SEM E COM GALVANIZAÇÃO (GI-85)**

Belo Horizonte

2021

Izabella Luiza Santos Almeida

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA CONFORMABILIDADE DO AÇO
SAE 1010 EM CHAPAS FINAS SEM E COM GALVANIZAÇÃO (GI-85)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Área de concentração: Processos de fabricação mecânica

Belo Horizonte
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

A447a Almeida, Izabella Luiza Santos
Análise numérica e experimental da conformabilidade do aço SAE 1010 em chapas finas sem e com galvanização (GI-85) / Izabella Luiza Santos Almeida. Belo Horizonte, 2021.
117 f. : il.

Orientador: Gilmar Cordeiro da Silva

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Conformação de metais. 2. Estampagem (Metais). 3. Metais - Propriedades mecânicas. 4. Galvanização. 5. Método dos elementos finitos. 6. Plasticidade. 7. Deformações (Mecânica). I. Silva, Gilmar Cordeiro da. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.7.04

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Marques de Souza e Silva - CRB 6/2086

Izabella Luiza Santos Almeida

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA CONFORMABILIDADE DO AÇO
SAE 1010 EM CHAPAS FINAS SEM E COM GALVANIZAÇÃO (GI-85)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação mecânica

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva – PUC MG (Orientador)

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa – CEFET MG (Examinador externo)

Prof. Dr.– Jânes Landre Júnior – PUC MG (Examinador interno)

Prof. Dr.– Pedro Paiva Brito – PUC MG (Examinador interno)

Belo Horizonte, 09 de julho de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelas oportunidades e por me guiar sempre no caminho da evolução.

Ao meu orientador, Professor Doutor Gilmar Cordeiro da Silva, pelo incentivo, pela amizade, pelos ensinamentos técnicos e contribuições para minha carreira profissional.

Ao meu querido pai pela motivação e dedicação, pela presteza na resolução dos desafios e por me ensinar o que é ter gosto pelo conhecimento.

À minha mãe pela preocupação, cuidados, orientação pedagógica e psicológica, que transformou muitas vezes momentos de turbulência em aprendizado.

Aos meus irmãos Henrique e Tarcísio pela amizade, pelo apoio incondicional e também pela convivência profissional.

Ao meu namorado Mateus e família pela paciência e auxílio durante esse longo período que envolveu muita dedicação, inclusive durante momentos de lazer.

À Zira, Lena, meus amigos e família pelo companheirismo de sempre.

Aos professores e colegas tanto da UFMG quanto da PUC-MG que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, meu reconhecimento. Em especial, aos técnicos de laboratório Ítalo, André, Marceliny, Erberte, Ernane e Edilene, que nunca mediram esforços nem sorrisos para me auxiliar.

À empresa TAJAX, pela oportunidade de realizar a fabricação das caçambas em sua fábrica e pela prestatividade de toda a equipe de colaboradores. Em especial, aos amigos Geraldo, Breno, Reinaldo, Edson e Wanderson.

Agradecimento especial à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela infraestrutura e suporte para elaboração do trabalho, e ao apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

*“Comece fazendo o necessário. Depois o possível.
Em breve estará fazendo o impossível”*
São Francisco de Assis

RESUMO

As empresas de estamparia avaliam constantemente melhorias em seu processo produtivo visando maior competitividade no mercado, seja pelo aumento da produtividade ou pela redução de custos. Neste cenário, a fabricação de peças finas com geometrias complexas e elevado padrão de qualidade se torna um desafio, sendo necessários estudos para prever falhas e defeitos durante o processo. Neste trabalho, estudou-se o limite de conformabilidade do aço SAE 1010 sem e com revestimento de zinco puro (GI-85) utilizando o software HyperForm na fabricação de caçambas de carrinho de mão em chapas finas. Além disso, a análise experimental foi feita, tanto em laboratório quanto industrialmente em escala real, com os objetivos de comparar limites de falha por estricção (CLC-E) e fratura (CLC-F) e confirmar resultados obtidos virtualmente. Concluiu-se que, em condições de atrito favoráveis à estampagem, o aço SAE 1010 GI-85 falha primeiro quando comparado ao sem revestimento, que podem ser correlacionadas ao craquelamento da camada de zinco ou redução da ductilidade do substrato após envelhecimento por deformação. A curva CLC-F obtida em laboratório se mostrou mais conservadora e pôde ser usada apenas de forma qualitativa para previsibilidade de falhas no processo real. Pode-se dizer que houve boa correlação entre os resultados simulados por elementos finitos e experimentais, com erro de apenas 6,5%.

Palavras-chave: Conformabilidade. Galvanização. Simulação por elementos finitos. Falha.

ABSTRACT

Stamping companies are constantly evaluating improvements in their manufacturing processes aiming increased competitiveness in the market, whether by increasing productivity or by reducing costs. In this scenario, the manufacture of thin complex geometry products attending high quality standards becomes a challenge, and studies are needed to predict failures and defects during the process. The formability limit of SAE 1010 steel with and without pure zinc coating (GI-85) was studied using HyperForm software in the manufacture of thin wheelbarrow buckets. In addition, the experimental analysis was carried out, both in laboratory and industrially on a real scale, with the objectives of comparing failure limits by constriction (FLC-E) and fracture (FLC-F) and confirming results obtained virtually. It was concluded that, under the same stamping favorable friction conditions, SAE 1010 GI-85 steel fails first when compared to uncoated steel, which can be correlated to zinc layer cracking or substrate ductility reduction after aging by deformation. The FLC-F curve obtained in the laboratory proved to be more conservative and could only be used qualitatively to predict failures in real process. It can be said that there was a good agreement between experimental and simulated results, which represented an error of only 6.5%.

Key-Word: Formability Limit Curve. Hot Dip Galvanising. Failure. Finite Elements Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos mecânicos de conformação	24
Figura 2 – Peças obtidas por estampagem a frio	25
Figura 3 – Operação de corte por cisalhamento	26
Figura 4 – Operação de dobramento	27
Figura 5 – Parâmetros do processo de estampagem	28
Figura 6- Tensões principais aplicadas na superfície de um elemento de chapa no embutimento	29
Figura 7 - Detalhamento de "Drawbeads" em formato circular	35
Figura 8 - Chapas laminadas a frio USIMINAS	36
Figura 9 - Processo de revestimento por galvanização por imersão a quente	38
Figura 10 - Esquema do ensaio Nakazima	41
Figura 11 – Esquema do ensaio Marciniak	41
Figura 12 – Preparação de corpos de prova dos ensaios Nakazima e Marciniak	42
Figura 13 – Região de malha circular antes e depois da deformação.....	43
Figura 14 – Deformações principais correspondentes à diferentes razões de embutimento	45
Figura 15 - Limite de conformabilidade do aço AISI 316L	53
Figura 16 - Etapas da simulação numérica	55
Figura 17 - Fluxograma do trabalho	59
Figura 18 – Corpo de prova para ensaio de tração	60
Figura 19 - Corpos de prova antes do ensaio de tração	61
Figura 20 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio Nakazima.....	63
Figura 21 – Geometria final da caçamba.....	67
Figura 22 - Ferramentas para embutimento.....	67
Figura 23 – Corpos de prova para obtenção da CLC a partir do embutimento real.....	68
Figura 24 – Conjunto de medição montado em fresadora CNC	69
Figura 25 - Medição de espessura em diferentes pontos	70
Figura 26 - Corpos de prova após ensaio de tração	72
Figura 27 – Camada do revestimento GI-85 no aço SAE 1010	76
Figura 28 – CP's do aço sem revestimento antes do ensaio Nakazima.....	77
Figura 29 – CP's do aço com revestimento antes do ensaio Nakazima	77
Figura 30 - CP's do aço com revestimento após ensaio Nakazima.....	78
Figura 31 - CP's do aço sem revestimento após ensaio Nakazima	78

Figura 32 - Profundidade obtida nos corpos de prova 40x180 com e sem revestimento	79
Figura 33 - Detecção de estricção e fratura durante ensaio Nakazima	80
Figura 34 - Comparativo entre caçamba real e simulada.....	82
Figura 35 - Caçambas obtidas por simulação numérica	83
Figura 36 - Regiões de análise da variação da espessura.....	84
Figura 37 - Blanque 1000 x 900 sem revestimento	86
Figura 38 - Blanque 1100 x 900 com revestimento	86
Figura 39 - Blanque 1100 x 850 sem revestimento	87
Figura 40 - Blanque 1100 x 900 sem revestimento	87
Figura 41 - Blanque 1100 x 850 com revestimento	88
Figura 42 - Blanque 1000 x 900 com revestimento	88
Figura 43 – Caçamba simulada com blanque 1100 x 900 no aço SR.....	96
Figura 44 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 900 no aço CR	96
Figura 45 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 850 no aço SR.....	97
Figura 46 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 850 no aço CR	97
Figura 47 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 950 no aço SR.....	98
Figura 48 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 950 no aço CR	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Estudo da variação de espessura nos cantos e parede de copos quadrados	30
Gráfico 2 - Relação entre alongamento relativo e coeficiente de atrito	33
Gráfico 3 - Análise da pressão de contato e do coeficiente de atrito em aços galvanizados (DPGI e DPGA)	34
Gráfico 4 - Classificação de aços quanto ao alongamento e resistência à tração	36
Gráfico 5 - Aços para estampagem organizados conforme R e LE.....	37
Gráfico 6 - Curvas tensão x deformação para aço baixo carbono laminado a frio.....	40
Gráfico 7 - Curva Limite de Conformação para um aço baixo carbono	44
Gráfico 8 - Regiões do Diagrama Limite de Conformação.....	47
Gráfico 9 – Curva CLC para aço baixo carbono de espessuras variadas	50
Gráfico 10 – Influência do coeficiente de Lankford no Diagrama Limite de conformação	52
Gráfico 11 - Influência do encruamento na curva CLC	52
Gráfico 12 - Gráfico tensão x deformação verdadeiras 90°	73
Gráfico 13 - Gráfico tensão x deformação verdadeiras 45°	73
Gráfico 14 - Gráfico tensão x deformação verdadeiras 0°	74
Gráfico 15 - Curva CLC obtida pelo ensaio Nakazima para o aço sem revestimento	80
Gráfico 16 - Curva CLC obtida pelo ensaio Nakazima do aço com revestimento.....	81
Gráfico 17 - Curvas CLC-F dos aços com e sem revestimento	82
Gráfico 18 - Curvas CLC-F obtidas pelo ensaio Nakazima e pelo embutimento real para o aço com revestimento.....	85
Gráfico 19 - Curvas CLC-F obtidas pelo ensaio Nakazima e pelo embutimento real para o aço sem revestimento	85
Gráfico 20 - Espessuras real e virtual dos pontos 1 a 7 do aço SR	93
Gráfico 21 - Espessuras real e virtual dos pontos 9 a 12 do aço SR	94
Gráfico 22 - Espessuras real e virtual dos pontos 1 a 7 do aço CR.....	94
Gráfico 23 - Espessuras real e virtual dos pontos 9 a 12 do aço SR	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de K conforme LDR (d/D)	31
Tabela 2 – Aços para estampagem conforme norma USIMINAS e aço 1010	39
Tabela 3 – Caçambas de carrinho de mão de acordo com NBR16269	57
Tabela 4 - Identificação corpos de prova de tração	61
Tabela 5 – Planejamento do embutimento de caçambas	68
Tabela 6 - Caracterização do aço 1010 com e sem revestimento GI.....	71
Tabela 7 – Dados obtidos pelo ensaio de tração variando velocidade de deformação.....	74
Tabela 8 – Dados obtidos pelo ensaio de tração variando a direção de laminação	75
Tabela 9 - Profundidades obtidas pelo ensaio de tração.....	79
Tabela 10 – Medições das diagonais das caçambas, em mm	90
Tabela 11 - Obtenção do LDR das caçambas.....	90
Tabela 12 – Espessuras obtidas pelos embutimentos reais e simulados para o aço SR	91
Tabela 13 – Espessuras obtidas pelos embutimentos reais e simulados para o aço CR.....	92
Tabela 14 - Análise da variação de espessura geral	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LDR	Limite de embutimento
EM	Estampagem média
EP	Estampagem profunda
IF	Interstitial Free
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de resistência
CP	Corpo de prova
CLC	Curva Limite de Conformação
CLC-E	Curva Limite da estrição local
CLC-F	Curva Limite da fratura
CLCo	Ponto crítico da CLC
DLC	Diagrama Limite de Conformação
DDQ	Deep Drawing Quality
BUT	Bending Under Tension
DPGI	Hot Deep Galvanized
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
PUC-MG	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
SAE	Society of Automotive Engineers
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
GI	Camada de zinco puro
NBR	Norma Brasileira Técnica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

Mm	Milímetro
G	Grama
Cm	Centímetro
Kgf	Kilograma-força
Th	Temperatura homóloga
T	Temperatura de trabalho (°C)
Tf	Temperatura de fusão (°C)
T	Espessura da chapa (mm)
To	Espessura da chapa inicial (mm)
P	Perímetro de corte (mm)
Fc	Força de corte (kgf)
LN	Linha neutra
Rf	Raio de curvatura (mm)
Rp ¹	Raio inferior do punção (mm)
Rp ²	Raio lateral do punção (mm)
Rd	Raio da matriz (mm)
F	Força de embutimento (Kgf)
Fbh	Força do prensa chapa (Kgf)
F	Folga entre punção e matriz (mm)
H	Profundidade de embutimento (mm)
V	Velocidade (mm/s)
Dp	Diâmetro do punção (mm)
Do	Diâmetro inicial (mm)
d1	Diâmetro maior (mm)
d2	Diâmetro menor (mm)
W	Largura (mm)
L	Comprimento (mm)
N	Coefficiente de encruamento
R	Coefficiente de anisotropia
Rm	Valor médio de anisotropia
ΔR	Coefficiente de anisotropia planar
$\bar{R}$	Coefficiente de anisotropia normal

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

σ	Tensão normal (MPa)
σ_r	Tensão radial (MPa)
σ_{LRT}	Tensão limite de resistência à tração (MPa)
σ_e	Tensão de escoamento (MPa)
σ_1	Tensão principal
σ_2	Tensão principal
σ_3	Tensão principal
τ	Tensão de cisalhamento (MPa)
A_i	Ângulo de dobramento inicial (°)
A_f	Ângulo de dobramento final (°)
μ	Coefficiente de atrito
A	Ângulo de embutimento (°)
B	Razão de embutimento
E	Deformação verdadeira
ε_0	Deformação anterior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivo geral	28
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>28</i>
<i>1.1.1.1</i>	<i>Justificativa.....</i>	<i>28</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Deformação Plástica.....	21
2.1	Plasticidade dos metais	22
2.2	Conformação de metais.....	23
<i>2.2.1</i>	<i>Corte por cisalhamento</i>	<i>25</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Dobramento.....</i>	<i>26</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Estiramento</i>	<i>27</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Embutimento.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.4.1</i>	<i>Fundamentos</i>	<i>27</i>
<i>2.2.4.2</i>	<i>Características do processo</i>	<i>28</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Aços para estampagem profunda</i>	<i>35</i>
<i>2.2.6</i>	<i>Aços galvanizados por imersão a quente</i>	<i>37</i>
2.3	Ensaio mecânicos para estampagem	39
<i>2.3.1</i>	<i>Ensaio de tração.....</i>	<i>39</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Ensaio Nakazima e Marciniak.....</i>	<i>40</i>
2.4	Curva limite de conformação (CLC)	42
<i>2.4.1</i>	<i>Marcação da malha.....</i>	<i>43</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Critérios para determinação das falhas.....</i>	<i>46</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Parâmetros que influenciam na curva limite de conformação</i>	<i>49</i>
<i>2.4.3.1</i>	<i>Espessura de chapa</i>	<i>49</i>
<i>2.4.3.2</i>	<i>Coefficiente de anisotropia e coeficiente de encruamento.....</i>	<i>50</i>
<i>2.4.3.3</i>	<i>Taxa de deformação</i>	<i>52</i>
2.5	Simulação por Elementos Finitos.....	53
<i>2.5.1</i>	<i>Considerações iniciais</i>	<i>54</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Características funcionais do HyperForm.....</i>	<i>55</i>
<i>2.5.2.1</i>	<i>Pré Processamento</i>	<i>55</i>
<i>2.5.2.2</i>	<i>Processamento</i>	<i>56</i>
<i>2.5.2.3</i>	<i>Pós-processamento</i>	<i>56</i>
2.6	Fabricação de caçambas em chapas finas	57
3	METODOLOGIA	59
3.1	Caracterização de materiais e preparação de corpos e prova.....	60
<i>3.1.1</i>	<i>Análise química</i>	<i>60</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Ensaio de tração.....</i>	<i>60</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Análise do revestimento GI-85</i>	<i>62</i>
3.2	Execução de ensaios em laboratório	62
3.3	Simulação	63
<i>3.3.1</i>	<i>Pré-processamento.....</i>	<i>63</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Processamento.....</i>	<i>65</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Pós-processamento.....</i>	<i>66</i>
3.4	Embutimento industrial.....	66
<i>3.4.1</i>	<i>Definição da geometria da peça final e ferramental</i>	<i>66</i>
<i>3.4.2</i>	<i>Definição das condições de processo.....</i>	<i>68</i>

3.5	Estudo da embutibilidade	69
3.5.1	<i>Variação da espessura ao longo da seção transversal.....</i>	69
3.5.2	<i>Formação de rugas e estricção localizada.....</i>	70
4	RESULTADOS	71
4.1	Caracterização de materiais	71
4.1.1	<i>Análise química.....</i>	71
4.1.2	<i>Ensaio de tração</i>	71
4.1.3	<i>Análise do revestimento GI-85</i>	76
4.2	Ensaio Nakazima.....	76
4.3	Simulação e embutimento industrial.....	82
5	CONCLUSÃO.....	100
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	101
ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DOS AÇOS		111
ANEXO B - CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº CAL0197 DA PRENSA EMIC.		113
APÊNDICE 1.....		114
APÊNDICE 2 –.....		116
APÊNDICE 3 –.....		117

1 INTRODUÇÃO

A produção de aços no Brasil e no mundo é de grande relevância econômica por abastecer boa parte das indústrias dos setores automobilístico, aeroespacial, de construção civil e linha branca. Atualmente, as empresas avaliam constantemente melhorias em seu processo produtivo visando aumento da competitividade no mercado. Por esse motivo, otimizações nos processos industriais de conformação de chapas metálicas tem se tornado cada vez mais comuns. Nesse cenário, a crescente busca por aumento da produtividade e pela redução de custos demandam produtos em chapas com menores espessuras em relação às amplamente utilizadas, com padrões de qualidade elevados (BITTENCOURT, 2014). Chapas finas de aço baixo carbono não ligados são usadas como matéria prima na estampagem para obtenção do produto final com custos competitivos, como na fabricação de painéis, carcaça de churrasqueira, telhas, tambores, caçambas para construção civil, dentre outros. Durante a fabricação destes produtos, há possibilidade de ocorrência de defeitos como rugas, orelhamento, trincas e marcas de fricção, podendo levar ao retrabalho ou sucateamento de peças, o que impacta principalmente na redução da produtividade.

Todos esses fatores tornam a viabilidade fabril das peças um desafio, sendo necessários estudos prévios a respeito dos limites de falha e possíveis defeitos gerados durante o processo (MADI, 2016). Porém, para atender a embutimentos cada vez mais complexos ao longo dos anos, houve a necessidade de otimizações em toda a cadeia produtiva que envolve o produto. Ligas de aço específicas foram desenvolvidas pelas siderurgias, com controle de composição química e garantia de propriedades favoráveis à estampagem. Nas indústrias, houve o incentivo para execução de análises preliminares (como testes de conformabilidade e simulações por elementos finitos) e uso de equipamentos com tecnologia de ponta (como prensas servo motoras). Na conformação de chapas, o atrito depende de alguns parâmetros como pressão de contato, uso de lubrificantes e velocidade de deformação. Os lubrificantes auxiliam na redução do atrito envolvido e desgaste de ferramentas, mas precisam ser removidos após a estampagem. Do ponto de vista tribológico, os revestimentos galvanizados influenciam diretamente na estampabilidade dos aços alterando o comportamento de fricção das superfícies. Os revestimentos Zn-puro (GI) promovem menor coeficiente de atrito se comparado a com Zn-Ferro (GA), porém maior susceptibilidade ao fenômeno de desgaste por abrasão denominado “stick slip” (SILVEIRA, 2015). O estudo da conformabilidade do aço SAE 1010 sem e com galvanização por imersão a quente (GI-85) foi feito neste trabalho com o objetivo de viabilizar

a fabricação a seco de caçambas para carrinho de mão em chapas finas, incluindo análises experimentais e numéricas.

1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento da conformabilidade do aço SAE 1010 a seco em chapas finas sem e com galvanização (GI-85) por meio numérico e experimental.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar a resposta dos materiais (aço SAE1010 sem e com revestimento GI-85) quanto à falha por estrição/fratura através do ensaio Nakazima e da fabricação de caçambas de carrinho de mão;
- b) Verificar a influência da variação dimensional do blanque no processo de estampagem de caçambas de carrinho de mão por simulação numérica e em escala real;
- c) Validar os resultados obtidos por simulação numérica quanto à previsibilidade de falhas durante o processo real.

1.1.1.1 Justificativa

O presente trabalho foi embasado na necessidade de conhecimento do limite de falha do aço SAE1010 sem e com revestimento de zinco puro durante o processo de embutimento a seco de caçambas de carrinho de mão. Diversos estudos recentes abordam a conformação de chapas finas para fabricação de produtos de geometria complexa. Porém, como a variação geométrica e as condições de atrito tem grande influência no início de estrição/fratura, faz-se necessário um estudo mais aprofundado para o produto em questão. Além disso, a etapa de simulação numérica por elementos finitos presente neste trabalho é amplamente utilizada nas empresas para auxílio na análise do comportamento dos materiais antes da etapa de fabricação, principalmente para realização de try-out virtual com precisão. Nessa dissertação, estuda-se o limite de conformabilidade do aço SAE 1010 sem e com revestimento de zinco puro (GI-85) utilizando o software HyperForm na fabricação a seco de caçambas de carrinho de mão arredondadas em chapas finas. Além disso, é feita também análise de fratura experimental, tanto em laboratório quanto industrialmente em escala real, com o objetivo de confirmar resultados obtidos virtualmente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A conformação mecânica dos metais consiste no processo de transformação de um corpo metálico de forma definida em outro corpo com formato diferente do inicial por meio de deformação plástica. Segundo (FILHO *et al.*, 2011) esse processo pode resultar em componentes ou produtos de alta qualidade em relação a tolerância geométrica, acabamento, alta produtividade e baixo custo, demonstrando assim grande importância na economia brasileira. Como contribuição para a investigação da deformação plástica no processo de conformação de chapas, esta revisão bibliográfica engloba o estudo da teoria da plasticidade incluindo conceitos relacionados ao escoamento e curvas de fluxo.

A implementação de formulações matemáticas que buscam representar o comportamento do material em processos de fabricação fez com que indústrias buscassem esquemas de resolução cada vez mais avançados (GHORBEL *et al.*, 2019). Por isso hoje a simulação por elementos finitos tem um papel importantíssimo em escala industrial, podendo ser aplicada em diversas etapas de um projeto, como design de peças e ferramentas, otimização de parâmetros de processo, try-out virtual e pós-processamento. Neste capítulo são abrangidos também conceitos relacionados a este tema e aplicação do software HyperForm em conformação de chapas.

2.1 Deformação Plástica

A obtenção de peças por meio da conformação mecânica só é possível pelo fenômeno de deformação plástica que, fisicamente, consiste na mudança de forma de um corpo sólido pela ação da temperatura ou de uma carga externa. Sabe-se que a estrutura atômica não é perfeita: nela existem lacunas, átomos substitucionais ou intersticiais, discordâncias ou vazios. E é por meio de defeitos na rede que a deformação plástica acontece. (CALLISTER, 2008)

Inicialmente, a deformação é elástica, não permanente, e obedece a Lei de Hooke. O limite de escoamento é atingido quando o nível de tensão é suficiente para a movimentação das discordâncias e, conseqüentemente, desvio da proporcionalidade. Na deformação plástica sob tensão, as discordâncias são multiplicadas, sendo necessárias tensões maiores para movimentação destas pelos planos de escorregamento (KRAUSS, 2005). Alguns parâmetros afetam a deformação plástica, como orientação e tamanho dos grãos, velocidade de deformação, temperatura de trabalho, grau de encruamento, condição de atrito, dentre outros. Segundo Silva (2011), o acréscimo na velocidade de deformação aumenta a tensão de escoamento. Como as

discordâncias se deslocam entre grãos, pode haver variação da tensão necessária para deformação para as diferentes orientações cristalográficas, pois existe a mudança de direção no plano de escorregamento de um grão para o outro (DENÚBILA, 2015).

2.1 Plasticidade dos metais

A teoria da plasticidade trata de cálculos de tensões e deformações em um corpo de material dúctil. Formulações matemáticas são concebidas com base na observação do comportamento de metais em estados uniformes de tensões combinadas (CHARABARTY, 2006). Após escoamento, o material deforma-se permanentemente devido à ação contínua de sollicitação externa e o regime plástico se inicia. A Equação 1 correlaciona as tensões principais (σ_1, σ_2 e σ_3) à de escoamento (σ_e) segundo Von Mises:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 < 2\sigma_e^2 \quad (1)$$

Na região plástica, o comportamento do metal é representado pela curva de fluxo, que correlaciona tensão e deformação em dada temperatura. A curva de fluxo é tecnicamente importante pois controla as propriedades macro do material, como resistência, ductilidade e fratura, parâmetros cruciais para adequação do material à determinado produto. (GUPTA; KUMAWAT, 2017) Pode ser obtida majoritariamente pelo ensaio de tração. O modelo sugerido por Krupkowski-Swift, como descrito na Equação 2, é amplamente usado como modelo constitutivo do encruamento de chapas metálicas no processo de estampagem. (GE; LI; LANG, 2015)

$$\sigma = K * (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (2)$$

Onde σ e ε são tensão e deformação verdadeiras, K é o coeficiente de resistência, n é o coeficiente (ou expoente) de encruamento e ε_0 é a deformação preexistente. Quando o histórico de deformações não é levado em considerações, a Equação 2 iguala-se à equação de Hollomon, como exibido na Equação 3.

$$\sigma = K * \varepsilon^n \quad (3)$$

A partir da curva que correlaciona força e deslocamento, a curva tensão e deformação verdadeiras pode ser obtida. Ao linearizar a região plástica, desde o escoamento até a tensão máxima verdadeira, pode-se obter K e n de acordo com a Equação 4:

$$\ln \sigma = n \ln \varepsilon + \ln K \quad (4)$$

Vale ressaltar que as curvas de fluxo citadas assumem um encruamento isotrópico, ou seja, durante o escoamento o encruamento acontece de forma homogênea (na conformação de aços à temperatura ambiente). Considerando que materiais anisotrópicos apresentam três planos ortogonais mutuamente simétricos que se encontram em três direções ortogonais (chamado plano axial de anisotropia), há variação de direção destes planos ao longo do material (BARLAT; LIAN, 1989). Por este motivo, fez-se necessário a generalização do critério de Von Mises para definir um critério de escoamento mais adequado para materiais anisotrópicos, proposta na teoria de Hill (HILL, 1947). O equacionamento proposto por ele pode ser escrito em função das tensões normais (σ_1, σ_2 e σ_3) e constantes da anisotropia no escoamento (F e G), como mostrado na Equação 5:

$$F (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 1 \quad (5)$$

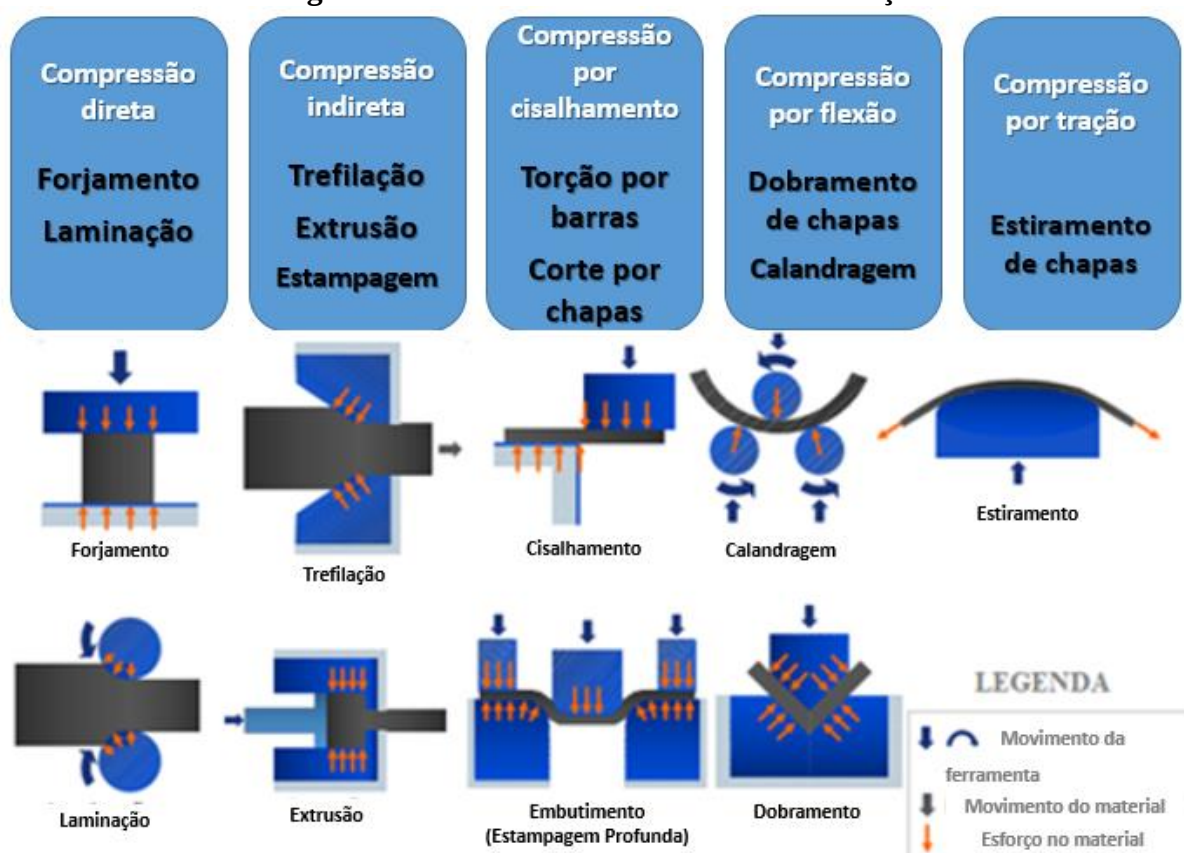
2.2 Conformação de metais

A transformação do corpo metálico pode ocorrer por processos mecânicos, em que há aplicação de esforços externos sem a transformação de fase do material, ou por processos metalúrgicos, em que há fusão (no caso da fundição por exemplo) ou difusão de partículas metálicas (como na sinterização), ocasionadas por tensões externas elevadas e/ou por altas temperaturas de trabalho.

Os processos mecânicos de fabricação podem ser realizados com e sem remoção de material. Aqueles sem remoção de metal são geralmente classificados como processos massivos e conformação de chapas, ambos caracterizados pela influência relevante do atrito no fluxo de material causado pelo contato entre ferramenta e metal em deformação (GROOVER, 2010). Nos processos de conformação de chapas, a chapa metálica é deformada tridimensionalmente por tensões externas, ou seja, há deformações tanto na espessura quanto na superfície da peça (NUNES *et al.*, 1998).

Os processos mecânicos de conformação são comumente classificados quanto ao tipo de tensão predominante ou quanto à temperatura de trabalho (FILHO *et al.*, 2011). Nos trabalhos a frio, há aumento de resistência mecânica devido à deformação plástica. A maioria dos processos de manufatura de chapas finas (de 0,20 a 3mm) são feitos a frio, como telhas, estrutura de geladeiras, portas de automóveis, dentre outros. Em termos do tipo de esforço predominante, os processos mecânicos de conformação se dividem em compressão direta e indireta, tração, cisalhamento e flexão, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Processos mecânicos de conformação



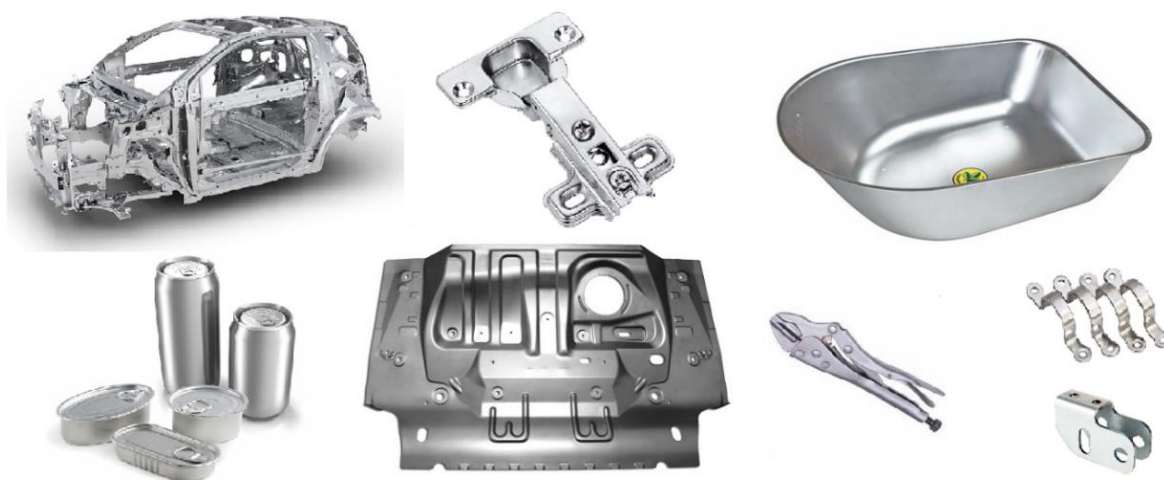
Fonte: Adaptado de Ita (2020).

Os processos de forjamento e laminação, por exemplo, são enquadrados no grupo de compressão direta. Já em outros processos em que a compressão da ferramenta sobre a peça contribui efetivamente para a deformação de interesse são classificados como de compressão indireta, como trefilação, extrusão e estampagem de chapas (FILHO *et al.*, 2011). A estampagem é um processo geralmente realizado a frio em prensas mecânicas ou hidráulicas e engloba principalmente as operações de corte, dobramento, estiramento e estampagem profunda (ou embutimento), em que há transformação da peça inicial em uma nova forma

geométrica (ALMEIDA, 1998). Essa peça inicial de formato pré-definido é chamada de *blanque* e sua geometria deve ser otimizada para garantir a execução da etapa por completo sem falhas do material e com menor geração de refugos possível.

Nas seções a seguir, os processos de estampagem a frio são apresentados. Alguns produtos obtidos por estes processos são embalagens, componentes eletroeletrônicos, dentre outras, comumente consumidos pelos setores automotivo, de linha branca, construção civil e uso geral, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Peças obtidas por estampagem a frio



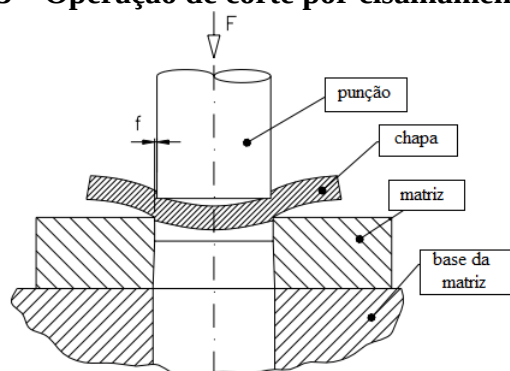
Fonte: Camanzi (2020); FGV TN Brasil (2020); Carrefour (2020); ABAL (2020); Tramontina (2020).

