

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE MIRANDA DREHER

AVALIAÇÃO DA ESTAMPAGEM PROFUNDA DE CUBAS EM AÇO INOX AISI 304

CAXIAS DO SUL

2016

FELIPE MIRANDA DREHER

AVALIAÇÃO DA ESTAMPAGEM PROFUNDA DE CUBAS EM AÇO INOX AISI 304

Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio 2 apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação

Supervisor: Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2016

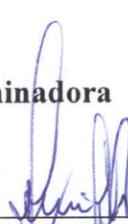
FELIPE MIRANDA DREHER

AVALIAÇÃO DA ESTAMPAGEM PROFUNDA DE CUBAS EM AÇO INOX AISI 304

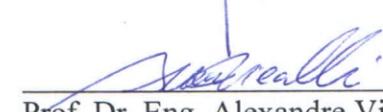
Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio 2 apresentado à Universidade de Caxias do Sul como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação

Aprovado(a) em 01/07 2016.

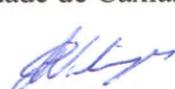
Banca Examinadora



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



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



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

Dedico este trabalho aos meus pais,
Augusto e Margareth.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo amor, apoio e incentivo ao longo de toda minha vida.

Ao Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels, pela amizade, paciência e orientações ao longo do último ano, que tornaram este trabalho possível.

Ao Sr. Wiliam Viganó, pelo grande apoio na realização deste trabalho dentro da empresa G.Paniz.

Ao Sr. Sérgio Isoton da empresa Metalcubas, pela ajuda na realização dos ensaios de estampagem.

A todos os familiares, amigos e colegas que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Com o objetivo de aprimorar o processo de estampagem de cubas de aço inoxidável austenítico AISI 304, minimizando o surgimento de trincas durante a sua utilização na amassadeira espiral, realizou-se uma revisão bibliográfica do material e do processo de estampagem profunda. Avaliou-se o processo através de ensaios visando determinar as deformações máximas na operação de estampagem atual e a matéria-prima (chapa laminada a frio de 2,00 mm de espessura) através do índice de anisotropia do material, coeficiente de encruamento, metalografias e análises de dureza. Além das propriedades mecânicas do material, foram observados os efeitos da temperatura no processo de conformação, como o fenômeno da transformação martensítica induzida por deformação. Os resultados encontrados nos ensaios de tração ficaram dentro do indicado pela literatura. Através de análises metalográficas em conjunto com as medições de dureza foi possível encontrar indícios da presença de martensita induzida por deformação. Nas amostras deformadas à temperatura próxima a 0°C foi perceptível o aumento da dureza, em comparação com a amostra ensaiada à temperatura ambiente. Na avaliação das deformações foi possível identificar que os pontos onde ocorrem as maiores deformações, e conseqüentemente maior transformação martensítica induzida por deformação, são as mesmas regiões onde ocorre o surgimento das trincas. A estampagem a morno, em temperaturas próximas a 100°C pode ser considerada uma alternativa ao processo produtivo atualmente empregado, inibindo a transformação martensítica e o conseqüente *Delayed Cracking*.

Palavras-chave: Estampagem profunda. Aço inoxidável AISI 304. Transformação martensítica induzida por deformação.

ABSTRACT

With the aim of improving the process of forming AISI 304 austenitic stainless steel tubs, minimizing the appearing of cracks during use in the spiral mixer, was conducted a literature review of the material and the deep drawing process. The process was evaluated through testing to determine the maximum strain in the current deep drawing operation and the raw material (cold rolled 2.00 mm sheet) through the anisotropy index of the material, hardening coefficient, metallography and hardness analysis. In addition to the mechanical properties were observed temperature effects on the shaping process, as the strain induced martensitic transformation. The results in tensile tests were according to the stated in the literature. Through metallographic analysis in conjunction with the hardness measurements were found evidences the presence strain-induced martensite. In the samples deformed at 0° C, there was a noticeable increase in hardness, in comparison with the sample tested at room temperature. In the deformation evaluation it was possible to identify that the points where larger deformations occurs, and consequently greater strain induced martensitic transformation, are the same areas where the appearing of cracks occurs. The warm stamping at temperatures around 100° C can be considered as an alternative to the currently employed production process, inhibiting martensite and consequent Delayed Cracking.

Keywords: Deep drawing. Stainless steel AISI 304. Strain induced martensitic transformation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de estampagem máxima para diversos materiais.....	19
Tabela 2 - Fator multiplicativo em função da espessura da chapa	21
Tabela 3 - Raio de canto do punção em função da espessura.....	22
Tabela 4 – Composição química em % do aço inoxidável AISI 304	33
Tabela 5 - Dimensões e relação de estampagem cubas G.Paniz	42
Tabela 6 - Corpos de prova para ensaios de tração	43
Tabela 7 - Propriedades Mecânicas	50
Tabela 8 - Anisotropia	50
Tabela 9 - Deformação verdadeira cubas	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amassadeira Espiral G.Paniz.....	14
Figura 2 - Ferramenta de estampagem	18
Figura 3 - Cálculo para determinar geratriz.....	20
Figura 4 - Tensões na estampagem profunda	24
Figura 5 - Princípio de determinação das deformações.....	26
Figura 6 – Deformações em função das solicitações durante a estampagem	27
Figura 7- Defeitos peças estampadas.....	29
Figura 8 – Relação temperatura com tensão e alongamento	30
Figura 9 – Aços inoxidáveis austeníticos série 300.....	32
Figura 10 – Transformação martensítica	34
Figura 11 – Influência EDE na formação de martensita induzida.....	35
Figura 12 – Transformação martensítica alfa-linha em função da deformação verdadeira	36
Figura 13 – Fração volumétrica martensita em função da temperatura na deformação	37
Figura 14 – Influência da temperatura na relação de estampagem máxima.....	37
Figura 15 – Delayed cracking em diferentes relações de estampagem	38
Figura 16 – Variação da martensita induzida por deformação na estampagem profunda.....	39
Figura 17 - Esquema matriz e punção com controle de temperatura	39
Figura 18 - Transformação martensítica em diferentes temperaturas	40
Figura 19 - Gráfico dureza em função da fração volumétrica de martensita	41
Figura 20 - Cuba amassadeira espiral AE-60L.....	42
Figura 21 – Equipamento EMIC DL20000	43
Figura 22 - Dimensões corpo de prova.....	44
Figura 23 - Bloco de alumínio.....	44
Figura 24 - Condicionamento corpos de prova	45
Figura 25 - Ensaio a baixa temperatura	46
Figura 26 - Geratriz com grades aplicadas na superfície.....	47
Figura 27 - Posições medições deformações	47
Figura 28 - Ferramental utilizado atualmente	48
Figura 29 - Fluxograma com a metodologia utilizada.....	49
Figura 30 - Análise metalográfica amostra sem deformação	51
Figura 31 - Análise metalográfica amostra temperatura ambiente.....	52
Figura 32 - Análise metalográfica amostra temperatura reduzida.....	52

Figura 33 - Análise metalográfica região trinca	53
Figura 34 - Análise metalográfica região abaixo da trinca.....	53
Figura 35 - Análise metalográfica com microdureza amostra sem deformação	54
Figura 36 - Análise metalográfica com micro dureza amostra deformada.....	54
Figura 37 - Gráfico dureza.....	55
Figura 38 – Gráfico deformações $\varphi m1$ e $\varphi m2$	56
Figura 39 - Gráfico deformação verdadeira equivalente cubas.....	57
Figura 40 - Canal alojamento resistência	58
Figura 41 – Variação da temperatura ao longo do processo de estampagem.....	59
Figura 42 - Esquema refrigeração conjunto punção.....	59
Figura 43 - Vista explodida da ferramenta	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI – American Iron and Steel Institute
ASM – American Society for Metals
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAD – Computer Aided Design
CCC – Cúbica Corpo Centrado
CFC – Cúbica Face Centrada
CLC – Curva Limite de Conformação
EDE – Energia de Defeito de Empilhamento
HC – Hexagonal Compacta
ISO – International Organization for Standardization
LAMEC – Laboratório de Ensaio Mecânicos
LAMET – Laboratório de Metalografia
NBR – Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

β – Relação de estampagem

D – Diâmetro da geratriz

d – Diâmetro do punção

β_{adm} – Relação de estampagem admissível

s – Espessura

h – Altura

j_r – Folga entre punção e matriz

$s_{m\acute{a}x}$ – Espessura máxima

k – Constante para folga entre punção e matriz

r_{cm} – Raio de canto matriz

r_{cc} – Raio de canto punção

n – Coeficiente de encruamento

C – Constante

φ – Deformação verdadeira

r – Índice de anisotropia

Δr – Anisotropia planar

r_m – Anisotropia média ou normal

a – Maior dimensão da elipse

b – Menor dimensão da elipse

F – Força de estampagem

kfm – Tensão de escoamento média

P_{ps} – Pressão do prensa-chapa

R_m – Limite de resistência

α' – Martensita alfa-linha

ε – Martensita épsilon

$M_s(\alpha')$ – Temperatura início transformação martensítica

$M_d(\alpha')$ – Temperatura transformação martensítica em função da deformação

σ_e – Tensão de escoamento

A – Alongamento

E – Módulo de elasticidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA E AMBIENTE DE ESTÁGIO	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA	17
2.2	PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA	17
2.2.1	Relação de estampagem	19
2.2.2	Determinação da geratriz	20
2.2.3	Folga entre matriz e punção	20
2.2.4	Raio de canto da matriz e do punção	21
2.2.5	Coefficiente de encruamento	22
2.2.6	Distribuições de tensões	23
2.2.7	Anisotropia do material	24
2.2.8	Curva limite de conformação	26
2.2.9	Força de estampagem	27
2.2.10	Prensa-chapas	28
2.2.11	Lubrificação	28
2.2.12	Defeitos em peça estampadas	29
2.2.13	Influência da temperatura no processo de conformação	29
2.3	AÇOS INOXIDÁVEIS	31
2.3.1	Aço inoxidável AISI 304	33
2.3.2	Transformação martensítica induzida por deformação	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
3.2	METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.2.1	Corpos de prova	43
3.2.2	Ensaio a baixa temperatura	44
3.2.3	Análises metalográficas	46

3.2.4	Deformações nas peças estampadas	47
3.2.5	Ensaio de dureza	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO	50
4.1.1	Propriedades Mecânicas	50
4.1.2	Anisotropia	50
4.2	ANÁLISES METALOGRÁFICAS	51
4.3	DUREZA.....	55
4.4	DEFORMAÇÕES	56
4.5	PROPOSTA DE ALTERAÇÃO NA FERRAMENTA	58
5	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – DESENHO CORPO ALUMÍNIO	65
	APÊNDICE B – DESENHO FERRAMENTA ATUAL	66
	APÊNDICE C – TABELAS MEDIÇÕES DEFORMAÇÕES	67
	APÊNDICE D – DESENHO PROPOSTA ALTERAÇÃO FERRAMENTA	68
	ANEXO A – DESENHO CUBA AE-60L	69
	ANEXO B – CERTIFICADO CHAPA INOX 304 ESPESSURA 2,00 mm	70
	ANEXO C – RELATÓRIO ENSAIO DE TRAÇÃO	71

1 INTRODUÇÃO

O mercado de máquinas para panificação apresenta um grande número de fabricantes e modelos de equipamentos para as mais diversas funções, buscando tornar o trabalho nas padarias cada vez mais eficiente, seguro e higiênico. Tais equipamentos são encontrados em diversos segmentos de alimentação, desde pequenas padarias até grandes redes de mercados, fazendo um papel fundamental na produção de alimentos no Brasil.

Este estudo abrange o processo de estampagem profunda de cubas em aço inox AISI 304, utilizadas em amassadeiras espirais, fabricadas pela empresa G.Paniz Indústria de Equipamentos Alimentação LTDA, sediada em Caxias do Sul – RS. Abrange a área de processos de fabricação da Engenharia Mecânica, na subárea de processos de conformação mecânica.

As amassadeiras espirais (figura 1) são equipamentos fundamentais nas padarias de todo o país, utilizando o movimento giratório de seu batedor em formato de espiral para homogeneizar a massa. O batedor prensa a massa nas laterais e fundos das cubas, proporcionando um processo rápido e eficaz de mistura. Tal processo permite que sejam preparados diversos tipos de massas, desde pão de trigo, a pão de queijo ou massas integrais.

Figura 1 - Amassadeira Espiral G.Paniz



Fonte: Adaptado de G.Paniz (2015).

A versatilidade deste sistema aliada à alta produtividade e robustez dos equipamentos G.Paniz, faz com que as amassadeiras espirais dessa marca sejam reconhecidas como referência no ramo da indústria alimentícia, tornando fundamental que sua construção garanta o padrão de qualidade que uma marca líder de mercado deve manter. Para tanto é necessário

aperfeiçoar os processos de fabricação do equipamento e de todas as suas partes constituintes, dando especial atenção a qualquer falha ou desvio de processo que possa causar insatisfação do cliente.

Neste contexto, foi apurado que as cubas das amassadeiras espirais apresentam um alto índice de trincas em campo, semanas ou meses após o início de seu uso no equipamento, tornando necessário um estudo profundo, visando determinar o motivo e o melhor método para evitar que este problema persista.

As cubas utilizadas nas amassadeiras espirais são produzidas a partir de chapas de aço inox AISI 304 por um processo de estampagem. As medidas das cubas variam de 280 mm de diâmetro por 180 mm de altura até 708 mm de diâmetro por 362 mm de altura, dependendo do modelo do equipamento, com espessuras de chapa de 0,8 a 2,5 mm. O modelo mais crítico para o estudo é a cuba da amassadeira espiral AE-60L, com 545 mm de diâmetro por 356 mm de altura e uma espessura de chapa de 2,0 mm.

Através da análise das causas de ruptura neste componente crítico, será possível aplicar uma solução para este problema no restante da linha de produtos.

1.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E AMBIENTE DE ESTÁGIO

A empresa G.Paniz iniciou suas atividades no começo da década de 80, fundada pelo Sr. Gilmar Paniz, em uma pequena oficina de 36 m² na cidade de Caxias do Sul. A partir de 1982 passou a fabricar máquinas elétricas para produção de macarrão, logo após dando início à primeira família de máquinas para essa finalidade.

Em 1999 inaugurou sua nova unidade fabril no bairro Vila Maestra, na cidade de Caxias do Sul, em um terreno de 50 mil m², hoje com uma área total construída de 12 mil m².

Seu negócio está firmemente consolidado no segmento de máquinas para alimentação, visando à produção de equipamentos que tornam mais produtivos, seguros e higiênico os meios de produção de alimentos, possibilitando um bom retorno para os usuários de seus equipamentos. Entre os equipamentos fabricados estão amassadeiras, cilindros sovadores, modeladoras de pães, fornos, batedeiras, serras-fita para açougue, amaciadores de bife e moedores de carne.

O Grupo G.Paniz é constituído pelas empresas G.Paniz, Gastromaq, Granomaq e Metalcubas, essa última responsável pelo processo de estampagem da maior parte dos modelos de cubas utilizadas nas amassadeiras espirais G.Paniz e Gastromaq. Atualmente o grupo conta com aproximadamente 250 colaboradores.

A visão de futuro e os conhecimentos adquiridos levaram as empresas do Grupo G.Paniz a tornarem-se referência no segmento de fabricação de máquinas para padarias, confeitarias, açougues, restaurantes, supermercados, no Brasil e exterior, exportando para países como Chile, Venezuela, México, Paraguai e Angola.

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à grande concorrência entre empresas do meio de equipamentos para a panificação, assim como a constante busca da empresa G.Paniz por maior qualidade em seus produtos e a satisfação de seus clientes, verificou-se a necessidade de buscar soluções para os problemas de assistência técnica enfrentados atualmente.

Este trabalho justificou-se a partir da constatação de que a vida útil de grande parte das cubas produzidas não atende ao período de garantia de seis meses concedido pela empresa, e conseqüentemente às expectativas do consumidor de um produto reconhecido no mercado por sua robustez e qualidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo aprimorar o processo de estampagem profunda de cubas, buscando identificar a principal causa de assistência técnica deste componente, propondo uma solução para o mesmo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) compreender melhor o processo de estampagem profunda do aço inoxidável AISI 304 por meio de revisão bibliográfica;
- b) determinar propriedades mecânicas do material (anisotropia, tensão de escoamento, coeficiente de encruamento) através de ensaios de tração, alterações na microestrutura (análises metalográficas) e dureza;
- c) estudo da influência da temperatura no processo de estampagem dos aços inoxidáveis austeníticos;
- d) propor possíveis melhorias no ferramental utilizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão do status da literatura referente à estampagem profunda, abordando os conceitos dos processos de conformação mecânica, assim como as propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos, mais especificamente o aço inox AISI 304.

2.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

No processo de produção de peças metálicas, a conformação mecânica apresenta inúmeros meios pelos quais o produto assume sua forma final, podendo este processo ser classificado em função dos tipos de esforços aplicados. Neste sentido, os esforços podem ser de compressão direta, compressão indireta, tração, dobramento e cisalhamento (CHIAVERINI, 1986).

Nos processos de compressão direta pode-se enquadrar o forjamento e a laminação de chapas. Já na compressão indireta, a trefilação de fios e tubos, os processos de extrusão e a estampagem profunda. Estes processos apesar de possuírem forças de tração ou compressão, possuem elevadas forças de compressão indiretas nas regiões de contato entre a peça e a matriz. Por sua vez, os processos de dobramento envolvem a aplicação de momentos de dobramento e os de cisalhamento, esforços de mesmo nome, buscando a ruptura do material (CHIAVERINI, 1986).

2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

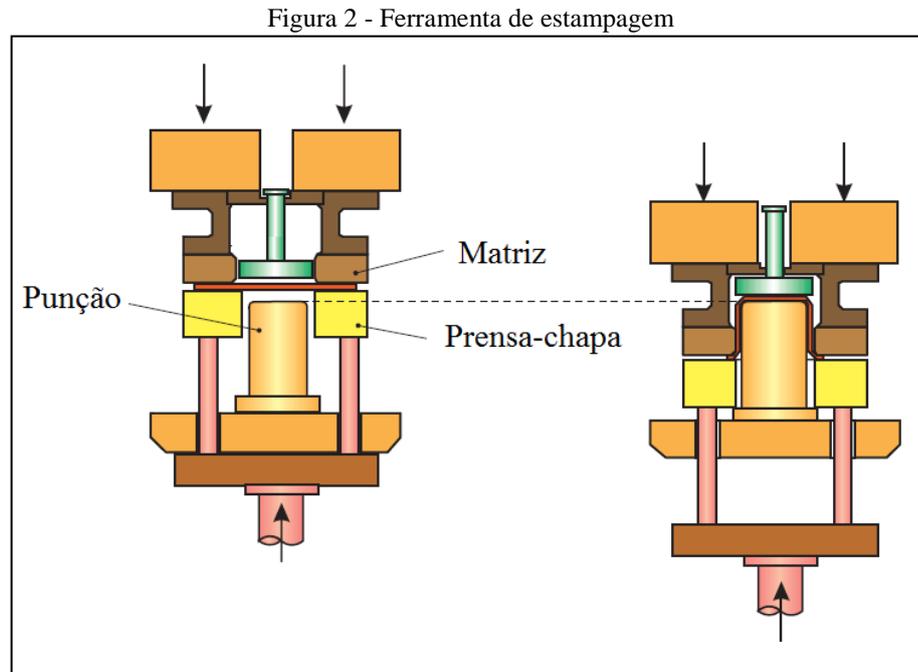
Denomina-se estampagem profunda ou embutimento profundo o processo no qual uma chapa metálica plana denominada geratriz, assume um formato de copo oco (SCHAEFFER, 2004).

Nesse processo, um material metálico plano é forçado a escoar de forma controlada através da ação de um prensa-chapa para o interior de uma matriz, pela ação de um punção ou cunho, podendo originar peças das mais diversas formas e dimensões (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Entre as principais vantagens desse processo de fabricação estão o baixo custo com matéria-prima e geração de superfícies que não necessitam de usinagem, assim como uma elevada velocidade de processo. Mas para tanto, são necessários cuidados com os

equipamentos utilizados, assim como o material da peça, o ferramental utilizado e os parâmetros de processo (SCHAEFFER, 2004).

Abaixo segue a figura 2, a qual ilustra as três principais partes de uma ferramenta de estampagem.



Fonte: Adaptado de Altan (1998).

A estampagem é um processo de conformação que envolve uma contínua interação entre a ferramenta, o material a ser conformado e o equipamento utilizado no processo, conforme itens abaixo (SCHAEFFER, 2004).

