

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

RAFAEL LAZZAROTTO

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CURVA LIMITE DE
CONFORMAÇÃO VIA ENSAIO NAKAJIMA**

CAXIAS DO SUL

2017

RAFAEL LAZZAROTTO

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CURVA LIMITE DE
CONFORMAÇÃO VIA ENSAIO NAKAJIMA**

Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Matrizes e Ferramentas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2017

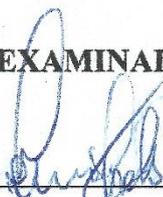
RAFAEL LAZZAROTTO

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CURVA LIMITE DE
CONFORMAÇÃO VIA ENSAIO NAKAJIMA**

Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Matrizes e Ferramentas.

Aprovado em: 13 / 06 / 2017

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Eng. Eduardo Nabinger
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Neste trabalho comparou-se a curva limite de conformação experimental e simulada para o aço SAE 1006. O método escolhido na determinação das curvas é o ensaio descrito por Nakajima, onde corpos de prova de tamanhos variados são conformados sob ação de um punção hemisférico. Uma ferramenta foi construída para os ensaios, com os quais a curva experimental foi determinada. As propriedades mecânicas do material foram obtidas por ensaios experimentais de tração e inseridas no Dynaform® para determinar a curva simulada. Concluiu-se que a curva experimental apresentou características consistentes com a literatura e que a curva simulada indicou uma capacidade de conformação do material inferior à prática, resultado de um comportamento conservador do Dynaform®.

Palavras-chave: Curva limite de conformação. Nakajima. Simulação numérica.

ABSTRACT

This work compared the experimental and simulated forming limit curve for SAE 1006 steel. The method selected for determining the curves is the test described by Nakajima, where specimens of varying sizes are formed under the action of a hemispherical punch. A tool was constructed for the tests, with which the experimental curve was determined. The mechanical properties of the material were obtained by experimental tensile tests and inserted in Dynaform® to determine the simulated curve. It is concluded that the experimental curve presented characteristics consistent with the literature and that the simulated curve indicated a conformation capacity lower than the practice for the material, result of a conservative Dynaform® behavior.

Keywords: Forming limit curve. Nakajima. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento da chapa em relação à deformação	18
Figura 2 - CLC para um aço	19
Figura 3 - Princípio de determinação de deformações	20
Figura 4 - Curva Limite de Conformação	21
Figura 5 - Esquema básico do ensaio Nakajima.....	22
Figura 6 - Corpos de prova ensaiados conforme Nakajima	23
Figura 7 - CLC experimentais para Ti CP GR.2	24
Figura 8 - Ferramenta de estampagem profunda.....	25
Figura 9 - Estado de deformações do processo	26
Figura 10 - Defeitos e causas em peças estampadas	27
Figura 11 - Resultado de uma simulação	28
Figura 12 - Ensaio de tração com extensômetro	33
Figura 13 - Projeto da matriz para ensaio.....	34
Figura 14 - Travamento da chapa.....	35
Figura 15 - Ferramenta para ensaio Nakajima	36
Figura 16 - Corpos de prova para ensaio Nakajima	36
Figura 17 - Corpos de prova prontos para ensaio.....	37
Figura 18 - Posicionamento da ferramenta na prensa	38
Figura 19 - Conjuntos fixo e móvel da ferramenta.....	39
Figura 20 - Corpos de prova ensaiados	46
Figura 21 - Corpo de prova 200x80 mm após embutimento.....	46
Figura 22 - CLC experimental.....	47
Figura 23 - Comportamento CLC x n.....	48
Figura 24 - Corpo de prova 200x125 mm simulado.....	49
Figura 25 - Deformação simulada na grade de círculos	50
Figura 26 - CLC simulada	51
Figura 27 - Comparação de simulações.....	52
Figura 28 - CLC experimental x CLC simulada	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1006	31
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1006.....	31
Tabela 3 - Valores de n e C para diversas ligas	32
Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova para ensaio de tração.....	33
Tabela 5 - Dados de entrada no programa	42
Tabela 6 - Propriedades mecânicas.....	44
Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos com a literatura	45
Tabela 8 - Comparação dos resultados obtidos com a literatura	45
Tabela 9 - Dados anteriores ao ensaio	61
Tabela 10 - Dados posteriores ao ensaio.....	61
Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova	69

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CLC	Curva Limite de Conformação
DLC	Diagrama Limite de Conformação
ETA	<i>Engineering Technology Associates</i>
MEF	Método de elementos finitos
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão
ε	Deformação
n	Índice de encruamento
r	Índice de anisotropia
E	Módulo de elasticidade
σ_e	Limite de escoamento
R_m	Limite de resistência ou tensão máxima
L_{Rup}	Limite de ruptura
δ	Alongamento
F	Força
l_1	Comprimento instantâneo
$\varepsilon\%$	Deformação relativa
A_0	Secção inicial
l_0	Comprimento inicial
φ	Deformação verdadeira
k_f	Tensão de escoamento
A	Área instantânea
C	Constante do material
φ_b	Deformações principais na direção da largura
φ_s	Deformações principais na direção da espessura
b_0	Largura inicial
b_F	Largura final
l_F	Comprimento final
r_m	Anisotropia média
Δ_r	Anisotropia planar
φ_1	Deformação principal máxima
φ_2	Deformação principal mínima
a	Deformação maior na elipse
b	Deformação menor na elipse
d_0	Diâmetro inicial do círculo
β	Relação de estampagem
μ	Coefficiente de atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo geral	12
1.3.2	Objetivo específico	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DE CHAPAS	14
2.1.1	Propriedades mecânicas	14
2.1.2	Curva de escoamento	15
2.1.3	Índice de anisotropia	16
2.2	CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO	17
2.2.1	Análise de deformações para determinação da CLC	19
2.2.2	Cálculo das deformações	20
2.3	ENSAIOS TECNOLÓGICOS	21
2.3.1	Método Nakajima	22
2.4	ESTAMPAGEM PROFUNDA	24
2.4.1	Parâmetros do processo de estampagem profunda	26
2.4.2	Defeitos em peças estampadas	27
2.5	SIMULAÇÃO DE ESTAMPAGEM	27
2.5.1	Análise por elementos finitos	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1.1	Teste de tração	32
3.1.2	Equipamentos	33
3.1.3	Ferramenta para ensaio	34
3.1.4	Preparação dos corpos de prova	36
3.1.5	Ensaio de Nakajima	38
3.2	METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO NUMÉRICO	40
3.2.1	Pré-processamento	40

3.2.2	Pós-processamento.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	44
4.1.1	Propriedades mecânicas.....	44
4.1.2	Anisotropia.....	45
4.2	ENSAIO NAKAJIMA EXPERIMENTAL.....	46
4.3	ENSAIO NAKAJIMA SIMULADO.....	48
4.4	CLC EXPERIMENTAL X CLC SIMULADA.....	53
5	CONCLUSÕES.....	54
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
	APÊNDICE A - MALHAS CRIADAS PARA SIMULAÇÃO.....	59
	APÊNDICE B - CÁLCULOS PARA A CURVA DE ESCOAMENTO REAL.....	60
	APÊNDICE C - CÁLCULOS PARA O ÍNDICE DE ANISOTROPIA.....	61
	APÊNDICE D - DADOS EXPERIMENTAIS PARA AS DEFORMAÇÕES.....	63
	APÊNDICE E - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ESTAMPAGEM.....	64
	APÊNDICE F - DADOS SIMULADOS PARA AS DEFORMAÇÕES.....	68
	ANEXO A - CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.....	69
	ANEXO B - RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	70
	ANEXO C - RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE EMBUTIMENTO.....	71

1 INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica possuem grande aplicação na indústria automotiva e de eletrodomésticos (linha branca) devido a sua produtividade, confiabilidade e baixo custo de produção, apesar do alto custo do ferramental. Segundo Provenza (1993), o processo consiste em submeter uma chapa plana a deformações plásticas, ocasionadas por uma série de operações mecânicas, de maneira que transformem a chapa em uma geometria determinada.

No entanto, para garantir o sucesso da ferramenta, é necessário possuir o domínio acerca das variáveis referentes ao material. Um recurso eficiente para atender esta necessidade é a Curva Limite de Conformação, ou CLC, que expressa a máxima deformação possível que uma chapa suporta durante o processo de conformação. Por se tratar de um critério de falha, a CLC é utilizada na indústria para análise da viabilidade de conformação de um componente, permitindo antever dificuldades no processo oriundas da sua geometria ou material.

As curvas são caracterizadas por testes tecnológicos onde a chapa é submetida a diferentes solicitações desde o embutimento profundo, deformação plana ao estiramento biaxial. A avaliação experimental da CLC é realizada pela deformação de tiras de chapa com diferentes larguras sob ação de punções com diferentes geometrias. Utilizam-se punções de geometria esférica no ensaio Nakajima e punções cilíndricos no ensaio Marciniak.

A proposta deste trabalho é determinar experimentalmente a Curva Limite de Conformação via ensaio Nakajima e, através do software de simulação de estampagem Dynaform®, reproduzir o ensaio para obter a curva simulada. Posteriormente, será feita uma avaliação e comparação das curvas encontradas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Depois de concluída a construção da matriz de estampo, a mesma é submetida a testes (*try-out*) com o objetivo de verificar se a peça produzida atende as expectativas. No entanto, frequentemente a matriz necessita ser modificada, desde a troca do material até a alteração na geometria dos punções e matrizes que compõem o ferramental, ocasionando atrasos e retrabalho no lançamento de produtos. Um meio de evitar estes problemas é determinar a curva limite de conformação, entendendo as reais condições a que um material pode ser submetido.

Desta forma, o ensaio Nakajima possibilita a determinação dos diferentes estados de deformação presentes no processo de estampagem, utilizando um único ferramental. Também

possibilita avaliar a variação da força em função do deslocamento do punção e a deformação ao longo do sentido de laminação da chapa. A simulação numérica, dotada dos mesmos parâmetros do experimento, trará à tona mais um resultado com o qual é possível analisar a estampabilidade de um determinado material.

1.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa Matrizes Valmasser Ltda., fundada em 1989, localiza-se no polo industrial de Caxias do Sul. Dispondo de amplo espaço físico e prédio próprio, num terreno de 6700m² e 3400m² de área construída, possui um quadro de funcionários de aproximadamente 100 colaboradores. Atendendo ao segmento de linha branca e automotiva, trabalha na fabricação de moldes de injeção e matrizes convencionais e progressivas para corte, dobra e repuxe.

Atualmente, com capacidade de produzir moldes e ferramentas de até 50 toneladas, a Matrizes Valmasser Ltda. encontra-se em posição de destaque no cenário nacional, com uma gama de clientes tais como: Fiat, Volkswagen, General Motors, Marcopolo, Electrolux, Honda, entre outras.

O presente trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia com colaboração dos setores de usinagem e ajustagem da empresa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Determinar por processo experimental e simulação numérica a curva limite de conformação por ensaio Nakajima.

1.3.2 Objetivo específico

A partir do objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- a) revisão do status da literatura da curva limite de conformação (CLC) via Nakajima;
- b) projetar ferramenta para ensaio Nakajima;
- c) determinar as propriedades mecânicas do material para que se consiga alimentar o *software* de simulação de estampagem Dynaform®;
- d) determinar experimentalmente a CLC;

- e) reproduzir no Dynaform® o ensaio Nakajima para obter a CLC simulada;
- f) comparar e avaliar as curvas obtidas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTAMPABILIDADE DE CHAPAS

O desenvolvimento e fabricação de um produto sob condições otimizadas, no que se refere às exigências de qualidade e menor custo, requer o controle acerca das variáveis do processo. Neste sentido, diversos testes foram criados para caracterizar as propriedades do material, de maneira a auxiliar os profissionais da área, desde o projetista de ferramentas ao operador de prensa. No entanto, não existe apenas um teste que forneça todas as informações necessárias. De maneira geral, vários tipos de ensaios são utilizados para a caracterização da estampabilidade de chapa metálicas (BUENO, 2016).

Segundo Schaeffer (2004), os principais testes utilizados na caracterização da estampabilidade de chapas são:

- a) testes de tração: determinam a curva tensão (σ) vs. deformação (ϵ), indicando tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade, ductilidade, energia por unidade de volume etc.;
- b) curva de escoamento: fornece o índice de encruamento (n) do material e o coeficiente de resistência. A mesma pode ser obtida pelo ensaio de tração;
- c) índice de anisotropia (r): caracteriza a influência das propriedades relacionadas com os efeitos das direções de conformação no processo de laminação;
- d) Curva Limite de Conformação ou CLC: demonstra os limites máximos de deformação relacionados com as três direções principais de deformação;
- e) testes tecnológicos: realizados para analisar os efeitos da combinação dos testes mencionados anteriormente;
- f) testes para determinar o coeficiente de atrito e informações sobre a eficiência dos lubrificantes.

2.1.1 Propriedades mecânicas

De acordo com Schaeffer (2004), o ensaio de tração é o teste mais usual na definição de algumas propriedades mecânicas, tais como:

- a) módulo de elasticidade (E);
- b) limite de escoamento (σ_e);
- c) limite de resistência ou tensão máxima (R_m);

- d) limite de ruptura (L_{Rup});
- e) alongamento (δ).

O ensaio é baseado na aplicação de carga de tração uniaxial crescente nas extremidades de um corpo de prova padronizado, assim o resultado do teste de tração consiste na obtenção da curva de tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo de prova (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). Ainda, conforme Schaeffer (2004), o corpo de prova é tracionado com velocidade constante até a fratura registrando-se a força F (N) e o comprimento instantâneo l_1 (mm).

Utilizando os valores de força (F) e comprimento (l_1) se obtém a tensão (σ) e a deformação relativa ($\epsilon\%$) para cada instante do ensaio. Segundo Schaeffer (2004), a tensão e a deformação relativa são calculadas, respectivamente, pelas equações (1) e (2).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [N/mm}^2 \text{]} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\epsilon\% = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (\text{eq. 2})$$

onde:

A_0 se refere à secção inicial do corpo de prova;

l_0 se refere ao comprimento inicial do corpo de prova.

2.1.2 Curva de escoamento

No diagrama convencional a força (F) é sempre relacionada com a área inicial (A_0), enquanto que no diagrama verdadeiro a força é relacionada com a área instantânea. À curva que relaciona a tensão verdadeira (σ) com a deformação verdadeira (φ), chama-se de curva de escoamento (curva verdadeira) (SCHAEFFER, 1999).

Através de um ensaio de tração uniaxial, é possível obter a variação da tensão de escoamento (k_f) de um determinado material em função da deformação verdadeira (φ), medindo a força e a variação do comprimento (SCHAEFFER, 2004). Ainda, segundo Garcia, Spim e Santos (2012), o método mais correto para determiná-la consiste em descarregar e carregar novamente o corpo de prova na região plástica de deformação, possibilitando a formação de histerese mecânica.

Conforme Schaeffer (2004), a tensão de escoamento (k_f), a área instantânea (A) e a deformação verdadeira (φ) são dadas, respectivamente, pelas equações (3) a (5).

$$k_f = \frac{\sigma}{A} \text{ [N/mm}^2 \text{]} \quad (\text{eq. 3})$$

$$A = \frac{A_0 l_0}{l_1} \text{ [mm}^2 \text{]} \quad (\text{eq. 4})$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \text{ [-]} \quad (\text{eq. 5})$$

Invariavelmente obtidas de maneira experimental, as curvas de escoamento podem ser descritas conforme uma função matemática. A forma geral da representação das curvas de escoamento para chapas segue a equação (6) de Hollomon e Ludwik (SCHAEFFER, 1999):

$$k_f = C \varphi^n \quad (\text{eq. 6})$$

onde:

C é uma constante do material;

n é o índice de encruamento.

O índice de encruamento (n) é um importante indicador das características de encruabilidade dos materiais, pois quanto maior for o número, maior será a encruabilidade do material. O índice pode ser obtido transferindo os dados da tensão de escoamento (k_f) e da deformação (φ) para um diagrama em escala logarítmica. Normalmente, obtêm-se uma reta, sendo que o valor de n é dado pela inclinação desta reta.

2.1.3 Índice de anisotropia

A deformação da microestrutura de chapas metálicas durante o processo de laminação gera grãos mais alongados na direção em que a chapa foi laminada, originando uma heterogeneidade nas propriedades da chapa. A quantificação deste efeito é realizada pelo índice de anisotropia (r). A anisotropia é responsável pelo fenômeno conhecido como "orelhamento" em processos de estampagem profunda (SCHAEFFER, 2004).

Usualmente, as peças laminadas possuem dois tipos de anisotropia: anisotropia planar,

resultante das propriedades mecânicas no plano da chapa que mudam com a direção em que são medidas; e anisotropia normal, onde as propriedades segundo a espessura são diferentes daquelas obtidas no plano da chapa.

De acordo com Schaeffer (1999), o índice de anisotropia (r) é definido como a razão entre as deformações principais na direção da largura (ϕ_b) e a deformação na espessura (ϕ_s), conforme equação (7):

$$r = \frac{\phi_b}{\phi_s} = \frac{\ln b_F/b_0}{\ln s_1/s_0} = \left(\ln \frac{b_F}{b_0} \right) / \left(\ln \frac{b_0 l_0}{b_F l_F} \right) \quad (\text{eq. 7})$$

Na qual b_0 e b_1 são, respectivamente, a largura inicial e a largura final do corpo de prova; l_0 e l_F correspondem, respectivamente, ao comprimento inicial e final do corpo de prova. A partir das três razões de deformação, são calculados os valores para anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δ_r), conforme equações (8) e (9) (SCHAEFFER, 1999):

$$r_m = \frac{1}{4} (r_0 + 2 r_{45} + r_{90}) \quad (\text{eq. 8})$$

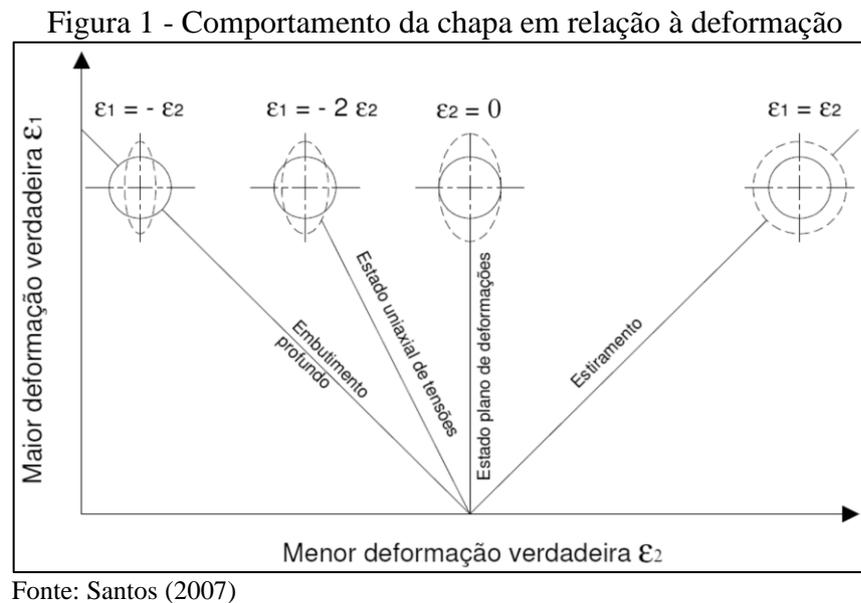
$$\Delta_r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} \quad (\text{eq. 9})$$

Nas quais r_0 , r_{45} e r_{90} representam o valor de anisotropia dos corpos de prova recortados nas três diferentes direções à direção de laminação. Conforme Schaeffer (2004), um material isotrópico ($r_m=1$) tem suas propriedades mecânicas iguais em todas as direções; um material anisotrópico com $r_m>1$ terá uma diminuição da espessura menor do que na largura; um material anisotrópico com $r_m<1$ não terá boa estampabilidade, pois para uma mesma solicitação mecânica uma deformação da espessura será maior que na largura, ocasionando falha prematura na direção da espessura.

2.2 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Na avaliação da estampabilidade de uma peça são muito utilizadas as CLC, definidas como a deformação principal máxima ϕ_1 vs. deformação principal mínima ϕ_2 (SCHAEFFER, 1999). As curvas mostram como a combinação das principais deformações (estiramento biaxial, deformação plana ou embutimento profundo), provenientes das diferentes solicitações durante

um processo de estampagem, influencia no limite de conformação de um material. Esse recurso ajuda a evitar falhas provenientes da escolha de um material de baixa qualidade, assim como elevados custos na utilização de materiais com qualidade desnecessariamente alta. A Figura 1 mostra o comportamento do material conforme o tipo de deformação.



