

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

Estudo do Processo de Estampagem para Materiais
Alternativos na Fabricação de um Componente para a
Indústria de Máquinas Agrícolas

Atilano Roberto Baú

Dissertação para obtenção do título de Mestre Em Engenharia

Porto Alegre

2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais-PPGEM

Estudo do Processo de Estampagem para Materiais Alternativos na Fabricação de um
Componente para a Indústria de Máquinas Agrícolas

Atilano Roberto Baú
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia,
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais -
PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre de Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2015

III

Dissertação para obtenção do Título de Mestre de Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora

Prof. Dr.Eng. Halstom Mozetic(UNIRITTER)

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito(UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha(UFRGS)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico às pessoas que são amantes da Engenharia, e se preocupam em utilizar as tecnologias para desenvolver produtos e processos contribuindo assim para o crescimento regional e nacional do nosso país.

AGRADECIMENTOS

À Deus que me possibilitou realizar esse trabalho.

À minha família pela compreensão e incentivo durante o desenvolvimento desse projeto.

Ao Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer, Orientador desse projeto, pela orientação, compreensão e dedicação oferecida ao longo do trabalho.

Ao Msc. Eng Uilian Boff, pelo valioso auxílio nos ensaios e nas simulações computacionais, bem como as recomendações bibliográficas.

A UFRGS pela disponibilidade dos seus recursos para uso nesse trabalho.

A Stara, pela compreensão na minha ausência, pelos corpos de prova e pela confiança dedicada.

A todos que me cercaram nesse período de pesquisa e desenvolvimento, meu muito obrigado.

Sumário

Agradecimentos.....	V
Sumário.....	VI
Lista de Figuras.....	VIII
Lista Tabelas.....	XI
Lista Símbolos.....	XII
Resumo.....	XIV
Abstract.....	XV
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivo	19
1.2. Justificativa	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Conformação de Chapas	21
2.2. Princípios do Processo de Estampagem	21
2.2.1 Tensão e Deformação no Processo de Estampagem.....	22
2.2.2 Tensão de Engenharia X Deformação Relativa	26
2.2.3 Curva de Escoamento	28
2.2.4 Índice de Anisotropia	30
2.2.5 Curva Limite de Conformação.....	32
2.2.6 Índice Erichsen.....	34
2.2.7 Capacidade de Embutimento do Material.....	34
2.3. Características dos Aços Inoxidáveis AISI 201 e AISI 304	36
2.3.1 Aço Inoxidável AISI 201	39
2.3.2 Aço Inoxidável AISI 304	41
2.4. Análise do Processo de Estampagem por Elementos Finitos	42
2.5. Ensaio das Propriedades Mecânicas dos aços Inoxidáveis AISI 201 e 304.....	43

2.5.1	Determinação Curva de Engenharia x Deformação Relativa	43
2.5.2	Determinação da Curva de Escoamento	43
2.5.3	Determinação do Índice de Anisotropia	44
2.5.4	Ensaio Erichsen.....	44
2.5.5	Ensaio de Dureza	45
2.5.6	Determinação da Composição Química.....	45
2.5.7	Simulação Computacional do Processo de Estampagem.....	46
3.	PROCEDIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
3.1	Caracterização dos Materiais.....	47
3.2	Simulação Computacional para a Estampagem do Aço Inoxidável AISI 201 e 304 53	
3.2.1	Força de Estampagem na Simulação Computacional.....	55
3.3	Procedimento de Estampagem do Disco	55
3.4	Estampagem dos Discos em aço Inoxidável AISI 201 e 304	58
4.	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	63
4.1	Curva Tensão de Engenharia x Deformação Relativa.....	63
4.2	Curva de Escoamento	66
4.3	Índice de Anisotropia.....	67
4.4	Índice Erichsen	69
4.5	Dureza.....	70
4.6	Composição Química.....	71
4.7	Simulação Computacional do Processo de Estampagem	72
5.	CONCLUSÕES.....	75
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
7.	SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS	77

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição de cromo e níquel para a série 200 e 300. Fonte: ISSF, 2005...	18
Figura 2 – Disco Distribuidor Fertilizantes fabricado em aço inoxidável AISI 304	19
Figura 3 – Detalhe da região rompida para o Disco Distribuidor Fertilizantes fabricado em aço inoxidável AISI 201.....	20
Figura 4 – Esquema do processo de estampagem. Fonte: Oliveira, 2003.....	21
Figura 5 – Desenho esquemático mostrando força e área inicial. Fonte: Schaeffer, 2004.....	22
Figura 6 – Desenho esquemático para deformação no comprimento. Fonte: Schaeffer, 2004.....	22
Figura 7 – Componente estampado, com uma linha definindo a região crítica. Fonte:Schaeffer, 2004	24
Figura 8 – Desenho esquemático do teste para determinação das deformações verdadeiras. Fonte: Campos et al., 2006	25
Figura 9 – Em (a), círculo antes da deformação, em (b), círculo depois da deformação. Fonte: Cavaler, 2010	25
Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: Ferrarini, 2004	26
Figura 11 - Curva tensão de engenharia para o aço inoxidável AISI 201 e para o aço inoxidável AISI 304. Fonte: Taylan et al.,1998	27
Figura 12 - Diagrama tensão com curva de engenharia(convencional) e verdadeira. Fonte: Schaeffer, 2004	28
Figura 13 – Anisotropia média ou normal. Fonte:Scheaffer, 2004.....	32
Figura 14 – Sentido de laminação para corpos de prova no ensaio de anisotropia. Fonte:Schaeffer, 2004	32
Figura 15 - Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada. Fonte: Keeler, 1994.....	33
Figura 16 - Representação esquemática dos equipamentos utilizados no ensaio Erichsen. Fonte: Hosford; Caddel, 2007.	34
Figura 17 – Representação esquemática punção disco e copo embutido. Fonte: Ferrarini, 2004.....	35
Figura 18 – Microestrutura aço inoxidável AISI 304, aumento 50x. Fonte: Nikulin e Kaibyshev, 2011.....	38

Figura 19 – Fração volumétrica de martensita. Fonte: Tavares et al., 2009.	38
Figura 20 – Microdureza. Fonte: Tavares et al., 2009.	39
Figura 21 - Equipamento Emic DL60000, utilizado no ensaio de tração, anisotropia e ensaio Erichsen. Fonte: UFRGS	44
Figura 22 – Medição da altura h no ensaio Erichsen. Fonte: Hosford; Caddel, 2007. ...	45
Figura 23 - Durômetro Microtest 737, utilizado para ensaio de dureza. Fonte: Stara	45
Figura 24 - Espectômetro Brucker Q4 Tasman. Fonte: Stara	46
Figura 25 – Força X Deformação Absoluta no Comprimento	47
Figura 26 - Curva tensão de engenharia x deformação relativa aço inoxidável AISI 201 e AISI 304	48
Figura 27 - Curva de escoamento aço inoxidável AISI 201 e AISI 304	49
Figura 28 – Corpos de prova para ensaio Erichsen.....	51
Figura 29- Ensaio Erichsen aço inoxidável AISI 201	51
Figura 30 - Ensaio Erichsen aço inoxidável AISI 304	51
Figura 31 – Representação do corpo de prova rompido na finalização do ensaio Erichsen.....	52
Figura 32 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 201. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.....	54
Figura 33 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 304. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.....	54
Figura 34 – Força de estampagem para os aços estudados	55
Figura 35 - Prensa Dan-Press 800T, utilizada na estampagem. Fonte: Stara.....	56
Figura 36 – Ferramenta para estampagem do blank	56
Figura 37 – Blank preparado para estampagem.....	57
Figura 38 – Blank posicionado na ferramenta	57
Figura 39 – Componente estampado na ferramenta.....	58
Figura 40 – Desenho esquemático do andamento do processo.....	58
Figura 41 – Blank para estampagem.....	59
Figura 42 - A) peça estampada em aço inoxidável AISI 201. B) peça estampada em aço inoxidável AISI 304	59
Figura 43 – Em A, Peça estampada. Em B detalhe mostrando a região onde foram medidas as deformações verdadeiras.	60

Figura 44 – Grade utilizada para medição das deformações verdadeiras no comprimento e largura, $\varphi_1[-]$ e $\varphi_2[-]$	60
Figura 45 – Em A, deformação verdadeira aço inoxidável AISI 201, em B deformação verdadeira aço Inoxidável AISI 304	62
Figura 46 – Curva tensão de engenharia aço inoxidável AISI 201 e AISI 304 ensaiados.....	65
Figura 47 - Curva tensão de engenharia aço inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012).....	65
Figura 48 – Curva de escoamento aço inoxidável AISI 201 e AISI 304 ensaiados.....	66
Figura 49 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 201. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.....	72
Figura 50 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 304. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.....	73
Figura 51 – Peça estampada mostrando a região de medição das deformações	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Composição química aço inoxidável AISI 201. Fonte: ASTM A240	40
Tabela 2 – Propriedades mecânicas aço inoxidável AISI 201. Fonte: ASTM A240.....	40
Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável AISI 304. Fonte: ASTM A240	41
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço Inoxidável AISI 304. Fonte: ASTM A240 ..	42
Tabela 5 - Resultados Propriedades Mecânicas	48
Tabela 6 - Resultados ensaio de anisotropia	50
Tabela 7 - Índice Erichsen.....	52
Tabela 8 - Resultados do ensaio de dureza	53
Tabela 9 - Resultados do ensaio de composição química	53
Tabela 10 – Medição das deformações verdadeiras no comprimento e largura, $\varphi_1[-]$ e $\varphi_2[-]$	61
Tabela 11 – Cálculo da deformação verdadeira na espessura $\varphi_3[-]$	61
Tabela 12 – Propriedades Mecânicas Ensaio de Tração	63
Tabela 13 – Propriedades Mecânicas aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304. Fonte: ASTM A240.....	63
Tabela 14 - Propriedades Mecânicas aço Inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012).....	64
Tabela 15 – Equações para Tensão de Escoamento.....	67
Tabela 16 - Resultados Índice de Anisotropia aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304	68
Tabela 17 - Resultados Índice de Anisotropia aço Inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012)	69
Tabela 18 – Resultados Ensaio Erichsen para aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304.....	69
Tabela 19 – Resultados Ensaio de Dureza para Aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304, comparado com a norma ASTM A240	70
Tabela 20 – Resultados Composição Química Aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304 ...	71
Tabela 21 – Composição Química Aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304. Fonte: ASTM A240.....	71
Tabela 22 - Composição Química Aço Inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012).....	72

Lista de Símbolos

A = Área [mm^2];

A_0 = Área da secção inicial [mm^2];

a = Comprimento da elipse [mm];

b = Largura da elipse [mm];

b_0 = Largura inicial [mm];

b_1 = Largura final [mm];

C = Constante da expressão matemática da curva de escoamento $kf = C\varphi^n$ [MPa];

d = Diâmetro do punção [mm];

d_0 = Diâmetro do círculo antes da deformação [mm];

D = Diâmetro do flange no momento da força máxima [mm];

D_0 = Diâmetro do disco [mm];

E = Módulo de elasticidade [MPa];

F = Força [N];

h = altura máxima até a deformação medida no ensaio Erichsen [mm];

kf = Tensão de escoamento [MPa];

l = Comprimento instantâneo [mm];

l_0 = Comprimento inicial [mm];

l_1 = Comprimento final [mm];

n = Índice de encruamento do material [-];

r = Índice de anisotropia [-];

r_m = Índice de anisotropia média [-];

R_m = Limite de Resistência [MPa];

s_0 = Espessura inicial da chapa [mm];

s_1 = Espessura final da chapa [mm];

V_1 = Volume final [mm^3];

V_0 = Volume inicial [mm^3];

Símbolos Gregos

φ_{eq} = Deformação equivalente [-];

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ = Deformação verdadeira na direção 1, 2, 3;

ε = Deformação relativa [-];

ε_s = Deformação relativa na espessura [-];

ε_b = Deformação relativa na largura [-];

ε_l = Deformação relativa no comprimento [-];

β = Relação de estampagem [-];

β_{adm} = Relação admissível de estampagem [-];

σ_e = Limite de escoamento no diagrama σ x ε [MPa];

σ = Tensão normal [MPa];

μ = Coeficiente de atrito [-];

Δb = Deformação absoluta na largura [mm];

Δh = Deformação absoluta na altura [mm];

Δl = Deformação absoluta no comprimento [mm];

Δr = Índice de anisotropia planar [-];

Δs = Deformação absoluta na espessura [mm];

Resumo

No presente trabalho, a conformabilidade do aço inoxidável AISI 201 foi comparada com o aço inoxidável AISI 304. O aço inoxidável AISI 201 é uma liga baixo níquel ligado com manganês e nitrogênio. Nesse estudo a conformabilidade dos dois materiais foi examinada por meio de ensaios tecnológicos como ensaio de tração, determinação da curva de escoamento, determinação do índice de anisotropia, ensaio Erichsen, dureza, composição química, simulação computacional do processo de estampagem e estampagem dos blanks. O aço inoxidável AISI 201 possui propriedades como limite de escoamento e tensão de ruptura superior as do inoxidável AISI 304. Os dois aços possuem uma similaridade na anisotropia. A máxima altura alcançada no momento da fratura pelo ensaio Erichsen também é semelhante para os dois materiais. O aço inox AISI 201 apresenta uma dureza maior que o inoxidável AISI 304. Na composição química os dois aços apresentam elementos fora do especificado, caracterizando um problema de qualidade na fabricação desses aços. A simulação computacional do processo de estampagem apresentou uma redução de espessura na região mais crítica, sem comprometer a estampagem do componente. Uma vez estampadas, obtiveram-se peças sem indícios de trincas, conforme previsto pela simulação computacional. Os resultados desse trabalho sugerem a possibilidade de utilização do aço inoxidável AISI 201 como opção para substituição ao inoxidável AISI 304, tendo uma observação a ser feita quanto aos cuidados na qualidade durante a fabricação do aço para que atenda os padrões exigidos.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis AISI 201 e AISI 304, estampagem profunda, conformabilidade, simulação por elementos finitos.

Abstract

In this study, the formability of stainless steel AISI 201 was compared to stainless steel AISI 304. Stainless steel AISI 201 is a low alloy nickel alloyed with manganese and nitrogen. In this study, the formability of the two materials was examined by means of technological tests such as tensile test, determination of the flow curve, determining the anisotropy index, Erichsen test, hardness, chemical composition, computer simulation of the stamping process and stamping of the blanks. Stainless steel AISI 201 has properties such as yield strength and higher breakdown voltage of the stainless steel AISI 304. The two steels have a similarity in anisotropy. The maximum height reached at the time of fracture by Erichsen test is also similar for the two materials. Stainless steel AISI 201 has a hardness greater than the stainless steel AISI 304. In chemistry the two steels have elements outside the specified, featuring a quality problem in manufacturing these steels. A computer simulation of the printing process showed a reduction in thickness in the most critical region, without compromising the component stamping. Once stamped, gave no broken pieces of evidence as provided by the computer simulation. The findings suggest the possibility of use of stainless steel AISI 201 as an option to replace the stainless steel AISI 304, with a point to be made about the care as during the manufacture of steel that meets the required standards.

Keywords: Stainless steel AISI 201 and AISI 304, deep drawing, formability, finite element simulation.

1. INTRODUÇÃO

No século 21 iniciou-se uma grande volatilidade no custo do níquel, provocando oscilações no seu preço de mercado. Nesse mesmo período histórico, iniciou-se um aumento no consumo dos aços inoxidáveis. Devido à importância dos aços inoxidáveis, Lo et al.(2009), publicaram um trabalho, abordando os desenvolvimentos dos últimos 20 anos relacionados a esses materiais. Os aços inoxidáveis, são materiais ideais para uma série de aplicações comerciais devido a uma série de fatores como elevada resistência à corrosão, resistência à manchas, possuir apelo estético, grande capacidade de deformação, versatilidade visual devido às diversas possibilidades de acabamentos de sua superfície (brilhante, fosca, escovada). Esses aços podem ser conformados em bobinas, folhas chapas, barras, fios e tubos, dependendo da finalidade da aplicação.

Dentre as principais aplicações que utilizam aços inoxidáveis, pode-se citar utensílios domésticos, instrumentos cirúrgicos e industriais, atendendo à indústria automotiva, aeroespacial, química, naval, máquinas agrícolas, construção civil, medicina, transportes, alimentícia, dentre outros. Kamerud et al.(2013), cita a indústria alimentícia como uma potencial consumidora de aços inoxidáveis. A partir dos anos 2000, incluiu-se nessa aplicação aços inoxidáveis da série 200.