A propriedade relacionada à resposta do material durante a ocorrência do processo de conformação de chapas é chamada de *estampabilidade* (ou *conformabilidade*) e alguns ensaios mecânicos são usados para sua determinação. As condições limítrofes do processo também são estudadas para melhor controle de variáveis e auxílio tanto na previsibilidade de falhas quanto na qualidade final da peça.

2.2.1 Corte por cisalhamento

A operação unitária de corte por cisalhamento de chapas, normalmente usada neste âmbito para preparação de *blanques*, utiliza o cisalhamento como meio de ruptura localizada do material. Neste caso, a chapa é colocada entre a parte fêmea da matriz e a faca de corte (punção), respeitando a folga mínima necessária entre elas, que varia com a espessura e tipo do metal como visto na Figura 3.

Figura 3 – Operação de corte por cisalhamento



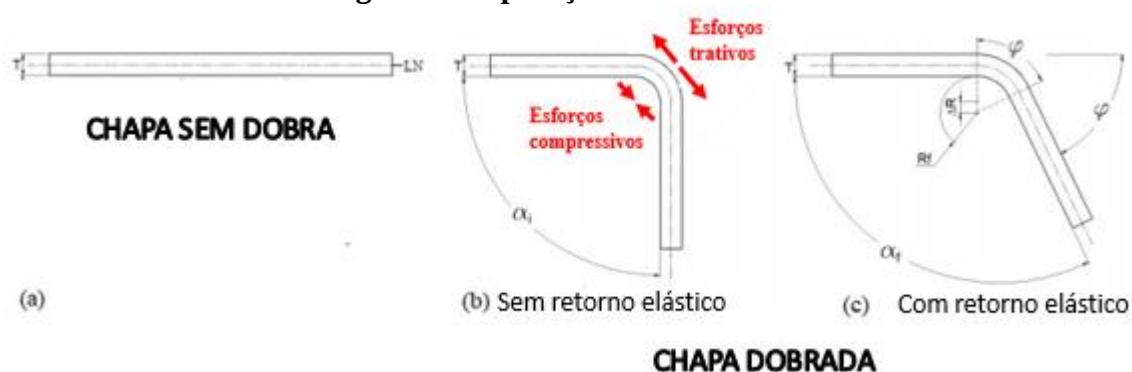
Fonte: SOUZA (2001).

A folga recomendada para cisalhamento de aço baixo carbono é de 3 a 5% da espessura da chapa.(SCHAEFFER, 2004). O ajuste da folga para corte é de extrema importância, pois, se for grande, há tendência de formação de rebarbas ou de dobramento da chapa para dentro deste vazio e, se muito pequena, corre-se o risco de quebra do ferramental (SOUZA, 2001). Para aços não ligados com baixo teor de carbono, a tensão de cisalhamento vale aproximadamente 40 kgf/mm^2 (SCHAEFFER, 2004). Mori (2020) verificou que quanto menor a razão de folga (razão da folga entre o punção e a matriz e a espessura da chapa), maior a qualidade superficial da peça.

2.2.2 Dobramento

A operação de dobramento de chapas consiste na transformação de segmentos retos em curvos e pode ser feita com auxílio de ferramentas em prensas ou por meio da utilização de rolos, como no caso de calandras. De acordo com Filho *et al.* (2011), uma chapa ao ser dobrada tem comportamento elasto-plástico e sua deformação caracteriza-se por ser não homogênea e dependente da posição em relação à linha neutra (LN), representada na Figura 4 pela linha tracejada imaginária que divide ao meio a espessura (t) da chapa. Conforme o ângulo de dobramento (α) diminui, as tensões trativas acima da linha neutra aumentam, fazendo com que esta se desloque para a região compressiva. Segundo Tharret, Stoughton (2003), as fibras da parte côncava da chapa espessam devido às sollicitações compressivas, enquanto as fibras do lado convexo afinam, pela tração local.

Figura 4 – Operação de dobramento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.2.3 Estiramento

O estiramento consiste na tração de uma chapa, travada em suas extremidades durante o movimento de descida de um punção, provocando afinamento na região de contato com a ferramenta. Neste caso, ocorre tração biaxial e a razão entre menor e maior tensão varia entre 0,5 e 1,0, ou seja, $0,5 < \sigma_3/\sigma_1 < 1,0$ (HOSFORD; CADELL, 2011). O estiramento pode ser o único processo de fabricação de uma peça, mas normalmente ocorre em conjunto com demais processos, como o embutimento. Um exemplo de estiramento puro seria a fabricação de próteses em aço inox por estampagem incremental.

2.2.4 Embutimento

Nesta seção os fundamentos e as características do processo conhecido como embutimento são apresentados.

2.2.4.1 Fundamentos

O processo de estampagem profunda ou embutimento consiste na conformação de uma chapa em uma peça por meio de um ou mais estágios, cuja razão σ_3/σ_1 está entre -1,0 e 0,4. Neste caso, o blank posicionado sobre a fêmea da matriz é levado para dentro da cavidade por um punção, sendo suas extremidades travadas por um prensa-chapas, mas não a ponto de impedir o fluxo de material (FILHO *et al.*, 2011). Prensas hidráulicas são mais utilizadas para melhor controle da velocidade de deformação, podendo ser simples ou de duplo/triplo efeito.

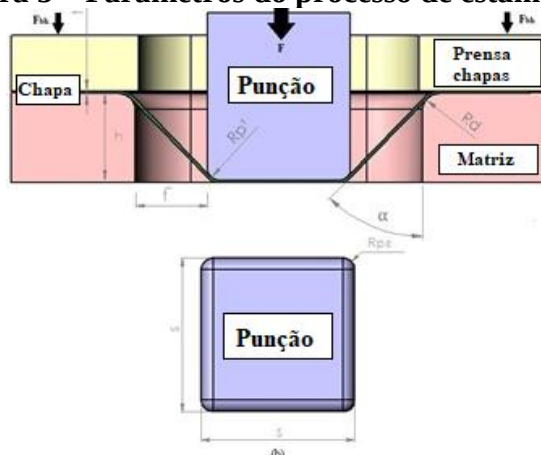
As prensas hidráulicas de duplo efeito são vantajosas pois permitem com que a chapa seja conformada pelo acionamento do cilindro primário ao mesmo tempo em que seus flanges são pressionados pelo prensa-chapas, através do acionamento do cilindro secundário. A deformação total da peça e/ou força de embutimento total pode variar dependendo do par tribológico em questão, sendo importante o controle do coeficiente de atrito (μ). O formato do blank varia conforme a geometria da peça final e sua máxima deformação é definida pelo material escolhido e também por outras variáveis de processo.

2.2.4.2 Características do processo

No processo de embutimento, peças de diferentes geometrias podem ser obtidas. Durante a formação da peça, diversas variáveis contribuem para fabricação conforme projeto. Aqueles relacionados ao material englobam a composição química, história de deformação, coeficiente de encruamento (n), coeficiente de anisotropia (R), espessura (t), tamanho de grão e inclusões metálicas. Outras variáveis estão relacionadas ao processo, como raios inferior e lateral do punção (R_{p1} e R_{p2} , respectivamente), raio da matriz (R_d), forças de embutimento (F) e do prensa-chapas (F_{bh}), ângulo de embutimento (α), folga entre punção e matriz (f), profundidade de embutimento (h) e velocidade da prensa (v). A Figura 5 exibe alguns destes parâmetros de processo na estampagem de uma chapa de aço com espessura t por meio de um punção quadrado.

Durante a formação do copo, o metal é empurrado contra o raio de curvatura da matriz, ocorrendo o dobramento da chapa. Quando o material avança para o interior da cavidade a chapa é desdobrada, o que permite que haja um estiramento da espessura da peça produzida.

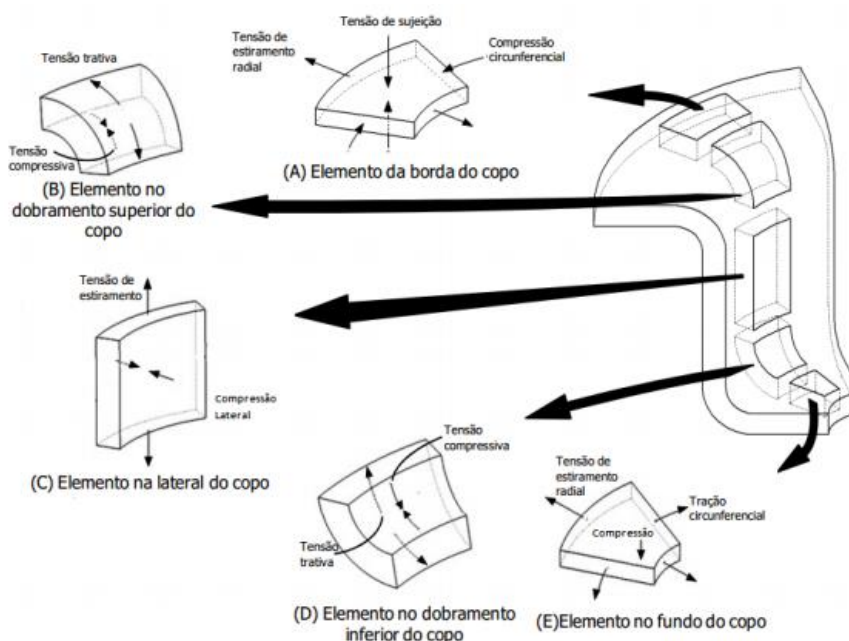
Figura 5 – Parâmetros do processo de estampagem



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na região da base do punção, o material é deformado por tração no sentido radial, fazendo com que tensões de compressão ocorram no sentido circunferencial. Para ilustração do modo de deformação plástica da chapa durante o embutimento, a Figura 6 mostra um elemento de um copo analisado em função das tensões principais superficiais.

Figura 6- Tensões principais aplicadas na superfície de um elemento de chapa no embutimento



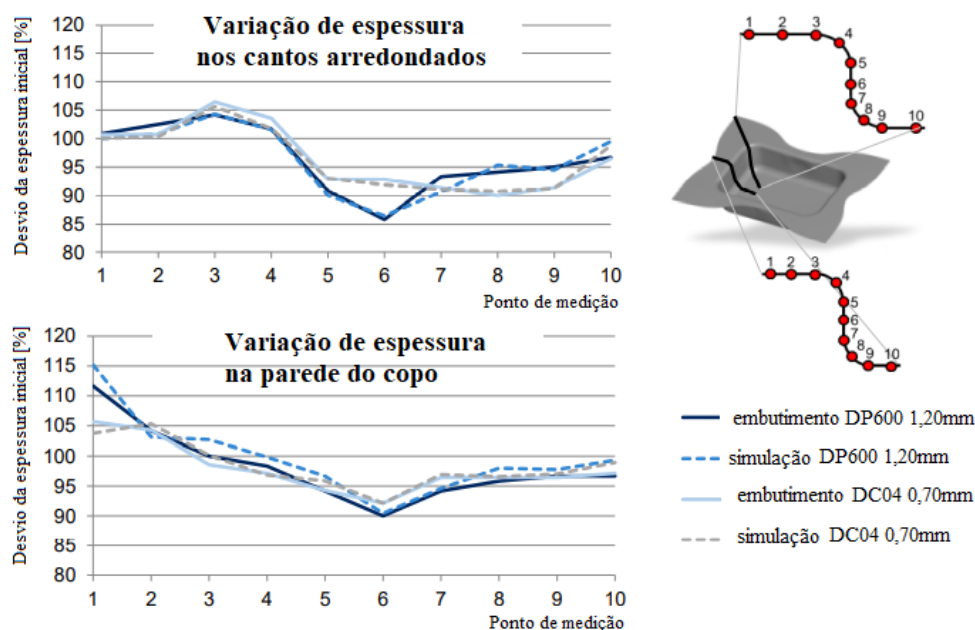
Fonte: Adaptado de FOLLE (2008).

No raio da matriz, a face inferior da chapa (em contato com a matriz) sofre um esforço de compressão, enquanto a face superior (em contato com o prensa chapas) sofre esforço de tração (SCHAEFFER; NUNES; BRITO, 2017). Na região das abas da peça, a tensão normal é bem menor em módulo que as tensões no plano da chapa, propiciando o aumento de espessura. No fundo do copo, a tendência é que a espessura inicial seja mantida.

Devido à solicitações excessivas, o estiramento localizado acontece em algumas regiões de embutimento, principalmente na obtenção de peças profundas, podendo levar ao afinamento e à ruptura precoce, principalmente na parte inferior do copo próxima ao raio do punção (FILHO *et al.*, 2011). Algumas destas situações são: dimensão inicial do blanque maior que o necessário, pressão do prensa chapas excessiva, raio de curvatura da matriz maior que o ideal e geometria da peça final irregular (REIS, 2002).

Jin, Li e Bao (2017) avaliaram a distribuição de espessura ao longo da seção transversal de copos retangulares de aço inoxidável AISI 304 embutidos pelo processo que utiliza fluido magneto-reológico. Devido à resistência ao atrito na flange, houve dificuldade de fluxo para dentro da cavidade, elevando a espessura nessa região. Notou-se ocorrência de simples dobramento nas paredes e deformação análoga à copos cilíndricos nos cantos arredondados. A redução de espessura majoritária ocorreu no raio do punção e atingiu quase 30%. Singer e Liewald (2016) investigaram a variação de espessuras iniciais diferentes dos aços DC04 e DP600 ao longo dos cantos arredondados e das paredes no embutimento de copos quadrados. O Gráfico 1 mostra que o percentual de afinamento dos pontos 7, 8 e 9 é menor no aço DP600 em comparação ao DC04, devido à maior resistência do material e também maior espessura inicial. Além disso, a simulação LS-Dyna usada se mostrou coerente nas duas situações.

Gráfico 1 - Estudo da variação de espessura nos cantos e parede de copos quadrados



Fonte: Adaptado de Singer e Liewald (2016)

Segundo Karndan *et al.*, (2017), as condições de processo na região de contato entre a chapa e o prensa chapas, como raio de curvatura e rugosidade superficial, são as variáveis mais influentes na distribuição da espessura. Nesta análise de conformação de copos cilíndricos de aço AISI 1006 nas espessuras 0,60, 1,00 e 1,50mm, os autores observaram que a distribuição de espessura da peça final é proporcional à espessura inicial do blanque. Além disso, há uniformidade da espessura nas peças conformadas com o aumento da força do prensa chapas.

A força de embutimento necessária para atingir a profundidade desejada não pode exceder a limite de resistência à tração da parede do copo e precisa ter magnitude suficiente para vencer o atrito, dobrar e desdobrar a chapa e puxar a flange para o interior da matriz.

Provenza (1976) propôs uma equação (Equação 6) obtida experimentalmente para obtenção da força de embutimento, utilizando a tensão limite de resistência à tração (σ_{LRT}) ajustada por um fator de correção tabelado (Y) que varia com o LDR (“limit drawing ratio” ou limite de embutibilidade) em questão. Para peças redondas, o LDR é calculado pela razão entre diâmetros inicial e final. Porém, para estampagem de peças com geometrias não circulares, regiões do blanque são submetidas à diferentes modos de deformação. Neste caso, para análise qualitativa da viabilidade do embutimento, o LDR costuma ser substituído pela razão entre os desenvolvimentos das diagonais do blanque e da peça final ou mesmo pela razão entre os comprimentos das linhas neutras do blanque e da peça conformada. Além disso, é comum usar um fator de segurança (até 20%) para que interferências (oxidação superficial do blanque por exemplo) não impeçam o processo de ocorrer.

$$F = \sigma_{LRT} * Y * \pi * Dp * t \quad (6)$$

Tabela 1 – Valores de Y conforme LDR (d/D)

Y	1,0	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
$LDR = \frac{d}{D}$	0,5	0,575	0,600	0,625	0,650	0,675	0,700	0,725	0,750	0,775	0,800
50											

Fonte: Provenza (1976).

O embutimento profundo, de um modo geral, abrange elevados valores absolutos de LDR à medida que as deformações aumentam. Neste caso, considerando o volume constante, a deformação na direção da espessura (ε_3) compensa as demais (ε_2 e ε_1), cujos valores em módulo aumentam com o afinamento da espessura (MAÊDA, 2009).

Para suportar as tensões compressivas da flange sem travamento localizado, o controle da força do prensa chapas (F_{bh}) é primordial e necessita de um valor mínimo para evitar rugas e permitir o fluxo de material para dentro da matriz. Segundo Feng *et al.*(2019), essa força é constante e obtida geralmente pelo método experimental de erros e acertos. Uma das equações de determinação da força do prensa chapas inclui as variáveis tensão radial (σ_r), diâmetro do punção (Dp), espessura (t) e coeficiente de atrito (μ) (Equação 7).

$$Fbh = \frac{\sigma r * Dp * \pi * t}{2\mu} \quad (7)$$

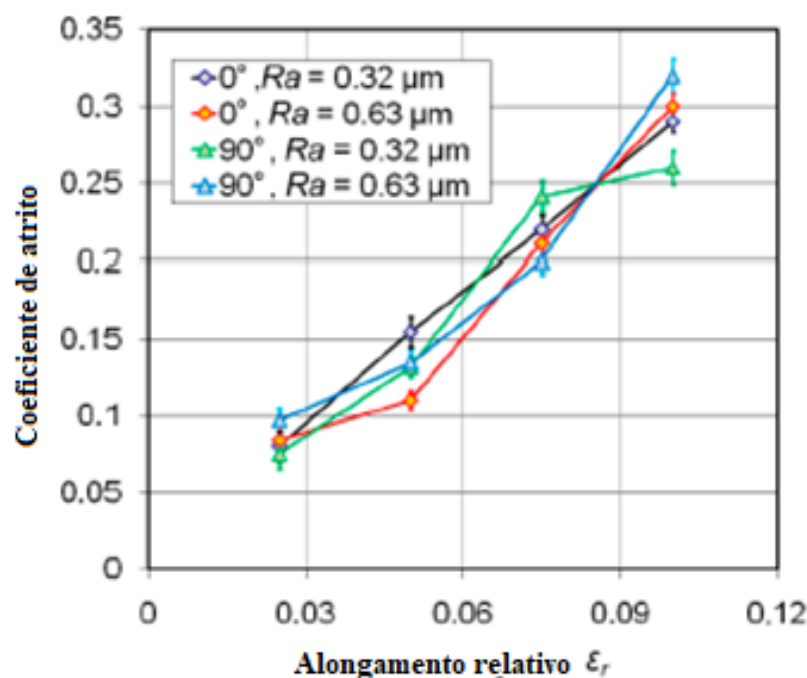
Aleksandrović; Stefanović, (2005) verificaram que a influência da força do prensa chapas na força total de embutimento representou menos de 10% na conformação de aço carbono revestido com camada de zinco em condições de atrito diferentes. Alguns estudiosos propuseram a variação da força do prensa chapas durante o processo de embutimento (FENG *et al.*, 2019). Mesmo com o ganho nítido em produtividade neste caso, esta condição se torna inviável para algumas aplicações devido aos elevados investimentos em maquinários com tecnologia especializada.

O perfil do punção influencia pouco na carga de embutimento, porém raios excessivamente pequenos aumentam a deformação localizada e podem gerar trincas. O mesmo ocorre quando pequenos raios da matriz são usados, pois, devido às severas tensões na região de dobramento, há maior redução de espessura da peça e o material pode ser levado à ruptura, além de ser necessária elevada força de estampagem. Ao contrário, grandes raios do punção (em torno de 50 vezes a espessura) ou grandes raios da matriz induzem a formação de rugas por falta de apoio entre chapa/ferramenta durante a descida. O raio da matriz e o do punção variam com a espessura e geometria iniciais do blank (KONINCK; GUTTER, 1980).

O coeficiente de atrito influencia no fluxo metálico em três principais superfícies de contato durante o processo: chapa metálica/prensa-chapas, chapa metálica/matriz e chapa metálica/punção. Para o aumento da estampabilidade, é esperada elevada fricção entre o blank/punção e baixo contato entre blank/prensa-chapas e blank/matriz (LIN *et al.*, 2015). Para diminuir a restrição do movimento causada pela grande área de contato entre chapa metálica/prensa-chapas, otimizações geométricas em blanks retangulares são requeridas.

Trzepieciński (2019) observou que o coeficiente de atrito no embutimento de chapas aumenta à medida que a deformação plástica acontece e é influenciado pela rugosidade superficial (Ra) e sentido de orientação dos grãos da peça. O Gráfico 2 mostra que o aço DDQ (Deep Drawing Quality) com 1,00 de espessura, rugosidade Ra=0,63 e orientação 90° quando submetido ao teste BUT (Bending Under Tension) a seco, apresenta coeficiente de atrito entre 0,1 e 0,325.

Gráfico 2 - Relação entre alongamento relativo e coeficiente de atrito

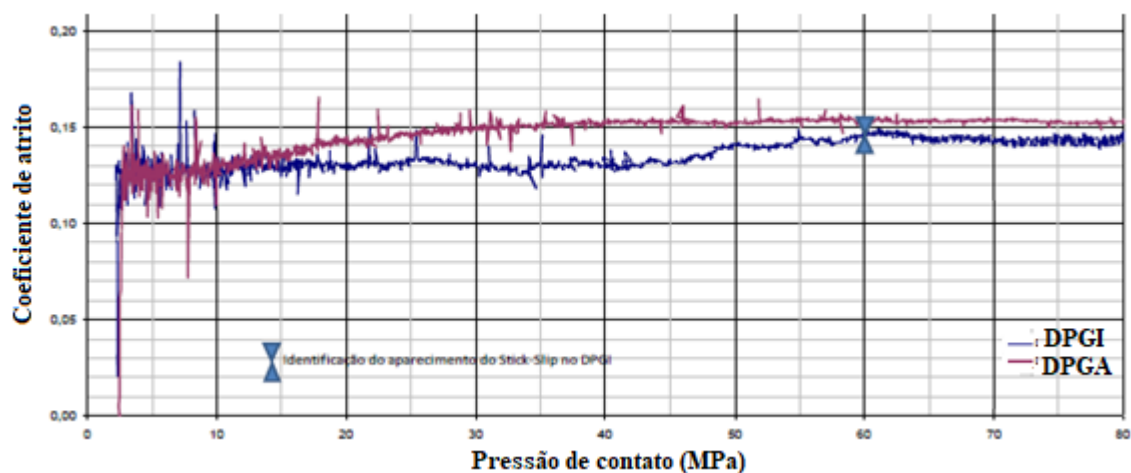


Fonte: (TRZEPIECINSKI, 2019)

Durante o deslizamento da chapa sobre a matriz, por diferença de dureza entre materiais, pode haver desgaste, mesmo que sem tensões, da ferramenta e/ou ranhuras na peça. Um estudo destinado a evitar engripamento entre a chapa metálica e a superfície da matriz na escala macro, verificou que a profundidade de desgaste no aço ferramenta varia com a pressão crítica de contato (DONG *et al.*, 2016). Quando a força crítica de contato é ultrapassada, duas situações podem acontecer: o fenômeno de desgaste por abrasão, que é remoção do metal da chapa para a ferramenta (HUTCHINGS, 1992). Para evitar danos às ferramentas de embutimento, aços mais resistentes do que aqueles a serem conformados são usados como material base. Outra possibilidade é realizar tratamento térmico nas superfícies (têmpera e cementação) ou optar pelo uso de revestimentos (cromo duro, TiNAl e zinco) para prolongamento da vida útil.

Silveira; Oliveira; Silva, (2015) avaliaram o efeito da galvanização por imersão a quente GI-50 a 60 g/m² no coeficiente de atrito em um aço bifásico de baixo carbono e espessura 1,5mm. Ele identificou um revestimento de rugosidade média (Ra) igual a 0,92 e dureza igual a 85HV, aproximadamente. Conforme o Gráfico 3, o coeficiente de atrito para o aço com revestimento de zinco duro (DPGI) em pressões de contato menores que 10 MPa ficou entre 0,13 e 0,10. Já em pressões acima de 45 MPa observou-se o fenômeno “stick-slip”, desgaste por abrasão que acontece devido à maciez do revestimento em relação à ferramenta de estampagem.

Gráfico 3 - Análise da pressão de contato e do coeficiente de atrito em aços galvanizados (DPGI e DPGA)

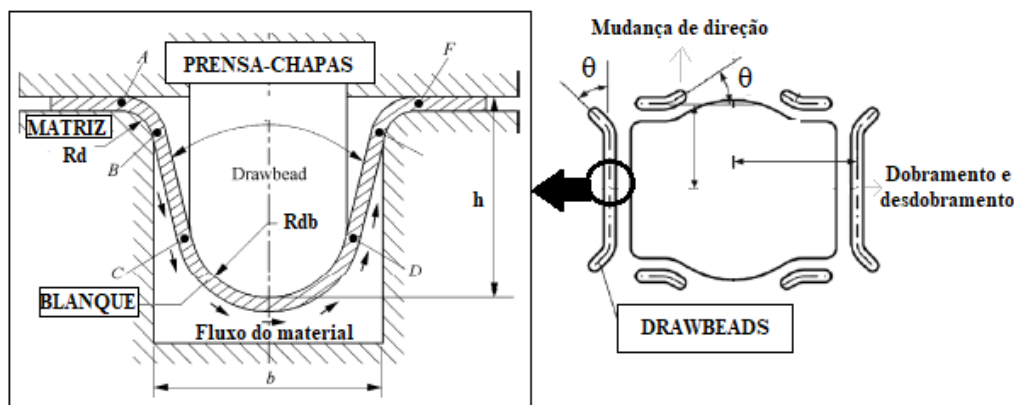


Fonte: Silveira; Oliveira; Silva, (2015)

A dimensão do blanque tem influência direta na qualidade da peça final. Por isso, faz-se necessária a determinação do blanque ótimo para que perdas sejam minimizadas (KITAYAMA; YAMADA, 2016). Atualmente alguns softwares são usados para otimização do formato inicial das chapas em escala industrial, como ANSYS and NUMISHEET. Yang; LI; Fan (2014) estudaram uma eficiente metodologia de design baseada em semelhança geométrica, cuja simulação por elementos finitos requer uma série de iterações. Este estudo foi validado experimentalmente em embutimentos trapezoidais e quadrados que comprovou a eficiência da previsão computacional, em que o blanque ótimo foi obtido após quatro ou cinco iterações. Aljabiri (2018), observou na produção de copos triangulares a variação da força de embutimento e da distribuição da espessura e de deformação com a alteração de dimensão do blanque.

A estampagem profunda de peças com geometrias assimétricas exige ajustes dos parâmetros para controle do fluxo do material, uma vez que a chapa tende a deformar mais em determinadas regiões da peça. Um artefato muito usado é o “drawbeads”, um ajuste no ferramental para controle principalmente de rugas na peça final. Bao *et al.* (2013). Ele consiste em um rebaixo na parte fêmea da matriz com um punção no formato negativo preso ao prensa chapas, como ilustrado na Figura 7. Estes são colocados em regiões estratégicas e sua geometria pode variar de acordo com a qualidade final almejada, para que localmente as chapas dobrem e desdobrem ou até mudem a direção do fluxo.

Figura 7 - Detalhamento de "Drawbeads" em formato circular

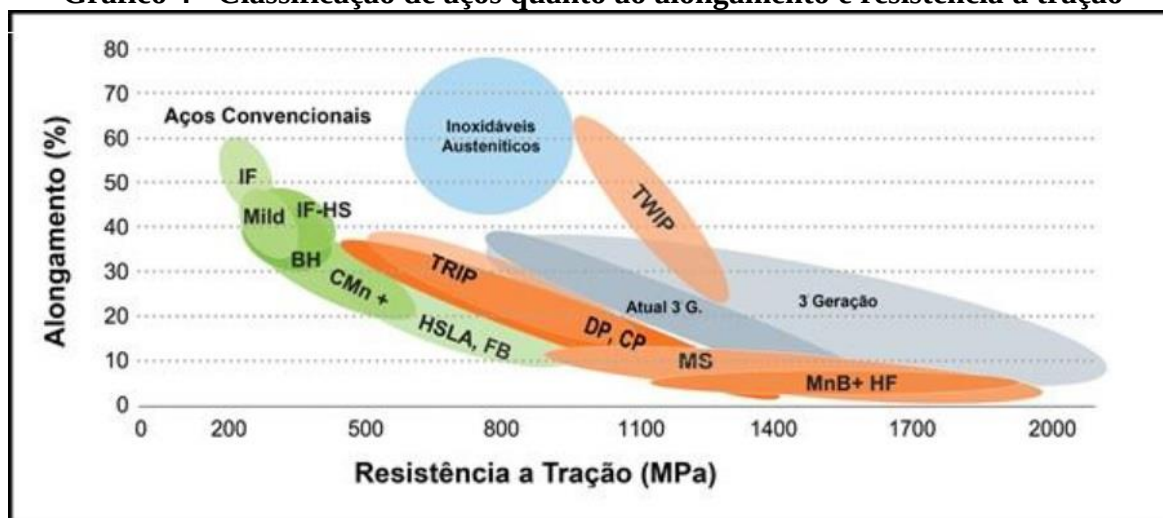


Fonte: Adaptado de (BAO *et al.*, 2013).

2.2.5 Aços para estampagem profunda

O processo de fabricação depende de um profundo conhecimento da qualidade de sua matéria prima, visto que é a primeira condição de otimização para os processos. Aços laminados planos, principalmente laminados a frio com baixo teor de carbono, são majoritariamente destinados à conformação de chapas, consumidas pelas indústrias automobilísticas, de eletrodomésticos e aeronáuticas (SILVA, 2013). Do ponto de vista de conformabilidade, esta classe de aço é considerada excelente devido ao seu teor de carbono, possuindo baixa razão entre limite de escoamento e limite de resistência e alto coeficiente de encruamento. A associação entre composição química e histórico termomecânico adequado permite a produção de diferentes qualidades de aço, que podem ser escolhidos conforme aplicação final a partir da combinação entre alongamento e resistência mecânica, como mostrado no Gráfico 4. A Figura 8 mostra os diversos aços usados em processos de estampagem profunda, como “bake hardening”, isotrópicos, “dual phase” (DP) e TRIP, e suas principais utilidades.

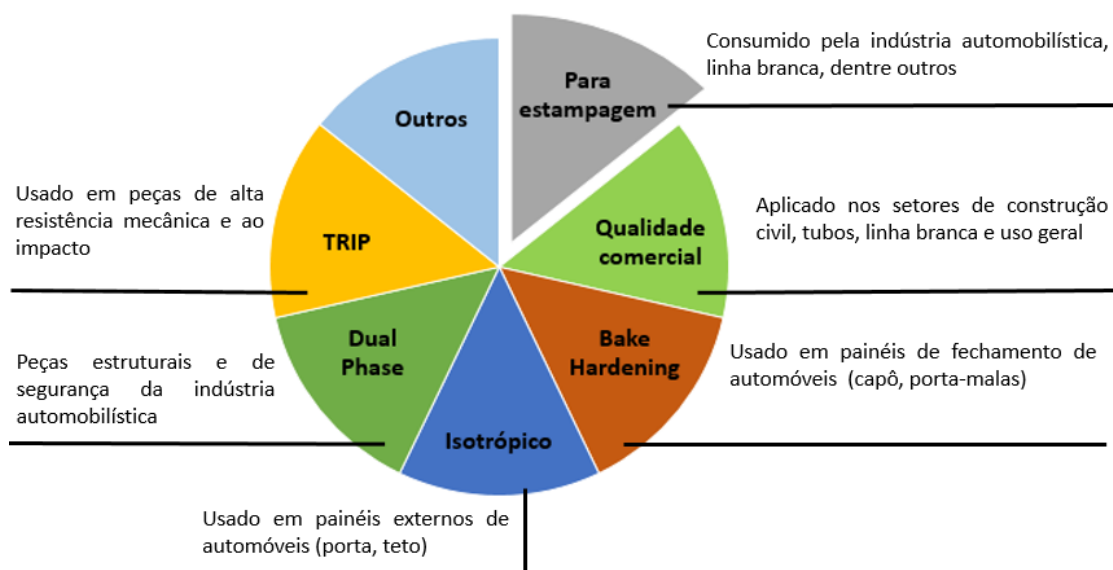
Gráfico 4 - Classificação de aços quanto ao alongamento e resistência à tração



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2013).

As propriedades mecânicas gerais requeridas nos aços para estampagem são elevado alongamento e baixo limite de escoamento, com limite de resistência adequado para aplicação da peça final. Em geral, além do baixo teor de carbono, há adição de elementos microligantes para melhor estampabilidade. Isto ocorre para dificultar o movimento de discordâncias e para evitar a presença de do C e N como intersticiais e, com isso, não formar patamar de escoamento na tração (GUIDA, 2006).

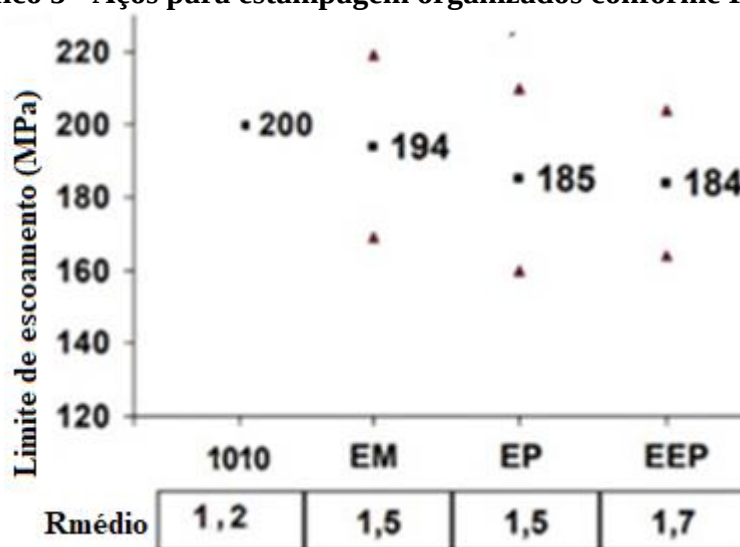
Figura 8 - Chapas laminadas a frio USIMINAS



Fonte: Adaptado do Catálogo da Usiminas (2020).

Dentre os aços com qualidade comercial, os obtidos conforme norma SAEJ403-2014 (graus 1006, 1008 e 1010) são usados em processos de dobramento nas indústrias automobilística, linha branca, tubos e eventualmente usados na estampagem de peças não profundas de geometrias simples. A norma ABNT NBR 5915-2002 inclui os grupos de aços para estampagem média (EM), estampagem profunda (EP) e estampagem profunda (EEP, graus 1,2 e 3) (ANDRADE, 2019). O Gráfico 5 relaciona estes aços com o aço 1010 de acordo com o coeficiente de anisotropia (R) e limite de escoamento (CASTRO, 2014).

Gráfico 5 - Aços para estampagem organizados conforme R e LE



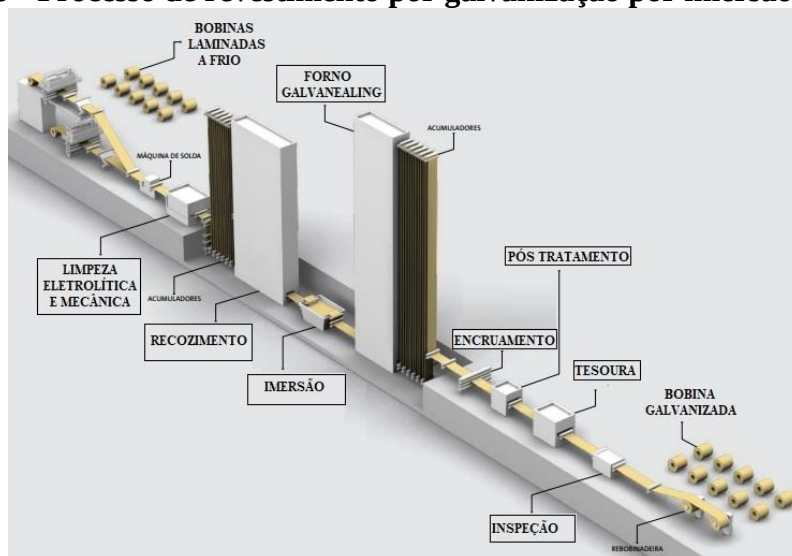
Fonte: Adaptado de Marcondes (2019).