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

2.2.1 Relação de estampagem

Segundo Schaeffer (2004), o processo de estampagem de um corpo só pode ser realizado dentro de limites pré-estabelecidos entre a dimensão da geratriz (D) e o diâmetro do punção (d). Tal razão é denominada Relação de Estampagem (β), podendo ser calculada através da equação (1).

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (1)$$

Como ponto de partida para o processo, deve-se calcular a Relação de Estampagem Admissível (β_{adm}) conforme equação (2), onde s é a espessura da chapa e d é o diâmetro do punção.

$$\beta_{adm} = 2,15 - \frac{d}{1000 \times s} \quad (2)$$

Na impossibilidade de realizar o processo em uma única etapa, devido à relação de estampagem (β) ultrapassar o β_{adm} , deve-se utilizar mais de uma etapa, podendo adotar valores de $\beta = 1,3$ para o segundo estágio e $\beta = 1,2$ para um terceiro estágio (SCHAEFFER, 2004).

Para determinar o β_{adm} , também é possível utilizar os valores especificados na tabela 1, para o primeiro e os estágios posteriores (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Tabela 1 - Relação de estampagem máxima para diversos materiais

Material	β_{adm} (estágio 1)	β_{adm} (estágios posteriores)
Aço para estampagem	1,54 - 1,67	1,25
Aço para estampagem profunda	1,67 - 1,82	1,25 - 1,33
Aço para carroceria automóvel	1,72 - 1,92	1,25 - 1,33
Aço inoxidável	1,82 - 2,0	1,18 - 1,25
Folha de flandres	1,82 - 2,0	1,25 - 1,33
Cobre	1,67 - 1,82	1,18
Latão	1,82 - 2,0	1,25 - 1,33
Zinco	1,43 - 1,54	1,11 - 1,18
Alumínio	1,67 - 1,89	1,25
Duralumínio	1,67 - 1,82	1,11
Níquel	1,54 - 1,68	1,25

Fonte: Adaptado de Martins e Rodrigues (2005).

2.2.2 Determinação da geratriz

Segundo Brito (2005), uma das maiores dificuldades no processo de estampagem é o correto dimensionamento da geratriz. Para o seu cálculo são considerados que a superfície da geratriz seja igual a da peça pronta, conforme equações abaixo (3, 4 e 5), utilizadas para peças cilíndricas como as ilustradas na figura 3.

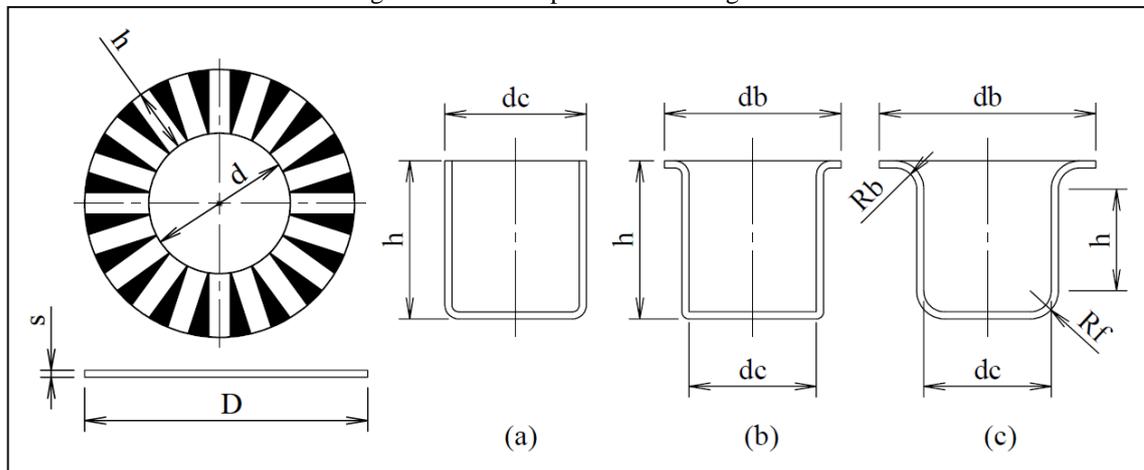
$$D_a = \sqrt{d_c^2 + 4 \times d_c \times h} \quad (3)$$

$$D_b = \sqrt{d_b^2 + 4 \times d_c \times h} \quad (4)$$

$$D_c = \sqrt{d_b^2 + 4 \times d_c \times h + 2,28 \times d_c \times (R_b + R_f) - 0,56 \times (R_b^2 - R_f^2)} \quad (5)$$

Onde D_a , D_b , D_c representam o diâmetro da geratriz, d_b é o diâmetro da borda, d_c o diâmetro do copo, h a altura, R_f o raio no fundo e R_b o raio na borda.

Figura 3 - Cálculo para determinar geratriz



Fonte: Adaptado de Rugani e Mesquita (1997) e Brito (2005).

No entanto, é preciso observar que os desenvolvimentos calculados apresentam pequenas diferenças em relação à prática devido ao estiramento sofrido pelo material, tornando muitas vezes necessária a realização de testes práticos (BRITO, 2005).

2.2.3 Folga entre matriz e punção

A folga entre os elementos responsáveis pelo processo de estampagem é de fundamental importância para o bom andamento do processo. Para a estampagem de peças

cilíndricas pode-se adotar a equação (6) para cálculo da folga (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

$$j_r = s_{m\acute{a}x} + k \times \sqrt{10 \times s} \quad (6)$$

Onde j_r é a folga, $s_{m\acute{a}x}$ a espessura máxima do material, s a espessura nominal e k uma constante com valor de 0,07 para aços, 0,04 para materiais não-ferrosos e 0,02 para alumínio. Ou pode-se utilizar a tabela 2, realizando a multiplicação da espessura da chapa com os fatores determinados para cada fase do processo.

Tabela 2 - Fator multiplicativo em função da espessura da chapa

Espessura da chapa [mm]	Fator multiplicativo em função da espessura da chapa		
	1ª fase	2ª fase	Acabamento
Até 0,4	1,07 a 1,09	1,08 a 1,10	1,04 a 1,05
0,4 a 1,3	1,08 a 1,10	1,09 a 1,12	1,05 a 1,06
1,3 a 3,2	1,10 a 1,12	1,12 a 1,14	1,07 a 1,09
> 3,2	1,12 a 1,14	1,14 a 1,20	1,08 a 1,10

Fonte: Adaptado de Martins e Rodrigues (2005).

Caso a folga for pequena, a chapa pode ser trefilada entre o punção e a matriz, aumentando os esforços e podendo causar ruptura do material e desgaste dos elementos. Por outro lado, uma folga excessiva pode promover o enrugamento da chapa na zona da matriz em que o prensa-chapa não atua (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

2.2.4 Raio de canto da matriz e do punção

O raio de canto da matriz apresenta importante influência no processo de estampagem. Quanto menor for o raio (r_{cm}), haverá um aumento no limite de estampagem, maior redução na espessura do copo, aumento no desgaste da ferramenta e na força de estampagem (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Pode ser definido conforme a espessura da chapa através da equação (7) para a primeira estampagem e da equação (8) para etapas seguintes (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

$$r_{cm} = (6 \text{ a } 10) \times s \quad (7)$$

$$r_{cm} = (6 \text{ a } 8) \times s \quad (8)$$

Ou através de equações empíricas como (9):

$$r_{cm} = k_m \times \sqrt{(D - d_i) \times s} \quad (9)$$

Onde D é o diâmetro da geratriz, d_i o diâmetro interior da taça, s a espessura da chapa e k_m uma constante com valor 0,8 para aços e 0,9 para alumínio.

No dimensionamento do raio de canto do punção, devem ser considerados o alongamento, e a taxa de encruamento que o material pode suportar. Quanto menores forem estes, menor deverá ser o raio do punção (r_{cc}) (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Na primeira fase da estampagem o raio do punção deve ser inferior ao da matriz, podendo ser determinado através da equação (10) para $d_i = 6$ a 25 mm, da equação (11) para $d_i = 25$ a 650 mm e da equação (12) para $d_i > 650$ mm.

$$r_{cc} = (3 \text{ a } 4) \times s \quad (10)$$

$$r_{cc} = (4 \text{ a } 5) \times s \quad (11)$$

$$r_{cc} = (5 \text{ a } 7) \times s \quad (12)$$

Ou pode-se definir o raio de canto do punção em função da espessura da geratriz conforme tabela 3.

Tabela 3 - Raio de canto do punção em função da espessura

Espessura da chapa [mm]	Raio mínimo [mm]	Raio máximo [mm]
0,38 a 0,46	4,0	6,4
0,53 a 0,69	4,7	7,1
0,79 a 1,17	4,7	7,9
1,2 a 1,6	6,4	9,5
2,0 a 2,4	7,9	11,1
2,8 a 3,2	8,7	11,9

Fonte: Adaptado de Martins e Rodrigues (2005).

2.2.5 Coeficiente de encruamento

O coeficiente de encruamento (n) é um indicador de endurecimento a frio do material, quanto maior for seu valor, maior será a encruabilidade do material. Na deformação

a frio a curva de escoamento pode ser determinada através da equação (13) (SCHAEFFER, 2004).

$$kf = C \times \varphi^n \quad (13)$$

Onde kf é a tensão de escoamento, C uma constante do material (para $\varphi = 1$), n o coeficiente de encruamento e φ a deformação verdadeira.

O coeficiente de encruamento pode ser obtido quando se transfere os dados da tensão de escoamento e da deformação para um diagrama em escala logarítmica. Normalmente, obtêm-se uma reta, sendo que o valor de n é dado pela inclinação desta reta (SCHAEFFER, 2004).

Apresenta influência direta na deformação, pois quando um corpo é sujeitado a uma tensão, ocorre uma diminuição na secção de uma região localizada. No entanto, o encruamento dessa secção aumenta o seu limite de resistência, sendo esse aumento proporcional ao seu coeficiente de encruamento. (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Quando o aumento de resistência mecânica gerado pelo encruamento superar a perda de resistência devido à redução da área da secção, a deformação plástica continuará em outra região, se distribuindo por todo o corpo. O coeficiente de encruamento médio pode ser definido conforme equação (14) (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

$$n = \frac{1}{4} \times (n_{0^\circ} + 2 \times n_{45^\circ} + n_{90^\circ}) \quad (14)$$

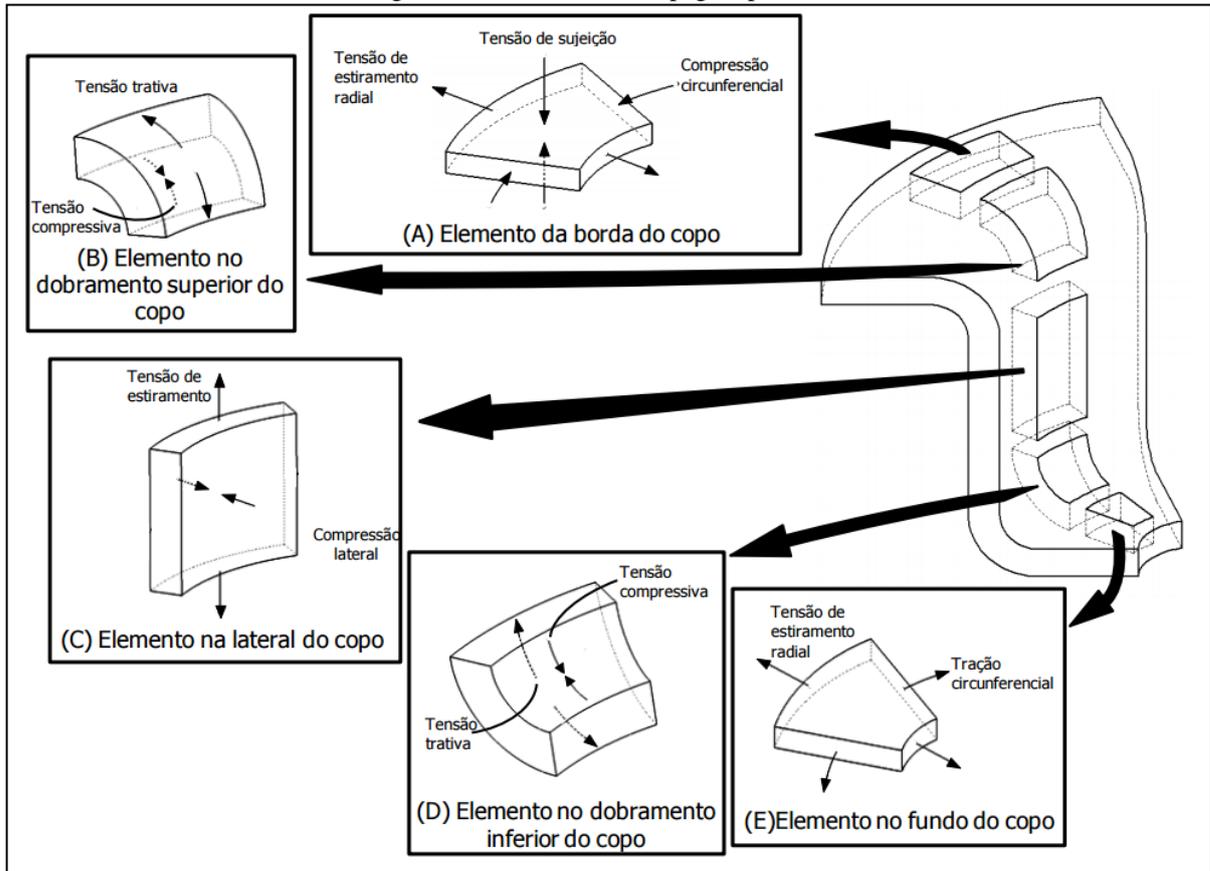
Onde n_{0° é o coeficiente de encruamento na direção da laminação, n_{45° o coeficiente de encruamento na direção a 45° da laminação e n_{90° o coeficiente de encruamento na direção normal à de laminação.

2.2.6 Distribuições de tensões

No processo de estampagem profunda, a geratriz é submetida a diversos estados de tensões, conforme figura 4.

Na região de atuação do prensa chapas, ocorrem tensões de tração no sentido radial e compressão no sentido circunferencial e ainda na espessura, devido à ação do próprio prensa chapa. Já a lateral do corpo sofre tensões de tração no sentido radial e compressão no sentido circunferencial e o fundo do corpo é submetido a tensões de tração (SCHAEFFER, 2004).

Figura 4 - Tensões na estampagem profunda



Fonte: Adaptado de Doege e Behrens (2007).

2.2.7 Anisotropia do material

No processo de laminação das chapas, a microestrutura é deformada, gerando grãos mais alongados na direção de laminação. Segundo Schaeffer (2004), essa diferença na forma como a microestrutura se apresenta pode ser quantificada através do índice de anisotropia (r) conforme equação (15), onde φ_b é a deformação na direção da largura e φ_s a deformação na direção da espessura.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (15)$$

Devido à possibilidade do erro na medição da espessura ser grande, no ensaio de chapas metálicas é recomendado o uso da lei da constância de volume, substituindo a deformação na direção da espessura (φ_s), por $(\varphi_b + \varphi_l)$, onde φ_l é a deformação no comprimento, conforme equação (16).

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad (16)$$

Materiais com índice de anisotropia igual a 1 são denominados isotrópicos, possuindo propriedades mecânicas iguais em todas as direções. Já materiais com índice de anisotropia diferente de 1 são chamados de anisotrópicos.

Entre os materiais anisotrópicos, os que apresentam índice de anisotropia menor que 1 não possuem boa estampabilidade, pois quando solicitados mecanicamente apresentam uma maior deformação na espessura que na largura, ocorrendo falha na direção da espessura do material (SCHAEFFER, 2004).

Diversos fatores podem influenciar no índice de anisotropia, como temperatura da laminação, temperatura do bobinamento, grau de deformação, teor de alumínio e oxigênio, tamanho do grão, taxa de aquecimento e temperatura de recozimento.

O comportamento anisotrópico de um material pode ser quantificado através do coeficiente de anisotropia normal, como também pelo coeficiente de anisotropia planar, onde é definido o grau de anisotropia no plano da chapa conforme equação (17).

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2 \times r_{45^\circ}}{2} \quad (17)$$

Onde r_{0° é o coeficiente de anisotropia na direção da laminação, r_{45° o coeficiente de anisotropia na direção a 45° da laminação e r_{90° o coeficiente de anisotropia na direção normal à de laminação.

Como consequência da anisotropia planar, o topo do copo não se mantém uniforme, apresentando regiões mais altas e mais baixas, podendo ser denominadas respectivamente de orelhas e vales. Essas regiões mais altas e baixas estão diretamente relacionadas a valores mais elevados e a valores mais reduzidos do coeficiente de anisotropia dessa direção (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Para evitar o aparecimento de rugas, assim como a realização de operações posteriores para calibrar a altura da peça e variações na espessura da parede do copo é desejável utilizar materiais com variação de anisotropia planar ($\Delta r \cong zero$) (RODRIGUES; MARTINS, 2005). Para quantificar a anisotropia na direção da espessura, utiliza-se o coeficiente de anisotropia normal ou médio, conforme equação (18).

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2 \times r_{45^\circ}}{4} \quad (18)$$

2.2.8 Curva limite de conformação

A curva limite de conformação (CLC) delimita as fronteiras entre as deformações possíveis e as catastróficas que um corpo pode ser submetido no processo de estampagem. (ARRUDA et al., 2008).

Com o emprego de grades na superfície da geratriz, antes do processo de estampagem, é possível medir as deformações em diferentes locais de um componente, conforme figura 5, através das equações (19), (20), (21) e (22) (SCHAEFFER, 2004).

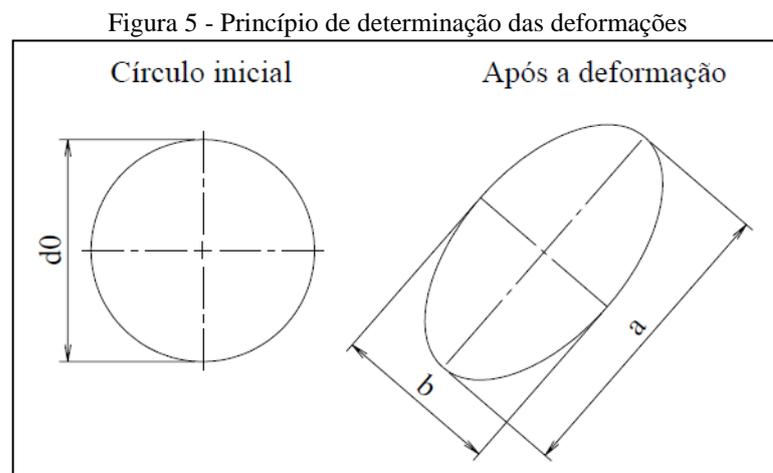
$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} \quad (19)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} \quad (20)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} \quad (21)$$

$$\varphi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \times (\varphi_1^2 + \varphi_1 \times \varphi_2 + \varphi_2^2)} \quad (22)$$

Onde d_0 é o diâmetro inicial do círculo, a é a maior dimensão da elipse, b a menor dimensão, s_1 a espessura final e s_0 a espessura inicial.



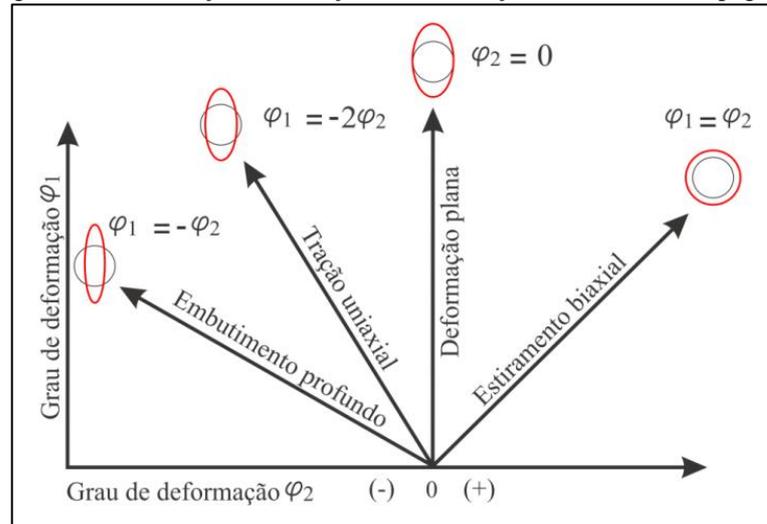
Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004).

Diversas técnicas podem ser usadas para determinar a CLC, sendo que o método mais comum é o de Nakajima, por ser mais simples pelo fato de usar apenas uma ferramenta.

Este método de consiste em estirar corpos de prova com larguras diferenciadas, mantendo os demais parâmetros constantes.