Conforme Toit e Steyn(2012), nos aços inoxidáveis, uma das mais utilizadas é a série 300, que é caracterizada por conter elevados teores de cromo e níquel. A fim de minimizar o custo, substituiu-se parte do níquel por outros elementos estabilizadores de austenita como manganês ou nitrogênio. Formou-se outro sistema na família austenítica, a série 200. Esta série é caracterizada por conter teores de manganês e nitrogênio mais altos e teor de níquel mais baixo que a série 300.

Devido ao crescente consumo dos aços inoxidáveis e à constante pressão para diminuição dos custos, novos aços da série 200 têm sido desenvolvidos nas últimas décadas pelas grandes siderúrgicas. Entretanto, poucos trabalhos são realizados para avaliar o comportamento em termos de deformação mecânica entre os aços da série 200 e 300.

Para Toit e Steyn(2012), o preço do níquel tende a ser variável e ocasiona picos a níveis muito elevados de custo. Uma oportunidade, portanto, existe para produzir um aço inoxidável com propriedades semelhantes às das do AISI 304, mas com elementos menos dispendiosos,

substituindo a totalidade ou parte do níquel, por elementos como manganês e nitrogênio. Leva-se assim ao nascimento da série 200 de aço inoxidável austeníticos.

O níquel aumenta o campo de fase austenita nos aços inoxidáveis a elevadas temperaturas, assim sua principal função é assegurar que o aço permaneça austenítico para uma dada temperatura. O níquel estabiliza a austenita contra a formação de martensita, baixando a temperatura. A distribuição de níquel e cromo para a série 200 e 300 pode ser visto na figura 1:

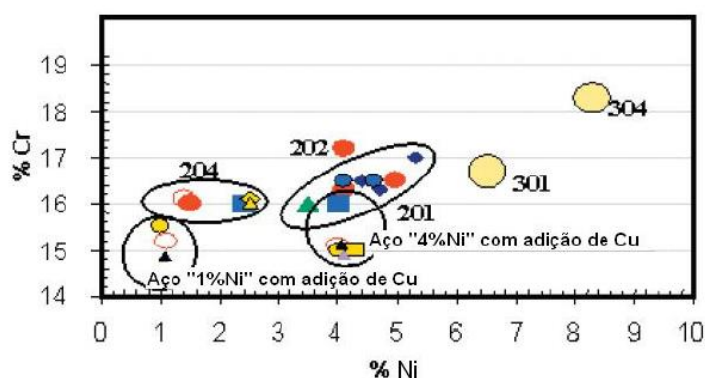


Figura 1 – Distribuição de cromo e níquel para a série 200 e 300. Fonte: ISSF, 2005

Segundo Campos et al.(2006), os processos tecnológicos de conformação de metal por meio de deformação plástica, permitem a fabricação de peças mecânicas com elevada taxa de produção. O sucesso de uma operação de conformação plástica depende em vários parâmetros iterativos de natureza diferente, geometria, as condições de operação, as propriedades do material.

Para o desenvolvimento do processo de estampagem, é necessário o conhecimento do material, conhecer as principais propriedades mecânicas como, limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (R_m), índice de anisotropia (r) e índice de encruamento (n). Gau et al.(2013), escreve que ensaios mecânicos, são utilizados na simulação, projetos de punções e matrizes. Elemento como a maleabilidade do material pode ser determinado facilitando o desenvolvimento do processo de estampagem para obtenção de um componente.

Esse trabalho procura avaliar a estampabilidade de um aço inoxidável AISI 201 comparado à um aço inoxidável AISI 304. Para esse estudo realizam-se ensaios mecânicos como tensão de engenharia x deformação relativa, anisotropia, ensaio Ericshen, ensaio de dureza e composição química. Os resultados dos ensaios são dados de entrada para a simulação computacional do processo de estampagem. Por fim é feito a estampagem das peças para avaliar suas deformações e o resultado final.

1.1. Objetivo

Esse trabalho tem por objetivo fazer um estudo comparativo entre o aço inoxidável AISI 201 e o AISI 304. No estudo realizam-se ensaios mecânicos para obtenção das propriedades mecânicas dos materiais. Os dois materiais foram utilizados na fabricação do componente “Disco Distribuidor Fertilizantes”(figura 2). Em seu projeto original este componente é fabricado em aço inoxidável AISI 304. A expectativa é possibilitar a fabricação utilizando aço AISI 201.

Inicialmente apresenta-se o problema atual no que diz respeito à conformação do item desejado. Seguindo de uma caracterização dos materiais, a fim de propor as devidas modificações para que se possa obter uma peça conformada em aço inoxidável AISI 201 dentro dos padrões de qualidade exigidos.

1.2. Justificativa

Para a fabricação do componente da figura 2, utiliza-se inoxidável AISI 304. Para que a indústria fabricante se mantenha competitiva no mercado, quanto menor for o custo do componente fabricado, menor será o preço de venda do produto. Assim desencadeia-se a necessidade de fabricar um componente ao menor custo possível. Na figura 2 observa-se um componente, Disco Distribuidor Fertilizantes, fabricado pelo processo de estampagem e a partir de um aço inoxidável AISI 304.



Figura 2 – Disco Distribuidor Fertilizantes fabricado em aço inoxidável AISI 304

Visando uma redução de custos, a empresa passou a utilizar o aço inoxidável AISI 201 em substituição ao aço inoxidável AISI 304, na fabricação do componente da figura 2. Essa alteração de matéria prima ocorreu sem que houvesse uma análise do departamento de

engenharia. O aço inoxidável AISI 201 possui um teor de níquel menor que o aço inoxidável AISI 304. O aço inoxidável AISI 201 pode ser comprado no mercado a um custo 30% inferior que o inoxidável AISI 304.

Ao utilizar a nova matéria prima no componente da figura 2, utilizando os recursos de processo existentes, ferramental, prensa, iguais aos utilizados no inoxidável AISI 304, obteve-se resultados insatisfatórios. O aço inoxidável AISI 201 rompeu durante a conformação conforme detalhe da figura 3.

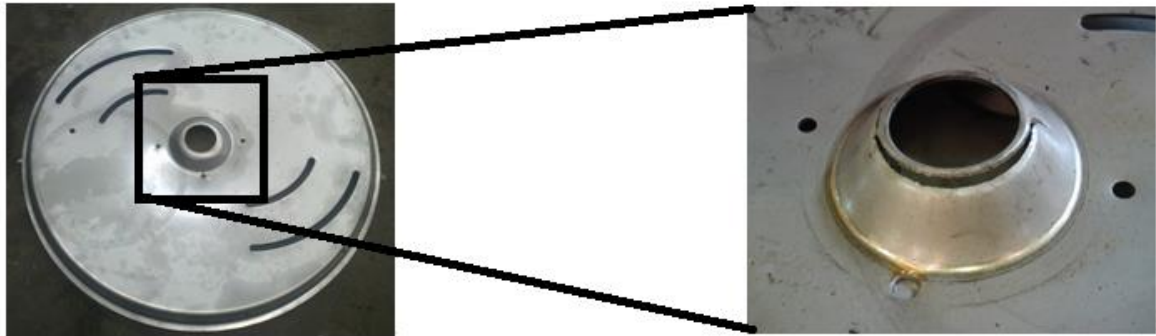


Figura 3 – Detalhe da região rompida para o Disco Distribuidor Fertilizantes fabricado em aço inoxidável AISI 201.

Este trabalho desenvolveu-se com a colaboração da Stara Indústria de Implementos Agrícolas e o Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conformação de Chapas

O processo de conformação de chapas pode ser dividido em dois diferentes grupos: o grupo dos processos de conformação e o grupo dos processos de separação. Ao grupo de conformação, pertencem todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem que haja separação ou adição de material, por exemplo, estampagem, embutimento profundo, dobra e repuxo. Ao grupo de separação, pertencem todos os processos de corte por cisalhamento, por exemplo, o corte convencional mais comumente usado por ser um processo simples e de baixo custo e o corte fino mais conhecido como “fineblanking” (Schaeffer, 1999).

2.2. Princípios do Processo de Estampagem

Para Schaeffer (2004), o processo de estampagem de chapas consiste principalmente na utilização de uma matriz, de um prensa-chapas e um punção, todos acoplados a uma prensa hidráulica ou mecânica. A Figura 4 ilustra uma representação esquemática em corte do punção, matriz e prensa chapas utilizados para a estampagem de um copo. O punção tem a função de conduzir a peça pelo interior da matriz, que atribui forma à peça. O prensa chapas por sua vez atua restringindo o deslizamento da chapa para o interior da matriz, evitando assim o enrugamento e promovendo o estiramento.

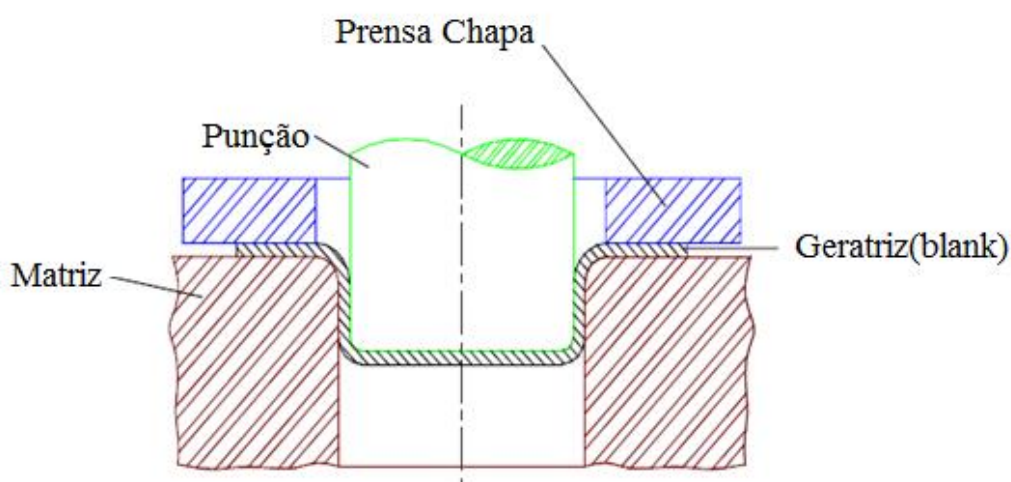


Figura 4 – Esquema do processo de estampagem. Fonte: Oliveira, 2003

2.2.1 Tensão e Deformação no Processo de Estampagem

A equação 1 fornece a Tensão Normal $\sigma [MPa]$, que é a razão entre a força $F [N]$ e a seção inicial $A_0 [mm^2]$, um desenho esquemático pode ser visto na figura 5;

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa] \quad Eq.(1)$$

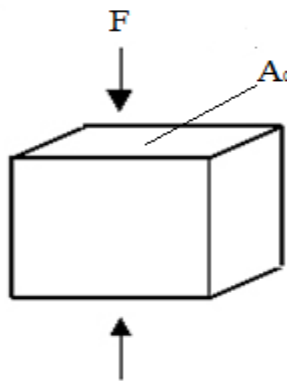


Figura 5 – Desenho esquemático mostrando força e área inicial. Fonte: Schaeffer, 2004.

A deformação relativa no comprimento (ε_l), obtida pela equação 2, que é a razão entre a diferença de comprimento final e inicial $(l_1 - l_0)$ pelo comprimento inicial (l_0) .

$$\varepsilon_l = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} [-] \quad Eq.(2)$$

Um esquema das dimensões para determinação da deformação relativa no comprimento pode ser visto na figura 6.

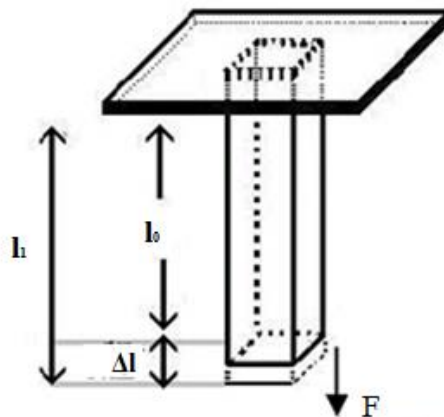


Figura 6 – Desenho esquemático para deformação no comprimento. Fonte: Schaeffer, 2004

➤ **Deformação Absoluta no Comprimento**

$$\Delta l = l_1 - l_0 \text{ [mm]} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

Δl = deformação absoluta no comprimento [mm];

l_1 = comprimento final [mm];

l_0 = comprimento inicial [mm];

➤ **Deformação Absoluta na Largura**

$$\Delta b = b_1 - b_0 \text{ [mm]} \quad \text{Eq.(4)}$$

Onde:

Δb = deformação absoluta na largura [mm];

b_1 = largura final [mm];

b_0 = largura inicial [mm];

➤ **Deformação Absoluta na Espessura**

$$\Delta s = s_1 - s_0 \text{ [mm]} \quad \text{Eq.(5)}$$

Onde:

Δs = deformação absoluta na espessura [mm];

s_1 = espessura final [mm];

s_0 = espessura inicial [mm];

➤ **Deformação Relativa no Comprimento**

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \text{ [-]} \quad \text{Eq.(6)}$$

➤ **Deformação Relativa na Largura**

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \text{ [-]} \quad \text{Eq.(7)}$$

➤ **Deformação Relativa na Espessura**

$$\varepsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} [-] \quad \text{Eq.(8)}$$

➤ **Deformação Verdadeira**

Para Blazynski(1989) avaliam-se as deformações verdadeiras no comprimento e na largura, através de uma técnica de medição chamada visioplasticidade. Esse método mede as deformações através da leitura de uma grade impressa na chapa com geometria conhecida, podendo ser circular ou quadrada. Schaeffer(2004), mostra que para a medição das deformações verdadeiras, após o processo de estampagem, define-se uma região crítica onde realizam-se as medições das deformações. A figura 7 mostra um componente com gravação eletroquímica e uma linha definindo a região crítica para análise das deformações verdadeiras no comprimento e na largura:

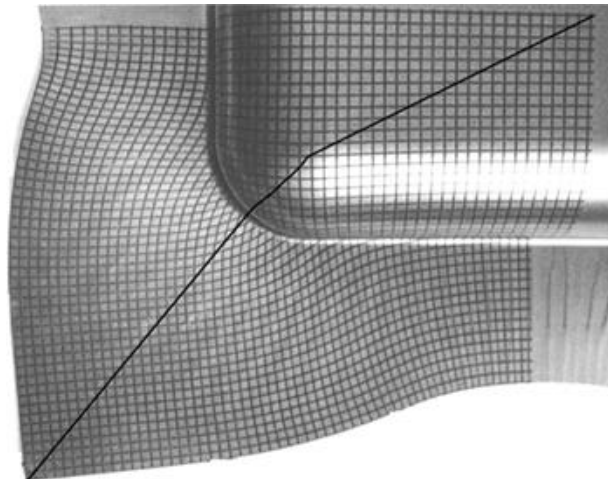


Figura 7 – Componente estampado, com uma linha definindo a região crítica.

Fonte:Schaeffer, 2004

Para Campos et al.,(2006), assim como para Blazynski, (1989), o método eletroquímico é utilizado para imprimir a grade na peça. A peça é deformada até a ruptura, conforme figura 8. A maior e menor dimensão da elipse são medidas e utilizadas para determinação das deformações verdadeiras.

Durante o processo de estampagem, ocorrem diferentes deformações no comprimento, largura e espessura. A ruptura ocorre quando as deformações de uma determinada região fazem com que a espessura do material diminua, figura 8, quando comparado à espessura inicial, até que o material não suporte o nível de deformações empregadas. O método de

grades permite a determinação das deformações verdadeiras em cada direção. Estabelece-se assim o máximo limite que um material poder ser deformado sem que haja a ruptura.