2.2.6 Aços galvanizados por imersão a quente

Os aços laminados a frio para estampagem também podem ser fabricados com revestimento, em que as chapas são eletrogalvanizadas ou galvanizadas por imersão a quente, apresentando o diferencial de melhor resistência à corrosão atmosférica. Pelas excelentes características superficiais, são utilizados em vários segmentos industriais, principalmente pelo automotivo. Além da proteção contra corrosão, a galvanização reduz o coeficiente de atrito, o que é de extrema importância por exemplo no aumento da vida útil de ferramentas durante o embutimento, pois reduz o desgaste (TALEB, 2019).

O processo consiste na preparação de bobinas laminadas a frio (desbobinamento, limpeza e recozimento), imersão em um banho de zinco fundido (445 a 465°C), passagem pelo forno “galvanealing”, resfriamento e acabamento, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Processo de revestimento por galvanização por imersão a quente



Fonte: Adaptado do catálogo da Usiminas (2020).

Na etapa de imersão, ocorre a deposição eletrolítica por difusão atômica de uma camada de material mais nobre (anodo) do que o material base (catodo). A espessura desta camada varia de acordo com a composição química do aço e velocidade do processo (GUIMARÃES, 2012). O alumínio é comumente adicionado ao banho para melhorar a adesão da camada intermetálica. O revestimento pode ser de zinco puro (GI) ou ligas de zinco-ferro (GA) e é feito na linha de fabricação das chapas, que pode ser visto de forma geral na Figura 9. Pode ser fornecido de 80 a 600g/m² (GI) ou de 60 a 140g/m² (GA), sendo a camada de massa metálica superficial dada pelo somatório das duas faces da chapa (JUNIOR; BIEHL; HACKENHAAR, 2014). Segundo Silveira; Oliveira; Silva, (2015), a espessura de revestimentos de Zn-Puro (GI) geralmente fornecidos à indústria automotiva estão entre 11,2 e 19µm (80 e 140 g/m², respectivamente). A Tabela 2 exhibe a composição química e propriedades mecânicas, como limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (σ_{LRT}), coeficiente de anisotropia (R), coeficiente de encruamento (n), alongamento e da dureza do aço 1010 sem tratamento superficial (norma SAEJ403) e galvanizado por imersão a quente com revestimento GI (NORMA 7008-ZC).

Os valores de composição química estão dados em teores máximos, e as propriedades mecânicas dadas apenas do aço sem revestimento, considerando as tensões em MPa, o alongamento em percentual mínimo e a dureza em HRB.

Tabela 2 – Aços para estampagem conforme norma USIMINAS e aço 1010

NORMA	GRAU	Composição Química				Propriedades Mecânicas				
		C	Mn	Al	P	σ_e	σ_{LRT}	A%	R	n
SAEJ403	1010	0,10	0,50	0,020	0,020	240	-	40	2,1	0,27
NBR 7008 (GI)	ZC	0,15	0,60	-	0,040	-	-	-	-	-

Fonte: Catálogo Usiminas (2020).

As propriedades mecânicas, no entanto, podem sofrer alterações ao longo do tempo em função de fenômenos metalúrgicos como o envelhecimento, que é termicamente ativado e pode ser classificado como natural ou artificial (REED-HILL, 1982). As principais características do envelhecimento por deformação são o reaparecimento do limite de escoamento em nível superior, aumento do limite de resistência e redução da ductilidade. Estes fenômenos acontecem devido à difusão e ancoragem das discordâncias pelos átomos em solução sólida intersticial. As discordâncias ancoradas pelas atmosferas de soluto adquirem alta mobilidade, promovendo o aumento da tensão e a presença das bandas de Luders (COTTRELL; BILBY, 1949).

2.3 Ensaios mecânicos para estampagem

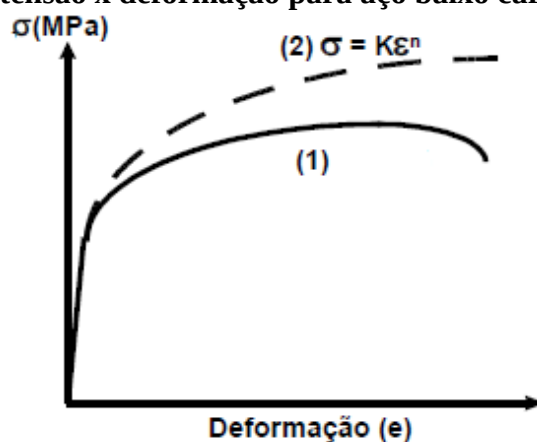
Os testes envolvidos para determinação da estampabilidade dos aços podem ser indiretos como o ensaio de tração e dureza, ligados às propriedades plásticas do material, ou diretos, como teste Erichsen, Olsen, Swift, Fukui, Nakazima e Marciniak, ligados ao comportamento em condições predeterminadas de trabalho conforme o tipo de deformação. Apesar dos ensaios indiretos não determinarem objetivamente a conformabilidade de metais, outras propriedades obtidas são usadas como bons parâmetros avaliadores da estampabilidade de chapas finas de aço. Os testes diretos determinam o comportamento do material em matriz padrão e em condições pré-determinadas de trabalho de acordo com a aplicação, dando ênfase ao embutimento ou ao estiramento conforme o tipo de deformação. Nesta seção alguns ensaios utilizados neste trabalho são discutidos.

2.3.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é o mais utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais e, a partir dele, são definidos o limite de resistência, o limite de escoamento, o grau de encruamento e também o índice de anisotropia (SCHAEFFER, 2004). O Gráfico 6 mostra a

representação das curvas convencional (1) e verdadeira (2), que foram obtidas do ensaio de tração de aço de baixo carbono laminado a frio e destinado a operações de estampagem (BITTENCOURT, 2014). Para obtenção do coeficiente de encruamento, os dados da tensão de escoamento e da deformação verdadeira são transferidos para um diagrama em escala logarítmica, sendo o valor de “n” dado pela inclinação da reta tangente à curva (SCHAEFFER, 2004). Outra opção para obtenção deste coeficiente é considera-lo igual à deformação real uniforme relativa ao valor de tensão real associado à carga máxima no ensaio.

Gráfico 6 - Curvas tensão x deformação para aço baixo carbono laminado a frio



Fonte: (BITTENCOURT, 2014) (1)convencional (2)verdadeira

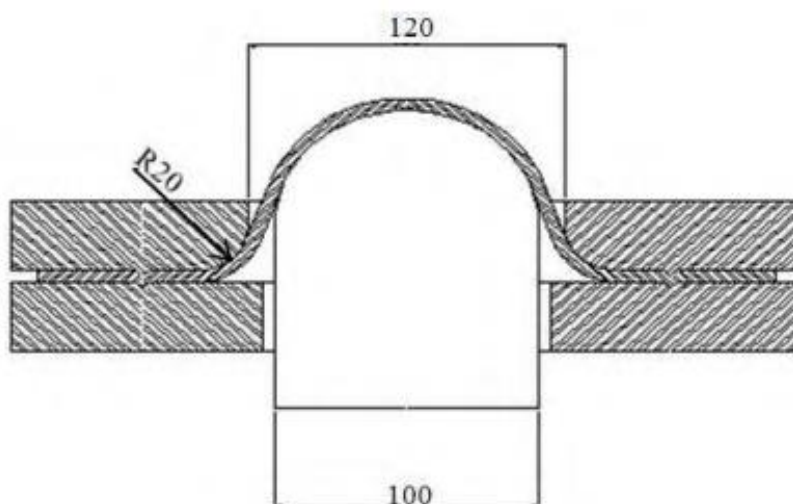
O índice de encruamento determina diretamente as características relacionadas à capacidade de encruar do material e significa distribuição mais uniforme em toda a peça (OTOMAR, 2010). Logo, elevados valores de “n” são desejados na conformação de chapas. Outro parâmetro ligado à embutibilidade do material que pode ser obtido pelo ensaio de tração é o coeficiente de anisotropia R de Lankford, que é o quociente entre as deformações na largura e na espessura. Usualmente este parâmetro é dado de acordo com o comportamento do material conforme direção de laminação (a 0°, 45° e 90°), expressado como valor médio (R_m) ou como coeficiente de anisotropia planar (ΔR), que serão discutidos em seções futuras deste trabalho (BITTENCOURT, 2014).

2.3.2 Ensaios Nakazima e Marciniak

A montagem dos dois testes é similar e consiste no travamento das abas e deformação do corpo de prova por um punção cilíndrico de diâmetro igual a 100mm com fundo hemisférico para o ensaio Nakazima (Figura 10) ou com fundo reto no caso do Marciniak (Figura 11). É

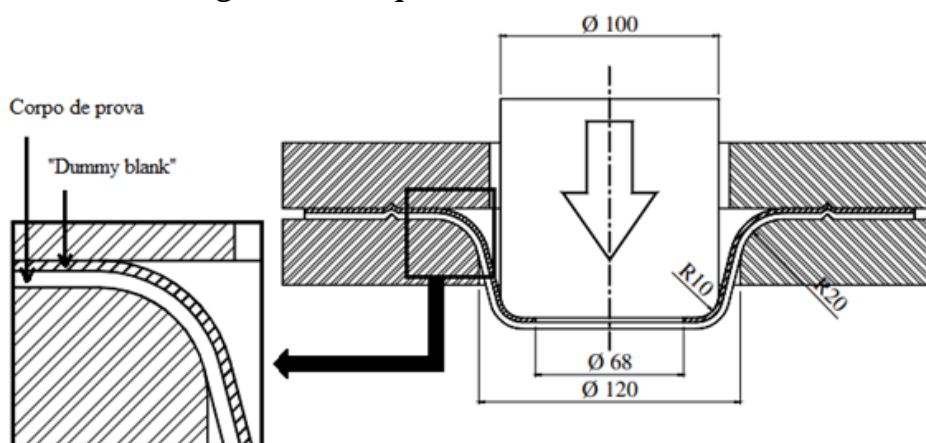
comum o auxílio de “draw beds”, um entalhe entre prensa chapas e matriz, para impedimento do fluxo de metal na região das flanges. O ensaio Marciniak difere do ensaio Nakazima principalmente na deformação do corpo de prova e de um “dummy blank”, chapa perfurada na parte central posicionada entre o punção e a corpo de prova, para impedir que ocorra contato direto entre eles.

Figura 10 - Esquema do ensaio Nakazima



Fonte: SANTOS (2007).

Figura 11 – Esquema do ensaio Marciniak

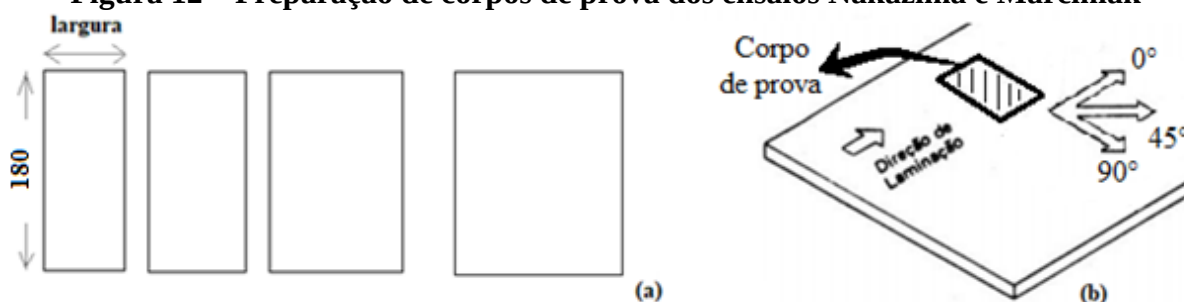


Fonte: (SANTOS et al., 2018).

Os corpos de prova usados são chapas retangulares de comprimento geralmente iguais a 180mm, espessura iguais e larguras variadas, sendo a mais estreita pelo menos 50% do diâmetro do punção. O corte dos corpos de prova (CP) é feito de acordo com a região de

interesse de estudo, de forma que a direção longitudinal do CP seja perpendicular à direção de laminação, análogo ao ensaio de tração. A Figura 12 ilustra a geometria e a posição de corte dos corpos de prova para os ensaios. A chapa é deformada até ocorrer a primeira trinca no corpo de prova, prevista para surgir próximo ao centro do punção. Antes do teste, a marcação de uma malha de círculos é feita sobre a superfície metálica para que, após o ensaio, as medições das deformações principais ε_1 e ε_2 sejam plotadas em um diagrama limite de conformação (maior deformação vs. menor). O ensaio Nakazima foi o escolhido neste trabalho.

Figura 12 – Preparação de corpos de prova dos ensaios Nakazima e Marciniak



Fonte: Adaptado de (OTOMAR, 2010) (a) Geometria dos CP's (b) Posição de corte dos CP's.

2.4 Curva limite de conformação (CLC)

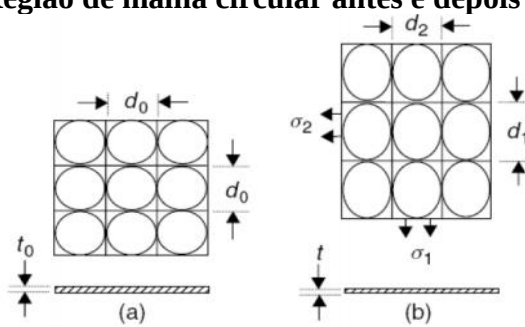
Segundo Martins *et al.* (2014), a previsão da ocorrência da falha em produtos estampados permite que peças manufaturadas, que já possuem certo valor agregado, não sejam refugadas ao final do processo pelo motivo de fratura indesejada. Os limites de conformação de chapas são dados majoritariamente pela estricção ao invés da fratura por ser uma situação que representa riscos à performance do produto final. Experimentos com diferentes carregamentos que geram deformações no plano viabilizam a obtenção de pares de deformação em que a estricção localizada ocorre e sua plotagem no espaço é chamada de Diagrama Limite de Conformação (DLC). A localização geral de pontos de fratura no DLC forma a curva limite de conformação (CLC), definida como a localização de deformações no plano em que mudanças bruscas na trajetória de carregamento acontecem. O DLC foi proposto originalmente por Keeler (1968) para o domínio tração-tração e estendida por Goodwin (1968) para o domínio tensão-compressão.

Nesta seção são estudados os critérios para determinação das falhas de embutimento e parâmetros que influenciam a curva CLC, como espessura de chapa, coeficiente de anisotropia, coeficiente de encruamento e taxa de deformação.

2.4.1 Marcação da malha

A técnica de marcação da malha se inicia com a marcação superficial das chapas a serem ensaiadas com espessura definida (t_0). Nelas, uma malha circular de diâmetro conhecido (d_0) é impressa geralmente por processo eletrolítico. A geometria da malha é modificada após conformação para elipses com diâmetros iguais a d_1 e d_2 . Uma região qualquer de uma chapa gradeada é ilustrada na Figura 13. De acordo com (FILHO *et al.*, 2011), quanto menor a dimensão dos círculos da grade impressa na superfície dos blanques, maior a precisão de determinação nas regiões críticas.

Figura 13 – Região de malha circular antes e depois da deformação



Fonte: MARCINIAK; DUNCAN; HU (2002).

Após a conformação de todos os corpos de prova, são estabelecidas, por análise visual, regiões com aparecimento de estricção localizada ou fratura. Nestas regiões de falha, círculos são selecionados para medição dos diâmetros d_1 e d_2 , que são na verdade as deformações de engenharia principais. Estas devem ser transformadas em deformações verdadeiras ε_1 e ε_2 (conforme Equação 12) para determinação do ponto cartesiano em que a fratura pode ocorrer (considerando o eixo vertical ε_1 e o eixo horizontal ε_2).

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (12)$$

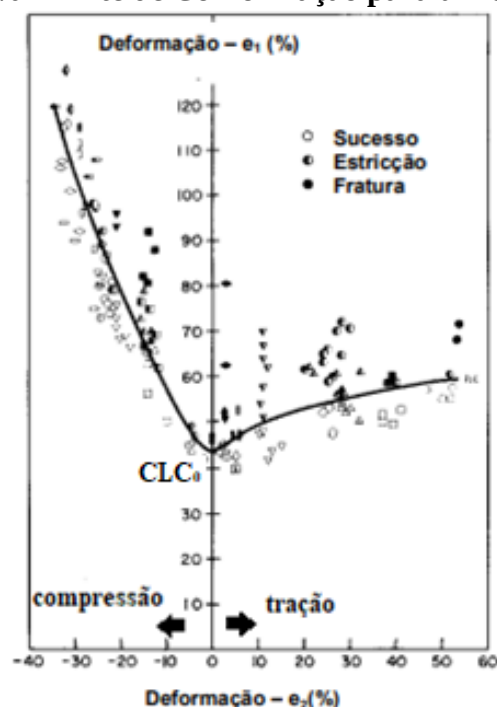
Sendo ε_1 e ε_2 as deformações principais no plano da chapa e ε_3 a deformação principal na direção de espessura, pode-se assumir no diagrama DLC $\varepsilon_3=0$, ou seja, um estado plano de deformações, pois esta dimensão é muito pequena em comparação com as outras duas devido à pressão de contato entre o ferramental e a chapa ser bem menor que o limite de escoamento do material. (MARCINIAK; DUNCAN; HU, 2002).

As deformações podem ser escritas também em função da razão de embutimento (β), razão entre as deformações verdadeiras ε_2 e ε_1 , conforme Equação 8:

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1 ; \varepsilon_3 = -(1 + \beta) \varepsilon_1 \quad (8)$$

A curva CLC obtida empiricamente descreve o lugar geométrico das deformações principais e críticas (estricção localizada visível ou fratura) que ocorrem na superfície da chapa, como mostrado no Gráfico 7. Ela pode ser dividida em dois quadrantes: um positivo, em que as tensões para ε_1 e ε_2 são trativas (tração-tração), e outro negativo, com tensões compressivas para ε_2 (tração-compressão).

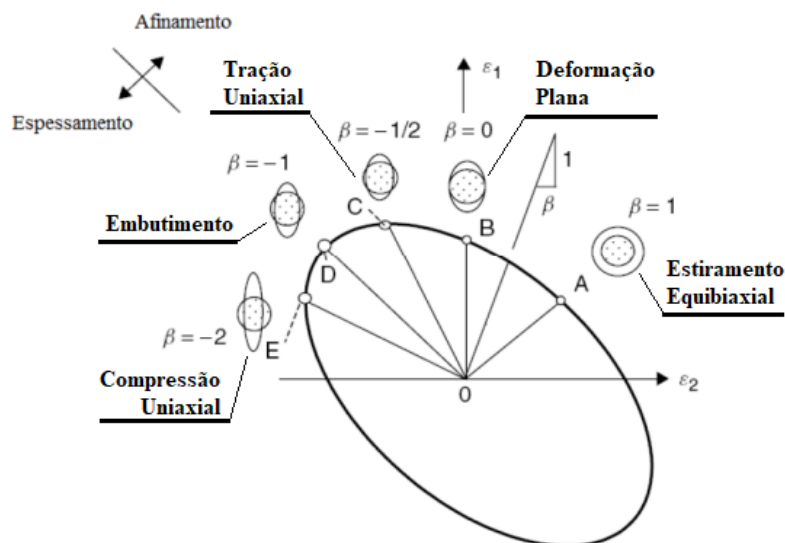
Gráfico 7 - Curva Limite de Conformação para um aço baixo carbono



Fonte: Adaptado de HOSFORD; CADELL (2011).

Considerando várias combinações de ε_1 e ε_2 , ou seja, um elemento de chapa deformado sobre diversos caminhos de deformação, a trajetória de deformação acontece no formato de uma elipse (contorno de igual deformação efetiva). A Figura 14 ilustra as deformações principais correspondentes às diferentes razões de embutimento (β).

Figura 14 – Deformações principais correspondentes à diferentes razões de embutimento



Fonte: Adaptado de MARCINIAK; DUNCAN; HU (2002).

O formato da grade de círculos após a deformação indica o modo de deformação da região em análise. A expansão da grade com permanência de geometria circular, ocorre o estiramento equibiaxial, em que as tensões e deformações no plano da chapa são iguais. Neste caso, a espessura reduz bruscamente devido à deformação homogênea em todas as direções, tornando a estricção mais difusa. Na deformação plana, apenas uma das direções tem a geometria do círculo alterado para elipse, situação que deixa a chapa mais suscetível à fraturas devido ao aparecimento de estricções localizadas. O modo de deformação chamado de tração uniaxial é semelhante ao que acontece no ensaio de tração, em que há estiramento na direção principal 1 e contração tanto na direção principal 2 quanto na espessura. Neste caso, a grade inicial se modifica por completo. Na situação em que a deformação ϵ_3 não é alterada (embutimento), o círculo na direção principal 1 é esticado. Por este motivo, é considerado o modo de deformação ideal e ocorre, por exemplo, na flange de peças embutidas profundamente ao ser puxada para dentro da matriz. Quando a tensão principal vale zero e a menor tensão é compressiva e igual à tensão de escoamento, há aumento de espessura da chapa e o modo é chamado de compressão uniaxial, o que pode ocasionar o enrugamento das flanges (MARCINIAK; DUNCAN; HU, 2002)(MARCINIAK, 1978). Para garantir que o material não falhe durante o uso, é necessário que os níveis de deformação em todos os pontos desta peça estejam abaixo da CLC.

2.4.2 Critérios para determinação das falhas

As chapas metálicas submetidas ao processo de estampagem atingem seu limite de conformação quando falham em algum momento do carregamento, ou seja, localizadamente surge uma estricção ou fratura. A fratura na conformação de metais pode ocorrer em três modos diferentes: tração, cisalhamento no plano ou cisalhamento fora do plano. As circunstâncias do processo definem este modo e dependem do fluxo plástico do metal e dos danos microestruturas (MARTINS, *et al.*, 2014). Quando as chapas são grossas, há tendência de aproximação para a curva de fratura por tração, pois o material exibe maior resistência à formação de rugas no plano (JAWALE, *et al.*, 2018). Para previsão de falha em peças de estampagem complexa, os modos de tração e de compressão no plano são usados em conjunto, e por esse motivo, a estricção deve ser considerada além da fratura. Sendo assim, é comum que o DLC construído inclua as curvas limite de estricção local (CLC-E) e fratura (CLC-F) (MARCINIAK; DUNCAN; HU, 2002). Vários modelamentos matemáticos para a previsão CLC-E e CLC-F na conformação de chapas metálicas, baseados em parâmetros do material e do processo, tem sido estudados (TEIXEIRA, 2005). A investigação iniciou por Hill em 1952 com a teoria da bifurcação, afirmando que o quadrante positivo não apresentava condições matemáticas necessárias para o surgimento da estricção local visível na superfície da chapa, do ponto de vista da teoria da plasticidade (MSOLLI; BEN BETTAIEB; ABED-MERAIM, 2016). Em 1967, o modelo M-K foi sugerido por Marciniak e Kuczynski, propondo que esta estricção era devido a um defeito geométrico inicial na espessura da chapa no formato de mini-canaleta, forçando a trajetória de deformação plástica a evoluir no estado plano de deformações.

No critério de fratura, é recomendado interromper o ensaio antes da completa separação das peças, facilitando a medição das deformações. No critério de estricção localizada, o ideal é interromper na ocorrência de qualquer indício de falha, seja por distorção exagerada da malha ou por micro trinca. Alguns métodos estatísticos são utilizados para detectar um forte gradiente de deformação, como listado a seguir (BASTOS, 2009):

- a) Método Veerman – compara a deformação de três círculos adjacentes e descreve a deformação do círculo central como média da deformação dos círculos adjacentes. Sua desvantagem está na morosidade de diversas medições, além de não considerar a estricção na vizinhança.
- b) Método Bragard – baseado na distribuição da deformação na fratura, utiliza o método matemático da regressão parabólica para determinar o ponto correspondente a estricção localizada. Neste caso, a escolha dos pontos representativos é importantíssima.

c) Método do “perfil duplo” – consiste na determinação de dois perfis de distribuição da deformação, sendo um correspondente à estrição localizada e outro correspondente à fratura. Ambos os perfis são então plotados num único gráfico e os dois últimos pontos em comum são selecionados para definir os limites de conformação na estrição localizada.

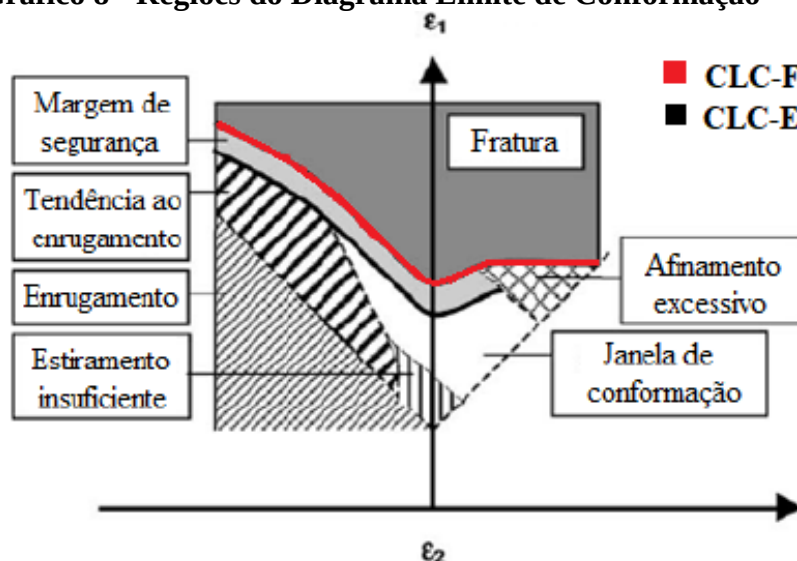
d) Método Hecker – consiste na medição de três tipos de círculos (círculos fraturados, círculos com estrição localizada e círculos sem falhas). A CLC é obtida pela plotagem dos limites entre os diferentes tipos de círculo.

e) Método Kobayashi – determina a estrição localizada no momento em que um aumento brusco da rugosidade de superfície ocorre.

f) Método nº 5 de Zürich – consiste na padronização da interpolação do método de Bragard, através da medição de um círculo fraturado e de 3 círculos adjacentes de cada lado, desde que a diferença entre dois círculos adjacentes seja menor que 5%.

Neste trabalho, o método Hecker foi utilizado para levantamento tanto da curva limite de estrição quanto da fratura. No diagrama DLC, pode-se identificar regiões de possíveis defeitos, como afinamento excessivo, enrugamento ou estiramento insuficiente, como mostrado no Gráfico 8. A região de conformabilidade ideal, chamada de “Janela de Conformação”, também aparece no DLC (HOLMBERG; ENQUIST; THILDERKVIST, 2004). Existem razões importantes de se analisar separadamente as curvas limite de fratura e de estrição e uma delas está relacionada com erros na previsibilidade de falha do material devido à dificuldade de medição do início da estrição.

Gráfico 8 - Regiões do Diagrama Limite de Conformação



Fonte: Bastos (2009).

A faixa logo abaixo da região de fratura representa a mudança do modo de deformação da chapa de tração uni ou biaxial para o estado plano de tensões, cujas propriedades mecânicas não são garantidas. Nesta região, a estricção pode ser observada, que é um dos mais importantes sinais de instabilidade no processo de conformação de chapas (FENG *et al.*, 2019). Mais abaixo, no lado esquerdo do gráfico, forças compressivas iniciam com a queda da deformação ε_2 , até que rugas são formadas, alterando o modo de deformação para compressão uniaxial. As rugas acontecem quando as tensões tangenciais compressivas excedem as transversais, ultrapassando o limite de estabilidade da chapa.

O limite de conformação por enrugamento não é tão consolidado como os de estricção e fratura pelo fato de ser influenciado por uma gama de parâmetros significativamente mais ampla e diversificada, que inclui a propriedade mecânica do material, a geometria da chapa metálica, as condições de contato impostas pela ferramenta e os níveis de tensão e deformação aplicados (MAGRINHO *et al.*, 2016). A ideia por trás da existência da deformação localizada no plano delimitando a formação de rugas na conformação de chapas é atribuída a Havranek, que propôs o conceito de uma curva limite (WLC) através da análise da conformação de copos cônicos sem apoio em matriz. Alguns autores confirmaram a existência desta curva, porém, na aplicação prática, diferentes trajetórias de deformação alteram estas condições e as rugas podem surgir eventualmente em qualquer região do espaço de deformação principal.

Em contrapartida, na parte direita, verifica-se grandes valores de ε_1 e ε_2 , promovendo afinamento excessivo de espessura (tração equibiaxial). Próximo à origem, o metal não é muito solicitado, podendo observar estiramento insuficiente. A região ideal para conformação acontece quando a chapa não apresenta instabilidade, chamada de “janela de conformação”.

Sabendo que o coeficiente de encruamento representa a deformação homogênea máxima sofrida pelo material, este ponto define a transição da condição segura de conformação para a região instável. Este ponto é definido como crítico (CLCo) (BRESSAN *et al.*, 2011). Como a CLC obtida pelo ensaio Nakazima é baseada em deformações no plano da chapa sem considerar deformações no sentido da espessura, a previsão de falhas pode ser muito conservadora ou liberal dependendo da peça a ser conformada na indústria (NEUHAUSER *et al.*, 2019).

Considerando que existem regiões que provocam deformações relevantes na espessura, como quinas de ferramentas e pequenos raios do punção, alguns ajustes do DLC foram propostos. Uma extensão do modelo M-K foi proposta por Fatemi, Dariani (2015) para prever o início da estricção de um material elasto-plástico com encruamento isotrópico considerando todas as condições de carregamento possíveis e suas resultantes tensões de cisalhamento

normais e através de espessura. Sönmez (2005) explicou com detalhes a extensão do diagrama limite de conformação para a terceira dimensão da chapa, proposta por Keeler-Brazier em 1975. Neste caso, a interseção do gráfico deve ser ajustada levando em consideração também a espessura da chapa, como mostrado na equação 14.

$$CLC_0 = (23,3 + 14,13 * t) \frac{n}{0,21} \quad (14)$$

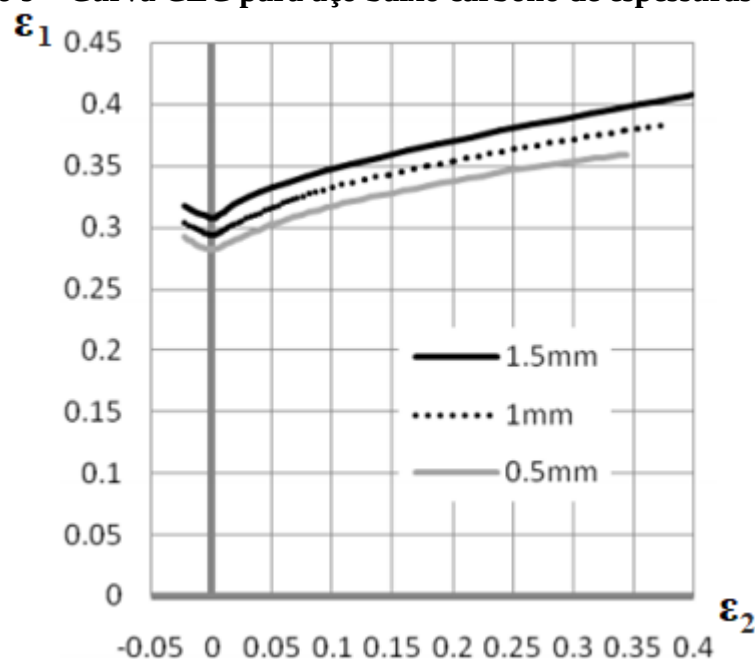
2.4.3 Parâmetros que influenciam na curva limite de conformação

Os parâmetros que mais afetam o comportamento da curva CLC são lubrificação, espessura da chapa, orientação preferencial dos grãos e propriedades do material. (DJAVANROODI; DEROGAR, 2010). Materiais com tamanho de grão inicial pequenos tendem a exibir a CLC posicionada para cima, pois resistem mais à estrição, permitindo maior estampabilidade. Em caso de metais pré-deformados, a CLC varia conforme a tensão aplicada: se as deformações anteriores foram majoritariamente trativas, a CLC fica posicionada mais para baixo e, se mais compressivas, para cima (RAGAB; SALEH; ZAAFARANI, 2002). Além disso, algumas variáveis de processo, como as medições realizadas nos círculos da grade, lubrificação e a velocidade de conformação podem variar a posição dos pontos, alterando assim a disposição da curva. Em relação ao atrito entre punção e corpo de prova, à medida que o coeficiente de atrito decresce, maiores deformações são realizadas e a curva CLC toma posições mais elevadas.

2.4.3.1 Espessura de chapa

O aumento da espessura das chapas tende a deslocar a curva CLC para cima, deixando a região de segurança mais ampla, ou seja, há possibilidade de obter peças mais profundas sem ocorrência de estrição localizada ou fratura (FILHO *et al.*, 2011). Uma aplicação da influência da espessura da chapa na curva CLC é mostrada no Gráfico 9, em que chapas de espessuras variadas de um aço baixo carbono para estampagem foram usadas para realização do ensaio Nakazima.

Gráfico 9 – Curva CLC para aço baixo carbono de espessuras variadas



Fonte: Marciniak (1978).

2.4.3.2 Coeficiente de anisotropia e coeficiente de encruamento

Para boa estampabilidade, algumas propriedades mecânicas influenciam diretamente na resposta do material às solicitações, a anisotropia e o encruamento, que impedem a distribuição uniforme da deformação durante o processo. A anisotropia, variação de propriedade mecânica de acordo com a direção em que se deforma o blank, aparece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico (anisotropia cristalográfica) ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada, também devido ao trabalho mecânico (FILHO, 2004). No geral, há tendência de alinhamento dos grãos com a direção de primeira conformação que, no caso das chapas, é a laminação. O parâmetro para análise desta resistência oferecida à deformação nas diferentes direções do plano e na espessura da chapa é chama de coeficiente de anisotropia (R), ou coeficiente de Lankford, e é obtido no ensaio de tração. R é dado pelo quociente entre a deformação verdadeira na largura (ϵ_w) e na espessura (ϵ_t), como mostrado na Equação 9:

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{w_o}{w_f}}{\ln \frac{t_o}{t_f}} \quad (9)$$

A relação média do comportamento de deformação da chapa, chamado de coeficiente de anisotropia normal ($\bar{R}$), pode ser obtida pela determinação dos coeficientes para três principais direções em relação à direção de laminação: paralela (0°), transversal (90°) e a 45° (Equação 10), como ilustrado anteriormente na Figura 12.

$$\bar{R} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (10)$$

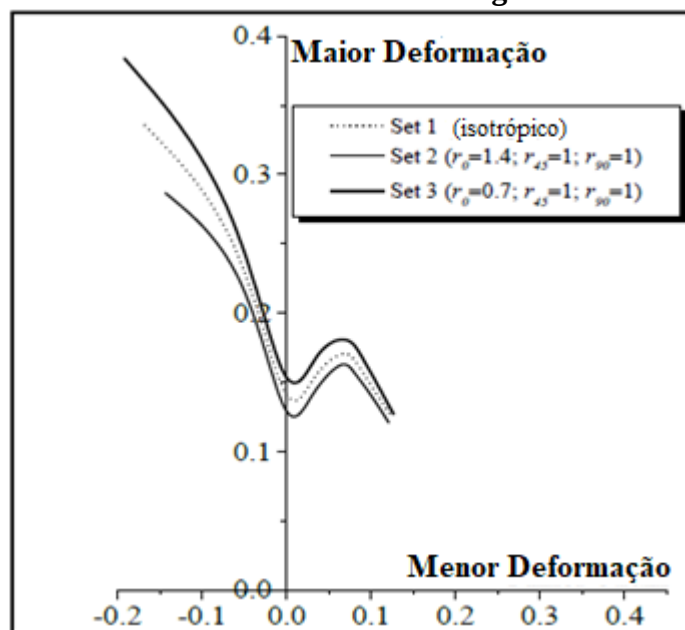
Caso a resistência à deformação na direção da espessura seja a mesma à deformação no plano da chapa, o coeficiente de anisotropia normal é igual a 1. Se a resistência é maior na direção da espessura, ou seja, o material não afina com facilidade, $\bar{R} > 1$. Por este motivo, quanto maior o valor de $\bar{R}$, mais profundo o embutimento (FABRIS, 2014). Outro parâmetro relacionado à anisotropia é a variação do comportamento da deformação nas diferentes direções dos planos da chapa, chamada de coeficiente de anisotropia planar (ΔR), calculado conforme Equação 11:

$$\Delta R = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (11)$$

Um material que se deforma uniformemente apresenta ΔR nulo. Como esta propriedade é idealizada em operações de embutimento, coeficientes de anisotropia planar próximos de zero são objetivados, reduzindo assim a formação de “orelhas”. Para os aços baixo carbono, as orelhas ocorrem a 0° e 90° e tem relação direta com ΔR . Em geral, materiais com alta anisotropia normal possuem alta anisotropia planar. (BASTOS, 2009).