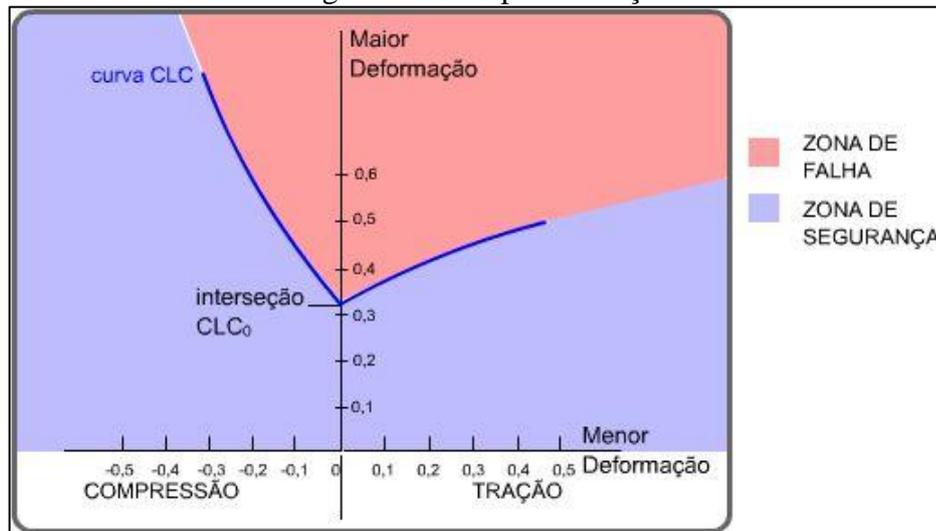
Os experimentos mais utilizados na determinação da CLC são os métodos propostos por Nakajima (1968) e Marciniak (1967). Os procedimentos consistem numa ferramenta composta por matriz, prensa-chapa e punção onde corpos de prova com diferentes larguras são deformados por um punção hemisférico (Nakajima) ou de fundo plano (Marciniak).

A diferença na geometria dos corpos de prova gera os diferentes estados de deformação na chapa. As deformações de todos os corpos de prova são medidas e seus valores plotados em um diagrama ϕ_1 vs. ϕ_2 , onde os pontos gerados formam a CLC.

Conforme Arruda (2008), alguns fatores afetam a CLC, deslocando-a para cima (maior limite de conformação) ou para baixo (menor limite de conformação): maiores espessuras, menores velocidades de conformação, menor tamanho de grão, menor coeficiente de atrito e corpo de prova cortado na direção de laminação deslocam a curva para cima; corpos de prova cortados perpendicularmente à direção de laminação e que sofreram pré-deformações trativas deslocam a curva para baixo.

Ainda, segundo Schaeffer (2004), a geometria das ferramentas, forma do corpo de prova, lubrificante, qualidade do material e sistemática de aquisição dos dados, também são fatores a serem ponderados para a determinação da CLC. Uma curva CLC típica para o aço pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - CLC para um aço



Fonte: CIMM (2017)

Todavia, o diagrama limite de conformação é muito sensível a trajetórias de deformações não lineares. Como por exemplo, em aplicações industriais peças complexas são normalmente feitas em múltiplos estágios de conformação. Em tais situações, o diagrama não pode ser utilizado para prever se o processo de produção será bem ou mal sucedido (JUNTARATIN et al., 2012).

2.2.1 Análise de deformações para determinação da CLC

De acordo com Chemin Filho (2004), os ensaios são realizados até o surgimento de fratura dúctil na chapa, momento em que as deformações limites ficam estabelecidas. A medição das deformações é feita na região vizinha à zona fraturada. Segundo Schaeffer (2004), a técnica utilizada para medir essas deformações é denominada visioplasticidade, ou seja, é o método de acompanhar e medir deformações através de uma malha impressa na chapa. Sabendo a geometria inicial e final da malha é possível mensurar a deformação originada durante o processo

Algumas questões precisam ser consideradas na impressão da malha. Conforme Srour Junior (2002) a grade de círculos tem que aderir firmemente à superfície, conformar junto à geratriz sem quebrar ou desaparecer, possuir linhas nítidas, ter contornos definidos antes e após a deformação plástica, a malha não deformada tem que manter suas dimensões, as linhas não podem cruzar-se gerando nós, a técnica de aplicação da malha não pode corroer a superfície e a espessura das linhas da malha deve ser pequena em relação à espessura da chapa.

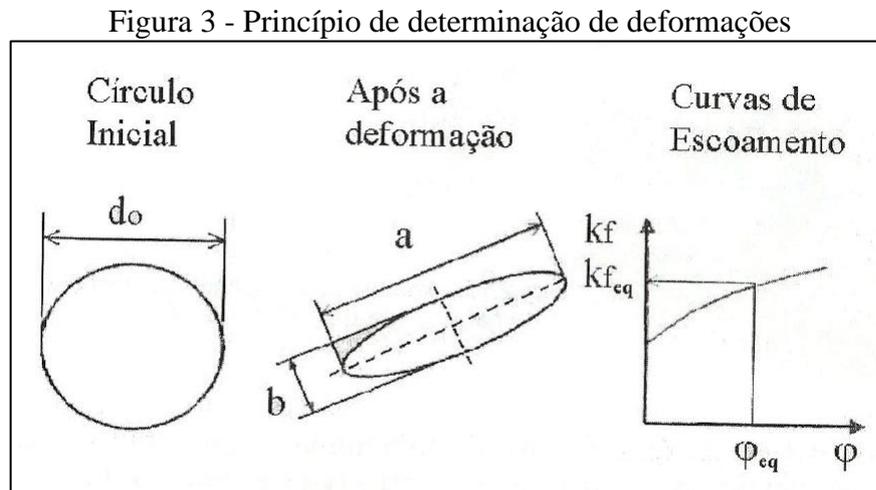
Há diversas maneiras de criar a grade de círculos na geratriz, contudo todas com

alguma desvantagem. O importante é que o método de gravação garanta a consistência das medições nas condições específicas do ensaio. Srour Junior (2002) cita alguns métodos para a impressão da malha na geratriz:

- a) riscar com objeto pontiagudo: processo demorado e sem precisão;
- b) pintar com tinta: pode desaparecer com a deformação;
- c) aplicação eletroquímica;
- d) processo Kodak: provoca corrosão do material;
- e) laser: preciso, mas de alto custo.

2.2.2 Cálculo das deformações

Após o ensaio de estampagem, as deformações na grade de círculos, previamente gravada na superfície da geratriz, fornecem as informações necessárias sobre a variação de deformações nas regiões críticas. Uma vez que os círculos gravados na chapa copiam as deformações causadas durante a estampagem, os mesmos se deformam e assumem a forma de elipses. A Figura 3 mostra o círculo inicial impresso na geratriz e a elipse resultante após o procedimento de estampagem.



Fonte: Schaeffer (2004)

As medidas das elipses apontarão os valores de deformação nos dois eixos de referência, portanto serão obtidos os valores de deformação maior e menor com os quais será possível plotar a CLC. As equações (10) e (11) são indicadas por Schaeffer (2004).

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad (\text{eq. 10})$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad (\text{eq. 11})$$

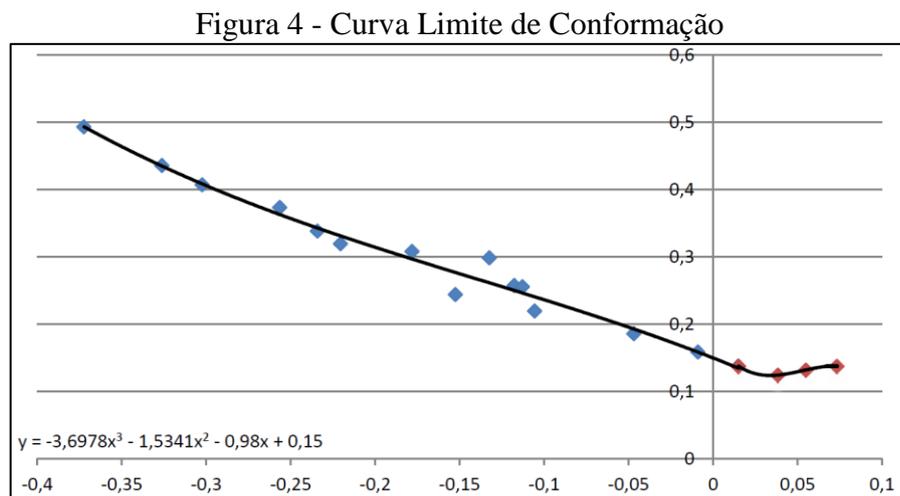
onde:

a se refere à deformação maior na elipse;

b se refere à deformação menor na elipse;

d_0 é o diâmetro inicial do círculo.

Os dados obtidos são plotados num gráfico de deformação principal máxima φ_1 no eixo y e deformação principal mínima φ_2 no eixo x. Esses dados formam uma nuvem de pontos, da qual um polinômio é formado, ou seja, a CLC. A Figura 4 mostra uma CLC formada a partir de uma nuvem de pontos.



2.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Os ensaios tecnológicos têm como objetivo estimar a capacidade de conformação de um determinado material na etapa de produção. Nas situações em que ocorre um estado complexo de deformações se torna necessário conhecer o comportamento da matéria-prima durante o processo de estampagem. Esses ensaios podem ser utilizados para determinar ou validar uma CLC, além de definir com mais exatidão a relação de estampagem (β) (SCHAEFFER, 2004).

A determinação da CLC pode ser feita por diversos ensaios, entretanto Schaeffer (2004)

afirma que o mais usual e prático é o ensaio denominado Nakajima. Segundo ele, neste método, corpos de prova com diferentes geometrias são submetidos a estiramento em uma matriz composta basicamente por matriz, punção e prensa-chapa.

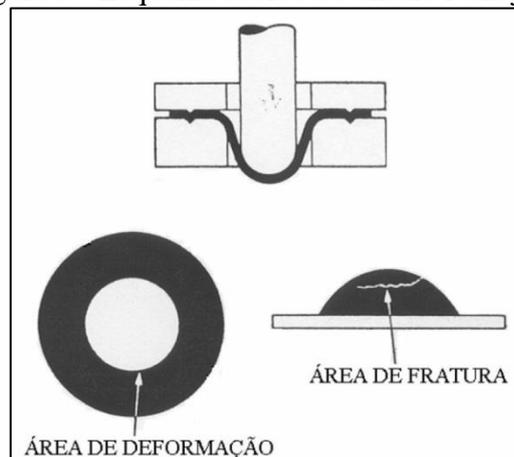
2.3.1 Método Nakajima

O ensaio é realizado utilizando uma ferramenta constituída essencialmente pelos seguintes componentes:

- a) matriz: sua função é servir de "forma" para a chapa que será estampada, sendo que a mesma será empurrada para dentro do furo central da matriz pelo punção;
- b) punção: responsável direto pela deformação da chapa;
- c) prensa-chapa: encarregado de posicionar e prender a chapa, de maneira a impedir o escoamento do material para dentro da matriz.

Em trabalho aplicando o método Nakajima, Chemin Filho (2004) utilizou ferramenta composta por um punção hemisférico com diâmetro de 100 mm, prensa-chapa e uma matriz com diâmetro interno de 108 mm com raio de concordância de 10 mm. O esquema básico do ensaio está ilustrado na Figura 5 abaixo:

Figura 5 - Esquema básico do ensaio Nakajima

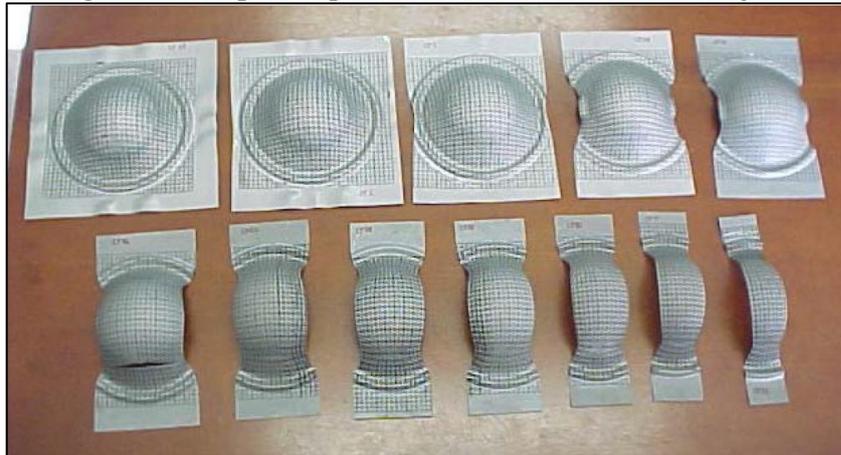


Fonte: Chemin Filho (2004)

O formato dos corpos de prova consiste em tiras retangulares com diferentes larguras, sendo que a menor dimensão segue o sentido de laminação, com a possibilidade de terem entalhes semicirculares nas laterais. De acordo com Silva (2005), corpos de prova com entalhe levam a uma condição de embutimento profundo, enquanto que nos corpos de prova sem entalhe a deformação ocorre por estiramento.

As chapas são deformadas uma a uma com velocidade controlada e constante, a fim de identificar o ponto de fratura de forma mais precisa. No ensaio Nakajima realizado por Chemin Filho (2004), foram confeccionados ao todo 12 corpos de prova que variavam suas dimensões desde 200x200 mm até 200x40 mm. Na Figura 6 é possível observar o aspecto dos corpos de prova após a gravação das malhas e deformação na máquina.

Figura 6 - Corpos de prova ensaiados conforme Nakajima



Fonte: Chemin Filho (2004)

A força aplicada pelo prensa-chapa não permite escorregamentos do material do flange para a parte central do corpo de prova, assim reproduzindo os diferentes estados de deformação (CHEMIN FILHO, 2004).

Sobre a lubrificação, Santos (2007) afirma que a mesma pode ser feita por meio de um filme lubrificante, podendo ter uma almofada elástica com o objetivo de melhorar a distribuição das deformações.

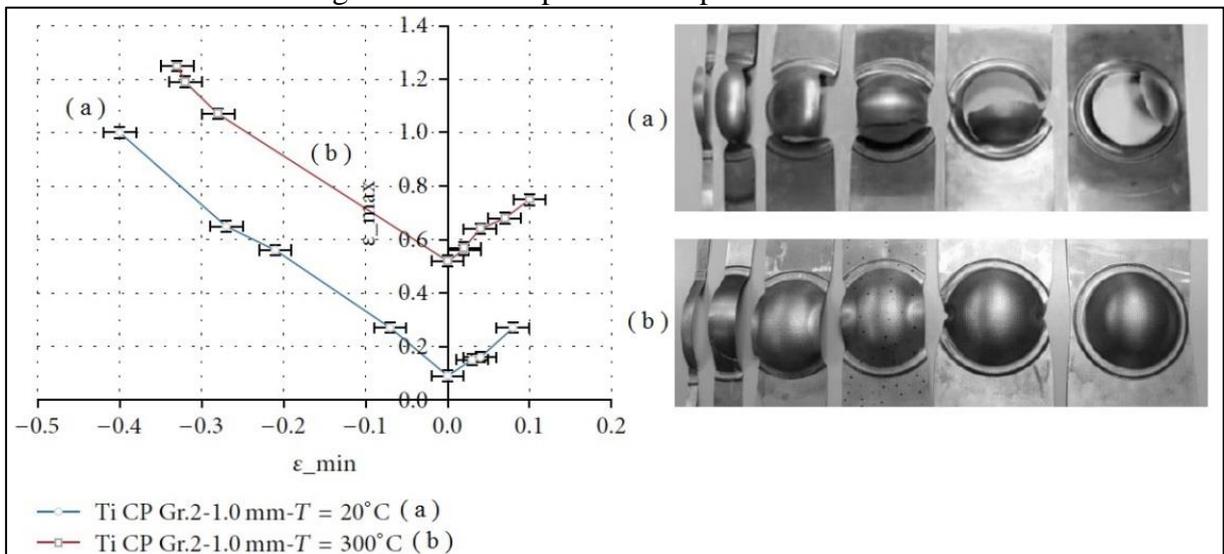
Em seu trabalho, Netto (2004) destaca que Nakajima observou:

- a) a influência direta das propriedades mecânicas (grau de encruamento e índice de anisotropia) no comportamento da curva;
- b) maiores deformações para um coeficiente de atrito menor, ou seja, o atrito entre o punção e o corpo de prova também influencia na curva;
- c) na direção principal de deformação, a menor deformação acontece na condição de deformação plana ($\varphi_2 = 0$). As deformações aumentam nas condições de tração uniaxial ($\varphi_2 < 0$) e deformação biaxial ($\varphi_2 > 0$);
- d) a dependência das deformações medidas relacionadas ao valor inicial da malha gravada na geratriz, isto é, quanto menor o tamanho da grade maior a capacidade de medir maiores deformações e vice-versa;

e) a conformabilidade do material depende da sua composição química, ou seja, a curva é influenciada pelo tipo de aço.

De modo a exemplificar a influência das propriedades mecânicas no comportamento da CLC, a Figura 7 ilustra as curvas obtidas por Fiorentino (2015) para chapas de titânio Ti CP GR.2 recozidas com espessura de 1 mm e testadas à temperatura de 20°C e 300°C. O autor cita um significativo aumento na conformabilidade do material, mesmo à média temperatura de 300°C. O estudo complementa que a CLC não depende da direção de laminação devido ao tratamento de recozimento nas chapas.

Figura 7 - CLC experimentais para Ti CP GR.2



Fonte: adaptado de Fiorentino (2015)

2.4 ESTAMPAGEM PROFUNDA

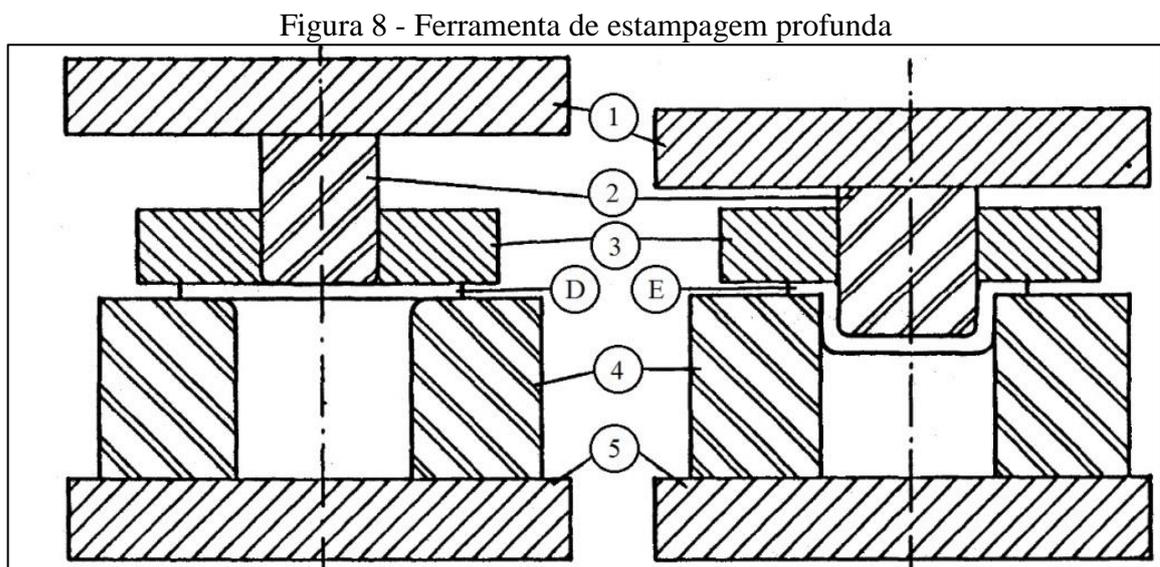
O processo de estampagem profunda é muito importante na transformação a frio de chapas metálicas, sendo base de produção para uma grande diversidade de peças e componentes nos mais variados setores da economia. As aplicações são muito amplas, destacando-se as indústrias automobilísticas, aeroespacial, aeronáutica, hospitalar, doméstica e decorativa.

O embutimento é definido por Schaeffer (2004) como o processo de fabricação onde a matéria-prima é uma chapa metálica plana (denominada geratriz ou *blank*) transformada em formas geométricas com saliências profundas ou rasas. O grande benefício desta tecnologia de fabricação é o baixo custo devido à economia de matéria-prima e à baixa necessidade de usinagem.

No processo de estampagem profunda são empregadas ferramentas compostas pelos

seguintes elementos básicos: punção, matriz e prensa-chapa. O punção possui a geometria interna do produto desejado; a matriz tem a forma de um anel com o canto interno arredondado, sob o qual o material escoar; a maioria desses dispositivos possui prensa-chapa (sujeitador), a fim de controlar o escoamento do material para o interior da matriz e evitar o enrugamento do flange.