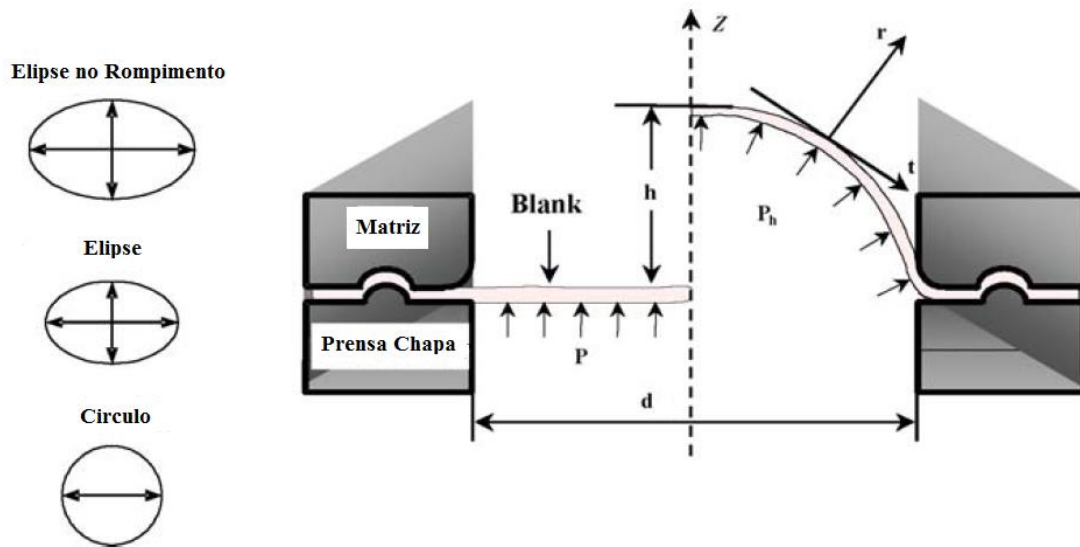


Figura 8 – Desenho esquemático do teste para determinação das deformações verdadeiras.

Fonte: Campos et al., 2006

As grades devem ser colocadas sobre a chapa antes de ocorrer a estampagem (na geratriz). Após o processo de estampagem, avaliam-se as deformações dessa rede, assim, obtém-se informações necessárias sobre a variação das deformações. A figura 9 mostra um círculo esquemático antes e depois da deformação.

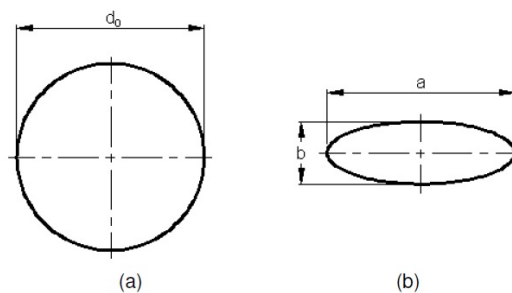


Figura 9 – Em (a), círculo antes da deformação, em (b), círculo depois da deformação. Fonte:

Cavaler, 2010

As deformações verdadeiras no comprimento, largura e espessura, podem ser determinadas pelas equações 9, 10 e 11, respectivamente:

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{d_0} [-] \quad \text{Eq.(9)}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{b}{d_0} [-] \quad Eq.(10)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{s_1}{s_0} [-] \quad Eq.(11)$$

Considerando a Lei da Constância de Volume, tem-se:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_1 \\ l_0 \cdot b_0 \cdot s_0 &= l \cdot b \cdot s \\ \ln(l_0 \cdot b_0 \cdot s_0) &= \ln(l \cdot b \cdot s) \\ \ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{s}{s_0} &= 0 \end{aligned} \quad Eq.(12)$$

Assim:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad Eq.(13)$$

2.2.2 Tensão de Engenharia X Deformação Relativa

Conforme Ferrarini(2004), o ensaio tensão de engenharia x deformação relativa dá-se a partir de um corpo de prova com dimensões pré-estabelecidas. O corpo de prova é fixado por uma extremidade em um equipamento de ensaio mecânico. Aplica-se um carregamento que traciona uniaxialmente o corpo de prova com velocidade controlada e constante. Deformações ocorrem até que o material do corpo de prova seja rompido. As dimensões do corpo de prova antes da deformação, podem ser vistas na figura 10.

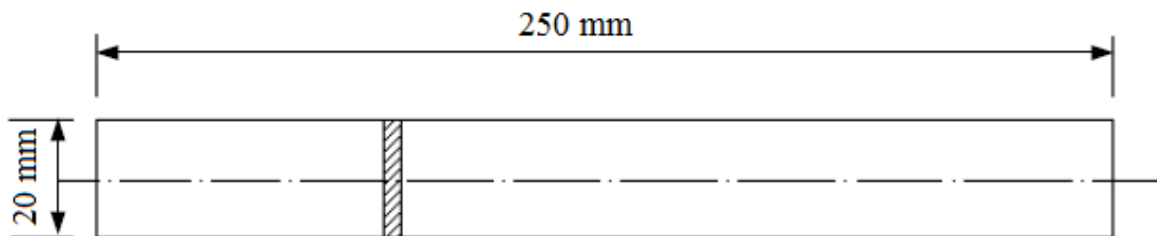


Figura 10 - Corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: Ferrarini, 2004

O equipamento para ensaio de tração possui também sensores que fazem a leitura das deformações absolutas causadas pela ação do carregamento externo. Lê-se a força (F)

aplicada no decorrer do ensaio e a variação de comprimento (Δl) do corpo de prova. Obtém-se a curva do ensaio, onde o eixo das ordenadas é formado pelo cálculo da tensão de engenharia (σ), dada pela relação entre a força (F) medida no ensaio e a área inicial (A_0) do corpo de prova. O eixo das abscissas é formado pela deformação relativa (ε), calculada pela relação entre a variação do comprimento (Δl) do corpo de prova pelo comprimento inicial (l_0) do corpo de prova.

Uma curva típica entre tensão de engenharia (σ) e deformação relativa (ε), para o aço inoxidável AISI 201 e AISI 304 no estado recozido, sendo os corpos de prova tracionados até o limite de 20%, é mostrada na figura 11:

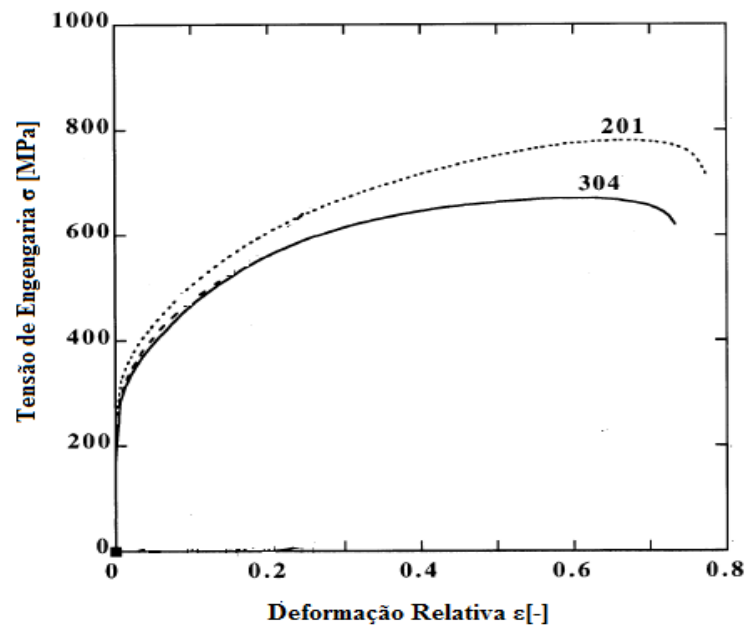


Figura 11 - Curva tensão de engenharia para o aço inoxidável AISI 201 e para o aço inoxidável AISI 304. Fonte: Taylan et al.,1998

Dieter (1981) faz uma descrição do comportamento do material quando este ultrapassa o valor correspondente ao limite de escoamento (σ_e). Segundo ele, a partir deste ponto, o material está permanentemente deformado se a carga for reduzida a zero. De forma que a tensão (σ) para produzir cada vez mais deformação (ε) plástica cresce com o aumento desta última, devido ao encruamento do material. Ainda segundo o autor, o volume do corpo de prova permanece constante durante a deformação plástica. Conforme se alonga, a área da seção reta transversal decresce uniformemente ao longo do comprimento útil do corpo de prova.

2.2.3 Curva de Escoamento

Conforme Schaeffer(2004), no limite de escoamento inicia-se a deformação plástica e no limite de resistência, o escorregamento dos cristais chegou a tal ponto que não há mais união entre eles e o material se aproxima da ruptura.

Enquanto no diagrama convencional a força $F[N]$, é sempre relacionada com a área inicial $A_0[mm^2]$, no diagrama verdadeiro, a força $F[N]$ é relacionada com a área instantânea $A[mm^2]$. Essa curva que relaciona a tensão de escoamento $kf[MPa]$ com a deformação verdadeira $\phi[-]$ é denominada curva de escoamento.

O conhecimento da resistência ao escoamento é fundamental para o cálculo da força de trabalho de conformação, assim como para o cálculo de matrizes e parâmetros internos nos materiais conformados. Um modelo de curva convencional e verdadeira pode ser observado na figura 12:

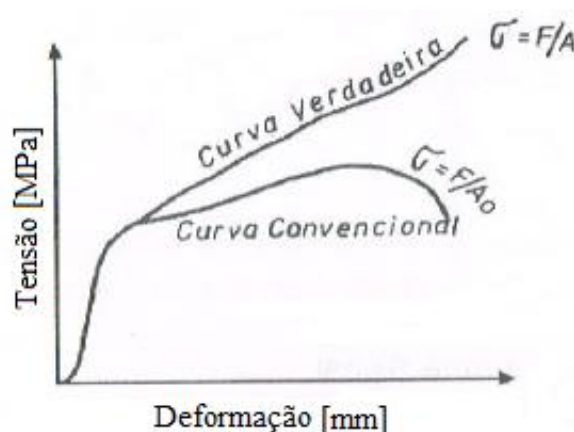


Figura 12 - Diagrama tensão com curva de engenharia(convencional) e verdadeira. Fonte: Schaeffer, 2004

A tensão verdadeira acima do limite de escoamento é também denominada de tensão de escoamento $kf[MPa]$. Define-se como tensão de escoamento aquela tensão aplicada a um corpo de prova submetido a um carregamento uniaxial que provoca o escoamento do material. Ponto onde ocorre a passagem do campo elástico para o plástico. A resistência ao escoamento é uma grandeza muito importante na conformação mecânica, é influenciada pelo material, microestrutura, temperatura, deformação e velocidade de deformação, onde se concentram todos os estudos sobre conformação plástica.

A tensão de escoamento é calculada pela relação entre a força $F[N]$ aplicada, e a área $A[mm^2]$ instantânea da seção deformada do corpo de prova, considerando o encruamento do material. A deformação verdadeira é o somatório de cada incremento de alongamento dividido pelo comprimento útil instantâneo, como pode ser visto na equação 14:

➤ **Tensão de Escoamento**

$$k_f = \frac{F}{A} [MPa] \quad Eq.(14)$$

A representação matemática das curvas é utilizada para determinação do comportamento mecânico do material. Para estimar a força necessária na fabricação de uma peça ou na simulação numérica de um processo, podem ser descritas por uma função matemática. Na deformação a frio essa função segue a equação de Hollomon, mostrada na equação 15:

$$k_f = C \varphi^n [MPa] \quad Eq.(15)$$

Onde:

C = constante da curva de escoamento $[MPa]$;

n = índice de encruamento do material $[-]$;

φ = deformação verdadeira $[-]$;

Na equação de Hollomon, os valores de (C) e (n) , são constantes para cada material, denominado coeficiente de resistência e índice de encruamento respectivamente. O índice de encruamento por deformação (n) é um parâmetro importante que indica o grau de encruamento dos metais, mede sua capacidade de endurecimento.

Alan et al(1999), mostra que quando um material sofre deformação plástica, o mesmo sofre um endurecimento devido a modificações permanentes na rede cristalina. Esse endurecimento por deformação plástica é chamado de encruamento (n) . Quanto maior o encruamento, maior é o grau de homogeneização das deformações, o material distribui melhor as deformações ao longo do seu volume.

Normalmente o processo de estampagem é realizado a temperatura ambiente. Em função disso o índice de encruamento é maior que zero com exceção de materiais como o ouro e o cobre.

O conhecimento dos principais parâmetros que envolvem a estampagem são necessários para a previsão da forma dos componentes após a conformação. Previsão de defeitos conjugados com a otimização do fluxo de material durante a fabricação. Previsão das propriedades mecânicas e qualidade no produto acabado.

2.2.4 Índice de Anisotropia

O índice de anisotropia, (r) é definido como quociente das deformações verdadeiras na largura e da espessura do corpo de prova, conforme equação 16:

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{s_1}{s_0}} [-] \quad Eq.(16)$$

Onde:

r = índice de anisotropia [-];

φ_2 = deformação verdadeira na largura [-];

φ_3 = deformação verdadeira na espessura [-];

➤ Índice de Anisotropia Média

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) [-] \quad Eq.(17)$$

Onde:

r_m = índice de anisotropia média [-];

➤ Índice de Anisotropia Planar

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} [-] \quad Eq.(18)$$

Onde:

Δr = índice de anisotropia planar [-];

Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação. Essa característica provoca variações na anisotropia conforme o sentido da laminação.

Para Schaeffer(2004), na avaliação da anisotropia, é usado o índice de anisotropia (r). Que é definido como sendo a razão das deformações verdadeiras que ocorrem em um elemento de volume durante a deformação. Ou a relação entre a deformação verdadeira na largura pela deformação verdadeira na espessura do corpo de prova, num ensaio de tração.

Em um ensaio de tração, bem como em um processo de estampagem de uma chapa a anisotropia que ocorre no comprimento, largura e espessura e não é uniforme. Por isso algumas chapas diminuem mais rápidas a espessura ocorrendo rupturas permanentes. Enquanto em outras chapas nas mesmas condições diminuem mais rápido comprimento ou largura, o que geralmente não causam problemas em processos de estampagem.

Padmanabhan et al.(2007), cita outros três parâmetros como responsáveis pela variação da espessura durante o processo de estampagem. Citando a influência do raio da matriz como fator principal. Seguido da força do prensa chapa, e do coeficiente de atrito.

A influência da anisotropia da chapa é visível especialmente na estampagem profunda. O material escoia melhor nas direções com maior índice de anisotropia. Esse comportamento é denominado anisotropia planar. O conhecimento desse valor é muito importante para estudos sobre estampagem profunda.

Para a anisotropia podem ocorrer três situações distintas:

$$r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} = 1 \text{ (isotropia total, material isotrópico);}$$

$$r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} \neq 1 \text{ (anisotropia normal ou média e anisotropia planar);}$$

$$r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} \neq 1 \text{ (anisotropia normal ou média + anisotropia planar);}$$

Um alto valor de r ($r > 1$), ocasiona uma resistência ao afinamento da chapa. e portanto uma alta resistência da tensão biaxial. Enquanto que um baixo valor de r ($r < 1$), indica facilmente um adelgamento ou afinamento da chapa, e portanto uma baixa resistência biaxial. Para materiais isotrópicos a anisotropia média é $r = 1$ e a anisotropia planar $\Delta r = 0$. Nos materiais para estampagem profunda um valor alto de anisotropia é desejado, porque proporciona maior resistência ao afinamento da chapa. A figura 13, apresenta a variação da anisotropia média.

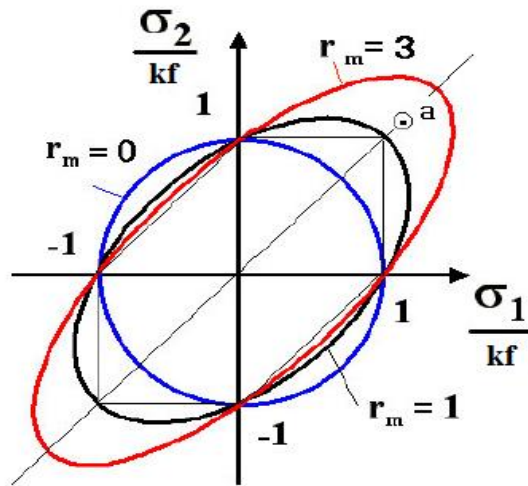


Figura 13 – Anisotropia média ou normal. Fonte:Scheaffer, 2004

Os valores do índice de anisotropia (r), determinados em corpos de prova situados em um mesmo material, não apresentam um único valor de anisotropia. São três razões de deformação que são obtidos em ensaios de tração de corpos de prova retirados nas três direções em relação ao sentido de laminação 0° , 45° e 90° conforme figura 14.