Msolli, Bettaieb e Abed-Meraim (2016) observaram grande influência do coeficiente de Lankford (R) no diagrama DLC, cujos efeitos de anisotropia plástica são mais significativos para o quadrante negativo, sugerindo comportamento plástico variável de acordo com a direção de laminação do material, como exibido no Gráfico 10.

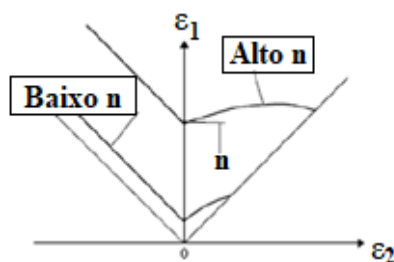
Gráfico 10 – Influência do coeficiente de Lankford no Diagrama Limite de conformação



Fonte: Msolli, Bettaieb e Abed-Meraim (2016)

O coeficiente de encruamento influencia na distribuição uniforme de deformações durante o embutimento. Nesse sentido, valores mais baixos de n indicam que a deformação homogênea é reduzida e, conseqüentemente, a estrição facilmente acontece. Pode-se dizer, então, que aços com boa estampabilidade apresentam valores elevados de n , como mostrado no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Influência do encruamento na curva CLC



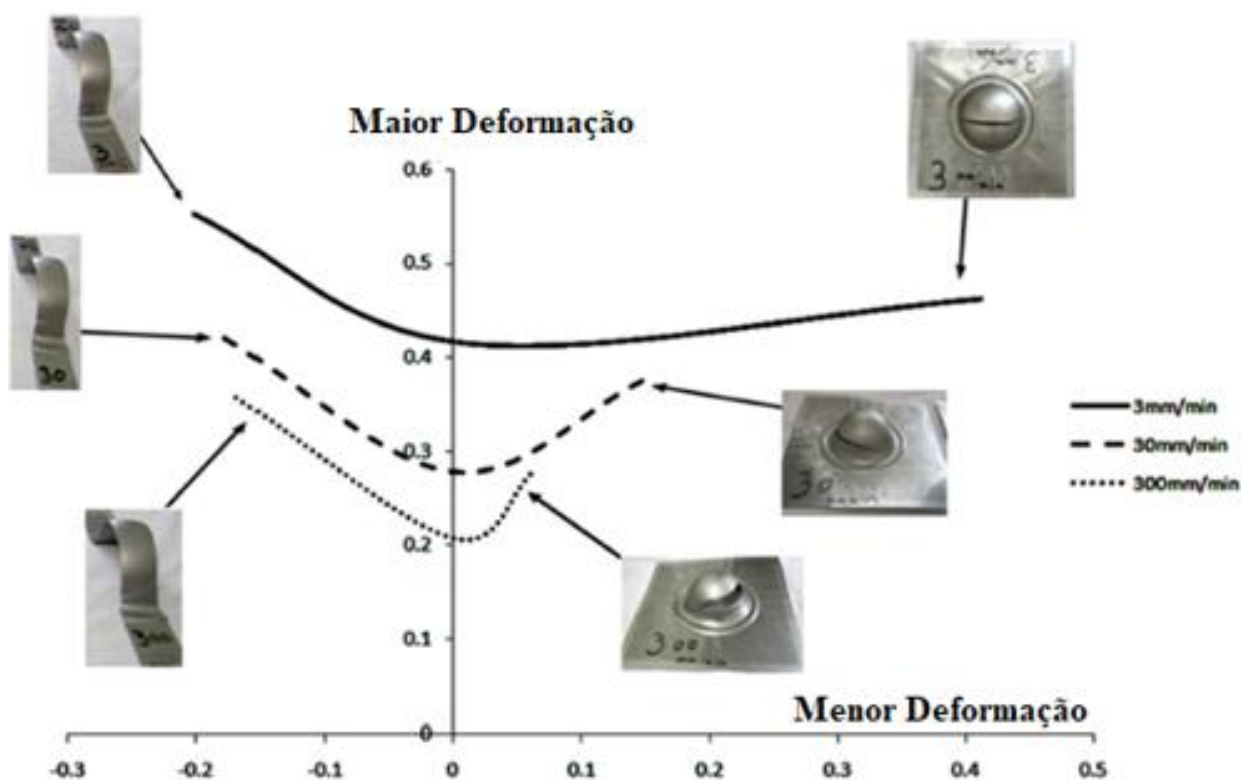
Fonte: Adaptado de Marciniak (1978).

2.4.3.3 Taxa de deformação

A velocidade de deslocamento do punção, ou seja, a solicitação imposta à chapa por unidade de tempo impacta diretamente no sucesso ou fracasso do embutimento. Quanto menor a velocidade do punção, maior a capacidade do material de ser deformado até falhar, isto é, a

curva CLC é posicionada mais para cima (RAGAB; SALEH; ZAAFARANI, 2002). Isto porque, no embutimento a frio, taxas baixas de deformação permitem o material absorver a energia gradativamente, encruar e aumentar sua resistência mecânica, suportando maiores níveis de deformação. Ao contrário, quando velocidades altas são necessárias, profundidades menores são atingidas e podem ocorrer fraturas precoces, que ocorrem próximas à flange, logo abaixo do raio de curvatura da matriz por concentrar mais esforço trativo, como ilustrado na Figura 15 (FATHI *et al.*, 2016).

Figura 15 - Limite de conformabilidade do aço AISI 316L



Fonte: FATHI *et al.*(2016).

2.5 Simulação por Elementos Finitos

Neste capítulo, foi feita uma análise dos softwares de simulação por elementos finitos mais usados para conformação de chapas para escolha do HyperForm. Além disso, foram apresentadas suas características funcionais para melhor entendimento dos parâmetros escolhidos para a simulação do processo em questão.

2.5.1 Considerações iniciais

No campo da engenharia é comum se deparar com problemas ou fenômenos regidos por equações diferenciais de difícil solução, ou impossíveis de serem resolvidas analiticamente, sendo usado assim, métodos numéricos para resolvê-las. (REIS, 2002) O método de elementos finitos, consiste em discretizar um corpo contínuo de geometria qualquer em um número finito de pequenos elementos simples, como quadrados e triângulos, chamados de malha, para possibilitar um estudo mais detalhado da situação à qual este é submetido. Os elementos gerados para descrever o corpo estudado são interligados por nós que transmitem informações para sua vizinhança por meio de soluções de equações diferenciais transformadas em matrizes. (LOBÃO, 2003) Para análise de estampagem de chapas metálicas, o tipo de estudo indicado é o não linear, que soluciona situações de geometrias não lineares e situações de condições de contorno variáveis, onde grandes deslocamentos são vistos, além da variação de contato entre componentes e diferentes níveis de encruamento.

Na conformação de metais, vários são os softwares de simulação computacional, como DEFORM-2D/3D, QFORM 2D/3D, FORGE 2D/3D, COLDFORM, ANSYS LS-DYNA e HYPERFORM. (SKRIPALENKO, 2013) A determinação de qual software utilizar deve ser embasada na modelagem que está sendo feita para resolver determinado problema, levando em consideração o processo de fabricação a ser avaliado, o material a ser conformado, os recursos disponíveis e a tolerância estimada dos resultados a serem obtidos.

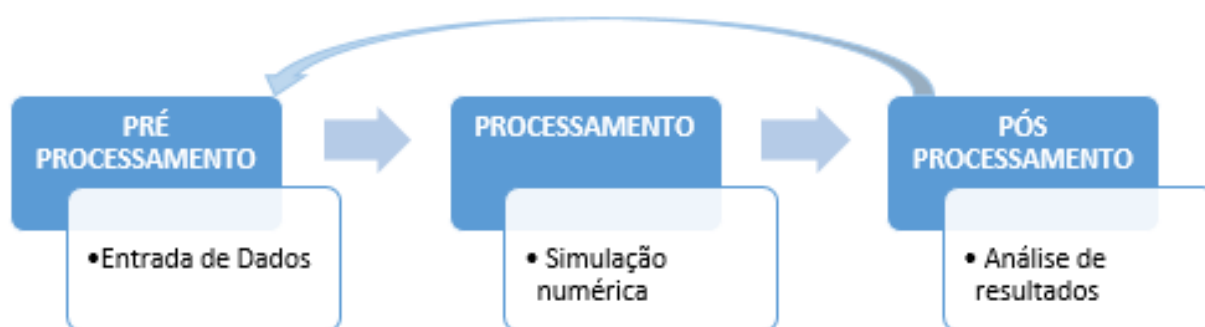
Diversos pesquisadores avaliaram a eficiência do controle produtivo por meio destes softwares. Considerando a complexidade das peças estampadas, as janelas de conformação se tornam mais restritas. Neste caso, a aplicação de algoritmos de controle é eficiente para avaliar possíveis falhas antes da fabricação em larga escala e ajustar de forma prática as configurações que se fizerem necessárias para manutenção da qualidade do produto final. (FISCHER *et al.*, 2020). Kamran; Gollo, (2017) obtiveram variação de 5% entre resultados teóricos e práticos em uma investigação no embutimento profundo hidro-mecânico de copos esferoidais, demonstrando que o modelo matemático proposto auxilia na determinação da variável de interesse a ser aplicada com facilidade ao invés do método de tentativas (acertos e erros).

Experimentos são comumente realizados para comprovação dos resultados virtuais. Em sua maioria, há compatibilidade entre eles, pois a variação é pequena e fica dentro dos limites do processo. É importante ressaltar que a precisão dos resultados obtidos por simulação varia diretamente com a resolução da malha, condições de contorno e parâmetros de processo utilizados (PRATES *et al.*, 2018).

2.5.2 Características funcionais do HyperForm

Altair HyperForm é um software de simulação abrangente comprovado por várias indústrias de estamparia e ferramentas. Ele permite projetar e otimizar todos os aspectos do ciclo de desenvolvimento de produto estampado, desde o conceito até a peça acabada para metais e compósitos. Este programa foi utilizado neste trabalho para simulação virtual da estampagem de caçambas de carrinho de mão em chapas finas submetidas à diferentes condições de deformação. Existem três etapas principais na elaboração de uma simulação numérica de um processo qualquer, conforme mostrado na Figura 16 (SILVA, 2011).

Figura 16 - Etapas da simulação numérica



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.5.2.1 Pré Processamento

Nesta etapa inicial, realiza-se a importação ou setup de várias condições preliminares à simulação propriamente dita. Na modelagem física, as geometrias da ferramenta e da peça final devem ser definidas, utilizando-se interface gráfica de software ou sistema CAD. O tipo de análise (2 ou 3D) é definido juntamente com as condições apropriadas de carregamento para resolução do problema em questão. Informações sobre o material, como curva de escoamento, densidade, limite de resistência à tração e coeficiente de encruamento, podem ser escolhidos a partir do banco de dados do programa ou pode ser importada curva tensão-deformação obtida experimentalmente em laboratório. Outros dados de entrada específicos precisam ser preenchidos, como coeficiente de atrito entre as partes móveis, velocidade do punção, curso de deformação, malha da ferramenta e da peça, dentre outros.

2.5.2.2 *Processamento*

Esta é a etapa de realização do cálculo computacional escolhido para resolução do problema dado em incrementos de deslocamentos, sendo o carregamento feito nos menores elementos da malha (nós) com o objetivo de aproximar os resultados virtuais dos reais e eliminar erros acumulativos. Além da busca pela correta representação geométrica, facilidade de aplicação de carregamentos e condições de contorno, uma discretização de malha apropriada definida na etapa de pré-processamento deve permitir um desempenho numérico otimizado para os elementos que estão sendo utilizados (SILVA, 2011).

2.5.2.3 *Pós-processamento*

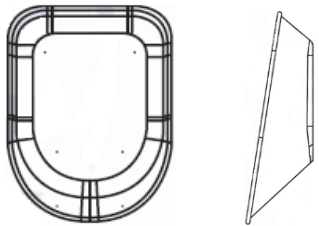
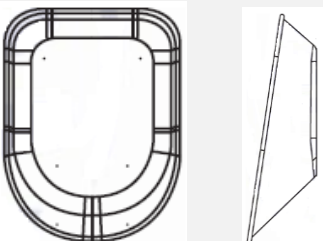
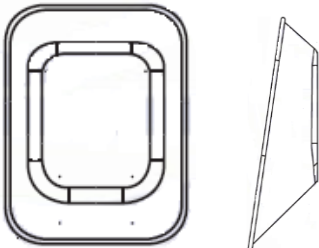
Na etapa final, os resultados obtidos pelo software são avaliados criteriosamente a fim de buscar resultados condizentes com os obtidos pelo processo real. Muitas vezes são realizados testes empíricos para comprovação de valores, como análise da variação da espessura na conformação de chapas. É comum realizar a convergência de malha, que consiste na repetição da simulação utilizando malha mais refinada a fim de avaliar a influência do refino nos resultados obtidos. A redefinição de parâmetros do pré-processamento é feita até que seja obtida relação satisfatória entre precisão nos resultados e tempo computacional.

Autores validaram a simulação numérica na estampagem de chapas finas através de experimentos, para determinar o erro entre os valores reais e virtuais ao fazer análise comparativa de um mesmo parâmetro. O diagrama DLC foi estudado por Bhatt (2014), que verificou diferença de 12,5% nas curvas CLC geradas a partir do ensaio Nakazima e da simulação pelo HyperForm, em que os valores simulados foram maiores que os reais. As deformações ε_1 e ε_2 foram analisadas em um componente automobilístico por Hariharan; Balaji, (2009), que encontrou variação máxima de 8% entre deformações reais e virtuais. A distribuição de espessura real avaliada na estampagem também de um componente automobilístico Zhang *et al.* (2018) apresentou erro máximo de 5% comparada à simulada, o que indica que este modelo de simulação é preciso.

2.6 Fabricação de caçambas em chapas finas

Diversos produtos embutidos em aço no formato de bojos são usados cotidianamente, desde itens de uso domiciliar (frigideiras, pias, fundo de churrasqueira) até outros destinados à construção civil (telhas, bojos de betoneira, caçambas). Nestes produtos, há uma intensa busca para conciliação entre resistência e leveza, o que em geral é desafiador, pois produtos de espessuras mais finas tendem a ser desgastados rapidamente. Carrinhos de mão em formatos arredondados são fabricados em chapas de aço variadas, de 0,50mm até 2,00mm, com capacidade em litros variável a depender do formato e profundidade escolhida. Algumas das dimensões e formas das caçambas de acordo com a norma brasileira “NBR16269 – Carrinhos de mão para construção civil” são exibidas na Tabela 3 (ABNT-NBR16269,2013).

Tabela 3 – Caçambas de carrinho de mão de acordo com NBR16269

Geometria	Volume	A (largura)	B (comprimento)
Redonda 	40 L 45 L 50 L 55 L 60 L	610 mm	830 mm
Redonda 	40 L 45 L 50 L 55 L 60 L 65 L 70 L	660 mm	930 mm
Quadrada 	40 L 45 L 50 L 55 L 60 L 65 L 70 L	660 mm	930 mm

Fonte: NBR16269 (2013).

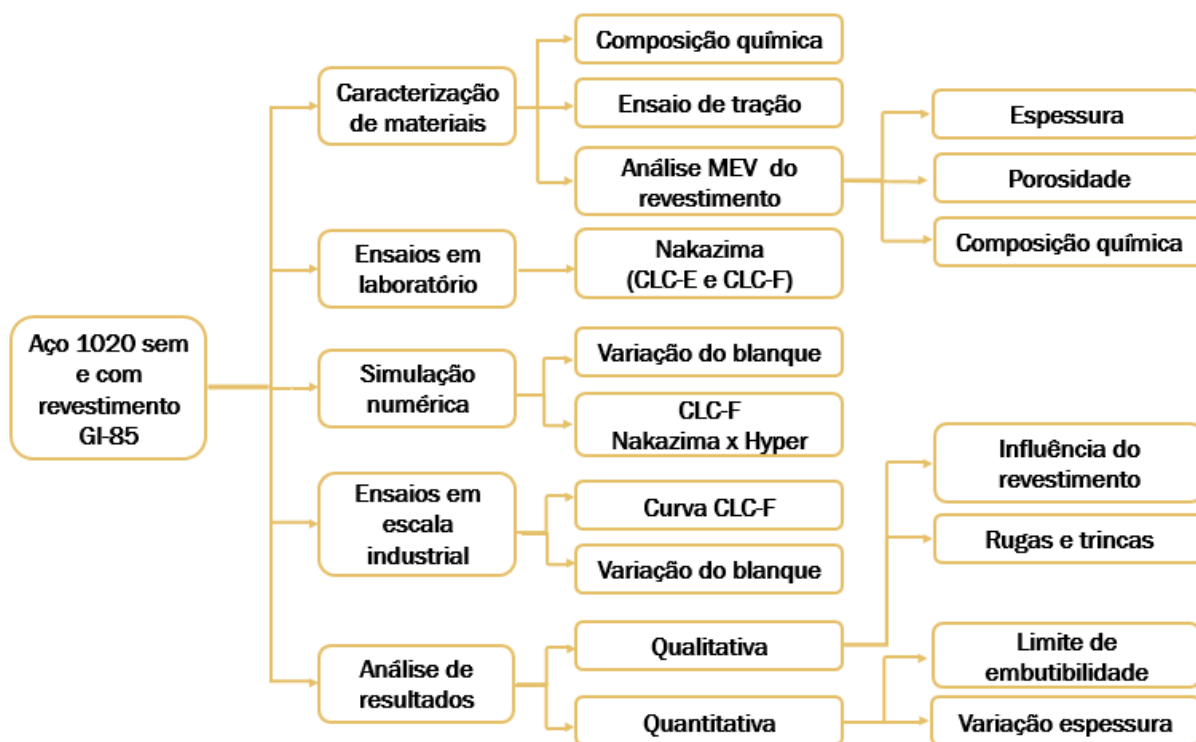
O presente trabalho visa estudar a embutibilidade de caçambas redondas fabricadas em chapas finas de aço com volume em torno de 50 litros, cujas dimensões estão conforme a norma supracitada ($A = 560\text{mm}$, $B = 780\text{mm}$). Neste caso, a influência da dimensão do blanque e do revestimento de zinco puro no comportamento do aço SAE 1010 é investigada.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho, realizou-se primeiramente a caracterização dos materiais (aço SAE 1010 com e sem revestimento de galvanização por imersão a quente). O limite de falha dos materiais em laboratório foi avaliado pelo ensaio Nakazima com o objetivo de determinar as curvas tanto de estrição quanto de fratura (CLC-E e CLC-F). A performance dos materiais também foi estudada por simulação no software HyperForm para a fabricação de caçambas de carrinho de mão. Para comprovação dos resultados obtidos em laboratório e pelo método de elementos finitos, realizou-se o embutimento real das caçambas em escala industrial.

Para melhor organização da metodologia de trabalho, o fluxograma deste trabalho foi dividido em cinco etapas: caracterização de materiais, execução de ensaios em laboratório, simulação no HyperForm, embutimento industrial e análise dos resultados, conforme fluxograma proposto na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.1 Caracterização de materiais e preparação de corpos e prova

Esta etapa consistiu na análise química dos materiais estudados e preparação dos corpos de prova utilizados para o ensaio de tração.

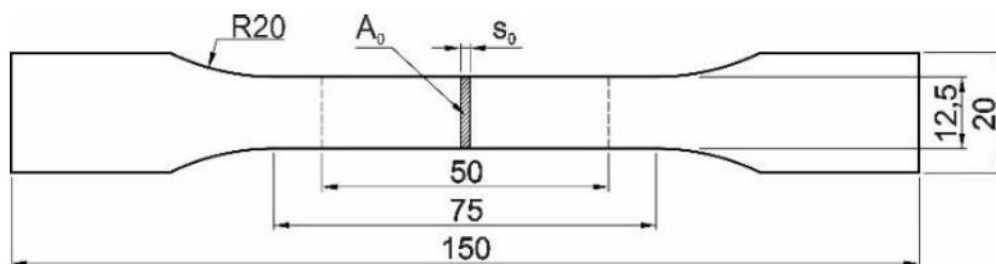
3.1.1 Análise química

O aço carbono utilizado, com e sem revestimento, foi caracterizado pela usina fabricante, com composição química disponibilizada no certificado de qualidade, tanto das amostras conforme a norma SAEJ403 (sem revestimento) quanto das amostras conforme norma NBR 7008-GI (galvanizada). Os certificados encontram-se no anexo A deste trabalho para consulta.

3.1.2 Ensaio de tração

As chapas de aço utilizadas tanto nos testes de embutimento quanto no processo em escala industrial foram adquiridas pela empresa TAJAX. Para o ensaio de tração foram cortados a laser conforme norma ASTM E8 (Figura 18) trinta e seis (36) corpos de prova, sendo dezoito (18) por material.

Figura 18 – Corpo de prova para ensaio de tração



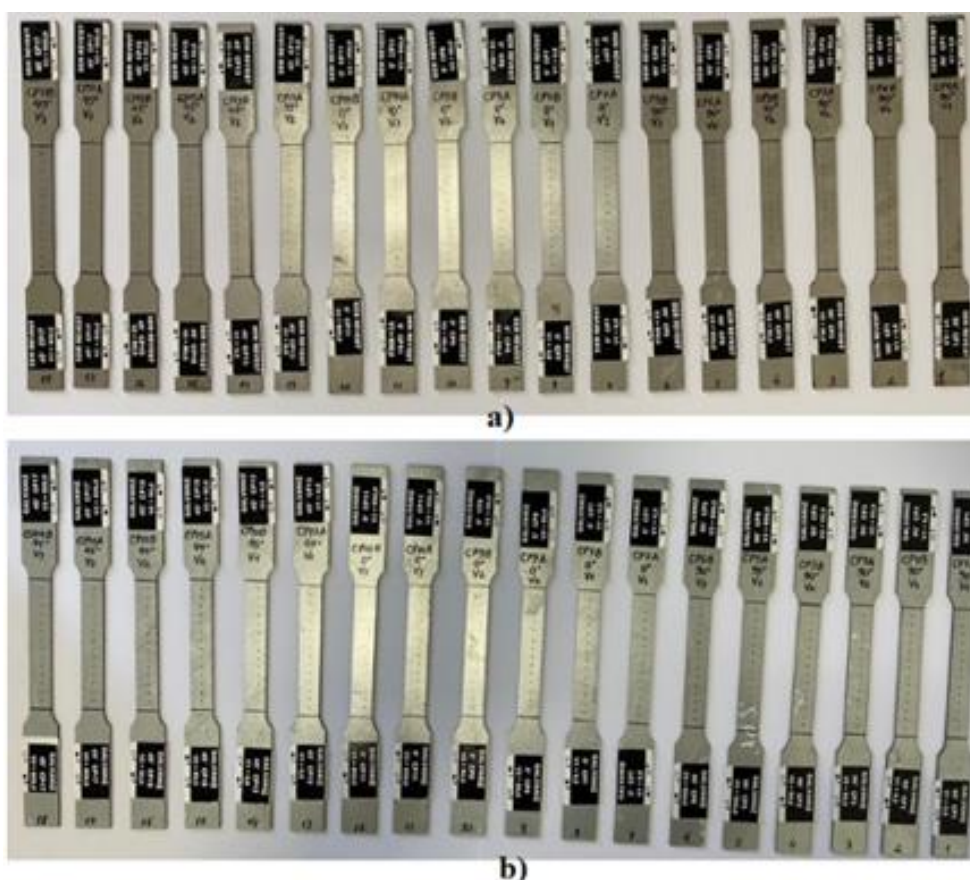
Fonte: ABNT.NBR-6152 (2002).

Para análise da influência da anisotropia na resistência do material, foram consideradas as direções 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação. Além disso, a taxa de deformação também foi estudada. Para cada direção, realizou-se o ensaio em três velocidades (V) diferentes: 0,5, 50 e 500mm/min, em duplicata. A identificação dos corpos de prova foi realizada conforme exibido na Tabela 4. A Figura 19 mostra os corpos de prova dos dois materiais já identificados, antes da realização do ensaio.

Tabela 4 - Identificação corpos de prova de tração

CORPO DE PROVA	CP1	CP3	CP5	CP7	CP9	CP11	CP13	CP15	CP17
DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO	90	90	90	0	0	0	45	45	45
VELOCIDADE (MM/MIN)	0,5	50	500	0,5	50	500	0,5	50	500

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 19 - Corpos de prova antes do ensaio de tração

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os ensaios foram feitos em uma máquina de ensaios de tração calibrada EMIC DL-10000, disponível na PUC-MG unidade Coração Eucarístico, com capacidade de 100KN, cujo certificado de calibração encontra-se no anexo B deste trabalho. Durante o ensaio na máquina, os dados são compilados por um software acoplado que fornece valores de força e deslocamento, base para geração do gráfico tensão x deformação de engenharia. O limite de escoamento e limite de resistência à tração foram determinados e correspondem às tensões de engenharia. Os valores de deformação e tensão foram convertidos em verdadeiros para

obtenção dos gráficos. Para levantamento do coeficiente de encruamento (n) de cada aço, a curva referente ao regime plástico verdadeiro foi linearizada, conforme equação 4 previamente apresentada na seção 2.1. O valor de “ n ” correspondente ao coeficiente angular da reta. O outro termo da equação da reta é usado para determinação do coeficiente de resistência K (MPa). Foi feito comparativo também entre coeficiente de anisotropia dos materiais, em que R e $\bar{R}$ foram determinados conforme Equações 9 e 10 exibidas na seção 2.4.3.2.

3.1.3 *Análise do revestimento GI-85*

Para verificação do revestimento de zinco puro (Zn) com concentração nominal de 85g/m² realizado no fabricante, fez-se necessária a análise da composição química da camada passiva do aço e também de sua espessura real. Essas informações foram obtidas com auxílio de imagens feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) disponível na PUC-MG unidade Coração Eucarístico.

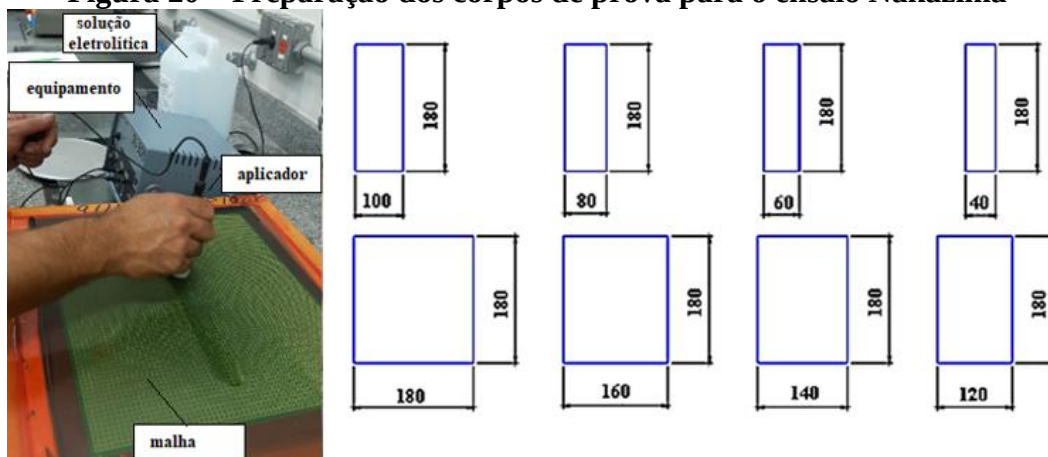
3.2 **Execução de ensaios em laboratório**

Nesta seção a descrição do ensaio Nakazima para obtenção das curvas CLC-E e CLC-F é apresentada. Para este ensaio de estiramento, foi utilizado prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas instalada na empresa Tajax, com velocidade constante de 3mm/s, à temperatura ambiente, sem uso de lubrificante. A matriz usada possui um travamento das abas por “draw-beds” e o punção cilíndrico tem diâmetro igual a 100mm fundo hemisférico. Oito corpos de prova foram utilizados por material, cujos cortes longitudinais foram feitos na direção a 90° da direção de laminação nas dimensões variando de (40x180)mm a (180x180)mm, como ilustrado na Figura 20. A marcação eletrolítica de uma malha circular com diâmetro igual a 10,00mm foi realizada com auxílio de um kit contendo equipamento para marcação, solução eletrolítica e a malha, como mencionado na seção 2.4.1. Após estiramento das chapas, utilizou-se o método Hecker (vide capítulo 2.4.2) para avaliação das regiões deformadas da seguinte forma:

- a) Região fraturada: círculos com frestas visíveis a olho nu, mesmo que de pequena dimensão;
- b) Região com estricção localizada: círculos com indícios de surgimento da trinca ou deformação exagerada da malha;

c) Região sadia: círculos deformados sem risco de falha.

Figura 20 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio Nakazima



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A medição do diâmetro das elipses das regiões d1e d2 foi realizada. No caso das regiões fraturadas, a abertura da trinca foi subtraída da maior deformação. As deformações de engenharia foram transformadas em verdadeiras e o ponto plotado no diagrama limite de conformação. O ponto de interseção do gráfico foi considerado como o coeficiente de encruamento médio obtido no ensaio de tração para os dois materiais (com e sem revestimento) e as curvas foram ajustadas a ele.

3.3 Simulação

Nesta seção, as etapas da simulação no software HyperForm são abordadas.

3.3.1 Pré-processamento

A análise computacional por elementos finitos começa com o pré-processamento de dados, onde, desde a concepção da geometria de estudo (o meio contínuo) até a análise de malha são feitos. A geometria da ferramenta foi construída com base no produto final por meio do software de CAD (SolidWorks).

O software escolhido para simulação por elementos finitos foi o HyperForm, da Altair, por ser amplamente utilizado no mercado para conformação virtual de chapas finas em produtos diversos. A análise escolhida foi o “Virtual TryOut”, que faz um estudo similar ao

experimental detalhando os diversos parâmetros envolvidos. O solver utilizado para análise foi o “RADIOSS”, que junto ao “Virtual TryOut” divide a simulação em estudos incrementais, para melhor resolução e análise no pós-processamento.

O HyperForm possibilita a construção de uma geometria de ferramenta com base no blanque deformado, ou punção ou fêmea dentro do software. Porém, para maior aproximação da condição real, optou-se por fazer a importação de toda a ferramenta construída na interface com o SolidWorks, com o formato “.STEP”. O tipo de deformação a ser considerado também foi escolhido: “Double Action Draw”. Além disso, na etapa de configuração de ferramenta, foram definidos velocidade do punção (5000mm/min) e curso de descida (195mm). Este curso está relacionado à profundidade da peça final e foi definido respeitando os limites reais para fabricação de uma caçamba com qualidade, objetivando menor risco de trincas e formação de rugas. O fator atrito também foi configurado nesta etapa em três situações: no contato entre blanque/prensa-chapas, blanque/fêmea e blanque/punção. O coeficiente de atrito indicado pelo software para metais similares ao aço SAE1010 sem revestimento ($\mu=0,125$) foi utilizado e está dentro do intervalo proposto pela literatura de 0,1 a 0,325. (TRZEPICINSKI, 2019)

Para comparação da condição de atrito proposta ($\mu=0,125$) com uma condição mais severa, o estudo coeficiente de atrito maior ($\mu=0,15$) foi feito. Além disso, como estudos prévios indicam redução deste coeficiente quando revestidos por uma camada de zinco puro (GI-85), utilizou-se $\mu=0,1$ para aços galvanizados. (SILVEIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2015)

Dentre as possibilidades de uso de material dentro do software, a melhor opção foi a criação de um material novo a partir dos dados obtidos através dos ensaios reais feitos (Nakazima e tração) na biblioteca do software. Os dados reais da curva tensão-deformação verdadeiras obtidos com o ensaio de tração foram inseridos.

A malha do blanque foi discretizada com elemento igual a 5mm utilizando o recurso “B-Mesh”. Como as ferramentas (matriz, punção e prensa chapas) são consideradas indeformáveis, as malhas do prensa chapas e da fêmea são irrelevantes. Porém a malha do punção também foi discretizada (5mm) utilizando o recurso “R-Mesh”, pois a peça final é gerada pelo software a partir da geometria do punção importada. Com isso, uma malha refinada permite maior compatibilidade entre a geometria da peça simulada e da real. Uma vantagem deste software, que auxilia no aumento de precisão localizada, é a ferramenta de auto refinamento, em que a malha é automaticamente discretizada em regiões que sofrem maiores deformações. Outro parâmetro informado ao software, também muito influente no resultado final, foi “adaptivity”, que influencia diretamente em como os elementos

deformáveis se comunicam com seus vizinhos e no modo de convergência de resultados para caminhar entre etapas de forma incremental. Uma boa maneira de se reduzir o tempo gasto na análise de processamento é a utilização de geometria simétrica, caso seja possível.

3.3.2 *Processamento*

A etapa de processamento não deve ser vista como totalmente dependente do software, afinal o processamento é resultado das escolhas na etapa anterior. Alguns parâmetros foram vistos como influentes no tempo de processamento e erro acumulado entre passos de simulação incremental. Dentre eles, pode-se ressaltar a qualidade da malha e refino da malha, adaptatividade e velocidade do punção.

Em relação a malha, observou-se que quanto mais grosseira, menor o tempo de cálculo, porém, maior o erro final obtido. Buscando maior precisão de resultados e menos recurso computacional, a convergência de malha foi feita de 30 (default do software) para 5. Outra convergência foi testada, de 5 para 2,5, mas não houve melhora nos resultados, apenas maior tempo para rodar a mesma simulação.

Adaptatividade é um parâmetro influente na malha do blanque, permitindo-a se adequar à deformação imposta. Quanto maior seu valor, maior o tempo de simulação necessário. Para uma convergência adequada ao presente trabalho, o valor utilizado foi 2.

A velocidade de atuação do punção foi um parâmetro muito influente no tempo de processamento e pouco influente nos resultados finais. Porém, quando muito diferentes dos indicados pelo software (default), obteve-se situações irreais. Sendo assim, a velocidade do punção foi mantida em 5000mm/min.

Outro fator importante foi a dimensão da geometria imputada, pois a quantidade de nós existente na malha está diretamente ligada ao volume de cálculo e iterações necessários. Neste trabalho, as simulações da peça inteira e de metade dela foram comparadas. Houve pequena variação nos resultados finais e discrepância no tempo de processamento. Por isso, adotou-se a simulação por simetria.

O processamento do HyperForm divide a análise principal em onze etapas, o que possibilita a análise profunda sem grandes incrementos de deformação. Entre elas, são feitas iterações a fim de minimizar o erro carregado entre nós e entre etapas. Durante a simulação, é possível acompanhar a evolução das etapas, o que o permite ao operador ter uma visão crítica para previsão de possíveis erros ou resultados incoerentes.

