



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**"Metodologia teórico-
numérica para
concepção e fabricação
de ferramental para
estampagem em escala
piloto de embalagens
metálicas de duas
peças"**

HESRON WILLIAN DE OLIVEIRA
ORIENTADOR: Prof. LUCIANO PESSANHA MOREIRA

**Volta Redonda
2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

HESRON WILLIAN DE OLIVEIRA

" Metodologia teórico-numérica para concepção e fabricação de ferramental para estampagem em escala piloto de embalagens metálicas de duas peças "

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense.

Área de Concentração: Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos.
Linha de Pesquisa: Conformação e Tratamentos Termomecânicos

Orientador: Prof. Luciano Pessanha Moreira, D.Sc.

**Volta Redonda
2019**

HESRON WILLIAN DE OLIVEIRA

"Metodologia teórico-numérica para concepção e fabricação de ferramental para estampagem em escala piloto de embalagens metálicas de duas peças"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense.

Área de Concentração: Modelamento e Simulação de Processos e Fenômenos.

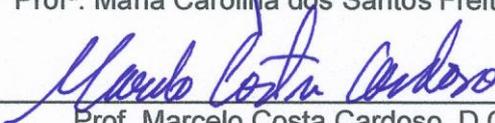
Linha de Pesquisa: Conformação e Tratamentos Termomecânicos

Aprovada em 16 de setembro de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof^a. Maria Carolina dos Santos Freitas, D.C, UFF



Prof. Marcelo Costa Cardoso, D.C., UFRJ



Profet sor Luciano Pessanha Moreira, D.Sc., UFF, Orientador

Volta Redonda
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus porque sem Ele nada seria possível. Gostaria de agradecer também a meus pais Magna Lúcia e José Camilo pelo incentivo ao estudo desde criança, aos meus irmãos pelo apoio e respeito.

À minha esposa Julia Silveira, pelo companheirismo, apoio e incentivo a nunca abandonar e desistir de meus sonhos.

A CSN - Companhia Siderúrgica Nacional pela oportunidade e disponibilização de amostras e equipamentos para a realização deste trabalho.

Ao meu amigo William Ribeiro, que sempre se dispôs a orientar e apoiar, nunca medindo esforços para ensinar e passar todos os seus conhecimentos.

Ao meu orientador Luciano Pessanha Moreira, que me guiou durante toda a jornada da realização deste trabalho e de todo o percurso desde a entrada no PPGEM até este momento, onde pude por meio de sua orientação, evoluir como Engenheiro e ampliar minha capacidade de escrita, análise e discussão de resultados.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 EMBALAGEM	15
3.1.1 Definição e as funções da embalagem	15
3.1.2 Embalagem Metálica.....	16
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 MATERIAL	26
4.1.1 Folha Cromada Têmpera T3.....	26
4.2 MÉTODOS	27
4.2.1 Análise Metalográfica	27
4.2.2 Ensaios de Tação Uniaxial	28
4.2.3 Ensaio de Rugosidade	29
4.2.4 Modelamento por Elementos Finitos	31
4.2.5 Modelo de localização de deformações tipo Marciniak-Kuczyski 35	
4.2.6 Desenvolvimento Do Ferramental Experimental.....	36
4.2.7 Produção Piloto da Embalagem Metálica	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 Inclusões e Microestrutura	47
5.2 Propriedades Mecânicas e Rugosidade	48
5.3 Previsões do modelo de Elementos Finitos.....	50
5.4 Previsões do modelo M-K.....	53
5.5 Fabricação do Ferramental	54
6 CONCLUSÕES	59

7	PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	61
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação Latas de Três peças.....	17
Figura 2: Representação Latas de 2 Peças.	18
Figura 3: Composição típica da folha cromada.	18
Figura 4 – Corpo de prova para ensaio de tração uniaxial.....	28
Figura 5: Mitutoyo modelo SJ301.....	30
Figura 6: Comprimentos avaliados na aferição de rugosidade (Filho, 2011).	30
Figura 7 - Conjunto do ferramental da estampagem profunda. Dimensões em mm .	31
Figura 8 - Curva do espaçamento entre os prensa-chapas durante o processo de estampagem.	33
Figura 9 - Malhas dos componentes: a) Prensa-chapas superior; b) Contrapunção; c) Prensa-chapas inferior; d) Punção; e) Esboço.....	34
Figura 10 - Esquema do modelo de localização de deformações do tipo Marciniak- Kuczysnski. Adaptado de Freitas et al. (2013).	36
Figura 11 – Projeto 2D do ferramental de estampagem (CSN, 2017).....	37
Figura 12 – Desenho da base inferior do ferramental (CSN, 2017).	39
Figura 13 – Usinagem da base inferior do ferramental via CNC (CSN, 2018).	40
Figura 14 – Desenho da base superior do ferramental (CSN, 2017).	41
Figura 15 – Usinagem da base inferior do ferramental via CNC (CSN, 2018).	42
Figura 16 – Processo de torneamento dos componentes do ferramental (CSN, 2018)	42
Figura 17 – Processo de tratamento térmico do ferramental (CSN, 2018).....	43
Figura 18 – Tanque de água para resfriamento (CSN, 2018).	43
Figura 19 – Peças após tratamentos térmicos (CSN, 2018).	44
Figura 20 – Processo de usinagem de acabamento (CSN, 2018).	44
Figura 21 – Exemplo Peça: Prensa Chapa Inferior temperado e acabado (CSN, 2018).....	45
Figura 22 – Colar de Esferas Modelo C13.050.100 (catálogo MDL Componentes Colar de Esferas, 2019)	45
Figura 23 – Prensa Mecânica BLISS 60T	46
Figura 24 – Amostra 500X longitudinal (com ataque).	48
Figura 25 – Amostra 500X transversal (com ataque).	48

Figura 26: Ajuste da curva tensão-deformação verdadeira. (a) Corpo de Prova D1 - 45°; (b) Corpo de Prova L1 - 0°; (c) Corpo de Prova T1 - 90°	49
Figura 27 - Deformação radial ao longo do perfil do modelo da embalagem mostrado em detalhe (c): direção de laminação (a) e a 45° em relação a direção de laminação (b).	51
Figura 28 - Superfícies de escoamentos representadas no espaço de tensões principais normalizadas: (a) orientação paralela (0°) e (b) orientação diagonal (45°) em relação à direção de laminação.....	52
Figura 29 - Previsões da geometria da embalagem metálica de duas peças obtidas a partir dos critérios (a) Hill quadrático (1948) e (b) Ferron (1994) e (c) variação angular do perfil normalizado do flange.	53
Figura 30 - Previsões das deformações limites em uma embalagem de duas peças de folha metálica: (a) direção de laminação e (b) a 45° em relação a direção de laminação.....	54
Figura 31 – Contrapunção e prensa-chapas superiores (CSN, 2019).....	55
Figura 32 – Conjunto do ferramental superior completo.	55
Figura 33 - Punção e prensa-chapas inferiores (CSN, 2019).....	56
Figura 34 – Conjunto do ferramental inferior completo (CSN, 2019).....	56
Figura 35 – Pré-montagem do ferramental.	57
Figura 36 – Ferramental de estampagem montado.	57
Figura 37 - Ferramental de estampagem montado em perspectiva.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço-base (ABNT, 2006).	19
Tabela 2 - Tolerâncias de espessura para folhas-de-flandres (ABNT, 2006).....	20
Tabela 3 – Têmpera para folhas metálicas de simples redução (SR), (ABNT, 2006)	21
Tabela 4 – Classes de propriedades mecânicas para folhas metálicas de dupla redução (DR) e valores de dureza Rockwell superficial 30T (ABNT, 2006)	21
Tabela 5 – Dureza Rockwell 30T, limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LR) e alongamento para folhas-de-flandres T52 e T59.....	22
Tabela 6 – Folhas-de-flandres para a fabricação de embalagens.....	23
Tabela 7 – Massa de revestimento igual (E) para folha-de-flandres (ABNT, 2006) ..	23
Tabela 8 – Massa de revestimento diferencial (D) para folha-de-flandres (ABNT, 2006).....	24
Tabela 9 - Composição química típica do Aço SAE 1008, %peso	27
Tabela 10 - Propriedades das malhas.....	33
Tabela 11 - Etapas da simulação de estampagem	35
Tabela 12 – Resultados da análise de Inclusões no material.....	47
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração uniaxial.	48
Tabela 14 - Propriedades mecânicas da folha metálica.....	49
Tabela 15 - Parâmetros de encruamento da folha metálica.....	50
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de rugosidade.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ASTM	ASTM – Sociedade Americana para Testes e Materiais
AVE	Vídeo Extensômetro Avançado
Al	Alumínio
CLC	Curva Limite de Conformação
CLCE	Curva Limite de Conformação na Estricção
CLCF	Curva Limite de Conformação na Fratura
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Cr	Cromo
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
Cu	Cobre
DR	Dupla Redução
Fe – Ferro	Ferro
Mg	Magnésio
NBR	Norma Brasileira
Ni	Níquel
SR	Simple Redução
Pb	Chumbo
Zn	Zinco

RESUMO

O presente trabalho propõe uma metodologia teórica-numérica a fim de contribuir com as etapas do projeto de ferramental para produção de embalagem metálica de duas peças. Nesta proposta, as propriedades mecânicas da folha cromada SAE 1008 T3, espessura 0,19 mm foram primeiramente avaliadas através do ensaio de tração uniaxial. A partir da geometria do ferramental, foi proposto um modelo de elementos finitos com $\frac{1}{4}$ de simetria do processo de estampagem profunda, a fim de considerar a anisotropia plástica e os efeitos de atrito entre o ferramental e o esboço. Ademais, as deformações limites que definem a Curva Limite de Conformação (CLC) do material foram calculadas pelo modelo tipo M-K de localização de deformações plásticas utilizando os dados uniaxiais experimentais e a rugosidade média da superfície. A partir das previsões do modelo de elementos finitos, observa-se que o orelhamento formado no componente estampado ocorre em função da dependência da orientação angular, da tensão de escoamento uniaxial ou da tensão de deformação. De fato, as variações radiais e na espessura dependem da anisotropia plástica apresentada pela tensão uniaxial na região do flange da embalagem de duas peças. Finalmente, as deformações limites previstas indicaram a viabilidade do processo. Sendo assim, com base nos resultados, foi fabricado um ferramental de estampagem experimental fiel ao projeto estudado neste trabalho.

Palavras chaves: Modelamento, Folhas Metálicas, Conformação, Embalagens.

ABSTRACT

The present contribution proposes a theoretical-numerical methodology aimed to help the tooling design steps to produce a two-piece metallic packaging. For this purpose, the mechanical properties of the 0.19 mm thick chromium coated SAE 1008 T3 steel foil were firstly evaluated by means of uniaxial tensile tests. From the tooling geometry, a $\frac{1}{4}$ symmetry finite element model of the deep-drawing process is proposed accounting for the plastic anisotropy and friction effects between the tools and the blank. Also, the limit strains which define the Forming Limit Curve (FLC) of the material were calculated with a plastic flow localization model M-K type using the experimental uniaxial data and the average surface roughness. From the finite element model predictions, the ears formation in the stamped part is explained as a function of the angular orientation dependence of the uniaxial tension or compression yield and or flow stress. In fact, either the radial and through-thickness strains variations depend on the plastic anisotropy manifested by the uniaxial stress in the flange region of the deep-drawn two-piece can. Finally, the predicted limit deformations indicated the feasibility of the process. Therefore, based on these results, an experimental stamping tooling was manufactured exactly to the project studied in this work.

Key words: Modelling, Sheet Metal Forming, Tinplate Steel, Steel Packaging

1 INTRODUÇÃO

A estampagem de um material é um processo de conformação mecânica, realizado geralmente a frio, que compreende um conjunto de operações, pelas quais uma chapa plana adquire uma nova forma geométrica. Esse processo pode alcançar elevada produtividade industrial, obtendo-se baixos custos de produção, baixo consumo de material, produtos semiacabados ou acabados e com boas propriedades mecânicas, por esses motivos é um processo de conformação bastante utilizado nas indústrias. O desenvolvimento de seu ferramental normalmente é realizado com a utilização do método de tentativa e erro. Na última década ocorreu um grande aumento na elaboração de estudos que visam o desenvolvimento de programas destinados a simular os processos de conformação de chapas. Dentro deste contexto têm destaque as simulações computacionais utilizando o método dos elementos finitos, tornando-se uma importante ferramenta na definição de processos reais ótimos. Fabricantes de componentes estampados, impulsionados pelo crescimento industrial, estão constantemente desenvolvendo estudos e melhorias na área dos processos de fabricação, com o intuito de atender as novas exigências do mercado. Para atender a elevada demanda dentro de um prazo especificado, os fabricantes procuram por processos mais rápidos e de menor custo, capazes de produzir grandes lotes de peças com um nível de qualidade elevado.