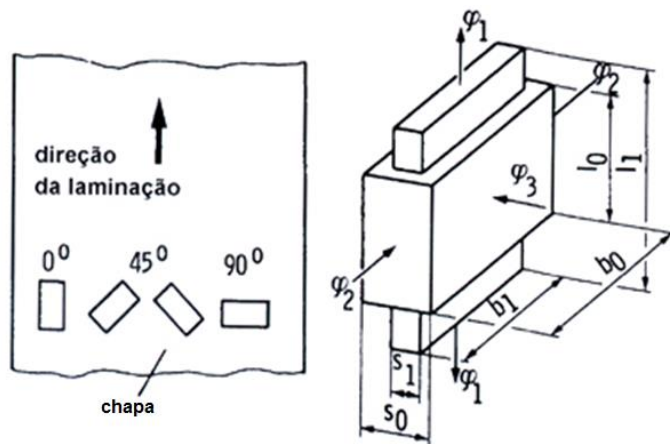


Figura 14 – Sentido de laminação para corpos de prova no ensaio de anisotropia.

Fonte:Schaeffler, 2004

2.2.5 Curva Limite de Conformação

O conceito de formação das curvas limite de conformação (CLC) foi introduzido por Keeler (1964) e Goodwin (1968), representa o primeiro critério de segurança para operações de estampagem profunda. A curva CLC é geralmente determinada com o auxílio de um ferramental simples. Empregando corpos de prova de diferentes larguras, que vem sendo

adotado nos ensaios propostos por Nakazima, (1968), Marciniak e Kuczynski (1967), nos quais a chapa é bloqueada em sua periferia e deformada por um punção hemisférico (Nakazima) ou de fundo plano (Marciniak).

Segundo Campos et al.,(2006), os diagramas limite de conformação (CLC) têm sido extensivamente utilizados na indústria no processo de conformação para avaliar a formabilidade. Esses diagramas permitem a previsão de que a deformação pode conduzir à falha do material. São considerados uma importante ferramenta no projeto de matrizes, bem como para otimizar e corrigir problemas na linha de produção.

Richter(2003), define a Curva Limite de Conformação como sendo uma representação do comportamento de uma chapa metálica, deformada em um processo de conformação mecânica e traçada em um diagrama deformação verdadeira (ϕ_1) vs. deformação verdadeira (ϕ_2), onde (ϕ_1) corresponde à deformação verdadeira no comprimento e (ϕ_2) a deformação verdadeira na largura.

As medições realizadas na rede deformada levam a uma relação entre as deformações verdadeiras. Keeler(1994), mostra que a indústria moderna cada vez mais busca produtos mais resistentes com menor peso. Dessa forma aços de elevada resistência são empregados no processo de fabricação. O autor ainda caracteriza na figura 15, cinco possíveis regiões de deformações que devem ser conhecidas para a elaboração de um processo de estampagem. Observa-se como podem ser classificadas essas deformações em função das solicitações que ocorrem durante a estampagem. Mesmo tendo sido quantificado as deformações nada se podem afirmar, sobre quão distantes estão essas deformações do limite máximo de deformação.

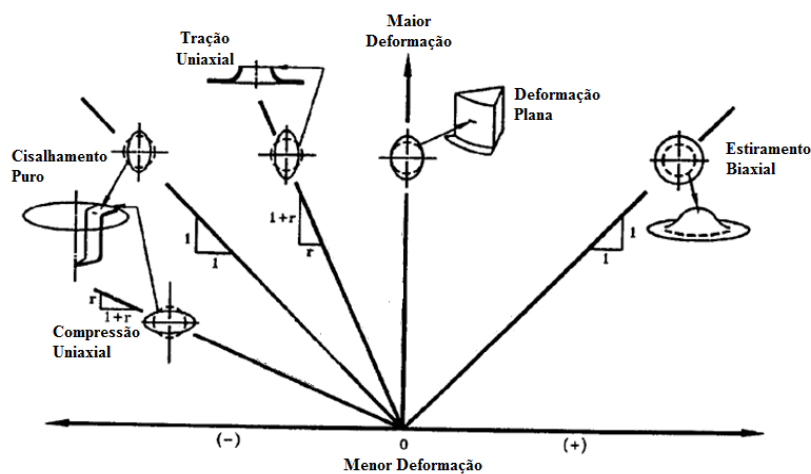


Figura 15 - Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada. Fonte: Keeler, 1994

A determinação de uma possível situação crítica não pode ainda ser caracterizada, sendo uma situação crítica aquela em que as deformações estão muito próximas do ponto em que irá ocorrer a ruptura. Essa resposta somente poderá ser respondida se os limites máximos de deformação permitidos do material são conhecidos.

2.2.6 Índice Erichsen

Para Kim e Lim(2010), no caso do ensaio de embutimento Erichsen o punção tem cabeça esférica de 20 mm de diâmetro. O resultado do ensaio é a medida da profundidade do copo formado pelo punção no momento da ruptura. O ensaio deve ser realizado sem choques e vibrações, com velocidade de penetração entre 5 mm/min e 20 mm/min.

O ensaio Erichsen tem sido largamente utilizado como meio de se determinar a conformabilidade de chapas (Hosford; Caddel, 2007). Neste ensaio um penetrador esférico pressiona uma chapa contra o furo de uma matriz. Esta chapa, de acordo com a norma NBR 16281: 2014, é impedida de deslizar entre o anel de fixação e a matriz por uma força de 10 kN, deforma-se adentrando na região do furo até sua ruptura. Após a falha ser detectada é medido o deslocamento axial máximo da chapa, h , chamado de índice de embutimento Erichsen. Na figura. 16 apresenta-se uma representação esquemática do procedimento descrito e do ferramental utilizado no ensaio Erichsen.

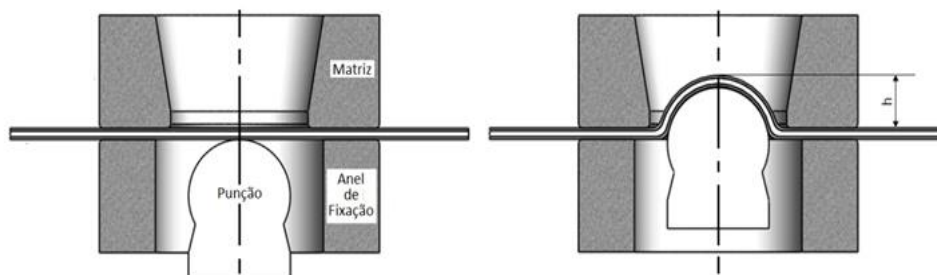


Figura 16 - Representação esquemática dos equipamentos utilizados no ensaio Erichsen.

Fonte: Hosford; Caddel, 2007.

2.2.7 Capacidade de Embutimento do Material

Um fator importante, na estampagem de peças é a relação entre o diâmetro do disco ou geratriz e o diâmetro da peça a ser fabricada ou diâmetro do punção. Este parâmetro é

denominado de limite razão de estampagem, representado por (β) . Entre as literaturas que tratam desse tema, para chapas metálicas e sua influência na estampagem, dentre outras, pode-se citar, Schaeffer(1999), Schuler(1998), Lange(1990), Sales(2002) e Borsoi(2000).

Na indústria de estampagem, conhecer o limite razão de estampagem (β) do material das chapas utilizadas é em parte garantir que as peças produzidas serão estampadas sem maiores problemas. A identificação se ocorrerá estiramento e/ou estampagem profunda em uma determinada região da ferramenta durante o processo de conformação, poderá garantir a otimização do processo de estampagem através da melhoria da geometria das ferramentas.

O limite razão de estampagem (β) pode ser obtido pela relação entre o diâmetro da geratriz ou disco (D) e o diâmetro do punção (d) , conforme equação 19:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad \text{Eq.(19)}$$

Uma representação esquemática entre diâmetro da geratriz ou disco (D) e diâmetro do punção (d) pode ser vistos na figura 17:

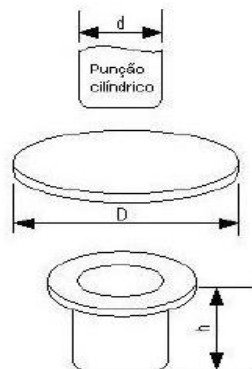


Figura 17 – Representação esquemática punção disco e copo embutido. Fonte: Ferrarini, 2004

Quando não for possível realizar o processo em uma só etapa, pelo fato de se ultrapassar a relação de estampagem admissível, pode-se produzir o copo em várias etapas de estampagem, sendo recomendado para primeira etapa utilizar β entre 5% a 10% inferior a β_{adm} . Para as demais etapas, não ultrapassar $\beta = 1,3$, Shuler(1998).

2.3. Características dos Aços Inoxidáveis AISI 201 e AISI 304

Segundo Mesquita(1997), aço inoxidável é uma liga de ferro e cromo, podendo conter também níquel, molibdênio e outros elementos, que apresentam propriedades físico-químicas superiores aos aços comuns. Sendo a alta resistência à oxidação atmosférica a sua principal característica. As principais famílias de aços inoxidáveis, classificados segundo a sua microestrutura, são: ferríticos, austeníticos, martensíticos, endurecíveis por precipitação e duplex. As propriedades mecânicas de um aço estão diretamente relacionadas aos elementos que compõem esse aço, Taylan et al.(1998),

Estes elementos de liga, em particular o cromo, conferem uma excelente resistência à corrosão quando comparados com os aços carbono. Eles são, na realidade, aços oxidáveis, isto é, o cromo presente na liga oxida-se em contato com o oxigênio do ar, formando uma película, muito fina e estável, de óxido de cromo Cr_2O_3 que se forma na superfície exposta ao meio. Ela é denominada camada passiva e tem como função proteger a superfície do aço contra processos corrosivos. Para isto é necessária uma quantidade mínima de cromo de cerca de 11% em massa. Esta película é aderente e impermeável, isolando o metal abaixo dela do meio agressivo.

Nesse estudo aborda-se o aço inoxidável AISI 201 e AISI 304, eles fazem parte da família austenítica. Segundo Davis(1994), esses aços possuem uma estrutura FCC, são aços não-magnéticos e podem ser endurecidos por trabalho mecânico. Possuem excelentes propriedades criogênicas, por não sofrerem transição dúctil-frágil e boa resistência mecânica em altas temperaturas, Silva e Mei(2006). A característica básica dos aços inoxidáveis é a sua elevada resistência à corrosão. São aços fáceis de serem trabalhados, aceitam deformações permanentes sem comprometimento de suas características. São versáteis, de fácil limpeza e manutenção por apresentarem superfície lisa.

Segundo Lo et al.(2009), os aços inoxidáveis austeníticos são materiais ideais para uma série de aplicações comerciais devido a uma série de fatores como elevada resistência à corrosão e a manchas, possuir apelo estético, ter grande capacidade de deformação, versatilidade visual devido às diversas possibilidades de acabamentos em sua superfície e por possuir elevadas propriedades mecânicas.

Para Mesquita(1997), os principais atributos do aços inoxidáveis são atribuídos à camada passiva que é formada pela reação entre o cromo e o oxigênio do ar. Essa camada em geral apresenta 50 angstrom de espessura e tem como função proteger o aço contra riscos ou

batidas em sua superfície. Ela pode se regenerar, ficar mais espessa e mais resistente quanto maior for o teor de cromo.

Kumar(2002), fala que a indústria tem exigido componentes estampados cada vez mais complexos. Sendo que para o sucesso no desenvolvimento desses processos devem-se conhecer perfeitamente os aços utilizados. Dados utilizados no processo podem ser obtidos em testes laboratoriais. Onde as propriedades dos materiais são estudadas.

Outra característica são as transformações de fase ocorridas durante a deformação. Para Haebne et al.(2003), durante a deformação a frio, 5% da energia empregada na deformação, é armazenada no material, na forma de defeitos cristalinos como discordâncias. Para Padilha e Siciliano(2005), a densidade e distribuição desses defeitos gerados na deformação plástica dependem de fatores como estrutura cristalina do metal, a sua pureza, as fases presentes, a velocidade e modo de deformação.

Para Gonzales et al.(2003), um dos fatores que contribui para melhorar a conformabilidade dos aços inoxidáveis autênticos é a transformação da austenita meta estável em martensita durante a deformação. A composição química, a deformação plástica e a temperatura, são os principais parâmetros que controlam a transformação de austenita em martensita induzida pela tensão durante a deformação. Mészáros e Prohászka(2005), coloca que a transformação da austenita para martensita em baixas temperaturas ocorre por processo de deformação, sem haver difusão.

Adicionando-se elementos como níquel, molibdênio, titânio e nióbio, pode-se transformar uma cadeia ferrítica em austenítica, Kim(2009). Sendo esses aços os que apresentam maior resistência a corrosão. Eles combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento. Oferecem as melhores propriedades para trabalho a frio. Não podem ser endurecidos por tratamento térmico, mas sua dureza e resistência a tração podem ser melhoradas por encruamento. Não são ferromagnéticos e possuem ampla faixa de propriedades mecânicas, oferecendo boa ductilidade e resistência a altas ou baixas temperaturas além de boa soldabilidade, a microestrutura característica pode ser vista na figura 18.

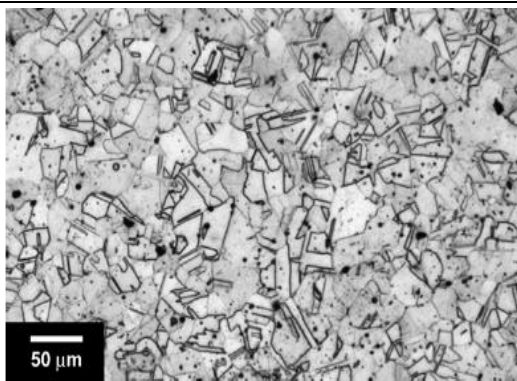


Figura 18 – Microestrutura aço inoxidável AISI 304, aumento 50x. Fonte: Nikulin e Kaibyshev, 2011

A figura 18 mostra a microestrutura característica para o aço inoxidável AISI 304, apresentando elementos que caracterizam esse aço como sua fase austenítica, e formação de carbonetos de cromo nos contornos de grão.

Tavares et al.(2009), mostra em seu trabalho uma comparação entre dois aços austeníticos, o AISI 201 modificado(por conter cerca de 1,5% em massa de cobre) e o AISI 304. A taxa inicial de transformação martensítica, é maior no aço AISI 304, mas se torna menor com o contínuo aumento da deformação, figura 19. O endurecimento dos aços também é diferente. A curva de microdureza em função da deformação verdadeira mostra que o aço AISI 201 modificado endurece mais quando comparado ao aço AISI 304, figura 20. Isso ocorre devido à adição de manganês em substituição ao níquel e também devido à maior susceptibilidade de transformação martensítica.

A figura 19 mostra a formação de martensita em relação à deformação verdadeira para os aço AISI 201 modificado e AISI 304:

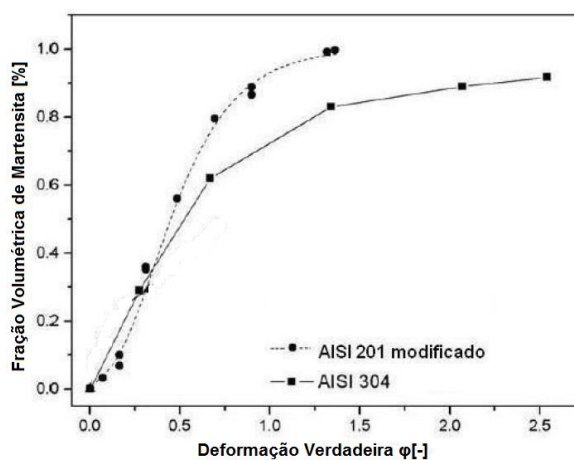


Figura 19 – Fração volumétrica de martensita. Fonte: Tavares et al., 2009.

A figura 20 mostra a microdureza em relação à deformação verdadeira para os aço AISI 201 modificado e AISI 304:

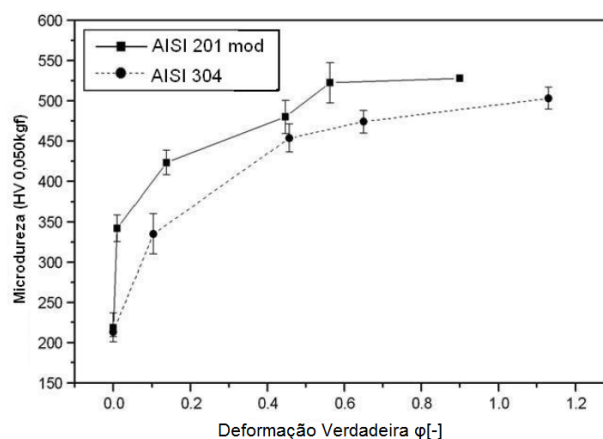


Figura 20 – Microdureza. Fonte: Tavares et al., 2009.