3.3.3 Pós-processamento

Após concluída a etapa de processamento, uma nova interface do software é utilizada para acessar os resultados obtidos, na qual diversas ferramentas estão disponíveis, como ferramentas de corte e plotagem de gráficos. É possível analisar deslocamento, tensões e deformações e afinamento. Além de tudo isso, o software permite a importação de uma curva CLC obtida externamente ou a construção desta curva (considerando CLCo ajustado). Foram comparadas as duas curvas para correlacioná-las à conformabilidade dos materiais.

A principal análise realizada foi a variação da espessura, pela viabilidade de validação experimental e levantamento da compatibilidade entre o real e o simulado.

3.4 Embutimento industrial

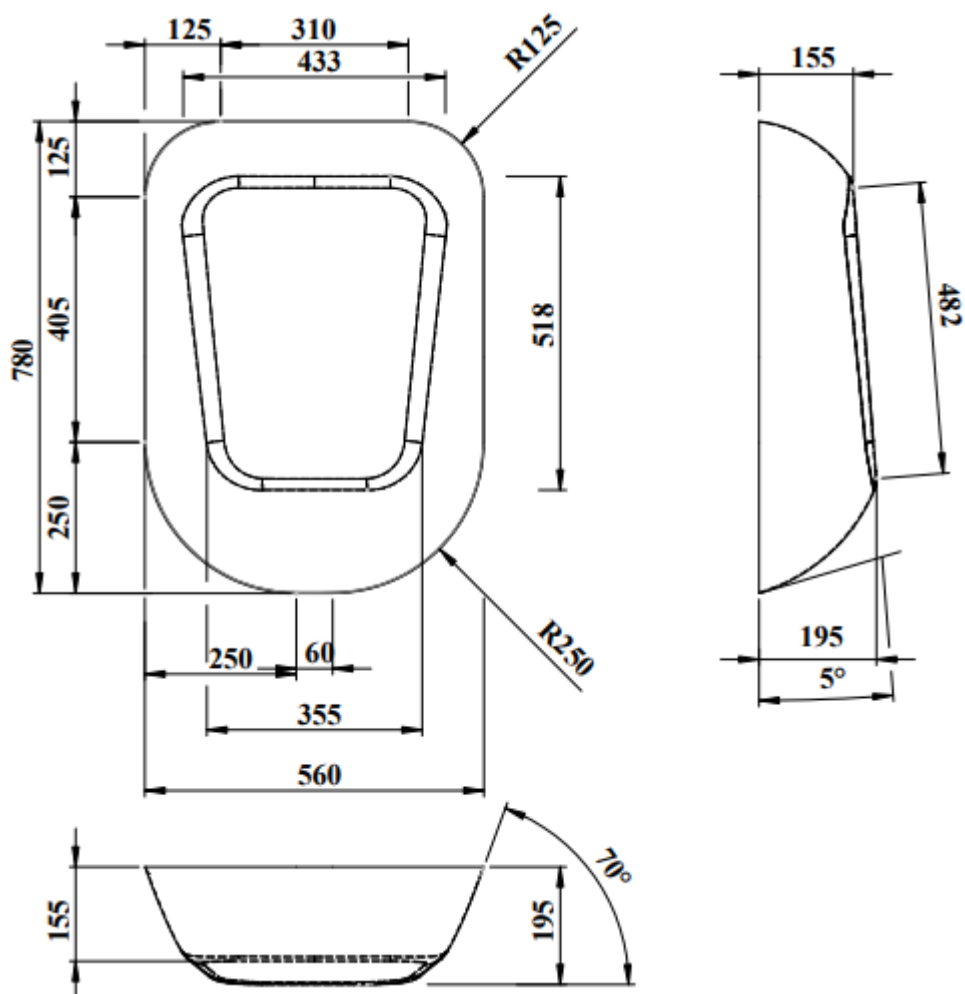
Nesta seção, o embutimento em escala real de caçambas de carrinho de mão foi realizado para possibilitar a validação dos resultados tanto da simulação quanto do ensaio realizado em laboratório.

3.4.1 Definição da geometria da peça final e ferramental

De acordo com o mercado nacional, o modelo arredondado com volume de até 55 litros fabricado em chapas finas é amplamente utilizado, não só para uso na construção civil, mas também em aplicações em que os desgastes são menos severos, como na jardinagem. A geometria escolhida foi detalhada na Figura 21, cujas dimensões macro (560 x 780mm) e volume (50 litros) estão de acordo com a norma vigente. Este modelo está disponível hoje para venda nas espessuras entre 0,50 e 2,00mm. Para obtenção de um produto de qualidade que atenda ao mercado atual com competitividade, este estudo visa avaliar o desempenho do aço SAE 1010 ao ser conformado na espessura nominal de 1,20mm neste formato arredondado.

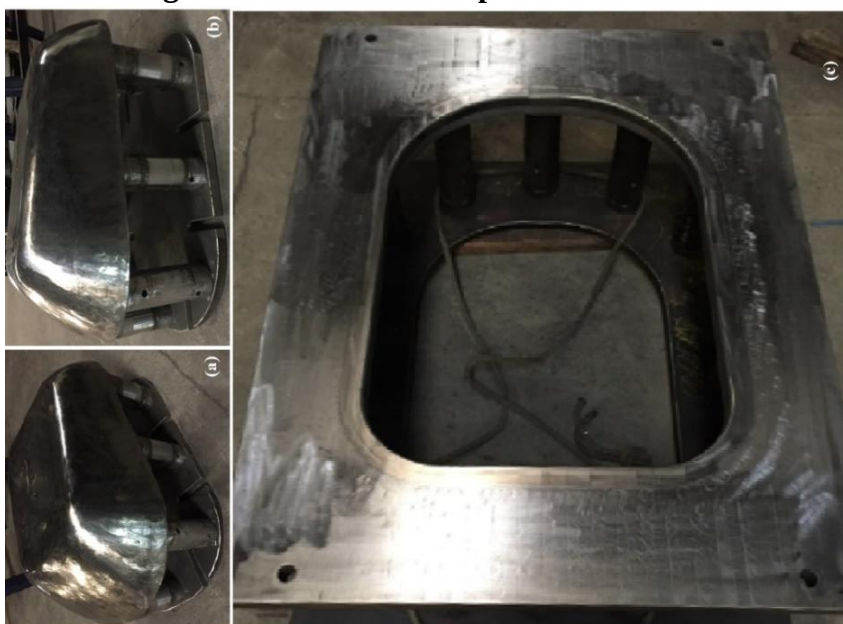
Uma prensa de duplo efeito com capacidade de 500x200 toneladas e velocidade de 13mm/s disponível da empresa Tajax foi utilizada para o ensaio em escala industrial. Como ferramenta de embutimento, um prensa chapas, uma fêmea e um punção de ferro fundido no formato da cavidade da caçamba foram fabricados, como exibido na Figura 22.

Figura 21 – Geometria final da caçamba



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 22 - Ferramentas para embutimento



Fonte: Elaborado pela autora (a)(b) Macho (c) Fêmea (2021).

3.4.2 Definição das condições de processo

Definiu-se alguns parâmetros com estudos preliminares: dimensão do blanque inicial igual a 1100 x 900mm, a força do prensa chapas igual a 150 toneladas e a profundidade de 195mm.

Para avaliar a influência da variação da geometria do blanque na embutibilidade do aço SAE 1010 com e sem revestimento durante a fabricação de caçambas de carrinho de mão, foram propostas as condições exibidas na Tabela 5. O curso do martelo foi definido conforme profundidade da peça. A medição das diagonais também foi realizada para determinação do LDR ao final do processo. O embutimento foi realizado sem lubrificante nos dois materiais e a velocidade de solicitação imposta pela prensa de 13mm/s.

Tabela 5 – Planejamento do embutimento de caçambas

CONDIÇÃO	DIMENSÃO DO BLANQUE	DIAGONAL INICIAL	FORÇA DO PRENSA CHAPAS
A	1100 x 900mm	1421	150 t
B	1100 x 850mm	1390	150t
C	1000 x 900mm	1345	150t

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Foi realizada também marcação eletrolítica de malha circular (do = 10mm) em uma chapa de cada material na dimensão 1100 x 900 em regiões estratégicas para levantamento da curva limite de conformação a partir do embutimento em escala real de caçambas, como Figura 23 . As condições do embutimento foram mantidas.

Figura 23 – Corpos de prova para obtenção da CLC a partir do embutimento real



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

3.5 Estudo da embutibilidade

Para melhor entendimento da influência das variáveis de processo na embutibilidade do aço SAE 1010 com e sem galvanização GI-85, realizou-se a análise em regiões específicas do produto final a fim de determinar a mudança de espessura, a formação de rugas e o surgimento de regiões de falha (estricção ou fratura).

3.5.1 Variação da espessura ao longo da seção transversal

Para verificar o afinamento da chapa real após o embutimento industrial em cada peça, a deformação ϵ_3 foi determinada medindo pontualmente algumas regiões. Os valores de espessura foram medidos com auxílio de um conjunto de medição montado em fresadora CNC composto por um relógio comparador (precisão $\pm 0,01\text{mm}$) preso no mandril contra haste pontiaguda presa na mesa, conforme mostrado na Figura 24. Foram escolhidos doze pontos em diferentes seções da peça, como ilustrado na Figura 25.

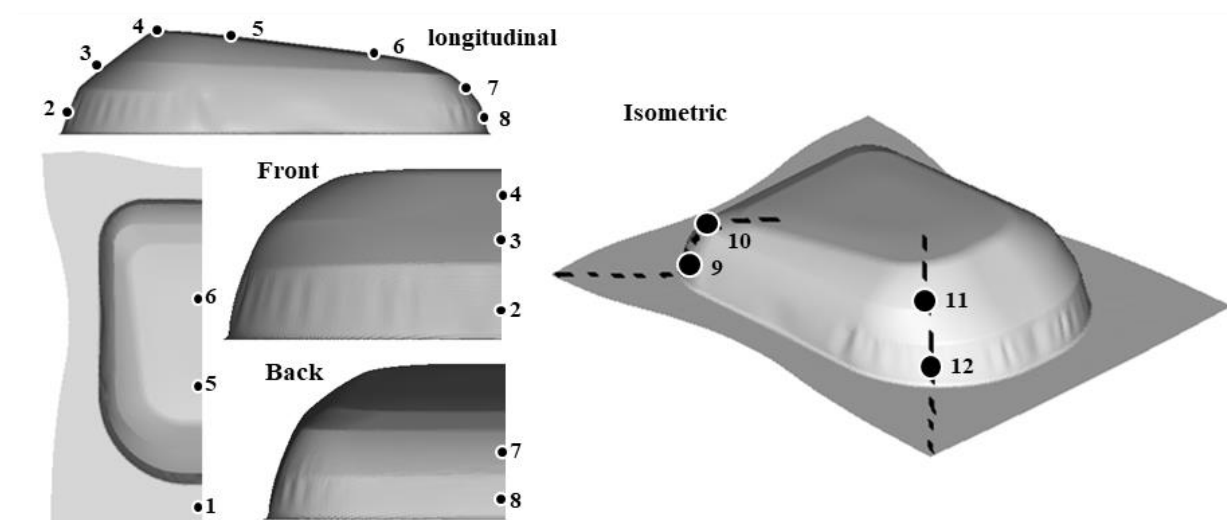
Figura 24 – Conjunto de medição montado em fresadora CNC



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A região de medição foi escolhida com cautela para evitar coincidência com rugas ou defeitos na peça que pudessem gerar erros. Para garantir a medida, foi incrementado 1,00mm no curso após o primeiro contato entre a ponta da haste e a ponta do relógio, sendo este definido como origem de medição. O valor de espessura em cada ponto definido foi anotado. A espessura da chapa inicial foi considerada uniforme para todas as regiões do blanque.

Figura 25 - Medição de espessura em diferentes pontos



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com base na teoria apresentada, espera-se que as regiões mais tracionadas sofram, estiramento localizado, ou seja, afinamento de parede. Estas regiões incluem a parte mais profunda da caçamba e as paredes laterais cujo raio de curvatura é grande (parte frontal). Ao contrário, na região da flange, espera-se ligeiro espessamento devido às tensões compressivas radiais.

3.5.2 Formação de rugas e estrição localizada

Devido às diferenças na profundidade e na geometria das partes frontal e traseira da caçamba, rugas são esperadas nas regiões em que o fluxo ocasionado pelas tensões trativas acontece com menor velocidade, ficando a região mais suscetível a deformações pelas solicitações compressivas. Um exemplo é a parte frontal da peça, em que o formato retangular do blanque dá origem a um formato arredondado. Neste caso, o fluxo do material acontece com mais dificuldade em relação as regiões laterais de simples dobra.

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1 Caracterização de materiais

Os aços utilizados foram caracterizados para validação das informações inerentes ao material, como composição química, tensões de escoamento e limite de resistência, além do coeficiente de encruamento espessura inicial estimada da camada formada pela galvanização.

4.1.1 Análise química

Os certificados de qualidade foram analisados quanto à composição química prevista nas normas (SAEJ403 e NBR7008) e os teores dos elementos principais foram organizadas na Tabela 6. Todos os aços apresentaram teores dos elementos analisados próximos ao exigido pela norma. De maneira geral, o aço SAE1010 é muito similar ao galvanizado, com maior variação no teor de alumínio.

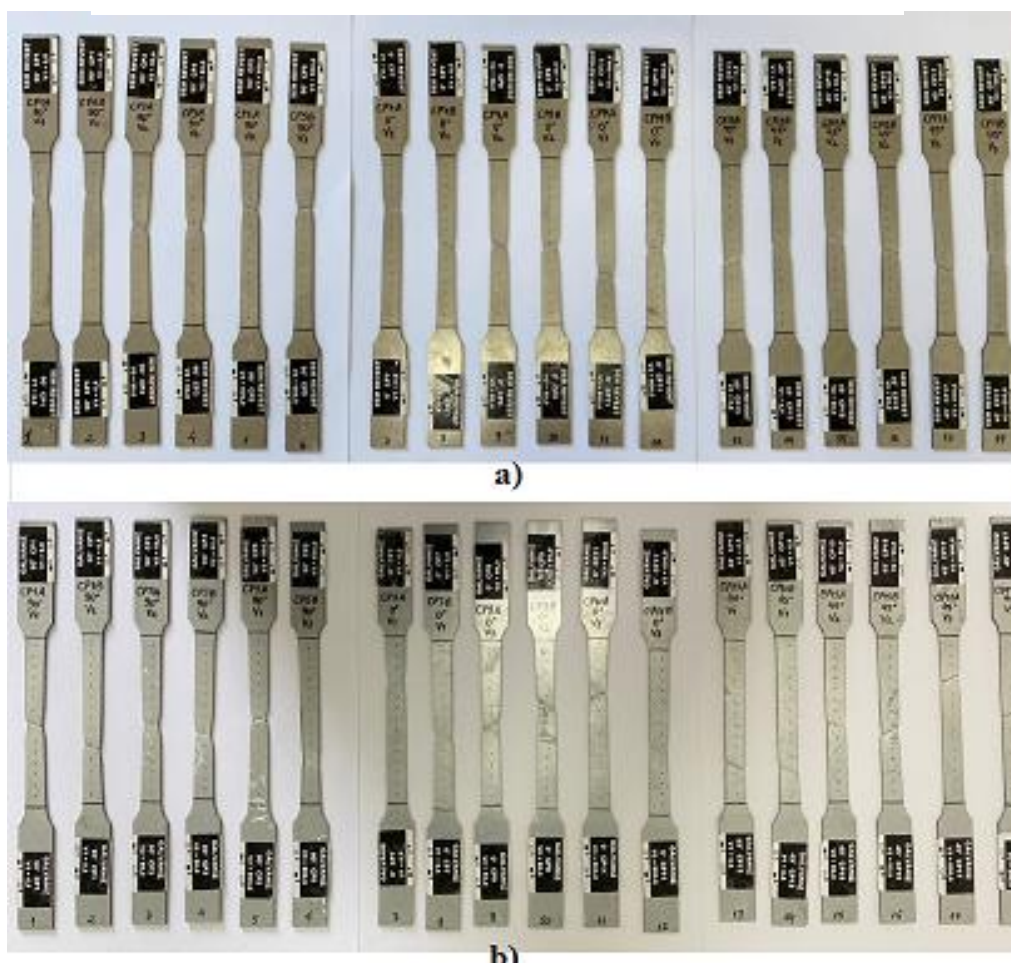
Tabela 6 - Caracterização do aço 1010 com e sem revestimento GI				
ESPECIFICAÇÃO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA			
	C	Mn	Al	P
SAEJ403 - 1010	0,04	0,20	0,037	0,015
ESPESSURA 1,20MM	0,03	0,21	0,037	0,010
NBR7008 (GI)	0,05	0,19	0,052	0,017
ESPESSURA 1,25MM	0,05	0,20	0,057	0,019

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.1.2 Ensaio de tração

As amostras pós ensaio de tração são exibidas na Figura 26 .

Figura 26 - Corpos de prova após ensaio de tração



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Foram determinadas as tensões e deformações de engenharia e verdadeiras, além do alongamento na fratura, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência, em velocidades diferentes (0,5, 50 e 500 mm/min) e a diferentes posições do sentido de laminação da chapa (0°, 45° e 90°).

Os gráficos 12, 13 e 14 de tensão e deformação verdadeiras são exibidos de acordo com a direção escolhida, tanto para o material sem revestimento (SR) quanto com revestimento (CR). Nos aços sem revestimento, os gráficos exibiram escoamento nítido, sem patamar. No material revestido, houve maior resistência ao escoamento e surgimento de um patamar, que pode estar associado a um fenômeno conhecido como banda de Lüders, ou seja, uma região de transição descontínua entre o regime elástico e o regime plástico. Uma hipótese para a existência deste patamar seria o destacamento do revestimento à medida que o material deforma, permitindo com que a deformação aconteça nos planos de escorregamento preferenciais sem incremento de tensão. Outra hipótese está relacionada à possibilidade de

ocorrência do fenômeno de envelhecimento por deformação ativado pela temperatura do banho no processo de galvanização. Como descrito na seção 2.2.6, pode ter ocorrido difusão e ancoragem das discordâncias pelos átomos em solução sólida intersticial (carbono e nitrogênio) e, com isso, elevação do limite de escoamento e surgimento do patamar de escoamento (banda de Luders).

Gráfico 12 - Gráfico tensão x deformação verdadeiras 90°

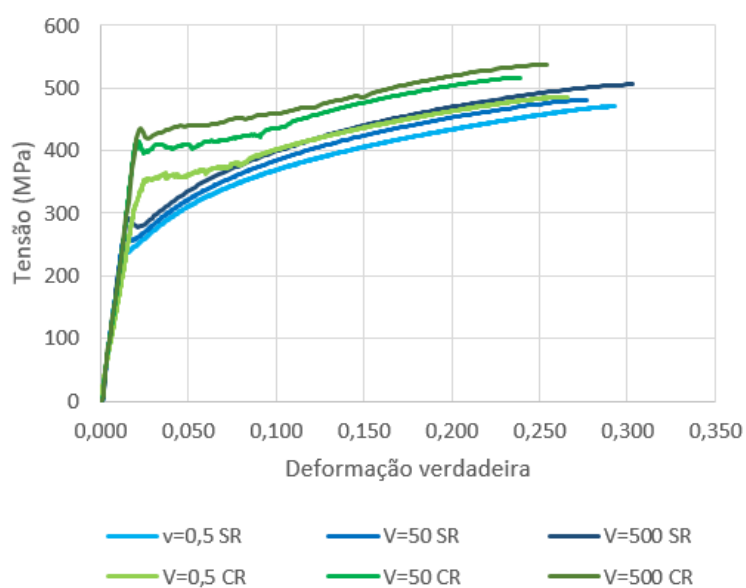


Gráfico 13 - Gráfico tensão x deformação verdadeiras 45°

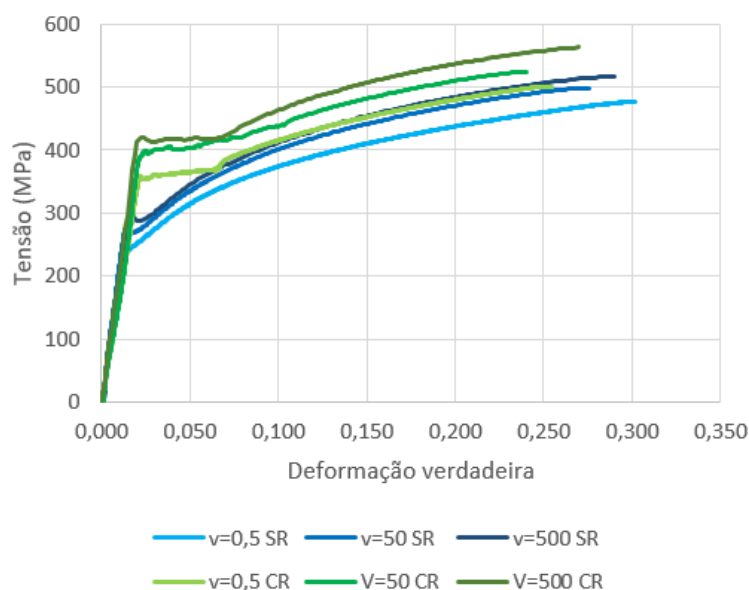
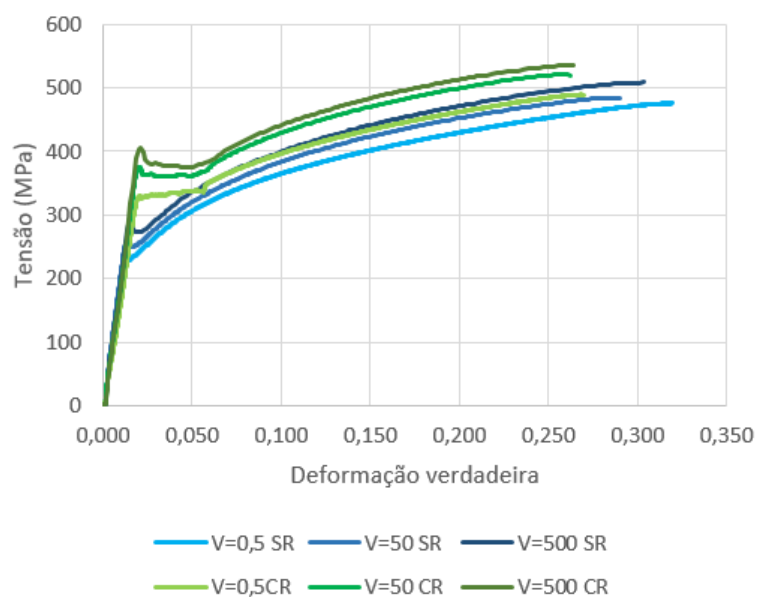


Gráfico 14 - Gráfico tensão x deformação verdadeiras 0°

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As tabelas com os valores médios obtidos de tensão de escoamento (σ_e) e limite de resistência à tração (σ_{LRT}), alongamento na fratura (A), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (K) são apresentados nas tabelas 7 e 8. O aço sem revestimento e o aço galvanizado foram identificados como SR e CR, respectivamente. Os dados completos encontram-se no Apêndice 1.

Tabela 7 – Dados obtidos pelo ensaio de tração variando velocidade de deformação

MATERIAL	VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO (MM/MIN)	σ_e (MPa)	σ_{LRT} (MPa)	A %	n	K (MPa)
SR	0,5	231	357	34,5	0,241	639
CR	0,5	340	381	30,9	0,208	669
SR	50	257	374	32,7	0,247	684
CR	50	363	396	28,8	0,209	697
SR	500	285	386	34,5	0,241	700
CR	500	388	407	31,6	0,206	727

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 8 – Dados obtidos pelo ensaio de tração variando a direção de laminação

MATERIAL	DIREÇÃO (°)	σ_e (MPa)	σ_{LRT} (MPa)	A %	n	K (MPa)
SR	0	250	371	34,7	0,246	671
CR	0	349	390	31,1	0,220	699
SR	45	269	386	31,7	0,243	686
CR	45	363	404	30,2	0,209	704
SR	90	257	371	34,1	0,240	666
CR	90	374	393	30,3	0,196	690

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

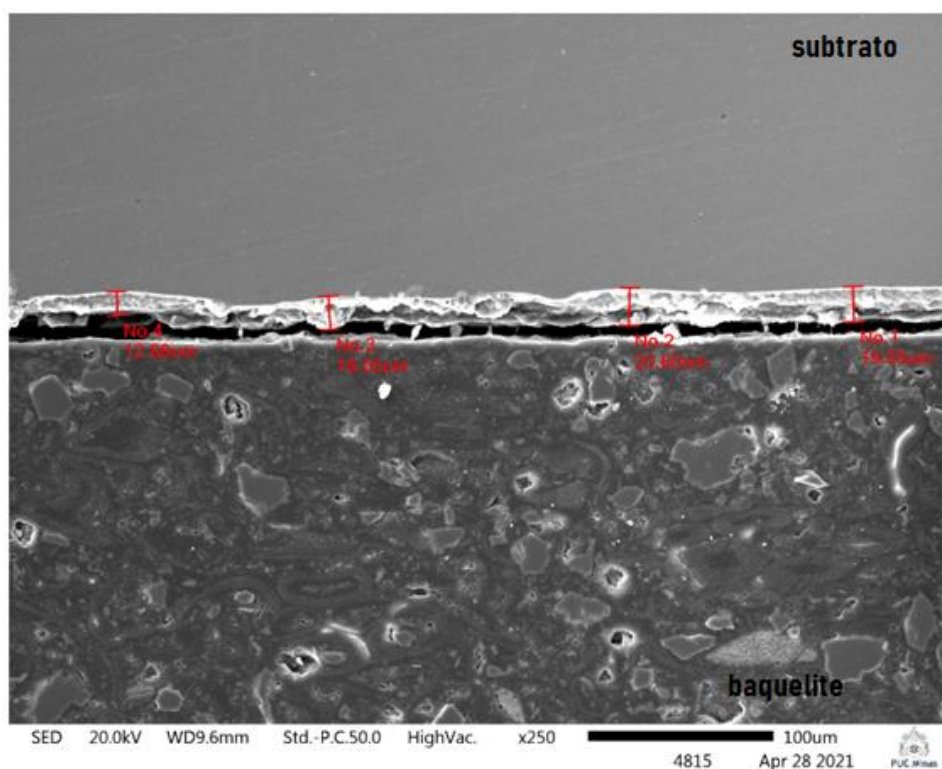
Pode-se perceber que para um mesmo material, houve aumento da tensão de escoamento com o aumento da taxa de deformação, 23% para o aço sem revestimento e 14% para o galvanizado, comparando as velocidades 0,5 e 500mm/min. Neste caso, o curto tempo de deformação não possibilita o rearranjo ideal das discordâncias na rede cristalina do material, por isso o aumento de resistência. Este comportamento também foi observado na tensão última de tração e no coeficiente de resistência, porém em menor magnitude. O ganho no limite de resistência à tração para o aço sem revestimento foi de 8% e para o galvanizado de 7%. Já no coeficiente de resistência, houve aumento de 9,5% e 8,7%, respectivamente. Não foi possível observar nenhuma tendência para o alongamento na fratura, nem para o coeficiente de encruamento. Valores mais elevados nas tensões foram obtidos para a direção 45°.

O material galvanizado apresentou maior resistência ao escoamento em relação ao sem revestimento para uma mesma velocidade. Para a taxa de deformação mais baixa, a tensão de escoamento aumentou 47%. Para a mais alta, o ganho foi de 36%. O efeito na resistência à tração também foi positivo, mas bem menos influente. O aumento médio foi de 6%. Porém, a embutibilidade foi reduzida, observada pela redução em 16% do coeficiente de encruamento médio. Os valores dos coeficientes de resistência apresentaram variação máxima de 4,5%. O coeficiente de Lankford médio foi obtido para os dois materiais, como exibido no Apêndice 2. O valor de $\bar{R}$ foi 0,53 e 0,45 para o aço galvanizado. Como mencionado no referencial teórico, espera-se que quanto maior o $\bar{R}$, maior a conformabilidade do material. Wang *et al.* (2015) avaliaram que elevados valores de “n” e “K” melhoraram a uniformidade de deformação em chapas sobrepostas e aumentaram o limite de conformabilidade.

4.1.3 Análise do revestimento GI-85

Foi realizada análise no microscópio eletrônico de varredura em um dos lados da chapa galvanizada para determinação da espessura média da camada de revestimento, como exibido na Figura 27. A camada média encontrada foi de 17,65 μ m, dentro do valor teórico esperado. Além disso, é possível verificar de forma qualitativa que a camada de zinco puro teve boa adesão ao substrato e apresentou pouca porosidade, porém seria necessária uma imagem com maior ampliação para afirmação da isenção de defeitos.

Figura 27 – Camada do revestimento GI-85 no aço SAE 1010



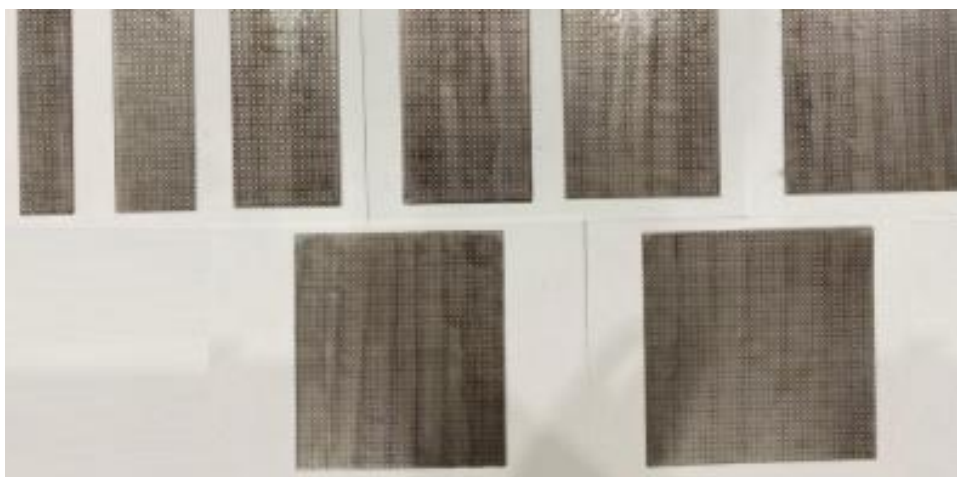
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2 Ensaio Nakazima

As peças com marcação eletrolítica antes e depois do ensaio Nakazima são exibidas nesta seção (Figuras 28, 29, 30 e 31). A profundidade obtida em cada peça foi registrada na Tabela 9. Pode-se dizer que não houve diferença significativa nesta medida entre o aço galvanizado e o sem revestimento, ou seja, por este parâmetro obtido pelo Nakazima não é possível afirmar ganho ou perda na embutibilidade do aço devido ao revestimento de zinco

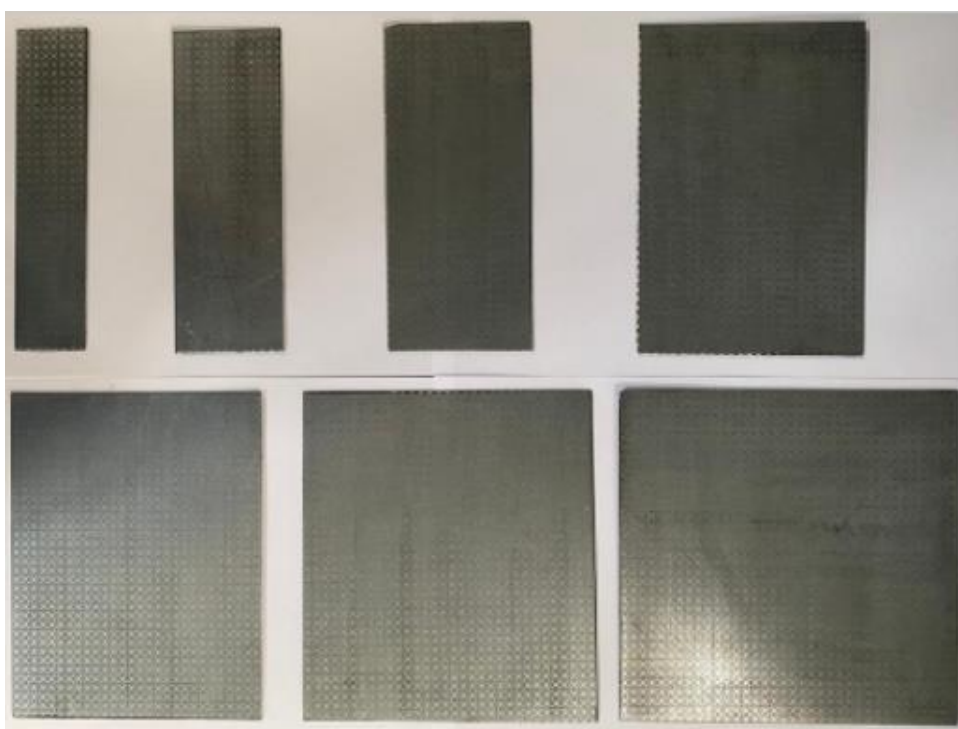
puro. A Figura 32 mostra a comparação de profundidade obtida entre materiais nos corpos de prova mais estreitos.