A estampagem profunda, é um processo de grande importância e de elevada produtividade, cujo campo de atuação inclui peças automobilísticas, aeronáuticas, produtos domésticos e embalagens químicas e alimentícias. O presente trabalho visa realizar um modelamento matemático para produção de ferramental de estampagem para produção de embalagens metálicas para a indústria alimentícia e química. Ainda hoje, é comum se observar fabricantes basearem-se no método de tentativa e erro

para projetar a tais operações. Essa metodologia resulta em uma calibração do processo de estampagem, contudo até que essa calibração seja realizada com sucesso, muita sucata pode ser gerada, o que se traduz em custos adicionais de fabricação e no aumento do tempo de produção e custo final da peça. Uma alternativa para se chegar a um controle adequado de todo o processo, mesmo em situações de estampagens complexas, é a utilização da mecânica computacional para a simulação do processo como um todo. A utilização desta ferramenta para a realização de simulações e modelamentos tem crescido rapidamente dentro do meio industrial, pois com o auxílio de um computador é possível analisar o comportamento de componentes sujeitos a carregamentos complexos, recriar cenários inviáveis economicamente de serem montados no mundo real, e testar a resistência de componentes, sem acarretar na criação de sucata e de custos adicionais, além de reduzir o tempo de realização dos testes e não colocar vidas em perigo.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar a simulação numérica em um formato de embalagem e um determinado material, comparando os resultados experimentais com os resultados numéricos para validação do projeto. Como experimento, foi determinada um caneco de formato cilíndrico de diâmetro 99 mm e altura 52 mm, aplicando folha cromada têmpera T3 e espessura de 0,19 mm.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver o ferramental de conformação para protótipos de embalagem metálica de 2 peças.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (a) Caracterizar o material através de ensaios de tração uniaxial, para avaliação de propriedades mecânicas. Em seguida, obter as deformações limites que compõem a Curva Limite de Conformação (CLC) da folha metálica empregando-se um modelo de localização de deformações do tipo Marciniak-Kuczynski (M-K). Além disso, realizar medidas de dureza; perfil de rugosidade e caracterização microestrutural.
- (b) Para avaliar os efeitos de parâmetros geométricos do ferramental e da embalagem assim como os parâmetros de processo (atrito, força de prensa-chapas e velocidade do punção), propõe-se aplicar modelos de elementos finitos em três dimensões. Realizar as simulações no software ABAQUS/Explicit.
- (c) Confeccionar um conjunto de ferramental de estampagem, pelo processo de usinagem, para produção em escala piloto de embalagens metálicas. O projeto deste ferramental considera uma prensa BLISS 60T disponível no laboratório do Centro de Pesquisas da CSN.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EMBALAGEM

3.1.1 Definição e as funções da embalagem

Ao abordar o tema embalagem, as definições distintas e inter-relacionadas embalar e acondicionar, devem ser perfeitamente compreendidas e interpretadas, pois segundo MICHAELIS (1998), embalagem significa acondicionamento. Ainda segundo MICHAELIS (1998), embalar significa empacotar, acondicionar e acondicionar significa preservar contra a deterioração, embalar ou acomodar (objetos) para transporte. Sendo assim, os termos embalar e acondicionar podem ser considerados termos sinônimos ou complementares.

De acordo com SLATER, MARTINS e PHILIPPI (2000), etimologicamente o termo embalagem deriva do alemão antigo, onde balla significa juntar ou aglomerar, apresentando a ideia de introduzir em ballas, e, por extensão, caracterizar embalagem como sendo o conjunto de materiais destinados a proteger um produto que deve ser transportado. Da mesma maneira, etimologicamente, a palavra acondicionamento deriva do latim condere, referindo-se a estabelecer ou estabilizar, e, no caso de um produto, significando sua apresentação de forma definitiva e estável (SLATER, MARTINS e PHILIPPI, 2000). Complementando as definições de embalagem e acondicionamento, segundo SLATER, MARTINS e PHILIPPI (2000):

Além das funções iniciais de embalar e acondicionar um produto, como ferramenta de proteção, existem muitas outras funções para a embalagem, como: diminuir as perdas, deterioração e desperdício entre distribuidor e cliente; acelerar as manipulações e operações comerciais; facilitar o armazenamento e organização; melhorar a rentabilidade

nas redes de venda; transmitir informação; assegurar a promoção do produto; e inspirar confiança aos compradores e consumidores”.

Isto mostra que a embalagem é algo complexo, e que as suas funções passam pela valorização do uso, da percepção, de instrução e da expressão a respeito de um determinado produto (SLATER, MARTINS e PHILIPPI, 2000). Ainda segundo SLATER, MARTINS e PHILIPPI (2000), e de acordo com os termos de Marketing, embalagem é o recipiente usado para proteger, promover, transportar e/ou identificar um produto.

SANTOS e CASTRO (1998) consideram a embalagem como sendo o elo de ligação entre o produtor e o consumidor, a qual vem acompanhando rapidamente as exigências do consumidor e desempenhando várias funções além de: proteger, promover, transportar e/ou identificar um determinado produto. Ainda segundo SANTOS e CASTRO (1998) as funções básicas da embalagem estão relacionadas à proteção física do produto. Por outro lado, após o surgimento e fortalecimento dos canais de distribuição do tipo autosserviço (supermercados) a embalagem adquiriu o papel de vendedor silencioso. Segundo esses autores: “As informações contidas nas embalagens passam a funcionar como veículo de promoção e de venda dos produtos, além de servir, informar e educar o consumidor”.

3.1.2 Embalagem Metálica

3.1.2.1 A origem da lata de aço

O uso de folhas metálicas para produção de embalagens surgiu de experimentos rudimentares feitos no século XVIII. Foi o francês Nicolas Appert o primeiro a constatar, em 1790, que alimentos aquecidos e acondicionados em embalagens devidamente seladas podiam ser guardados por mais tempo, livre da ação de certos tipos de bactérias. O método foi cientificamente comprovado mais de 70 anos depois pelo pesquisador Louis Pasteur, que batizou o processo de pasteurização (CSN, 2017).

No século XIX, em 1810, o inglês Peter Durand patenteava uma invenção: uma técnica especial permitindo o uso do metal na fabricação de embalagens. Um ano depois, a empresa Durand Iron Works fazia os primeiros testes em grande escala, atendendo a uma solicitação da marinha e do exército britânico (CSN, 2017). Finalmente na década de 1940, as embalagens metálicas passaram por um importante e decisivo teste de ordem

prática: mostraram-se perfeitas para o fornecimento de alimentos aos combatentes e a população civil, durante a II Guerra Mundial. Desde então, as embalagens de aço são utilizadas para acondicionar, proteger e conservar os mais diferentes produtos. As características exclusivas oferecidas pelo aço tornaram este tipo de embalagem insubstituível na composição da imagem e da qualidade de muitos dos mais renomados e conhecidos produtos que fazem parte do nosso cotidiano (CSN, 2017).

3.1.2.2 Definição

Segundo as normas NBR 11276 (ABNT, 1990) apud DANTAS, GATTI e SARON (1999) e NBR 10531 (ABNT, 1998) apud DANTAS, GATTI e SARON (1999) a Lata é definida como embalagem metálica. Da mesma forma, a Embalagem Metálica é definida como um recipiente hermético ou não, produzido a partir de materiais metálicos, destinado a acondicionar e conservar produtos diversos

3.1.2.3 Classificação das embalagens metálicas – latas

As embalagens metálicas podem ser classificadas de acordo com a matéria-prima (material metálico) que a originou em: latas de aço e latas de alumínio. São exemplos de embalagens metálicas as latas de folha-de-flandres (aço), as latas de alumínio e os tambores de aço (ABRE, 2005).

Segundo DANTAS, GATTI e SARON (1999), dependendo do processo de fabricação, as latas podem ser classificadas em:

Latas de três peças: constituída por corpo, tampa e fundo, possuindo na maioria dos casos formato cilíndrico e em outros casos formatos retangulares ou diferenciados, conforme apresentado na Figura 1. As latas de alimentos são chamadas open top e as latas para produtos não alimentícios são chamadas general line.



Figura 1: Representação Latas de Três peças.

Latas de duas peças: são formadas apenas pela tampa e pelo corpo e apresentam a característica de não possuírem a costura, ou solda, lateral. Em linhas gerais, tanto a folha de flandres quanto o alumínio alcançam os requisitos necessários para a fabricação de latas, embora tais materiais apresentem características diferentes (DANTAS, GATTI e SARON, 1999).



Figura 2: Representação Latas de 2 Peças.

3.1.2.4 Conceito de folha cromada

Folha de aço revestida em ambas as faces com camadas de cromo metálico (valor nominal de 60 mg/m²) e óxido de cromo, aplicadas por deposição eletrolítica, que combina as características de propriedades mecânicas do aço com a resistência à corrosão e elevada aderência dos revestimentos orgânicos ao depósito de cromo (CSN, 2019). A composição típica da folha cromada é ilustrada na Figura 3.

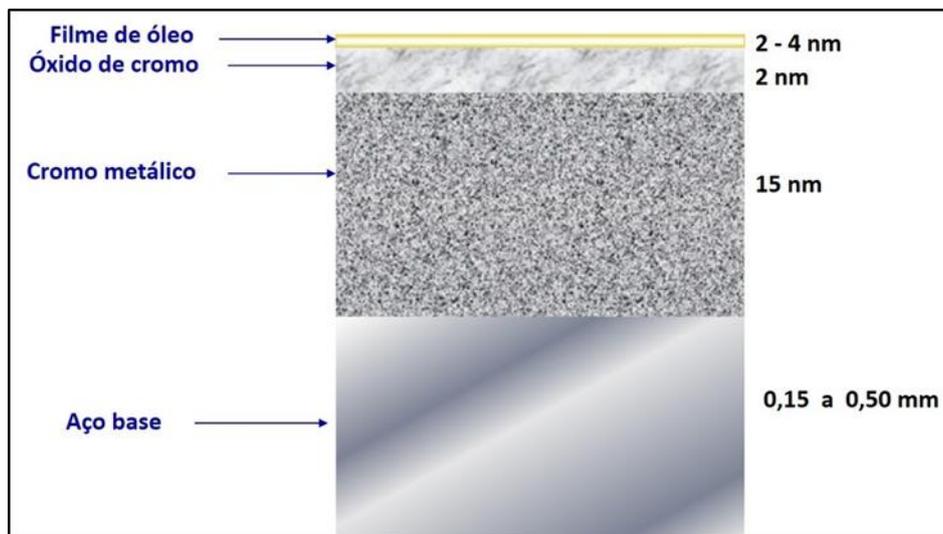


Figura 3: Composição típica da folha cromada.

3.1.2.5 Composição química do aço-base

O aço utilizado na fabricação de folhas-de-flandres é de baixo teor de carbono, com valores que variam de 0,06 a 0,15%, conferindo ao aço boas propriedades de ductilidade. O teor de manganês (Mn) conserva-se na faixa de 0,30 a 0,60% e tem a função de compensar os efeitos negativos causados pelo enxofre (S) na deformação a quente do aço e na aceleração da corrosão. A presença de teores elevados de fósforo (P) e enxofre (S) são prejudiciais ao produto final, sendo que o teor de enxofre (S) deve ser controlado entre 0,015 a 0,040%, para se evitar problemas na estampagem e o teor de fósforo (P) deve ser mantido num valor máximo de 0,015% para se evitar a fragilidade a frio e diminuição da resistência à corrosão. Para maior rigidez e maior resistência à corrosão, pode ser adicionado nitrogênio (N), boro (B) ou nióbio (Ni) ao aço. O teor de silício (Si) não deve ultrapassar 0,01 a 0,02% pois sua elevada concentração diminui a estampabilidade da folha. O cobre (Cu) tem boa propriedade de proteção à corrosão externa em teores entre 0,10 e 0,30%. Na Tabela 1 têm-se os teores máximos especificados pela norma NBR 6665 (ABNT, 2006).

Tabela 1 - Composição química do aço-base (ABNT, 2006).

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Al	Outros
(%) Máx	0,13	0,60	0,020	0,030	0,020	0,20	0,15	0,10	0,020	0,020

3.1.2.6 Propriedades físicas e mecânicas do aço-base

3.1.2.6.1 Espessura

A espessura da folha é inicialmente reduzida na laminação a quente, seguindo-se na laminação a frio e na laminação de encruamento e, em alguns casos, na laminação de dupla redução e influi significativamente nas propriedades mecânicas do material. A Tabela 2 apresenta uma série de espessuras e suas respectivas tolerâncias padronizadas pela NBR 6665 (ABNT, 2006).

Tabela 2 - Tolerâncias de espessura para folhas-de-flandres (ABNT, 2006).

Espessura nominal (mm)		Tolerância ±(mm)
Folha Simples Redução	Folha Dupla Redução	
---	0,13	0,006
---	0,14	0,007
---	0,15	0,008
----	0,16	0,008
0,17	0,17	0,009
0,18	0,18	0,009
0,19	0,19	0,010
0,20	0,20	0,010
0,21	0,21	0,011
0,22	0,22	0,011
0,23	0,23	0,012
0,24	0,24	0,012
0,25	0,25	0,013
0,26	0,26	0,013
0,27	0,27	0,014
0,28	0,28	0,014
0,29	0,29	0,015
0,30	----	0,015
0,31	----	0,016
0,32	----	0,016
0,33	----	0,017
0,34	----	0,017
0,35	----	0,018
0,36	----	0,018
0,37	----	0,019
0,38	----	0,019
0,39	----	0,020
0,40	----	0,020
0,41	----	0,021
0,42	----	0,021
0,43	----	0,022
0,44	----	0,022
0,45	----	0,023
0,46	----	0,023
0,47	----	0,023
0,48	----	0,024
0,49	----	0,024

FONTE: ABNT, 2006.

3.1.2.6.2 Têmpera

É um processo de tratamento térmico por resfriamento rápido para aumento de dureza e resistência do aço, porém, o termo têmpera é utilizado na caracterização das folhas metálicas, sendo expresso na escala de dureza Rockwell 30T e indica o grau de encruamento da folha de flandres simples redução (SR) após o recozimento, caracterizando uma combinação de propriedades mecânicas interrelacionadas (ABNT, 2006).

Segundo ANJOS (1989) apud DANTAS, GATTI & SARON (1999) a dureza dos aços é influenciada pela composição química e pelas etapas de recozimento parâmetros tempo e temperatura e tipo de processo, que pode ser contínuo ou em caixa. A espessura e têmpera estão correlacionadas no que diz respeito à resistência mecânica da folha. Na Tabela 3, encontram-se os valores de dureza Rockwell 30T para materiais metálicos com suas respectivas têmperas.