Nesse ensaio é utilizada uma matriz com prensa-chapas e um punção. Após o processo de estampagem, avaliam-se as deformações ocorridas nessa rede, dando informações necessárias sobre esta variação nas regiões críticas. As deformações podem ser classificadas em função das solicitações que ocorrem durante a estampagem, conforme figura 6 (SCHAEFFER, 2004).

Figura 6 – Deformações em função das solicitações durante a estampagem



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004).

2.2.9 Força de estampagem

No processo de estampagem, a força necessária para conformação está relacionada com as tensões radiais e tangenciais. A força máxima ocorre a aproximadamente 30% da altura do corpo, devido à combinação de dois efeitos opostos: a diminuição da zona de conformação, que diminui os esforços, e o encruamento, que aumenta a força necessária para a estampagem (SCHAEFFER, 2004).

Este parâmetro pode ser calculado através da equação (23) para o primeiro estágio e conforme equação (24) para estágios posteriores (SCHAEFFER, 2004).

$$F_1 = 5 \times d_0 \times s \times kfm_1 \times \ln \beta_1 \quad (23)$$

$$F_2 = 0,5 \times F_1 + 5 \times d_1 \times s \times kfm_2 \times \ln \beta_2 \quad (24)$$

Onde F_1 é à força de estampagem no primeiro estágio, F_2 a força de estampagem no segundo estágio, kfm_1 a tensão de escoamento média no primeiro estágio, kfm_2 a tensão de

escoamento média no segundo estágio, β_1 a relação de estampagem no primeiro estágio, β_2 a relação de estampagem no segundo estágio, d_0 o diâmetro do punção na primeira operação e d_1 o diâmetro do punção na segunda operação.

2.2.10 Prensa-chapas

No processo de estampagem, a chapa a ser conformada é fixada à matriz através da ação de um prensa-chapas, com o objetivo de evitar o surgimento de rugas durante o processo de escoamento do material (BRITO, 2005). Podem ser utilizados prensa-chapas do tipo fixo, móvel acionado por molas ou cames, e do tipo independente, de acionamento hidráulico em prensas de duplo ou triplo efeito (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

A pressão do prensa-chapa pode ser calculada conforme equação (25) (TSCHAETSCH, 2005).

$$P_{ps} = \left[(\beta - 1)^2 + \frac{d}{200 \times s} \right] \times \frac{Rm}{400} \quad (25)$$

Onde P_{ps} é a pressão do prensa-chapas, d o diâmetro do punção, s a espessura da chapa, β a relação de estampagem e Rm o limite de resistência mecânica.

2.2.11 Lubrificação

No processo de estampagem profunda, a lubrificação é de fundamental importância para o bom andamento do processo. Segundo Schaeffer (2004), a correta lubrificação exerce várias funções como: evitar contato entre a peça e matriz; aumentar ou diminuir o atrito no prensa chapa, assim como o esforço no mesmo.

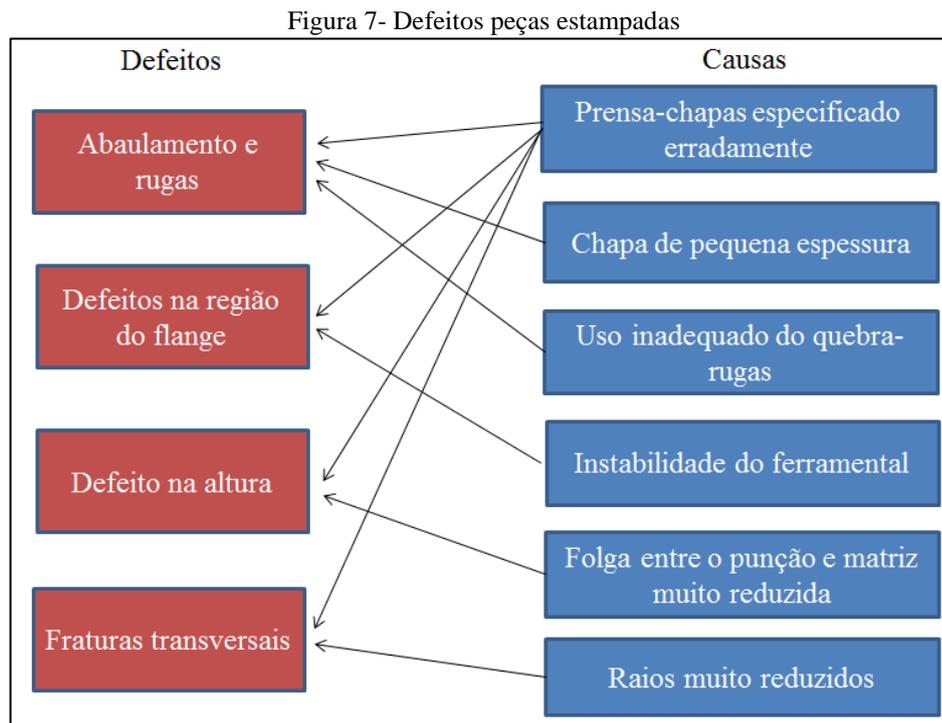
Entre os tipos de lubrificação, pode-se destacar a com película grossa, que evita o contato metal com metal, a lubrificação com película fina ou mista, que pode permitir algum contato, a lubrificação de fronteira, lubrificação de extrema pressão e lubrificação de película sólida (RUGANI; MESQUITA, 1997).

De maneira geral, o lubrificante deve resistir à temperatura e pressão de trabalho, não devem reagir quimicamente às superfícies lubrificadas, deve ser facilmente removido após o processo e não devem conter substâncias nocivas para a saúde ou meio ambientes. Devido às dificuldades de reunir em um único lubrificante todas as características citadas, tem-se

utilizado revestimentos de nitreto de cromo e nitreto de titânio, possuindo elevada dureza e um baixo coeficiente de atrito (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

2.2.12 Defeitos em peça estampadas

Durante o processo de estampagem, vários fatores que não forem corretamente dimensionados podem levar a defeitos nos componentes produzidos, conforme figura 7.



Fonte: Adaptado de Schaeffer (2004).

2.2.13 Influência da temperatura no processo de conformação

Os processos de conformação podem ser classificados, como trabalhos a quente ou a frio, em função de que temperatura em que eles são realizados, esteja acima ou abaixo da temperatura de recristalização.

No trabalho a quente, podem ser alcançadas maiores profundidades devido ao contínuo processo de recristalização, assim como o uso de menor esforço mecânico para uma determinada deformação, quando comparado ao processo a frio (CHIAVERINI, 1986).

Mas para tanto, os ferramentais utilizados no processo devem suportar trabalhar em temperaturas mais elevadas, aumentando os custos. Outro ponto negativo é a formação de óxidos na superfície, devido às altas temperaturas no processo e uma limitação quanto ao controle dimensional da peça pronta (CHIAVERINI, 1986).

Dentro do trabalho a quente, os processos de estampagem a quente podem ser classificados em diretos, onde a geratriz é aquecida em um forno antes da estampagem; e indiretos, onde parte da peça é conformada a frio, e posteriormente é aquecida na ferramenta, com o objetivo de estender os limites de conformação (SILVEIRA; SCHAEFFER, 2011).

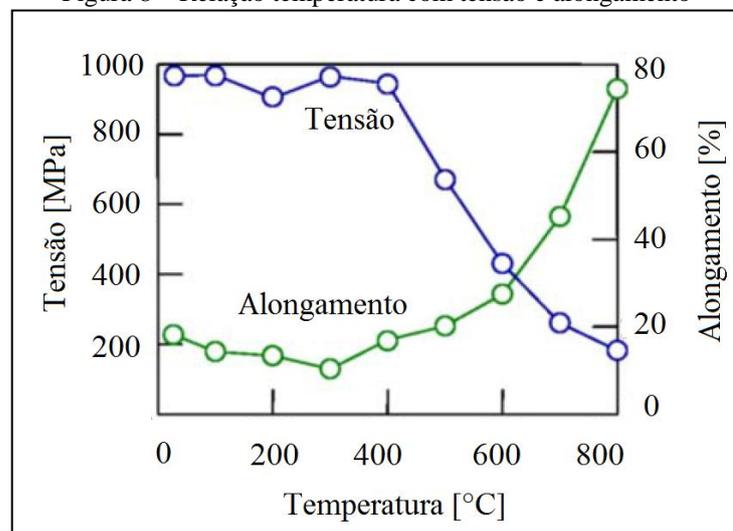
Pode ser utilizado também o aquecimento por resistências, onde é possível aquecer a peça rapidamente, evitando perda de temperatura e diminuindo a oxidação do componente, como é o caso do uso de fornos (MORI; MAKI; TANAKA, 2005).

No trabalho a frio, não ocorre à recristalização do material, tendo como consequência um aumento da dureza e uma diminuição da ductilidade. Caso não seja desejável esse efeito, podem ser realizados processos de recozimento a fim de recuperar as propriedades originais. Como principais vantagens em relação ao trabalho a quente, é possível destacar um melhor acabamento superficial e a possibilidade de obter dimensões dentro de tolerâncias mais estreitas (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Stachowicz, Trzepiecinski e Pieja (2010), os processos de conformação podem ser classificados quanto à temperatura, como: a frio, quando a temperatura é inferior a 0,35 da temperatura de fusão, a morno quando se encontra entre 0,35 e 0,55, e a quente quando a temperatura for superior a 0,55 da temperatura de fusão do material.

O processo de conformação a morno, ao contrário da conformação a quente, não permite recristalização, mas proporciona recuperação do material. Tem como efeito positivo em relação ao trabalho a frio, a possibilidade de uma maior taxa de deformação, no entanto necessita de uma maior força de estampagem quando comparado ao trabalho a quente, como ilustrado na figura 8 (STACHOWICZ; TRZEPIECINSKI; PIEJA, 2010).

Figura 8 – Relação temperatura com tensão e alongamento



Fonte: Adaptado de Mori, Maki e Tanaka (2005).

Os processos a quente e a morno se tornam especialmente úteis na estampagem de aços inoxidáveis austeníticos, onde o aumento da temperatura inibe parte da transformação martensítica induzida por deformação. (STACHOWICZ; TRZEPIECINSKI; PIEJA, 2010).

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

De maneira geral, aços com teores superiores a 12% de cromo são denominados inoxidáveis, possuindo elevadas resistências à corrosão e oxidação.

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco principais grupos: martensíticos, ferríticos, austeníticos, ferríticos-austeníticos (duplex) e endurecidos por precipitação (SILVA; MEI, 2010).

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam valores elevados de cromo, superiores a 25% e baixos valores de carbono, chegando ao máximo a 0,2%. Como consequência, não são endurecíveis por têmpera, tendo como principal tratamento térmico o alívio de tensões após processos de conformação a frio (CHIAVERINI, 2005).

Por sua vez, os aços inoxidáveis martensíticos apresentam valores de cromo entre 11,5 e 18%, podendo sofrer processo de têmpera a fim de ganhar dureza. Podem ser trabalhados tanto a frio como a quente, especialmente os com baixo teor de carbono, também conhecidos como “turbina”. Assim como os austeníticos, podem sofrer processo de recozimento buscando alívios de tensões após processos a frio (CHIAVERINI, 2005).

Aços ferríticos-austeníticos, também conhecidos como duplex buscam o equilíbrio entre as propriedades dos aços ferríticos e austeníticos, graças à presença das duas fases na sua microestrutura.

Além dos elementos de liga como cromo e molibdênio, o controle do hidrogênio é fundamental para obter o controle da microestrutura desejada. Estes aços podem alcançar a mesma, ou até mesmo uma maior resistência à corrosão que os melhores aços austeníticos, com limites de escoamento podendo exceder duas vezes o mesmo (SILVA; MEI, 2010).

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são aços martensíticos, austeníticos ou semiausteníticos submetidos a processos de envelhecimento. Suas propriedades de resistência à corrosão são similares aos dos aços austeníticos, no entanto possuem propriedades mecânicas similares aos aços martensíticos (SILVA; MEI, 2010).

Já os aços inoxidáveis austeníticos podem ser classificados em dois grupos: aços ao cromo-níquel e ao cromo-mangânês-níquel. O primeiro apresenta teores de cromo e níquel na

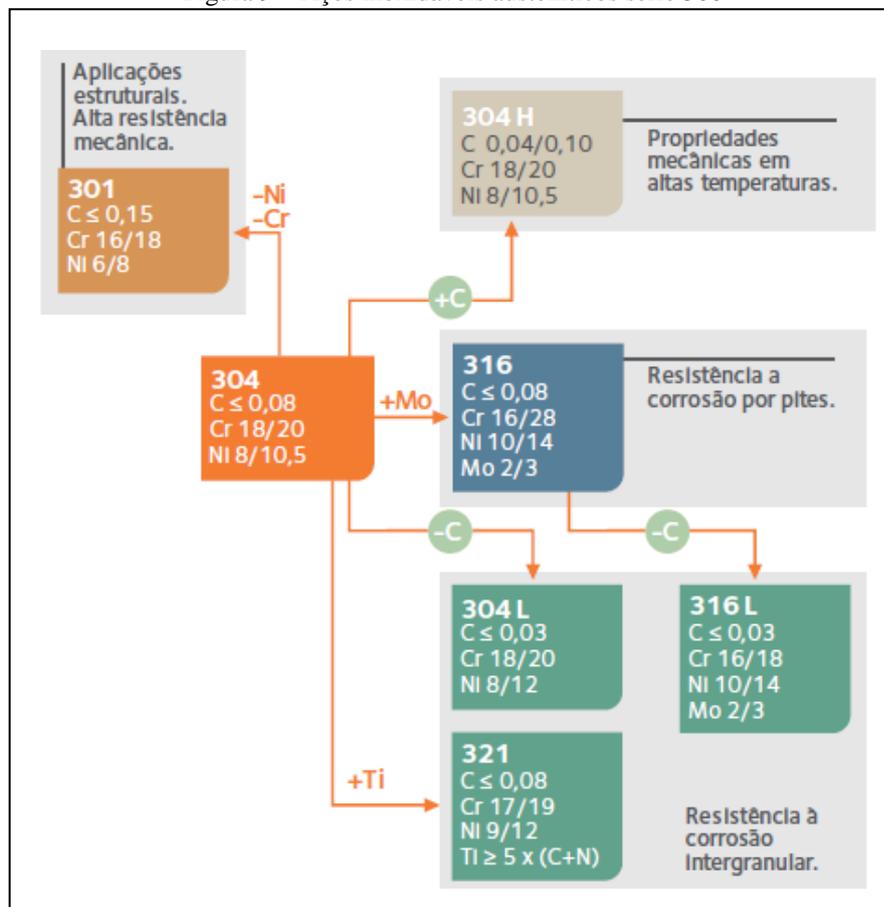
ordem de 18% e 8% respectivamente. Já o segundo tem o seu teor de níquel reduzido em torno de 4%, esse sendo substituído por manganês em quantidade superior, cerca de 7%.

Entre suas principais características estão o fato de não serem magnéticos, não endurecíveis por processo de têmpera e apresentarem um aumento da dureza quando encruados devido à instabilidade da austenita (CHIAVERINI, 2005).

Possuem alta capacidade de encruamento, assim como uma elevada plasticidade, possibilitando o seu trabalho a frio. Também estão entre os aços inoxidáveis com melhor resistência à temperatura elevadas, assim como aplicações para serviços criogênicos (SILVA; MEI, 2010).

Entre os aços inoxidáveis austeníticos, o mais popular é o AISI 304, sendo utilizado tanto em aplicações domésticas como industriais devido as suas excelentes resistência a corrosão, ductilidade e soldabilidade. Seu uso não é o mais comum apenas em aplicações extremamente corrosivas, onde é acrescido cerca de 2% de molibdênio, transformando-o no tipo 316, conforme figura 9 (CARBÓ, 2008).

Figura 9 – Aços inoxidáveis austeníticos série 300



Fonte: Adaptado de Carbó (2008).

2.3.1 Aço inoxidável AISI 304

Pertencente ao grupo dos aços inoxidáveis austeníticos, o aço AISI 304 é utilizado em aplicações hospitalares, equipamentos para indústria química, farmacêutica e alimentícia. Também é utilizado na construção de estruturas metálicas, na confecção de fios para molas e elementos de fixação como parafusos e rebites (SILVA; MEI, 2010). A sua composição química está indicada na tabela 4.

Tabela 4 – Composição química em % do aço inoxidável AISI 304

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
0,08	2,0	1,0	18-20	8-10,5	0,045	0,03

Fonte: Adaptado de Davis (1998).

Nos processos de conformação a frio, os aços inoxidáveis austeníticos podem ser classificados como estáveis ou metaestáveis. Os aços estáveis mantêm sua estrutura austenítica, já os metaestáveis têm partes de suas estruturas alteradas para martensita após a deformação a frio (SILVA; MEI, 2010).

Segundo Silva e Mei (2010), o aço inoxidável AISI 304 é considerado estável, quando comparado com outros aços inoxidáveis austeníticos. No entanto, segundo Takuda et al. (2003), em um estudo sobre a transformação martensítica induzida por deformação, classifica esse mesmo material como metaestável.

2.3.2 Transformação martensítica induzida por deformação

Das várias fases cristalinas resultantes da produção de aços, a martensita é a mais dura, a mais resistente e, além disso, a mais frágil. Sua dureza depende diretamente do teor de carbono e para atenuá-la, normalmente é realizado um tratamento térmico de revenimento (CALLISTER, 2002).

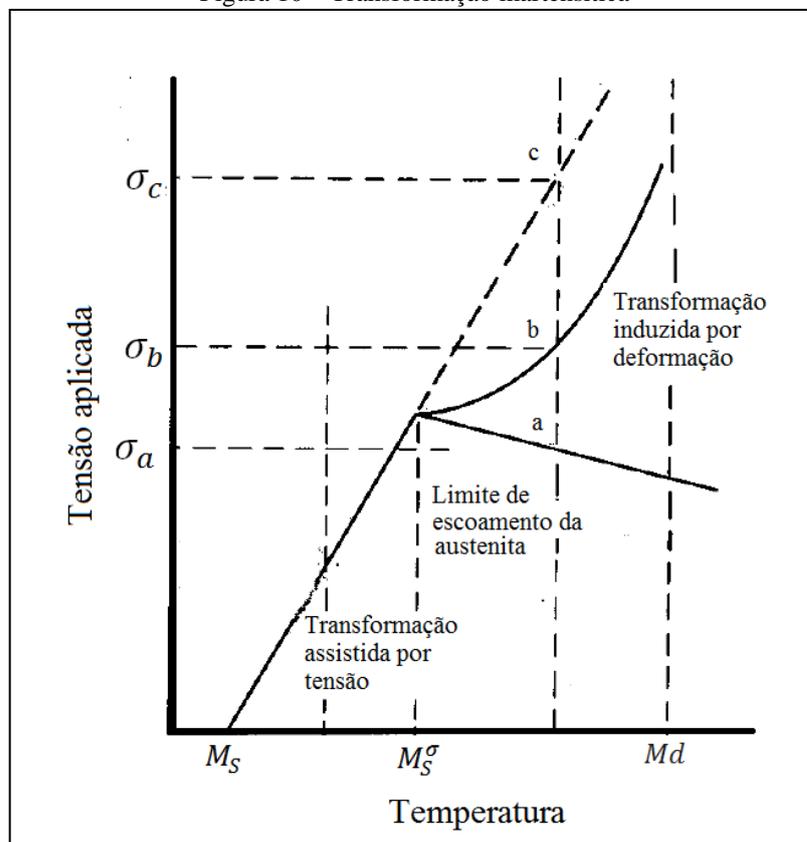
Segundo Gomes (2012), a formação de martensita ocorre sem mudança na composição química e sem difusão, causando mudança na estrutura cristalina e gerando grande quantidade de defeitos cristalinos.

No processo de conformação a frio de aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis, a matriz austenítica (CFC) torna-se instável, ocorrendo à transformação de parte dessa estrutura em martensita α' (CCC, ferromagnética) e martensita ε (HC, paramagnética). Tal alteração causa uma expansão volumétrica de 2,57% no caso da α' e uma contração volumétrica de

1,12% no caso da ε . A transformação da martensita ε precede o surgimento da α' , aumentando até um valor limite, enquanto a α' aumenta continuamente com a deformação realizada (PADILHA; GUEDES, 1994).

A austenita se transforma espontaneamente em martensita através de resfriamento quando a temperatura ultrapassa a temperatura M_S (figura 10), sendo esta a força motriz responsável pelo processo. No entanto, a martensita também pode ser formada acima da temperatura M_S , desde que a força motriz para a transformação seja fornecida através da aplicação de uma tensão externa, seja assistida por tensão ou induzida por deformação (SANTOS, 2008; KRAUSS, 2005; LISCHKA, 2013).