Para Davis(1994), certos elementos de liga são adicionados ao sistema Fe-Cr e Fe-Cr-Ni, como exemplo, manganês, silício, molibdênio e nitrogênio no intuito de controlar a microestrutura e suas propriedades.

Conforme Nikulin e Kaibyshev(2011), o aço inoxidável é composto por elementos como o cromo, vanádio, nióbio, dentre outros. São esses elementos que oferecem ao aço propriedades como resistência mecânica, a corrosão, tenacidade necessária para cada aplicação.

Para Moallemi et al.(2011), o aço inoxidável austenítico, é usado também em aplicações onde se requer resistência a corrosão. Algumas aplicações requerem resistência, outras tenacidade. Sendo que para alcançar esses parâmetros deve-se controlar o teor dos elementos de liga e trabalhar com tamanho de grão controlado. Dessa forma uma estrutura austenítica é preferível para a transformação em martensita durante a deformação.

2.3.1 Aço Inoxidável AISI 201

O aço inoxidável AISI 201 tem um propósito, substituir parte do níquel por manganês a fim de reduzir custos na comercialização desse aço. Essa redução de custos chega a 30% quando comparado com o aço inoxidável AISI 304. Para Charles(2005), a grande diferença dos aços da série 200 em relação a 300, está no percentual de níquel, sendo este de 3,5 a 5% na série 200 e 8 a 10,5% na série 300. Os aços inoxidáveis da série 200, são aços Fe – Cr – Ni – N, sendo o aumentado o percentual de manganês, Sedriks(1996).

Alguns estudos tem sido publicados considerando a utilização dos aços da série 200, como Somrerk et al.(2012), Chuaipan e Srijaroenpramong(2014), e Toit e Steyn(2012), sendo estudado a influência da velocidade no processo de soldagem, a soldagem a plasma entre AISI 201 e AISI 304 e a conformabilidade dos aços inoxidáveis da série 200 e da série 300 respectivamente.

Toit e Steyn(2012), mostra que os aços inoxidáveis da série 200 foram desenvolvidos para resolver a escassez do níquel. Sendo este substituído por manganês. Os principais aços dessa série são o AISI 201 e o AISI 202. Por possuir um menor teor de níquel, essas ligas apresentam uma maior dureza e resistência quando comparado a série 300. Porém esse aumento de resistência e dureza não compromete a ductilidade. Sendo recomendado a utilização do AISI 201 onde se necessita boa usinabilidade e o AISI 202 onde se necessita boa conformabilidade.

Davis(1994), fala que o custo do níquel pode ser minimizado substituído-o por nitrogênio e manganês, formando assim a classe 200. O nitrogênio é muito eficaz em substituir o níquel nos aços inoxidáveis, porque atua na formação e estabilização da austenita. O níquel não pode ser substituído na sua totalidade por nitrogênio devido à solubilidade limitada. O manganês é conhecido por aumentar a solubilidade do nitrogênio. Isso constitui a principal razão para a adição significativa de manganês como um elemento de liga para aços inoxidáveis.

Uma possível desvantagem de aços da série 200 como substitutos para os da série 300 é uma rápida taxa de endurecimento por deformação. Esta rápida taxa de encruamento é atribuída à transformação da austenita metaestável para martensita induzida por deformação, devido a luxação de iterações. Na tabela 1 é apresentada a composição química para o aço inoxidável AISI 201:

Tabela 1 – Composição química aço inoxidável AISI 201. Fonte: ASTM A240

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)
AISI 201	0,15	5,5 ~7,5	1,0	0,03	0,06	16,0 ~18,0	3,5 ~5,5

As propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 201 apresenta-se na tabela 2:

Tabela 2 – Propriedades mecânicas aço inoxidável AISI 201. Fonte: ASTM A240

Propriedades Mecânicas	σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Alongamento (%)
AISI 201	260	515	40

2.3.2 Aço Inoxidável AISI 304

Para Sedriks(1996), os aços inoxidáveis da série 300 são basicamente ligas Fe - Cr - Ni. Outros metais atuam como elementos de liga nos aços inoxidáveis, sendo o cromo o mais importante e a sua presença é fundamental para assegurar as suas propriedades. A tabela 3 apresenta a composição química do aço inoxidável AISI 304.

Tabela 3 - Composição química do aço inoxidável AISI 304. Fonte: ASTM A240

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
AISI 304	0,08	2,0	0,75	0,045	0,03	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5

Conforme Guida,(2006) os aços inoxidáveis são comumente divididos em cinco grupos:
Austeníticos (série 300): contendo 17-25% de cromo e 6-20% de níquel;
Martensíticos (série 400): com 12-17% de cromo e 0,1 a 1,0% de carbono;
Ferríticos (série 400): contendo 10,5-27% de cromo e baixo carbono;
Duplex: com 23-30% de Cr, 2,5-7% de níquel e adições de titânio ou molibdênio;
Endurecíveis por precipitação : podem ter uma base austenítica ou martensítica, com adições de Cu, Ti, Al, Mo, Nb ou N.

Para Guida, (2006) o aço austenítico AISI 304, quando submetido a uma deformação a frio, sofre um endurecimento (os limites de resistência e de escoamento aumentam) e a ductilidade cai. Quanto maior a deformação plástica, maior será o esforço para produzir uma nova deformação, fenômeno este denominado encruamento ou endurecimento por deformação. Os aços austeníticos apresentam uma capacidade de encruamento maior que os ferríticos. Milad(2008), mostra que efeito do encruamento devido à deformação a frio no processo de laminação, para o aço AISI 304 provoca aumento no limite de escoamento e resistência desse aço. Estes aços são utilizados em uma ampla gama de aplicações tais como: indústria aeronáutica, química, naval, arquitetural, alimentação, caldeiraria, fabricação de tubos, etc.

Os aços inoxidáveis austeníticos não são ferromagnéticos, mas depois de conformados, dobrados, embutidos, etc., podem às vezes se tornar magnéticos em função da modificação da estrutura. Não apresentam a transição dúctil-frágil e são os mais indicados para estampagem profunda (Guida, 2006). A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço Inoxidável AISI 304. Fonte: ASTM A240

Propriedades Mecânicas	σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Alongamento (%)
AISI 304	205	515	40

2.4. Análise do Processo de Estampagem por Elementos Finitos

O método de elementos finitos é uma ferramenta útil na análise de problemas termomecânicos. Fornece um meio para estudar em detalhes problemas complexos que conduzem a uma melhor compreensão e eventualmente otimização do processo. Métodos numéricos podem ser aplicados de diversas maneiras, permitindo comparar resultados obtidos experimentalmente com resultados obtidos através da simulação, alcançando um nível mais alto de precisão nos parâmetros de identificação. Desta forma, uma síntese entre experimentos e simulação, busca atingir um maior conhecimento entre os materiais e processos.

Outra grande aplicação do método de elementos finitos esta no projeto de ferramentas, matrizes e no dimensionamento de blanks. Isso porque o método de elementos finitos permite não só a otimização do processo, como também é capaz de prever defeitos que ocorrem ao longo do processo.

O propósito de usar o método de elementos finitos em conformação de metais é investigar o mecanismo dos processos de deformação plástica, com os seguintes objetivos (Oliveira, 2003):

- Estabelecer as relações cinemáticas (forma, velocidades, razões de deformação e deformações) desde a peça não deformada até a peça deformada ou acabada, ou seja, durante todo o processo de conformação;

- Estabelecer os limites de conformabilidade, ou seja, determinar se é possível ou não realizar a operação, sem causar danos superficiais ou internos no material, ao final do processo;

- Prever as tensões, os esforços e a energia necessária para realizar a operação de conformação. Essas informações são necessárias para o projeto das ferramentas e para a seleção dos equipamentos com capacidades apropriadas (força e energia).

Um grande número de defeitos e falhas pode ser encontrado no processo de estampagem. Os ajustes dos parâmetros muitas vezes são feitos por tentativa e erro, o que causa um grande prejuízo de tempo e material.

Assim a simulação numérica pode ser utilizada para otimizar todas as fases dos processos, com uma grande economia de tempo e redução de custos, Zhang et al.,(2012).

2.5. Ensaios das Propriedades Mecânicas dos aços Inoxidáveis AISI 201 e 304

Para caracterização dos materiais estudados, alguns ensaios mecânicos são necessários. Para obter as propriedades do aços inoxidáveis AISI 201 e AISI 304, utiliza-se o ensaio de tração, índice de anisotropia, ensaio Erichsen, ensaio de dureza, composição química e simulação computacional do processo de estampagem empregado nesse estudo.

2.5.1 Determinação Curva de Engenharia x Deformação Relativa

Para Spim et al,(2000), o ensaio de tração é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos por fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais.

De modo a obter a curva tensão de engenharia x deformação relativa para o aço inoxidável AISI 201 e do aço inoxidável AISI 304, realiza-se o ensaio de tração de acordo com a norma ABNT NBR 6152, em uma máquina universal de ensaios. A curva tensão de engenharia x deformação relativa é obtida considerando a relação entre força $F[N]$ e área inicial $A_0[mm^2]$. Sendo utilizados três ensaios válidos para 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação.

2.5.2 Determinação da Curva de Escoamento

A tensão de escoamento é um importante parâmetro utilizado no processo de estampagem. Dois exemplos de utilização da tensão de escoamento são a determinação da força de estampagem e o dimensionamento do ferramental. A tensão de escoamento é aquela tensão aplicada a um corpo de prova submetido a um carregamento uniaxial que provoca o escoamento do material, início da deformação plástica. Assim como para a determinação da curva de engenharia x deformação relativa, a curva de escoamento é determinada através do ensaio de tração, considerando para a determinação da tensão de escoamento $k_f[MPa]$ a relação entre a força $F[N]$ com área instantânea $A[mm^2]$.

2.5.3 Determinação do Índice de Anisotropia

A anisotropia caracteriza as propriedades de uma chapa metálica levando-se em conta os efeitos de sua heterogeneidade causada no processo de laminação. Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura. A deformação origina grãos mais alongados na direção da laminação provocando uma heterogeneidade nas propriedades das chapas. Valores diferentes são encontrados, que dependem de como os corpos de prova são cortados de acordo com a direção em que o material foi laminado. A laminação modifica a orientação cristalina dos grãos que compõem o material. Através da norma ABNT NBR 8164, determina-se a anisotropia normal do aço inoxidável AISI 201 e do aço inoxidável AISI 304 com três ensaios válidos para 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa.

2.5.4 Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen é realizado conforme ABNT NBR 16281: 2014. A carga de fixação do corpo de prova entre a matriz e o anel de fixação deve ser de 1000kgf. A velocidade de deformação do corpo de prova deve ser realizada sem choques e vibrações, com velocidade de penetração entre 5 mm/min e 20 mm/min. Para o ensaio Erichsen, utiliza-se um equipamento universal de ensaios a uma velocidade de 5mm/min, conforme figura 21.



Figura 21 - Equipamento Emic DL60000, utilizado no ensaio de tração, anisotropia e ensaio Erichsen. Fonte: UFRGS

Uma vez realizado o ensaio mede-se a máxima altura alcançada até a fratura do corpo de prova, um esquema para a medição dessa altura pode ser visto na figura 22:

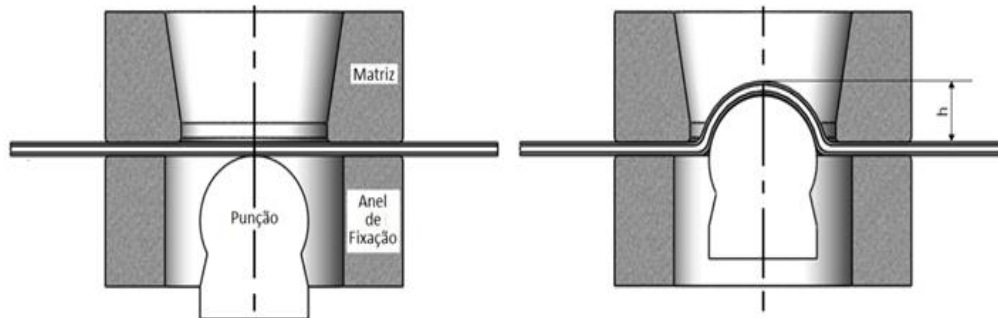


Figura 22 – Medição da altura h no ensaio Erichsen. Fonte: Hosford; Caddel, 2007.

2.5.5 Ensaio de Dureza

Para o ensaio de dureza é utilizado o método Brinell. É realizado conforme norma ASTM E10. Consiste em um penetrador, sendo uma esfera de aço de 10 mm de diâmetro, feito de aço de elevada dureza ou de carbeto de tungstênio. A carga aplicada varia entre 500 e 3000 kgf, durante o teste a carga é mantida constante por um período entre 10 e 30 segundos. O número Brinell de dureza (HB) é função da carga aplicada e do diâmetro da impressão. O equipamento utilizado é um durômetro do modelo Microtest 737 conforme figura 23:



Figura 23 - Durômetro Microtest 737, utilizado para ensaio de dureza. Fonte: Stara

2.5.6 Determinação da Composição Química

A análise da composição química, realiza-se através de um aparelho cuja essência de funcionamento está na espectrometria óptica. O material é acoplado ao equipamento, em um tempo que varia de 15 a 30 segundos (dependendo do material), toda a composição é listada

em um relatório gerado pelo próprio software. O equipamento é um espectômetro Brucker Q4 Tasman, microscópio e acessórios de preparo de amostragem, esse espectômetro pode ser visto na figura 24:



Figura 24 - Espectômetro Brucker Q4 Tasman. Fonte: Stara

2.5.7 Simulação Computacional do Processo de Estampagem

Para a simulação computacional do processo de estampagem, utilizou-se o software de simulação em estampagem Form-Advisor.

O Form-Advisor é um software de simulação em estampagem desenvolvido pela C3P Software. As funções iterativas e as análises dos elementos são integradas unicamente para servir a indústria de estampagem. Seja para o setor automotivo, bens de consumo, indústria de eletrônicos ou estampagem progressiva, tanto para o dimensionamento de matrizes como no desenvolvimento de peças finais.

O Form-Advisor é um software de uso geral que incorpora as análises não lineares, dinâmicas e de elementos finitos. Utiliza capacidades implícitas e explícitas para resolver problemas tanto de fluidos, como dar informações, no caso de uma estampagem, acerca da estampabilidade das chapas, atuação do prensa chapas, do punção, retorno elástico, orelhamento, espessura da chapa durante o processo, tendências a rupturas prematuras, tendências a enrugamento e estampagem em múltiplos estágios.

3. PROCEDIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Caracterização dos Materiais

3.1.1. Curva de Engenharia

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Foi utilizado para sua realização um equipamento de ensaio de tração Emic DL60000. Os corpos de prova foram fabricados com 250mm de comprimento e 20mm de largura, conforme figura 10, a espessura é 2,5mm para ambos materiais, aço inoxidável AISI 201 e AISI 304. O ensaio atende a norma ABNT NBR 6152. A força $F[N]$ necessária para promover uma dada deformação absoluta $\Delta l[mm]$ no comprimento pode ser observada na figura 25.