Tabela 3 – Têmpera para folhas metálicas de simples redução (SR), (ABNT, 2006)

Têmpera	Recozimento	Espessura $\leq 0,21\text{mm}$		0,21 < espessura $\leq 0,28\text{mm}$		Espessura $> 0,28\text{mm}$	
		Nominal	Tolerância	Nominal	Tolerância	Nominal	Tolerância
T50	RCX	53 máx.	-	52 máx.	-	51 máx.	-
T52	RCX	53	± 4	52	± 4	51	± 4
T57	RCX	58	± 4	57	± 4	56	± 4
T61	RC	62	± 4	61	± 4	60	± 4
T65	RC	65	± 4	65	± 4	64	± 4

As folhas metálicas de dupla redução (DR) são menos dúcteis que as folhas simples redução (SR), sendo que tais materiais devem ser caracterizados pelo limite de escoamento (LE) com 0,2% de deformação. Na Tabela 4, encontram-se os valores do limite de escoamento para as folhas de aço de dupla redução (DR) (ABNT, 2006).

Tabela 4 – Classes de propriedades mecânicas para folhas metálicas de dupla redução (DR) e valores de dureza Rockwell superficial 30T (ABNT, 2006)

Classe	LE (0,2%) (MPa)	Tolerância (MPa)	Dureza Rockwell 30T
DR 520	520	± 70	70 ± 3
DR 550 RCX	550	± 70	73 ± 3

DR 550 RC	550	±50	73±3
DR 620	620	±70	76±3
DR 660	660	±70	77±3

Apesar das folhas metálicas de dupla redução (DR) serem menos dúcteis que as folhas de simples redução (SR) e serem caracterizados pelo limite de escoamento (LE) a 0,2% de deformação, assim como limite de resistência à tração e alongamento percentual, estes três parâmetros podem também ser aplicados às folhas de simples redução (SR), pois fornecem informações sobre a resistência mecânica e ductilidade do material (ANJOS, 1989 apud DANTAS, GATTI & SARON, 1999).

Embora não conste na norma NBR 6665 (ABNT, 2006), conforme pode ser observado na Tabela 3, a folha-de-flandres T59 foi lançada pela COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL – CSN em 2003, sendo especialmente desenvolvida para a fabricação de latas expandidas no Brasil e tendo as suas propriedades mecânicas similares àquelas especificadas para a folha-de-flandres TH415 presente na EN 10202 (EURONORM, 2001).

A Tabela 5 apresenta os valores de dureza, limite de escoamento a 0,2% de deformação (LE), limite de resistência à tração (LR) e alongamento mínimo percentual para as folhas T52 e T59, segundo as especificações do Centro de Pesquisas da COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL e segundo as normas NBR 6665 (ABNT, 2006) e EN 10202 (EURONORM, 2001).

Tabela 5 – Dureza Rockwell 30T, limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LR) e alongamento para folhas-de-flandres T52 e T59.

NBR (ABNT, 2006)	Equivalente (EURONORM, 2001)	CSN	Dureza Rockwell 30T	LE (0,2%) (MPa)	Lr (0,2%) (MPa)	AL Mín (%)
T52	TS245	T52	53 ± 4	245 ± 50	340 ± 50	25%
-----	TH415	T59	62 ± 4	415 ± 50	435 ± 50	16%

A Tabela 6 apresenta uma relação de equivalência entre normas para classificação e as possíveis aplicações da folha-de-flandres de acordo com esta classificação de dureza.

Tabela 6 – Folhas-de-flandres para a fabricação de embalagens.

Classificação (Têmpera)		Dureza Rockwell Escala 30T	Aplicação
Antiga	Atual		
T1	T50	46-52	Peças profundamente estiradas
T2	T52	50-56	Peças específicas de latas e com estiramento raso
T3	T57	54-63	Corpos e fundos de latas, fechamentos de grandes diâmetros e rolhas metálicas
T4	T61	58-64	Corpos e fundos de latas, pequenos fechamentos com rosca
T5	T65	62-68	Fundos e corpos de latas rígidos para produtos não corrosivos
T6	T70	67-73	Aplicações muito rígidas
DR550	DR8	70-76	Corpos de latas redondas e fundos de latas
DR620	DR9	73-79	Corpos de latas redondas e fundos de latas
DR660	DR9M	74-80	Fundos de bebidas carbonatadas e cerveja

3.1.2.6.3 Revestimento de Estanho

Assim como a têmpera, o revestimento de estanho também é base para a seleção da folha-de-flandres para a fabricação de embalagens. A massa de estanho aplicada e o tipo caracterizam a folha mais apropriada, de acordo com a agressividade do produto a ser acondicionado e características do meio externo (CSN, 2017). A Tabela 7 apresenta valores de revestimento de estanho iguais (em ambos os lados) em folhas-de-flandres e a Tabela 8 apresenta valores de revestimentos diferenciais.

Tabela 7 – Massa de revestimento igual (E) para folha-de-flandres (ABNT, 2006)

Código de identificação	Massa nominal (g/m ²)		
	Desvio de massa por face		
E1,1/1,1	1,10	-0,25	2,20
E2,0/2,0	2,00	-0,30	4,00
E2,8/2,8	2,80	-0,35	5,60
E5,6/5,6	5,60	-0,50	11,20
E8,4/8,4	8,40	-0,65	16,80
E11,2/11,2	11,20	-0,90	22,40

Tabela 8 – Massa de revestimento diferencial (D) para folha-de-flandres (ABNT, 2006)

Código de Identificação	Massa nominal (g/m ²)			
	Revestimento	Desvio de massa permitido para menos na média de ensaio triplo	Face de menor revestimento	Desvio de massa permitido para menos na média de ensaio triplo
D2,0/1,0	2,00	-0,30	1,00	-0,25
D2,8/1,1	2,80	-0,35	1,10	-0,25
D5,6/2,8	5,60	-0,50	2,80	-0,35
D8,4/2,8	8,40	-0,65	2,80	-0,35
D8,4/5,6	8,40	-0,65	5,60	-0,50
D11,2/2,8	11,20	-0,90	2,80	-0,35
D11,2/5,6	11,20	-0,90	5,60	-0,50
D11,2/8,4	11,20	-0,90	8,4	-0,65

3.1.2.7 Principais Características da Lata de Aço

Segundo a Associação Brasileira da Embalagem de Aço (ABEAÇO, 2003) a lata de aço é uma das melhores formas de se acondicionar, transportar e proteger os alimentos ou outros produtos de uso industrial. Suas principais características são: elevada resistência mecânica; produtividade, pois hoje se pode fabricar cerca de 1.200 latas por minuto; excelente apelo visual para o consumidor devido à impressão (litografia) com até seis cores; conveniência ao consumidor; reciclabilidade e degradabilidade, isto é, se deixada no ambiente em contato com o solo e intempéries se decompõe na forma de óxido de ferro num período médio de 5 anos.

De forma muito similar, segundo a CSN (2017), a embalagem de aço possui as seguintes características: é inviolável; se constitui de um recipiente ou embalagem totalmente hermética, o que possibilita o isolamento do produto em seu interior, atuando como barreira natural à ação da luz, evitando-se assim a oxidação do produto acondicionado em seu interior; não é inflamável e se apresenta reciclável e degradável.

THE CHOICE (2004) cita como vantagens da embalagem de aço: a preservação do sabor e dos valores nutricionais do produto; elevada qualidade da impressão, o que ajuda na diferenciação da marca; propriedades magnéticas do aço, o que contribui para facilidade no processo de envase da embalagem e na reciclagem da lata vazia; além da inerente resistência do aço, a qual faz com que a embalagem seja resistente a danos durante manuseio e transporte.

3.1.2.8 Principais Aplicações da Lata de Folha Cromada

A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN, 2017) cita que as principais aplicações da lata de folha cromada são latas estampadas para o acondicionamento de alimentos (pescado), tampas e fundos de latas sanitárias e latas em geral, embalagens para tintas, rolhas metálicas, formas de assar e outras.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

O material avaliado neste trabalho é uma folha cromada têmpera T3, onde as amostras para estudo deste material foram disponibilizadas pela Companhia Siderúrgica Nacional. Todos os procedimentos experimentais foram realizados nos laboratórios de análise do Centro de Pesquisas da CSN. Os ensaios de tração uniaxial e dureza foram realizados para fins de determinação tanto do comportamento plástico da chapa (encruamento) e anisotropia da folha metálica. Além disso, foi calculada a Curva Limite de Conformação (CLC) empregando-se um modelo de localização de deformações do tipo Marciniak-Kuczysnki (M-K) proposto por Freitas et al. (2013). O material determinado para estudo foi totalmente caracterizado tanto em suas propriedades mecânicas e características microestruturais. Foi também realizada a simulação por elementos finitos através do software Abaqus/Explicit o comportamento da folha metálica durante o processo de estampagem de uma embalagem de 2 peças. Com base nos resultados e no projeto do ferramental aplicado, foi fabricado um ferramental de estampagem experimental.

4.1.1 Folha Cromada Têmpera T3

O material especificado para os testes iniciais, contempla a folha cromada de têmpera T3 e esta apresenta as seguintes propriedades mecânicas: dureza de 57 +/- 4 (HR30T), LE 275 +/- 50 (MPa), alongamento total > 20% e espessura 0,19 mm (SAE 1008). O processamento deste material foi realizado em escala industrial nos equipamentos da Companhia Siderúrgica Nacional.

O aço ensaiado possui 0,19 mm de espessura e trata-se de uma folha cromada. A composição química típica deste aço está listada na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química típica do Aço SAE 1008, %peso

C (Máx.)	Mn (Máx.)	P (Máx.)	S (Máx.)	Si (Máx.)
0,09	0,45	0,02	0,02	0,02

A folha metálica em estudo, é uma folha laminada cujo range da temperatura de laminação à quente variou entre 870°C e 910°C e o range da temperatura de boninamento variou entre 550°C e 590°C. A bobina à quente passou pelo processo de redução à frio (Simples Redução) à uma taxa de 90,5% e, posteriormente o material encruado resultante deste processo foi recristalizado por meio do processo de recozimento em caixa, após este processo, a bobina recozida passou pelo laminador de encruamento à uma taxa de redução de 2% para fins de acabamento superficial, eliminação de quebra de superfície do aço e aplicar maior rigidez à folha de aço, finalizado este processo, a bobina de aço foi encaminhada à tesoura para aparar das bordas e finalmente passou pela linha de cromagem, tornando-se em fim uma Bobina de Folha Cromada.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Análise Metalográfica

A análise metalográfica do material em estudo foi realizada nas direções transversal e longitudinal ao sentido de laminação da amostra. A preparação da amostra foi baseada na norma ASTM E3- 2011 que consistiu inicialmente no corte transversal e longitudinal de uma pequena parte do material nas regiões de borda e centro de acordo com a largura da bobina e seu posterior embutimento a quente na baquelite, resina utilizada com elevada dureza que favorece o manuseio e as operações posteriores necessárias para o ensaio.

Após o embutimento a amostra foi lixada com lixas de granulometria de 220, seguida pelas lixas 320, 400, 600 e 1200. Todo o processo de lixamento é feito sob refrigeração com água.

Após passar pelo procedimento de lixamento, foi feito o polimento, executado por panos especiais, colados à pratos giratórios, refrigerados com álcool, sobre os quais são depositadas pequenas quantidades de abrasivos (Pasta de Diamante) na granulometria de 6, 3 e 1 micron. (máquina Buehler Beta).

Em seguida ataca-se a amostra com ácido nital 3% (ácido nítrico 3 ml e 97ml álcool etílico) e realiza-se a inspeção no microscópio. O microscópio ótico utilizado foi um Zeiss Axiophot.

A inspeção da amostra foi feita conforme a norma ASTM E407 para caracterização dos tipos de estruturas presentes, ASTM E 45, Método A, para determinação de inclusões na análise e E112-24420 para a determinação do tamanho de grão conforme o método planimétrico, que consiste na contagem do número de grãos dentro de uma área conhecida (adotou-se o padrão estipulado na norma - área circular de 5000 mm²) e método dos interceptos de Heyn, que é feito traçando linhas de comprimento conhecido em relações as direções estabelecidas na norma mencionada. Para esta análise foram feitas 8 fotomicrografias de 8 campos diferentes na amostra das direções em análises. Foi analisado o tamanho de grão para as direções longitudinal e transversal da amostra com magnitude de ampliação de 500x.

4.2.2 Ensaios de Tração Uniaxial

Os corpos de prova para os ensaios de tração uniaxial foram confeccionados com a utilização de um centro de usinagem CNC ROMI Discovery 1250 no Centro de Pesquisas da CSN. As dimensões do corpo de prova de tração uniaxial foram tomadas segundo a norma NBR – 6673 conforme Figura 4.

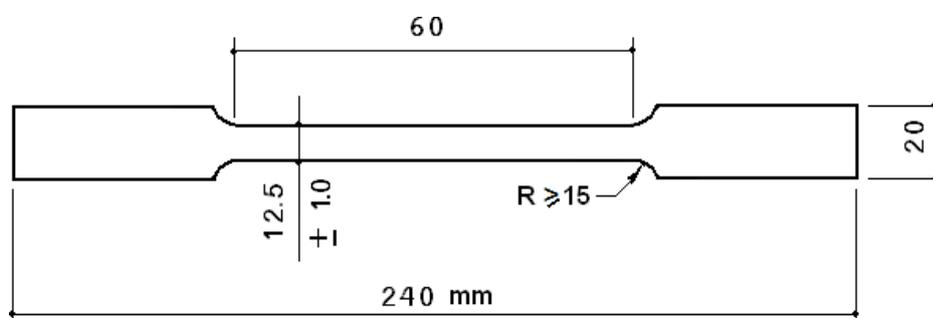


Figura 4 – Corpo de prova para ensaio de tração uniaxial.

A máquina utilizada nos ensaios de tração uniaxial para determinação de propriedades mecânicas e anisotropia plástica foi uma máquina universal Instron série

25 T modelo 5585H com célula de carga de 3.000 Kgf e software Instron Série 25 T com vídeo extensômetro de base de medidas 50 mm. Os testes foram realizados em três corpos de prova por direção, laminação (0°), diagonal (45°) e transversal (90°) a uma velocidade de 1 mm/min até o LE, após o LE a velocidade se manteve constante à 10 mm/min até a ruptura.