Figura 28 – CP's do aço sem revestimento antes do ensaio Nakazima



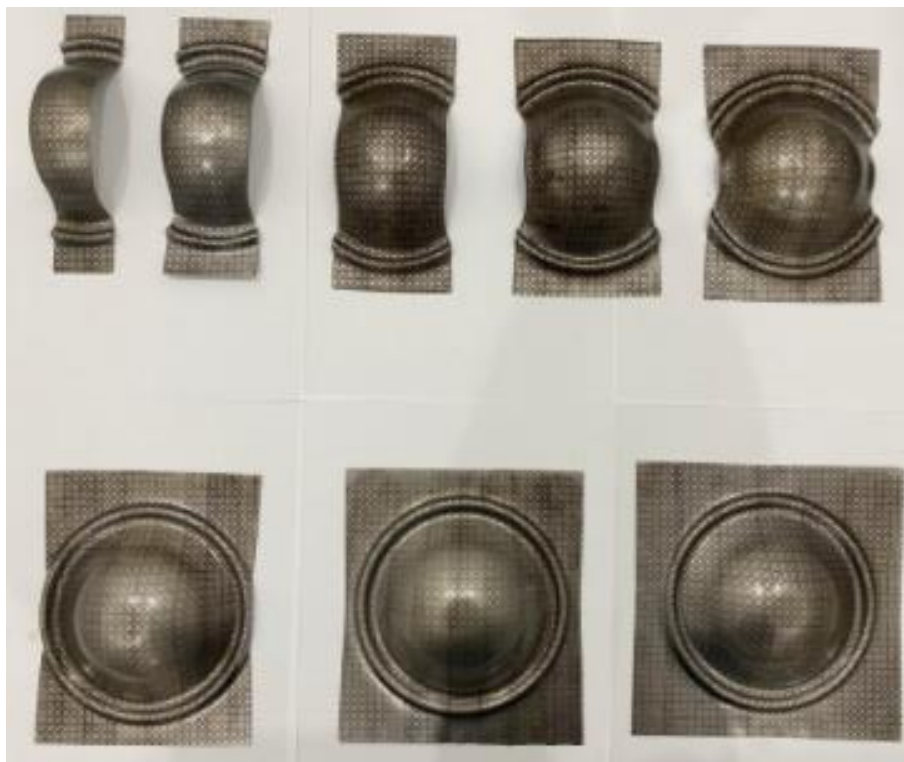
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 29 – CP's do aço com revestimento antes do ensaio Nakazima



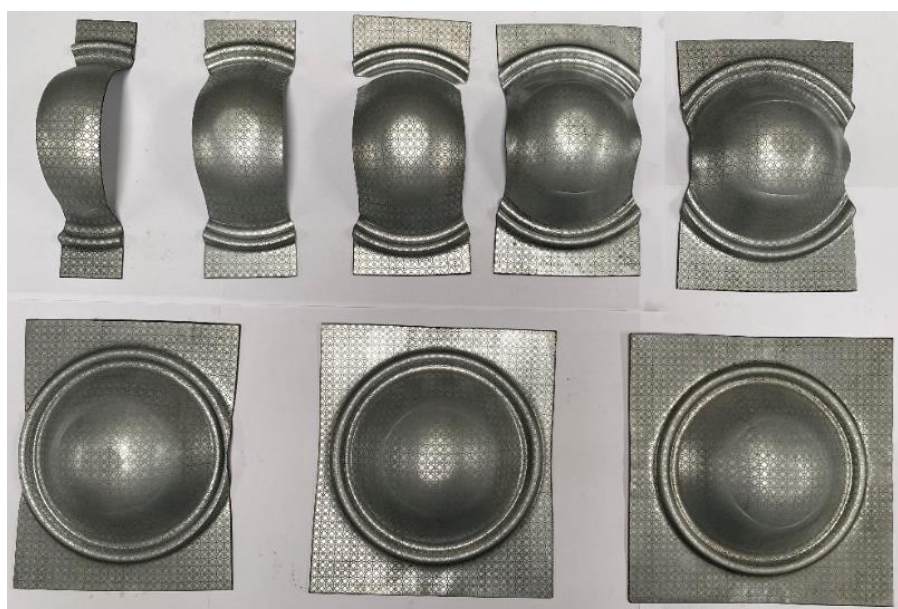
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 31 - CP's do aço sem revestimento após ensaio Nakazima



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 30 - CP's do aço com revestimento após ensaio Nakazima

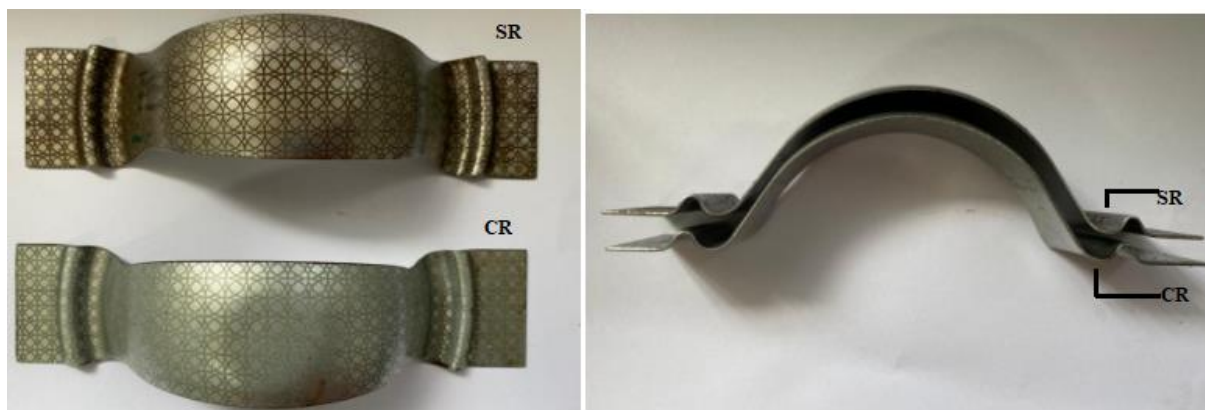


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 9 - Profundidades obtidas pelo ensaio de tração

CORPO DE PROVA	SEM REVESTIMENTO (MM)	GALVANIZADO (MM)
40 X 180	39	39
60 X 180	36	35
80 X 180	33	36
100 X 180	33	35
120 X 180	32	32
140 X 180	33	33
160 X 180	33	34
180 X 180	32	32

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 32 - Profundidade obtida nos corpos de prova 40x180 com e sem revestimento

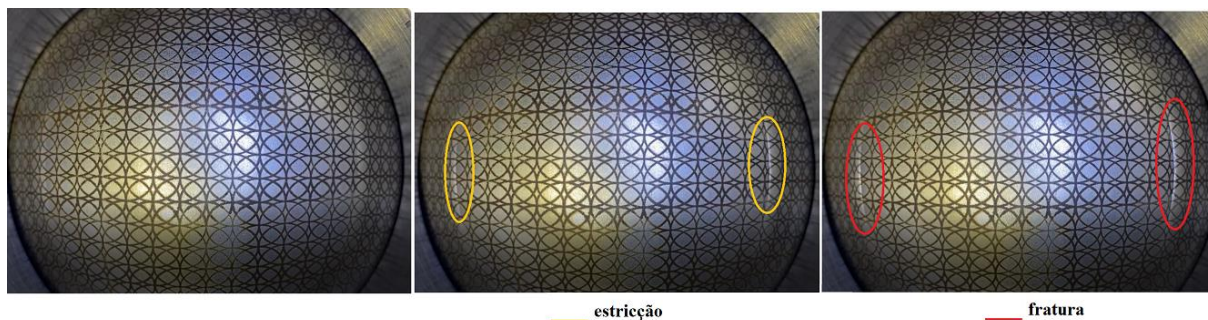
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Foram obtidas maiores profundidades para as peças mais estreitas, especialmente com 40 e 60mm. Isto porque uma porção lateral dos corpos de prova mais estreitos que o diâmetro do “draw bed” ofereceu certa liberdade para o material se deformar, tendendo a promover um esforço uniaxial de tração, gerando assim um maior alongamento do corpo de prova no sentido do comprimento (longitudinal) e uma redução na largura (transversal), além da formação de rugas. As menores larguras deram origem a pontos no quadrante compressivo do diagrama enquanto as peças maiores exibiram apenas deformações trativas.

Uma câmera posicionada abaixo da matriz durante o ensaio Nakazima possibilitou a ampliação local da região de início da estrição e permitiu a visualização da trinca, como exibido na Figura 33. À esquerda, nenhuma falha pode ser detectada. À medida que o punção se aproximou da profundidade limite, surgiram duas trincas em lados opostos que foram

considerados como estrição. Num próximo incremento de força, essas fissuras se abriram e foram consideradas como fraturas. Os dados obtidos das deformações dos corpos de prova são apresentados no Apêndice 3.

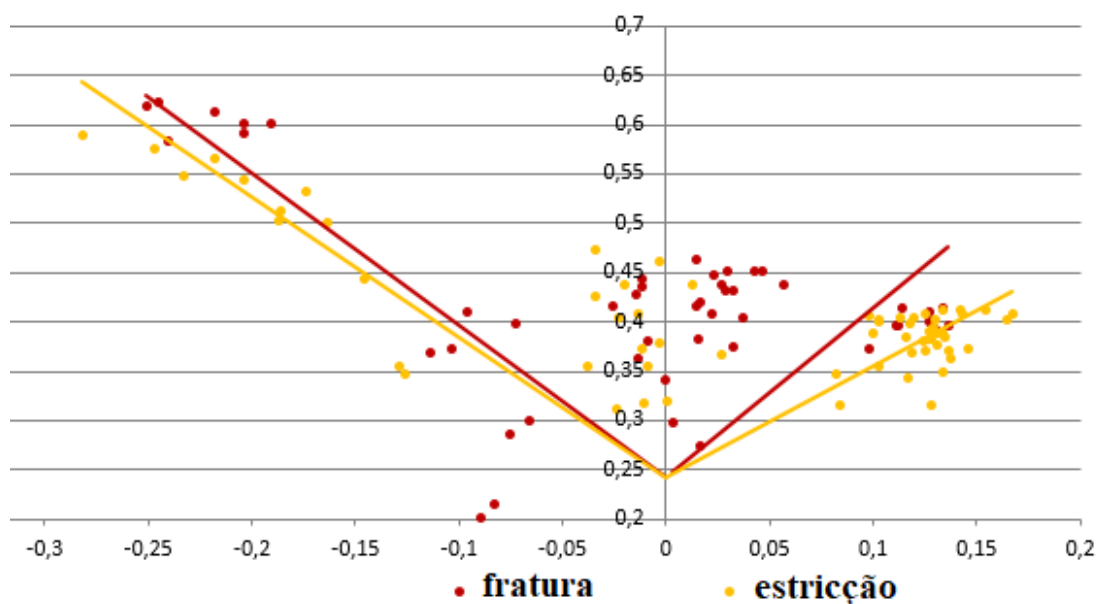
Figura 33 - Detecção de estrição e fratura durante ensaio Nakazima



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

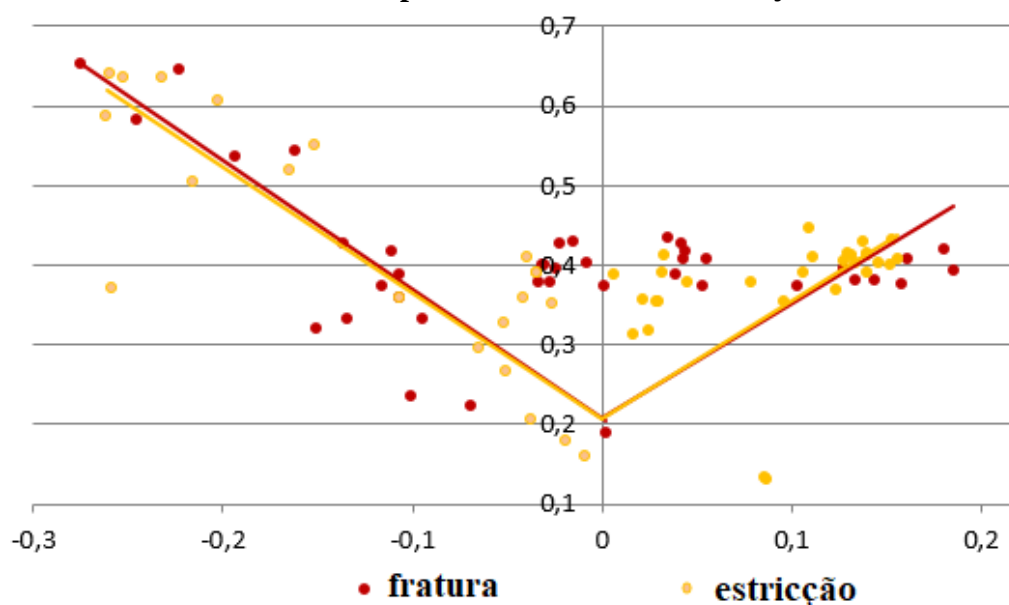
As curvas limite de conformação do aço sem revestimento e do aço galvanizado foram plotadas (CLC-E e CLC-F) a partir dos respectivos coeficientes de encruamento médios iguais a 0,242 e 0,208, como pode ser visto nos gráficos 15 e 16. Como esperado, a curva de falha por estrição ficou abaixo da curva de falha por fratura para o aço SAE 1010. No aço galvanizado isso não ocorreu, pois houve sobreposição das curvas. Uma hipótese pode ser o aumento da tensão de escoamento com o revestimento, fazendo com que a falha por estrição fique menos visível no ensaio devido à proximidade entre as tensões de escoamento e ruptura.

Gráfico 15 - Curva CLC obtida pelo ensaio Nakazima para o aço sem revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

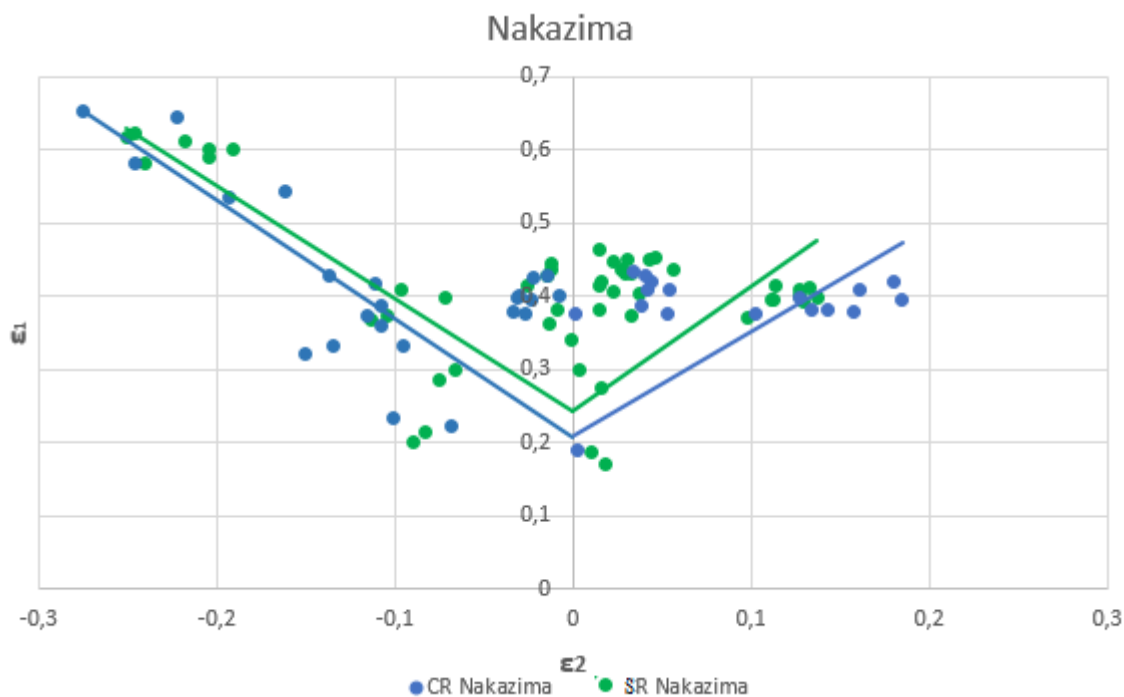
Gráfico 16 - Curva CLC obtida pelo ensaio Nakazima do aço com revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O Gráfico 17 exibe a falha dos dois aços por fratura pelo ensaio Nakazima. Pode-se dizer que o aço galvanizado apresentou menor estampabilidade, pois a magnitude das deformações limite apresentadas foram menores. Uma hipótese levantada no referencial teórico está relacionada à fragilidade da camada remanescente frágil existente entre o revestimento de zinco puro e o substrato deixada pelo processo de galvanização por imersão a quente. Sendo assim, haveria destacamento ou trinca desta camada e, com isso, menor limite de ruptura. Porém não houve identificação de trincas durante inspeção visual realizada para comprovação dessa hipótese.

Gráfico 17 - Curvas CLC-F dos aços com e sem revestimento

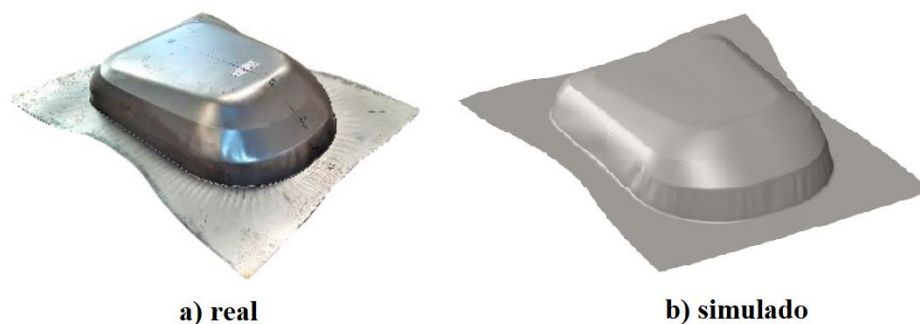


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3 Simulação e embutimento industrial

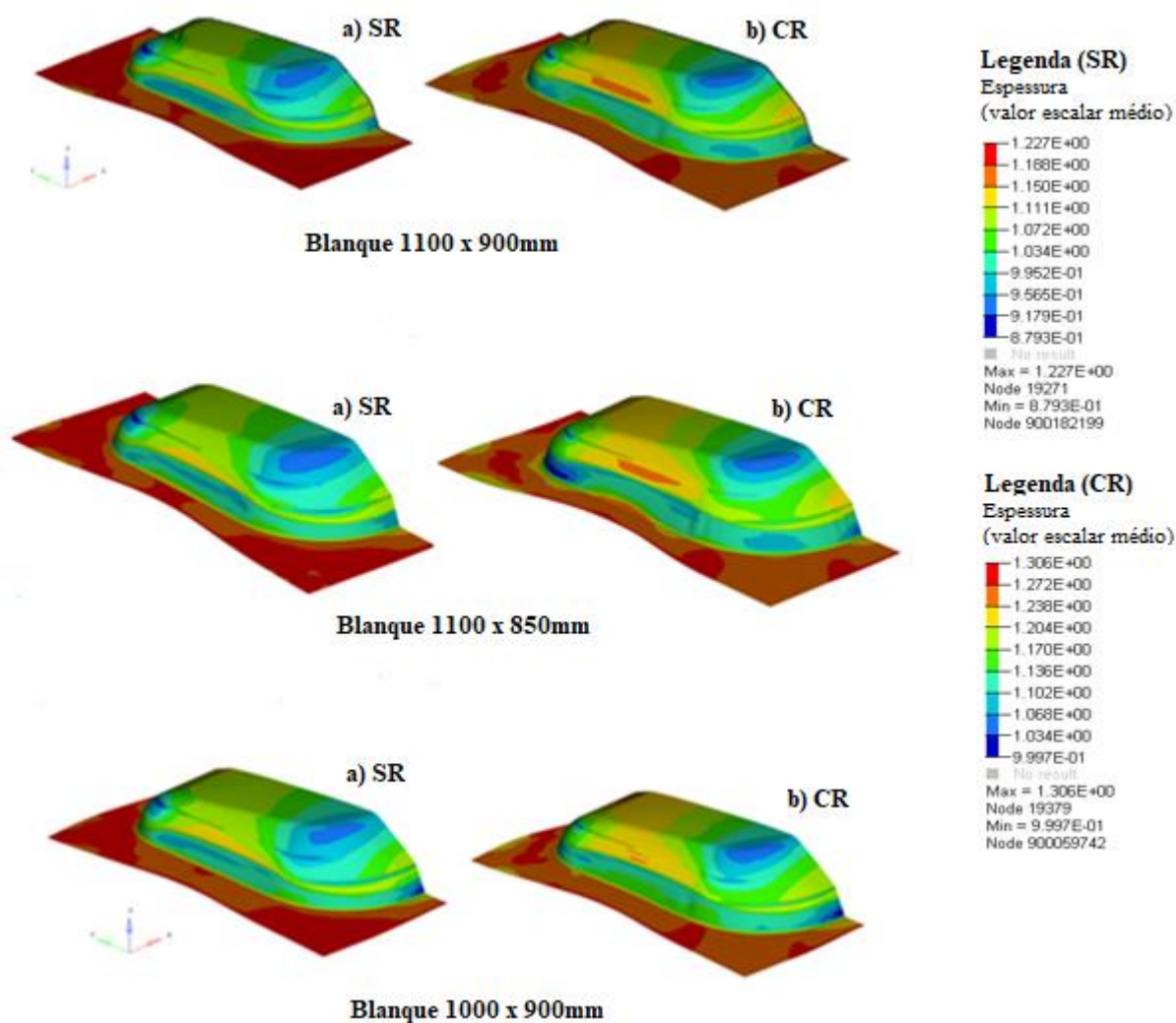
A primeira simulação foi feita com geometria total do carrinho, ou seja, não foi utilizado a opção de simetria. O aço sem revestimento foi utilizado, com coeficiente de atrito igual a 0,125, branco 1100 x 900mm e 150 toneladas força. Como apresentado na Figura 34, o formato da peça obtida foi similar ao do embutimento real, inclusive nos detalhes de rugas frontais e redução lateral das abas. As peças simuladas em simetria com força de prensa chapas igual a 150 toneladas-força e brancos variados, com coeficiente de atrito igual a 0,125 para aços sem revestimento e 0,1 para galvanizados GI-85 são exibidas na Figura 35.

Figura 34 - Comparativo entre caçamba real e simulada



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 35 - Caçambas obtidas por simulação numérica

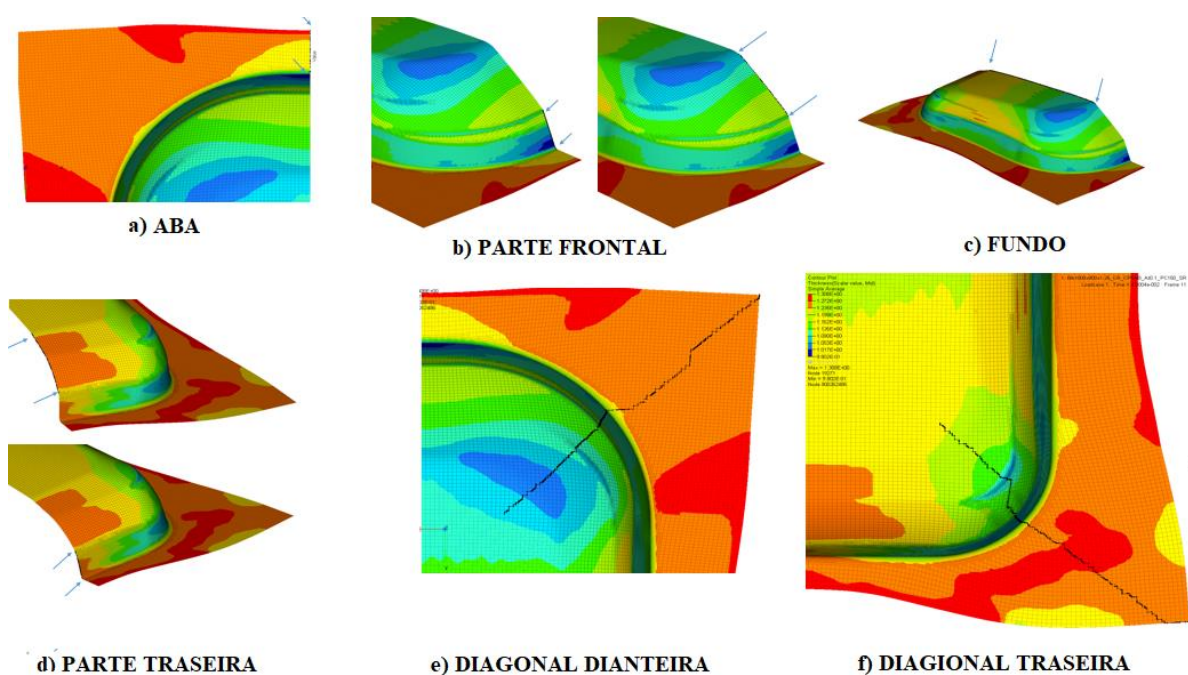


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Avaliando as caçambas simuladas, as cores das abas apresentadas estão majoritariamente vermelhas e alaranjadas, representando espessuras maiores do que as iniciais do blanche, como pode ser observado na legenda que indica espessura média obtida numa escala de cores. Nas regiões em que a ferramenta submete o material a dobras severas, houve afinamento considerável, como nas quinas arredondadas laterais traseiras e na parte mais profunda dianteira da peça. O estiramento também foi detectado na parede das caçambas mais próximas às abas, o que pode ser relacionado à última etapa do embutimento, em que a chapa já vestiu o macho quase completamente e é tracionada para deformar-se até atingir a altura final estipulada. É visível também maior intensidade de deformação na região frontal das peças conformadas com blanques menores (1100 x 850 e 1000 x 900), porém sem rugas de grande amplitude.

Com auxílio de uma ferramenta de corte do software HyperForm, foi possível determinar espessuras na seção transversal e longitudinal e demais regiões, como aba dianteira (ponto 1), parte frontal (pontos 2,3 e 4), fundo (pontos 5 e 6), parte traseira (pontos 7 e 8), diagonal dianteira (pontos 11 e 12) e diagonal traseira (pontos 9 e 10), como exibido na Figura 36. Os pontos selecionados para análise de espessura foram apresentados na Figura 25 durante a metodologia.

Figura 36 - Regiões de análise da variação da espessura



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para levantamento da curva limite de conformação pelo embutimento real de caçambas, não foi possível diferenciar a estricção entre a região sadia e a fraturada. Desta forma, foi obtida apenas a curva CLC-F das peças embutidas com blanche 1100 X 900mm.

Os Gráfico 18 e Gráfico 19 exibem a curva CLC-F obtidas pelo Nakazima e na conformação de caçambas na prática.

Gráfico 18 - Curvas CLC-F obtidas pelo ensaio Nakazima e pelo embutimento real para o aço com revestimento

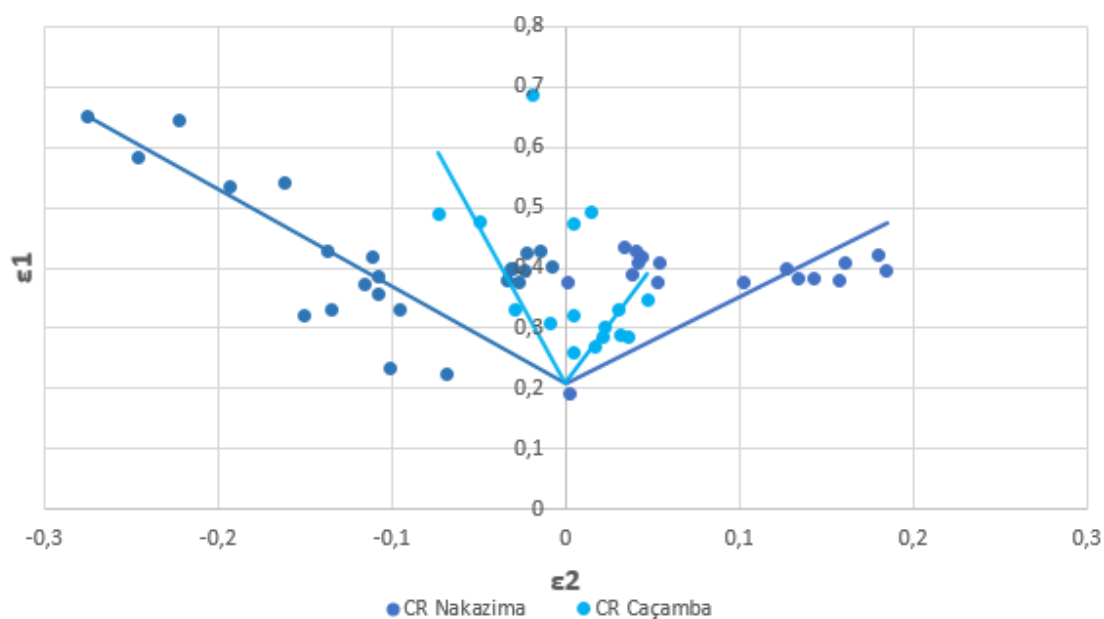
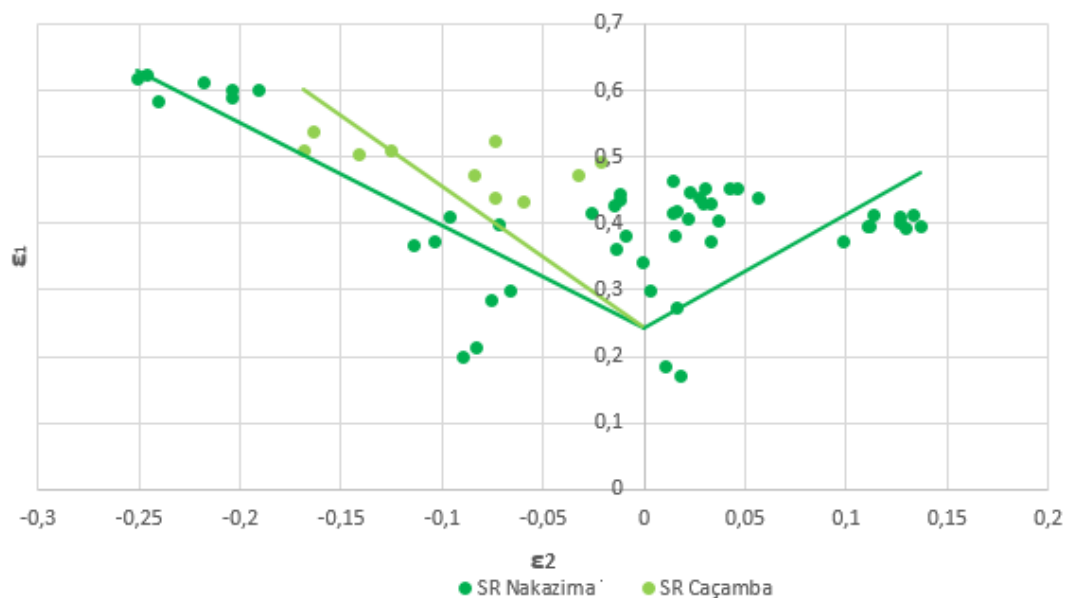


Gráfico 19 - Curvas CLC-F obtidas pelo ensaio Nakazima e pelo embutimento real para o aço sem revestimento



Os resultados referentes as curvas que foram obtidas mostram que o ensaio Nakazima para as condições que foram impostas nesse estudo pode prever a falha dos materiais no processo de fabricação de caçambas em chapa fina, porém de forma qualitativa, devido à variação considerável entre as curvas limite obtidas. No aço sem revestimento a proximidade

foi maior entre as curvas, porém foram detectadas apenas deformações compressivas no ensaio em escala real (características de embutimento profundo), reduzindo a região de análise ao quadrante esquerdo do diagrama. As caçambas obtidas pelo embutimento em escala real são exibidas nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42.

Figura 38 - Blanque 1000 x 900 sem revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 37 - Blanque 1100 x 900 com revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 39 - Blanque 1100 x 850 sem revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 40 - Blanque 1100 x 900 sem revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 41 - Blanque 1100 x 850 com revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 42 - Blanque 1000 x 900 com revestimento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As peças obtidas com blanque 1100 x 900mm atingiram o nível de qualidade almejado nos dois materiais. Percebeu-se formação de rugas durante o embutimento, principalmente na região frontal, que foram ocasionadas pelas tensões radiais compressivas impostas ao material para se moldar ao macho arredondado. Nas situações em que o blanque foi reduzido no sentido longitudinal (Figuras 37 e 42), a amplitude das rugas foi bem mais intensa. Este fenômeno ocorreu pela redução frontal da aba, promovendo menor apoio pelo prensa chapas e consequentemente maior intensidade de tensões compressivas, principalmente ao final do processo.

Foi possível perceber pelo formato final da aba nas regiões de simples dobra (laterais e fundo) que o material se movimentou com maior velocidade para dentro da matriz. Algumas peças fraturaram, sempre na região traseira da caçamba. Como esperado, na região das quinas, em que o formato precisa passar de retangular para arredondado, há maior impedimento do fluxo metálico. Além disso, a imposição de dobras mais severas que intensificam o afinamento da chapa, principalmente na situação em que o blanque foi reduzido no sentido transversal (Figura 39 e 41). A ocorrência das falhas por fratura pode estar relacionada às seguintes causas:

- a) o material excedeu o limite de embutimento, ou seja, a profundidade escolhida é maior do que a condição limite do material;
- b) as condições de atrito entre blanque/punção e entre prensa chapas/blanque prejudicaram o fluxo metálico durante o processo, promovendo a fratura precoce, antes de atingir a razão de embutimento (LDR) estimada;
- c) A força do prensa chapas foi superior à necessária.

As flanges sofreram ligeiro enrugamento, em toda sua extensão. Esse fato indica que a força do prensa chapas de 150 toneladas permitiu a formação de rugas durante o embutimento, anulando a hipótese c. Há possibilidade de eliminar essas rugas aumentando a força do prensa, porém existe o risco do travamento excessivo da chapa como um todo, impedimento a conformação de acontecer por embutimento. Para melhor investigação da hipótese a e b, as medições das diagonais assim como o desenvolvimento das peças nos sentidos longitudinal e transversal foram organizadas na Tabela 10. Foi determinada a variação de cada uma delas (em mm), como mostrado na Tabela 11. Em todos os casos houve menor variação da diagonal e dos desenvolvimentos transversal e longitudinal do aço galvanizado em relação ao sem revestimento, ou seja, o material galvanizado foi menos deformado. Este fato está relacionado à presença do revestimento que, ao propiciar aumento no escoamento do material, diminui a janela de conformação do aço, reduzindo sua

embutibilidade. A razão de embutimento (LDR) em peças conformadas a partir de blanques retangulares é dada pela razão entre o desenvolvimento das diagonais e, para o aço SAE 1010, o valor esperado é em torno de 1,2. A partir disso, pode-se dizer que a fratura ocorreu antes da condição limite esperada. Este fato valida a hipótese b em que ocorre a fratura precoce.

Tabela 10 – Medições das diagonais das caçambas, em mm

MATERIAL	DIMENSÃO DO BLANQUE	DIAGONAL INICIAL	DIAGONAL FINAL	TRANSVERSAL	LONGITUDINAL
SR	1100 x 900	1421	1630	936	1257
CR	1100 x 900	1421	1522	931	1139
SR	1100 x 850	1390	1496	874	1163
CR	1100 x 850	1390	1475	865	1151
SR	1000 X 900	1345	1454	936	1032
CR	1000 X 900	1345	1435	925	1025

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 11 - Obtenção do LDR das caçambas

MATERIAL	DIMENSÃO DO BLANQUE	ROMPEU?	RELAÇÃO DE EMBUTIMENTO (LDR)	VARIAÇÃO TRANSVERSAL	VARIAÇÃO LONGITUDINAL
SR	1100 x 900	Não	1,15	4,0%	14,3%
CR	1100 x 900	Não	1,07	3,4%	3,5%
SR	1100 x 850	Sim	1,08	2,8%	5,7%
CR	1100 x 850	Não	1,06	1,8%	4,6%
SR	1000 X 900	Sim	1,08	4,0%	3,2%
CR	1000 X 900	Não	1,07	2,8%	2,5%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A medida do blanco 1100 x 900mm foi considerada como ótima para o embutimento em questão. Os blanques com dimensões 1100x850mm e 1000x900mm foram considerados inapropriados para a fabricação das caçambas. Além disso, pode-se dizer que a redução no comprimento tem maior impacto na falha do material do que a redução na largura. A conformabilidade do aço 1010 com revestimento foi maior que o galvanizado na fabricação real de caçambas, o que vai contra o esperado pelas curvas limite obtidas em laboratório. Uma hipótese está na possibilidade de o material ter corrido com facilidade (maior embutimento)

devido à redução no coeficiente de atrito pela presença do revestimento de zinco, o que pode ser comprovado pela menor variação transversal e longitudinal das peças obtidas (menor estiramento) comparado ao material sem revestimento. Vale lembrar que a diferença nas condições de atrito entre o ensaio Nakazima e o embutimento de caçambas de carrinho de mão resultam em discrepâncias na deformação das chapas durante a execução do processo e tem grande influência no limite de conformabilidade dos materiais. A partir da inspeção visual das caçambas, riscos aparentes na superfície das peças galvanizadas foram identificados (Figuras 38, 41 e 42), que podem comprometer a resistência à corrosão do material e demandar pintura. Sendo assim, o material sem revestimento foi escolhido como preferencial para embutimento real de caçambas, mesmo apresentando menor conformabilidade.

Os valores de espessura obtidos foram organizados nas Tabelas 12 e 13 juntamente com as determinadas empiricamente, conforme metodologia. A medição do ponto 8 não pode ser realizada devido à dimensão da peça quando montada no esquema na fresa. A variação de espessura encontrado entre a simulação e o real é mostrada na Tabela 14. Houve maior alteração da espessura média nos aços sem revestimento (de 1,19 para 1,13mm) em relação aos galvanizados (de 1,26 para 1,22mm) nas medições reais. Já as espessuras médias simuladas seguiram o mesmo comportamento, cujas espessuras médias foram 1,05 e 1,14, respectivamente.