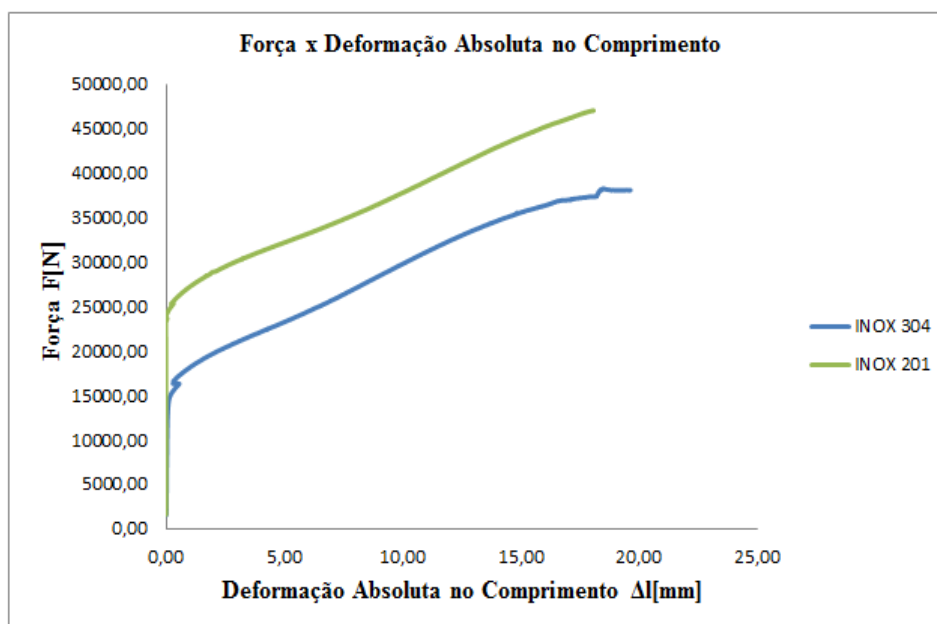


Figura 25 – Força X Deformação Absoluta no Comprimento

A figura 26 mostra a curva tensão de engenharia x deformação relativa para ambos os materiais, na tabela 5, estão expressos os resultados do ensaio de tração, onde pode-se observar a limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (R_m), alongamento até a fratura, constante da curva de escoamento (C) e índice de encruamento (n) para ambos materiais.

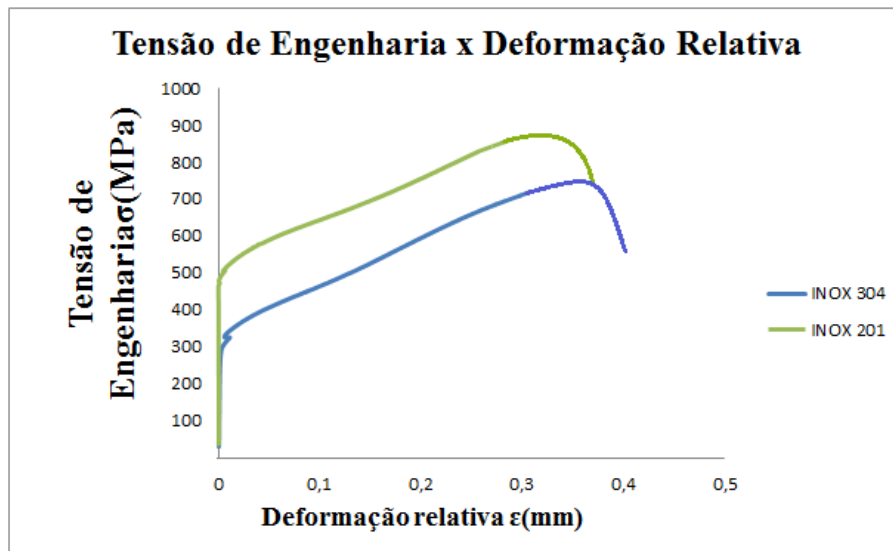


Figura 26 - Curva tensão de engenharia x deformação relativa aço inoxidável AISI 201 e AISI 304

Tabela 5 - Resultados Propriedades Mecânicas

Propriedades Mecânicas	σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Alongamento (%)	C[MPa]	n
AISI 201	455	880	52	1750	0,36
AISI 304	308	720	59	1510	0,42

3.1.2. Curva de Escoamento

A curva de escoamento, que mostra a tensão de escoamento kf [MPa] e a deformação verdadeira ϕ [-], trata das tensões e deformações que ocorrem durante o processo de deformação a cada instante em que haja evolução no processo, obtida pelo ensaio de tração, sendo caracterizada pela equação 20 onde a tensão de escoamento kf [MPa], que é a razão entre a força F [N] e a área instantânea A [mm²], pode ser vista na figura 27:

➤ Curva de Escoamento

$$kf = \frac{F}{A} \text{ [MPa]} \quad \text{Eq.(20)}$$

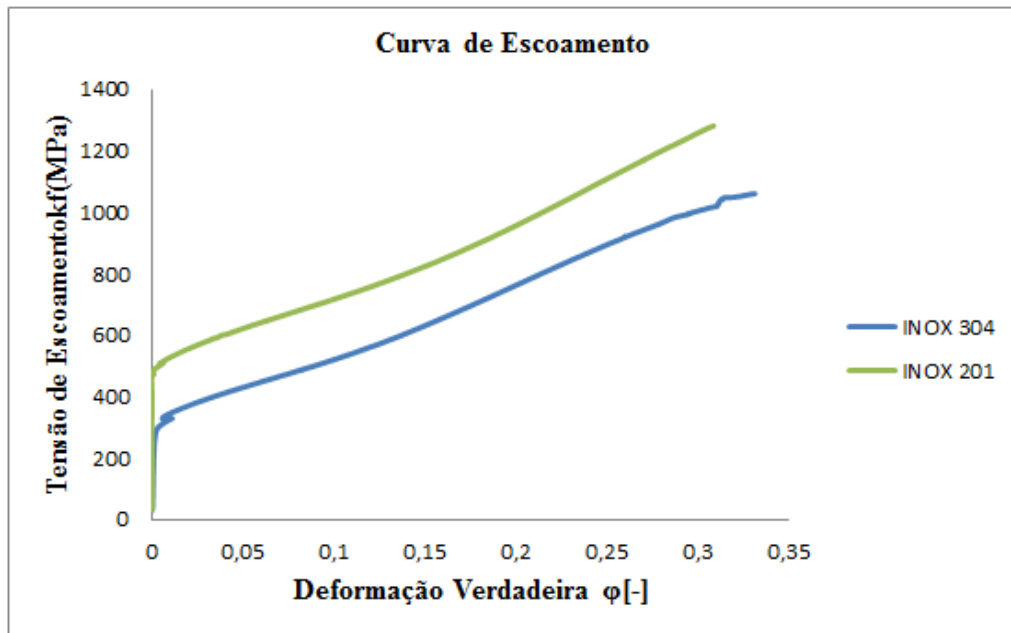


Figura 27 - Curva de escoamento aço inoxidável AISI 201 e AISI 304

A equação de Hollomon $kf = C\varphi^n$ para o aço inoxidável AISI 201 e 304 pode respectivamente ser escrito por:

$$kf = 1750\varphi^{0,36} \text{ para aço inoxidável AISI 201}$$

$$kf = 1510\varphi^{0,42} \text{ para aço inoxidável AISI 304;}$$

O índice de encruamento n , é maior para o aço inoxidável AISI 304. Isso caracteriza uma maior facilidade de estampagem quando comparado ao aço inoxidável AISI 201. O aço inoxidável AISI 304 possui uma capacidade de encruamento maior, ele distribui melhor as deformações pelo seu volume no momento da estampagem.

3.1.3. Índice de Anisotropia

O ensaio de anisotropia foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Foi utilizado para realização do ensaio um equipamento de ensaio de tração Emic DL60000, sendo os corpos de prova tracionados até um limite de 15%. Os corpos de prova foram cortados na direção de 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação. Para o cálculo do índice de anisotropia considera-se a razão entre as deformações verdadeiras na largura (φ_2) pelas deformações verdadeiras na espessura (φ_3):

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} [-] \quad \text{Eq.(21)}$$

Como os erros para a medição das deformações verdadeiras na direção da espessura (φ_3) podem ser grandes, utiliza-se a lei da constância de volumes substituindo (φ_3) por ($\varphi_2 + \varphi_1$):

$$r = \frac{\varphi_2}{-(\varphi_2 + \varphi_1)} [-] \quad \text{Eq.(22)}$$

os resultados para o índice de anisotropia são apresentados na tabela 6:

Tabela 6 - Resultados ensaio de anisotropia

Anisotropia	r [0°]	r [45°]	r [90°]	rm	Δr
AISI 201	1,15	1,12	0,97	1,09	-0,0520
AISI 304	1,21	1,13	1,06	1,13	0,0064

O índice de anisotropia, apresenta valores diferentes, que dependem da direção de laminação em relação a como os corpos de prova foram cortados. Um índice de anisotropia $r = 1$, indica um material isotrópico, as propriedades mecânicas são iguais para todas as direções. Um índice de anisotropia $r < 1$, indica que o material não possui boa capacidade de se permitir estampar, as deformações na espessura serão maiores do que na largura, podendo gerar uma falha durante o processo. Valores de $r > 1$ são desejáveis para uma boa estampagem.

3.1.4. Índice Erichsen

O ensaio Erichsen foi realizado Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, foi utilizado para sua realização um equipamento de ensaio de tração Emic DL60000. Os corpos de prova utilizados foram fabricados em forma de discos com 90mm de diâmetro, conforme figura 28.

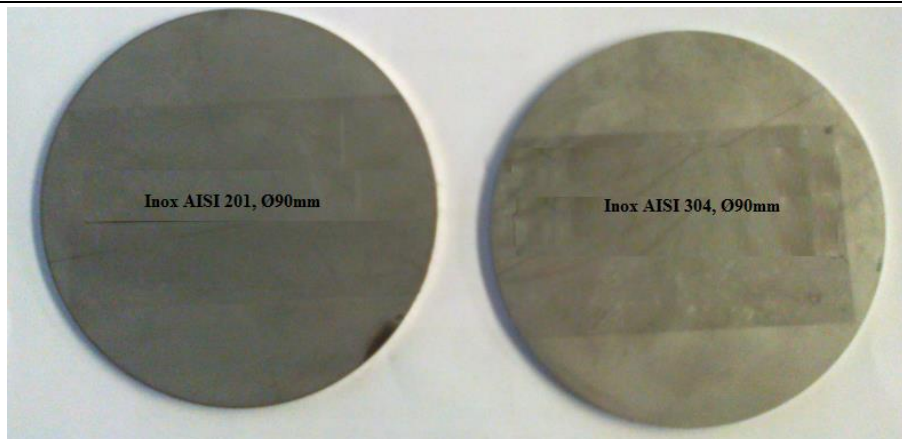


Figura 28 – Corpos de prova para ensaio Erichsen

A curva obtida no ensaio Erichsen para o inoxidável AISI 201 é apresentada na figura 29 e para o inoxidável AISI 304 é mostrada na figura 30:

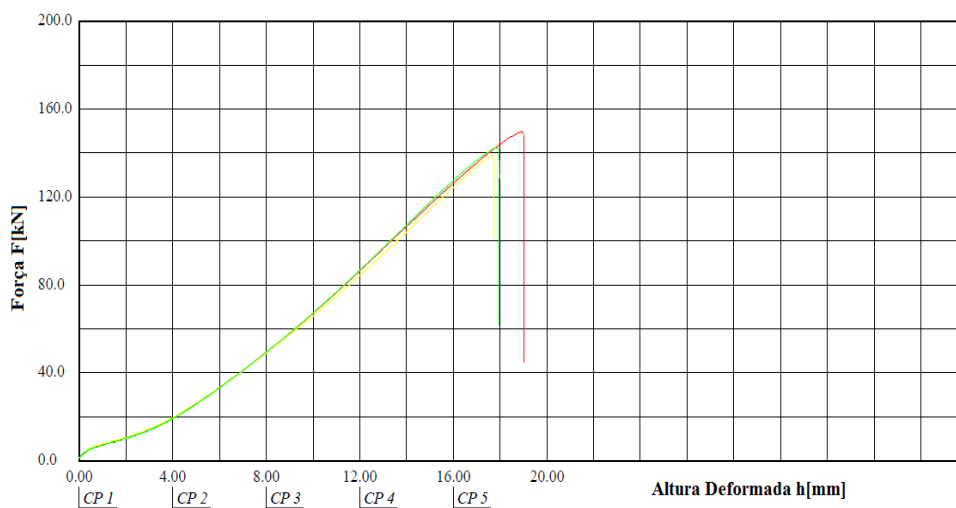


Figura 29- Ensaio Erichsen aço inoxidável AISI 201

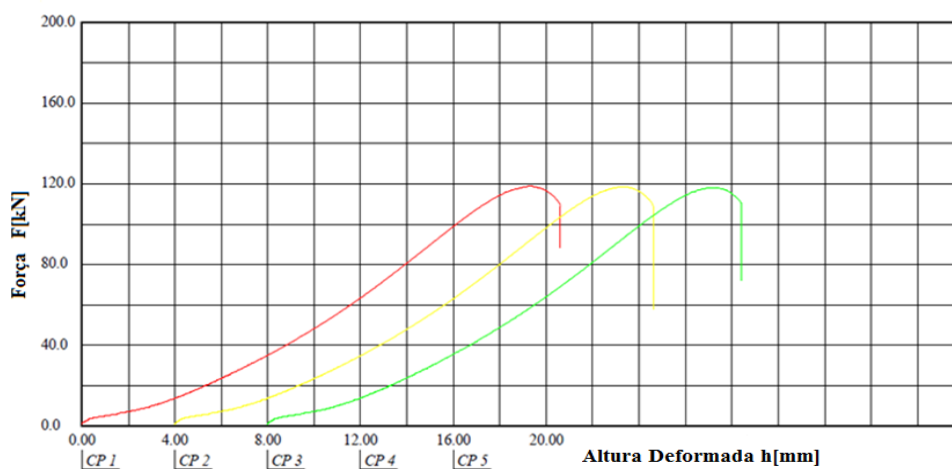


Figura 30 - Ensaio Erichsen aço inoxidável AISI 304

A tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtido no ensaio Erichsen;

Tabela 7 - Índice Erichsen

Índice Erichsen	F[kN]	h[mm]
AISI 201	143	18,16
AISI 304	118	19,26

O ensaio de embutimento Erichsen, é utilizado para comparar a ductilidade entre materiais. A importância de se registrar a carga $F[kN]$, durante todo o ensaio até que ocorra a fratura, se justifica pelo fato de que duas chapas supostamente semelhantes, quando ensaiadas nas mesmas condições, podem apresentar à mesma altura $h[mm]$ de deformação (mesma ductilidade), porém uma das chapas pode precisar de uma carga maior do que a outra. Como foi o caso do inoxidável AISI 201, que necessitou de uma carga maior para uma menor altura deformada em relação ao aço inoxidável AISI 304, conforme tabela 7. A finalização do ensaio é dada no momento da ruptura do corpo de prova, momento em que é registrada a máxima força e altura deformada, conforme figura 31:



Figura 31 – Representação do corpo de prova rompido na finalização do ensaio Erichsen

3.1.5. Dureza

O ensaio de dureza foi realizado nas dependências da Stara – Indústria de Implementos Agrícolas, sendo utilizado um durômetro do modelo Microtest 737. Para a leitura da dureza foi utilizado a escala de dureza Brinell. A dureza encontrada nas amostras é resultado médio de dez medições feitas em cada uma das três amostras de aço inoxidável AISI 201 e AISI 304, sendo apresentada na tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de dureza

Dureza	HB
AISI 201	220±10
AISI 304	170±50

3.1.6. Composição Química dos Materiais

O ensaio de composição química, foi realizado com a utilização de um espectrômetro Brucker Q4 TASMÁN, microscópio e acessórios de preparo de amostragem, sendo que a composição química encontrada pode ser vista na tabela 9;

Tabela 9 - Resultados do ensaio de composição química

	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Ti%	Co%	Cu%
AISI 201	0,079	10,07	0,462	0,037	0,001	14,03	1,029	0,068	0,006	0,123	0,412
AISI 304	0,027	1,254	0,390	0,033	0,005	18,79	5,928	0,108	0,004	0,136	0,129

A principal diferença entre a série 200 em relação a 300, está no percentual de níquel, essa diferença pode ser observada na tabela 9. Elementos como cromo(Cr), níquel(Ni), manganês(Mn) e carbono(C) apresentam composição química fora do especificado no caso do aço inoxidável AISI 201. Já para o inoxidável AISI 304 elementos como níquel(Ni), manganês(Mn) e carbono(C) também estão fora do especificado para esse aço

3.2 Simulação Computacional para a Estampagem do Aço Inoxidável AISI 201 e 304

As simulações foram realizadas utilizando como dados de entrada os dados obtidos nos ensaios de tração e anisotropia (tabelas 5 e 6). A curva tensão de escoamento x deformação verdadeira é gerada pelo software a partir do método de Hollomon. O coeficiente de atrito utilizado entre as ferramentas e o blank foi de 0,1. A velocidade do processo foi de 25mm/s. Para o blank foram utilizadas malhas do tipo quadrangular com 2,75mm, já para as ferramentas foram utilizadas malhas do tipo triangular com tamanho máximo de 5mm e mínimo de 1mm. A figura 32 mostra os resultados da simulação computacional para o aço AISI 201 tendo como critério de falha a curva CLC e a espessura. Nota-se que mesmo com

uma redução de espessura considerável na região central da peça, a CLC indica que não haverá riscos de ruptura na peça.