Para descrever o comportamento plástico do material no modelo de elementos finitos, as curvas experimentais de tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira foram ajustadas a duas equações de encruamento. A primeira equação de Swift (equação 1):

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^N \quad (1)$$

na qual N é o expoente de encruamento, K é coeficiente de resistência (MPa) e ε_0 é a pré-deformação. A segunda equação (equação 2) de encruamento de Ludwik definida por:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\varepsilon^p)^N \quad (2)$$

na qual σ_0 é o limite de escoamento em tração uniaxial. Os parâmetros das equações (1) e (2) foram determinados por meio de ajuste não-linear disponível no programa comercial Origin.

4.2.3 Ensaio de Rugosidade

Foram retiradas as medidas de rugosidade nas regiões de borda e centro com relação à largura da folha cromada. O equipamento utilizado foi um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ301, apresentado na Figura 5, para determinação dos valores de rugosidade média (R_a) em conformidade com a norma DIN1990.



Figura 5: Mitutoyo modelo SJ301

A avaliação da rugosidade é feita por meio de um comprimento de amostragem denominado cut-off (figura 6). A determinação do cut-off permite minimizar os efeitos do desvio de forma na avaliação da rugosidade e seus valores são definidos pelas normas (Filho, 2011).

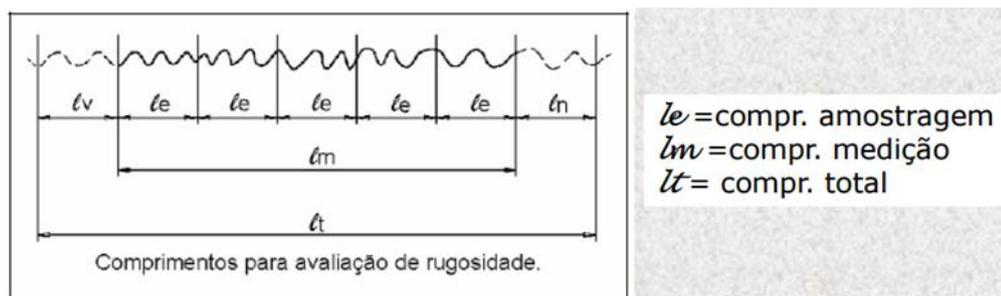


Figura 6: Comprimentos avaliados na aferição de rugosidade (Filho, 2011).

Conforme Filho, 2011, os parâmetros obtidos pela rugosidade consistem em: Amplitude, espaçamento e híbridos.

O parâmetro de amplitude R_a (Rugosidade aritmética ou média) utilizado nesta dissertação é definido em função da linha média M do perfil de rugosidade. Esta linha média consiste na divisão do perfil de rugosidade de forma que a soma das áreas

processo de estampagem. Por fim, ao final do curso dos prensa-chapas, o contrapunção desce realizando a estampagem do fundo da embalagem. Foi realizada a descrição geométrica do ferramental de estampagem em modelos geométricos 3D a partir de desenhos 2D em CAD (Computer Aided Design) fornecidos pela CSN. As geometrias dos prensa-chapas, do punção e do contrapunção foram definidas no programa de elementos finitos ABAQUS/CAE. O esboço metálico possui raio inicial igual a 90,48 mm. Graças às simetrias axial da embalagem metálica e ortotrópica do material do esboço, foi modelado apenas um quarto das geometrias e apenas as superfícies de interesse, para fins de redução do tempo computacional.

Durante a estampagem, ocorre um aumento na espessura do esboço na região do flange conforme este entra na região da cavidade da matriz, diminuindo seu diâmetro. Ignorar este efeito pode levar ao agarramento excessivo do esboço pelos prensa chapas, porém um aperto insuficiente pode também levar a defeitos de enrugamento. Assim, usualmente se faz um controle da força do punção, porém neste trabalho propôs-se um controle do deslocamento dos prensa-chapas. Para tal, foi estabelecido que o prensa-chapas inferior se move um pouco mais rápido que o superior, aumentando gradativamente a distância entre os prensa-chapas. Essa distância crescente em função do tempo computacional entre os prensa-chapas foi obtida a partir da variação da espessura do esboço determinada em simulações preliminares, que se apresenta aproximadamente linear, conforme mostrado no gráfico da Figura 8, aproximada pela seguinte equação:

$$g_i = 0,25(1 + t) \tag{3}$$

na qual g_i é a separação crescente entre os prensa-chapas superior e inferior em milímetros e t é tempo computacional em segundos.

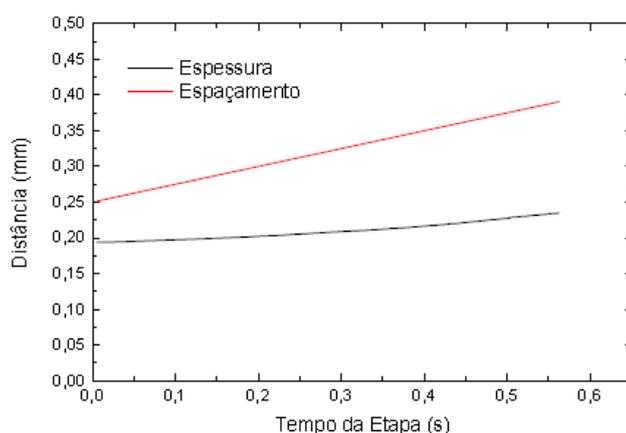


Figura 8 - Curva do espaçamento entre os prensa-chapas durante o processo de estampagem.

O ferramental foi definido por elementos rígidos enquanto o esboço metálico foi discretizado por elementos de casca adotando-se uma malha mapeada. A malha para o ferramental utilizou elementos R3D4 e para o esboço elementos de casca S4R, de acordo com a terminologia do programa ABAQUS. Nas regiões de cantos do punção e contrapunção, nas quais existem menores raios, foram feitos refinamentos na malha e, conseqüentemente, nas regiões do esboço que entraram em contato com estes raios de adoçamento. A Figura 9 exibe os componentes com suas malhas e o resumo das malhas de elementos finitos do conjunto são listados na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades das malhas.

Componente	Nº de nós	Nº de elementos	Tipo de elemento
Esboço	8.037	7.860	S4R
Punção	5.074	4.920	R3D4
Contrapunção	4.870	4.725	R3D4
Prensa-chapas inferior	2.744	2.640	R3D4
Prensa-chapas superior	2.544	2.444	R3D4

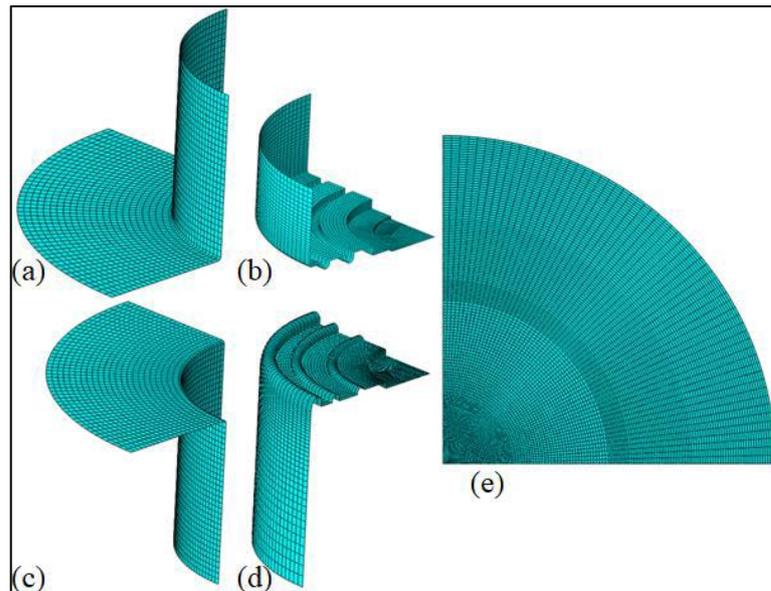


Figura 9 - Malhas dos componentes: a) Prensa-chapas superior; b) Contrapunção; c) Prensa-chapas inferior; d) Punção; e) Esboço.

Os efeitos de contato entre o esboço e o ferramental de estampagem foram descritos pela lei de atrito de Coulomb. Para descrever o comportamento mecânico da folha, assumiu-se a elasticidade linear isotrópica de Hooke definida em função dos valores do módulo de elasticidade longitudinal ($E = 207.000 \text{ MPa}$) e do coeficiente de Poisson ($\nu = 0,29$), em conjunto com a hipótese de encruamento isotrópico no contexto da teoria de escoamento plástico. A anisotropia plástica inicial da folha metálica foi descrita pelos critérios de escoamento de Hill quadrático (1948) e Ferron (1994), implementados em uma sub-rotina aberta ao usuário no programa ABAQUS/Explicit (Moreira, 2007). Com vistas a atender à velocidade de fabricação esperada de 100 peças por minuto, o processo de estampagem profunda foi simulado no tempo total de 0,655 segundos. Como o processo é dividido entre a estampagem do corpo da embalagem seguido pelo processo de conformação do fundo, foram criadas etapas individuais no programa ABAQUS/Explicit para cada uma dessas operações. Para manter ambas as velocidades do punção e contrapunção constantes e iguais, na primeira etapa o punção percorre o curso de 48 mm em 0,558 segundos, enquanto o contrapunção percorre 3,61 mm em 0,042 segundos. Duas etapas adicionais foram criadas apenas para representação do contato e liberação entre os prensa-chapas e a folha metálica. Todas as etapas da simulação estão resumidas na Tabela 11.

Tabela 11 - Etapas da simulação de estampagem

Etapa	Tempo da Etapa (s)
Aperto do esboço	0,005
Estampagem do corpo	0,558
Estampagem do fundo	0,042
Liberação do esboço	0,050
Total	0,655

Este esboço que está em formato PDF foi desenvolvido no AutoCAD e posteriormente será transportado para o ABAQUS em formato SAT.

4.2.5 Modelo de localização de deformações tipo Marciniak-Kuczysnki

As deformações limites que compõem a Curva Limite de Conformação (CLC) da folha metálica no espaço dos valores das menores e maiores deformações principais ($\varepsilon_2, \varepsilon_1$), foram calculadas empregando-se um modelo de localização de deformações do tipo Marciniak-Kuczysnki (M-K) proposto por Freitas (2013). Nesse tipo de modelo, são considerados os efeitos de anisotropia plástica planar descrito pelo critério fenomenológico de Ferron (1994) em conjunto com as equações constitutivas da teoria de escoamento plástico assumindo-se a hipótese de um encruamento isotrópico descrito pela Eq. (1). No modelo de localização do tipo M-K assume-se a existência de uma imperfeição geométrica inicial na forma de uma banda inclinada em relação a maior componente de tensão principal no plano da chapa, conforme esquema na Figura 10. Tal imperfeição geométrica é definida pela razão entre as espessuras das zonas homogênea e defeituosa representadas nesta figura pelos índices a e b, respectivamente. Neste trabalho, o valor inicial da imperfeição geométrica foi calculado a partir da rugosidade média inicial ($R_a = 0,61 \times 10^{-3}$ mm) medida na orientação transversal em relação a direção de laminação, a saber:

$$f_0 = \frac{h_0^a - 2R_a}{h_0^a} \quad (4)$$

Sendo h_0^a (mm) a espessura inicial da folha metálica medida na direção transversal (Freitas, 2013).

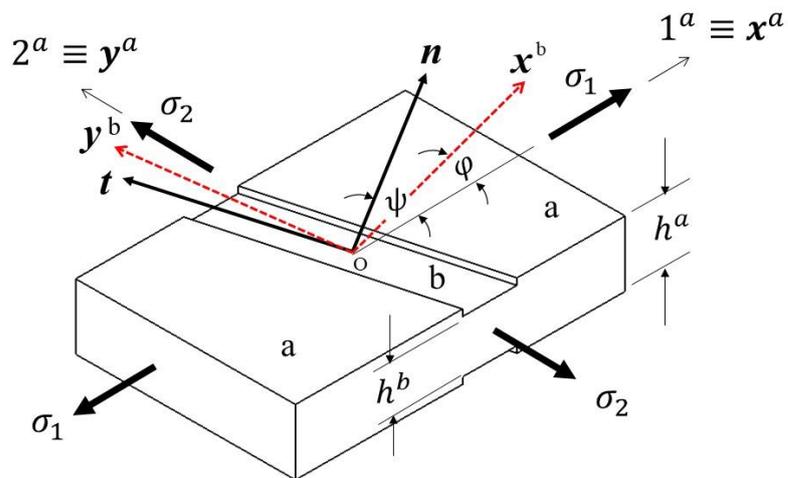


Figura 10 - Esquema do modelo de localização de deformações do tipo Marciniak-Kuczysnski. Adaptado de Freitas et al. (2013).

4.2.6 Desenvolvimento Do Ferramental Experimental

Para a concepção do ferramental, foi desenvolvido um projeto 2D em Auto CAD para usinagem do conjunto de peças e componentes que irão compor o ferramental de estampagem conforme apresentado na Figura 11.

A partir da concepção do desenho do ferramental, foram usinados no laboratório de oficina mecânica do Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional, um conjunto de peças que irão compor o ferramental para produção piloto da embalagem metálica. O ferramental foi produzido pelo processo de torneamento convencional em torno mecânico e posteriormente pelo processo de fresamento CNC em um centro de usinagem ROMI Discovery 1250.

O processo de usinagem deu-se por início com a usinagem das bases superior e inferior do ferramental, conforme resumido nas sequências das fotos mostradas nas Figuras 12 a 15. O aço adotado para usinagem foi um aço SAE1045 retirado do esboço de placa laminada com espessura de 70 mm.