Figura 10 – Transformação martensítica



Fonte: Adaptado de Santos (2008).

Se a força motriz química decresce com o aumento da temperatura acima de M_S , a força motriz mecânica necessária para iniciar a transformação deverá ser maior. Conseqüentemente, a tensão necessária também deve aumentar, linearmente, com a temperatura na faixa compreendida entre M_S e M_S^σ (temperatura limite na qual ocorre a nucleação da martensita apenas com a aplicação de tensão na região de deformação elástica da austenita).

Neste caso, tem-se a transformação induzida por tensão, onde nucleação espontânea e crescimento da martensita em forma de agulhas, da mesma maneira que ocorre no processo de têmpera. (SANTOS, 2008; LISCHKA, 2013).

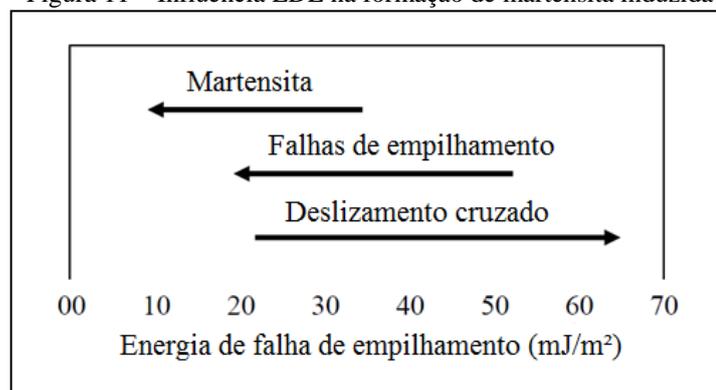
Com a elevação da temperatura acima de M_s^c , a tensão crítica para alcançar a formação de martensita se iguala ao limite de escoamento da austenita, fazendo com que ocorra deformação plástica com a tensão σ_a , e encruamento até a tensão σ_b , onde se inicia a transformação martensítica induzida por deformação (SANTOS, 2008; LISCHKA, 2013).

Segundo Agnieszka et al. (2010), por meio da análise do aço inoxidável austenítico AISI 304 conformado a frio, foi possível encontrar apenas a fase martensítica magnética α' . A fase não magnética ε não foi encontrada. De acordo com Padilha e Guedes (1994), a fase ε não se forma em ligas com teor de Ni + Cr menor que 24 a 28% e com energia de defeito de empilhamento menor que 50 mJ/m².

A transformação de austenita em martensita nos processos de conformação depende tanto da temperatura: quanto mais baixa, maior a instabilidade da austenita, como também do percentual de deformação plástica aplicada ao componente e do teor de elementos de liga (ANTUNES; ANTUNES, 2007). A energia de defeito de empilhamento (EDE) e velocidade de deformações realizadas também tem influência no processo (PADILHA; GUEDES, 1994).

A EDE é de extrema importância devido a sua ligação com as propriedades dos materiais, como: taxa de encruamento, subestrutura das discordâncias após deformação plástica e estabilidade de fases. De maneira geral, o aumento da EDE está relacionado com maior estabilidade das fases (PADILHA; GUEDES, 1994). Segundo Lischka (2013), com a redução da energia de defeito de empilhamento, a uma maior probabilidade de se originarem falhas de empilhamento e martensita induzida, conforme figura (11).

Figura 11 – Influência EDE na formação de martensita induzida



Fonte: Adaptado de Gomes (2012).

Analisando a composição química, aços com menor teor de níquel tendem a sofrer maiores efeitos da martensita induzida por conformação, no entanto, com a inclusão de cobre e uma redução dos teores de carbono e nitrogênio é possível retardar esse fenômeno, e o conseqüente *delayed cracking* (GONZALES et al., 2007; SANTOS, 2008).

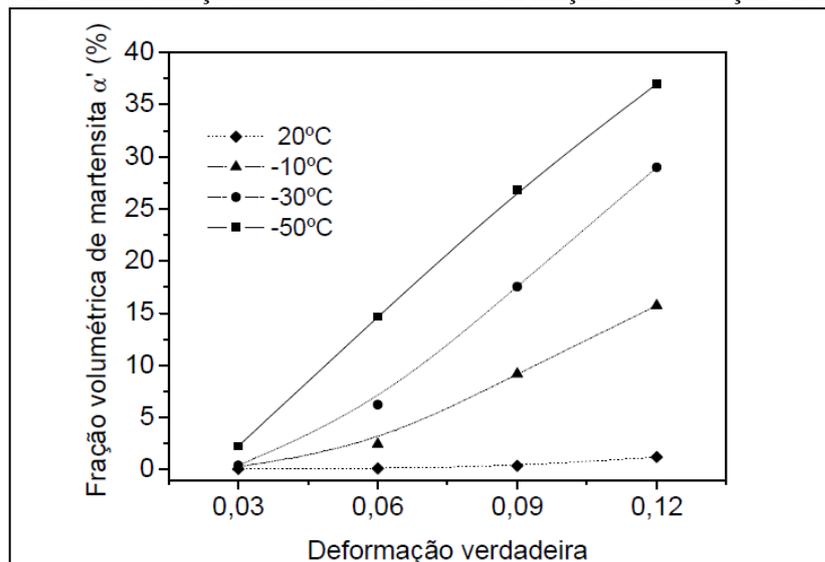
De acordo com as equações 26 e 27 é possível determinar a influência da composição química do material na temperatura em que ocorrem as transformações, sendo $Ms(\alpha')$ a temperatura [°C] onde inicia a transformação e $Md(\alpha')(30/50)$ a temperatura [°C] em que ocorre a formação de 50% de α' para uma deformação verdadeira de 30% (PADILHA; GUEDES, 1994).

$$Ms(\alpha') = 1305 - (61,1Ni) - (41,7Cr) - (33,3 Mn) - (27,8Si) - |1667(C + N)| \quad (26)$$

$$Md(\alpha')\left(\frac{30}{50}\right) = 413 - (9,5Ni) - (13,7Cr) - (8,1 Mn) - (9,2Si) - (18,5Mo) - |462(C + N)| \quad (27)$$

Segundo Antunes, Antunes e Sampaio (2011), por meio de ensaios realizados em temperaturas entre 77 K e 300 K com o aço inox AISI 304, foi possível constatar que com o aumento da temperatura, ocorre a diminuição das transformações da austenita para martensita. O mesmo comportamento foi observado por Santos e Andrade (2008), este em temperaturas entre -50 e 20°C, conforme figura 12.

Figura 12 – Transformação martensítica alfa-linha em função da deformação verdadeira

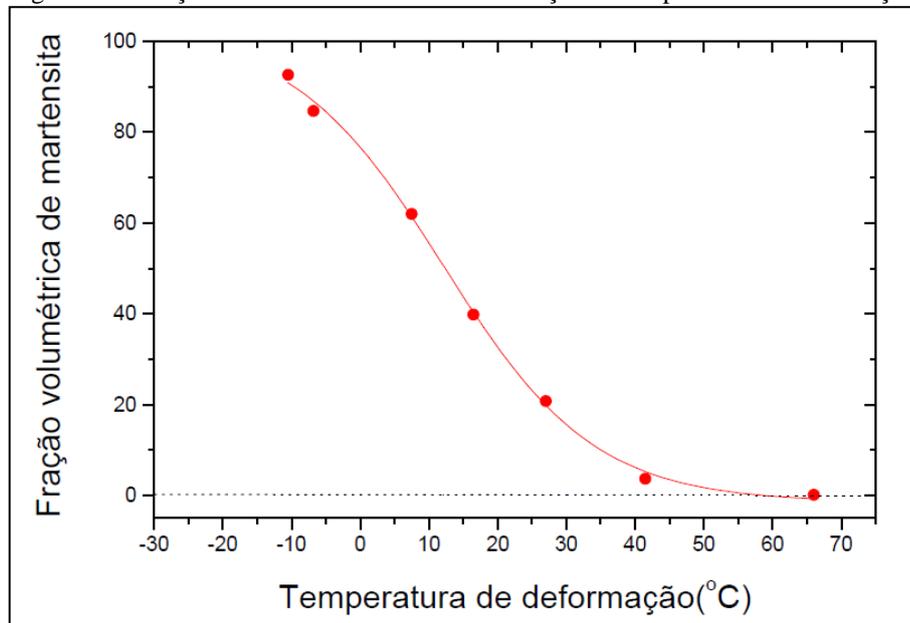


Fonte: Adaptado de Santos e Andrade (2008)

Segundo Andrade et al. (2003), na avaliação do teor de martensita em um aço AISI 304 com uma deformação verdadeira de 0,30, foi possível identificar a diminuição da fração

volumétrica de martensita com o aumento da temperatura, chegando a valores próximos de 0% na temperatura de 70 °C, conforme figura 13.

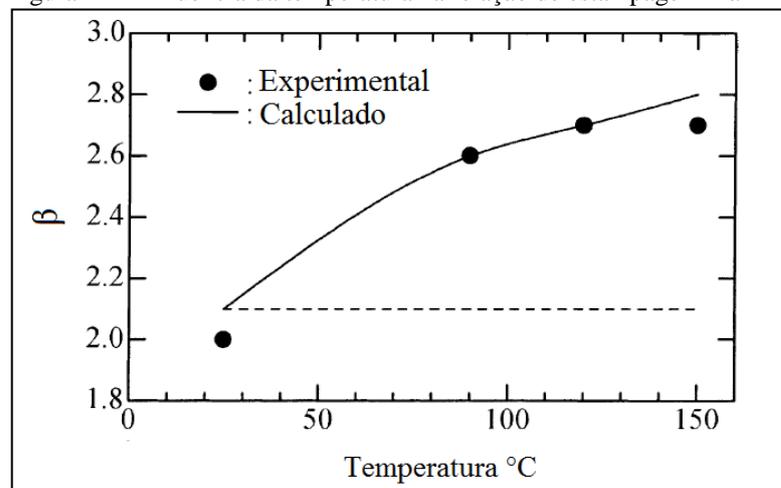
Figura 13 – Fração volumétrica martensita em função da temperatura na deformação



Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2003).

A temperatura em que o processo é realizado, afeta também a relação máxima de estampagem. Segundo Takuda et al. (2003), na conformação de uma chapa de inox AISI 304 com 1,0 mm de espessura, é possível passar de uma relação de estampagem de 2,2 a temperatura ambiente para 2,7 a uma temperatura de 120°C conforme demonstrado na figura 14.

Figura 14 – Influência da temperatura na relação de estampagem máxima



Fonte: Adaptado de Takuda et al. (2003).

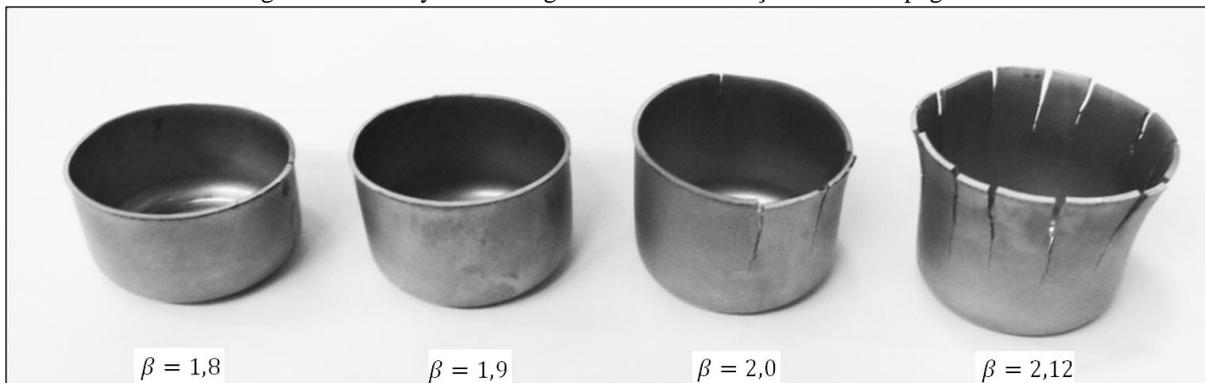
Além da influência na relação de estampagem, o processo de conformação a morno, realizado em temperaturas inferiores a 150°C, permite que a transformação da austenita em martensita seja evitada (TAKUDA et al., 2003).

A transformação martensítica induzida por deformação aumenta a taxa de encruamento do material, dificultando o processo de estampagem profunda, podendo tornar necessário o uso de várias etapas para concluí-lo (TAKUDA et al., 2005).

Além disso, o alto teor de martensita causa um aumento na força de trabalho necessária para a conformação, uma diminuição na resistência a corrosão, a magnetização do material e o chamado *delayed cracking* (TAKUDA et al., 2005).

O *delayed cracking* é um fenômeno caracterizado pelo surgimento de trincas, que se revelam horas, dias ou até mesmo meses após o término do processo de conformação. Essas trincas se formam nas bordas e se propagam linearmente até a base do copo (GONZALES et al., 2007). Na figura 15, é possível perceber o surgimento deste fenômeno em diferentes relações de estampagem.

Figura 15 – Delayed cracking em diferentes relações de estampagem

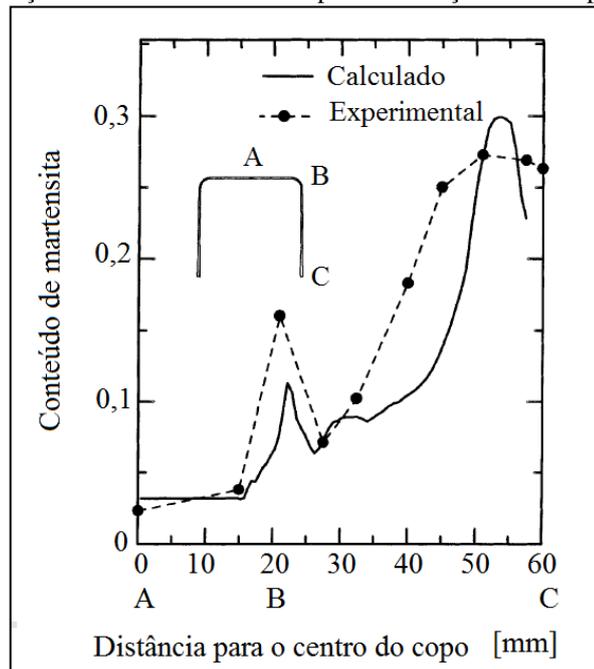


Fonte: Adaptado de Papula (2015).

No processo de estampagem profunda, a fração volumétrica de martensita varia na parede do copo de acordo com a profundidade, conforme figura 16 (SOLOMON; SOLOMON, 2010). O surgimento do fenômeno *delayed cracking* é atribuído às tensões residuais originárias das diferenças nas resistências mecânicas entre as fases martensítica e austenítica presentes e também ao teor de hidrogênio (GONZALES et al., 2007).

Segundo Santos (2008), o aumento da fração volumétrica de martensita induzida pela deformação eleva tanto a dureza dos aços inoxidáveis quanto as tensões residuais que levam à abertura das trincas.

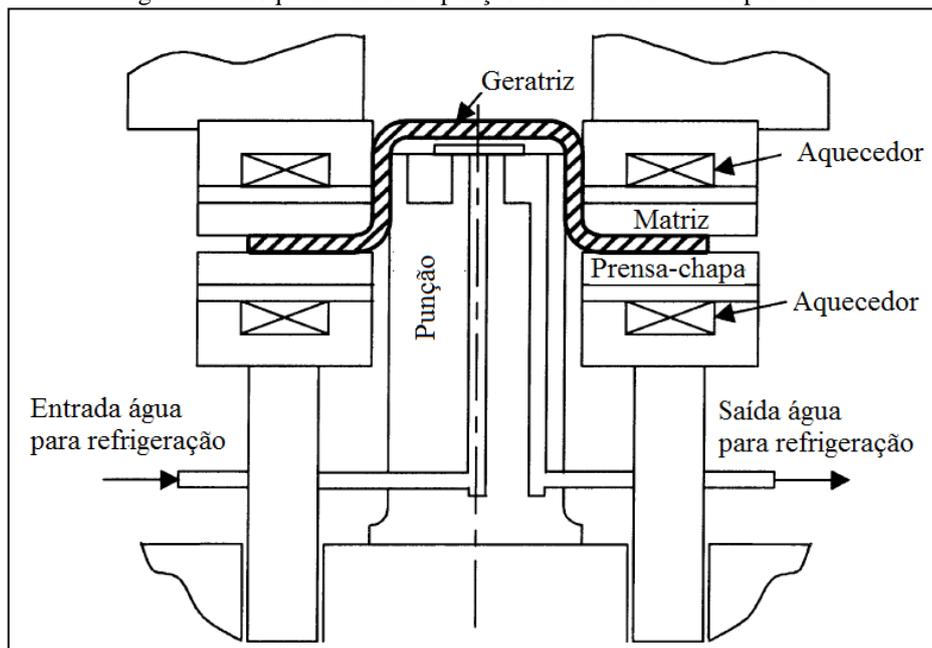
Figura 16 – Variação da martensita induzida por deformação na estampagem profunda



Fonte: Adaptado de Takuda et al. (2003).

No processo de estampagem profunda, o controle de temperatura em cada região do ferramental é fundamental para evitar a transformação martensítica e proporcionar um bom processo, pois quando a temperatura é uniforme em toda a geratriz, o ganho na relação de estampagem não é alcançado. Enquanto regiões específicas da matriz devem ser aquecidas, o punção deve ser refrigerado conforme ilustrado na figura 17 (TAKUDA et al., 2003).

Figura 17 - Esquema matriz e punção com controle de temperatura



Fonte: Adaptado de Takuda et al. (2003).

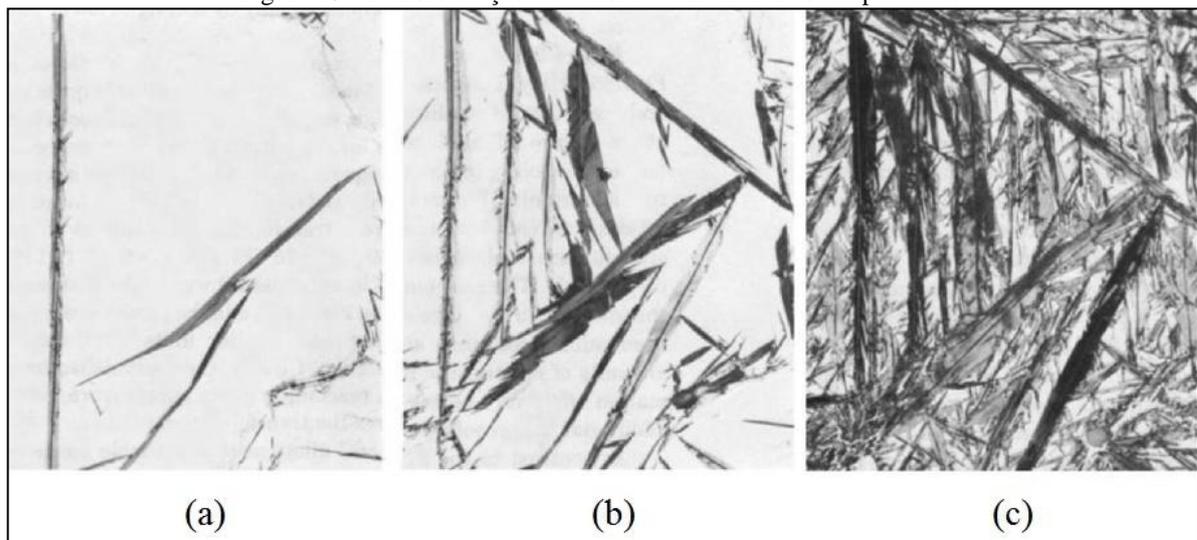
A velocidade de deformação atua de maneira contrária a temperatura na deformação plástica, ou seja, aumentar a velocidade apresenta um efeito semelhante a diminuir a temperatura do componente (PADILHA; GUEDES, 1994).

A geometria dos punções também influencia na transformação martensítica. Na conformação com punções hemisféricos, é possível observar maior transformação das fases austenita → martensita quando comparados a punções planos (CARDOSO et al., 2013).

Para identificar a quantidade de austenita transformada em martensita em processos de deformação a frio, podem ser empregados diversos métodos, como por exemplo, a análise metalográfica.

Segundo Krauss (2005), conforme figura 18, é possível observar o aumento da quantidade de martensita presente nas amostras a diferentes temperaturas. A amostra (a) foi conformada a 24°C, a amostra (b) a -60°C e a amostra (c) a uma temperatura de -100°C.

Figura 18 - Transformação martensítica em diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado de Krauss (2005).