Os componentes citados são confeccionados em aço ferramenta temperado para garantir uma boa resistência ao desgaste, originada pelo atrito inerente ao processo. As regiões em contato com a chapa devem ser retificadas e polidas (SCHAEFFER, 1999). A Figura 8 ilustra a configuração básica de uma ferramenta de embutimento, na qual tem-se suporte de punção (1), punção (2), prensa-chapa (3), matriz (4), suporte da matriz (5), disco ou peça inicial no processo (D) e copo ou peça parcialmente deformada (E).

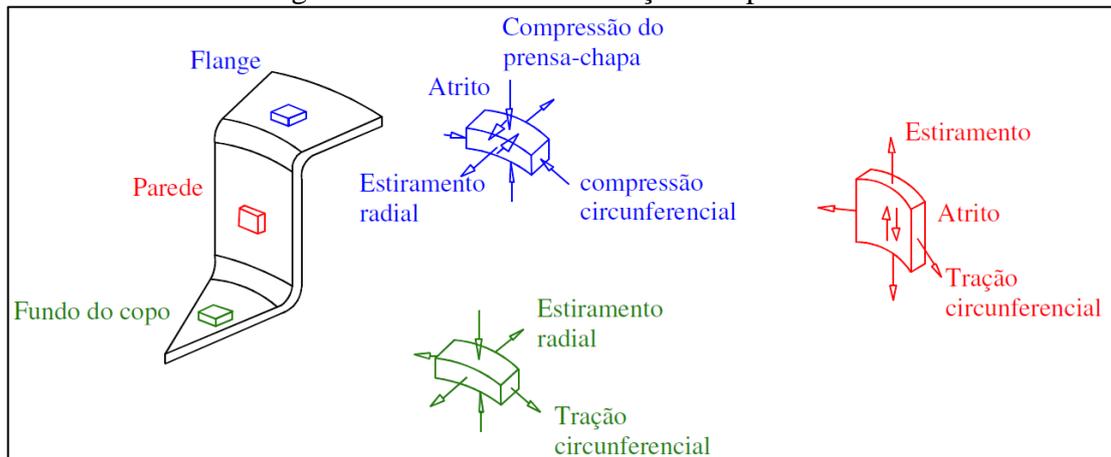


Fonte: adaptado de Bresciani Filho et al. (2011)

Segundo Bresciani Filho et al. (2011), o estado de deformações e tensões a que uma chapa plana é sujeitada numa operação de embutimento causa a modificação da sua espessura. A posição do elemento de estudo na peça conformada possui um estado de tensão próprio. Em peças cilíndricas, existem três distintos estados de tensão: um no flange, um na parede lateral e um no fundo do copo.

Na região do flange, onde atua o sujeitador, existem tensões de tração no sentido radial, além de tensões de compressão no sentido circunferencial e no sentido da espessura. No corpo lateral e no fundo do copo ocorrem tensões de tração no sentido radial e tensões de compressão no sentido circunferencial (SCHAEFFER, 2004). A Figura 9 demonstra os estados de deformação do processo.

Figura 9 - Estado de deformações do processo



Fonte: Santos (2007)

2.4.1 Parâmetros do processo de estampagem profunda

Conforme Bresciani Filho et al. (2011), o processo de estampagem é influenciado por diversos fatores de natureza mecânica e metalúrgica. Dentre os fatores de natureza mecânica é possível citar: forma e dimensões da peça, o tipo de prensa utilizada, forma e dimensões dos punções e matrizes e as condições de lubrificação. Os elementos elencados influenciam diretamente os estados de tensão e deformação em cada instante e região da peça.

O autor complementa que os fatores de ordem metalúrgica, referentes ao material da peça, dizem respeito à composição química e estrutura da matéria-prima. Fatores esses que dependem, por sua vez, do processo de fabricação e laminação aliado aos tratamentos térmicos que afetam as propriedades mecânicas do material da chapa.

De acordo com Schaeffer (2004), vários parâmetros são fundamentais para melhorar o processo, gerando assim ganhos na produção e competitividade no mercado. Dentre os diversos parâmetros, o autor cita:

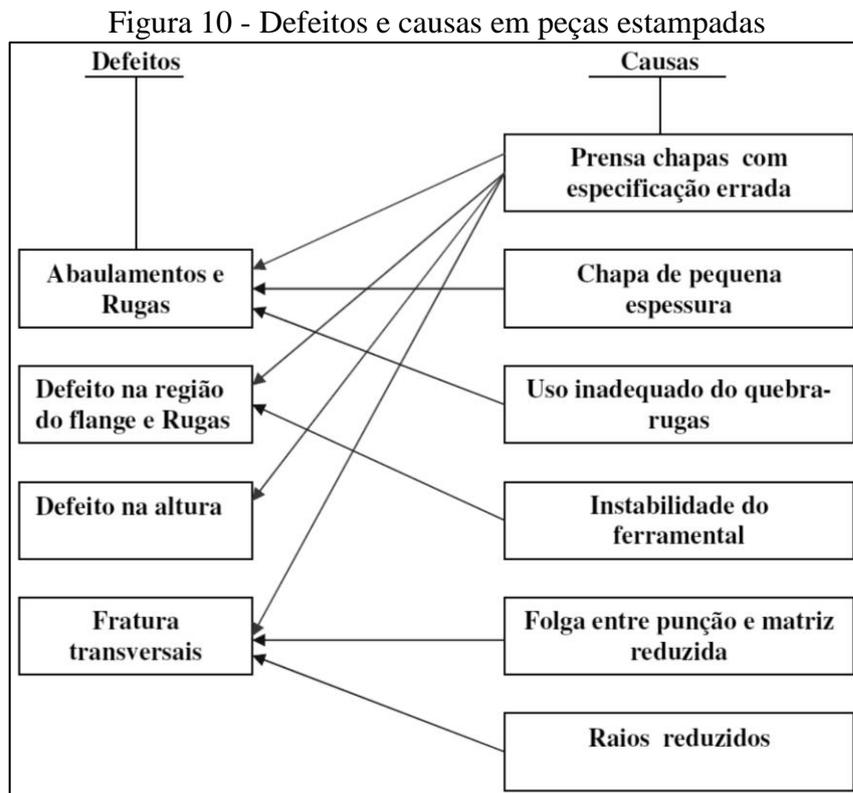
- a) tecnológicos: força, energia, deslocamento, tempo de deslocamento, velocidade de deformação, tempo de pressão;
- b) ferramental: geometria e sistema de fixação do punção, geometria e sistema de fixação da matriz, temperatura, deformações elásticas do material;
- c) equipamento: velocidade do punção, profundidade de conformação, tempo de pressão, precisão das guias, folga das guias, força, deslocamento, lubrificação;
- d) material: tensão máxima, tensão de escoamento, coeficiente de encruamento, anisotropia, alongamento, limite de ruptura, condições superficiais, microestrutura;
- e) geometria do componente: espessura da chapa, comprimento da chapa, largura da

chapa, diâmetro da geratriz, raios de centro, retorno elástico.

2.4.2 Defeitos em peças estampadas

Os principais defeitos encontrados em peças embutidas são decorrentes essencialmente de defeitos já existentes na chapa, de falhas no projeto e na construção da ferramenta, bem como erros na conservação do ferramental (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

No decorrer do processo de estampagem diversos fatores, que não são levados em conta ou que são mal dimensionados, podem ocasionar vários tipos de defeitos nos componentes produzidos. Na Figura 10, Schaeffer (2004) elenca uma série de defeitos e suas prováveis causas.



Fonte: adaptado de Schaeffer (2004)

2.5 SIMULAÇÃO DE ESTAMPAGEM

A simulação de estampagem pela análise computacional, fundamentada no método de elementos finitos (MEF), já comprovou ser uma ferramenta eficiente para avaliar a conformabilidade de peças estampadas durante a fase de projeto e confecção da matriz. Os projetistas encontram no MEF formas de solucionar problemas intrínsecos aos processos de

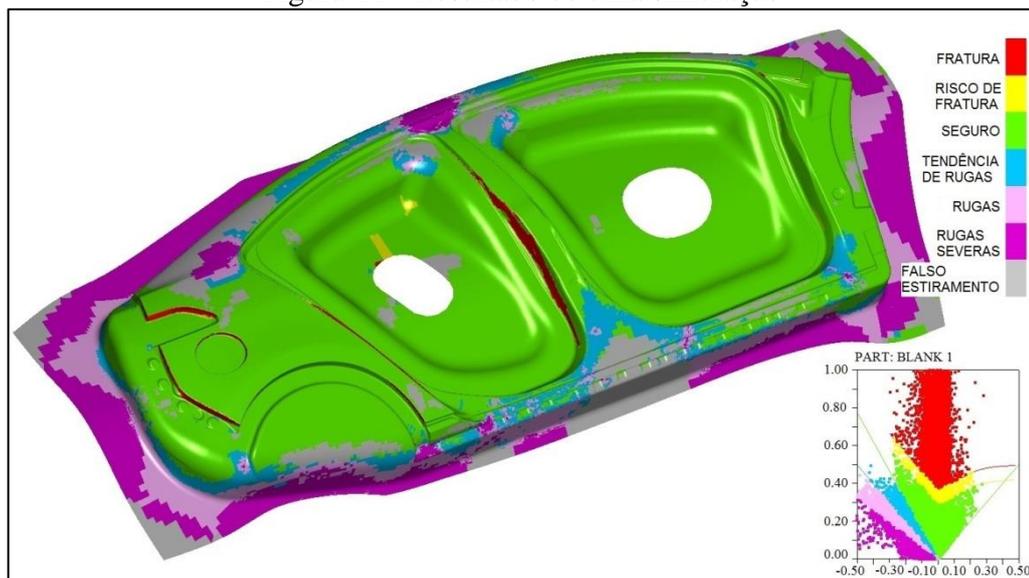
conformação, como o efeito de pequenas alterações nos parâmetros de processo ou o impacto do uso de diferentes lubrificantes (ÁLVAREZ-CALDAS et al., 2014).

Com a utilização crescente da análise computacional nos últimos anos, a relação dos resultados com dados práticos se tornou importante para legitimar um projeto. Aliada ao baixo custo se comparada a um ensaio experimental, a simulação proporciona rapidez em todas as fases do processo de desenvolvimento (ASSIS et al., 2010).

De acordo com Boff (2012), a simulação numérica pode ser utilizada de várias maneiras, permitindo relacionar resultados experimentais com resultados simulados, atingindo um nível mais alto de precisão nos parâmetros do processo. Desta maneira, a síntese entre simulação e experimento permite o estudo detalhado de problemas complexos e, conseqüentemente, o aprimoramento do processo.

A elevada capacidade de processamento dos programas e computadores modernos permitiu que as simulações se aproximassem cada vez mais dos resultados experimentais. Todavia, as condições de contorno e os valores dos dados de entrada são fatores de extrema relevância para a obtenção de resultados confiáveis. Alguns exemplos de softwares disponíveis no mercado para simulação de estampagem são: Optris®, Autoform®, Pam-Stamp®, Isoform®, MSC Patran® (MORAIS, 2009). A Figura 11 traz o resultado de uma simulação executada no Dynaform®.

Figura 11 - Resultado de uma simulação



Fonte: adaptado de ETA (2016)

A fim de estudar a influência de vários parâmetros de processo na qualidade da estampagem do piso inferior de automóveis, Huang (2014) avaliou a interferência dos

esticadores ou "tira rugas", o raio da matriz, o coeficiente de atrito, dentre outros. Também utilizando o *software* Dynaform®, o autor verificou que a análise por simulação fornece a base para o aprimoramento dos processos de estampagem, podendo reduzir significativamente os ciclos de fabricação de matrizes, custos de produção e melhorar a eficiência da produção.

2.5.1 Análise por elementos finitos

De acordo com Alves Filho (2006), os métodos analíticos clássicos possibilitam o cálculo de resposta aproximada dos deslocamentos para um específico modelo, deformações e tensões na estrutura nos seus infinitos pontos. Todavia, as soluções encontradas são insuficientes para a maioria dos problemas que são encontrados diariamente. Desta maneira, é conveniente desenvolver procedimentos que podem ser aplicados em caráter genérico, independente da configuração da estrutura e da condição de carregamento, dentro de uma precisão admissível do programa de engenharia. Estes métodos de aproximação deram origem ao Método de Elementos Finitos (MEF).

No MEF os sistemas contínuos são divididos em um número finito de partes denominadas elementos, os quais são interligados através de pontos chamados nós (SILVA, 2005). Em complemento, Santos (2007) afirma que esses elementos podem ser agrupados em um grande número de distantes configurações, modelando formas geométricas bastante complicadas. Além disso, permite aos projetistas alternativas no modo de aplicação de cargas e condições de contorno.

Em relação a processos de conformação mecânica, Santos (2007) estabelece que para transformar uma geometria simples em complexa é obrigatório um bom número de operações (pré-formação). Na aplicação do MEF para análise de conformação é indispensável um método adequado às condições de contorno das matrizes.

Conforme Silva (2005), os programas que usam o MEF são classificados de acordo com o tipo de integração de tempo e pelo tipo de formulação. Em seu estudo, Huang (2014) afirma que o *software* Dynaform® possui 16 tipos de elementos, sendo que o elemento padrão utilizado no programa é Balytschko-Tsay, que é o elemento mais eficiente no algoritmo.

Em estudo para estabelecer a eficácia da simulação numérica na estampagem de chapas metálicas, Stadnicki (2015) concluiu que é principalmente afetada pela complexidade do modelo de MEF, resultante do número de elementos/nós e dos graus de liberdade do modelo. O usuário pode reduzi-la por meio de ferramentas disponíveis nos *softwares* de simulação de estampagem. Outros fatores de influência seriam os métodos de solução e as possíveis

simplificações do MEF usadas pelos *solvers* dos programas. Quanto a isso, o autor afirma que o usuário tem capacidade limitada de influenciar os métodos de solução presentes nos *softwares*.

Com base na confrontação dos resultados de simulação para uma peça estampada típica, incluindo a análise de *springback* nos programas Dynaform® e Autoform®, Stadnicki (2015) verificou a concordância dos resultados da simulação com a realidade. Em trabalho para contrapor análises numéricas e experimentais para obter a CLC, Assis et al. (2010) alegou que a simulação é um instrumento seguro e de amplas possibilidades para a engenharia contemporânea, encontrando resultados próximos aos obtidos analiticamente com erro máximo de 7%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será descrita a metodologia dos ensaios experimentais utilizados na caracterização do material, a fim de determinar experimental e numericamente a CLC, haja vista que a mesma caracteriza a capacidade de deformação de um material quando submetido à estampagem.

O material em estudo foi o aço SAE 1006 com espessura de 0,75 mm laminado a frio, cuja composição química está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 1006

Elemento	C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)
%	0,08	0,45	0,03	0,035

Fonte: ArcelorMittal (2015)

A Tabela 2 compara as propriedades mecânicas do aço SAE 1006 em função do tipo de laminação. Observa-se um aumento da resistência mecânica do material na laminação a frio devido ao aumento do encruamento, porém há redução da ductilidade, constatada pela redução no alongamento em 50 mm do corpo de prova se comparada à laminação a quente.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1006

Processo de Laminação	Valores mínimos estimados				
	Limite de resistência [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento em 50 mm [%]	Redução da área [%]	Dureza [HB]
Quente	300	170	30	55	86
Frio	330	280	20	45	95

Fonte: adaptado de ASM International (1990)

Para diversas ligas metálicas, dentre os quais o aço de baixo carbono (aço doce) no qual o aço SAE 1006 se enquadra, Callister (2002) tabulou os valores do índice de encruamento (n) e a constante do material (C). De acordo com Callister (2002), seus valores variam de liga para liga e dependem da condição de fornecimento do material, ou seja, se ele foi submetido a deformação plástica, tratamento térmico ou outros conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de n e C para diversas ligas

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

Fonte: adaptado de Callister (2002)

Descrito por fabricantes como um aço de qualidade comercial, o aço SAE 1006 tem garantia de atendimento quanto à composição química, porém sem adição de elementos microligantes ou propriedades mecânicas asseguradas. O material possui aplicações na indústria civil e mecânica, autopeças, indústria de móveis, tubos, implementos agrícolas, aparelhos eletrodomésticos, peças com leve conformação ou dobramento (ARCELORMITTAL, 2015).

3.1.1 Teste de tração

Na caracterização do material empregado neste estudo, efetuaram-se ensaios de tração para determinar as propriedades mecânicas, tais como: índice de encruamento (n), índice de anisotropia (r), limite de resistência (R_m), limite de escoamento (σ_e) e alongamento (δ). Os dados obtidos nos ensaios foram utilizados para calibrar o *software* de simulação, buscando a maior paridade possível com os procedimentos experimentais. Apesar de os programas de simulação de estampagem possuírem bibliotecas de materiais, as mesmas são limitadas e não abrangem todas as normas e tipos de materiais.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração foram especificados conforme norma ABNT NBR 6892-1 (2013), que descreve e padroniza as suas dimensões. Foram usadas amostras com secção transversal retangular, sem rebaixe central, atendendo às dimensões exigidas pela norma (ver Anexo A). Os mesmos foram cortados a laser e posteriormente lixados para remoção de quaisquer vestígios de rebarbas ou concentradores de tensão. Os corpos de prova foram cortados conforme o sentido de laminação da chapa, sendo seis amostras para cada direção em relação à laminação (0°, 45°, 90°), totalizando dezoito corpos de prova, como

mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova para ensaio de tração

Direção de laminação	Quantidade de amostras para $n e r$	Quantidade de amostras para $R_m, \sigma_e e \delta$	Total de amostras para cada sentido de laminação
0°	3	3	6
45°	3	3	6
90°	3	3	6
Total de corpos de prova			18

Fonte: o autor (2017)

3.1.2 Equipamentos

Os ensaios de tração foram feitos na máquina EMIC Modelo DL 20000, com capacidade de 20 toneladas, localizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. Os ensaios foram realizados segundo norma NBR 6673:1981 com velocidades constantes de 10,0 mm/min. A Figura 12 mostra o posicionamento do corpo de prova e do extensômetro no procedimento.

Figura 12 - Ensaio de tração com extensômetro



Fonte: o autor (2017)

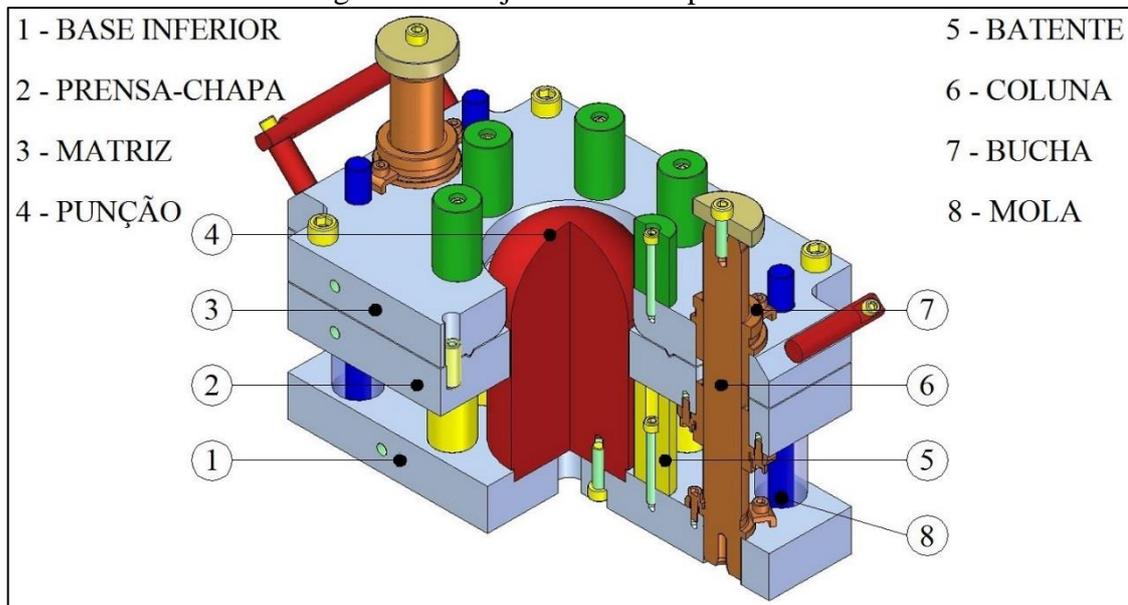
Para medir a variação dimensional nos mesmos pontos, do comprimento e largura antes e depois dos ensaios de tração, os corpos de prova foram previamente marcados. No

ensaio de tração convencional foi necessário usar o extensômetro para determinar o alongamento do corpo de prova.