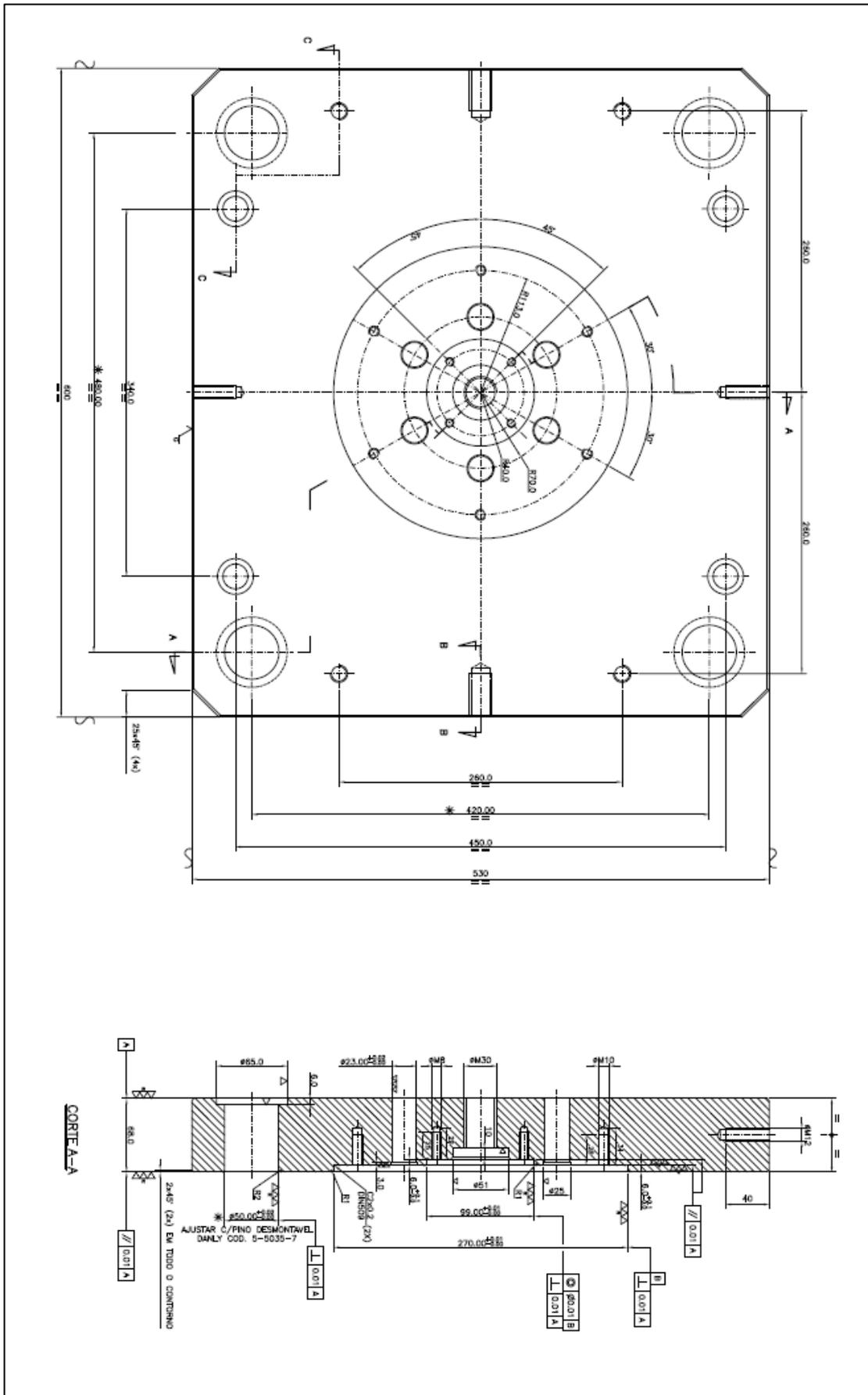


Figura 12 – Desenho da base inferior do ferramental (CSN, 2017).

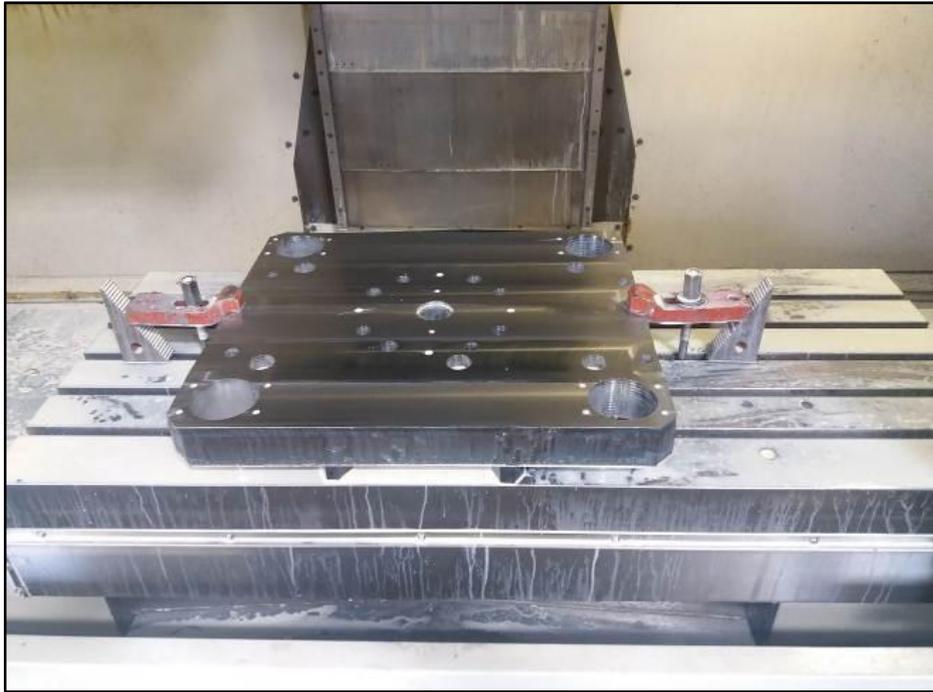


Figura 13 – Usinagem da base inferior do ferramental via CNC (CSN, 2018).



Figura 15 – Usinagem da base inferior do ferramental via CNC (CSN, 2018).

Com as bases do ferramental usinadas, deu-se início à usinagem dos componentes do ferramental conforme desenhos técnicos individuais. As peças foram usinadas em aço SAE1045 pelo processo de torneamento, mostrado na Figura 16, e posteriormente as roscas e furos foram usinadas pelo processo de usinagem CNC.

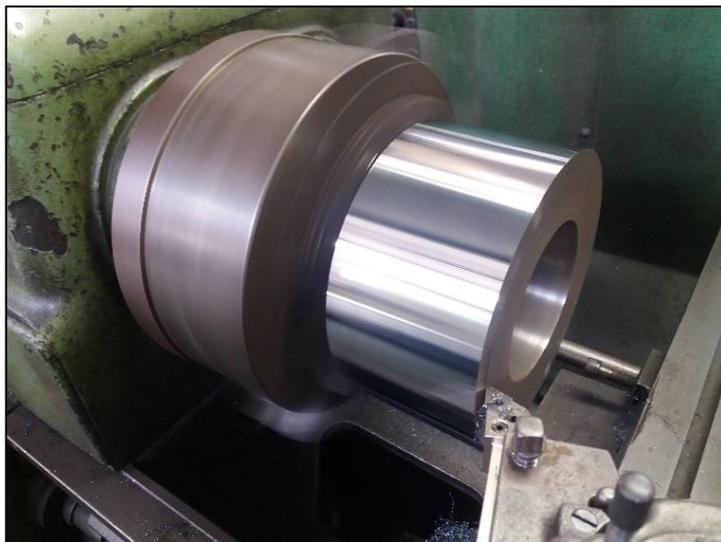


Figura 16 – Processo de torneamento dos componentes do ferramental (CSN, 2018)

As peças foram usinadas com acréscimo de 0,5 mm de sobremetal para realização de têmpera e revenimento e usinagem de acabamento. Antes do processo

tratamento térmico, as peças apresentaram dureza de 65 HRB. Cada componente foi submetido a um pote de carvão em pó (processo de carbonetação) a posteriormente foram colocados em um forno à temperatura ambiente aplicando aquecimento até a temperatura de 900°C e permaneceram em um período de encharque de 4 horas (figura 17), após este processo, as peças foram resfriadas em água à temperatura ambiente (figura 18). Para o revenimento, as peças foram aplicadas em forno à 200°C pelo período de 2 horas. As peças temperadas são apresentadas na Figura 19.



Figura 17 – Processo de tratamento térmico do ferramental (CSN, 2018).



Figura 18 – Tanque de água para resfriamento (CSN, 2018).



Figura 19 – Peças após tratamentos térmicos (CSN, 2018).

Após o processo de tempera e revenimento, as peças tratadas voltaram para o processo de usinagem onde foi aplicado o passe acabamento, conforme Figura 20 e Figura 21.



Figura 20 – Processo de usinagem de acabamento (CSN, 2018).

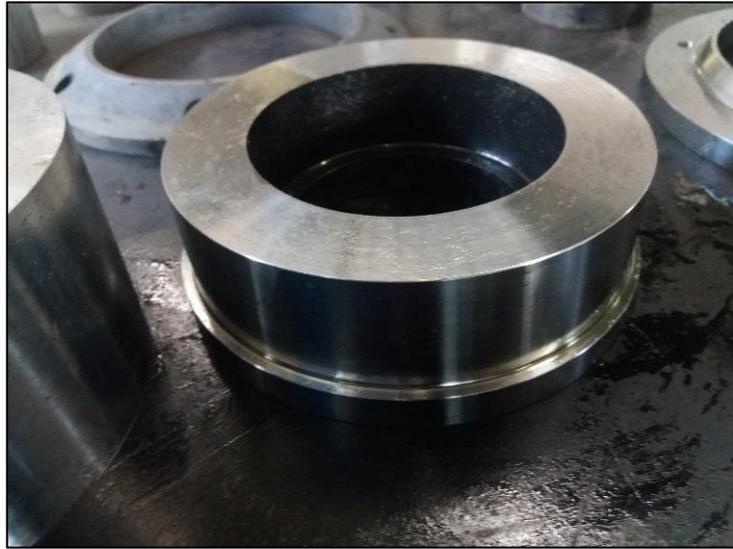


Figura 21 – Exemplo Peça: Prensa Chapa Inferior temperado e acabado (CSN, 2018)

Com os processos de tempera e usinagem concluídos, iniciou-se o processo de montagem e ajustagem do ferramental. Para o sistema de guia e alinhamento do ferramental foi necessário a aquisição do colar de esferas para compor o sistema de deslizamento e alinhamento do ferramental conforme apresentado na Figura 22. As barras e buchas que compõem o sistema foram usinados pelo processo de torneamento.

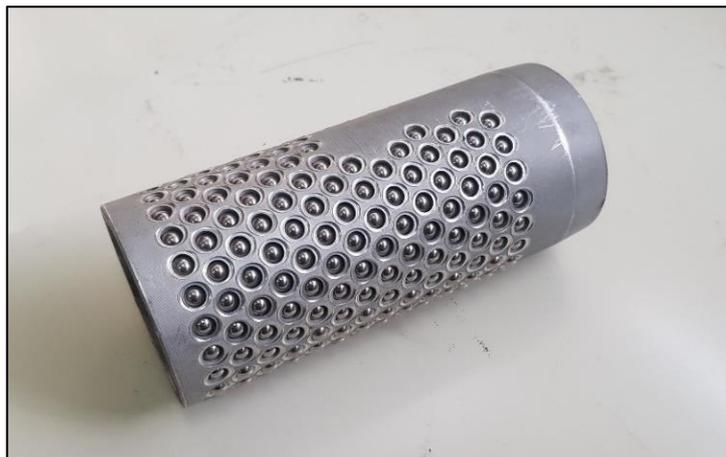


Figura 22 – Colar de Esferas Modelo C13.050.100 (catálogo MDL Componentes Colar de Esferas, 2019)

4.2.7 Produção Piloto da Embalagem Metálica

Para produção em escala piloto das embalagens, o ferramental deverá ser implantado em uma prensa de produção com capacidade de 60T. Foi disponibilizado pela empresa PRADA Embalagens, empresa do grupo CSN, uma prensa mecânica BLISS 60T conforme representado na Figura 23, porém segundo o Ministério do Trabalho e Emprego está proibido o uso deste tipo de prensa na Indústria. A CSN está estudando e viabilizando economicamente à modernização e adequação desta prensa à Norma Regulamentadora de Segurança NR#12 que diz permitir o uso dessas prensas desde que se impeça o ingresso das mãos ou dos dedos dos operadores nas zonas de prensagem, devendo ser adotado o enclausuramento com proteções fixas.



Figura 23 – Prensa Mecânica BLISS 60T

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Inclusões e Microestrutura

A folha metálica analisada apresentou microestrutura formada por grãos ferríticos poligonais associados a cementita globular fina dispostas em alinhamento. Os resultados de Análise de Inclusões são listados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados da análise de Inclusões no material.

AMOSTRA	Sulfeto		Aluminato		Silicato		Óxido / Globular	
	Fino	Grosso	Fino	Grosso	Fino	Grosso	Fino	Grosso
Folha Cromada T3	---	---	---	---	---	---	½	---

Foram realizadas fotomicrografias digitalizadas da amostra e são apresentadas nas figuras 24 e 25 com aumento de 500x. Onde pode se observar a formação de grãos na fase ferrítica associados à cementita fina que são formados devido ao auto-revenimento da martensita de baixo carbono, característica habitual do produto folha metálica, proveniente à combinação da composição química do aço aplicado com os processos termomecânicos de laminação a frio da folha de aço juntamente com o recozimento em caixa. Esta característica microestrutural apresenta boa conformabilidade e é muito utilizada para aplicação em latas revestidas de cromo ou estanho.