Tabela 12 – Espessuras obtidas pelos embutimentos reais e simulados para o aço SR

MATERIAL	PONTO	1100 X 900 REAL	1100 X 900 SIMULADO	1100 X 850 REAL	1100 X 850 SIMULADO	1000 X 900 REAL	1000 X 900 SIMULADO
SEM REVESTIMENTO	1	1,225	1,178	1,250	1,150	1,325	1,178
	2	1,192	1,030	1,150	1,033	1,200	1,000
	3	1,125	1,090	1,175	1,056	1,150	1,040
	4	1,100	1,010	1,125	0,965	1,125	0,975
	5	1,150	1,000	1,125	1,010	1,175	1,034
	6	1,175	1,084	1,175	1,095	1,200	1,092
	7	1,175	1,125	1,150	1,113	1,175	1,150
	8	-	1,020	-	1,055	-	1,095
	9	0,930	1,018	0,875	1,020	0,925	1,025
	10	1,150	0,979	1,150	1,189	1,125	1,015
	11	1,170	0,985	1,130	1,020	1,150	1,020
	12	1,100	1,102	1,100	1,075	1,00	1,055
	t0=1,19	1,14	1,04	1,13	1,07	1,13	1,05

Tabela 13 – Espessuras obtidas pelos embutimentos reais e simulados para o aço CR

MATERIAL	PONTO	1100 X 900 REAL	1100 X 900 SIMULADO	1100 X 850 REAL	1100 X 850 SIMULADO	1000 X 900 REAL	1000 X 900 SIMULADO
GALVANIZADO	1	1,300	1,260	1,350	1,262	1,300	1,223
	2	1,200	1,128	1,200	1,133	1,225	1,065
	3	1,250	1,199	1,225	1,187	1,250	1,162
	4	1,175	1,110	1,150	1,082	1,175	1,075
	5	1,200	1,109	1,225	1,136	1,225	1,144
	6	1,250	1,222	1,250	1,221	1,275	1,213
	7	1,250	1,234	1,250	1,239	1,275	1,237
	8	-	1,163	-	1,190	-	1,232
	9	1,050	1,145	1,150	1,073	1,225	1,063
	10	1,225	1,234	1,200	1,150	1,250	1,144
	11	1,200	1,092	1,200	1,150	1,225	1,108
	12	1,175	1,180	1,200	1,088	1,300	1,090
	t0=1,26	1,20	1,14	1,22	1,16	1,25	1,14

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

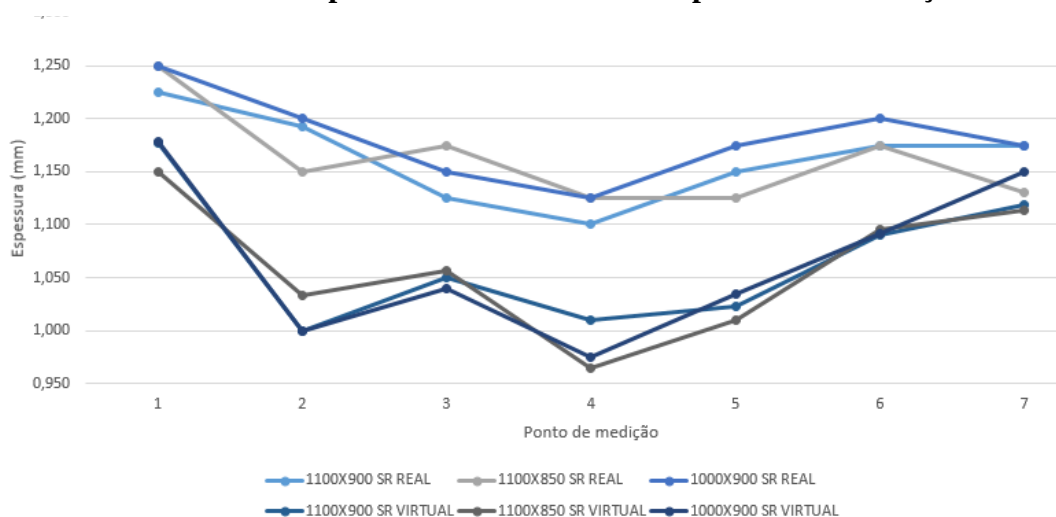
Tabela 14 - Análise da variação de espessura geral

SEM REVESTIMENTO				COM REVESTIMENTO		
PONTO	1100 X 900	1100 X 850	1000 X 900	1100 X 900	1100 X 850	1000 X 900
1	-3,9%	-8,0%	-5,8%	-3,4%	-6,5%	-5,9%
2	-16,1%	-10,2%	-16,7%	-6,0%	-5,6%	-13,1%
3	-6,7%	-10,1%	-9,6%	-6,5%	-3,1%	-7,0%
4	-8,2%	-14,2%	-13,3%	-8,3%	-5,9%	-8,5%
5	-11,0%	-10,2%	-12,0%	-6,1%	-7,3%	-6,6%
6	-7,2%	-6,8%	-9,0%	-7,1%	-2,3%	-4,9%
7	-4,8%	-1,5%	-2,1%	-1,3%	-0,9%	-3,0%
9	11,8%	16,6%	10,8%	2,4%	-6,7%	-13,2%
10	-11,3%	3,4%	-9,8%	-10,2%	-4,2%	-8,5%
11	-14,5%	-9,7%	-11,3%	-7,1%	-4,2%	-9,6%
12	-15,5%	-2,3%	5,5%	-7,4%	-9,3%	-16,2%
MÉDIA	-7,9%	-4,8%	-6,7%	-5,5%	-5,1%	-8,8%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

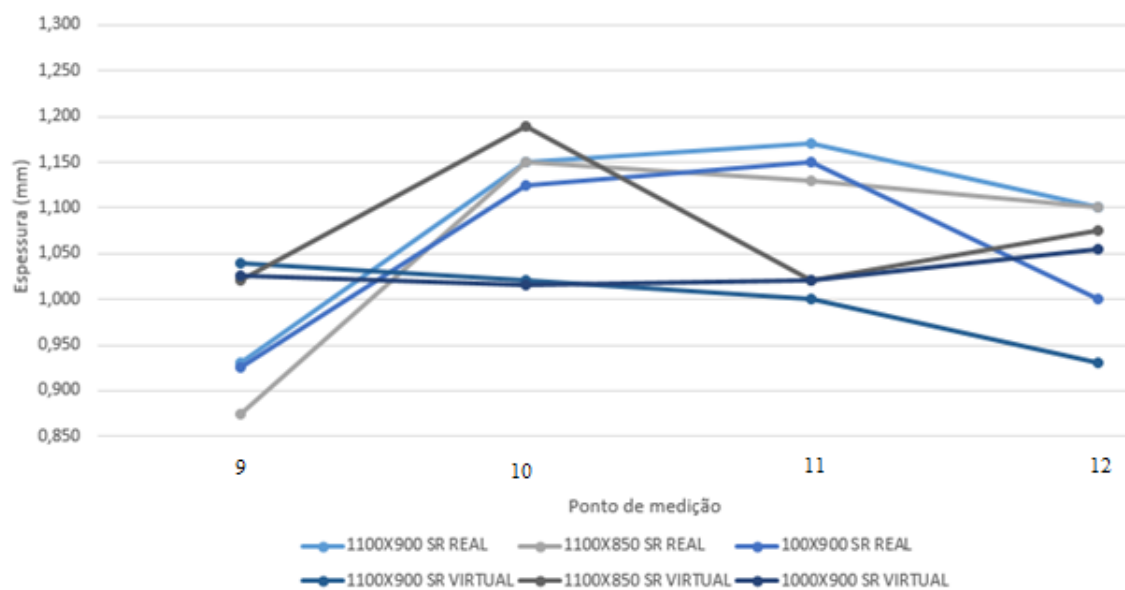
Alguns gráficos foram gerados para ilustrar a variação de espessura longitudinal e nas laterais na direção diagonal traseira e dianteira. Os gráficos 20 e 21 referem-se às caçambas no aço sem revestimento, tanto na conformação real quanto na virtual. Já os gráficos 22 e 23 exibem os valores encontrados para os galvanizados. Pode-se dizer que, de forma geral, as espessuras obtidas por simulação foram menores do que as experimentais na análise longitudinal das peças (pontos 1 a 8). No ponto 1 (região da aba) verificou-se a maior espessura e no ponto 4 (região mais profunda da caçamba) a menor. De acordo com a teoria, este é um comportamento esperado no embutimento profundo. O espessamento no ponto 1 reu devido à tendência de formação de leves rugas que acontecem em quase todos os blanques utilizados em contato com o prensa chapas. O maior afinamento de chapa no ponto 4 foi consequência do estiramento no contato da região mais profunda do punção. Além disso, é possível afirmar que o nível de deformação é mais intenso na região frontal da caçamba (ponto 3) em relação à traseira (ponto 7). Avaliando o erro entre as medições reais e simuladas no ponto 1, a média foi de 4% para o sem revestimento e 5% para o galvanizado. Já no ponto 4, o erro foi de 6% e 7%, respectivamente. Na análise das diagonais traseira e dianteira (pontos 9 a 12), houve maior variação entre os pontos, principalmente nos aços sem revestimento. De forma geral, o ponto 9 foi o de maior afinamento na maioria dos casos. No real, a variação foi de 24% para o aço sem revestimento e 9% para o galvanizado. Essa região é submetida ao estiramento ocasionado pela dobra severa imposta pela geometria da ferramenta, resultando na perda considerável de espessura e possível ruptura, como foi o caso de várias caçambas. Portanto, os resultados obtidos pela simulação são condizentes com os conduzidos experimentalmente por apresentar variação média de 6,5%.

Gráfico 20 - Espessuras real e virtual dos pontos 1 a 7 do aço SR



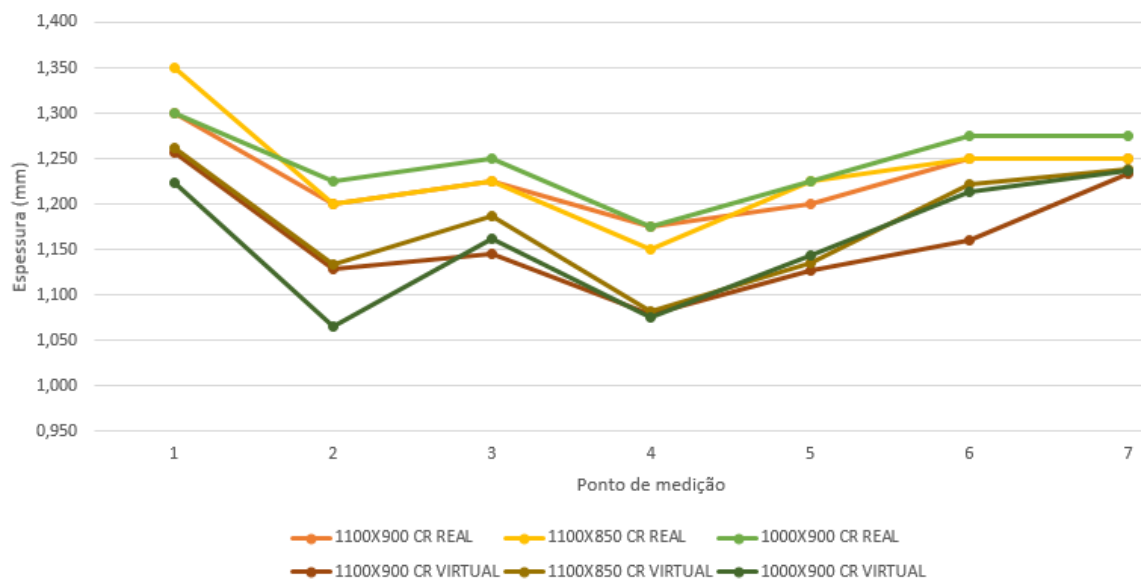
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 21 - Espessuras real e virtual dos pontos 9 a 12 do aço SR



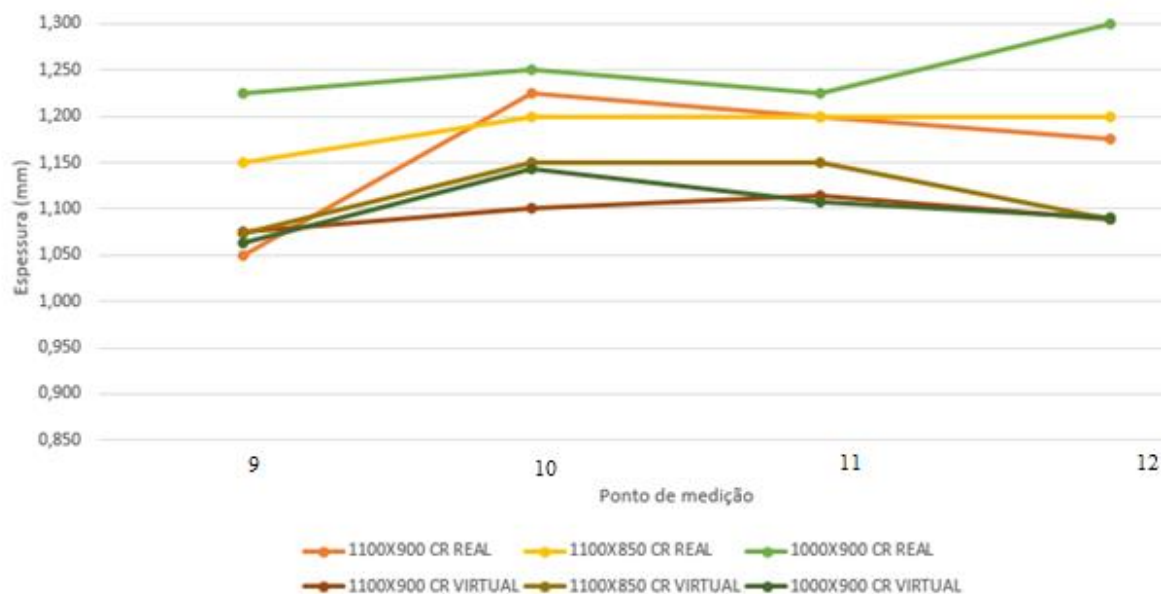
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 22 - Espessuras real e virtual dos pontos 1 a 7 do aço CR



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Gráfico 23 - Espessuras real e virtual dos pontos 9 a 12 do aço SR

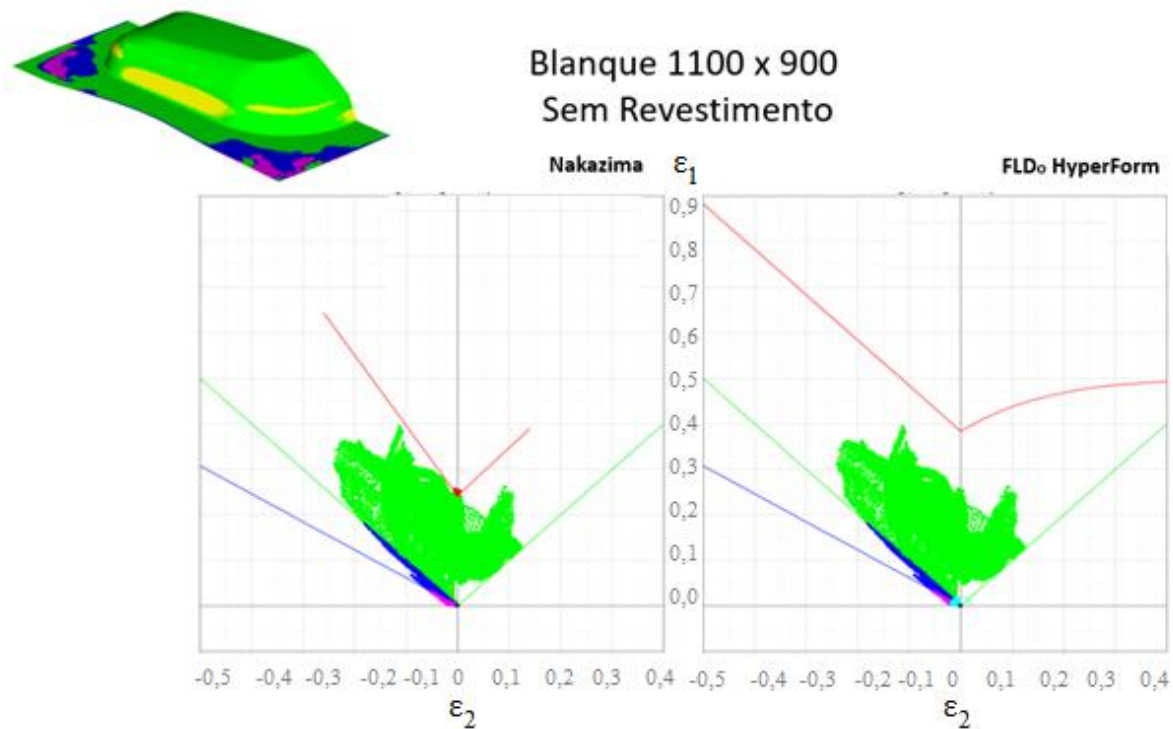


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As curvas limite de conformação do software foram exibidas nas Figuras 43, 44, 45, 46, 47 e 48. Como esta curva limite é baseada em deformações no plano da chapa sem considerar deformações no sentido da espessura, a previsão de falhas pode mascarar resultados reais. Por este motivo, a curva CLC gerada pelo software é apresentada ao lado da obtida pelo Nakazima.

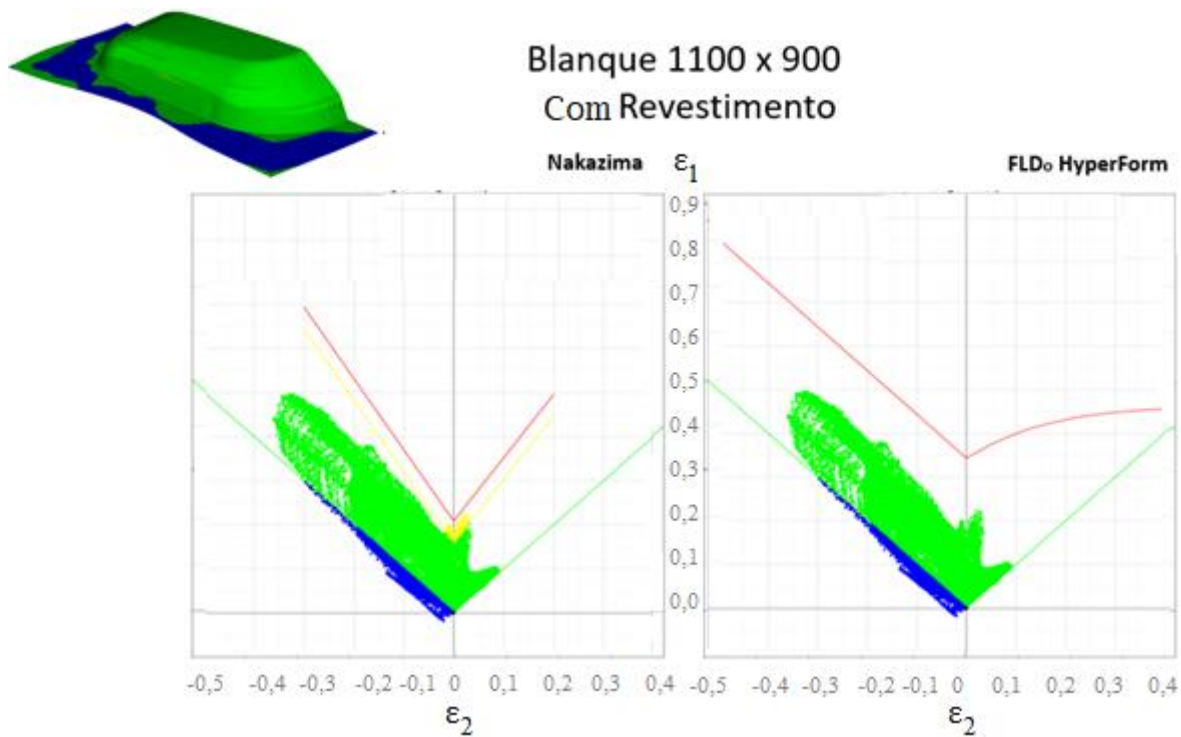
Considerando a curva CLC obtida pelo Nakazima, pequenas regiões na parte frontal de algumas caçambas falharam, como pode ser visto nas Figuras 43 e 47. Percebe-se que a consideração do coeficiente de encruamento na determinação da CLCo implica no aumento da região de embutibilidade do material. Sendo assim, a falha dos materiais pode ser estimada pela CLC (Nakazima), porém de forma muito conservadora.

Figura 43 – Caçamba simulada com blanque 1100 x 900 no aço SR



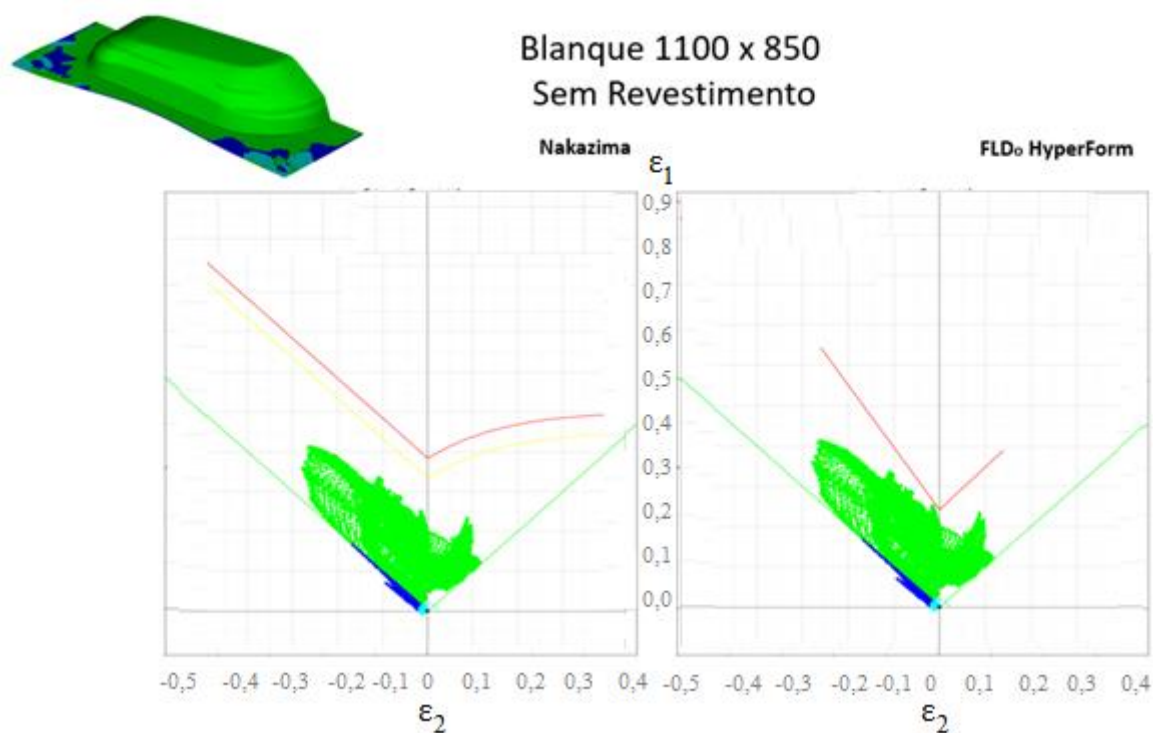
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 44 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 900 no aço CR



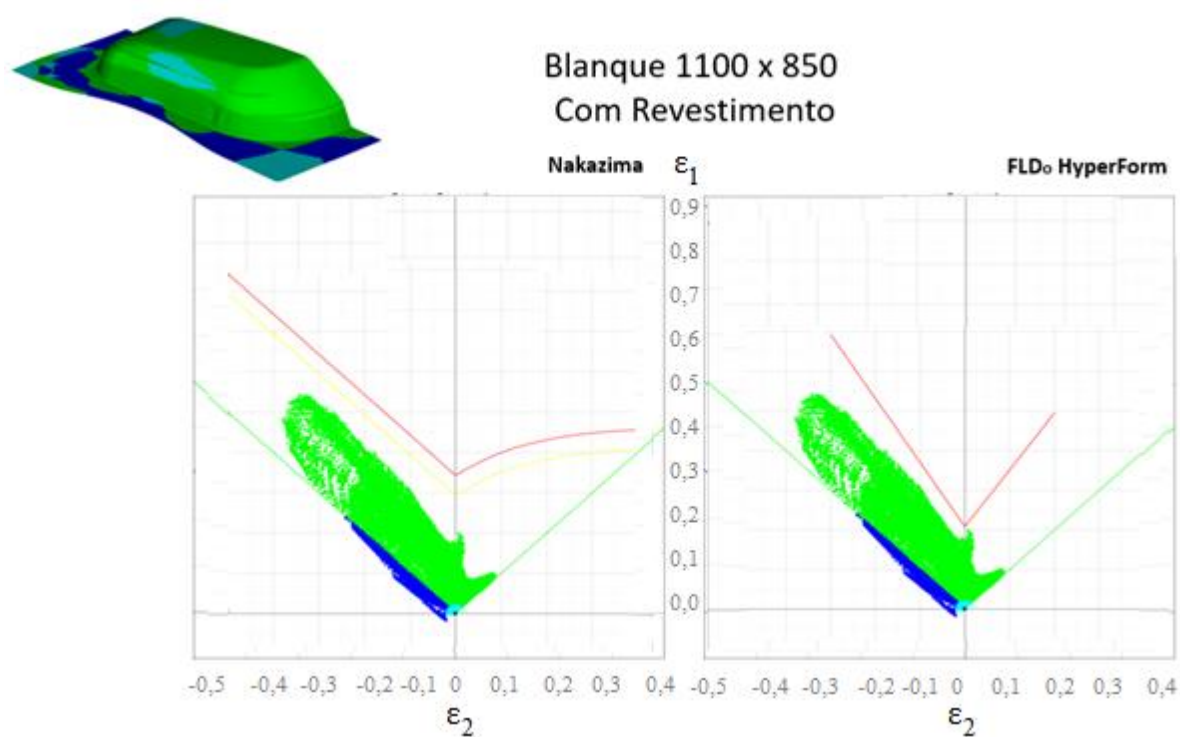
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 45 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 850 no aço SR



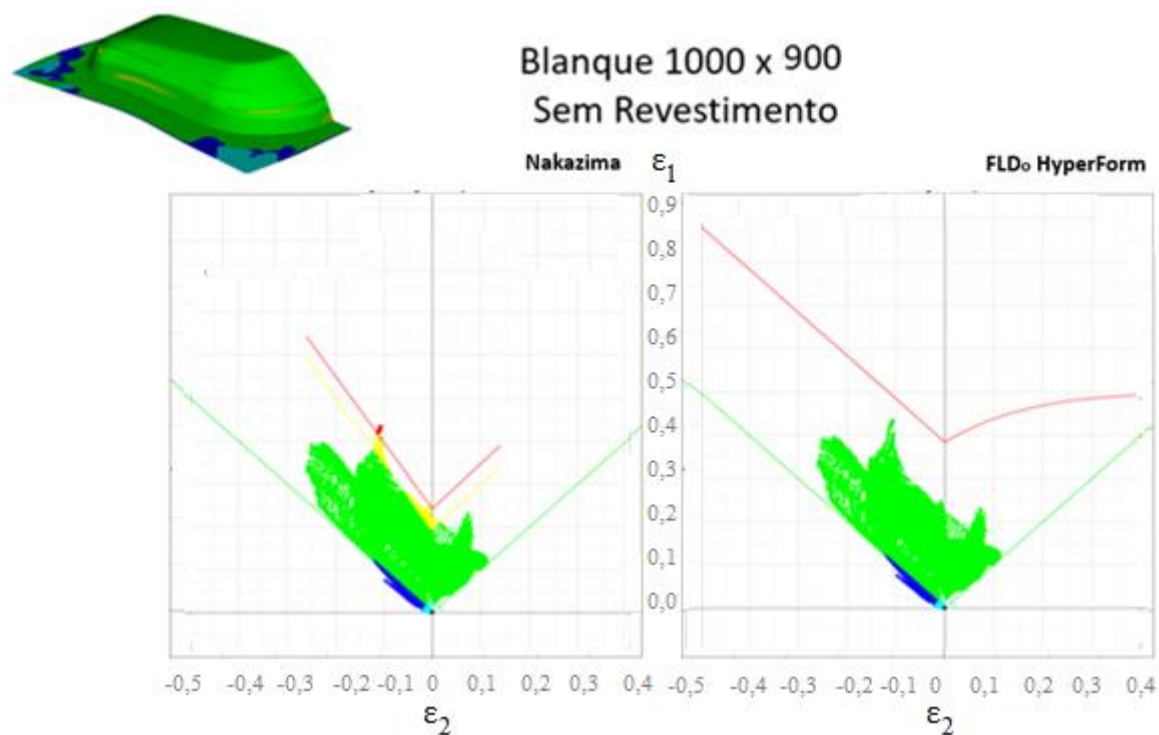
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 46 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 850 no aço CR



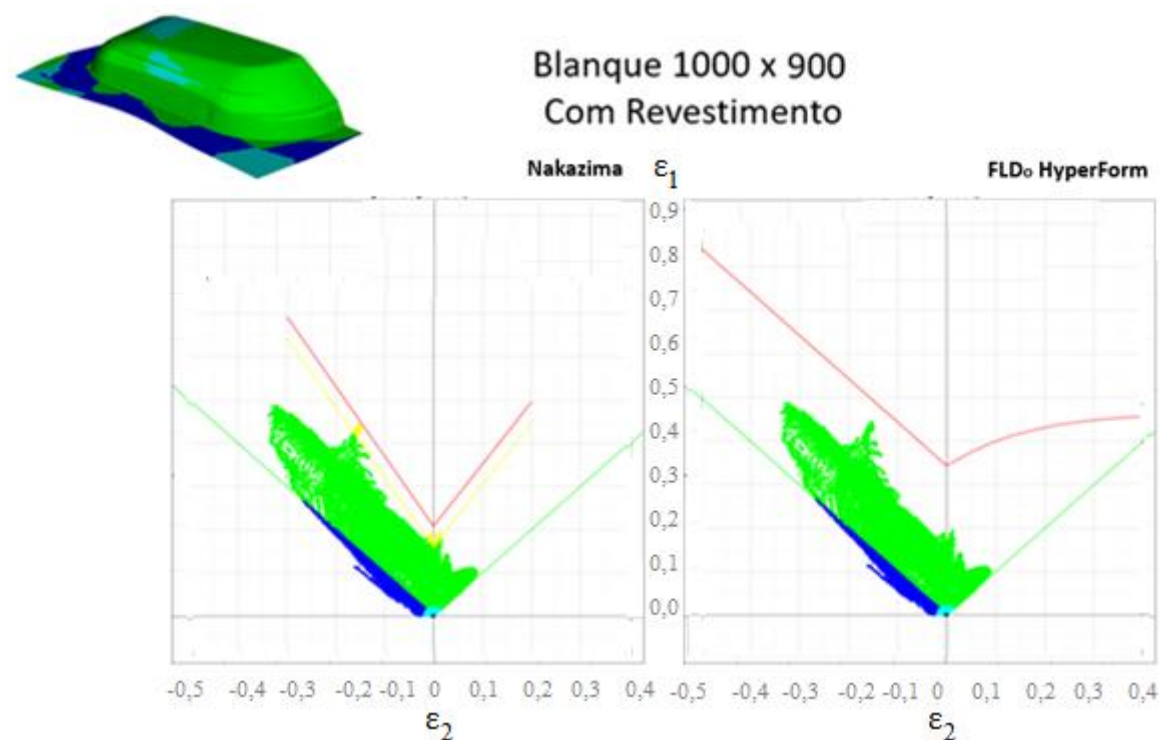
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 47 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 900 no aço SR



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 48 - Caçamba simulada com blanque 1100 x 900 no aço CR



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

5 CONCLUSÃO

O resultado de simulação, obtido por meio do método de elementos finitos, foi eficaz no presente trabalho. A variação média das espessuras obtidas pelos embutimentos reais e simulados foi de 6,5%, erro baixo comparado a outros trabalhos citados. Houve concordância nas regiões de espessamento (nas abas) e de maior afinamento (na parte mais profunda da caçamba e na parede lateral traseira).

Após a execução em escala laboratorial do ensaio Nakazima, concluiu-se que a estampabilidade do aço SAE 1010 sem revestimento é superior à do aço com revestimento de zinco puro (GI-85). Este fato é comprovado pelos coeficientes de encruamento médio (n) obtidos pelo ensaio de tração, 0,242 e 0,208, respectivamente.

O blanque ótimo para fabricação de caçambas de carrinho de mão foi definido como 1100 x 900mm. A redução em 100mm no sentido longitudinal do blanque provoca rugas de grande amplitude na parte frontal do produto. Já no sentido transversal, a diminuição de 50mm intensifica o afinamento da parede na região lateral traseira.

Na conformação de caçambas com blanques menores que 1100x900mm, a resposta quanto a falha por fratura não seguiu o comportamento previsto de conformabilidade da curva CLC obtida pelo Nakazima. Este fato está relacionado às diferentes condições de atrito entre ensaios em laboratório e em escala real. Além disso, houve maior embutimento no material galvanizado comparado ao sem revestimento, o que indica que o revestimento promoveu maior escorregamento da chapa sobre a superfície da matriz e menos estiramento. Porém, foram observados riscos superficiais nas caçambas galvanizadas que prejudicam a resistência à corrosão e demandam pintura, inviabilizando o uso de chapas galvanizadas mesmo com conformabilidade superior em escala industrial. Pode-se concluir que a estampabilidade prevista em laboratório é mais conservadora e pode ser usada apenas de forma qualitativa.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Medir o coeficiente de atrito médio real entre chapa e ferramenta para comparação com os valores obtidos por simulação.

Para redução de custos com matéria prima, realizar o embutimento de blanques com as geometrias menores propostas em mais de uma operação.

Analisar no MEV o revestimento após os ensaios de tração e conformação para confirmação da hipótese de destacamento da camada de zinco.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **Portal embalagens de alumínio**. Disponível em: <https://http://embalagensdealuminio.com.br/latas-de-bebidas-e-alimentos/>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- ABNT.NBR-16269, **Ferramentas Manuais – Carrinho de mão para construção civil**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ABNT.NBR-6152, **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.
- ALEKSANDROVÍK, S. STREFANOVÍČ, M. Significance and Limitations of Variable Blank Holding Force Application in Deep Drawing Process. **Tribology in industry**, v. 27. 2005.
- ALJABIRI, S. Finite Element Analysis of Blank Design Optimal To Produce a Triangle Cup By Deep Drawing Process. **Kufa Journal of Engineering**, p. 189–200, 2 Apr 2018.
- ALMEIDA, Tarcísio. José. De. **Estudo da Conformabilidade de Chapas de Aço Interstitial Free em Prensas Hidráulicas de Simples Efeito**, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1998.
- ANDRADE, Etienne Pereira de. **Caracterização Mecânica e análise microestrutural de chapas obtidas pelo processo de Tailor Welded Blank (TWB)**, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.
- BAO, M. *et al.* Inner wrinkling control in hydrodynamic deep drawing of an irregular surface part using drawbeads. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2013.
- BARLAT, F.; LIAN, K. Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. **International Journal of Plasticity**, v. 5, n. 1, p. 51–66, 1989.
- BASTOS, A. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- BHATT, R. J. FLD Creation for SS304 Using Experiments & It ' s Validation Using HyperForm 11.0. **Nirma University Institute os Technology**, 2014.
- BITTENCOURT, T. R. **Avaliação da Conformabilidade e da Resistência à Indentação dos Aços Interstitial Free High Strength Steel (IFHSS) e Bake Hardenable (BH) da Classe de 260 MPa de Limite de Escoamento**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- BRESSAN, J. *et al.* Previsão Teórica Da Curva Clc E Comparação Com Resultados

Experimentais De Chapas Do Aço Dc 06 Obtidos com ensaios de nakazima e marcinia. *In*: Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação, 6., 2011, Caxias do Sul.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAMANZI. **Estrutura: o carro que você veste todo dia**. Disponível em: <https://carroscamcanzi.com.br/estrutura-o-carro-que-voce-veste-todo-dia/>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CARREFOUR. **Mercado**. Disponível em: <https://carrefour.com.br/Cacamba-Funda-65L-Para-Carrinho-De-Mao-77725006-Tramontina/p/MP05578285/>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CASTRO, R. **Efeito do tamanho de grão em diferentes propriedades do aço AISI 1010**. Monografia em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2014.