3.1.3 Ferramenta para ensaio

Para os ensaios experimentais, projetou-se uma ferramenta que, ao final deste trabalho, ficou à disposição da Universidade de Caxias do Sul para futuros estudos. Uma vez que o método escolhido para a determinação da CLC foi Nakajima, o projeto foi desenvolvido conforme critérios descritos pelo procedimento e de acordo com as características do equipamento utilizado nos experimentos (prensa de ensaio EMIC Modelo DL 20000).

Figura 13 - Projeto da matriz para ensaio



Fonte: o autor (2017)

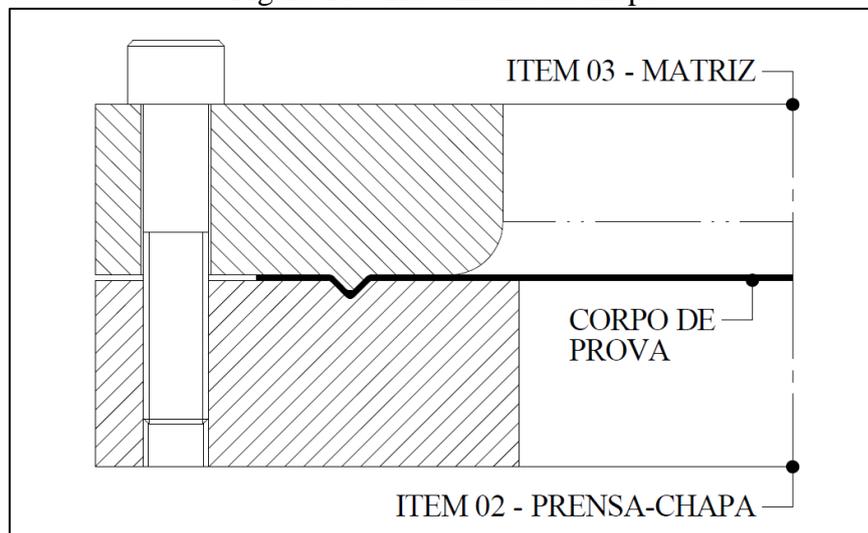
O projeto da matriz desenvolvida pode ser visto na Figura 13. A ferramenta é composta basicamente por punção, matriz e prensa-chapa, diretamente ligados à deformação da chapa. Os componentes citados foram confeccionados em aço SAE P20 comercial fornecido temperado e revenido com dureza de 30-34 HRC, a fim de proporcionar maior resistência ao desgaste. Os demais itens, com exceção de componentes comerciais (parafusos, pinos guia, colunas e molas), foram fabricados em aço SAE 1020 por razões de custo e por não terem esforços ou desgastes que justificassem a utilização de um material mais nobre.

O punção (item 4 da Figura 13), principal responsável pela deformação, tem um diâmetro de 100 mm com extremidade hemisférica. A matriz (item 3 da Figura 13) possui um

raio de borda de 10 mm pelo qual o material escoava, por este motivo tanto o raio da matriz quanto a ponta hemisférica do punção foram polidos. O prensa-chapa (item 2 da Figura 13) tem a função de controlar o escoamento do material durante o embutimento e, através de dois pinos guia, centralizar o *blank*.

O travamento da chapa foi feito conforme Figura 14. Inicialmente, durante a preparação dos corpos de prova, foi estampado nos *blanks* um ressalto em formato de "v" para travar a chapa. Além disso, o corpo de prova ficava prensado pela matriz e prensa-chapa pela força de compressão exercida por quatro parafusos M12 distribuídos nas extremidades das placas (ver Figura 13), impedindo o material de escoar durante os ensaios.

Figura 14 - Travamento da chapa

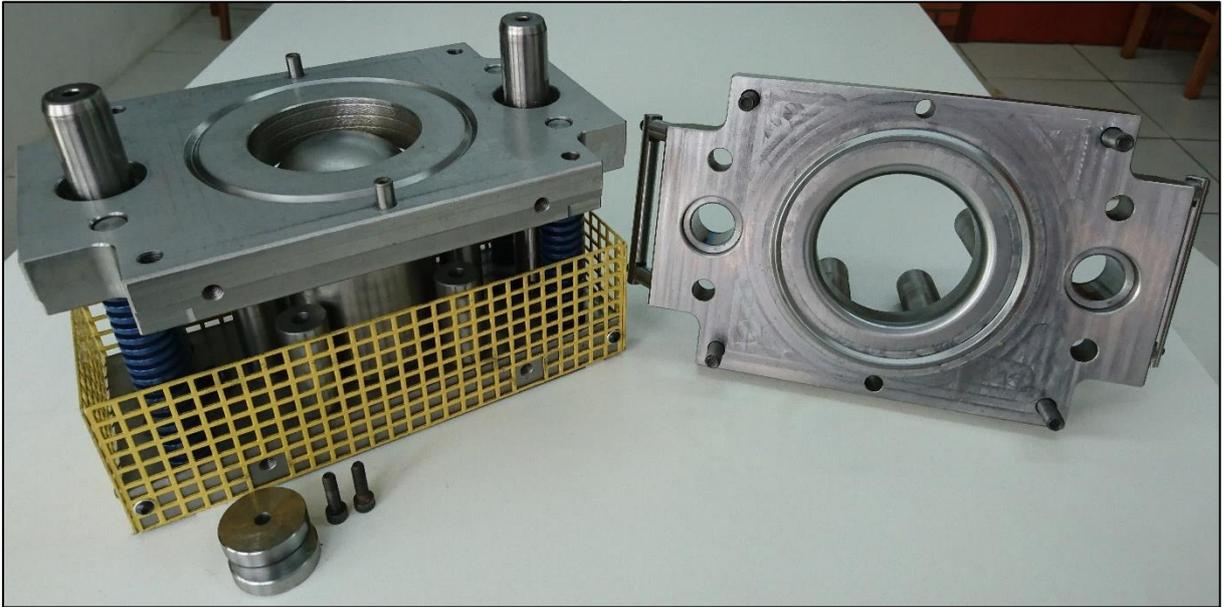


Fonte: o autor (2017)

As colunas e buchas (respectivamente, itens 6 e 7 da Figura 13), obviamente, tem como função garantir o alinhamento entre o punção, fixado na base inferior ou porta-punção (item 1 da Figura 13), com a matriz e prensa-chapa. Os batentes inferiores (item 5 da Figura 13) limitam o fechamento da ferramenta, estabelecido para uma altura máxima de embutimento de 55 mm. As molas (item 8 da Figura 13) servem para extrair a chapa conformada do punção e abrir a ferramenta, permitindo novo ciclo de estampagem.

A ferramenta, com aproximadamente 60 kg, foi projetada de tal forma que seja possível visualizar a fratura ou sua iminência no corpo de prova. Neste instante o ensaio era concluído e as medições de deformações realizadas. Como pode ser percebido na Figura 13, a região esférica do punção sob a qual o material se conforma fica exposta, permitindo ao operador monitorar o ensaio. A Figura 15 exhibe a ferramenta utilizada nos ensaios Nakajima.

Figura 15 - Ferramenta para ensaio Nakajima

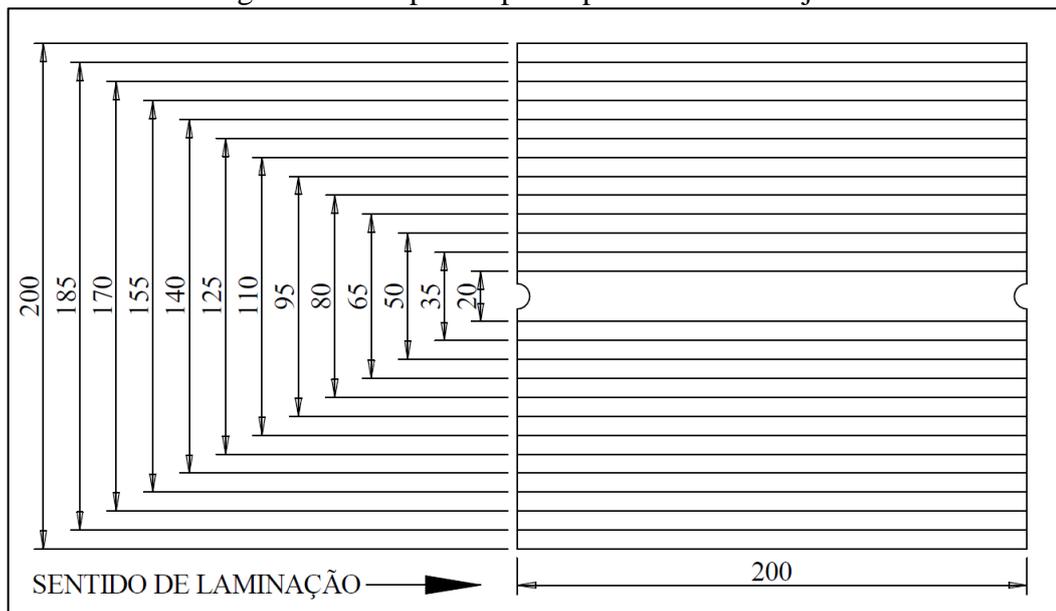


Fonte: o autor (2017)

3.1.4 Preparação dos corpos de prova

Os *blanks* utilizados nos ensaios de estampagem foram cortados a laser da mesma chapa dos corpos de prova usados nos ensaios de tração, a fim de garantir a conformidade dos resultados. Fundamentado na proposta de Nakajima e no trabalho executado por Mattana (2013), os corpos de prova tinham dimensões máximas de 200x200 mm e variavam sua largura de 15 mm em 15 mm até o tamanho mínimo de 200x20 mm, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Corpos de prova para ensaio Nakajima



Fonte: o autor (2017)

Para facilitar o posicionamento do *blank* sob a ferramenta e indicar o sentido de laminação (0°) foram acrescentados dois detalhes semicirculares. Desta forma, neste trabalho foram usados treze tamanhos diferentes de corpos de prova, com o objetivo de atingir os diferentes estados de deformação presentes no processo de estampagem do ensaio. Para cada modelo de *blank* foram testadas duas amostras, com a intenção de garantir repetibilidade nos resultados, totalizando 26 provas.

A primeira etapa da preparação dos corpos de prova foi a estampagem dos ressaltos nos corpos de prova. A estampagem foi realizada na Matrizes Valmasser Ltda. utilizando uma prensa de 400 toneladas. Para que a ferramenta não fechasse por completo e executasse a conformação, os batentes inferiores (item 5 da Figura 13) foram substituídos temporariamente por calços com 130 mm de altura. Assim, não foi necessário desmontar o punção e também tornou o processo de estampagem mais prático.

A segunda etapa consistiu na gravação da malha de círculos sobre a superfície dos corpos de prova. A geratriz usada na gravação possuía círculos com diâmetro de 10 mm intercalados e espaçados igualmente numa área de 150x150 mm. A gravação foi realizada pela empresa G.Paniz Indústria de Equipamentos de Alimentação Ltda., através de processo eletroquímico utilizando o aparelho Tecnigrav Modelo RB 200 Super. Ao final dos trabalhos de preparação dos corpos de prova, obtiveram-se amostras conforme Figura 17.

Figura 17 - Corpos de prova prontos para ensaio



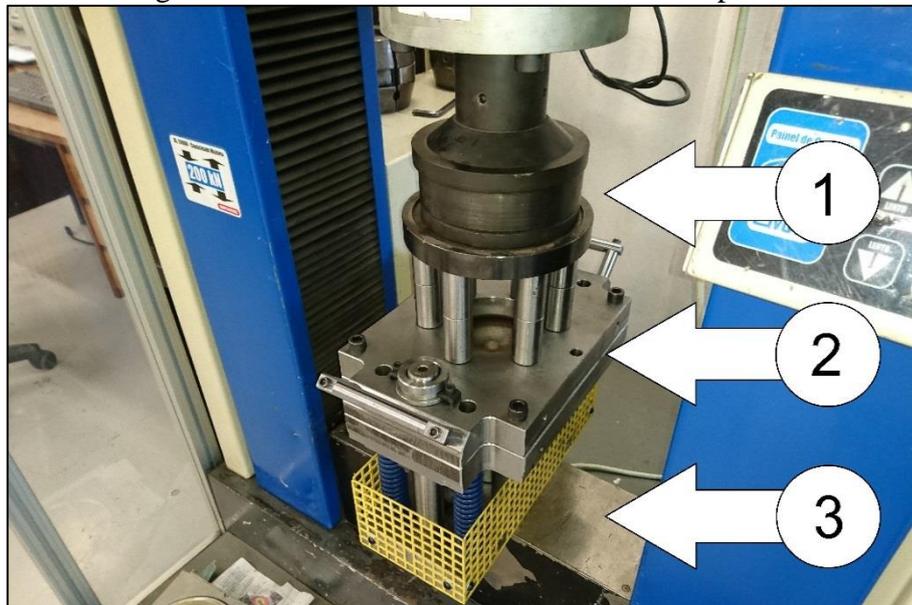
Fonte: o autor (2017)

3.1.5 Ensaio de Nakajima

Os ensaios de Nakajima também foram executados na máquina de tração/compressão EMIC Modelo DL 20000, na qual foi feito o acoplamento de um flange (acessório já existente). A ferramenta foi posicionada transversalmente à mesa da máquina, de modo a facilitar a colocação dos corpos de prova. Os ensaios foram realizados por duas pessoas, para agilizar o processo de desmontagem da matriz e colocação de novo *blank*.

As buchas e colunas da ferramenta foram lubrificadas e um prato compensador foi colocado sobre a matriz. O prato compensador (1) foi usado com a finalidade de ajustar possíveis desalinhamentos entre a matriz (2) e a prensa (3), conforme Figura 18.

Figura 18 - Posicionamento da ferramenta na prensa



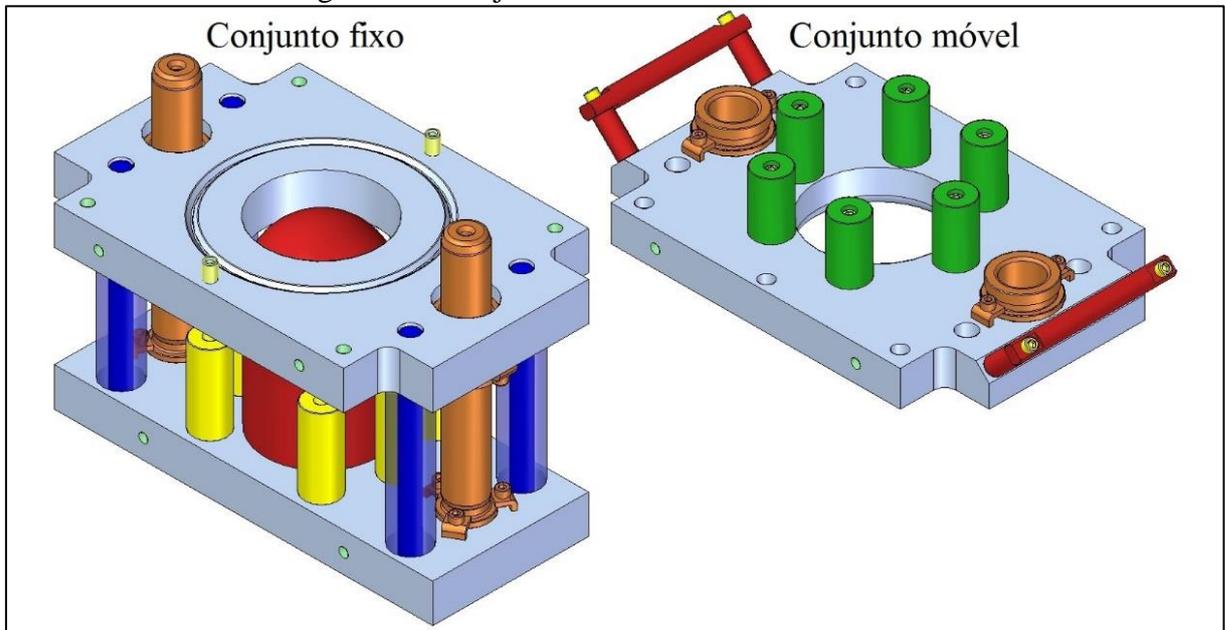
Fonte: o autor (2017)

Os corpos de prova foram separados conforme seu tamanho e lubrificados com graxa no lado de contato com o punção (lado oposto à gravação). Os testes foram realizados seguindo a ordem de tamanho dos corpos de prova, do maior para o menor, resultando num total de 26 amostras. Os *blanks* foram conformadas a uma velocidade de 20 mm/min até o instante em que ocorresse a fratura ou fosse possível visualizar sua evidência.

De maneira a atender as características do equipamento, a ferramenta de ensaio foi planejada com dois conjuntos principais: o conjunto fixo, no qual estão o punção e o prensa-chapa, apoiado sobre a mesa da máquina e que não sofre manipulação por parte do operador; e o conjunto móvel, cujo componente principal é a matriz, que recebe a força direta da máquina,

sendo desmontada constantemente pelo operador durante os ensaios. A Figura 19 ilustra os conjuntos fixo e móvel da matriz de ensaio.

Figura 19 - Conjuntos fixo e móvel da ferramenta



Fonte: o autor (2017)

O tempo por ensaio foi de aproximadamente cinco minutos, o que levou a uma duração total de testes de duas horas. Os 26 corpos de prova foram ensaiados conforme a sequência descrita abaixo:

- a) colocou-se o *blank* sobre prensa-chapa, centralizando-o pelos pinos guia;
- b) o conjunto móvel da ferramenta foi montado, tendo as colunas servido de guias. O conjunto foi manipulado pelo operador através das alças laterais;
- c) os quatro parafusos M12 foram montados e rosçados;
- d) iniciou-se o processo de estampagem, sendo interrompido no momento em que foi notado o surgimento ou iminência de fratura no corpo de prova;
- e) abriu-se o carro da máquina e a ferramenta, impulsionada pelas molas, voltou a seu estado de repouso;
- f) retiraram-se os parafusos e o conjunto móvel foi desmontado;
- g) o *blank* estampado foi retirado e outro ciclo de ensaio foi iniciado.

As deformações decorrentes do processo de estampagem foram copiadas pela malha de círculos gravada sobre os corpos de prova. Os círculos, antes com 10 mm de diâmetro, deformaram-se e tomaram a forma de elipses.

As elipses foram medidas nos pontos de maior deformação do material, para calcular

a deformação principal máxima (φ_1) e mínima (φ_2) conforme equações 10 e 11. Os dados foram plotados num gráfico de deformação principal máxima φ_1 no eixo y e deformação principal mínima φ_2 no eixo x, formando uma nuvem de pontos da qual originou-se a CLC experimental.

3.2 METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO NUMÉRICO

O ensaio de Nakajima foi reproduzido no *software* Dynaform®, versão 5.9.3, com *solver* LS-Dyna versão 971, desenvolvidos pela empresa norte-americana ETA (*Engineering Technology Associates, Inc.*). O programa combina as análises do LS-Dyna versão 971 com as funções pré e pós-processador do Dynaform®. As simulações foram realizadas pelo autor deste trabalho nas dependências da Matriz Valmasser Ltda., que detém a propriedade de uma licença.

Os procedimentos de simulação adotados neste trabalho estão embasados no treinamento e conhecimento profissional adquirido durante o tempo de utilização do *software*. O *software* de simulação de estampagem vem demonstrando resultados satisfatórios nos trabalhos desenvolvidos, apesar do seu alto custo de licenciamento e manutenção.

3.2.1 Pré-processamento

Na etapa de pré-processamento cabe ao usuário importar para o *software* os modelos CAD da ferramenta e simplificá-los (para evitar sobrecarga desnecessária durante os cálculos computacionais); gerar e verificar a qualidade das malhas da matriz, punção e prensa-chapa; gerar e verificar a qualidade da malha do *blank*; identificar o tipo de análise; definir as condições de contorno; inserir os dados de entrada referentes às propriedades mecânicas do material.

A primeira etapa foi a preparação dos modelos CAD, na qual do projeto final da ferramenta (ver Figura 13) utilizou-se somente o modelamento do *blank*, punção, matriz e prensa-chapa. Os itens foram simplificados em um programa CAD, no caso *Solid Edge*®, eliminando detalhes como furos, chanfros, rebaixas ou quaisquer outros que não estivessem relacionados à estampagem propriamente dita. O *blank*, por se tratar de uma geometria simples, teve apenas os detalhes semicirculares suprimidos, pois os mesmos não teriam influência alguma nos resultados. Os modelos foram exportados em formato IGES, uma das extensões compatíveis com o Dynaform®, para serem posteriormente importados.

A partir da segunda etapa trabalhou-se exclusivamente com o Dynaform®. Na interface de pré-processamento do programa foram importados os arquivos IGES e outro

processo de tratamento dos modelos foi iniciado. Com a intenção de simplificar ao máximo os sólidos importados, apenas as superfícies de contato com o *blank* foram mantidas. O procedimento resultou em cascas (superfícies) dos componentes envolvidos na simulação.