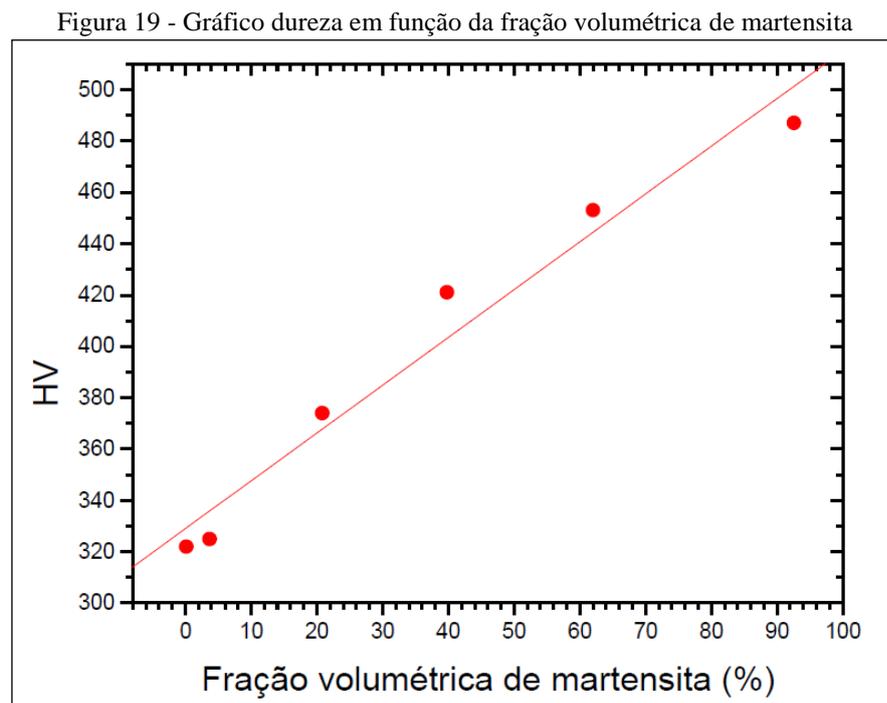
Segundo Moraes, Viana e Abreu (2011) podem ser utilizadas as técnicas de segmentação de imagens, difração de raios x, e a ferritoscopia na identificação na quantificação da martensita.

A ferritoscopia consiste na quantificação da fase ferromagnética. Um campo magnético gerado por uma bobina interage com as fases magnéticas da amostra, as mudanças no campo magnético induzem uma tensão proporcional em uma segunda bobina. Com a medição da diferença de potencial, é possível determinar o volume das fases (MORAIS; VIANA; ABREU, 2011).

Já na técnica de difração de raios x, um feixe monocromático incide num conjunto de planos cristalinos. Em um cristal sem deformações, o resultado é um pico bem definido. No caso de um material deformado, ocorre uma diminuição da intensidade e o alargamento desses picos (AGUIAR, 2012).

Na comparação desses três métodos, foi possível determinar que todos são capazes de detectar as alterações na estrutura do material, no entanto, a segmentação de imagens foi o método com menor dispersão nos resultados (MORAIS; VIANA; ABREU, 2011).

Com o aumento da deformação, ocorre também um aumento da dureza, no entanto, esse parâmetro, por si só, não pode determinar se houve ou não a transformação martensítica induzida por deformação (AGUIAR, 2012). No entanto, segundo Andrade et al. (2003), em uma avaliação realizada no aço AISI 304 foi possível encontrar uma dependência linear entre a dureza e a fração volumétrica de martensita (figura 19).



Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2003).

Ainda relacionando à dureza a fração volumétrica de martensita, segundo Padilha e Guedes (1994), com a deformação verdadeira de 50% de um aço 304 a -196°C foi encontrada uma dureza 50% mais elevada, quando comparado ao mesmo material conformado à temperatura ambiente. Os autores atribuíram tal aumento a presença da fase martensítica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo 2 deste trabalho foram revisados conceitos sobre a estampagem profunda e o comportamento do aço inoxidável AISI 304 no processo de conformação. No capítulo 3 serão descritos a metodologia dos ensaios experimentais buscando caracterizar o material, com o objetivo de investigar as possíveis causas de rupturas nas cubas.

O objeto de estudo é a chapa de aço inoxidável AISI 304 com 2,0 mm de espessura, sendo ela a matéria-prima para a cuba com a maior relação de estampagem dentre as cubas produzidas internamente (figura 20) na empresa Metalcubas, e também com os dois maiores índices de assistência técnica enfrentados pela empresa G.Paniz, nas cubas das amassadeiras AE-40L e AE-60L (Anexo A), conforme tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões e relação de estampagem cubas G.Paniz

Modelo amassadeira	D [mm]	s [mm]	d [mm]	h [mm]	β [-]
AE-40L	970	2,0	545	300	1,78
AE-60L	1030	2,0	545	356	1,89

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Figura 20 - Cuba amassadeira espiral AE-60L



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

3.2 METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul. Inicialmente, foram fabricados corpos de prova

e realizados ensaios de tração no equipamento EMIC Modelo DL20000 (Número série: NS016) (figura 21), com capacidade para 20 toneladas, visando determinar as propriedades mecânicas do material utilizado na fabricação das cubas, conforme tabela 6.

Figura 21 – Equipamento EMIC DL20000



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Tabela 6 - Corpos de prova para ensaios de tração

Direção de laminação	Quantidade de corpos de prova para determinar r, n e tensão de escoamento	Quantidade de corpos de prova para determinar influência da temperatura na transformação martensítica	Quantidade de corpos de prova para cada direção de laminação
0°	3	3	6
45°	3	0	3
90°	3	0	3
Quantidade total de corpos de prova			12

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

3.2.1 Corpos de prova

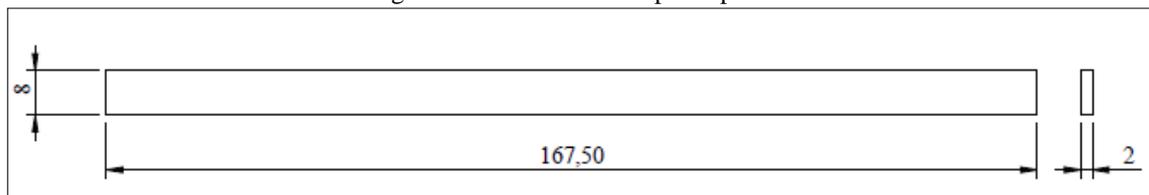
Os corpos de prova foram fabricados a partir de uma chapa de aço inoxidável AISI 304 do fabricante APERAM, através do processo de corte laser na empresa G.Paniz

Inicialmente os corpos foram cortados com um sobre metal de 1,0 mm, para posterior remoção da camada afetada pelo corte laser através do processo de retífica. Após o processo

de retífica, os corpos tiveram os seus cantos quebrados utilizando uma lixa d'água 2000, a fim de eliminar quaisquer cantos vivos que pudessem influenciar nos ensaios, atuando como concentradores de tensões.

Devido às limitações de curso do extensômetro (distância base de medida 50mm, máxima deformação mensurável 25mm) utilizado nos ensaios de tração, impedindo realizar o ensaio até ruptura, os corpos de prova não adotaram as medidas padrões conforme norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013, adotando dimensões reduzidas, conforme figura 22.

Figura 22 - Dimensões corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

3.2.2 Ensaios a baixa temperatura

Com o objetivo de determinar a influência da temperatura no processo de conformação, foram realizados ensaios de tração, reduzindo a temperatura dos corpos de prova a aproximadamente 0°C.

Para manter a temperatura do corpo de prova a mais baixa possível durante a realização do ensaio de tração, foi utilizado um corpo de alumínio bipartido (Apêndice A), com um canal central onde é acomodado o corpo de prova, conforme figura 23, onde foi aplicada uma pasta térmica para propiciar uma melhor troca térmica entre o bloco de alumínio e o corpo de prova.

Figura 23 - Bloco de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Inicialmente os corpos de prova, juntamente com as garras do equipamento EMIC DL20000 e o corpo de alumínio foram condicionados em sacos plásticos herméticos e imersos em uma mistura de água e gelo, com os sacos ainda abertos. Depois de imersos, a pressão da água expulsava o ar de dentro dos sacos, e então eles eram fechados.

Os itens permaneceram no isopor por um período de inicial de aproximadamente 50 minutos para o primeiro ensaio, e 30 minutos para o segundo, conforme figura 24. Antes da retirada dos itens do isopor, a temperatura era medida através de um termopar, estando próxima a 0°C.

Figura 24 - Condicionamento corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Posteriormente, todos os itens foram retirados do isopor, montados no equipamento EMIC DL20000 e realizados os ensaios de tração. Durante os ensaios, conforme o corpo de prova sofria o alongamento e era criada uma folga, o corpo de alumínio era movido para cima e para baixo, buscando manter a temperatura constante ao longo do corpo de prova, conforme ilustrado na figura 25.

No primeiro ensaio, o bloco de alumínio foi montado no corpo de prova por meio de parafusos de fixação. No segundo e terceiro ensaios, uma das partes do bloco foi virada e passou-se a utilizar uma borracha para manter a superfície do bloco de alumínio em contato com o corpo de prova, a fim de minimizar os efeitos da redução de seção do corpo de prova na troca térmica com o canal central.

Figura 25 - Ensaio a baixa temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Durante todo o ensaio, a temperatura do corpo de prova, do corpo de alumínio e das garras do equipamento EMIC DL20000 foram monitoradas por termopares tipo K, inseridos em furações no corpo de alumínio e encostados diretamente sobre as garras e corpo de prova. Os termopares estavam ligados a 03 multímetros digitais Minipa Modelo ET-2110.

3.2.3 Análises metalográficas

Após os ensaios à temperatura reduzida, foram realizadas análises metalográficas com aumento de 100X e 500X, utilizando um ataque de ácido oxálico – 90 segundos. As análises foram realizadas no Laboratório de Metalografia (LAMET) da Universidade de Caxias do Sul utilizando o microscópio Zeiss Modelo Observer.D1m.

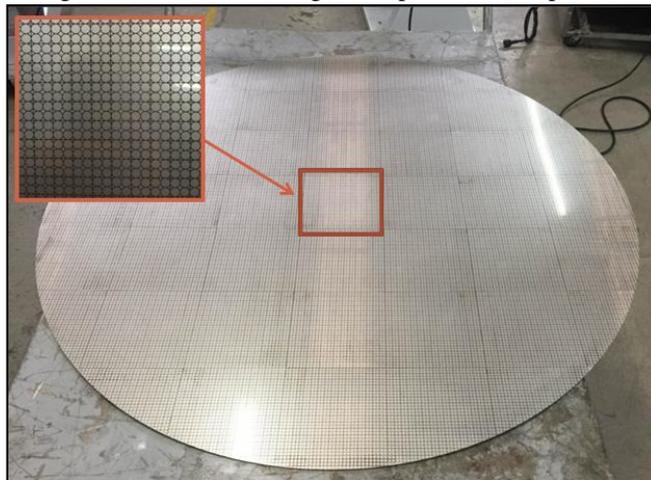
Estas análises tiveram por objetivo determinar como a deformação ocorrida a temperaturas próximas a 0°C influenciou na transformação de fases austenita → martensita.

Foi utilizada uma amostra da peça sem deformação, uma deformada à temperatura ambiente e outra à temperatura próxima a 0°C. Além das amostras ensaiadas em laboratório, foram analisadas duas amostras de uma cuba que apresentou trincas. Todas as amostras foram retiradas a partir de cortes longitudinais em relação ao comprimento do corpo de prova.

3.2.4 Deformações nas peças estampadas

Para avaliar a máxima deformação nas peças estampadas, foram utilizadas grades aplicadas na superfície da geratriz, com um diâmetro de $\text{Ø}5 \text{ mm}$ (figura 26), através de um processo eletroquímico com o aparelho Tecnigrav Modelo RB 200 Super, para posterior medição e avaliação dos pontos críticos.

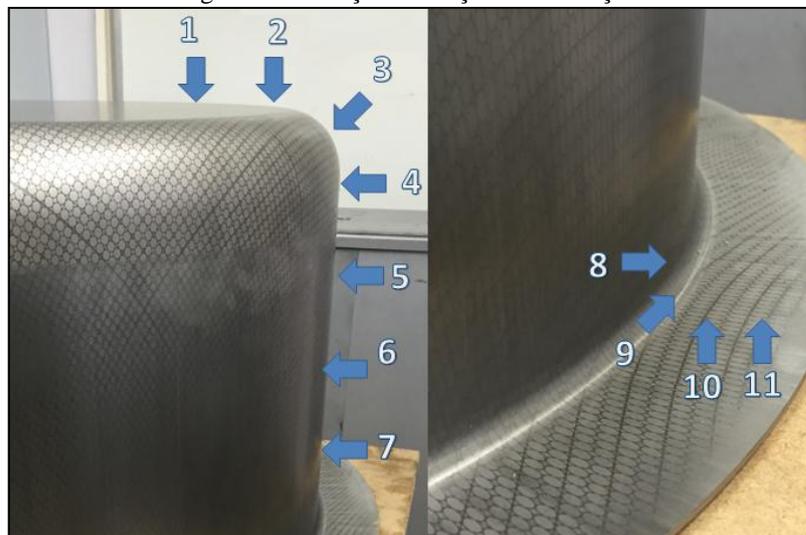
Figura 26 - Geratriz com grades aplicadas na superfície



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

As avaliações foram feitas em 11 pontos distintos: 1) Fundo da cuba; 2) Início raio punção; 3) Raio punção; 4) Final raio punção; 5) Região inferior cuba; 6) Região meio cuba; 7) Região superior cuba; 8) Início raio matriz; 9) Raio matriz; 10) Final raio matriz e 11) Região prensa-chapa, conforme ilustrado na figura 27.

Figura 27 - Posições medições deformações



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Todas as avaliações feitas nestes 11 pontos foram repetidas para os sentidos de laminação 0°, 45° e 90°, utilizando um paquímetro digital Mitutoyo Modelo CD-8 CSX-B.

Esse ensaio foi realizado na empresa Metalcubas, utilizando o ferramental utilizado no processo atual (figura 28) (Apêndice B), com 02 geratrizes do modelo AE-60L. O material utilizado para o corte da geratriz foi do mesmo lote dos corpos de prova utilizados para os demais ensaios realizados.

Figura 28 - Ferramental utilizado atualmente



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

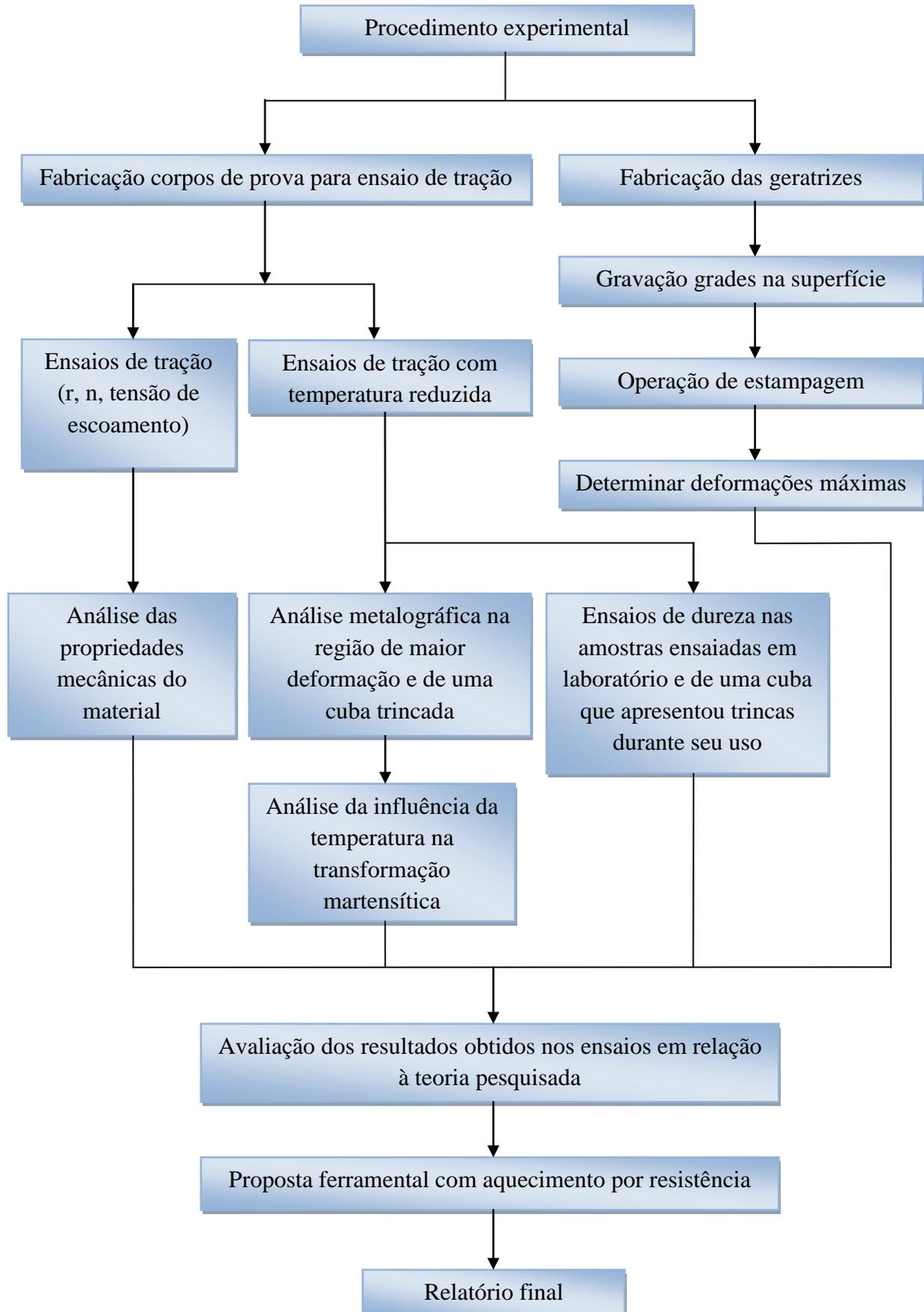
3.2.5 Ensaio de dureza

A dureza das amostras tracionadas à temperatura ambiente e à temperatura reduzida foram avaliadas, assim como as amostras retiradas de uma cuba trincada e da chapa sem deformação. As regiões avaliadas foram os mesmos pontos onde foram realizadas as análises metalográficas.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LAMEC) da Universidade de Caxias do Sul, com o aparelho WPM Heckert, a escala de dureza utilizada foi a Vickers HV10 e foram realizadas cinco medições para cada amostra.

Um apanhado geral da metodologia utilizada nos procedimentos experimentais é demonstrado através do fluxograma (figura 29).

Figura 29 - Fluxograma com a metodologia utilizada



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram compilados os resultados práticos obtidos na forma de gráficos, tabelas e imagens, e feita a discussão dos dados obtidos em relação às referências bibliográficas.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

4.1.1 Propriedades Mecânicas

A tabela 7 apresenta os valores obtidos nos ensaios para Alongamento (A), Módulo de Elasticidade (E), Limite de Resistência (R_m), Limite de Escoamento (σ_e) e Coeficiente de Encruamento (n).

Tabela 7 - Propriedades Mecânicas

σ_e [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	E [GPa]	n [-]
292 ± 4	718 ± 7	52 ± 1	192 ± 9	$0,45 \pm 0,03$

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O valor médio encontrado para o coeficiente de encruamento ficou dentro do especificado por Martins e Rodrigues (2005), com valores entre 0,4 a 0,5. O limite de escoamento experimental foi ligeiramente menor que o especificado pelo fabricante (316 MPa), assim como o alongamento (55%).

Em relação ao limite de resistência mecânica, o resultado prático superou o relatado pelo fabricante (671 MPa). Todos os valores ficaram dentro dos limites estabelecidos pela norma ASTM A-240, conforme declara o fabricante no certificado (Anexo B) que acompanha o lote de chapas.

4.1.2 Anisotropia

A tabela 8 apresenta os resultados da anisotropia para cada sentido de laminação, assim como os valores da anisotropia média (r_m) e anisotropia planar (Δr).

Tabela 8 - Anisotropia

r_{0°	r_{45°	r_{90°	Δr	r_m
$0,86 \pm 0,04$	$1,05 \pm 0,03$	$0,80 \pm 0,01$	$-0,22 \pm 0,13$	$0,94 \pm 0,13$

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O fornecedor da chapa não informa os valores referentes à anisotropia planar e média, no entanto os valores ficaram dentro do especificado conforme Martins e Rodrigues (2005), com um valor de r_m entre 0,9 a 1 para um aço austenítico 18-10.