CHARABARTY, J. **Theroy of Plasticity**. Third Edition, USA. 2006.

DENÚBILA, Danilo de Castro. **Efeito da temperatura de bobinamento nas propriedades mecânicas e microestrutura de um aço multiconstituído da classe de 800 MPa de Limite de Resistência para aplicação em rodas automotivas**. 2015. 80f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DJAVANROODI, F.; DEROGAR, A. Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets. **Materials and Design**, v. 31, p. 4866–4875, 21 May 2010.

DONG, W. *et al.* Experimental and numerical investigation on galling behavior in sheet metal forming process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, n. 1–4, p. 1101–1109, 5 May 2016.

FABRIS, A. **Influência da força do prensa-chapas na conformabilidade do aço hsla440**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, 2014.

FATEMI, A., DARIANI, B. M. The effect of normal and through thickness shear stresses on the formability of isotropic sheet metals. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 6Oct2015.

FATHI, H. *et al.* Effect of punch speed on the formability behavior of austenitic stainless steel type 304L. **Metals and Materials International**, v. 22, n. 3, p. 397–406, 2016.

FENG, Y. *et al.* Optimization of variable blank holder force in deep drawing based on support vector regression model and trust region. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, 20 Sep 2019.

FGV TN BRASIL. **Dobradiças série M slide-on**. Disponível em: <https://fgvtn.com.br/produto/dobradica-tn-inox/>. Acesso em: 02 fev. 2020.

FILHO, E. *et al.* **Conformação Plástica dos Metais**. 6^a ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

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

FISCHER, P. *et al.* On part-to-part feedback optimal control in deep drawing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 50, n. October 2018, p. 403–411, 2020.

FOLLE, L. **Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

GE, Y.; LI, X.; LANG, L. Inverse approach to evaluate the tubular material parameters using the bulging test. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2015.

GHORBEL, O. *et al.* Coupled anisotropic plasticity-ductile damage: Modeling, experimental verification, and application to sheet metal forming simulation. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2018.

GOODWIN, G. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. **SAE technical paper 680093**, 1968.

GROOVER, M. **Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2010.

GUIDA, R. **Comparação da estampabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio obtidas através de duas rotas de fabricação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

GUIMARÃES, J. **Da Atmosfera Protetora Dos Fornos De Recozimento Contínuo Na Qualidade Do**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

GUPTA, C.; KUMAWAT, B. Analysis of flow behaviour of iron and steel using power law models. **Materials Science and Technology (United Kingdom)**, v. 33, n. 8, p. 971–983, 2017.

HARIHARAN, K.; BALAJI, C. Material optimization: A case study using sheet metal-forming analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 1, p. 324–331, 2009.

HILL. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. **Proceedings of the Royal Society of London, Serie A**, 1947.

HOLMBERG, S.; ENQUIST, B.; THILDERKVIST, P. Evaluation of sheet metal formability by tensile tests. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 145, p. 72–83, 2004.

HOSFORD, W.; CADELL, R. **Metal forming mechanics and metallurgy**. 4th. ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 1992.

ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. **Introdução a materiais e processos de fabricação**. Disponível em: < http://www.mec.ita.br/~arfaria/MT717_01.pdf />. Acesso em: 01 jul. 2020.

JAWALE, K. *et al.* Characterizing fracture forming limit and share fracture forming limit for sheet metals. **Journal of Materials Processing Tech.** V. 255, p. 886-897, 31 jan 2018.

JIN, C.C., LI, F. BAO, Z.P. Study on deep drawing of 304 stainless steel rectangular case with magnetic medium. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** . v. 94, p. 1525-1531, 30 ago 2017.

JUNIOR, O.; BIEHL, L.; HACKENHAAR, R. **Princípios do processo de galvanização à quente**. Rio Grande, 2014. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/3730/3820>. Acesso em: 10 jun. 2020.

KAMRAN, M. A, GOLLO, M. H. Theoretical and experimental investigation of hydro-mechanical deep drawing of hemi-prolate spheroid cups. **The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 2017.

KARDAN, M.; PARVIZI, A.; ASKARI, A. Experimental and Finite Element Results for Optimization of Punch Force and Thickness Distribution in Deep Drawing Process. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 01 Aug 2017.

KEELER, S.P. Circular Grid System – a valuable aid for evaluating sheet metal formability. **SAE technical paper 680092**, 1968.

KITAYAMA, S.; YAMADA, S. Simultaneous optimization of blank shape and variable blank holder force of front side member manufacturing by deep drawing. **International Journal of Manufacturing Technology**, p. 1381–1390, 7 Dec 2016.

KONINCK, J. ; GUTTER, D. **Manual do Ferramenteiro**. 3ªed. São Paulo: Mestre Jou, 1980.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. 1ªed. Ohio, ASM International, 2005.

LIN, B. T. *et al.* Improvement of deep drawability by using punch surfaces with microridges. **Journal of Materials Processing Technology**, Taiwan, p. 275–285, 12 Jun 2015.

LOBÃO, M. C. Determinação de curvas limite de conformação por procedimentos experimentais e simulação numérica do processo de estampagem. p. 133, 2003.

MADI, M. **Avaliação, simulação e otimização da velocidade de estampagem na conformação de chapas do aço DP 600**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, 2016.

MAÊDA, D. A. **Modelagem da estampagem profunda de chapas metálicas via o método dos elementos finitos associado ao critério de escoamento não-quadrático de Hill**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

MAGRINHO, J. P. G. *et al.* Formability limits by wrinkling in sheet metal forming. **Journal of Materials: Design and Applications**, p. 1–12, 13 Mar 2016.

MARCINIAK, Z. Sheet Metal Forming Limits. In: **Mechanics of Sheet Metal Forming**. Poland: Technical University of Warsaw, 1978.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. 2nd. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002.

MARCONDES, Paulo. **Aços para Estampagem**. Curitiba: UFPR - Labconf, 2019. 44 slides, color. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM206/Prof_Marcondes/Novos%20A%E7os%20para%20Estampagem.pdf. Acesso em: 5 abr. 2020.

MARTINS, P. A. F. *et al.* Characterization of fracture loci in metal forming. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 83, p. 112–123, 2014.

MORI, K. Review of Shearing Processes of High Strength Steel Sheets. **Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, p. 54, 7 Jun 2020.

MSOLLI, S. BETTAIEB, M.B., ABED-MERAÏM, F. Combined effect of damage and plastic anisotropy on the ductility limit of thin metal sheets. **Procedia Structural Integrity**, v.2. 24 Jun 2016.

NEUHAUSER, F. *et al.* The bending dependency of forming limit diagrams. **International Journal of Material Forming**, v. 12, 2019.

NUNES, R. *et al.* **Forming and forging**. 9th ed. ASM Handbook, 1998.

OTOMAR, H. P. **Estudo Comparativo da estampabilidade da liga de alumínio AA1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Carlos, 2010.

PRATES, P. A. *et al.* Numerical study on the effect of mechanical properties variability in sheet metal forming processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1–4, p. 561–580, 2018.

PROVENZA, Francesco. **Estampos**. Volumes I, II e III. PRO-TEC, São Paulo, 1976.

RAGAB, A. R.; SALEH, C.; ZAAFARANI, N. N. Forming limit diagrams for kinematically

hardened voided sheet metals. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 128, p. 302–312, 4 Jul 2002.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2ªed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A., 1982.

REIS, L. **Estudo dos parâmetros de influência na simulação numérica de estampagem de chapas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

SANTOS, R. A. *et al.* Avaliação da curva limite de conformação usando o teste de marciniaq comparando com teste de nakazima para avaliação de chapa de aço de alta estampabilidade. **Universidade Federal do Paraná**. 2018.

SANTOS, R. **Avaliação de estampabilidade do aço DC05 (DIN 10152) e validação das deformações verdadeiras obtidas via simulação numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, 2007.

SCHAEFFER, L, NUNES, R. M., BRITO, A.M.G. **Tecnologia da Estampagem de chapas metálicas**. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 2017.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 2ª ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SILVA, E. **Estudo da influência dos parâmetros de recozimento em caixa nas propriedades mecânicas de aços para estampagem de limite de escoamento máximo de 230 MPa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

SILVA, G. C. da. **Simulação numérica e experimental no processo de extrusão indireta a frio, considerando o efeito do caminho de deformação**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2011.

SILVEIRA, C. C.; OLIVEIRA, C. A. S. DE; SILVA FILHO, J. F. DA. **Efeito De Revestimentos Galvanizados Por Imersão a Quente No Coeficiente De Atrito De Um Aço Bifásico Destinado À Indústria Automotiva**. Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração, São Paulo, v. 12, n. 3, p.195-201, jul./set. 2015.

SINGER, M. LIEWALD, M. In-Situ-measurement of restraining forces during forming of rectangular cups. *In: Challenges in Forming High-Strength sheets Conference*, v. 159, 2016. Germany.

SKRIPALENKO, M. M.; SKRIPALENKO, M. N. On choosing software for simulating metal-forming process. v. 57, n. 1, p. 20–23, 2013.

SÖNMEZ, Ç. **Investigation of the Deep Drawability**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Midle East Technical University, 2005.

SOUZA, J. H. C. DE. **Estudo do processo de corte de chapas por cisalhamento**, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

TALEB, A. *et al.*, Tribological behaviour of a continuous hot dip galvanized steel. **Materials Research Express**, v.6, 2019.

TEIXEIRA, P. ‘**Benchmarks**’ Experimentais e Modelação Numérica por Elementos Finitos de Processos de Conformação Plástica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade do Porto, 2005.

THARRET, M. R., STOUGHTON, T. B. Stretch-bend forming limits of 1008 AK steel. **SAE Technical Papers**, 2003.

TRAMONTINA. **Cozinhas profissionais**. Disponível em: http://https://www.tramontina.com.br/132-cozinhas-profissionais/134-coccao?filter%5B%5D=14_611/. Acesso em: 02 fev. 2020.

TRZEPIECINSKI, T. A Study of the Coefficient of Friction in Steel Sheets Forming. **Metals**. 2019.

USIMINAS. **Laminados a frio**. Catálogo de Produtos. BH, Minas Gerais, Julho 2020. Disponível em: <https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2019/11/LAMINADOSFRIO-PORT.pdf>. Acesso em: 02 de Abril de 2020.

YANG, C.; LI, P.; FAN, L. Blank shape design for sheet metal forming based on geometrical resemblance. **Procedia Engineering**, v. 81, p. 1487–1492, Oct 2014.

WANG, Y.; LANG, L.; ZAFAR, R.; SUN, Z.; ZHANG, Q. Investigation into the overlapping sheet hydraulic bulge and its formability. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2015.

ZHANG, Q. *et al.* An investigation into the production of a large-scale automotive part included small features using hydraulic sequential forming method. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 7, p. 1–20, 2018.

ANEXO A – Certificado de qualidade dos aços

USINAS SIDERURGICAS DE MINAS GERAIS S.A.		CERTIFICADO DE INSPEÇÃO		CLIENTE-CUSTOMER: FIXOFE COMERCIO E INDUSTRIAL TDA		Data de Emissão Date of Issue																																																													
USINA INTENDENTE CÁMARA - PATRIMÔNIO MOBRAL		INSPECTION CERTIFICATE		Tolerâncias - Tolerances		Nota Fiscal Commercial Invoice																																																													
SEDE: BELLO HORIZONTE - MG - BRASIL		BOBINA FRIA		Espessura - Thickness		1 000450639 2																																																													
FABRIL ENGENHO NOGUEIRA - CP 341		COLD ROLLED STEEL COIL		Largura - Width		Ordem de Venda Sale Order																																																													
CNPJ: 06.944.786/02-42						Nº Certificado Certificate Nº																																																													
INSCRIÇÃO ESTADUAL: 310.902321/109						5268736																																																													
A Usiminas certifica que os produtos discriminados foram fabricados no Brasil pelo processo de cogelato básico (LD), ensaiados e analisados de acordo com as especificações técnicas aplicáveis. A Usiminas disponibiliza, através do endereço eletrônico www.usiminas.com.br, o texto integral das especificações técnicas e dos procedimentos de ensaio e análise. A Usiminas não se responsabiliza por danos ou prejuízos decorrentes do uso indevido das informações aqui fornecidas. Usiminas makes available, by using the following website www.usiminas.com.br, the full text of the technical specifications and the testing and analysis procedures. Usiminas does not accept responsibility for damages or losses resulting from the improper use of the information provided here. Usiminas is not responsible for damages or losses resulting from the improper use of the information provided here.																																																																			
Qualidade - Steel SAE-J403-14-1005		Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 1,20 x 1200,0 mm		Bordas - Edge / Oleamento - Oiling NAO APARADA / PROTETIVO		Apresentação superficial - Surface Appearance SUPERFICIE CINZENTA / SUPERFICIE 3 (NER7008)																																																													
Placa Volume Slab Package 281 0044230		Placa Volume Slab Package 281 9995593		Placa Volume Slab Package 281 13980		Placa Volume Slab Package 281 14007																																																													
Massa Líquida Real Total-Total Actual Net Mass = 28.300 t Massa Bruta Real Total-Total Actual Gross Mass = 28.354 t		Massa Líquida Real Total-Total Actual Net Mass = 28.300 t Massa Bruta Real Total-Total Actual Gross Mass = 28.354 t		Massa Líquida Real Total-Total Actual Net Mass = 28.300 t Massa Bruta Real Total-Total Actual Gross Mass = 28.354 t		Massa Líquida Real Total-Total Actual Net Mass = 28.300 t Massa Bruta Real Total-Total Actual Gross Mass = 28.354 t																																																													
Composição Química (%) - Chemical Composition (%)																																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Corrida</th> <th>Análise</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Al</th> <th>Cu</th> <th>Nb</th> <th>V</th> <th>Ti</th> <th>Cr</th> <th>Ni</th> <th>Mo</th> <th>Sn</th> <th>N</th> <th>B</th> <th>Sb</th> <th>Pb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>432886</td> <td>P</td> <td>0,03</td> <td>0,01</td> <td>0,21</td> <td>0,020</td> <td>0,018</td> <td>0,025</td> <td>0,00</td> <td>0,001</td> <td>0,001</td> <td>0,001</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> <td>0,000</td> <td>0,0034</td> <td>0,0033</td> <td>0,001</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>535424</td> <td>P</td> <td>0,04</td> <td>0,01</td> <td>0,22</td> <td>0,010</td> <td>0,011</td> <td>0,037</td> <td>0,00</td> <td>0,001</td> <td>0,001</td> <td>0,001</td> <td>0,01</td> <td>0,01</td> <td>0,00</td> <td>0,001</td> <td>0,0058</td> <td>0,0036</td> <td>0,002</td> <td>0,000</td> </tr> </tbody> </table>								Corrida	Análise	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Sb	Pb	432886	P	0,03	0,01	0,21	0,020	0,018	0,025	0,00	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01	0,00	0,000	0,0034	0,0033	0,001	0,000	535424	P	0,04	0,01	0,22	0,010	0,011	0,037	0,00	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01	0,00	0,001	0,0058	0,0036	0,002	0,000
Corrida	Análise	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	B	Sb	Pb																																																
432886	P	0,03	0,01	0,21	0,020	0,018	0,025	0,00	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01	0,00	0,000	0,0034	0,0033	0,001	0,000																																																
535424	P	0,04	0,01	0,22	0,010	0,011	0,037	0,00	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01	0,00	0,001	0,0058	0,0036	0,002	0,000																																																
Condição de Fornecimento - Supply Condition																																																																			
RECOZIMENTO CONTÍNUO - CONTINUOUS ANNEALING																																																																			
Abreviaturas - Abbreviations																																																																			
P = Folha-Ladle																																																																			
Abreviaturas - Abbreviations Al = Alumínio Total-Total Aluminum																																																																			
Sistema de Gestão Certificado pelas normas: Management System certified according to the standards: ISO 9.001 ISO 14.001 IATF 16.949 OHSAS 18.001																																																																			
Produto Conforme Compliant Product Produto 100% Reciclável 100% Recyclable Product																																																																			

USINAS SIDERURGICAS DE MINAS GERAIS S.A.		CERTIFICADO DE INSPEÇÃO		CLIENTE-CUSTOMER: FIMOPRO COMERCIO E INDUSTRIAL TDA		NOTA FISCAL Commercial Invoice		DATA DE EMISSÃO Date of Issue	
USIMINAS U USINA INTENDENTE CÂMARA - PATRIMÔNIO INDIRETO END: BELLO HORIZONTE - MG - BRASIL CNPJ: 06.944.740/0001-91 INSCRIÇÃO ESTADUAL: 310.9020219-10		INSPECTION CERTIFICATE BOEIRA GALVANIZADA A QUENTE - GI TRATAMENTO QUÍMICO HOT DIP GALVANIZED - GI COIL CHEMICALLY TREATED		Tolerâncias - Tolerances Espessura-Thickness Largura-Width		Nota Fiscal 1 000442295 2		28/11/2019	
Quantidade - Steel NBR-7008-Z-12-20		Dimensões Nominais - Nominal Dimensions 1,25 x 1200,0 mm		Borda - Edge / Orlamento - Oiling NÃO APARADA / PROTETIVO MILL EDGE / PROTECTIVE		Ordem de Venda Sale Order		Nº Certificado Certificate Nº	
						Nº Item 00479841 7		5113881	
Ficha Volume Slab Package 251 9377110		Pieces per Volume Gross Mass 11135		Corrida Sheet 350657		Massa Bruta Gross Mass 11545		Volume Bruto Net Mass 350657	
Massa Líquida Real Total-Total Actual Net Mass = 22,630 t Massa Bruta Real Total-Total Actual Gross Mass = 22,680 t		Pieces per Volume Gross Mass 11135		Corrida Sheet 350657		Massa Bruta Gross Mass 11545		Volume Bruto Net Mass 350657	
Ensaio de Revestimento - Coating Test		Revestimento Sup Inf Total Line Coating 48,0 44,0 92,0 GI 48,0 44,0 92,0		Designação do Revestimento-Coating Designation = 285 Aderência-Adhesion = Approved-Approved Unidade de Revestimento-Coating Unit = g/m²		Composição Química (%) - Chemical Composition (%)		Sistema de Gestão Certificado pelas normas: Management System certified according to the standards: ISO 9001 ISO 14001 IATF 16949 OHSAS 18001	
Corrida Analise Heat Analysis 350657 P		C Si Mn P S Al Cu Nb V Ti Cr Ni Mo Zn B Pb 0,05 0,01 0,20 0,019 0,013 0,057 0,00 0,001 0,000 0,001 0,01 0,01 0,00 0,001 0,0026 0,0001 0,000 0,000		Abreviações - Abbreviations P = Fenela-Sadla		Produto Conforme RohS&ELV Compliant Product		Produto 100% Reciclável 100% Recyclable Product	
Sup = Superfície Superior-Upper Surface Al = Alumínio Total-Total Aluminum		Inf = Superfície Inferior-Lower Surface		Abreviações - Abbreviations P = Fenela-Sadla					

Certificado do tipo 3.1 da norma EN-10204. Certificate of the type 3.1 of the EN-10204.
 Certificamos que este material foi inspecionado e possui nível de radiação abaixo de 1 kg/kg. We certify that this material has been inspected and the radiation level is less than 1 kg/kg.

Observações - Remarks
 PROGRAMAÇÃO 02 DEZEMBRO 2019
 SZ-NBR7008ZC-1 25X1200-285
 FDS - Ficha de Dados de Segurança do Produto disponível na Extratex das Usiminas
 MSDS - Material Safety Data Sheet available at Usiminas Extratex

Helber Luiz Oliveira Ribeiro
 helber@rctmateriais.com
 +55 031 3629-3215

GERENTE GERAL CONTROLE INTEGRADO DE QUALIDADE

MATERIAL

ANEXO B - Certificado de calibração nº CAL0197 da prensa EMIC

NOME DO EQUIPAMENTO	EMIC DL-10000
CAPACIDADE	100kN
RESPONSÁVEL	INSTRON
NORMA RELACIONADA	NBR ISO/IEC 17025
DATA DA CALIBRAÇÃO	03/04/2018
NÚMERO DA CALIBRAÇÃO	CAL0197
NÚMERO DO CERTIFICADO	18040301RB
IDENTIFICAÇÃO	CCE2MN/9946



APÊNDICE 1 – Resultados do ensaio de tração para o aço sem e com revestimento

SEM REVESTIMENTO										R	R̄
CP	DIREÇÃO LAMINAÇÃO	VELOCIDADE [MM/MIN]	σ _e (MPa) (Engenharia)	σ _{LRT} (MPa) (Engenharia)	A %	σ _e (MPa) (Verdadeiro)	σ _{LRT} (MPa) (Verdadeiro)	n	K (Mpa)		
CP1-A	90	0,5	232	357	34,1	231	472	0,238	637	1,07925	R90 = 1,1550
CP1-B	90	0,5	231	356	34,1	235	471	0,242	642	1,19017	
CP3-A	90	50	261	375	32,5	270	486	0,231	671	1,02434	
CP3-B	90	50	253	367	32,8	256	478	0,249	668	1,22031	
CP5-A	90	500	282	381	35,9	284	506	0,238	685	1,22987	
CP5-B	90	500	287	386	34,9	292	506	0,240	692	1,1864	R0 = 0,52778
CP7-A	0	0,5	224	352	38,5	229	481	0,246	642	0,80741	
CP7-B	0	0,5	222	351	36,8	218	471	0,243	631	0,79411	
CP9-A	0	50	248	370	32,8	251	482	0,253	678	1,06676	
CP9-B	0	50	252	372	33,9	261	487	0,25	680	1,11582	
CP11-A	0	500	272	380	34,1	289	504	0,244	693	0,97987	R45 = 0,7221
CP11-B	0	500	280	386	35,2	288	513	0,242	699	0,9725	
CP13-A	45	0,5	236	357	32,9	238	473	0,236	636	0,58965	
CP13-B	45	0,5	231	360	34,9	231	482	0,239	645	0,60186	
CP15-A	45	50	269	387	30,5	275	499	0,248	705	0,66473	
CP15-B	45	50	268	385	31,2	272	497	0,248	701	0,81548	0,7221
CP17-A	45	500	291	395	32,1	296	515	0,24	708	0,74402	
CP17-B	45	500	292	397	29,9	299	520	0,244	720	0,91691	
MÉDIA GERAL			257	373	33,7	262	491	0,243	674		

COM REVESTIMENTO											
CP	DIREÇÃO LAMINAÇÃO	VELOCIDADE [MM/MIN]	σe (MPa) (Engenharia)	σLRT (MPa) (Engenharia)	A %	σe (MPa) (Verdadeiro)	σLRT (MPa) (Verdadeiro)	n	K (Mpa)	R	R
CP1-A	90	0,5	359	381	31,1	391	487	0,202	679	1,07007	R90 = 1,1778
CP1-B	90	0,5	339	378	31,6	364	512	0,203	677	1,1359	
CP3-A	90	50	380	399	28,8	434	525	0,200	706	1,21066	
CP3-B	90	50	368	387	29,4	408	510	0,195	678	1,10721	
CP5-A	90	500	406	412	33,5	443	540	0,187	697	1,13093	R0 = 0,4514
CP5-B	90	500	393	402	28,8	411	505	0,191	705	1,0522	
CP7-A	0	0,5	322	378	30,6	340	486	0,222	656	0,67251	
CP7-B	0	0,5	321	381	31,5	339	494	0,220	662	0,6061	
CP9-A	0	50	351	392	28,8	376	498	0,220	716	0,64815	R0 = 0,6876
CP9-B	0	50	346	387	32,3	378	495	0,217	702	0,73342	
CP11-A	0	500	377	400	32,9	411	544	0,216	725	0,6823	
CP11-B	0	500	378	401	29,6	389	506	0,224	735	0,78311	
CP13-A	45	0,5	340	389	30,0	366	495	0,209	665	0,58919	R45 = 0,5798
CP13-B	45	0,5	351	397	30,3	375	516	0,207	676	0,5105	
CP15-A	45	50	363	404	28,1	401	485	0,197	680	0,58838	
CP15-B	45	50	362	403	28,8	376	509	0,224	705	0,60764	
CP17-A	45	500	383	412	30,3	398	527	0,212	747	0,583	0,59983
CP17-B	45	500	399	421	32,9	439	536	0,205	750	0,59983	
MÉDIA GERAL			363	396	30,5	391	509	0,208	698		

APÊNDICE 2 – Medições de espessura e largura para obtenção de R

AÇO SEM REVESTIMENTO							
ID ENSAIO	ESPESSURA INICIAL MÉDIA (MM)	LARGURA INICIAL MÉDIA (MM)	COMPRIMENTO INICIAL (MM)	ESPESSURA FINAL MÉDIA (MM)	LARGURA FINAL MÉDIA (MM)	COMPRIMENTO FINAL MÉDIO (MM)	R
1A	1,19	12,48	75,00	0,78	7,92	99,63	1,0792
1B	1,19	12,46	75,00	0,86	8,50	99,87	1,1902
3A	1,19	12,47	75,00	0,80	8,24	98,80	1,0243
3B	1,20	12,47	75,00	0,81	7,76	99,27	1,2203
5A	1,20	12,48	75,00	0,84	8,11	101,49	1,2299
5B	1,19	12,47	75,00	0,82	7,92	100,55	1,1864
7A	1,20	12,49	75,00	0,76	8,66	101,68	0,8074
7B	1,20	12,50	75,00	0,79	8,93	101,79	0,7941
9A	1,20	12,51	75,00	0,87	8,87	99,11	1,0668
9B	1,20	12,48	75,00	0,85	8,50	99,27	1,1158
11A	1,20	12,51	75,00	0,80	8,46	100,47	0,9799
11B	1,20	12,48	75,00	0,80	8,44	100,85	0,9725
13A	1,19	12,48	75,00	0,74	9,40	98,89	0,5897
13B	1,19	12,48	75,00	0,75	9,41	100,30	0,6019
15A	1,19	12,47	75,00	0,80	9,54	97,00	0,6647
15B	1,19	12,48	75,00	0,86	9,55	99,32	0,8155
17A	1,19	12,47	75,00	0,83	9,52	98,09	0,7440
17B	1,19	12,52	75,00	0,88	9,45	96,32	0,9169

AÇO COM REVESTIMENTO							
CP	ESPESSURA INICIAL MÉDIA (MM)	LARGURA INICIAL MÉDIA (MM)	COMPRIMENTO INICIAL INICIAL (MM)	ESPESSURA INICIAL MÉDIA (MM)	LARGURA INICIAL MÉDIA (MM)	COMPRIMENTO INICIAL MÉDIO (MM)	R
1A	1,27	12,48	75,00	0,85	8,12	97,21	1,070067
1B	1,27	12,47	75,00	0,89	8,32	97,60	1,135903
3A	1,27	12,47	75,00	0,88	7,99	95,77	1,210661
3B	1,26	12,48	75,00	0,85	8,00	95,90	1,107213
5A	1,26	12,49	75,00	0,86	8,14	99,39	1,130932
5B	1,26	12,48	75,00	0,92	8,95	96,05	1,052203
7A	1,27	12,44	75,00	0,77	8,87	96,92	0,672515
7B	1,26	12,49	75,00	0,73	8,96	97,53	0,606103
9A	1,26	12,53	75,00	0,74	8,83	95,83	0,648147
9B	1,26	12,49	75,00	0,76	8,56	98,16	0,733422
11A	1,26	12,53	75,00	0,82	9,35	99,40	0,682296
11B	1,26	12,45	75,00	0,87	9,32	96,10	0,783113
13A	1,26	12,48	75,00	0,88	10,08	94,62	0,589192
13B	1,26	12,48	75,00	0,83	10,08	96,80	0,510504
15A	1,26	12,48	75,00	0,80	9,56	95,00	0,588378
15B	1,27	12,46	75,00	0,78	9,31	95,56	0,607637
17A	1,26	12,49	75,00	0,84	9,90	96,97	0,583001
17B	1,25	12,50	75,00	0,85	9,88	98,70	0,599832

APÊNDICE 3 – Deformações verdadeiras obtidas para obtenção das CLC

SEM REVESTIMENTO			
NAKAZIMA			
FRATURA		ESTRICCÃO	
ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y
0,6192315	-0,25302875	0,59056099	-0,28236291
0,62454709	-0,24590054	0,577175	-0,24718013
0,61302114	-0,21815601	0,54985401	-0,23319389
0,58422477	-0,24079849	0,56644953	-0,21815601
0,60267528	-0,19116051	0,54580699	-0,20456717
0,59366801	-0,20456717	0,50440506	-0,18753512
0,60267528	-0,20456717	0,51040201	-0,18612958
0,20130686	-0,08992471	0,53297843	-0,17435339
0,18689442	0,00993033	0,50077529	-0,16369609
0,17227122	0,01783992	0,44468582	-0,14618251
0,43078427	-0,0965109	0,35627486	-0,12897038
0,3949245	-0,11428915	0,34854296	-0,12669765
0,4001175	-0,07257069	0,35557434	-0,08740883
0,27459683	0,01587335	0,2657407	-0,03459144
0,29936358	0,00299551	0,4732376	-0,03459144
0,21591751	-0,08338161	0,3134982	-0,02429269
0,30084506	-0,0661398	0,40479822	-0,02326863
0,37433838	-0,30425002	0,43825493	-0,02020271
0,2868157	-0,07580171	0,4087929	-0,04098992
0,42918163	-0,01511364	0,37431838	-0,01207258
0,43996378	-0,01207258	0,33938054	-0,01306095
0,43907529	-0,02634398	0,35627486	-0,00904074
0,44532664	-0,01207258	0,17647134	-0,00803217
0,31855524	-0,00904074	0,46184544	-0,00408002
0,36325326	-0,01409892	0,38048932	-0,00408002
0,34217026	-0,0010005	0,3213586	0
0,4167347	0,01390291	0,19109663	0,0009995
0,44820526	0,02273949	0,15700375	0,00498754
0,45234869	0,0295588	0,43954442	0,01192857
0,43889988	0,05638033	0,36741704	0,02664193
0,46436275	0,01390291	0,43854296	0,08157999
0,45234869	0,04210118	0,33626953	0,08342161
0,45298462	0,04592893	0,40746311	0,09803374
0,43857746	0,02664193	0,38933573	0,09984533
0,38390093	0,01488861	0,40145709	0,10255699
0,3750059	0,03246719	0,35557434	0,10255699
0,42002526	0,01587335	0,40146311	0,10255699
0,43178242	0,02858746	0,40546511	0,11243543
0,43178242	0,03246719	0,3852624	0,11511281
0,4087929	0,02176549	0,3435897	0,11600368
0,40546511	0,03633193	0,39877632	0,11689375
0,39271754	0,12927234	0,37038329	0,11867153
0,39810475	0,13627762	0,40479822	0,11953924
0,41475536	0,11332869	0,38185524	0,12398598
0,41144718	0,12663265	0,37087366	0,12486898
0,40212621	0,12663265	0,4087929	0,12486898
0,37294192	0,09803374	0,3825376	0,12663265
0,39743294	0,11254137	0,39136638	0,12663265
0,39743294	0,11064652	0,33626953	0,12751332
0,41442485	0,13278111	0,3825376	0,12751332
		0,39608795	0,12839321
		0,40413089	0,12927234
		0,37775127	0,13015068
		0,38933573	0,13015068
		0,41343328	0,13278111
		0,35065687	0,13278111
		0,38933573	0,13365638
		0,3852624	0,13453089
		0,37087366	0,13627762
		0,36394843	0,13714984
		0,41210965	0,14349956
		0,4087929	0,14236724
		0,37431838	0,14583045
		0,41277368	0,15357909
		0,40279488	0,16381809
		0,4087929	0,16720792

COM REVESTIMENTO			
NAKAZIMA			
FRATURA		ESTRICCÃO	
ϵ_x	ϵ_y	ϵ_x	ϵ_y
0,58361129	-0,24590054	0,37038329	-0,25877073
0,64730324	-0,22314355	0,5031966	-0,21567154
0,65414644	-0,2757535	0,51879379	-0,16487464
0,53649337	-0,19358475	0,60540827	-0,20211618
0,54377672	-0,16251893	0,59043088	-0,15198636
0,33217731	-0,1346749	0,58723095	-0,26136476
0,22194323	-0,09935008	0,6408007	-0,26006991
0,38865799	-0,10758521	0,63657683	-0,25213199
0,37431838	-0,11653382	0,63604759	-0,23193206
0,41805222	-0,11093156	0,17898266	-0,01918282
0,42885606	-0,13696586	0,16041672	-0,00904074
0,23586232	-0,10092592	0,20538683	-0,03737017
0,3220835	-0,15082289	0,35977055	-0,10647224
0,33217731	-0,09943038	0,20696903	-0,09024322
0,39977015	-0,10758521	0,29565024	-0,063072
0,12962377	0,08681969	0,12962377	0,08681969
0,13308754	0,08608595	0,13308754	0,08608595
0,38048932	-0,03355678	0,12962377	0,08681969
0,42983246	-0,01511364	0,13308754	0,08608595
0,37843644	-0,0273712	0,39068982	-0,03491544
0,39676067	-0,02429269	0,39977015	-0,04186412
0,4272266	-0,02224561	0,38933573	-0,03491544
0,40346311	-0,00803217	0,4087929	-0,03978087
0,4001175	-0,03149067	0,32786386	-0,05129329
0,40145709	-0,03045921	0,35206433	-0,02634398
0,19062036	0,0019918	0,38730114	0,00598207
0,41936801	0,04403689	0,37843644	0,04497337
0,43502391	0,03440143	0,35487332	0,0295588
0,42853038	0,04114194	0,39068982	0,03149867
0,40945713	0,05448829	0,31261856	0,01658712
0,3750059	0,0009995	0,35627486	0,02176149
0,4087929	0,04210118	0,41144718	0,03246719
0,38797979	0,03825871	0,35346981	0,02858746
0,3750059	0,05259245	0,31626953	0,02469261
0,42068207	0,17981843	0,40546511	0,12751332
0,38117242	0,14323417	0,40212621	0,14583045
0,4087929	0,16126815	0,40812823	0,15614868
0,37775127	0,15785808	0,42918163	0,1380213
0,38287861	0,13365638	0,41475536	0,12927234
0,39406706	0,18481844	0,43078427	0,1154137
0,3750059	0,10255699	0,41144718	0,13976194
0,39743294	0,12751332	0,41541544	0,13976194
		0,44596705	0,1088544
		0,41113285	0,15272109
		0,4001175	0,15186235
		0,38933573	0,13976194
		0,38933573	0,1061602
		0,40145709	0,13365638
		0,35276732	0,09621886
		0,30949245	0,12398598
		0,41210965	0,13190507
		0,37843644	0,07881158

SEM REVESTIMENTO	
ESCALA REAL	
FRATURA	
ϵ_x	ϵ_y
0,505008738	-0,141563564
0,509224342	-0,168418652
0,494696242	-0,021223636
0,524136638	-0,07364654
0,440188544	-0,07364654
0,473746616	-0,025231992
0,510425544	-0,125563223
0,472500509	-0,084469157
0,53882982	-0,163696093
0,434376452	-0,059750004

COM REVESTIMENTO	
ESCALA REAL	
FRATURA	
ϵ_x	ϵ_y
0,322083499	0,003992021
0,287432041	0,020782519
0,347835995	0,04683586
0,288182947	0,035367544
0,270790205	0,016857117
0,49403863	0,014888612
0,491010996	-0,07364654
0,476234179	0,003992021
0,477475644	-0,050241216
0,332894415	-0,029428811
0,687632	-0,019182819
0,303801454	0,022739487
0,308219724	-0,009040745
0,262364264	0,003992021
0,291173962	0,031498667
0,333611004	0,029558802