Uma vez concluído o procedimento de criação das cascas, as malhas começaram a ser geradas. Para os componentes denominados pelo programa como *tools*, que são a matriz, prensa-chapa e punção, adotou-se o tamanho máximo de elemento de 10 mm. O refinamento da malha foi executado automaticamente pelo programa, cabendo ao usuário apenas a verificação da sua qualidade por meio de comandos específicos e, caso necessário, sua correção.

No caso do corpo de prova, denominado pelo *software* como *blank*, o tamanho máximo de elemento estabelecido foi de 5 mm. Como dito anteriormente, o refinamento da malha foi executado automaticamente pelo programa, competindo ao usuário apenas a verificação da sua qualidade e, se necessário, sua correção. O resultado final da preparação das malhas no Dynaform® está apresentado no Apêndice A, obtido através da sequência de trabalho descrita anteriormente.

Após a criação e inspeção das malhas, começaram as definições de tipo de análise e condições de contorno. Ainda na interface de pré-processamento, no menu *AutoSetup*, o programa elenca uma série campos de entrada de dados como: espessura da chapa e tipo de processo. O projeto da ferramenta foi concebido para uma prensa de simples ação, como a máquina EMIC Modelo DL 20000 utilizada nos ensaios experimentais, portanto o tipo de processo escolhido foi *Single Action* e a espessura determinada foi a nominal de 0,75 mm.

Depois de definir a espessura da chapa e o tipo de processo, deu-se início às definições das condições de contorno. A primeira condição de contorno definida diz respeito ao *blank*, na qual foram fixados sua geometria e especificado o material, daí a necessidade da realização de ensaios de tração para determinar suas propriedades mecânicas. No dia-a-dia profissional são utilizados catálogos de siderúrgicas para determinar suas propriedades mecânicas, muitas vezes de forma paliativa por falta de informações.

O segundo passo na delimitação das condições de contorno foi a definição das geometrias denominadas pelo programa como *tools*. No momento em que o processo foi definido como *Single Action*, o *software* criou uma pré-configuração da simulação com os *tools*: *die*, *punch* e *binder*. Os itens foram fixados como sendo, respectivamente, matriz, punção e prensa-chapa. Posteriormente bastou fazer o posicionamento dos elementos para o instante anterior ao início da estampagem (tomando o *blank* como a referência para posicionamento).

O terceiro e último passo era delimitar os movimentos da simulação, divididos pelo *software* em dois momentos: *closing* (fechamento da ferramenta) e *drawing* (estampagem). Em

closing, foi delimitado que a matriz iria fazer o fechamento com o prensa-chapa com uma folga de 0,75 mm (a espessura da chapa) e já formando o ressalto em "v"; em *drawing*, a matriz e prensa-chapa iriam se movimentar juntos com o *blank* prensado entre eles, conformando-o sobre o punção até uma altura de embutimento máxima de 55 mm. Os valores de velocidade foram mantidos *default*, sendo 2000 mm/s no movimento *closing* e 5000 mm/s no movimento *drawing*.

A Tabela 5 mostra os dados de entrada no *software* para definição do material, sendo alguns dados *default* (padrão) do programa e outros obtidos pelos ensaios de tração, cujos resultados estão apresentados no Capítulo 4.

Tabela 5 - Dados de entrada no programa

Propriedade	Dado de entrada
Densidade	7,85 g/cm ³
Módulo de Young	207 GPa
Coefficiente de Poisson	0,28
Anisotropia r_0	Ensaio de tração
Anisotropia r_{45}	Ensaio de tração
Anisotropia r_{90}	Ensaio de tração
Alongamento (δ)	Ensaio de tração
Resistência à Tração (R_m)	Ensaio de tração
Índice de Encruamento (n)	Ensaio de tração

Fonte: o autor (2017)

Como os ensaios experimentais de conformação foram conduzidos com o uso de lubrificantes, no caso graxa, o valor padrão de 0,125 fornecido pelo *software* para o coeficiente de atrito (μ) precisava ser verificado. De acordo com Altan (2012), o mecanismo de lubrificação em função do lubrificante, viscosidade, velocidade deslizante e pressão normal pode ser descrito como:

- a) $\mu > 0,3$: condição seca, sem lubrificação. Esta condição é frequentemente usada quando a formabilidade de material é grande o suficiente para conformar uma peça, sem influenciar na qualidade do produto;
- b) $0,1 < \mu < 0,3$: condição na qual a interação entre o filme lubrificante e a rugosidade das superfícies se dá em sua quase totalidade;
- c) $0,03 < \mu < 0,1$: comumente encontrada na conformação de chapas, neste caso os

picos e vales da rugosidade superficial são preenchidos pelo lubrificante. Como a condição dos ensaios experimentais corresponde a este caso estimou-se o valor de 0,06 para μ , ou seja, um valor intermediário na faixa delimitada pelo autor;

d) $\mu < 0,03$: lubrificação hidrodinâmica, condição experimentada em alguns casos de conformação de chapas, onde se exigem altas velocidades de operação.

Como haviam treze tamanhos diferentes de corpos de prova, foi realizada uma simulação para cada tamanho de amostra. Os procedimentos numéricos eram praticamente iguais entre si, sendo a única diferença a geometria do corpo de prova. As simulações tiveram seus cálculos executados de duas maneiras: *accurate* (preciso) e *fast* (rápido). As opções de cálculo escolhidas, às quais soma-se a situação *normal* (normal), foram escolhidas com o objetivo de colher dois resultados simulados para cada modelo de corpo de prova, assim como nos procedimentos experimentais.

3.2.2 Pós-processamento

Na interface de pós-processamento do Dynaform® é possível visualizar as deformações (gerando vídeos ou imagens), plotar gráficos de tensões, afinamento da espessura, o diagrama limite de conformação (DLC), forças de estampagem, dentre outras informações. Nesta etapa são feitas a análise, interpretação e coleta dos resultados das simulações.

De maneira similar ao que foi feito experimentalmente, na interface de pós-processamento do *software* foi plotado sobre a superfície do *blank* a grade de círculos. A grade, plotada após o ressalto ser formado, também era formada por círculos com 10 mm de diâmetro e tangentes, porém não intercalados. Como esperado, estes círculos sofreram deformações e assumiram a forma de elipses.

As elipses selecionadas para análise estavam nos pontos de maior deformação do material, identificados no *software* por um gradiente de cores, a fim de calcular a deformação principal máxima (ϕ_1) e mínima (ϕ_2) conforme equações 10 e 11, respectivamente. Os dados foram plotados num gráfico de deformação principal máxima ϕ_1 no eixo y e deformação principal mínima ϕ_2 no eixo x, formando a nuvem de pontos da qual surgiu a CLC simulada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos na forma de gráficos, tabelas e imagens, e realizada a discussão e comparação dos dados práticos e simulados com as referências bibliográficas.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

4.1.1 Propriedades mecânicas

Os ensaios de tração permitiram a determinação dos valores correspondentes ao limite de resistência (R_m), o limite de escoamento (σ_e), alongamento (δ) e valores relativos à anisotropia (r). Os dados também possibilitaram, através de planilhas eletrônicas, a geração do gráfico tensão de escoamento verdadeira (k_f) x deformação verdadeira (φ) para definir a curva de escoamento real e, por conseguinte, definir os valores para o índice de encruamento (n) e constante do material (C). O relatório dos ensaios de tração realizados está presente no Anexo B deste trabalho, enquanto que as equações das curvas obtidas com as planilhas eletrônicas estão no Apêndice B.

A Tabela 6 apresenta os valores de limite de resistência (R_m), limite de escoamento (σ_e) e alongamento (δ) para os corpos de prova nos três sentidos de laminação, além do índice de encruamento (n) e constante do material (C) obtidos das planilhas eletrônicas. Os valores médios de R_m , σ_e e δ foram calculados por média aritmética, enquanto os valores médios de n e C foram calculados conforme equação 8 (ver Apêndice B).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas

Direção	R_m [MPa]	σ_e [MPa]	δ [%]	n [-]	C [MPa]
0°	370	265	45,8	0,222	645,07
45°	366	252	27,6	0,222	638,62
90°	362	239	50,6	0,227	635,46
Média	366	252	41,3	0,223	639,44

Fonte: o autor (2017)

Os valores encontrados para o limite de resistência (R_m) e limite de escoamento (σ_e) ficaram próximos ao indicado pela literatura. Segundo *ASM International* (1990), as estimativas

para R_m e σ_e são, respectivamente, 330 MPa e 280 MPa (ver Tabela 2). No entanto, os valores de alongamento (δ) encontrados destoaram bastante do que foi apontado por *ASM International* (1990) como sendo 20% (ver Tabela 2).

Em relação ao índice de encruamento (n) e a constante do material (C), a Tabela 7 compara os resultados obtidos através das planilhas eletrônicas (ver Apêndice B) com os valores apontados pela literatura. Os valores de n e C indicados por Araújo (2009), se referem à média aritmética nas três direções de laminação citados em seu trabalho.

Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos com a literatura

Propriedade	Resultado	Callister (2002)	Araújo (2009)
n [-]	0,223	0,260	0,205
C [MPa]	639,44	530	554,48

Fonte: adaptado de Callister (2002) e Araújo (2009)

Quanto ao índice de encruamento observa-se a similaridade nos valores, uma vez que o valor de n encontrado neste trabalho é praticamente igual à média aritmética entre o que foi apontado por Callister (2002) (ver Tabela 3) e Araújo (2009), ou seja, um n de 0,232. Todavia, os valores encontrados para C divergem do que foi indicado pelas referências, pois o C obtido (639,44 MPa) supera em praticamente 100 MPa os números sugeridos pelos autores.

4.1.2 Anisotropia

A Tabela 8 compara os resultados obtidos aos valores encontrados na literatura para anisotropia em cada sentido de laminação, bem como os valores para anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δ_r). Os cálculos realizados estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 8 - Comparação dos resultados obtidos com a literatura

Propriedade	Resultado	Araújo (2009)
r_0	1,36	0,95
r_{45}	1,03	0,85
r_{90}	1,18	1,23
r_m	1,15	0,97
Δ_r	0,24	0,24

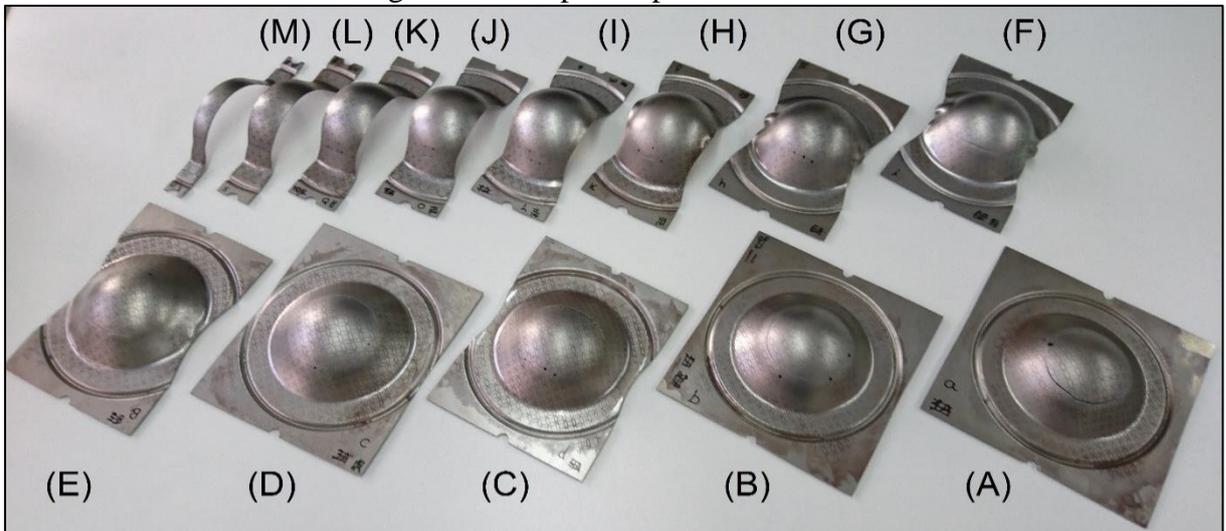
Fonte: adaptado de Araújo (2009)

Comparando os resultados encontrados com os valores estabelecidos por Araújo (2009), nota-se certa proximidade entre os índices, apesar da clara diferença para r_0 , e que os valores para anisotropia planar (Δ_r) coincidiram. Segundo Schaeffer (2004), para um material cujo $r_m > 1$, caso deste estudo, espera-se uma diminuição da espessura menor do que na largura.

4.2 ENSAIO NAKAJIMA EXPERIMENTAL

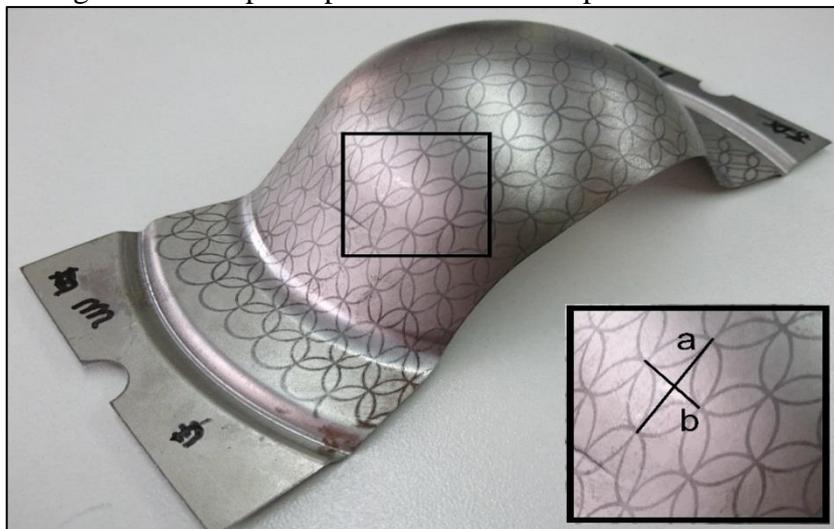
A Figura 20 mostra os corpos de prova resultantes dos ensaios de embutimento, já a Figura 21 mostra em detalhe uma amostra de tamanho 200x80 mm, na qual fica visível a deformação da malha de círculos e a trinca proveniente do embutimento.

Figura 20 - Corpos de prova ensaiados



Fonte: o autor (2017)

Figura 21 - Corpo de prova 200x80 mm após embutimento



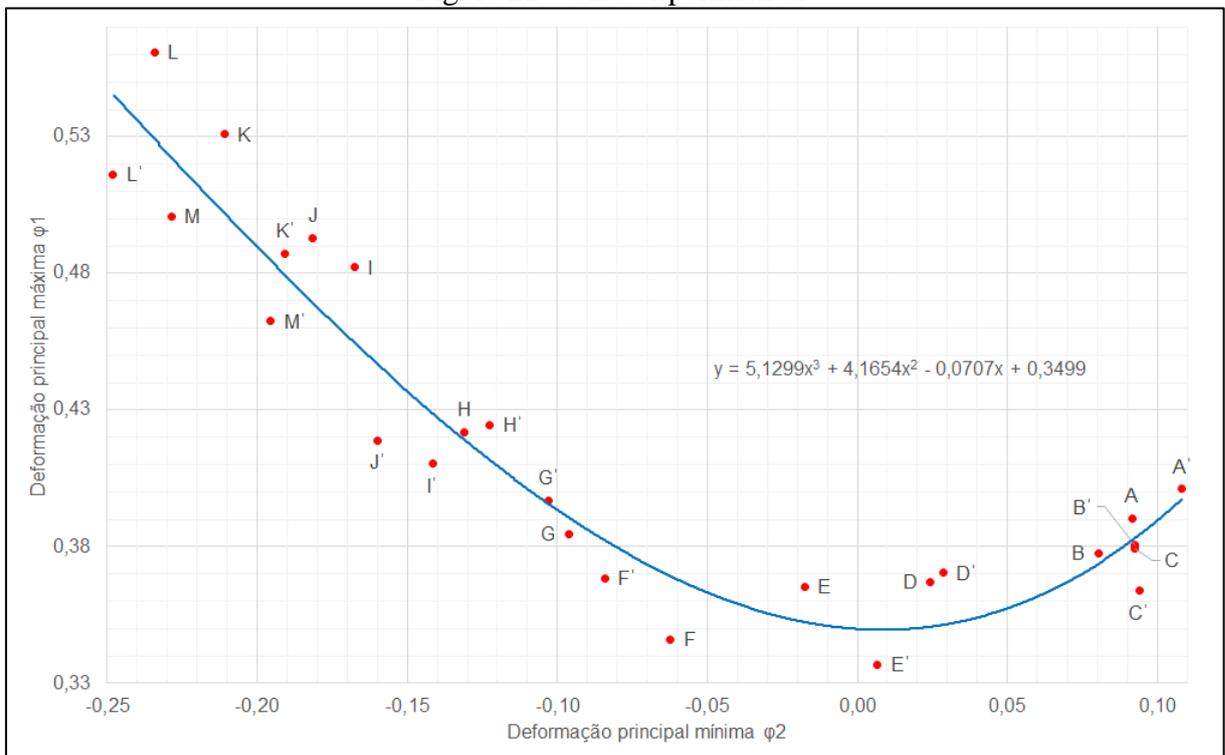
Fonte: o autor (2017)

Com um paquímetro digital foram medidos os eixos de maior e menor deformação de três elipses para cada corpo de prova. As elipses selecionadas para medição estavam localizadas nas regiões opostas às trincas, onde fossem perceptíveis as maiores deformações. No caso dos corpos de prova mais estreitos, onde a fratura se propagou por quase toda sua largura, foram medidas as elipses mais próximas à trinca. Após a realização das leituras foram calculadas as médias aritméticas das medições, de maneira a definir a deformação maior média e a deformação menor média de cada amostra.

Os dados foram inseridos numa planilha eletrônica e, conforme equações 10 e 11, calculada a deformação principal máxima φ_1 e deformação principal mínima φ_2 para cada corpo de prova. Os valores resultantes foram plotados num gráfico de deformação principal máxima φ_1 no eixo y e deformação principal mínima φ_2 no eixo x.

Como consequência da nuvem de pontos, formada a partir das deformações principais dos 26 corpos de prova ensaiados, a CLC experimental foi gerada a partir de uma linha de tendência polinomial de terceira ordem, como mostrado na Figura 22. O relatório dos ensaios está apresentado no Anexo C, onde estão descritos a força e deformação máxima para cada amostra. No Apêndice D constam os valores de deformação obtidos com as medições e resultados calculados para as deformações principais.

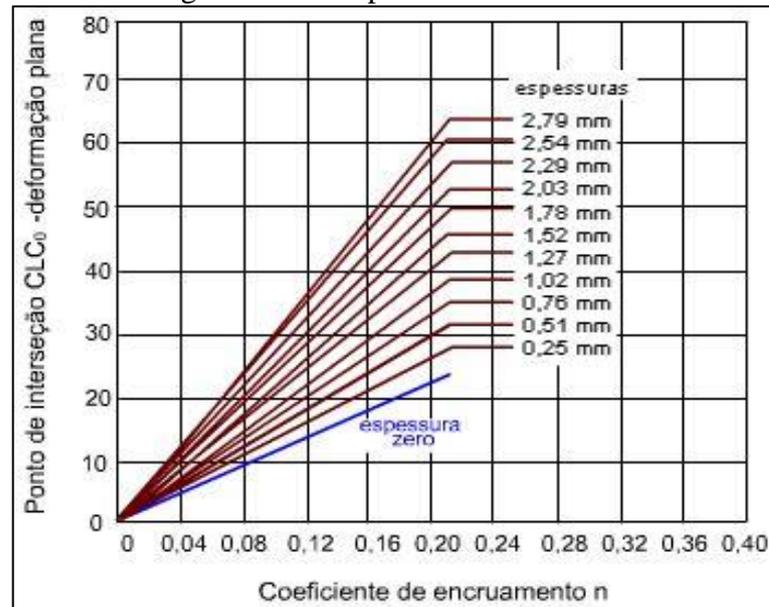
Figura 22 - CLC experimental



Fonte: o autor (2017)

Além de apresentar o formato característico de uma CLC (ver Figuras 2, 4 e 7), outro aspecto da CLC obtida diz respeito à sua intersecção com o eixo vertical. Segundo CIMM (2017), a posição da curva sobre o eixo vertical varia com a espessura e o índice de encruamento da chapa, conforme Figura 23.

Figura 23 - Comportamento CLC x n



Fonte: CIMM (2017)

A partir da equação da curva (ver Figura 22) foi possível descobrir que o valor de intersecção entre a CLC e o eixo vertical foi de 0,35. Analisando a Figura 23, para os valores de espessura de 0,75 mm e índice de encruamento de 0,223 encontrado neste trabalho, verificou-se que a intersecção também resultava num valor próximo a 0,35. A comparação e constatação de semelhança comprova a coerência dos resultados experimentais.