Fazendo uma comparação com Ferrarini (2004), onde foram encontrados valores de 0,991 para anisotropia normal e - 0,283 para anisotropia planar em um aço inox AISI 304, os resultados apresentados na tabela 8 condizem com o que seria esperado deste material.

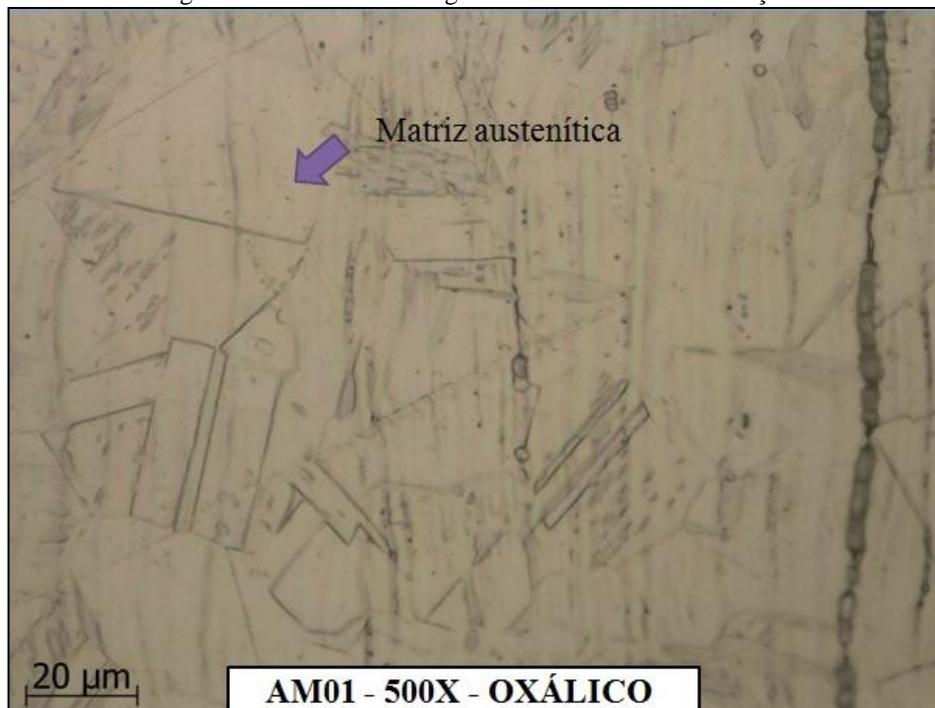
O relatório dos ensaios de tração realizados se encontram presentes nos Anexo C deste trabalho.

4.2 ANÁLISES METALOGRAFICAS

A seguir seguem as metalografias das cinco amostras, utilizando um aumento de 500 vezes e ataque de ácido oxálico.

Na figura 30 é observada a amostra da chapa de 2,00 mm sem deformação, com uma matriz tipicamente austenítica.

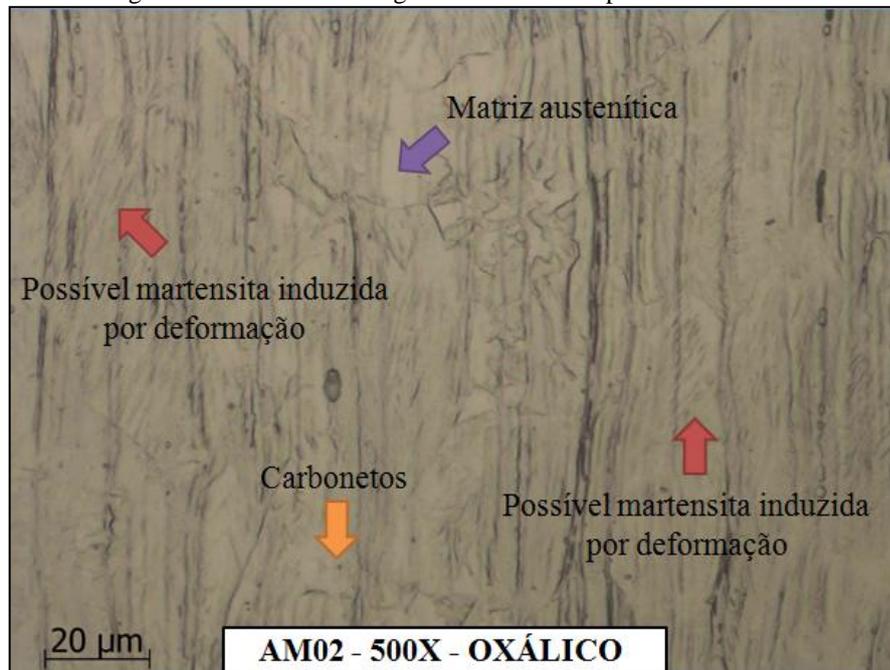
Figura 30 - Análise metalográfica amostra sem deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A figura 31 (amostra deformada a temperatura ambiente) apresenta microestrutura com grãos de austenita e martensita.

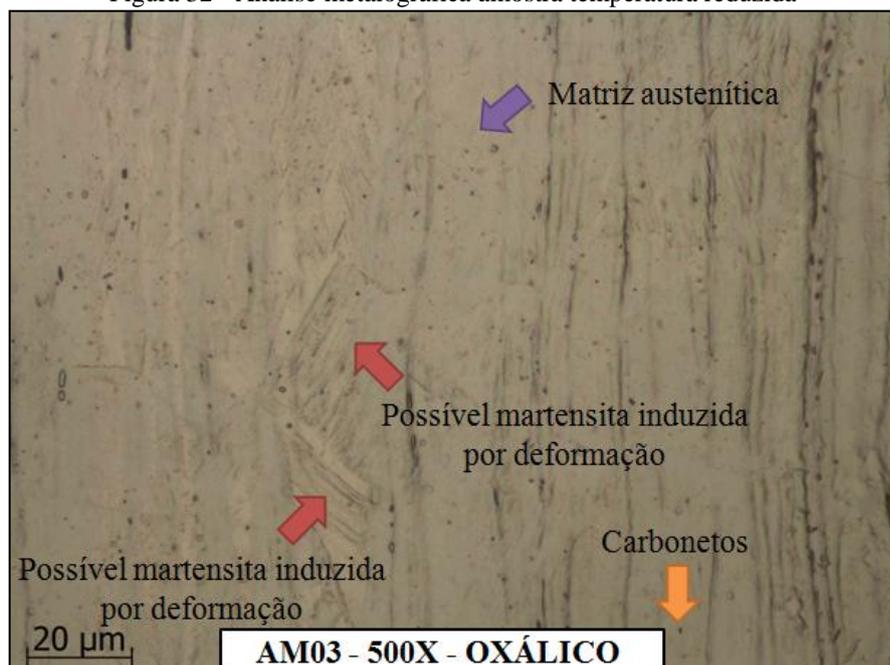
Figura 31 - Análise metalográfica amostra temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A figura 32 (amostra deformada a temperatura reduzida) apresenta microestrutura com grãos de austenita, martensita e carbonetos dispersos na matriz.

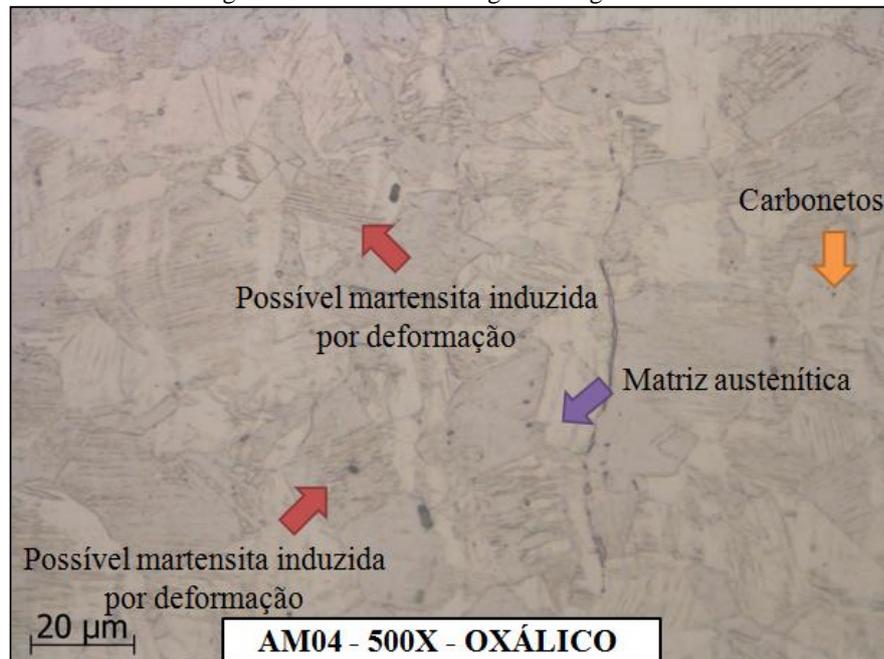
Figura 32 - Análise metalográfica amostra temperatura reduzida



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A figura 33 (amostra região da trinca) apresenta microestrutura com grãos de austenita, martensita.

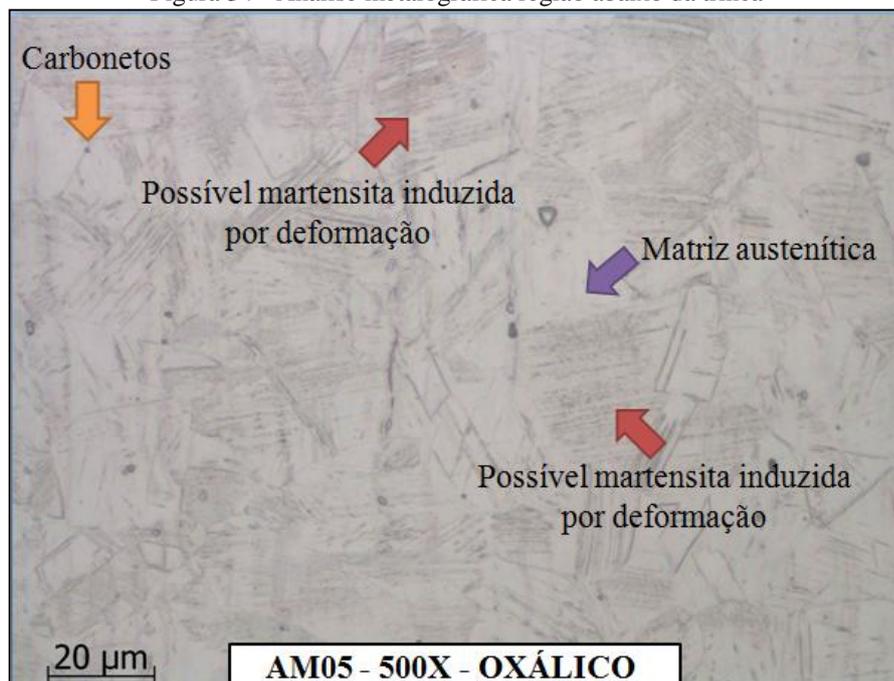
Figura 33 - Análise metalográfica região trinca



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A figura 34 apresenta microestrutura com grãos de austenita, martensita e carbonetos dispersos na matriz, sendo esta a amostra retirada da região inferior à região da trinca.

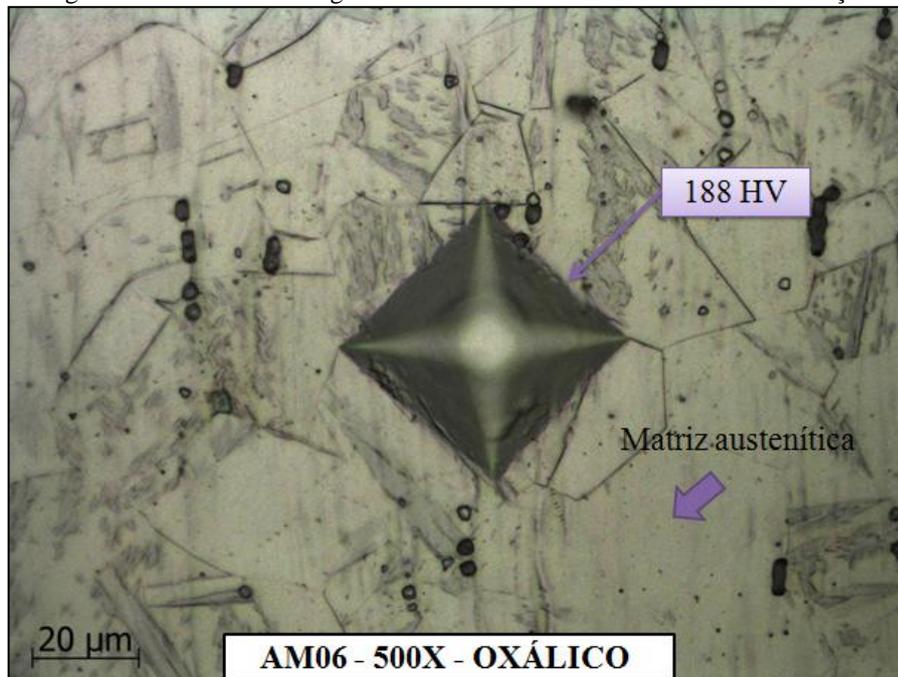
Figura 34 - Análise metalográfica região abaixo da trinca



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

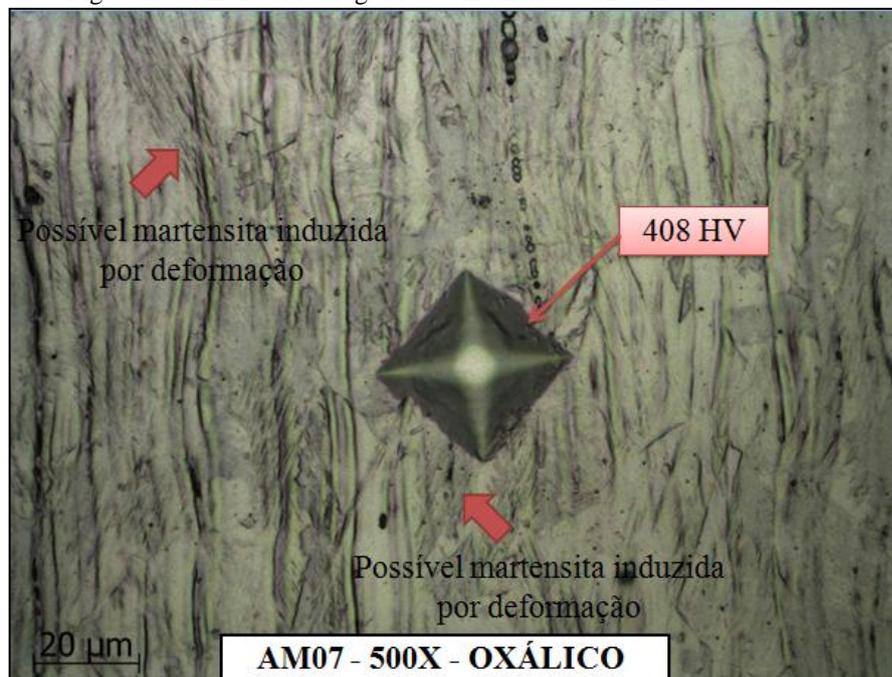
Abaixo segue as análises de microdureza realizadas na chapa sem deformação (figura 35) e na amostra tracionada em laboratório (figura 36).

Figura 35 - Análise metalográfica com microdureza amostra sem deformação



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Figura 36 - Análise metalográfica com micro dureza amostra deformada

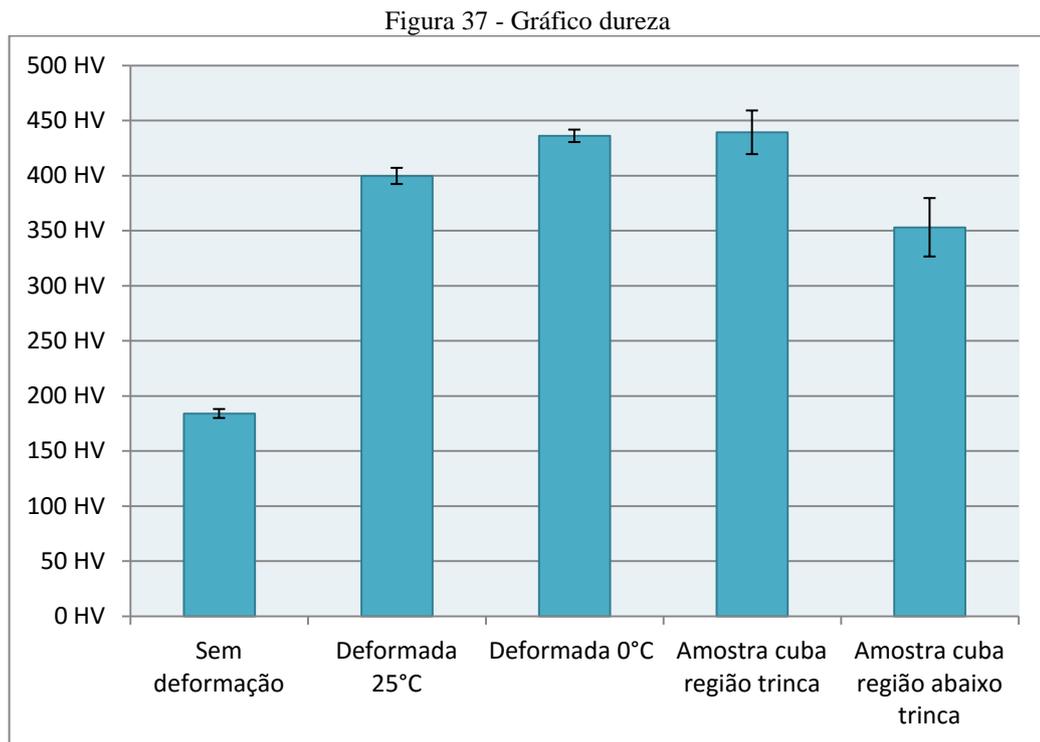


Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Comparando as amostras acima é possível identificar um aumento significativo da dureza quando analisada uma região com presença de martensita induzida por deformação.

4.3 DUREZA

O gráfico abaixo (figura 37) apresenta a média de valores de dureza encontrados nos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração à temperatura ambiente, à baixa temperatura, na chapa sem deformação e nas amostras retiradas de uma cuba que apresentou trincas em campo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A dureza encontrada para as amostras sem deformação, com uma média de 184 HV, ficou próximo ao informado pelo fabricante (161 HV).

Fazendo uma comparação com Andrade et al. (2003), é possível destacar as durezas encontradas acima de 300 HV para as amostras que sofreram deformações, como situações onde a presença de martensita é esperada.

Entre os valores de dureza encontrados para as amostras tracionadas até a ruptura, é possível perceber um aumento da dureza quando deformadas a temperatura reduzida (436HV), possivelmente devido à maior presença de martensita, contra uma dureza média de 400 HV das amostras tracionadas a temperatura ambiente.

É possível destacar também a elevada dureza encontrada na região da trinca, ficando acima até mesmo do encontrado nas peças deformadas até a ruptura, chegando a um valor máximo de 461 HV.

4.4 DEFORMAÇÕES

Segue abaixo a tabela 9 e a figura 38, com as deformações verdadeiras encontradas durante a estampagem de duas cubas do modelo AE-60L. Os valores medidos nas grades das cubas estão presentes no Apêndice C.