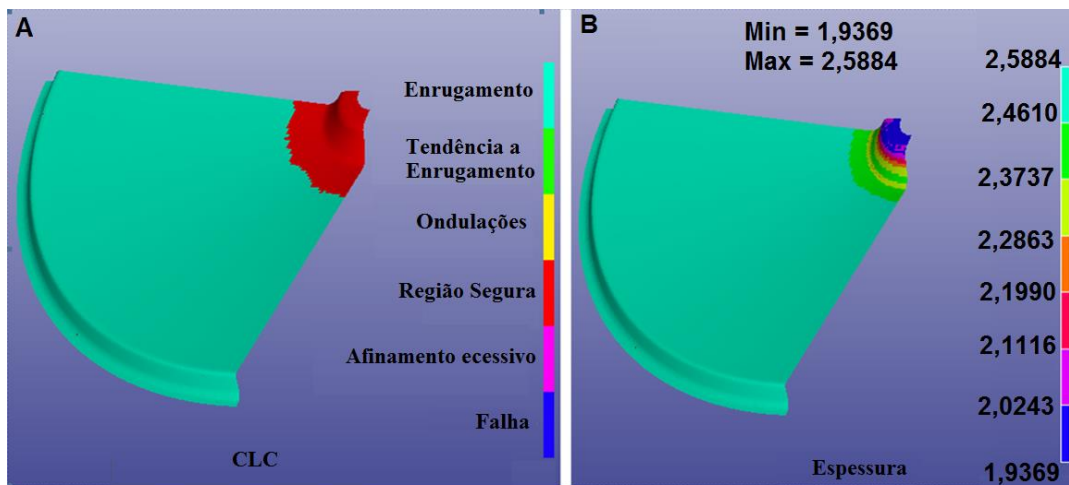


Figura 32 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 201. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.

Na figura 33 estão expressos os resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 304. Assim como ocorrido no aço inoxidável AISI 201, não houve indícios do surgimento de trincas na peça, apenas o aumento de espessura na borda da peça ocasionada pelo enrugamento. Os resultados indicam que ambos os materiais poderiam ser empregados na fabricação desta peça.

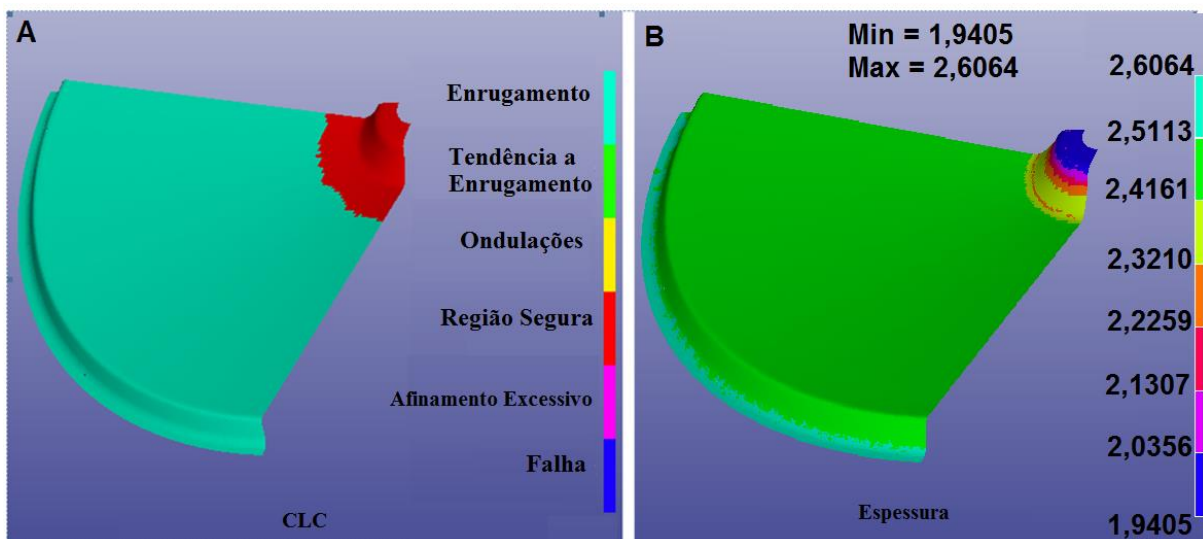


Figura 33 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 304. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.

3.2.1 Força de Estampagem na Simulação Computacional

A simulação da força de estampagem, é um importante parâmetro para especificar a capacidade necessária do equipamento. A força serve para otimização de um projeto onde pode-se avaliar o efeito dos principais parâmetros que interferem no processo como, tensão de escoamento, relação de estampagem, influência do prensa chapas, atrito, dentre outros.

Neste estudo a força de estampagem foi determinada através da simulação computacional do processo de estampagem para os dois aços estudados, o inoxidável AISI 201 e o inoxidável AISI 304. A simulação foi realizada no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. A simulação utilizou como dados de entrada os dados obtidos nos ensaios mecânicos. O software utilizado foi o Form-Adivisor, os resultados para força de estampagem podem ser vistos na figura 34:

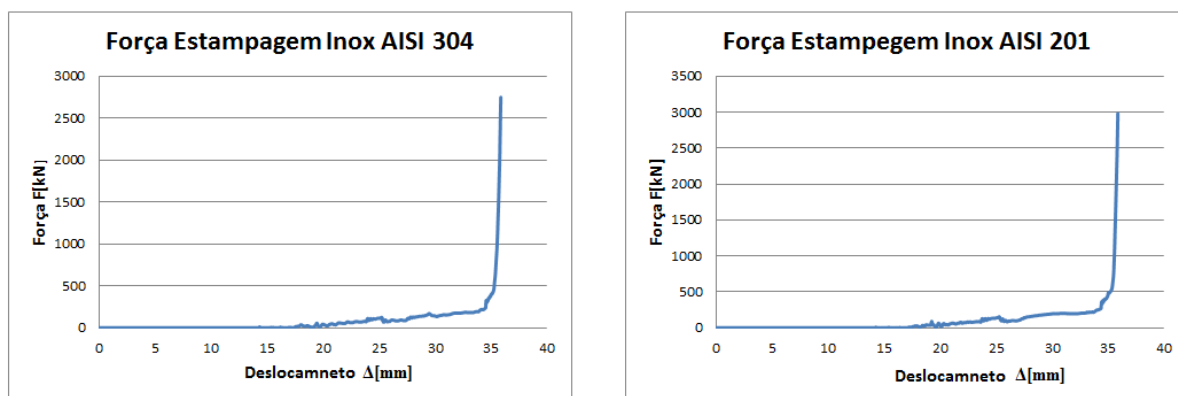


Figura 34 – Força de estampagem para os aços estudados

Conforme gráfico da figura 35, observa-se que a força máxima de estampagem para o aço inoxidável AISI 201 chegou a 3000kN, equivalendo a 300T(Toneladas), sendo esta obtida no final da operação, à um deslocamento de 35mm. Para a mesma condição a força máxima para o aço inoxidável AISI 304, chegou a 2740kN, equivalendo a 274T(Toneladas). Para realizar essa operação deve-se dispor de uma prensa que possua uma capacidade maior que 300T(Toneladas).

3.3 Procedimento de Estampagem do Disco

Para a estampagem do componente estudado, utiliza-se uma prensa Dan-Press 800T, com ferramental específico, conforme figura 35:



Figura 35 - Prensa Dan-Press 800T, utilizada na estampagem. Fonte: Stara

A ferramenta é instalada na prensa, utilizando-se grampos como elementos fixadores na parte inferior e superior. A ferramenta fixada à prensa pode ser vista na figura 36:

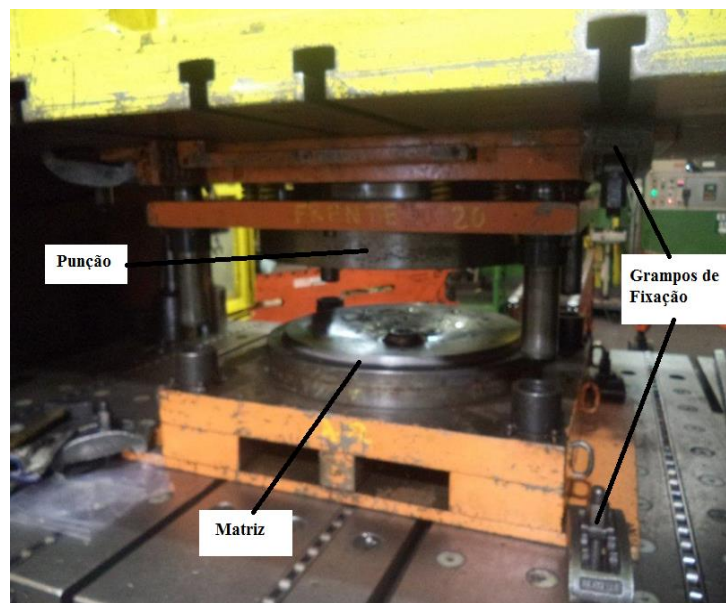


Figura 36 – Ferramenta para estampagem do blank

O blank possui um diâmetro externo de 635mm e possui um furo na região central de diâmetro 21mm. O blank é preparado por processo de corte a laser. A figura 37 identifica o blank como ele chega à prensa.



Figura 37 – Blank preparado para estampagem

Posiciona-se o blank na ferramenta conforme figura 38:



Figura 38 – Blank posicionado na ferramenta

Uma vez posicionado o blank, aciona-se a prensa e o componente estampado é obtido, conforme figura 39:



Figura 39 – Componente estampado na ferramenta

Um desenho esquemático do processo de estampagem pode ser visto na figura 40:

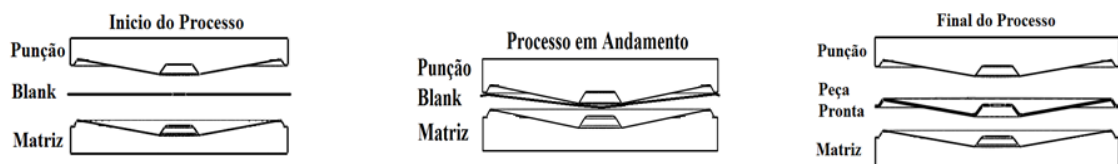


Figura 40 – Desenho esquemático do andamento do processo

3.4 Estampagem dos Discos em aço Inoxidável AISI 201 e 304

De forma a validar os resultados obtidos na simulação numérica, foram estampadas 3 peças em aço inoxidável AISI 201 e AISI 304. O blank que origina as peças estampadas, possui um diâmetro externo de 635mm e um furo central de 21mm de diâmetro(para passagem de um eixo no produto acabado). O blank é fabricado por processo de corte a laser em uma operação anterior à etapa de estampagem. Na figura 41 pode ser visto o blank preparado para estampagem:



Figura 41 – Blank para estampagem

Na figura 42 pode ser visto as peças estampadas em ambos os materiais. Nota-se que assim como a simulação já havia indicado, a peça estampou de forma correta sem que houvesse algum indício de trinca.

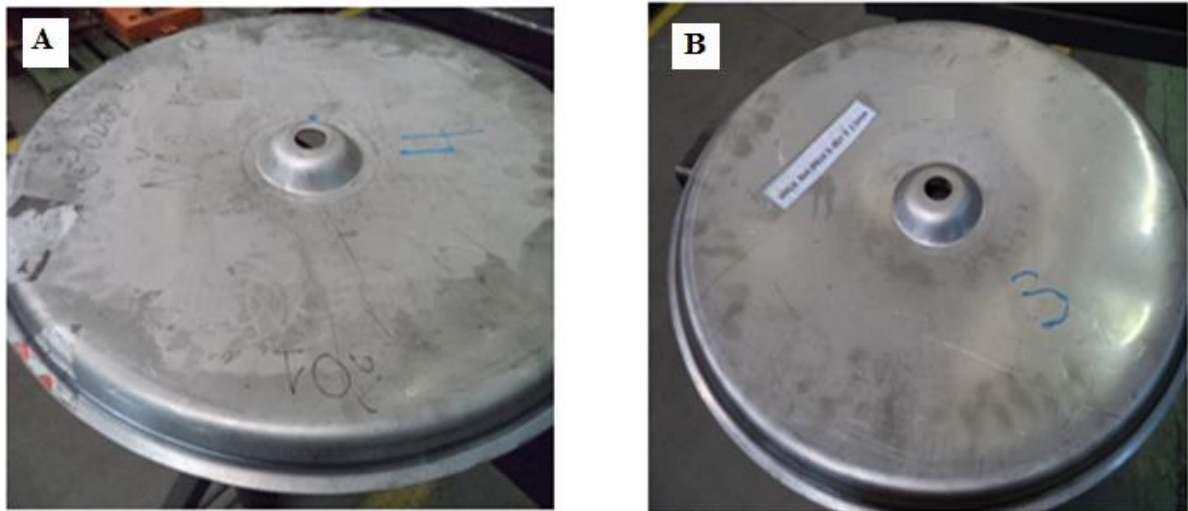


Figura 42 - A) peça estampada em aço inoxidável AISI 201. B) peça estampada em aço inoxidável AISI 304

As deformações verdadeiras no comprimento e na largura, $\varphi_1[-]$ e $\varphi_2[-]$ das peças estampadas foram avaliadas. Utilizando a técnica de medição chamada visioplasticidade, conforme Blazynski, 1989. As deformações são medidas através da leitura de uma grade impressa na chapa com geometria conhecida, circular ou quadrada, no caso foi utilizado malha circular de 2,5 mm de diâmetro, conforme figura 43:

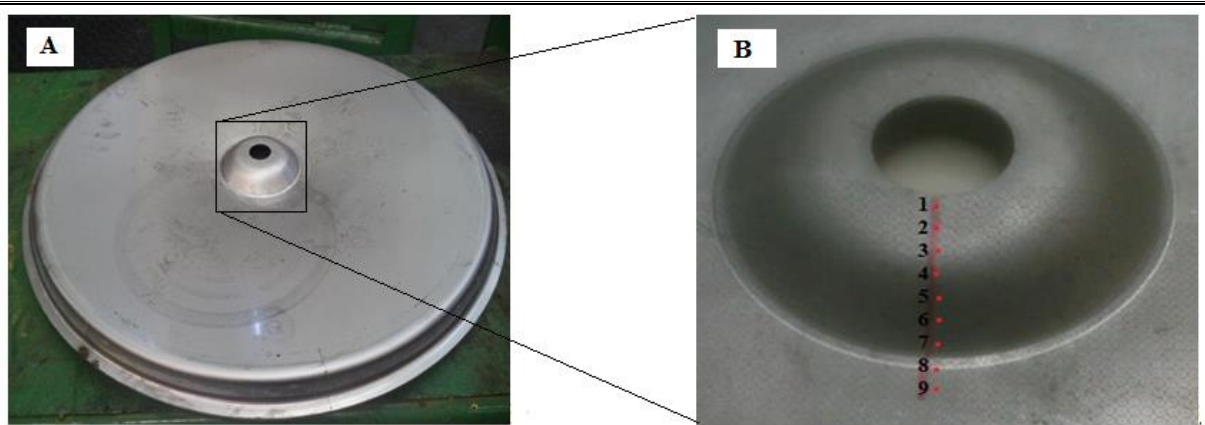


Figura 43 – Em A, Peça estampada. Em B detalhe mostrando a região onde foram medidas as deformações verdadeiras.

Um modo de medir as variações de geometria da grade impressa é utilizar uma fita flexível, conforme figura 44, que por ser flexível permite acompanhar a variação do formato da peça estampada. Medem-se as regiões mais críticas do componente estampado, conforme apontado na figura 43 B.