4.3 ENSAIO NAKAJIMA SIMULADO

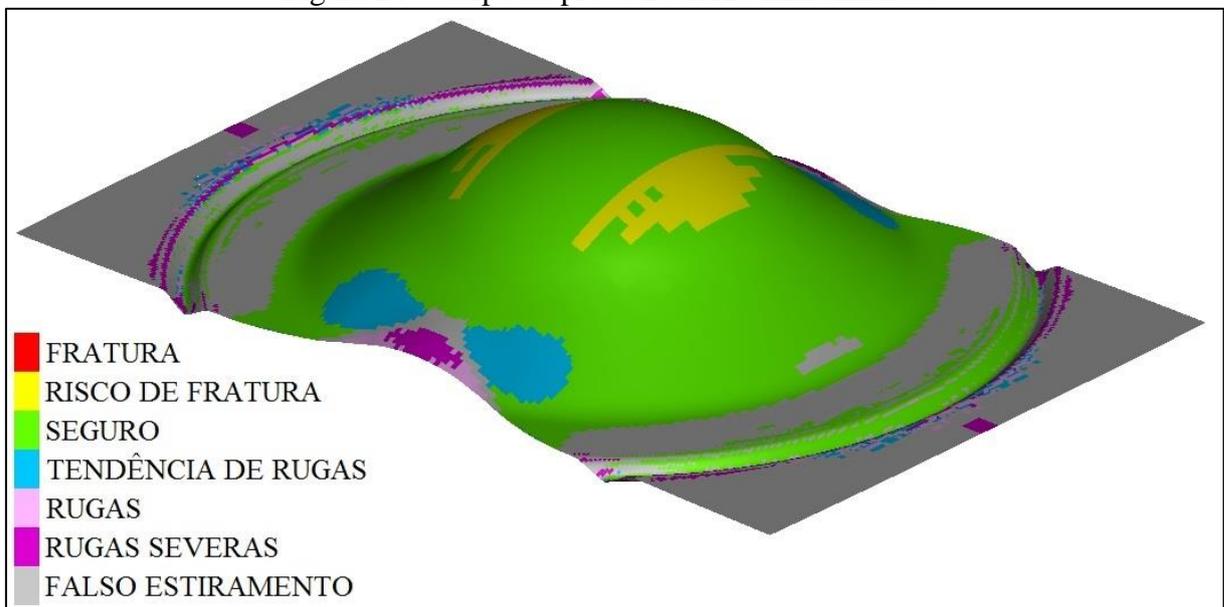
As simulações foram executadas após a determinação de todas as propriedades mecânicas necessárias à calibração do *software*, tais como: resistência à tração, índice de encruamento e índice de anisotropia nos três sentidos de laminação, conforme apontado na Tabela 5. Os valores com os quais o programa foi alimentado e as simulações efetuadas estão exibidos, respectivamente, nas Tabelas 6, 7 e 8. Para o coeficiente de atrito adotou-se o índice de 0,06, cujo valor encontra-se dentro de uma margem estabelecida por Altan (2012).

Para cada modelo de corpo de prova foram realizadas duas simulações, variando

apenas a exatidão do cálculo numérico, de forma a obter dois resultados para cada amostra, assim como nos procedimentos experimentais. Em razão deste método foram executadas um total de 26 simulações, tendo duração média de 40 minutos cada.

Os resultados das simulações eram visualizados através de uma ferramenta do Dynaform® denominada *PostProcessor* (do inglês, pós-processador). Com uma interface semelhante a um *software* CAD tradicional, a simulação podia ser rotacionada, transladada, ampliada para facilitar a análise de algum ponto específico, entre outras possibilidades. Como exemplo, a Figura 24 mostra o resultado da simulação para o corpo de prova de tamanho 200x125 mm.

Figura 24 - Corpo de prova 200x125 mm simulado



Fonte: o autor (2017)

O comportamento da chapa durante a conformação era interpretado a partir de um gradiente de cores gerado pelo *software*, conforme legenda presente na figura acima. As regiões críticas na estampagem ficavam destacadas nas cores vermelha e amarela, enquanto que zonas seguras estavam em verde; tons de rosa indicavam as partes com ondulações na superfície da chapa (rugos), ao passo que a cor azul apontava os próximos locais afetados por este comportamento; a cor cinza correspondia às áreas sem deformações, denominadas pelo programa como falso estiramento.

Os resultados gerados pelo *software* são visualizados pelo usuário como uma sequência de "fotos", denominadas *frames*, geradas pelo programa durante todo o processo de simulação. O conjunto de *frames* forma o resultado completo de uma simulação, como exemplo

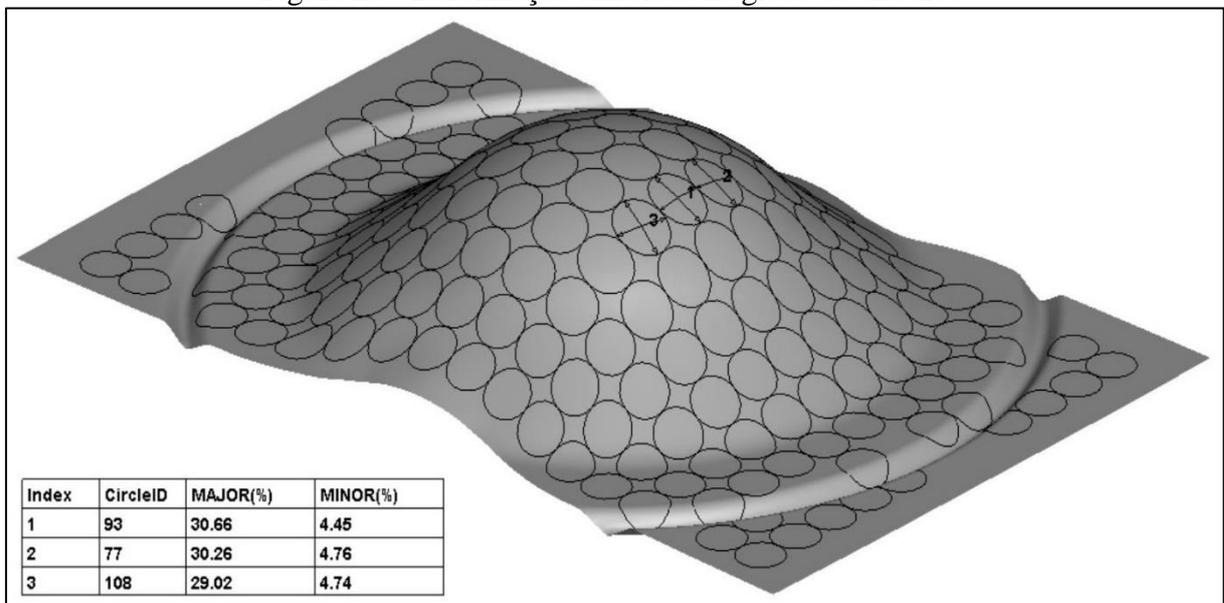
a Figura 24 corresponde ao *frame* número 29 de um total de 42. Assim como nos procedimentos experimentais, nos quais as amostras eram estampadas até o momento em que fosse perceptível a fratura, a abordagem dos resultados simulados foi feita da mesma forma.

O *frame* no qual surgissem os primeiros indícios de fratura seria definido como o resultado final para aquele determinado corpo de prova, a partir do qual os valores simulados para deformação seriam colhidos. Os resultados finais para as simulações de conformação por ensaio Nakajima estão no Apêndice E, todas calculadas de forma precisa (*accurate*). As simulações estão identificadas pelo tamanho do corpo de prova, em ordem decrescente do maior para o menor.

Uma vez definido o *frame* a partir do qual os dados da simulação seriam extraídos, deu-se início a leitura dos dados quanto às deformações provenientes da estampagem. Para isso, de forma semelhante ao que foi feito nos experimentos, na interface do *PostProcessor* foi gerada sobre o *blank* a grade de círculos tangentes com diâmetro de 10 mm.

Na sequência da simulação, até o ponto (*frame*) definido como final, os círculos se deformaram e os valores de deformação puderam ser coletados. A Figura 25 mostra o resultado para o corpo de prova de tamanho 200x125 mm, a partir do qual buscaram-se os valores da deformação máxima e mínima nas elipses.

Figura 25 - Deformação simulada na grade de círculos



Fonte: o autor (2017)

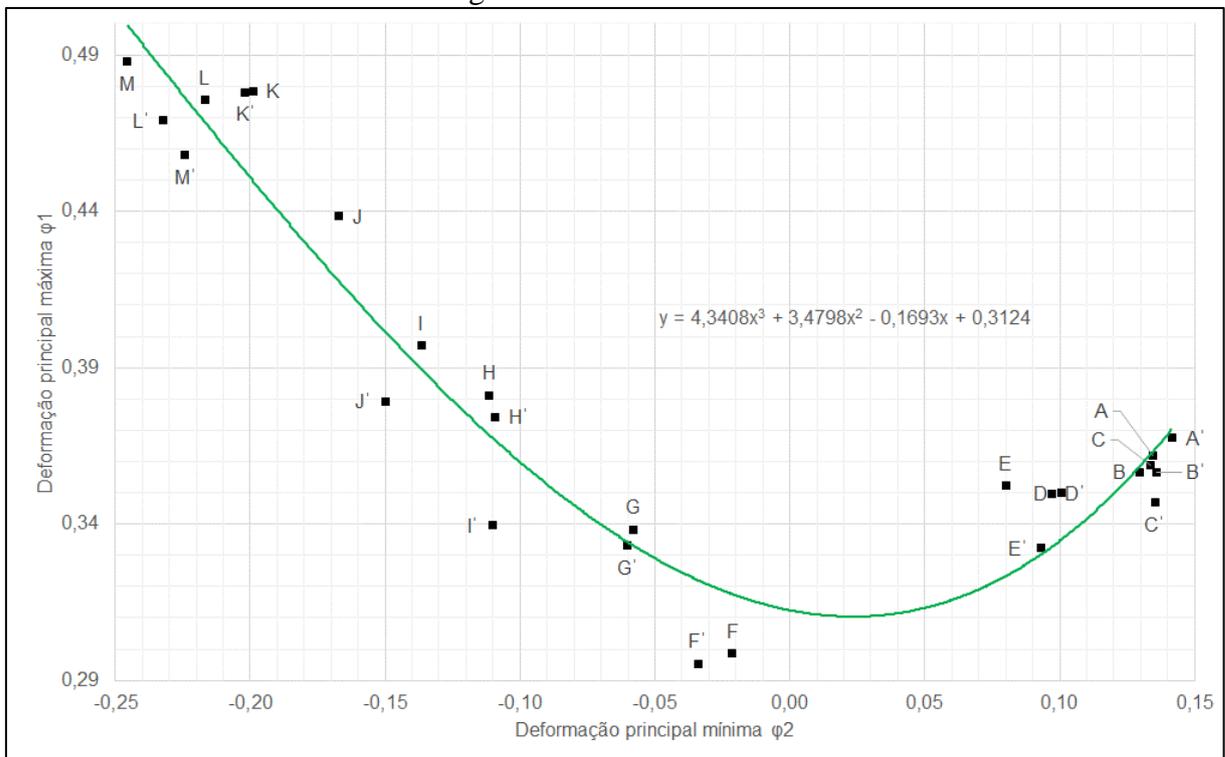
Os mesmos critérios adotados para medição das amostras experimentais foram seguidos durante os procedimentos numéricos. As elipses selecionadas para coleta de dados

localizavam-se nas regiões próximas às fraturas, indicadas nas simulações de conformação em amarelo (ver Apêndice E). Como mostra a Figura 25, as elipses escolhidas para aferição são numeradas pelo *software* para facilitar a identificação e o resultado da deformação é dado em valores percentuais.

Os dados percentuais fornecidos pelo *software* foram convertidos em milímetros e inseridos numa planilha eletrônica. Utilizando as equações 10 e 11, foram calculadas as deformações principais máximas ϕ_1 e mínimas ϕ_2 para cada simulação. Os valores resultantes foram plotados num gráfico de deformação principal máxima ϕ_1 no eixo y e deformação principal mínima ϕ_2 no eixo x.

Como consequência da nuvem de pontos, formada a partir das deformações principais das 26 simulações, a CLC simulada foi criada a partir de uma linha de tendência polinomial de terceira ordem, como mostrado na Figura 26. No Apêndice F constam os valores simulados de deformação maior e menor e as deformações principais, dados que originaram a nuvem de pontos e, por conseguinte, a CLC simulada.

Figura 26 - CLC simulada



Fonte: o autor (2017)

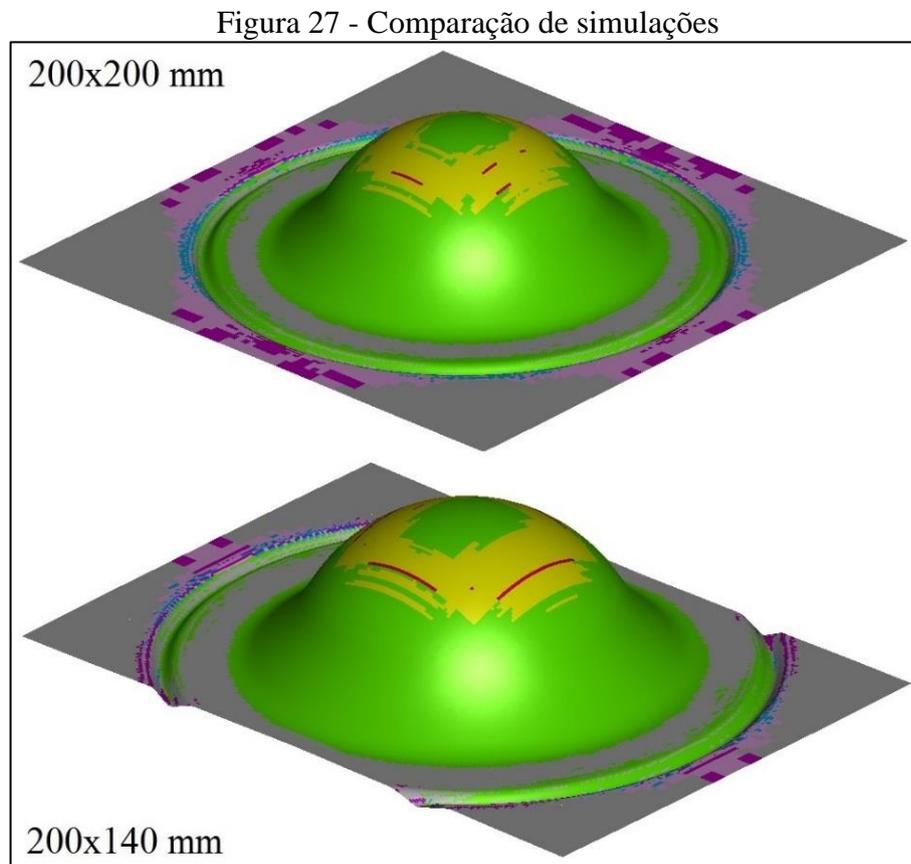
A curva simulada também apresentou o formato característico para uma CLC (ver Figuras 2, 4, 7 e 22), mas sua intersecção com o eixo vertical não coincidiu com o resultado obtido para a curva experimental. De acordo com a equação da curva, o ponto no qual a curva

cruza o eixo vertical corresponde a 0,31, diferente da curva experimental cujo valor foi de 0,35.

Analisando a Figura 23, que mostra a relação entre o índice de encruamento e o ponto de intersecção da CLC com o eixo vertical, nota-se que para um valor de intersecção de 0,31 o índice de encruamento equivalente seria de aproximadamente 0,18. Diante disso, há uma diferença de aproximadamente 24% entre o índice de encruamento encontrado a partir dos ensaios de tração e o índice obtido da intersecção da curva simulada com o eixo vertical, proveniente do gráfico apresentado na Figura 23.

Outro aspecto observado na CLC simulada foi o acúmulo de pontos na extremidade direita da curva. Os pontos identificados por letras (ver Apêndice F) correspondem aos *blanks* de tamanho 200x200 mm, 200x185 mm, 200x170 mm, 200x155 mm e 200x140 mm, ou seja, os cinco maiores modelos de corpos de prova se concentram na mesma região do gráfico.

Os pontos tão próximos uns dos outros indicam que o *software* não detectou diferenças na conformação destes modelos, como se o comportamento de estampagem das chapas fosse o mesmo, apesar da diferença dimensional entre os *blanks*. Na Figura 27 as simulações para os corpos de prova de tamanho 200x200 mm e 200x140 mm estão agrupadas de maneira a tornar evidente a similaridade de resultados, a despeito da diferença dimensional.

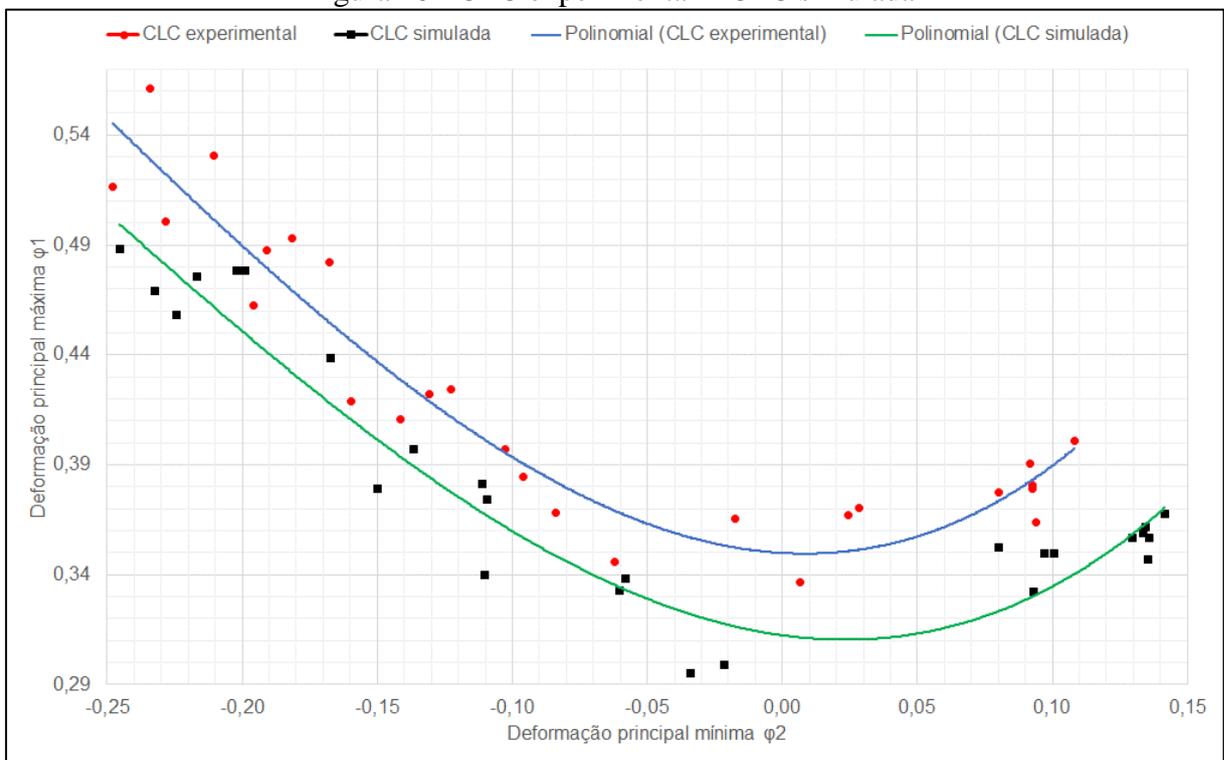


Fonte: o autor (2017)

4.4 CLC EXPERIMENTAL X CLC SIMULADA

Uma vez que as curvas experimental e simulada estivessem plotadas, a sobreposição delas facilitaria a análise e discussão de resultados. Neste sentido, a Figura 28 apresenta o resultado final na determinação experimental e numérica da CLC por ensaio Nakajima, tendo como matéria-prima para testes o aço SAE 1006 com espessura de 0,75 mm. As curvas, diferenciadas por cores, demonstram grande semelhança quanto ao seu formato, no entanto o deslocamento em relação ao eixo y entre ambas ficou nítido.

Figura 28 - CLC experimental x CLC simulada



Fonte: o autor (2017)

A CLC simulada indica que o material tem menor capacidade de conformação do que na prática, o que pode ser constatado por números ao confrontar os Apêndices D e F. Na comparação dos resultados fica perceptível que as deformações simuladas são inferiores aos valores experimentais.