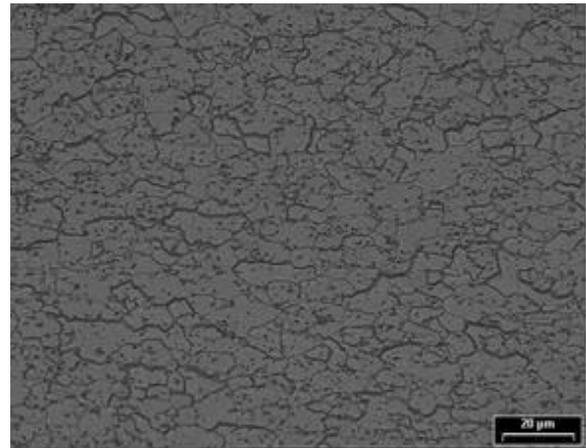
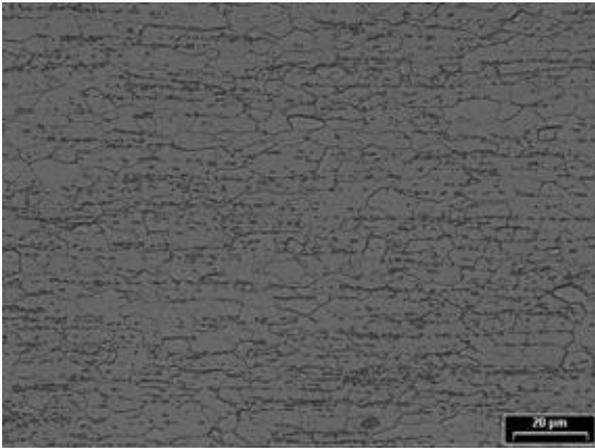


Figura 24 – Amostra 500X longitudinal (com ataque). Figura 25 – Amostra 500X transversal (com ataque).

5.2 Propriedades Mecânicas e Rugosidade

Os ensaios de tração uniaxial forneceram os valores médios das propriedades mecânicas da folha metálica, conforme resultados listados na Tabela 13 em função da orientação angular em relação da direção de laminação. Estes resultados de propriedades calculados estão listados na Tabela 14, na qual σ_e é o limite de escoamento determinado a 0,2% de deformação plástica, ϵ_u é a deformação uniforme, ϵ_t é a deformação total, σ_u o limite de resistência, N é o expoente de encruamento, R é o coeficiente de anisotropia plástica de Lankford, \bar{R} é o coeficiente de anisotropia plástica normal e ΔR é a medida de anisotropia plástica planar. Os valores em itálico representam o desvio padrão calculado a partir de três ensaios por direção de laminação (0°, 45° e 90°). É possível observar primeiro menor valor do limite de escoamento em tração uniaxial na orientação a 45° em concordância com o maior valor do coeficiente de anisotropia plástica nessa orientação angular. Estes valores, em conjunto com o valor de anisotropia planar, indicam que a folha metálica apresentará na estampagem profunda orelhamento a 45° com vales nas orientações angulares com valores mínimos de anisotropia plástica, isto é, nas orientações paralela e transversal a direção de laminação.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração uniaxial.

Direção		LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	R	N
Transversal	Média	262	366	31	0,98	0,18
Longitudinal	Média	272	366	30	0,94	0,17
Diagonal	Média	263	355	36	1,38	0,18

Tabela 14 - Propriedades mecânicas da folha metálica.

α (graus)	σ_e (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_t (%)	σ_u (MPa)	N	R	ΔR	\bar{R}
0	272 0,67	23,38 0,28	29,76 0,36	368 1,33	0,17 0,00	0,99 0,05		
45	263 0,16	25,83 0,42	36,66 1,22	355 0,17	0,18 0,00	1,41 0,00	-0,43	1,20
90	262 2,98	24,25 0,52	32,01 1,50	366 0,67	0,18 0,00	0,98 0,04		

Os parâmetros das equações de encruamento de Ludwik e Swift estão listados na Tabela 15, na qual é possível observar que esta última equação forneceu um melhor ajuste para todas as orientações angulares ($R^2 \sim 1$) e, portanto, foi escolhida para descrever o comportamento plástico da folha metálica nas simulações por elementos finitos do processo de estampagem de uma embalagem de duas peças. Os parâmetros destas equações foram determinados por meio de ajuste não-linear disponível no programa comercial Origin a partir dos resultados de tração uniaxial, as curvas são ilustradas na figura 26.

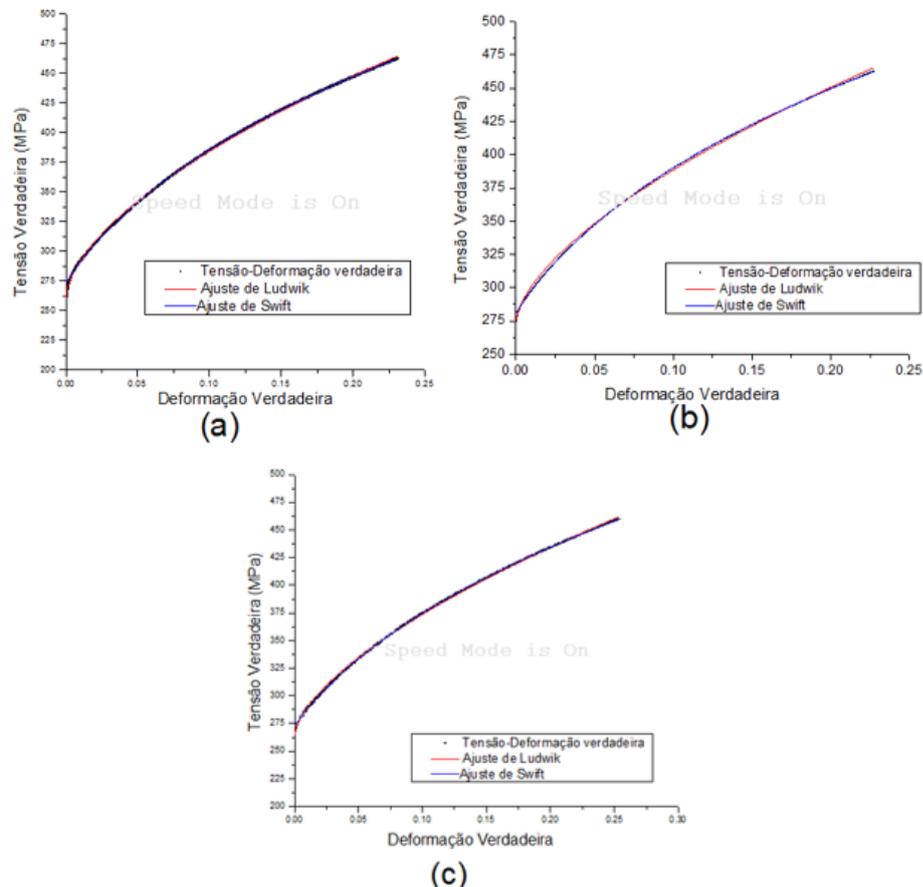


Figura 26: Ajuste da curva tensão-deformação verdadeira. (a) Corpo de Prova D1 - 45°; (b) Corpo de Prova L1 - 0°; (c) Corpo de Prova T1 - 90°

Tabela 15 - Parâmetros de encruamento da folha metálica.

α (graus)	Ludwik				Swift			
	K (MPa)	N	σ_0 (MPa)	R^2	K (MPa)	N	ϵ_0	R^2
0	464,37	0,5989	272,18	0,9987	657,59	0,2652	0,0402	0,9999
	2,69	0,0048	0,62	0,0001	3,17	0,0009	0,0002	-
45	454,62	0,6104	262,61	0,9991	650,58	0,2916	0,0506	0,9998
	3,34	0,0040	0,07	0,0001	2,01	0,0027	0,0007	-
90	471,02	0,5834	261,88	0,9989	662,91	0,2757	0,0404	0,9999
	2,22	0,0132	3,07	0,0002	3,50	0,0047	0,0019	-

Os resultados dos valores médios de rugosidade média obtidos em três regiões da folha metálica (borda, centro e borda 1) estão listados na Tabela 16. Como esperado, os maiores valores de rugosidade média foram encontrados na direção transversal a direção de laminação, devido às condições de acabamento impressas no material pelo cilindro de laminação.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de rugosidade.

Direção (T e L)	R_a (μm) Superior		R_a (μm) Inferior	
	T	L	T	L
Borda	0,63	0,16	0,64	0,23
Centro	0,60	0,25	0,61	0,12
Borda 1	0,62	0,14	0,57	0,14
Média	0,61	0,19	0,61	0,16

5.3 Previsões do modelo de Elementos Finitos

As previsões numéricas da distribuição de deformação radial na embalagem estão apresentadas na Figura 27 para as orientações angulares paralela (0°) e diagonal (45°) com respeito a direção de laminação. Estas distribuições estão representadas em função da distância original ao longo do perfil do centro a borda da peça estampada. Esta escolha é justificada uma vez que os valores do coeficiente de Lankford R nas orientações paralela (0°) e transversal (90°) são muito próximos, conforme Tabela 14. As deformações radiais na orientação paralela (e transversal) são inferiores em comparação as deformações radiais obtidas na orientação a 45° (diagonal) com respeito a direção de laminação, como pode ser visto na Figura 27 próximo as regiões da parede e flange, entre as distâncias 90 e 110 mm. Estes efeitos

são atribuídos a evolução angular dos valores do coeficiente de anisotropia plástica R em tração ou melhor a evolução angular do limite de escoamento no estado de tração/compressão uniaxial $\sigma(\alpha)$ na direção circunferencial na borda do flange e cisalhamento puro na região do flange, ou seja, valores máximos de R (ou valores mínimos de limite e ou tensão de escoamento σ) resultam em maiores (ou menores) deformações radiais no flange do estampo (Hill, 1948),(Moreira, 2000). Deste modo, torna-se possível explicar as diferenças entre as previsões obtidas a partir dos critérios de escoamento em função da forma da superfície de escoamento entre os estados de tensão de interesse na estampagem, a saber, expansão biaxial simétrica no fundo, deformação plana na parede, cisalhamento puro no flange e compressão na borda.

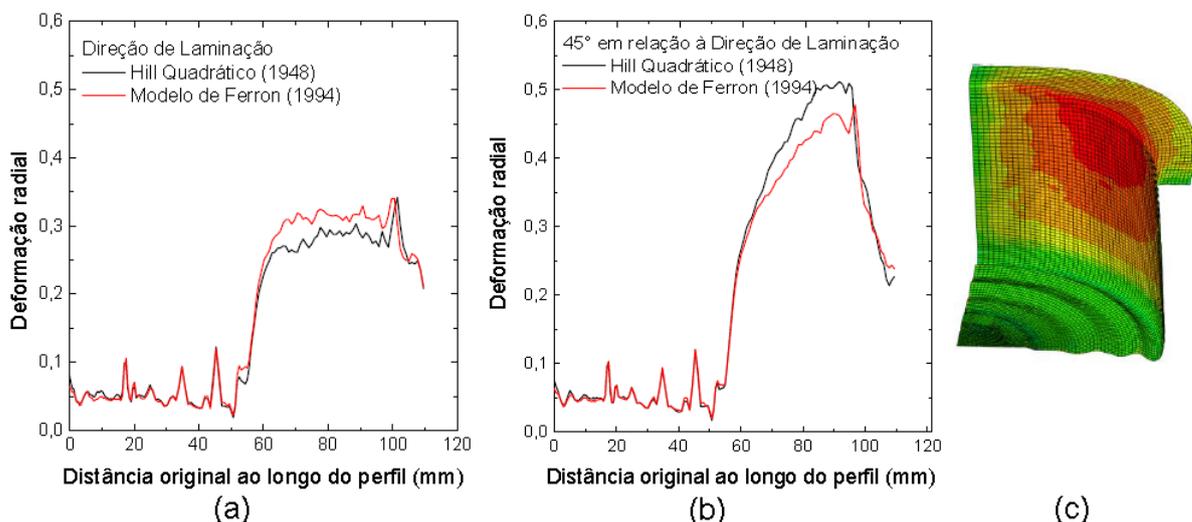


Figura 27 - Deformação radial ao longo do perfil do modelo da embalagem mostrado em detalhe (c): direção de laminação (a) e a 45° em relação a direção de laminação (b).

A Figura 28 apresenta o traçado das superfícies de escoamento a 0° e 45° com respeito à direção de laminação junto com os valores médios do limite de escoamento em tração uniaxial normalizado pelo limite de escoamento uniaxial na direção de laminação. A superfície de escoamento do critério de plasticidade de Hill quadrático (Hill, 1948) na orientação a 45° e 135° fornece menores valores de tensões por toda região de interesse do processo de estampagem profunda da embalagem de duas peças e, portanto, prevê maiores valores de deformações radiais nas regiões do estampo nesta orientação angular. De acordo com os valores do coeficiente de anisotropia plástica da folha metálica, listados na Tabela 15, a embalagem deverá apresentar orelhamento com picos a 45° e 135° e vales a 0° e 90°, respectivamente.

Os vales (e picos) são formados em razão das maiores (e menores) deformações radiais na região do flange.

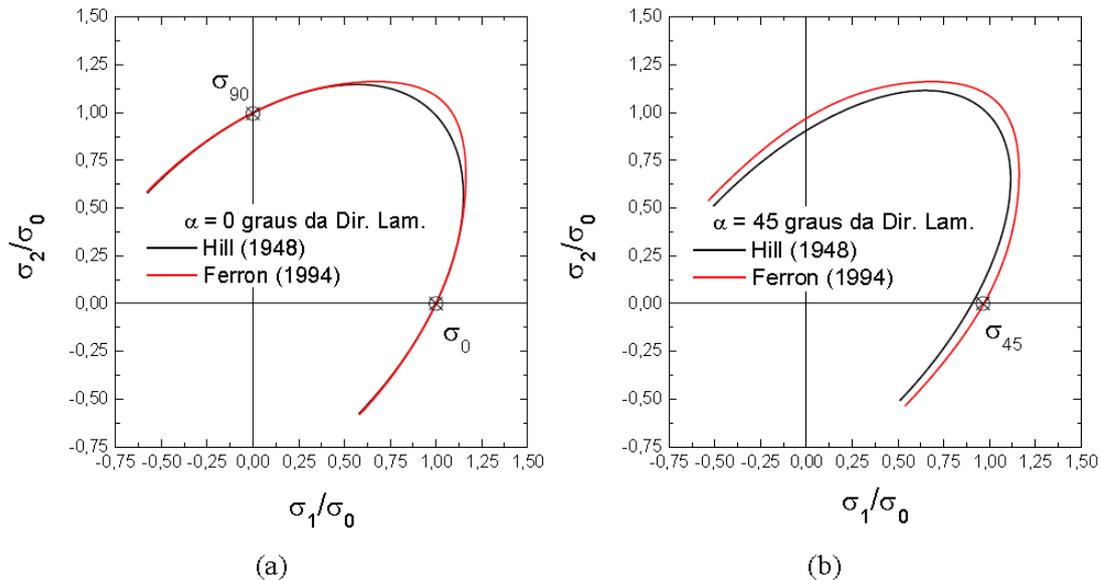


Figura 28 - Superfícies de escoamentos representadas no espaço de tensões principais normalizadas: (a) orientação paralela (0°) e (b) orientação diagonal (45°) em relação à direção de laminação.