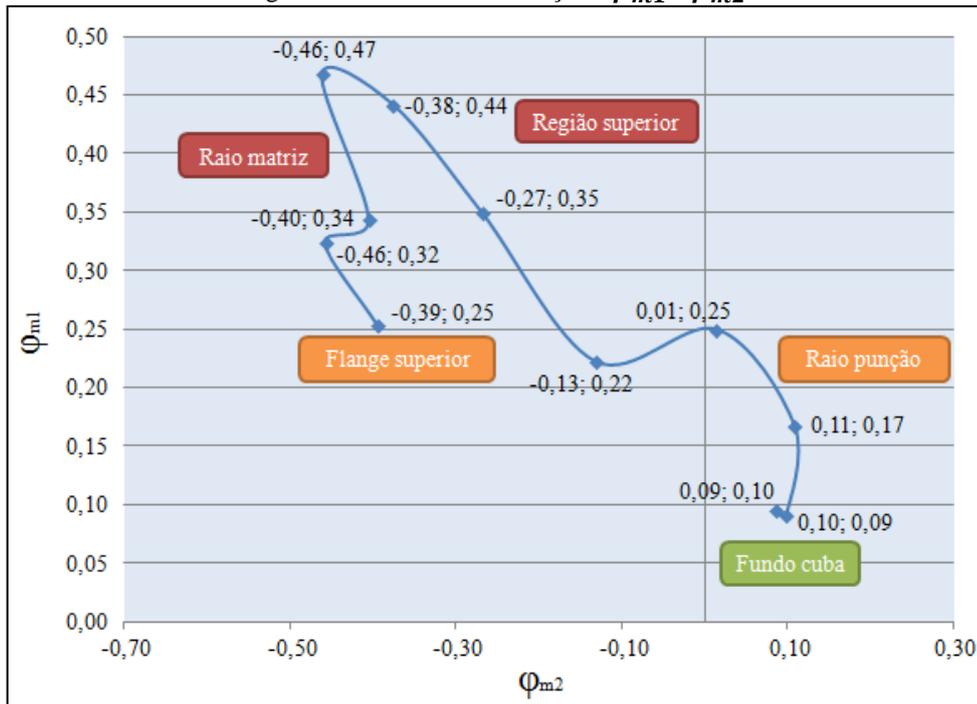
Tabela 9 - Deformação verdadeira cubas

Região	Cuba 1		Cuba 2		Média	
	φ_1	φ_2	φ_1	φ_2	φ_{m1}	φ_{m2}
Fundo	0,10	0,08	0,10	0,09	$0,10 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,01$
Início raio punção	0,09	0,10	0,09	0,10	$0,09 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,01$
Raio punção	0,17	0,11	0,17	0,11	$0,17 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$
Final raio punção	0,24	0,01	0,26	0,02	$0,25 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
Região inferior	0,18	-0,12	0,26	-0,15	$0,22 \pm 0,06$	$-0,13 \pm 0,02$
Região central	0,34	-0,27	0,36	-0,27	$0,35 \pm 0,02$	$-0,27 \pm 0,01$
Região superior	0,44	-0,37	0,45	-0,39	$0,44 \pm 0,01$	$-0,38 \pm 0,01$
Início raio matriz	0,47	-0,48	0,47	-0,44	$0,47 \pm 0,01$	$-0,46 \pm 0,02$
Raio matriz	0,32	-0,41	0,36	-0,40	$0,34 \pm 0,02$	$-0,40 \pm 0,01$
Final raio matriz	0,30	-0,46	0,35	-0,45	$0,32 \pm 0,02$	$-0,46 \pm 0,01$
Flange	0,24	-0,38	0,27	-0,41	$0,25 \pm 0,01$	$-0,39 \pm 0,02$

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Onde φ_1 corresponde às deformações no sentido da altura do componente, φ_2 na direção da largura e φ_m a média das deformações.

Figura 38 – Gráfico deformações φ_{m1} e φ_{m2}

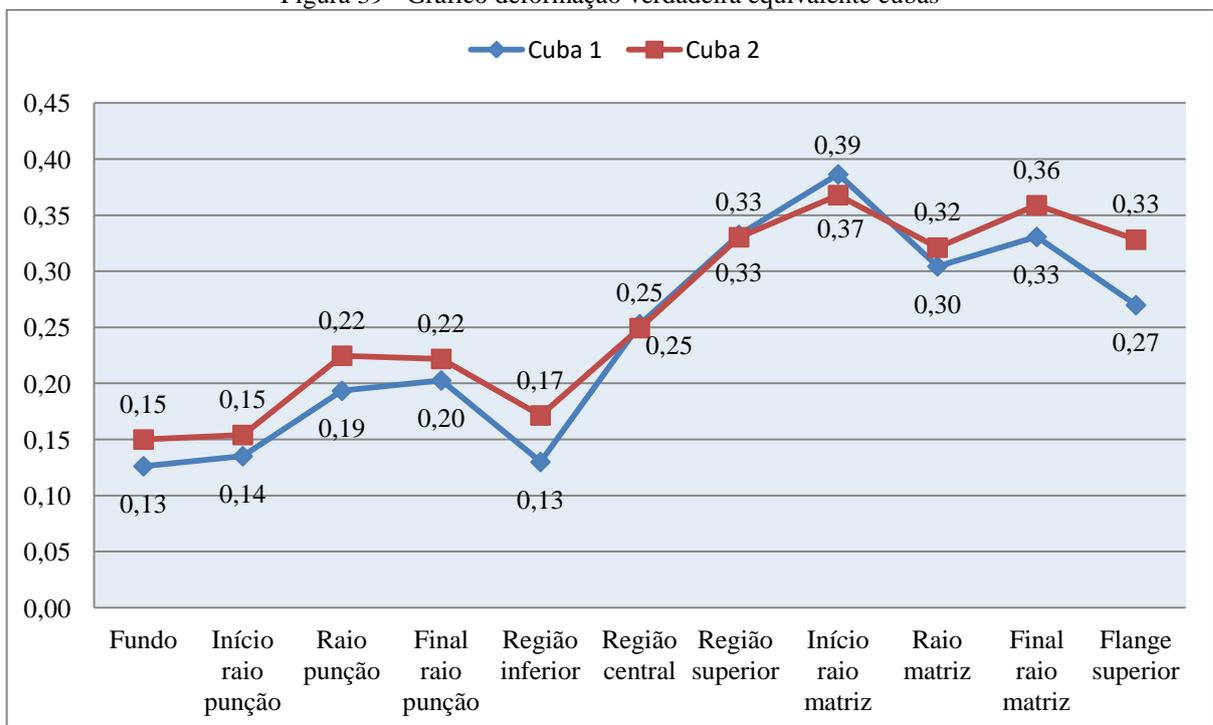


Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Na região superior das cubas, assim como na região do raio da matriz, é possível perceber o comportamento típico da estampagem profunda indicado por Schaeffer (2004), onde a deformação φ_1 se aproxima de $-\varphi_2$. Já a região do fundo da cuba apresentou o comportamento de estiramento biaxial, com φ_1 se aproximando de φ_2 .

Também é possível perceber que os locais onde ocorreram as maiores deformações são nas regiões do raio da matriz, na região imediatamente abaixo ao raio e no flange superior, conforme figura 39, justamente onde ocorre o surgimento de trincas durante o uso do componente.

Figura 39 - Gráfico deformação verdadeira equivalente cubas



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Pode ser visto que o fundo da cuba e a região do início do raio do punção não apresentaram deformações significativas. O aumento das deformações ocorreu de forma crescente da região inferior até chegar à região do raio da matriz, diminuindo ligeiramente na região onde atua o prensa-chapa.

Fazendo uma comparação das deformações equivalentes na figura 39 com o comportamento indicado por Takuda et al. (2003) (figura 16) da fração volumétrica de martensita, é possível perceber o mesmo comportamento das curvas, havendo picos no raio do punção e chegando ao valor máximo entre a região superior do componente e o raio da matriz.

Comparando os resultados obtidos nas duas cubas pode ser percebida uma maior deformação na região do início do raio da matriz na cuba 1. No entanto, ambas as cubas apresentaram as maiores deformações na região superior do componente.

Neste ensaio também podem ser percebidos riscos verticais, especialmente na lateral da cuba, sendo necessário realizar um polimento na região do raio da matriz.

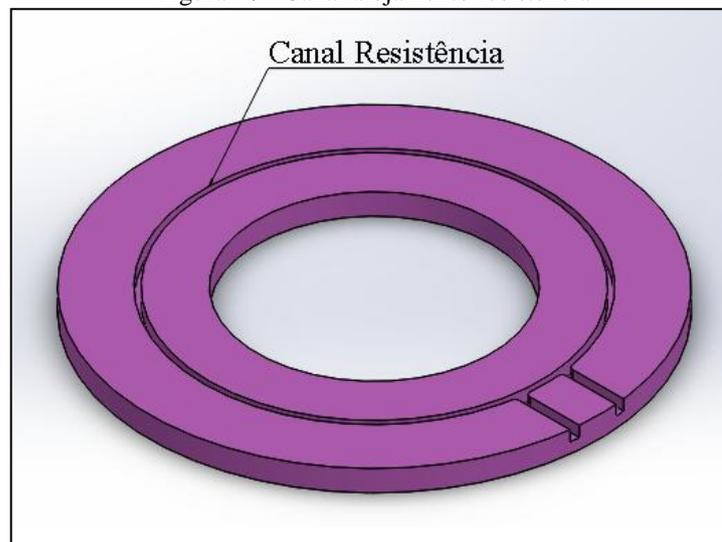
4.5 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO NA FERRAMENTA

Durante a realização deste trabalho foi possível identificar o uso da estampagem a morno, com temperaturas próximas a 100°C como uma alternativa para suprimir a transformação martensítica induzida por deformação.

Na adaptação da ferramenta atual a este processo, seria usinado um canal para acomodar uma resistência elétrica no postigo existente na matriz. Para incluir uma resistência no prensa chapa seria utilizada a mesma técnica, conforme figura 40.

Todas as peças usinadas seriam fabricadas no setor de ferramentaria da empresa G.Paniz.

Figura 40 - Canal alojamento resistência

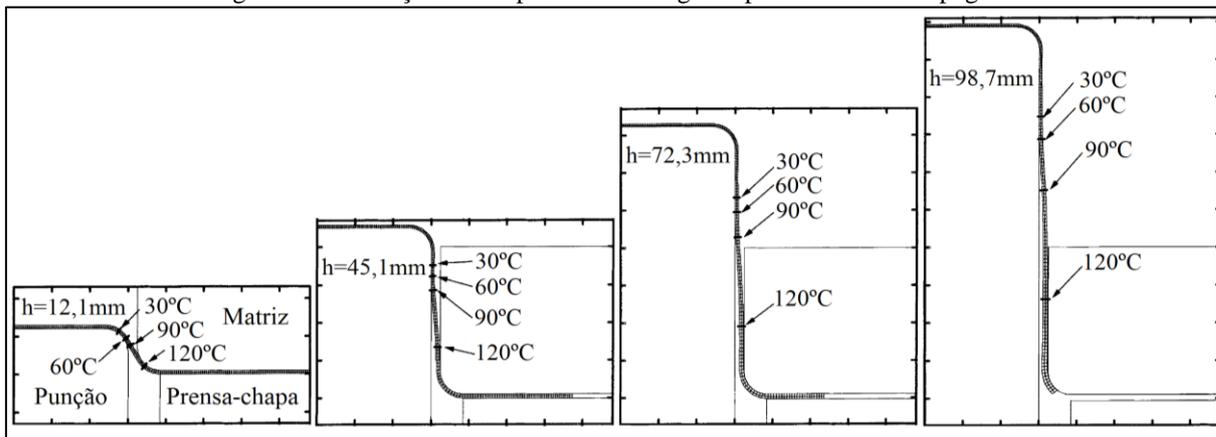


Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O controle da temperatura seria feito através de um controlador digital, que monitoraria termopares instalados na matriz e no prensa-chapa. Este controlador ligaria e desligaria contadores que alimentariam as resistências com energia elétrica. As resistências seriam dimensionadas e fabricadas por empresa especializada.

O uso da refrigeração do punção é de fundamental importância, produzindo o gradiente de temperaturas ilustrado na figura 41. Esta redução da temperatura próxima ao raio do punção impede que o material rompa devido à perda de resistência mecânica gerado pelo aumento da temperatura. (TAKUDA et al., 2003).

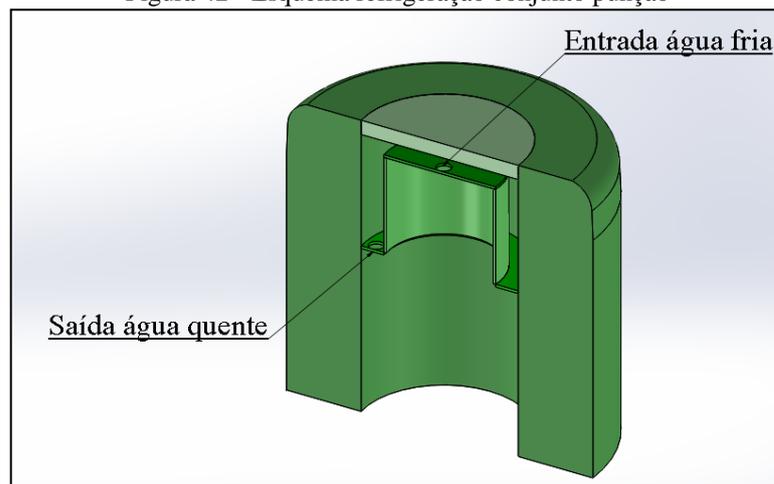
Figura 41 – Variação da temperatura ao longo do processo de estampagem



Fonte: Adaptado de Takuda et al. (2003).

Para a adaptação da ferramenta atual será utilizada água a 5°C como fluido refrigerante circulando na região superior do punção (figura 42). O resfriamento do fluido será feito utilizando um resfriador de água produzido pela empresa G.Paniz.

Figura 42 - Esquema refrigeração conjunto punção

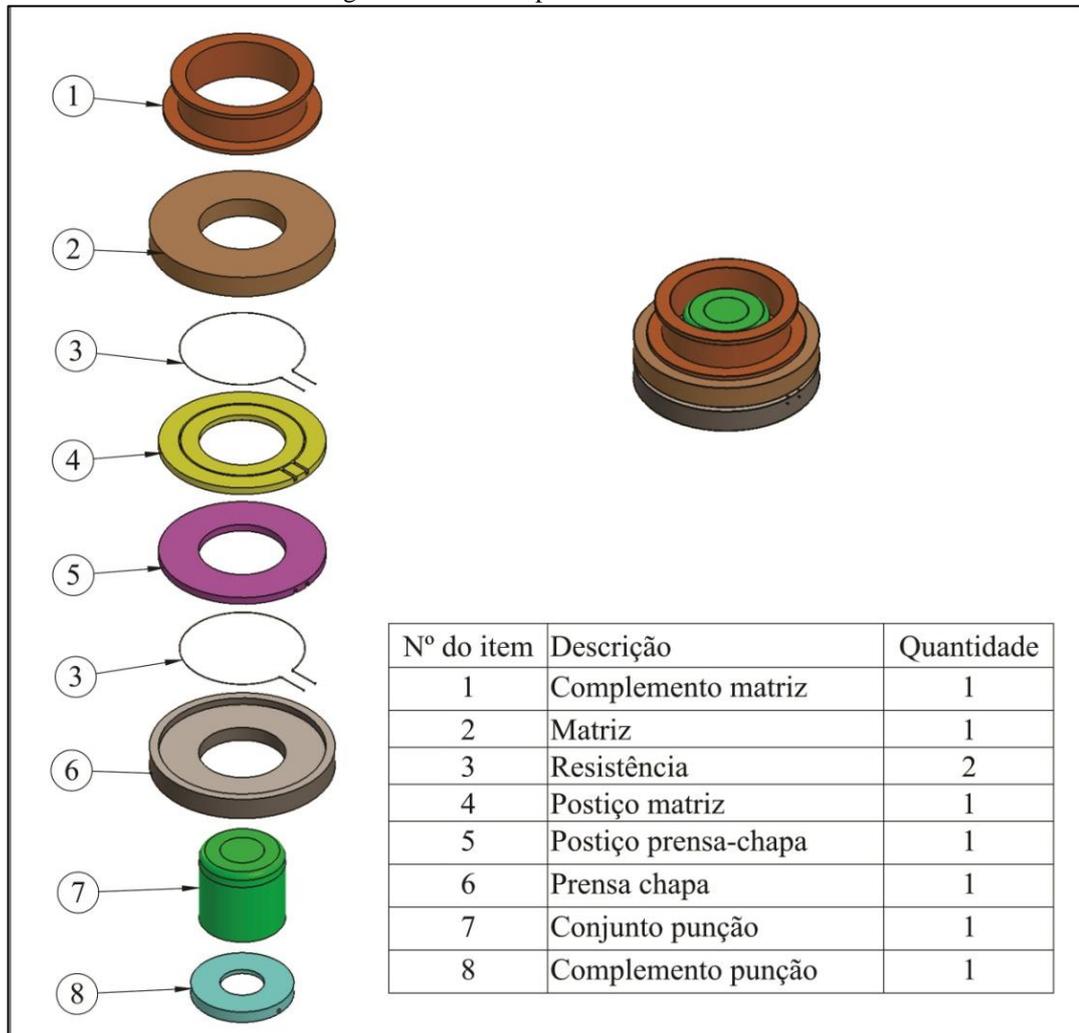


Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O projeto final da alteração na ferramenta seria feito com o Software CAD SolidWorks 2012, no setor da engenharia de produto. A montagem final da ferramenta seria feita no setor de ferramentaria da empresa G.Paniz, em conjunto com o setor da montagem elétrica, responsável pelas ligações elétricas do sistema de aquecimento.

Um projeto com os principais componentes da ferramenta com a alteração proposta se encontra no Apêndice D deste trabalho. A seguir a figura 43 com a vista explodida da proposta de ferramenta.

Figura 43 - Vista explodida da ferramenta



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

5 CONCLUSÕES

Através da revisão bibliográfica foi possível uma melhor compreensão do processo de estampagem profunda, assim como sobre o comportamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 neste processo.

O aço inoxidável AISI 304 apresenta instabilidade da fase austenítica quando submetido a deformações em baixa temperatura, ocorrendo alteração de parte da estrutura para martensita, podendo ocasionar o fenômeno do *Delayed Cracking*, com o surgimento de trincas.

Os resultados encontrados nos ensaios de tração ficaram dentro do especificado pela literatura e próximos ao declarado pelo fabricante.

Com a medição das deformações ao longo da altura da cuba, foi possível identificar as regiões onde ocorrem as maiores deformações, coincidindo com as regiões onde ocorre o surgimento de trincas.

A formação da martensita nas amostras ensaiadas em laboratório e da cuba que apresentou trincas pode ser verificada através da relação entre as análises metalográficas e os ensaios de dureza realizados nas amostras.

É possível considerar o processo de estampagem a morno, com temperaturas próximas a 100°C como uma alternativa para a fabricação do componente, suprimindo a transformação de fase austenita para martensita e os seus efeitos indesejáveis.

Este processo ainda pode ser empregado em outros produtos fabricados pela empresa G.Paniz, como cubas de bateadeiras ou amassadeiras rápidas, onde o β é maior que o permitido para uma única operação de estampagem, ou quando o componente fabricado através de outros processos de fabricação como calandragem, solda e posterior processo de acabamento.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a quantificação da martensita por meios magnéticos através do uso de um ferritoscópio.

Em relação aos ensaios realizados para determinar as deformações, poderiam ser utilizadas grades com um diâmetro maior, a fim de reduzir o erro proporcional nas medições. Também poderia ser traçada a CLC do material.

REFERÊNCIAS

- AGNIESZKA, K. et al. Effect of deformation-induced martensite on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of X5CrNi18-8 stainless steel. **International Scientific Journal**, v.43, p. 42-53, mai. 2010.
- AGUIAR, D. J. M. de. **Estudo da formação e reversão de martensita induzida por deformação na austenita de dois aços inoxidáveis duplex**. 2012. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2012.
- ALTAN, T. **Metal Forming Handbook**. Springer-Verlag: Berlin, 1998.
- ANDRADE, M. S. et al. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003, Uberlândia. **Avaliação da estampabilidade de dois aços inox austeníticos**. Uberlândia: Femec, 2003.
- ANTUNES, A. E. B.; ANTUNES, L. M. D. Comportamento plástico do aço inoxidável austenítico em baixa temperatura. **Revista Escola de Minas**. p. 141-147, mar. 2007.
- ANTUNES, A. E. B.; ANTUNES, L. M. D.; SAMPAIO, M. Comportamento plástico no escoamento de aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v.30 n.1-2, p. 18-23, 2011.
- ARRUDA, R. P. de et al. Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva limite de conformação. **Corte e Conformação**, São Paulo, ano IV, n.37, p. 64, abr. 2008.
- BRITO, O. **Estampos de formar: Estamparia de Metais**. São Paulo: Hemus, 2005.
- CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002.
- CARBÓ, H. M. **Aços inoxidáveis: Aplicações e especificações**. ArcelorMittal Inox Brasil. São Paulo, 2008.
- CARDOSO, M. C. et al. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013, Itatiaia. **Avaliação da curva limite de conformação de um aço inoxidável austenítico**. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas: Rio de Janeiro, 2013.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DAVIS. J. R. **Metals Handbook Desk Edition**. ASM International: Ohio, 1998.
- DOEGE, E; BEHRENS, B, A. **Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen**. Springer, 2007.

FERRARINI, J. L. **Caracterização de materiais para o processo de estampagem.** 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2004.

GOMES, T.E. **Efeitos da temperatura de laminação na formação e na reversão de martensita induzida por deformação no aço inoxidável austenítico AISI 304L.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2012.