As divergências entre resultados experimentais e simulados pode ser efeito de um comportamento conservador do *software*, resultando em deformações inferiores ao observado na prática. Como consequência, a CLC simulada é deslocada em relação ao eixo y, posicionando-a abaixo da CLC experimental.

5 CONCLUSÕES

A determinação da curva limite de conformação para o aço SAE 1006 foi obtida através do procedimento descrito por Nakajima. Os ensaios de tração definiram algumas de suas propriedades mecânicas, como: limite de resistência ($R_m = 366$ MPa); limite de escoamento ($\sigma_e = 252$ MPa); alongamento ($\delta = 41,3$ %); anisotropia média ($r_m = 1,15$) e anisotropia planar ($\Delta_r = 0,24$); determinação da equação de Hollomon, cujo resultado indicou o índice de encruamento ($n = 0,223$) e a constante do material ($C = 639,44$ MPa).

Os valores encontrados para o limite de resistência e escoamento foram consistentes com a literatura de *ASM International* (1990), porém o alongamento foi superior ao que foi indicado pelo autor. O índice de encruamento obtido dos ensaios ficou intermediário aos índices informados por Callister (2002) e Araújo (2009), já a constante do material (C) superou os valores sugeridos pelos autores. Os índices de anisotropia planar e média ficaram coerentes com a bibliografia, se aproximando das estimativas de Araújo (2009).

Para os ensaios de conformação foi projetada uma ferramenta que, adotando especificações estabelecidas por Nakajima, mostrou-se adequada no travamento da chapa e na estampagem dos corpos de prova. A curva obtida apresentou o formato característico para aços e o ponto no qual interceptava o eixo vertical estava de acordo com a literatura.

Os ensaios experimentais foram reproduzidos no *software* de simulação Dynaform®, calibrado com as propriedades mecânicas definidas pelos ensaios de tração, pelo coeficiente de atrito sugerido pela literatura e pelas condições de contorno dos experimentos. A sobreposição das curvas experimental e simulada mostrou que a CLC simulada permite menores deformações do que na prática, resultado provável de um comportamento conservador do *software*. As menores deformações obtidas por simulação resultaram numa CLC simulada posicionada abaixo da CLC experimental. Além disso, algumas simulações apresentaram anomalias na região de estiramento biaxial, pois o Dynaform® deformou de forma similar corpos com geometrias distintas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se:

- a) utilização de diferentes materiais na avaliação da CLC, como aço inoxidável;
- b) avaliação da influência do lubrificante na CLC;
- c) avaliação da influência da espessura na CLC para um dado material;
- d) determinar a faixa de confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTAN, T.; TEKKAYA, E. **Sheet metal forming: fundamentals**. 1. ed. Ohio: Materials Park, 2012. Disponível em: http://books.google.com.br/books?id=rbTxcQNw_IMC&printsec. Acessado em 03/06/2017.

ÁLVAREZ-CALDAS et al. Caracterização de materiais para simulação de processos de estampagem. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. 109, p. 18-41, maio 2014.

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 4.ed. São Paulo: Érica, 2006.

ARAÚJO, Árisson Carvalho de. **Análise da formação de bandas de cisalhamento por meio de corpos de prova de tração especiais**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

ARCELORMITTAL. **Nossos produtos**. Disponível em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/nossos-produtos/catalogo-acos-planos-america-sul>. Acessado em 02/04/2017.

ARRUDA, R.P.; FOLLE, L.F.; SCHAEFFER, L. Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva limite de conformação. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. 37, p. 64-76, abr. 2008.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook**. 10. ed. Materials Park: ASM International, 1990. 7v.

ASSIS, G.M. et al. Análise comparativa numérico-experimental para obtenção da curva limite de conformação do aço. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., 2010, São João Del-Rei. **Anais...** São João Del-Rei: UFSJ, 2010. Disponível em: <http://www.ufsj.edu.br/simmec2010/pagina/simcomp/SIC-16>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1: Materiais Metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. ABNT, 2013.

BOFF, U.; SCHAEFFER, L. Simulação numérica prevê comportamento do aço na estampagem de micropeças. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. 88, p. 26-33, ago. 2012.

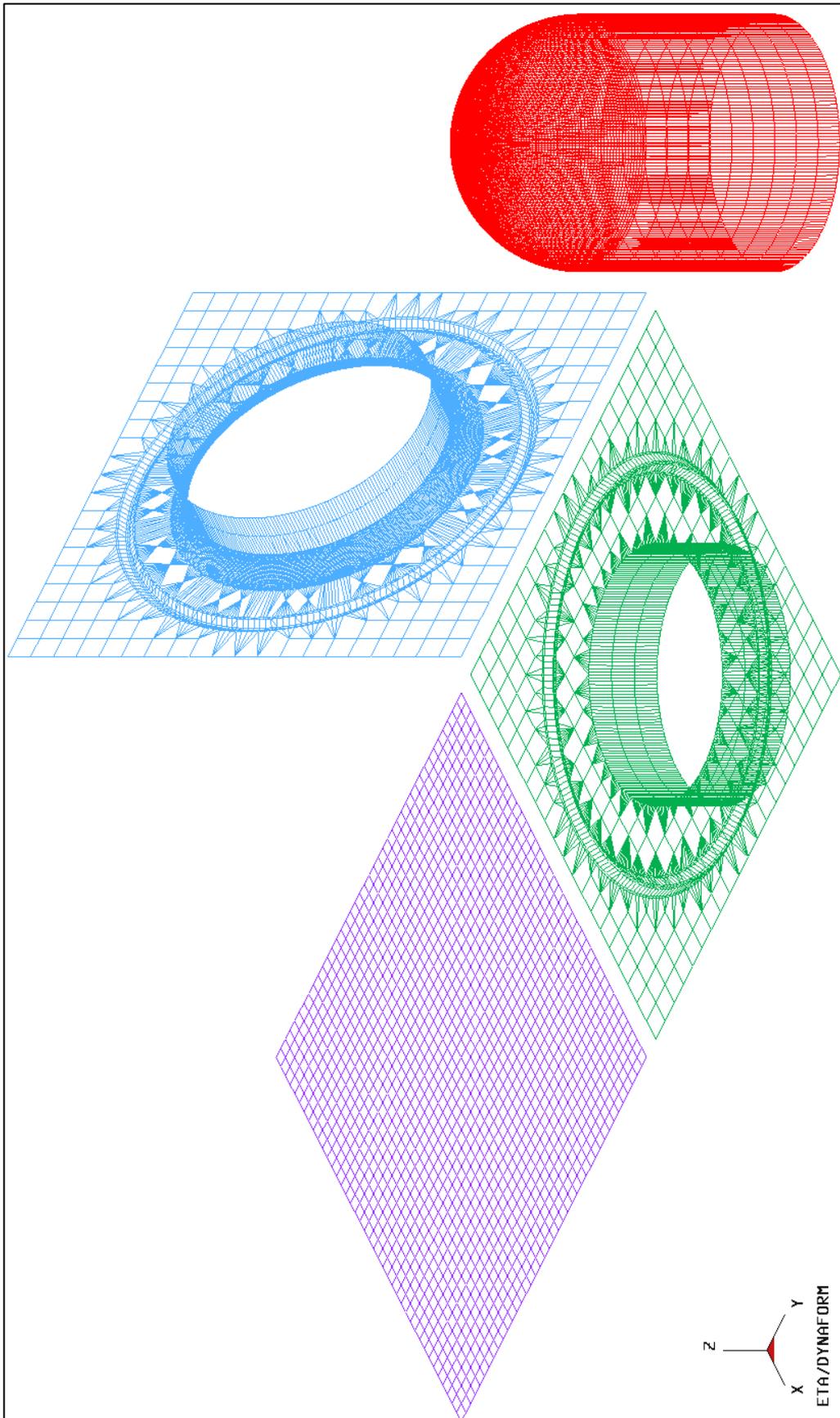
BRESCIANI FILHO, E. et al. **Conformação plástica dos metais**. 1. ed. dig. São Paulo: EPUSP, 2011.

BUENO, J.S.; SCHAEFFER, L. Critérios de estampabilidade de chapas metálicas. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. 135, p. 14-21, jul. 2016.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

- CHEMIN FILHO, Ravilson Antonio. **Avaliação das deformações de chapas finas e curvas CLC para diferentes geometrias de punções.** 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2004.
- CIMM. Centro de informação Metal Mecânica. **O que são as curvas limites de conformação.** Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6602-o-que-sao-as-curvas-limite-de-conformacao#. Acessado em 16/03/2017.
- DIFERRO. **Nossos produtos.** Disponível em: <http://www.diferro.com.br/produtos.acos-para-ferramentas-e-moldes-aco-ferramenta-para-injecao-de-plasticos>. Acessado em 08/04/2017.
- ETA. **Innovation starts here.** Disponível em: <http://www.eta.com/blank-size-engineering>. Acessado em 16/03/2017.
- FIORENTINO, A.; CERETTI, E.; GIARDINI, C. **Experimental and Numerical Method for the Analysis of Warm Titanium Sheet Stamping of an Automotive Component.** Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2015, ID 137964, 10 p., 2015.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HUANG, B.; MA, G. **Optimization of Process Parameters of Stamping Forming of the Automotive Lower Floor Board.** Journal of Applied Mathematics, vol. 2014, ID 470320, 9 p., 2014.
- JUNTARATIN, J. et al. O uso do diagrama-limite de tensão para prever a conformabilidade de chapas. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. 90, p. 28-45, abr. 2012.
- MATTANA, Henrique Antônio. **Construção e análise da curva limite de conformação através do método Nakazima para o aço SAE 1008.** 2013. 44 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.
- MORAIS, W.A. Elementos Finitos. **Conformação Plástica dos Metais**, 2009, Santos. Apostila... Santos: UNISANTA, 2007. P.95-96.
- NETTO, Sergio Eglan Silveira. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação.** 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2004.
- PROVENZA, F. **Estampos.** São Paulo: Editora F. Provenza, 1993. v.I.
- SANTOS, Ricardo Adriano dos. **Avaliação de estampabilidade do aço DC05 (DIN 10152) e validação das deformações verdadeiras obtidas via simulação numérica.** 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 167 p.

- SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p.
- SILVA, Heber Castro. **Análise da simulação numérica do ensaio de Nakazima via método de elementos finitos**. 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2005.
- SROUR JUNIOR, E.H. **Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2002.
- STADNICKI, J.; WRÓBEL, I. **Numerical effectiveness of the simulation of an automotive body part stamping**. Advances in Mechanical Engineering, vol. 2015, ID 708434, 8 p., 2015.

APÊNDICE A - MALHAS CRIADAS PARA SIMULAÇÃO

APÊNDICE B - CÁLCULOS PARA A CURVA DE ESCOAMENTO REAL

Equação obtida para os corpos de prova a 0°.

$$y_0 = 645,07x^{0,222}$$

Equação obtida para os corpos de prova a 45°.

$$y_{45} = 638,62x^{0,222}$$

Equação obtida para os corpos de prova a 90°.

$$y_{90} = 635,46x^{0,227}$$

Valores de C e n obtidos através da Equação 8.

$$C = \frac{1}{4} (645,07 + 2 \cdot 638,62 + 635,46) = 639,44$$

$$n = \frac{1}{4} (0,222 + 2 \cdot 0,222 + 0,227) = 0,223$$

APÊNDICE C - CÁLCULOS PARA O ÍNDICE DE ANISOTROPIA

Tabela 9 - Dados anteriores ao ensaio

Direção	b ₀₁ (mm)	b ₀₂ (mm)	b ₀₃ (mm)	Média b ₀ (mm)	l ₀ (mm)	Média l ₀ (mm)
0°	20,06	20,06	20,05	20,04	100,49	100,88
	20,00	20,02	20,03		101,27	
45°	20,03	20,05	20,07	20,02	101,28	101,58
	19,98	19,98	19,99		101,88	
90°	20,05	20,04	20,06	20,06	101,87	101,62
	20,06	20,06	20,09		101,37	

Fonte: o autor (2017)

Tabela 10 - Dados posteriores ao ensaio

Direção	b _{F1} (mm)	b _{F2} (mm)	b _{F3} (mm)	Média b _F (mm)	l _F (mm)	Média l _F (mm)
0°	18,17	18,10	18,03	18,07	120,40	120,70
	17,92	18,06	18,16		121,00	
45°	18,58	18,16	18,08	18,22	121,60	122,25
	18,35	18,13	18,00		122,91	
90°	18,07	18,06	18,10	18,06	123,64	123,39
	18,07	18,00	18,05		123,14	

Fonte: o autor (2017)

Cálculos dos índices de anisotropia r_0 , r_{45} e r_{90} conforme Equação 7.

$$r_0 = \left(\ln \frac{b_F}{b_0} \right) / \left(\ln \frac{b_0 l_0}{b_F l_F} \right) = \left(\ln \frac{18,07}{20,04} \right) / \left(\ln \frac{20,04 \cdot 100,88}{18,07 \cdot 120,70} \right) = 1,36$$

$$r_{45} = \left(\ln \frac{b_F}{b_0} \right) / \left(\ln \frac{b_0 l_0}{b_F l_F} \right) = \left(\ln \frac{18,22}{20,02} \right) / \left(\ln \frac{20,02 \cdot 101,58}{18,22 \cdot 122,25} \right) = 1,03$$

$$r_{90} = \left(\ln \frac{b_F}{b_0} \right) / \left(\ln \frac{b_0 l_0}{b_F l_F} \right) = \left(\ln \frac{18,06}{20,06} \right) / \left(\ln \frac{20,06 \cdot 101,62}{18,06 \cdot 123,39} \right) = 1,18$$

Cálculo do coeficiente de anisotropia média (r_m) conforme Equação 8.

$$r_m = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) = \frac{1}{4}(1,36 + 2 \cdot 1,03 + 1,18) = 1,15$$

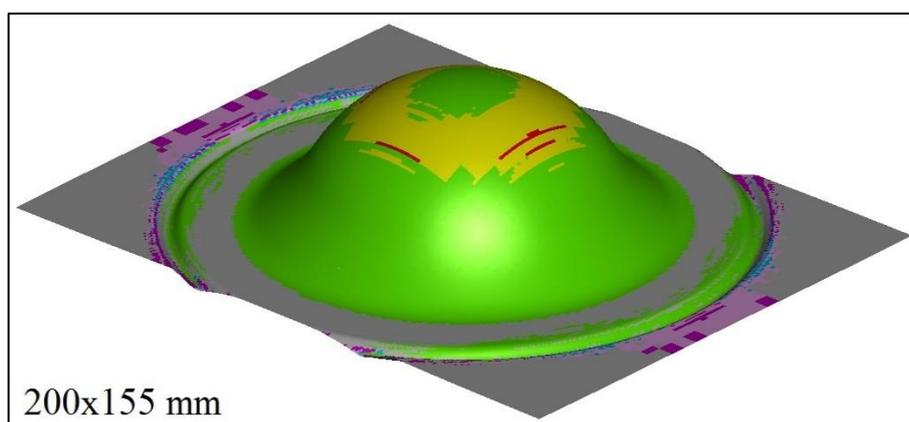
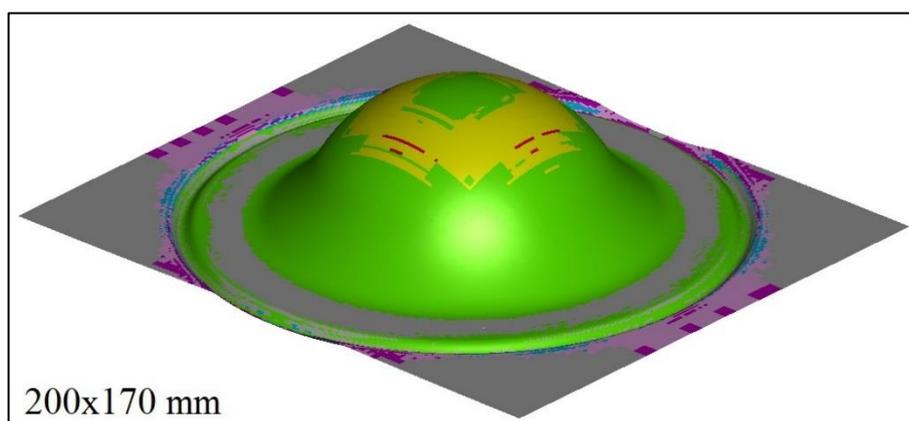
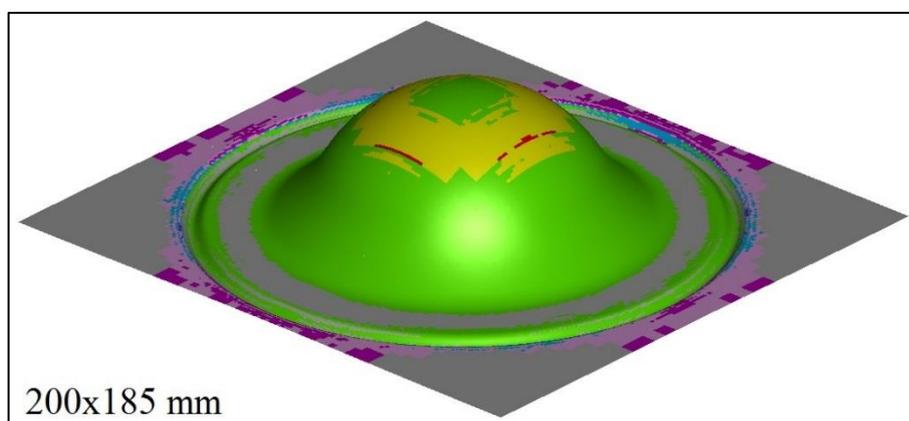
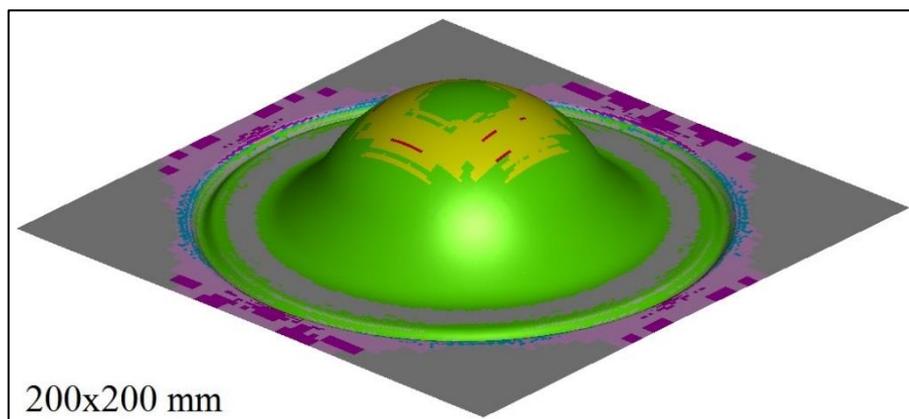
Cálculo do coeficiente de anisotropia planar (Δ_r) conforme Equação 9.