A Figura 29 (c) apresenta as previsões do perfil do flange determinado para os critérios de Hill quadrático (1948) e Ferron (1994), Figuras 29 (a) e 29 (b), respectivamente. Nesta representação, o perfil do flange está normalizado pela distância radial na direção de laminação. Primeiramente, é possível analisar a formação de orelhamento no flange da embalagem na orientação próximo a 45° em concordância com a anisotropia plástica experimental da folha metálica, observada para ambas as razões de anisotropia plástica deformação e limite de escoamento em tração uniaxial, especificamente, $R_{45} > R_0 > R_{90}$ ou considerando-se os desvios padrão, $\sigma_{45} < \sigma_{90} < \sigma_0$. Em segundo lugar, menores valores das deformações radiais irão resultar na formação de vales nas orientações angulares paralela (0°) e transversal (90°) a direção de laminação. Por outro lado, os maiores níveis de deformações radiais obtidos na orientação diagonal (45°) em relação a direção de laminação resultam na formação de orelhas (picos).

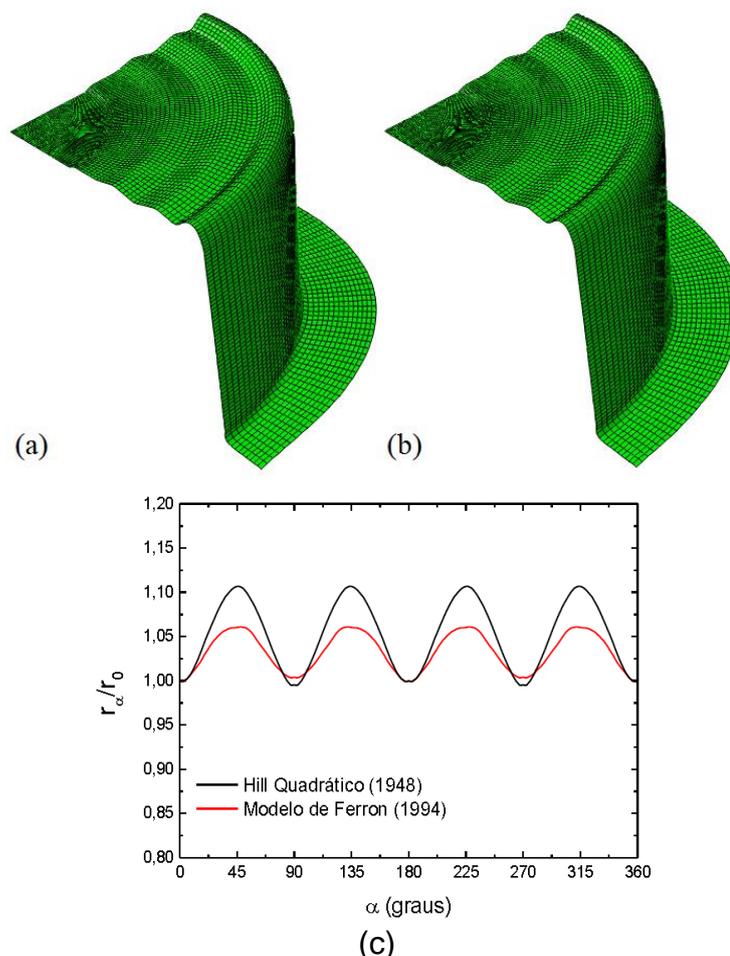


Figura 29 - Previsões da geometria da embalagem metálica de duas peças obtidas a partir dos critérios (a) Hill quadrático (1948) e (b) Ferron (1994) e (c) variação angular do perfil normalizado do flange.

5.4 Previsões do modelo M-K

As previsões das deformações limites da folha metálica determinadas pelo modelo de localização do tipo Marciniak- Kuczysnski (M-K) com o critério de Ferron (1994) estão apresentadas na Figura 30. Para fins de comparação, os valores das deformações principais previstas pelo modelo de elemento finitos da estampagem da embalagem de duas peças foram acrescentados na forma de par de pontos, os quais, por sua vez, são representativos das principais regiões da embalagem cilíndrica: fundo, raio do punção, parede, raio da matriz e flange. Este tipo de representação constitui uma ferramenta denominada Diagrama Limite de Conformação (DLC) que possibilita prever condições de risco de fratura precedida por instabilidade plástica na forma de estrição localizada, indicando assim as regiões críticas em dado estampo. Com exceção das deformações no flange, submetido a um estado de tensão por

cisalhamento definido por componentes radial trativa e circunferencial compressiva, para o qual as previsões de qualquer modelo de localização M-K não se aplicariam, as comparações entre a CLC teórica e as previsões das deformações nas demais regiões da embalagem indicam a viabilidade da conformação com o ferramental e material propostos.

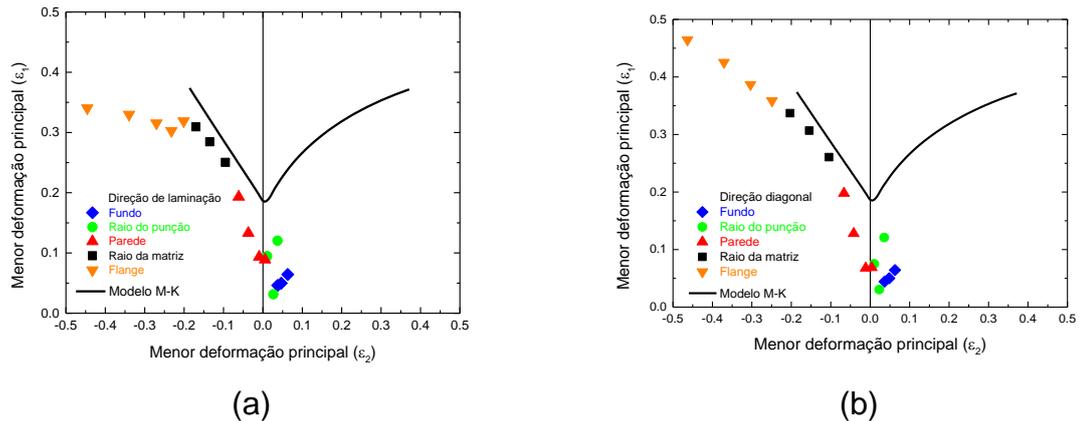


Figura 30 - Previsões das deformações limites em uma embalagem de duas peças de folha metálica: (a) direção de laminação e (b) a 45° em relação a direção de laminação.

5.5 Fabricação do Ferramental

O ferramental projetado foi completamente, usinado, temperado, montado e ajustado, conforme apresentado nas Figuras 35 e 36. O processo de têmpera e revenimento aplicou ao ferramental uma dureza de 52 HRC e o processo de acabamento aplicou ao ferramental acabamento Classe N1 (Ra de 0,025 μ m) para garantir o melhor escoamento possível da folha metálica dentro do ferramental.

O conjunto de ferramental superior composto pelo contrapunção e prensa-chapas superior foi montado e ajustado conforme representado na Figura 31. A base superior do ferramental completa composta pelos componentes de estampagens e as buchas de alinhamento são representados na Figura 32.

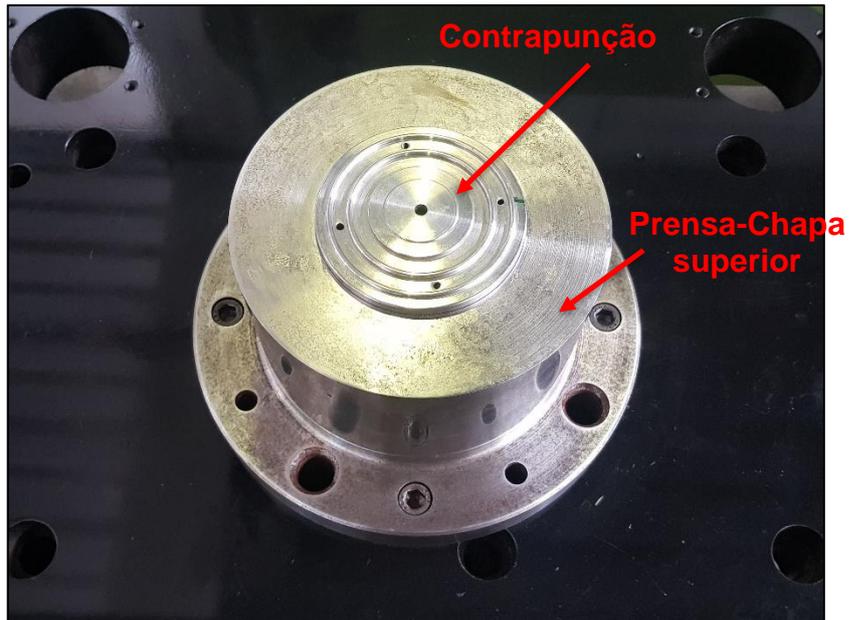


Figura 31 – Contrapunção e prensa-chapas superiores (CSN, 2019).



Figura 32 – Conjunto do ferramental superior completo.

O conjunto de ferramental inferior composto pelo punção e prensa-chapas inferior foi montado e ajustado conforme representado na Figura 33. A base inferior do ferramental completa composta pelos componentes de estampagens, barras de guia e alinhamento e os colares de esfera são representados na Figura 34.

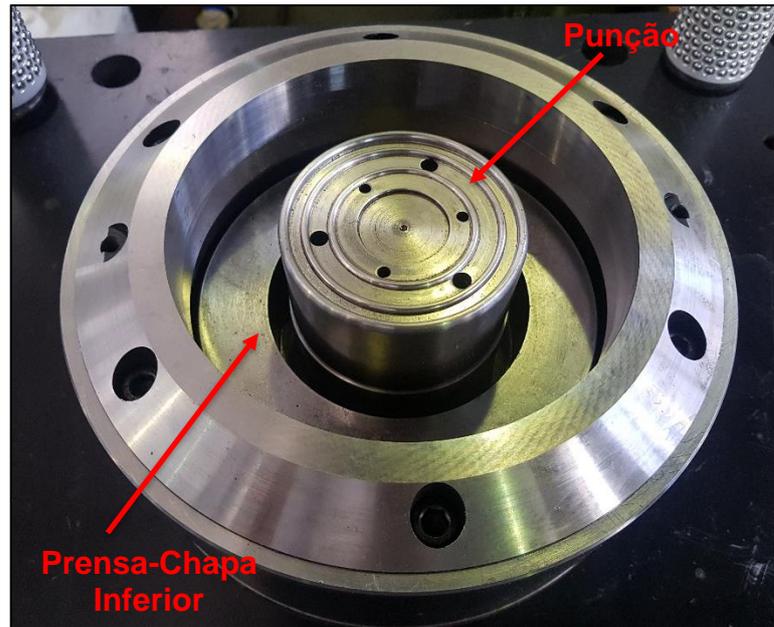


Figura 33 - Punção e prensa-chapas inferiores (CSN, 2019).

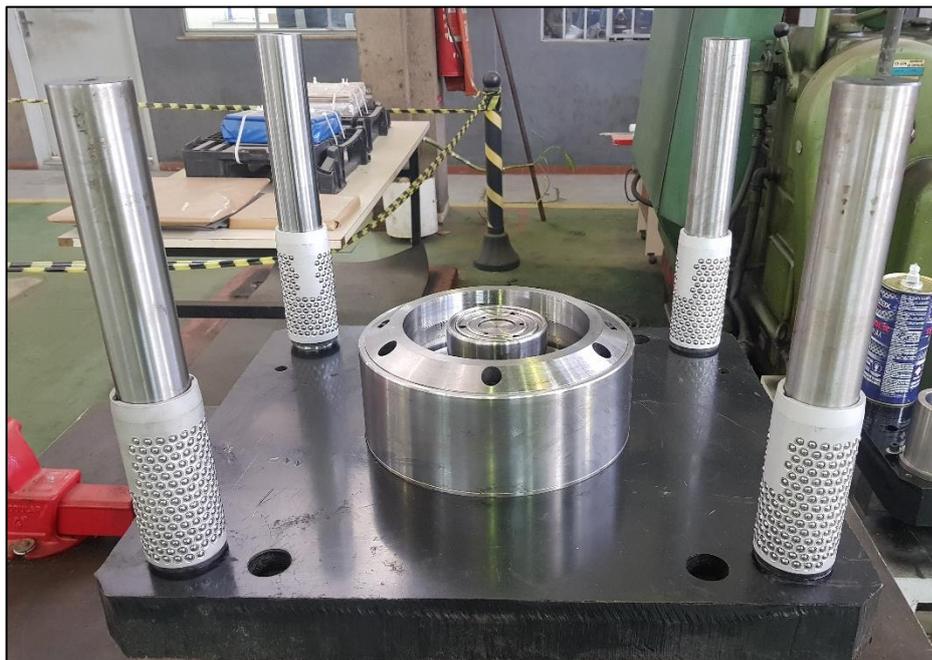


Figura 34 – Conjunto do ferramental inferior completo (CSN, 2019).