GONZALES, B. M. et al. **Efeito do gradiente de martensita induzida por deformação sobre o fenômeno de delayed cracking em aços inoxidáveis austeníticos.** Revista Escola de Minas, p. 169-173, mar. 2007.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, structure, and performance.** ASM International: Ohio, 2005.

LISCHKA, F. T. **Efeito de cobre e da deformação no efeito TRIP de um aço inoxidável austenítico AISI 304, avaliado por diversos métodos de análise.** 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2013.

MORAIS, N. W. S.; VIANA, N. F.; ABREU, H. F. G. de. Comparação entre as técnicas de segmentação de imagens, difração de raios x e ferritoscopia na quantificação da martensita induzida por deformação no aço AISI 301L. **Revista Matéria**, v. 16, n. 4, p. 836 – 841, 2011.

MORI, K.; MAKI, S.; TANAKA, Y. Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, p. 209-212, 2005.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços inoxidáveis austeníticos.** São Paulo: Hemus, 1994.

PAPULA, S. **Delayed cracking of α metastable low-nickel austenitic stainless steels.** 2015. 95f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Aalto. Departamento de Engenharia de Design e Produção, Helsinki, 2015.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia mecânica: Tecnologia da deformação plástica.** Lisboa: Escolar Editora, 2005.

RUGANI, L. L.; MESQUITA, E. L. A. **Conformação de aços inoxidáveis.** Acesita. Belo Horizonte, 1997.

SANTOS, M. R. **Efeito do Nitrogênio e do Cobre na Formação da Martensita em Aços Inoxidáveis Austeníticos e sua Influência sobre o Fenômeno de Delayed Cracking.** 2008. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2008.

SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M. S. Avaliação dilatométrica da reversão das martensitas induzidas por deformação em um aço inoxidável austeníticos do tipo ABNT 304. **Revista Matéria**, v. 13, p.587-596, 2008.

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SILVA, A. L. V. da C.; MEI, P. R. **Aço e ligas especiais**. 3. Ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVEIRA, V. H. M.; SCHAEFFER, L. **Estampagem de chapas de alta resistência para uso automotivo**. Siderurgia Brasil, v.12, p.34-36, 2011.

STACHOWICZ, F.; TRZEPIECINSKI, T.; PIEJA, T. Warm forming of stainless steel sheet. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, 2010.

SOLOMON, N.; SOLOMON, I. Deformation induced martensite in AISI 316 stainless steel. **Revista de Metalurgia**, v. 46, p.121-128, abr. 2010.

TAKUDA, H. et al. Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v.143-144, p. 242-248, dez. 2003.

TSCHAETSCH, H. **Metal forming practise: Processes-machines-tools**. Vieweg Verlag: Wiesbaden, 2005.

APÊNDICE A – DESENHO CORPO ALUMÍNIO

Fechamento inferior

Fechamento superior

Montagem

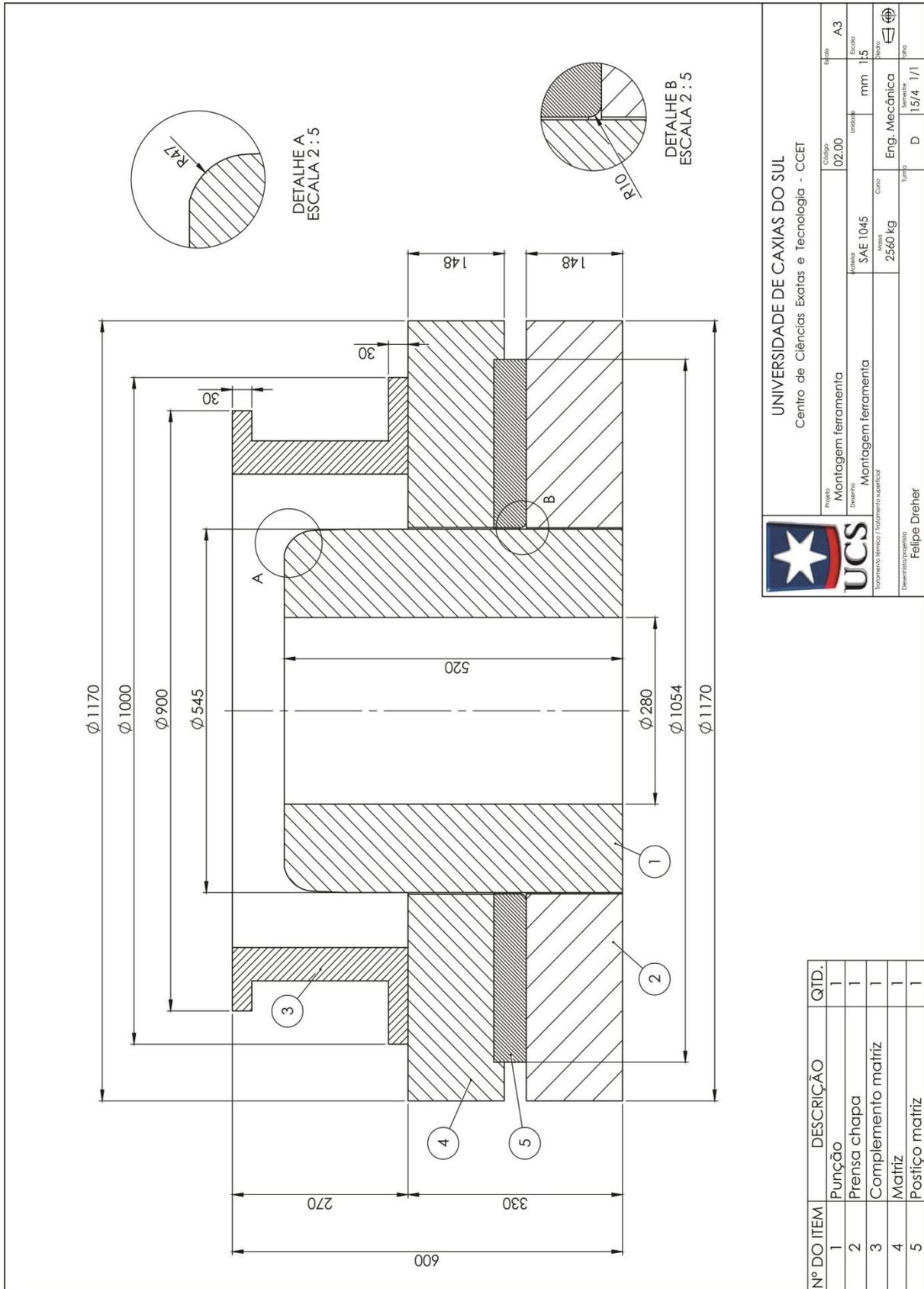
6,3 / (3,2)

2	Fechamento Inferior	1
1	Fechamento Superior	1
IT	Descrição	QT.

-Chanfros não cotados 1x45°.

Uso	QT.	Uso	QT.	Uso	QT.	Treatamento Superf.:
Ensaio	01					
Tolerâncias admissíveis para dimensões lineares sem indicação conforme NBR ISO 2768-1 Classe de Tolerância: até 10 3 a 6 6 a 30 30 a 120 120 a 400 400 a 1000 1000 a 2000 2000 a 4000 Fino: ±0,05 ±0,05 ±0,1 ±0,15 ±0,2 ±0,3 ±0,5 - Médio: ±0,1 ±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2 ±2 Grosso: ±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2 ±2 ±3 ±4 Afastamento admis. para interv. de comprimentos em mm. do menor lado do ângulo corresp. NBR ISO 2768-K: até 10 10 a 50 50 a 120 120 a 400 acima 400 ±1° ±0°,30' ±0°,20' ±0°,10' ±0°,5'						
Des.	Felipe D.	01/03/2016	Escala:	Material:		
Apro.	Felipe D.	01/03/2016	1:2	Alumínio		
UCS UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL				Denominação: Bloco de Alumínio Ensaio de Tração		Código 01.00

APÊNDICE B – DESENHO FERRAMENTA ATUAL



UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Punção	1
2	Pressa chapa	1
3	Complemento matriz	1
4	Matriz	1
5	Postiço matriz	1

Projeto	Montagem ferramenta	Material	SAE 1045	Unidade	mm	Escala	1:5	Formato	A3
Desenho	Montagem ferramenta	Quantidade	2560 kg	Curso	Eng. Mecânica	Projeto		Revisão	
Titular do Projeto / Responsável Técnico		Tempo		Turno	D	Norma	15/4	Data	1/1
Desenhista responsável	Felipe Dreher								

APÊNDICE C – TABELAS MEDIÇÕES DEFORMAÇÕES

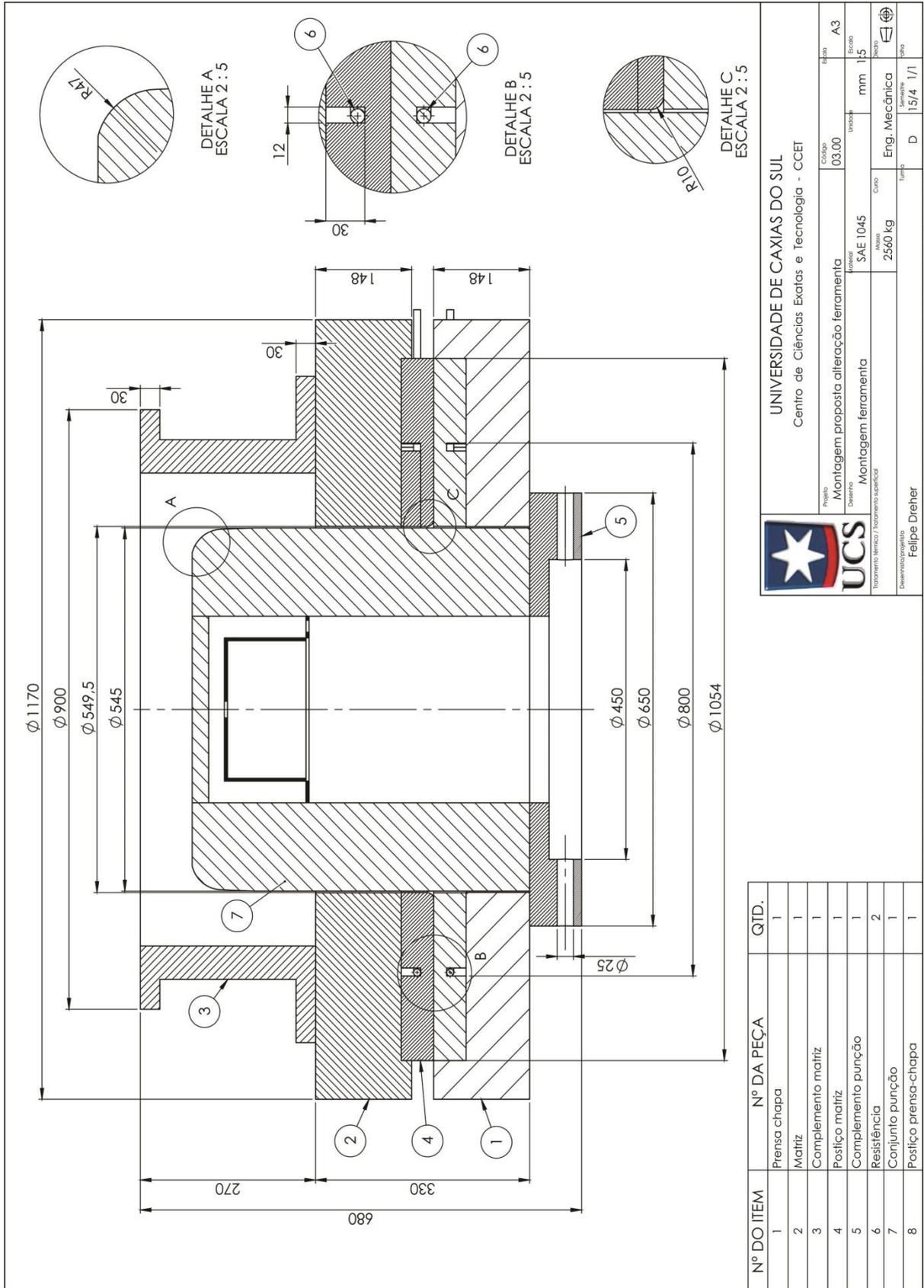
Cuba 1 - Medições grades externas [mm]

Região	Sentido 0° laminação		Sentido 45° laminação		Sentido 90° laminação	
	a	b	a	b	a	b
Fundo cuba	5,5	5,4	5,5	5,4	5,5	5,5
Início raio punção	5,6	5,5	5,4	5,5	5,5	5,5
Raio punção	5,8	5,5	5,9	5,5	6,0	5,7
Final raio punção	6,3	5,2	6,5	5,1	6,3	4,9
Região inferior	5,9	4,5	6,1	4,3	6,0	4,6
Região central	6,9	3,7	7,1	4,0	7,1	3,8
Região superior	7,8	3,5	7,8	3,4	7,7	3,5
Início raio matriz	7,8	2,9	7,9	3,2	8,3	3,2
Raio matriz	7,2	3,2	6,6	3,6	7,0	3,3
Final raio matriz	6,8	3,2	7,0	3,3	6,5	3,0
Flange superior	6,4	3,3	6,4	3,6	6,3	3,4

Cuba 2 - Medições grades externas [mm]

Região	Sentido 0° laminação		Sentido 45° laminação		Sentido 90° laminação	
	a	b	a	b	a	b
Fundo	5,5	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5
Início raio punção	5,5	5,5	5,4	5,5	5,5	5,6
Raio punção	5,9	5,6	5,8	5,6	6,1	5,5
Final raio punção	6,4	5,1	6,6	4,9	6,5	5,3
Região inferior	6,5	4,5	6,5	4,2	6,5	4,3
Região central	7,3	3,9	7,3	3,9	7,0	3,7
Região superior	7,8	3,5	8,1	3,3	7,6	3,4
Início raio matriz	7,8	3,0	8,1	3,3	8,1	3,3
Raio matriz	7,6	3,2	6,9	3,5	7,1	3,4
Final raio matriz	7,2	3,1	7,3	3,2	6,7	3,3
Flange superior	6,6	3,3	6,6	3,4	6,4	3,3

APÊNDICE D – DESENHO PROPOSTA ALTERAÇÃO FERRAMENTA



UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET

Projeto	03.00	Edição	A3
Montagem proposta alteração ferramenta	03.00	Unidade	mm
Desenho	SAE 1045	Material	1:5
Montagem ferramenta	SAE 1045	Estado	Eng. Mecânica
Instrumento Técnico / Instrumento Especial	2560 kg	Tipo	15/4 1/1
Desenhista/autor	Colaborador	Revisor	0002
Felipe Dreher			

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QTD.
1	Prensa chapa	1
2	Matriz	1
3	Complemento matriz	1
4	Posição matriz	1
5	Complemento punção	1
6	Resistência	2
7	Conjunto punção	1
8	Posição prensa-chapa	1

ANEXO B – CERTIFICADO CHAPA INOX 304 ESPESSURA 2,00 mm


CERTIFICADO DE QUALIDADE
 QUALITY CERTIFICATE

 Nº 83257613
 DATA 23.11.2015
 DATE

Página 1 de 1

CLIENTE
 CUSTOMER

PEDIDO INTERNO
 INTERNAL ORDER

NOTA FISCAL
 INVOICE

G PANIZ IND DE EQUIP P/ ALIMENTACAO

30280759

104530

CARACTERÍSTICAS GERAIS | GENERAL CHARACTERISTICS

Item	Descrição Description	Unidade Metálica Heat Number	Rem Internal Nº	Peso Weight
1	Chapa Inox. austenítico AISI 304 2,00 mm 1.240,00 mm 3.000,00 mm F3-LF,RECOZIDO,DECAPADO COM LE	562138H8001B	9829781	1.012
2				
3				
4				
5				

ANÁLISE QUÍMICA (% PESO) | CHEMICAL ANALYSIS (% WEIGHT)

Item	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	N2PPM	Ti%	Cu%	Nb%	Co%	Al%
1	0,0190	1,260	0,440	0,036	0,001	18,01	8,00	0,197	535	0,0029	0,2019	0,000	0,182	0,000
2														
3														
4														
5														

ENSAIOS DESTRUTIVOS | DESTRUCTIVE TESTS

Item	Lim. Resistência Tensile Strength (MPa)	Lim. Escoamento Yield Strength (MPa)	Alongamento Elongation (%)	Estricção Reduction of Area (%)	Tam. de Grão Grain Size (ASTM)	Oxálico Oxalic Test	Dureza Hardness				Dobramento Bending (°)	Estampabilidade Drawability Erichsen (mm)
							HRB	HV	HRC	HB		
1	671,00	316,00	55,00				82,06				Sim	
2												
3												
4												
5												

ENSAIOS DESTRUTIVOS | DESTRUCTIVE TESTS

Item	Flangeamento Flangeament	Achatamento Flattening	Achatamento Rev. Reverse Flattening	Dobramento Rev. Reverse Bending	Alargamento Flaring Test	Expansão Expansion Test
1						
2						
3						
4						
5						

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS | NON DESTRUCTIVE TESTS

	Raio X X Ray	Trat. Térm.	Teste Pneumático Pneumatic Test	Teste Hidrostático Eddy Current Hydrostatic Test	Rugosidade Roughness (µmRa)
1					
2					
3					
4					
5					

OBSERVAÇÕES | REMARKS

Item	
1	Atende Norma - Norma ASTM A-240
2	
3	
4	
5	

Certificamos que os resultados descritos acima disponíveis em nossos arquivos estão corretos e de acordo com as especificações em referência ou concessão autorizada.
 Material sem contaminação por radioatividade (Garantia enquanto estocado sob responsabilidade da APERAM INOX SERVIÇOS BRASIL LTDA).
 Material sem contaminação por mercúrio.

Caxias do Sul, 23 de Novembro de 2015

ANEXO C – RELATÓRIO ENSAIO DE TRAÇÃO

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos REGISTRO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

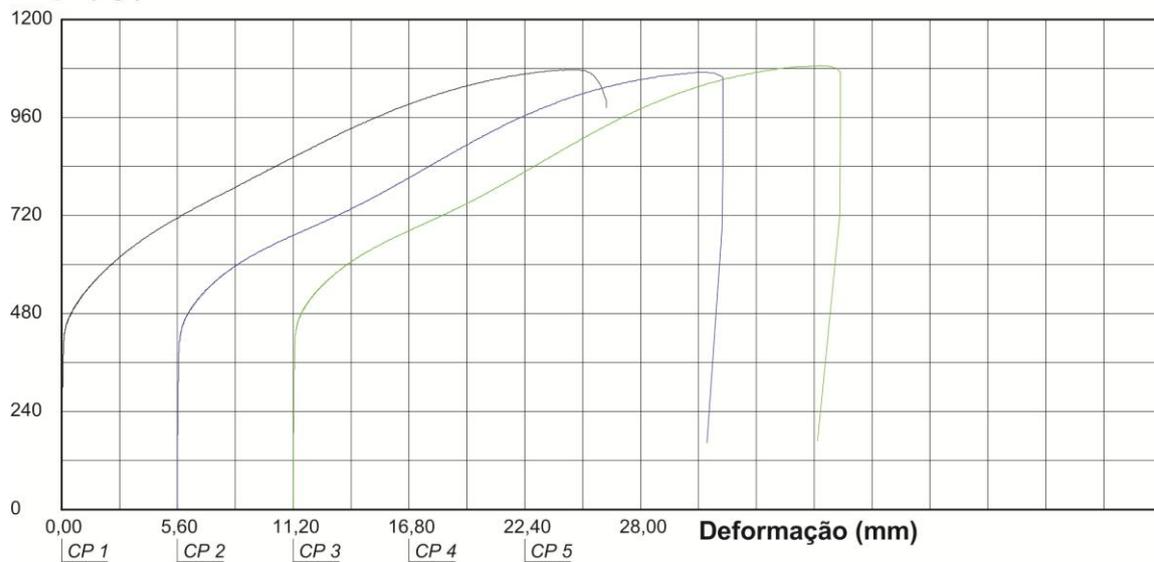
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: **Trd 6** Data: **23/10/2014** Hora: **15:15:57** Trabalho n° **0086**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **2T_TRAÇÃO RETANGULAR (com extensômetro)**
 Ident. Amostra: > Cliente: **Estágio Prof. Michels** Temp.(°C): **26** - Ident. n°: **02-05-08** S.S.: **260401/14** - 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 (mm)
CP 1	02	1,87	7,95	289,7	711,1	182201	50	76,4
CP 2	05	1,86	7,85	290,0	719,4	196453	50	75,6
CP 3	08	1,87	7,87	297,2	725,0	198296	50	75,4

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)



Observação:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: 03 amostras de aço comercial inox 304. Identificados por 02-(00°), 05-(45°), 08-(90°).