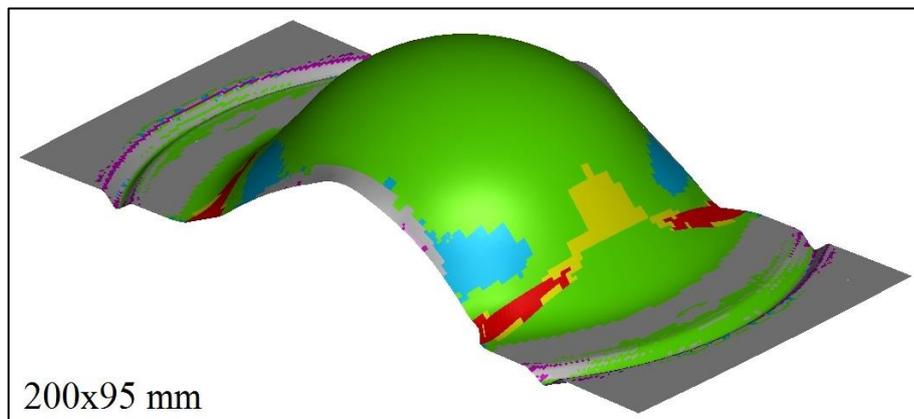
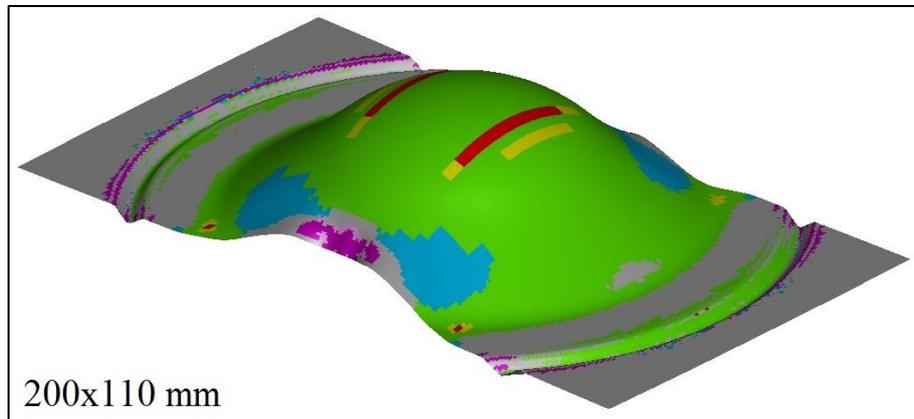
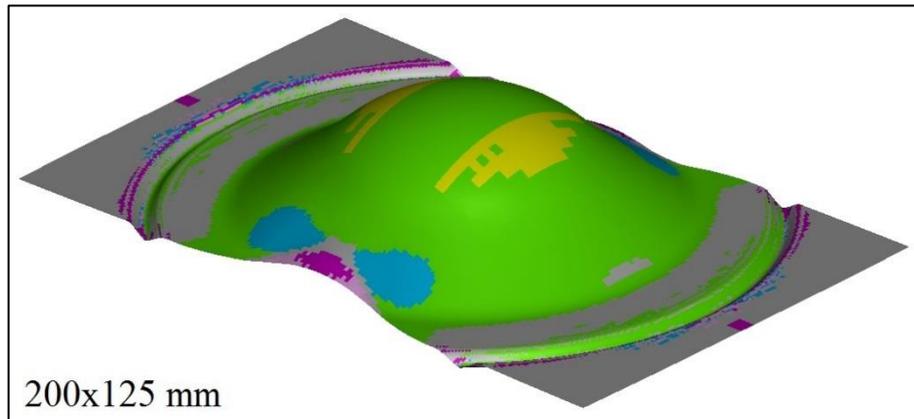
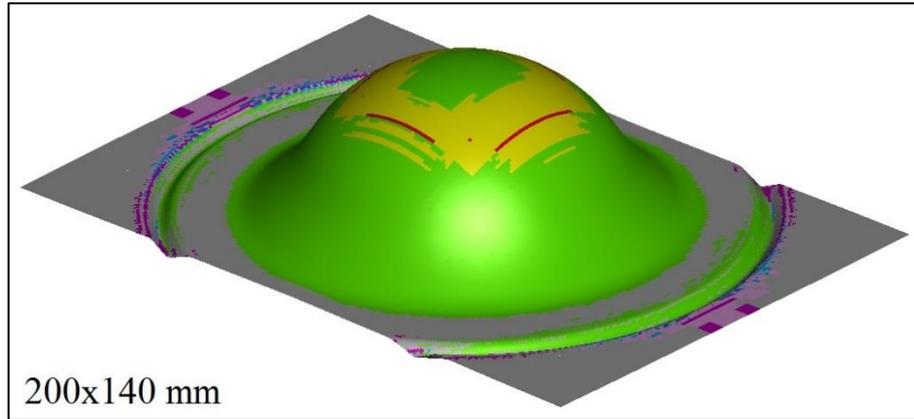
$$\Delta_r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} = \frac{1,36 + 1,18}{2} - 1,03 = 0,24$$

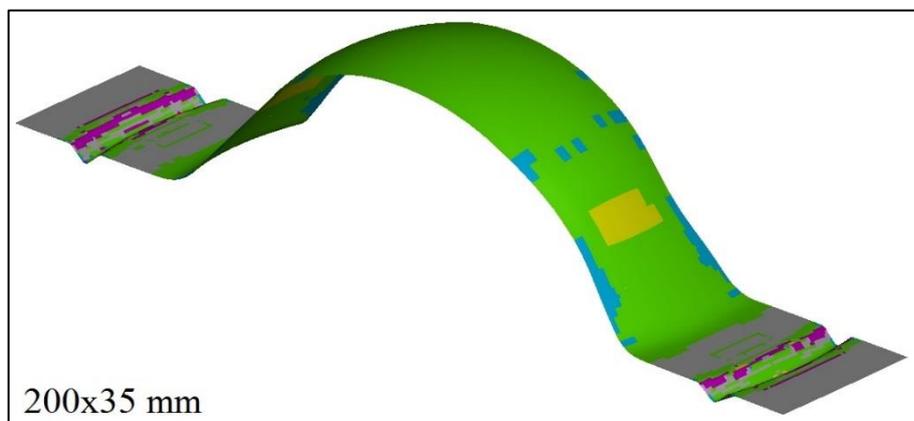
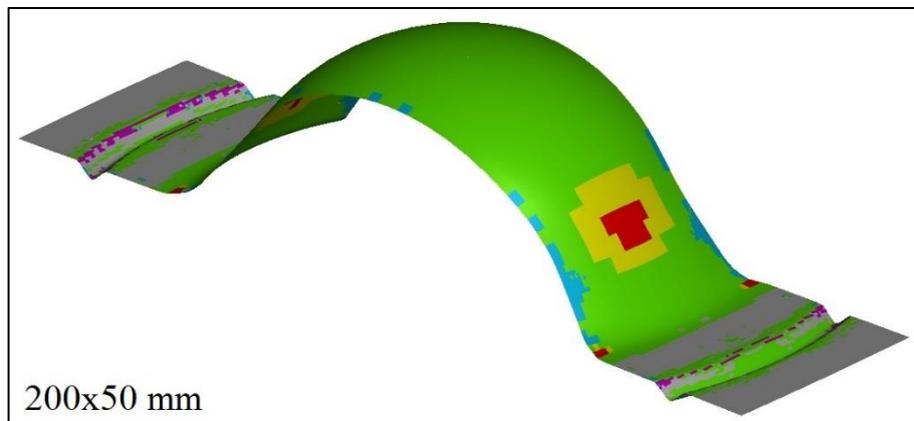
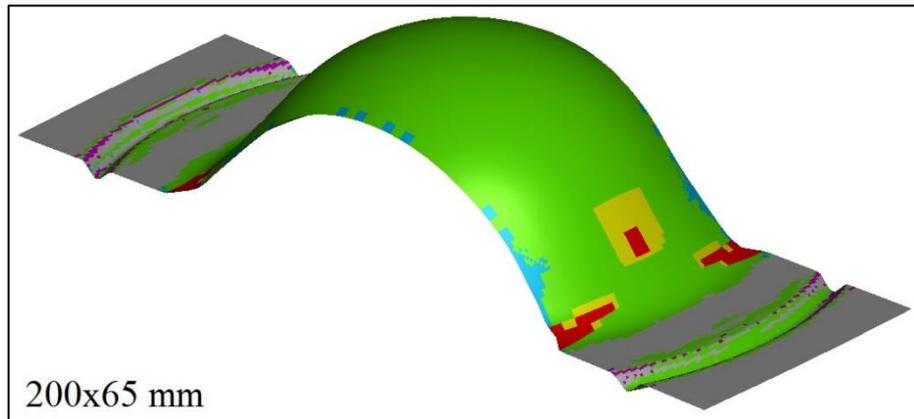
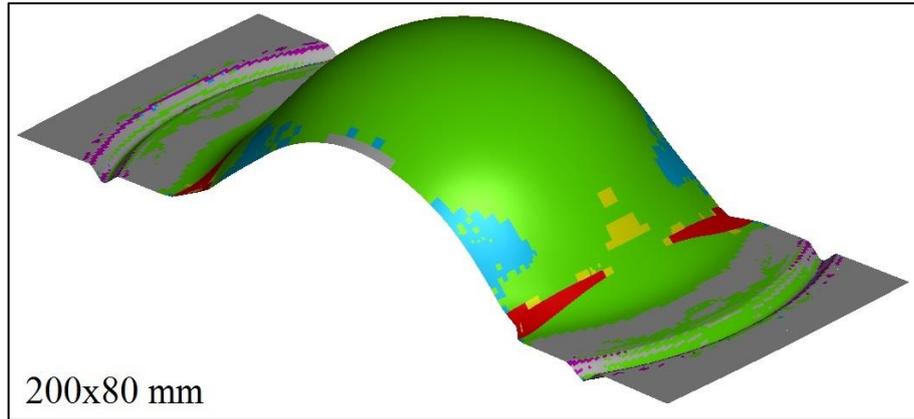
APÊNDICE D - DADOS EXPERIMENTAIS PARA AS DEFORMAÇÕES

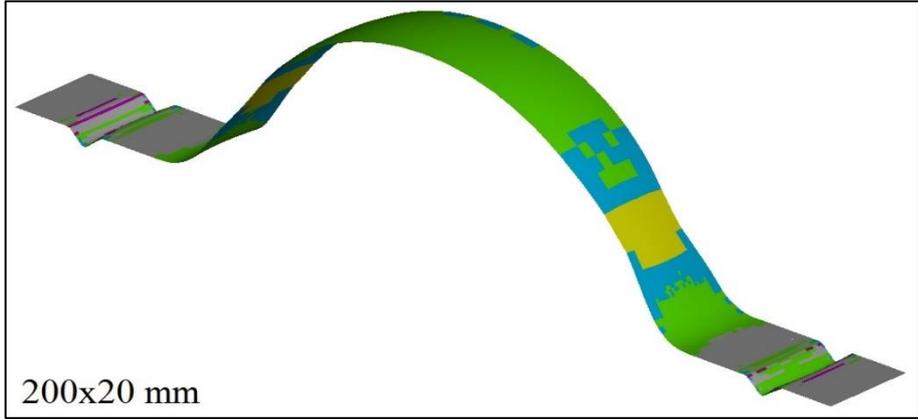
Dimensões [mm]	Amostra	Deformação maior média [mm]	Deformação menor média [mm]	$\phi 1$ [-]	$\phi 2$ [-]
200x200	A	14,78	10,96	0,39046427	0,09166719
	A'	14,93	11,14	0,40101076	0,10825632
200x185	B	14,59	10,84	0,37752278	0,08035035
	B'	14,63	10,97	0,38048912	0,09257918
200x170	C	14,61	10,97	0,37912113	0,09257918
	C'	14,39	10,99	0,36394843	0,09409732
200x155	D	14,44	10,25	0,36718617	0,02436736
	D'	14,48	10,29	0,37041347	0,02858746
200x140	E	14,41	9,83	0,36533732	-0,01748531
	E'	14,00	10,07	0,33671030	0,00664454
200x125	F	14,13	9,40	0,34595098	-0,06223008
	F'	14,45	9,19	0,36833998	-0,08410651
200x110	G	14,69	9,08	0,38458190	-0,09614386
	G'	14,87	9,02	0,39698481	-0,10277128
200x95	H	15,25	8,77	0,42199441	-0,13086828
	H'	15,29	8,85	0,42439590	-0,12254435
200x80	I	16,20	8,46	0,48222037	-0,16763001
	I'	15,08	8,68	0,41056320	-0,14156356
200x65	J	16,37	8,34	0,49306890	-0,18152188
	J'	15,20	8,52	0,41892961	-0,15977759
200x50	K	17,00	8,10	0,53082431	-0,21072103
	K'	16,28	8,26	0,48735227	-0,19075704
200x35	L	17,52	7,91	0,56094823	-0,23403599
	L'	16,76	7,80	0,51621110	-0,24803410
200x20	M	16,50	7,96	0,50077529	-0,22857494
	M'	15,88	8,22	0,46247536	-0,19560945

Fonte: o autor (2017)

APÊNDICE E - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ESTAMPAGEM





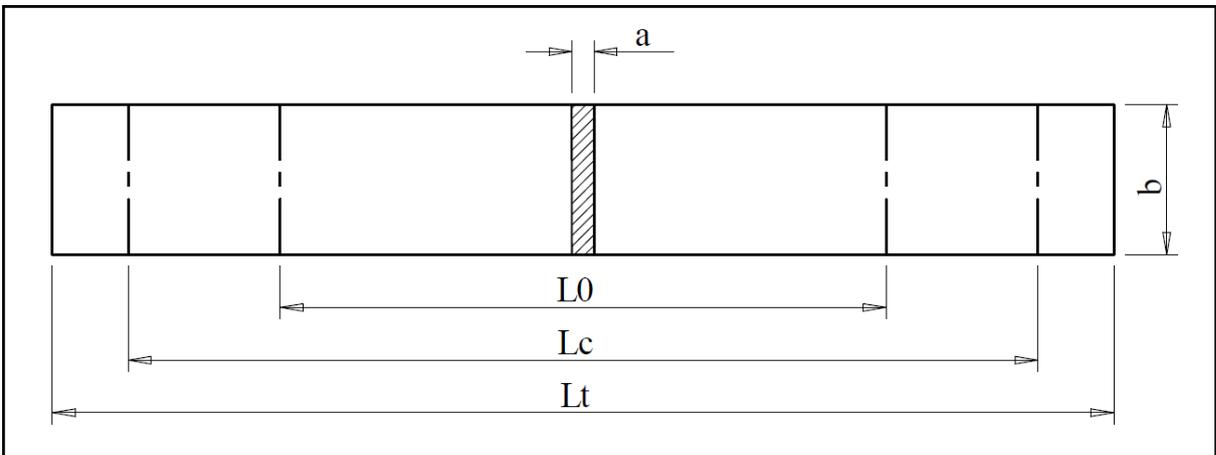


APÊNDICE F - DADOS SIMULADOS PARA AS DEFORMAÇÕES

Dimensões [mm]	Simulação	Deformação maior [mm]	Deformação menor [mm]	φ1 [-]	φ2 [-]
200x200	A	14,36	11,44	0,36174540	0,13453089
	A'	14,44	11,52	0,36753245	0,14164423
200x185	B	14,28	11,38	0,35650826	0,12956520
	B'	14,29	11,46	0,35662494	0,13584122
200x170	C	14,32	11,43	0,35872285	0,13365638
	C'	14,15	11,45	0,34677611	0,13525907
200x155	D	14,19	11,06	0,34983494	0,10059920
	D'	14,19	11,02	0,34971746	0,09712671
200x140	E	14,23	10,83	0,35241589	0,08004271
	E'	13,94	10,97	0,33229687	0,09288299
200x125	F	13,48	9,79	0,29874564	-0,02139389
	F'	13,44	9,67	0,29540220	-0,03390155
200x110	G	14,03	9,44	0,33825636	-0,05798228
	G'	13,95	9,42	0,33301388	-0,06010392
200x95	H	14,64	8,95	0,38117242	-0,11130407
	H'	14,54	8,96	0,37420375	-0,10944291
200x80	I	14,87	8,72	0,39698481	-0,13658367
	I'	14,04	8,96	0,33956269	-0,11037306
200x65	J	15,50	8,46	0,43836245	-0,16723592
	J'	14,61	8,61	0,37923520	-0,15004800
200x50	K	16,14	8,20	0,47850902	-0,19906088
	K'	16,13	8,17	0,47809580	-0,20191221
200x35	L	16,09	8,05	0,47571645	-0,21670598
	L'	15,98	7,93	0,46896142	-0,23235249
200x20	M	16,29	7,82	0,48796633	-0,24547437
	M'	15,81	7,99	0,45805756	-0,22418576

Fonte: o autor (2017)

ANEXO A - CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



Fonte: adaptado da NBR 6892-1

Onde:

a é a espessura do corpo de prova [mm]

b é a largura do corpo de prova [mm]

L_0 é a medida inicial do comprimento [mm]

L_c é o comprimento paralelo [mm]

L_t é o comprimento total [mm]

Tabela 11 - Dimensões dos corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Largura (b)	Comprimento de medida inicial (L_0)	Comprimento paralelo		Comprimento livre entre garras para corpos de prova de lados paralelos
			Mínimo	Recomendado	
1	$12,5 \pm 1$	50	57	75	87,5
2	$20,0 \pm 1$	80	90	120	140
3	$25,0 \pm 1$	50	60	-	Não definido

Fonte: adaptado da NBR 6892-1

Neste trabalho adotou-se o corpo de prova do tipo 2.

ANEXO B - RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos REGISTRO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

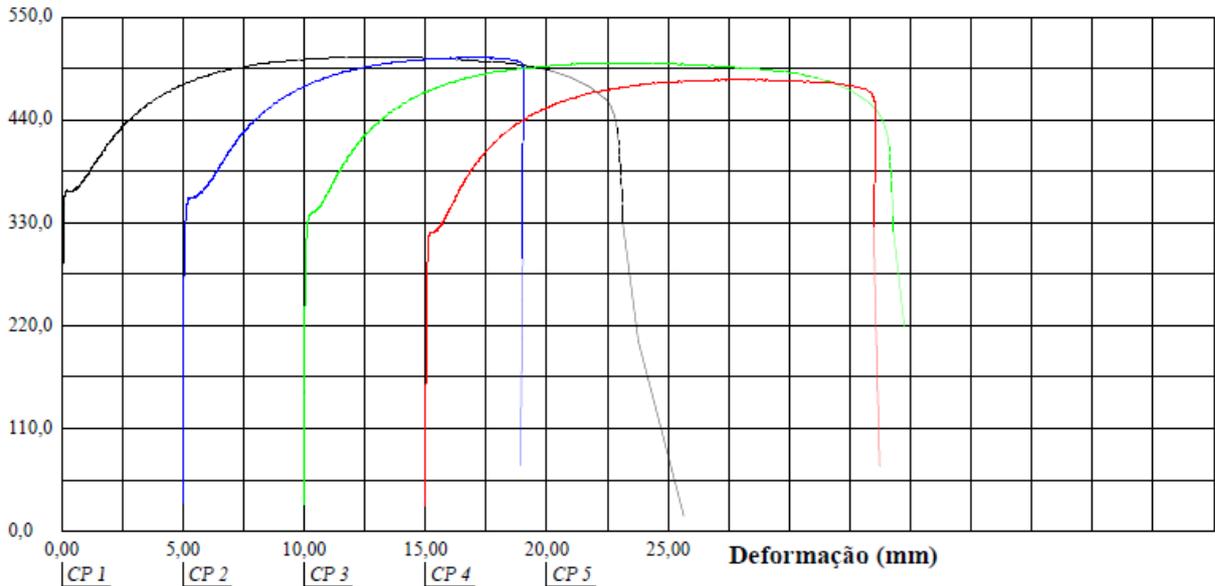
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 26** Extensômetro: **Trd 6** Data: **07/04/2017** Hora: **17:29:59** Trabalho n° **1458**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **2T_TRAÇÃO RETANGULAR (com extensômetro)**
 Ident. Amostra: >>Cliente: **TCC Rafael Lazzarotto** Temp.(°C): **22,6** - Ident. n°: **90°** S.S.: **268789/17** - Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Ident. n°:	Esp. (mm)	Larg. (mm)	Tensão Escoam (MPa)	Tensão Max. (MPa)	Módulo de Elast. (MPa)	Comp. Inicial (Lo) (mm)	Comp. Final (Lf) (mm)
CP 1	00°	0,68	19,80	264,6	370,1	195255	50	72,9
CP 2	45°	0,68	20,00	251,9	365,9	196367	50	63,8
CP 3	90°	0,68	20,00	238,9	361,6	192507	50	75,3
CP 4	45°	0,68	20,00	227,8	348,8	196420	50	69,5

*Escoam. - ponto da curva corresp. ao escoamento convencional: **0,20 %**
 Método de ensaio segundo norma NBR: **6673,81**
 Velocidade de Ensaio: **10,0 mm/min**

Força (kgf)



ANEXO C - RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE EMBUTIMENTO

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos REGISTRO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **11/05/2017** Hora: **14:07:04** Trabalho n° **0006**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_COMPRESSÃO EMBUTIMENTO**
 Ident. Amostra: > Cliente: **TCC Rafael Lazzaroto - Prof. Michels** Temp. (°C): **20,2** - Ident. n°: **S.S.:/17** - Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Ident. n°	Força Máxima (kgf)	Deform. Máxima (mm)
CP 1	01A	6725	28.5
CP 2	01B	7048	30.5
CP 3	02A	6967	29.9
CP 4	02B	6769	29.6
CP 5	04A	5871	34.5
CP 6	04B	5908	28.1
CP 7	05A	5623	35.3
CP 8	05B	5492	27.9
CP 9	06A	5715	31.8
CP 10	06B	6306	35.5
CP 11	07A	8688	53.3
CP 12	07B	5108	38.5
CP 13	08A	4345	36.5
CP 14	08B	4640	39.4
CP 15	09A	3870	41.6
CP 16	09B	3624	37.2
CP 17	10A	2926	40.2
CP 18	10B	2859	41.1
CP 19	11A	2147	41.7
CP 20	11B	2283	42.2
CP 21	12A	1574	44.1
CP 22	12B	1588	42.2

Método de ensaio segundo norma NBR: **6673.81**
 Velocidade de Ensaio: **20.0 mm/min**
 Comp. Inicial (Lo): **100 mm**

Força (kgf)