Com ambas as partes montadas e ajustadas, o ferramental foi ajustado e alinhado (base superior e base inferior) de acordo com suas respectivas posições, conforme pode apresentado na Figura 35.



Figura 35 – Pré-montagem do ferramental.

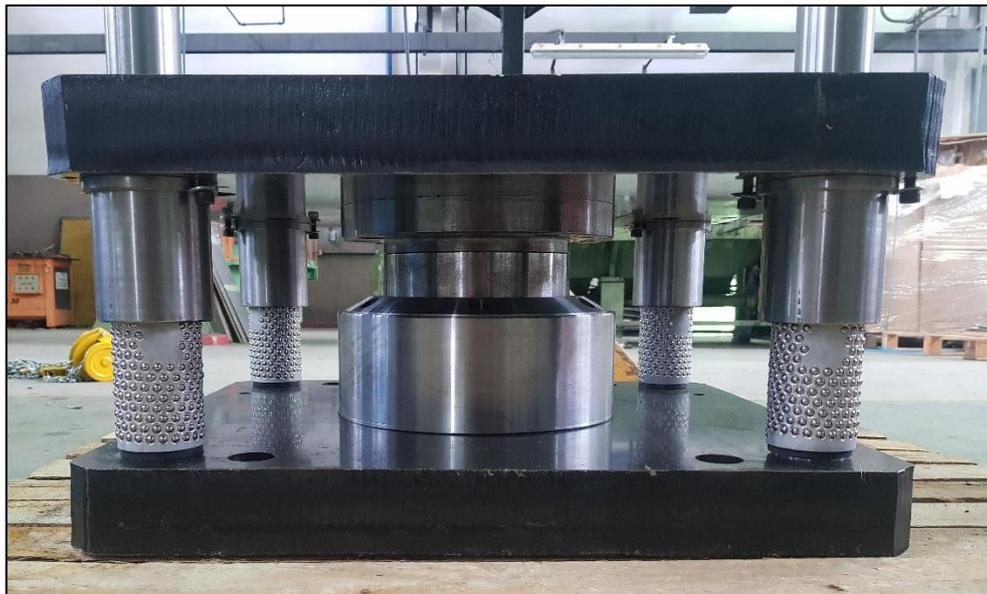


Figura 36 – Ferramental de estampagem montado.

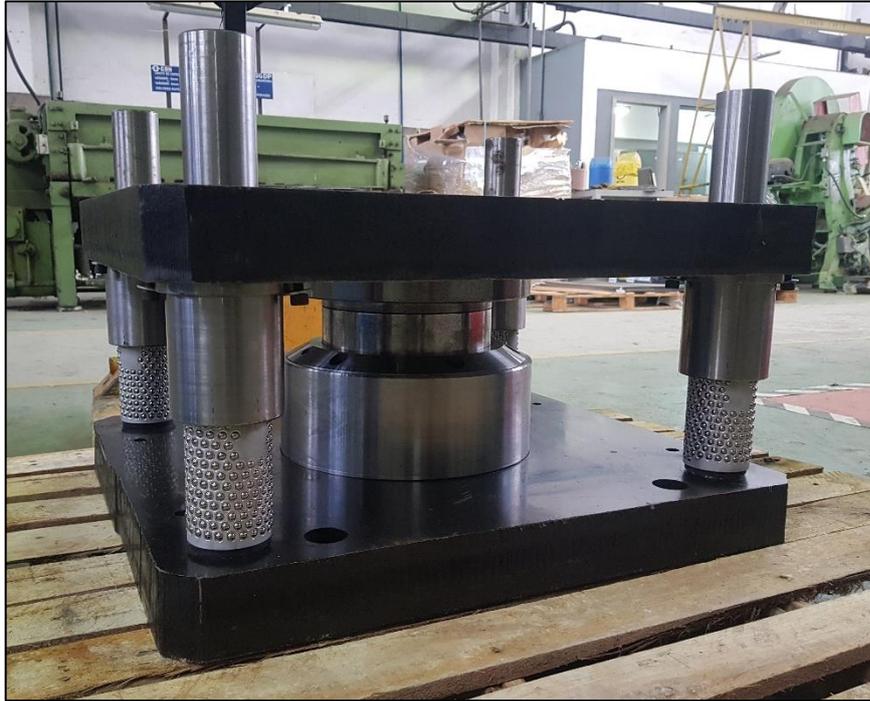


Figura 37 - Ferramental de estampagem montado em perspectiva.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia teórico-numérica para auxiliar o projeto do ferramental do processo de estampagem de uma embalagem cilíndrica de duas peças a partir de uma folha metálica com espessura nominal igual a 0,19 mm. A partir dos valores das propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração uniaxial realizados em três orientações angulares com relação a direção da laminação e medidas de rugosidade inicial da folha metálicas foram propostos dois tipos de modelos. No primeiro modelo, o processo de estampagem profunda foi simulado pelo método de elementos finitos considerando-se os efeitos de anisotropia plástica, encruamento e atrito ferramental-esboço para conformar a embalagem duas etapas, a saber, corpo e fundo. No segundo modelo, foram considerados os efeitos das propriedades mecânicas e rugosidade inicial da folha metálicas para obter as previsões teóricas das deformações limites da Curva Limite de Conformação (CLC). Com bases nas previsões referentes ao processo de estampagem profunda de uma embalagem metálica de duas peças, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- 1 - Os efeitos de anisotropia plástica planar devem ser considerados por meio de critérios de plasticidade que descrevam corretamente as variações angulares do limite e ou tensão de escoamento no plano da chapa, possibilitando a previsão não somente da formação de orelhas como também da amplitude;
- 2 - Como consequência, foi demonstrado que as deformações radiais no estampo ou de forma equivalente as deformações na espessura, índice de regiões afinamento, dependem da anisotropia plástica e, em geral, as folhas metálicas apresentam alguma variação de propriedades mecânicas que pode resultar em desperdício de material ou até mesmo sucateamento devido as orelhas, enrugamento e afinamento excessivo;

3 - O procedimento proposto para considerar a variação de espessura do flange por meio da separação dos prensa-chapas inferior e superior mostrou-se eficaz indicando uma forma de controle do processo real de conformação por estampagem profunda;

4 - As previsões das deformações limites determinadas por um modelo de localização podem ser muito úteis, sobretudo no caso de folhas metálicas para as quais a determinação experimental da CLC além de custosa é difícil de executar com sucesso;

5 – As previsões deformações principais das regiões representativas da embalagem indicaram a viabilidade do processo por meio do Diagrama Limite de Conformação.

6 – O ferramental de estampagem projetado e desenvolvido neste trabalho foi concebido respeitando-se os acabamentos e folgas projetados, cujo geometria visa contribuir com a comprovação e validação dos resultados numéricos obtidos através das simulações e modelos numéricos aplicados nesta dissertação. Com este ferramental, será possível realizar na prática a estampagem da embalagem metálica de 2 peças em estudo e obter amostras de uma série de protótipos onde possa-se realizar fisicamente medições e análises que comprovem experimentalmente os resultados das distribuições de deformações assim como geometria final do estampo.

7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Com as etapas realizadas de usinagem e tratamentos térmicos do ferramental, será possível avaliar comparar o perfil do orelhamento do protótipo com o perfil de orelhamento do modelo que apresentou picos a 45° e 135° e vales a 0° e 90° em relação ao sentido de laminação na região do flange. Além disso, será possível estampar um esboço de folha metálica com marcação de grade para realizar medições de deformações superficiais utilizando-se o sistema ASAME e obter resultados de deformações que possam para comparar com as previsões numéricas por elementos finitos. Neste contexto, as perspectivas de continuidade do trabalho são:

1- Instalar o ferramental desenvolvido em uma prensa de capacidade 60 toneladas e produzir lotes experimentais da embalagem metálica de 2 peças.

2- Retirar amostras dos lotes pilotos produzidos e realizar medições de coordenadas 3D através de um braço medidor (Scanner 3D) e comparar a geometria física com a geometria simulada a fim de observar se na prática ocorreu desvios dimensionais, retorno elástico, desvios de forma, entre outros.

3- Recortar as amostras ao longo do sentido transversal e longitudinal e realiza medição do perfil de espessura ao longo das direções 0° e 90° com micrômetro de ponta.

4- Estampar amostras de folhas metálicas gradeadas e realizar medições de deformações superficiais através do método ASAME e comparar os resultados físicos com as previsões por elementos finitos obtidas neste trabalho.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. ASTM E-112 – Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken: ASTM, 1974.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. ASTM E-3 – Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM, 2001.

ANJOS, B. B., Análise experimental e numérica do corte lateral de tiras de aço SAE 1006 laminado a quente., Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, 2014.

ANJOS, V.D.A. Características dos materiais utilizados na fabricação de embalagens metálicas para alimentos. In: INTERAÇÃO de embalagens metálicas com produtos alimentícios. Campinas: CETEA/ITAL, 1898, p.01-22 apud DANTAS, S.T., GATTI, J. A. B., SARON E. S. Embalagens metálicas e a sua interação com alimentos e bebidas. Campinas: CETEA/ITAL, 232p. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA EMBALAGEM DE AÇO – ABEAÇO. Embalagens de Aço. Disponível em: <<http://www.abeaco.org.br>>. Acesso em 17 de maio de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM – ABRE. Apresentação do setor. Disponível em: <http://www.abre.org.br/apres_setor_materia.php>. Acesso em 03 de janeiro de 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10531 – Embalagens metálicas – Latas – Terminologia. Rio de Janeiro, 1988 apud DANTAS, S. T., GATTI, J. A. B., SARON E. S. Embalagens metálicas e a sua interação com alimentos e bebidas. Campinas: CETEA/ITAL, 232p. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11276 – Latas – Classificação. Rio de Janeiro, 1990 apud DANTAS, S. T., GATTI, J. A. B., SARON E. S. Embalagens metálicas e a sua interação com alimentos e bebidas. Campinas: CETEA/ITAL, 232p., 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6665 – Folhas laminadas de aço-carbono revestidas eletroliticamente com estanho ou cromo ou não revestidas – Especificação. São Paulo: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6673 – Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração – Método de ensaio. São Paulo: ABNT, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7407 – Folhas-de-flandres – Determinação da dureza Rockwell – Método de ensaio. São Paulo: ABNT, 1982.

AZEVEDO, M. L. Aplicação da Simulação Numérica na Indústria de Componentes Estampados, 2013.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL – CSN. Aplicações. Disponível em: <<http://www.csn.com.br>>. Acesso em 17 de maio de 2017.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL – CSN. Embalagem. Disponível em: <<http://www.csn.com.br>>. Acesso em 17 de maio de 2017.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL – CSN. Folhas Metálicas, [S.l.:s.n.], 25p., 2003. Apostila. Disponível em: <<http://www.csn.com.br>>. Acesso em 17 de maio de 2017.

DIAS, F. T. Método dos Elementos Finitos, ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2010;

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – EURONORM. EN 10202 – Cold reduced tinmill products – Electrolytic tinplate and electrolytic chromium/chromium oxide coated steel. Bruxelas: EURONORM, 2001.

FERRON, G., MAKKOUK, R. AND MORREALE, J. A parametric description of orthotropic plasticity in metal sheets. Int. J. Plasticity. 1994; 10: 431-449.

FILHO, V. M., Embalagem Metálica: Avaliação de folhas-de-flandres na fabricação de latas expandidas a partir do processo STRETCHING, 2007.

FILHO, Antonio Piratelli. 2011. 3º Seminário de Metrologia - Rugosidade Superficial. UNB - Universidade de Brasília, Brasília : LM - Laboratório de Metrologia, 2011.

FREITAS, M.C.S., MOREIRA, L.P. AND VELLOSO, R. G. Experimental analysis and theoretical predictions of the limit strains of a hot-dip galvanized interstitial-free steel sheet, Materials Research, 2013; 16: 351-366, <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000015>.

HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Academy Society of London. 1948; A193: 281–297.

- MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L. The Mechanics of Sheet Metal Forming. Great Britain: Edward Arnold, a division of Hodder and Stoughton Limited, 1992.
- MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. The Mechanics of Sheet Metal Forming. Great Britain: Edward Arnold, a division of Hodder and Stoughton Limited, 2002.
- MEHTA, H. S.; KOBAYASHI, S. Finite Analysis and Experimental Investigation of Sheet Metal Stretching. University of California, 1971.
- MICHAELIS UOL, Dicionário. [S.l.: s.n.], 1998. 1 CD-ROM.
- MOREIRA, L.P., FERRON, G. Finite element implementation of an orthotropic plasticity model for sheet metal forming simulations. Latin American Journal of Solids and Structures. 2007; 4: 149-176.
- MOREIRA, L. P., FERRON, G. AND FERRAN, G. Experimental and numerical analysis of the cup drawing test for orthotropic metal sheets. Journal of Materials Processing Technology. 2000;108: 78-86, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00660-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00660-9).
- MOURA, R. A. Embalagem, unitização e containerização. São Paulo: IMAM, 1997.
- SANTOS, R. C., CASTRO V. M. F. Uma proposição sistêmica para o desenvolvimento de embalagens. In: RAE – REVISTA DE ADMINISTRAÇÃO DE EMPRESAS. São Paulo: FGV/EAESP, v.38, nº2, p.26-35, abr-jun.1998.
- SLATER, B., MARTINS B. T., PHILIPPI S. T. Rótulos e embalagens na indústria de alimentos. In: BRASIL ALIMENTOS, São Paulo: USP, nº1, p.42-45, mar.2000.
- STRETCH MACHINE. New Technology. Disponível em: <http://www.canstretch.com/technology.htm>. Acesso em 14 de março de 2005.
- STRETCHING the boundaries. Cantech International, Gravesend, v.10, n.2, p.18- 20, julho- agosto 2003. Bimestral.
- THE CHOICE of steel packaging for olive oil. APEAL News, Brussels, p.04, n. 23, novembro 2004. Trimestral.