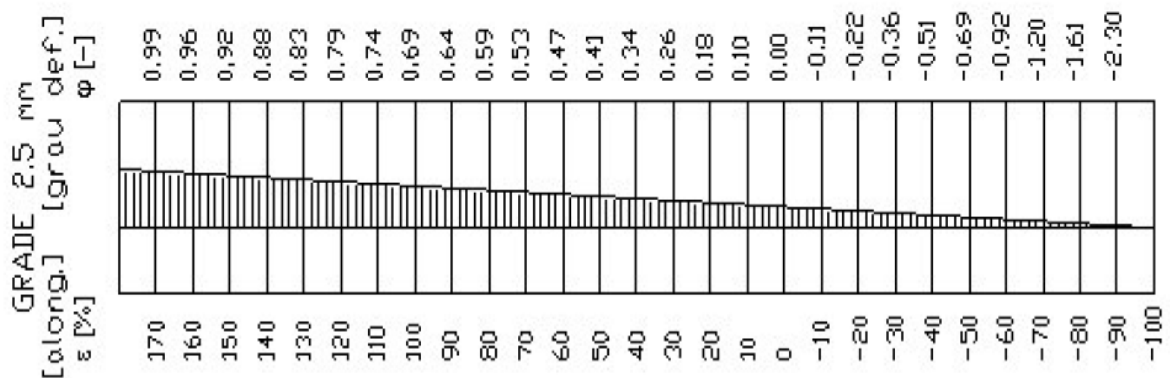


Figura 44 – Grade utilizada para medição das deformações verdadeiras no comprimento e largura, $\varphi_1[-]$ e $\varphi_2[-]$

Os resultados das medições são apresentados na tabela 10, sendo como resultados da medição a deformação relativa no comprimento $\varepsilon_1[\%]$, a deformação relativa na largura $\varepsilon_2[\%]$, a deformação verdadeira no comprimento $\varphi_1[-]$ e deformação verdadeira na largura $\varphi_2[-]$:

Tabela 10 – Medição das deformações verdadeiras no comprimento e largura, $\varphi_1[-]$ e $\varphi_2[-]$

Aço Inoxidável AISI 201					Aço Inoxidável AISI 304				
Medições	ε_1 [%]	φ_1 [-]	ε_2 [%]	φ_2 [-]	Medições	ε_1 (%)	φ_1 [-]	ε_2 [%]	φ_2 [-]
1	40	0,34	-20	-0,22	1	40	0,34	-20	-0,22
2	40	0,34	-20	-0,22	2	30	0,26	-10	-0,11
3	30	0,26	-10	-0,11	3	20	0,18	-10	-0,11
4	20	0,18	-10	-0,11	4	20	0,18	-10	-0,11
5	20	0,18	-10	-0,11	5	20	0,18	-10	-0,11
6	20	0,18	0	-0,11	6	10	0,10	0	0,00
7	10	0,10	0	0,00	7	10	0,10	0	0,00
8	10	0,10	0	0,00	8	0	0,00	0	0,00
9	10	0,10	0	0,00	9	0	0,00	0	0,00

Com base nas deformações verdadeiras medidas $\varphi_1[-]$ e $\varphi_2[-]$, utiliza-se a lei da constância do volume, para calcular a deformação verdadeira na espessura, $\varphi_3[-]$, sendo o resultado apresentados na tabela 11:

Lei da Constância dos volumes:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

Tabela 11 – Cálculo da deformação verdadeira na espessura $\varphi_3[-]$

Aço Inoxidável AISI 201				Aço Inoxidável AISI 304			
Medições	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_3 [-]	Medições	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_3 [-]
1	0,34	-0,22	-0,12	1	0,34	-0,22	-0,12
2	0,34	-0,22	-0,12	2	0,26	-0,11	-0,15
3	0,26	-0,11	-0,15	3	0,18	-0,11	-0,07
4	0,18	-0,11	-0,07	4	0,18	-0,11	-0,07
5	0,18	-0,11	-0,07	5	0,18	-0,11	-0,07
6	0,18	-0,11	-0,07	6	0,10	0,00	-0,10
7	0,10	0,00	-0,10	7	0,10	0,00	-0,10
8	0,10	0,00	-0,10	8	0,00	0,00	0,00
9	0,10	0,00	-0,10	9	0,00	0,00	0,00

Cálculo da máxima redução de espessura:

Aço inoxidável AISI 201, ponto de medição 3:

$$\varphi_1 = 0,26$$

$$\varphi_2 = -0,11$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

$$0,26 - 0,11 = -\varphi_3$$

$$\varphi_3 = -0,15$$

A maior deformação verdadeira na espessura calculada para ambos materiais foi $\varphi_3 = -0,15$, localizada no ponto de medição 3 para o aço inoxidável AISI 201 e no ponto 2 para o aço inoxidável AISI 304. Assim a espessura inicial $s_0 = 2,50mm$ tem uma redução na região estudada apresentando uma espessura final de $s_1 = 2,35mm$.

O resultado das deformações verdadeiras pode ser visto pela figura 45:

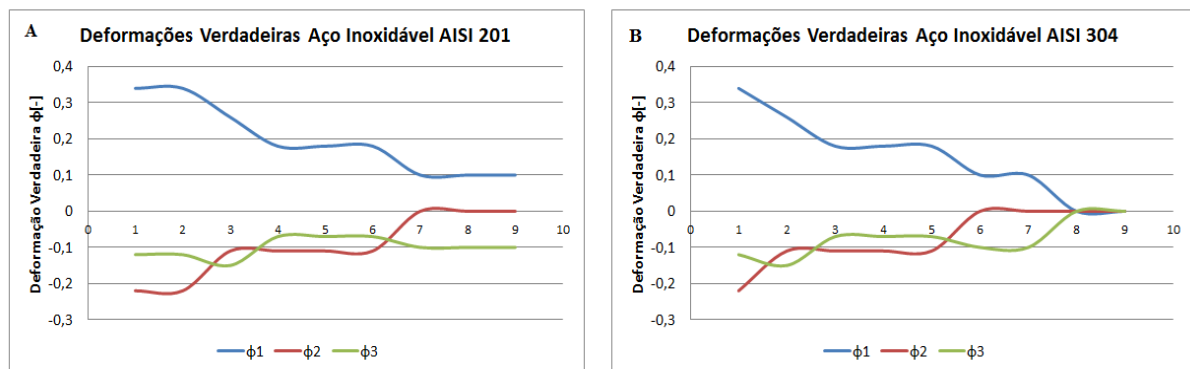


Figura 45 – Em A, deformação verdadeira aço inoxidável AISI 201, em B deformação verdadeira aço Inoxidável AISI 304

4. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

4.1 Curva Tensão de Engenharia x Deformação Relativa

Os resultados obtidos no ensaio de tração para os materiais estudados são apresentados na tabela 12, sendo os resultados para o ensaio de cinco corpos de prova para cada material. Nessa tabela são mostrados como resultados o limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (R_m), alongamento até a fratura, constante da curva de escoamento (C) e índice de encruamento (n) para ambos materiais.

Tabela 12 – Propriedades Mecânicas Ensaio de Tração

Propriedades Mecânicas	σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Alongamento (%)	C[MPa]	n
AISI 201	455	880	52	1750	0,36
AISI 304	308	720	59	1510	0,42

O aço inoxidável AISI 201, apresenta propriedades mecânicas maiores que o aço AISI 304, tanto o limite de escoamento (σ_e) e limite de resistência (R_m) apresentam valores acima do que os obtidos no aço AISI 304. Essa característica confirma que o aço AISI 201 pode suportar carregamento mecânico de maior grandeza quando comparado com aço inoxidável AISI 304. Devido a essa diferença e também ao alongamento até a fratura ser menor para o aço inoxidável AISI 201, esse aço possui maiores dificuldades para se deformar durante o processo de estampagem, o que também sugere uma necessidade de uma força maior para provocar a mesma deformação.

Conforme ASTM A240, as propriedades mecânicas devem seguir tabela 13 para o aço AISI 201 e AISI 304:

Tabela 13 – Propriedades Mecânicas aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304. Fonte: ASTM A240

Propriedades Mecânicas	σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Alongamento (%)
AISI 201	260	515	40
AISI 304	205	515	40

Os dois materiais estudados, apresentam variações nas propriedades mecânicas quando comparados às propriedades apresentadas pela norma ASTM A240 na tabela 13. No aço inoxidável AISI 201 as variações das propriedades mecânicas do material ensaiado são bastante expressivas quando comparado com as da literatura.

Outra literatura consultada foi Toit e Steyn(2012), sendo as propriedades mecânicas para esses autores mostradas na tabela 14. Esses autores estudaram o aço inoxidável AISI 202(que é um aço semelhante ao AISI 201) e AISI 304.

Tabela 14 - Propriedades Mecânicas aço Inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012)

Propriedades Mecânicas	σ_e (MPa)	R_m (MPa)	Alongamento (%)	C[MPa]	n
AISI 202	283	631	57	1302	0,39
AISI 304	284	662	57	1404	0,42

Toit e Steyn(2012), apresentam valores para as propriedades mecânicas entre o aço AISI 202 e AISI 304 que são muito semelhantes entre si. Tanto o limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (R_m) e alongamento até a fratura, praticamente não apresentam variações. Ao analisar os resultados de Toit e Steyn(2012), na tabela 14 e a norma ASTM A240, na tabela 13, observa-se também algumas divergências entre os materiais.

Os aços inoxidáveis AISI 201 e AISI 304 ensaiados, apresentam propriedades mecânicas superiores às propriedades apresentadas pela norma ASTM A240, principalmente para o inoxidável AISI 201 onde essa diferença é maior. Essas propriedades mecânicas são fortemente influenciadas pela composição química dos materiais, elementos que causaram essas diferenças entre os materiais comparados.

As curvas tensão de engenharia x deformação relativa para o aço AISI 201 e AISI 304 ensaiados, podem ser vistas na figura 46:

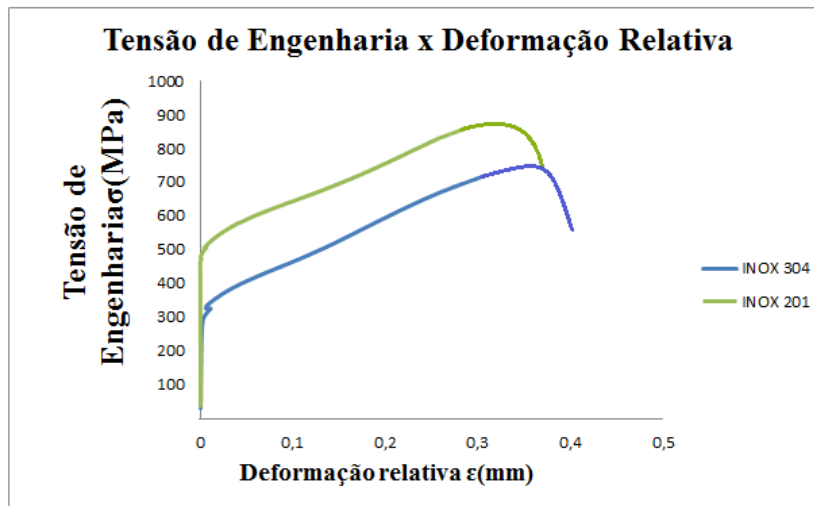


Figura 46 – Curva tensão de engenharia aço inoxidável AISI 201 e AISI 304 ensaiados

Para comparação, as curvas tensão de engenharia x deformação relativa para o aço AISI 202 e AISI 304 encontradas em Toit e Steyn(2012), podem ser vistas na figura 47:

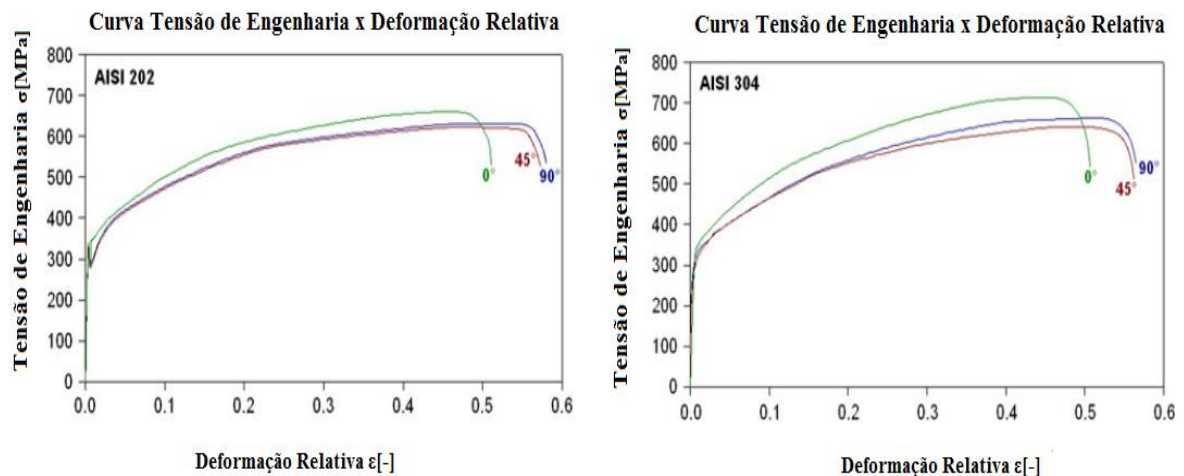


Figura 47 - Curva tensão de engenharia aço inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012)

Comparando os resultados do ensaio, figura 47, com os resultados da literatura, figura 11, pode-se concluir que o aço inoxidável AISI 201 possui uma curva, no diagrama tensão de engenharia x deformação relativa, mais alta do que o aço inoxidável AISI 304, assim possui propriedade mecânicas como limite de escoamento σ_e (MPa), e limite de resistência (R_m) superiores ao aço inoxidável AISI 304 nos resultados do ensaio e para a literatura pesquisada.

4.2 Curva de Escoamento

A curva de escoamento é obtida pela razão entre a força $F[N]$ e a área instantânea $A[mm^2]$, sendo o resultado a tensão de escoamento $kf[MPa]$, que é calculada pela equação 23. As curvas obtidas nos ensaios para o aço AISI 201 e AISI 304 pode se vistas na figura 48:

➤ **Curva de Escoamento**

$$kf = \frac{F}{A} [MPa] \quad Eq.(23)$$

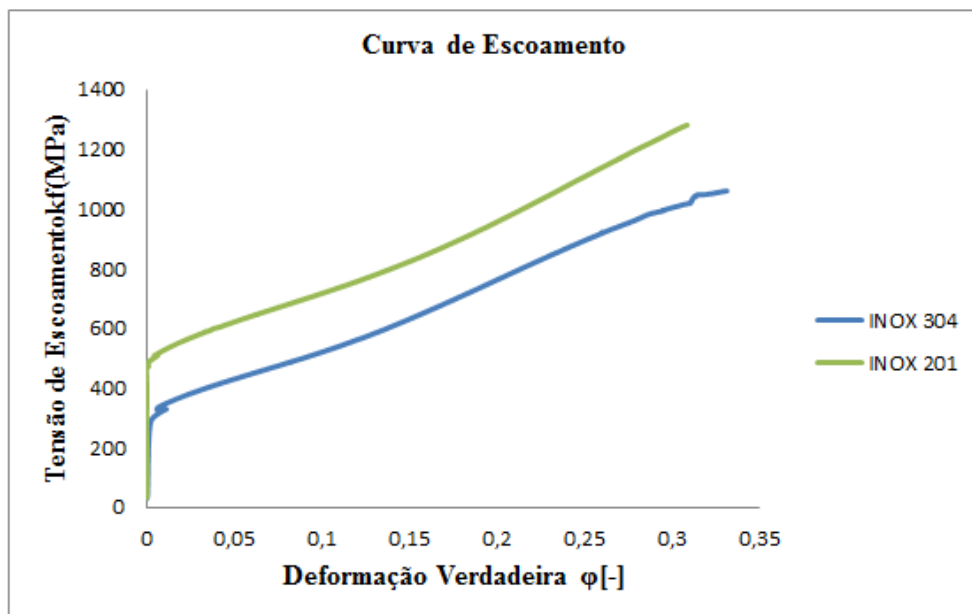


Figura 48 – Curva de escoamento aço inoxidável AISI 201 e AISI 304 ensaiados

Assim como para a tensão de engenharia x deformação relativa, a curva de escoamento para o aço inoxidável AISI 201 apresenta resultados superiores aos apresentados pela curva do aço inoxidável AISI 304. A constante de escoamento (C) e o índice de encruamento (n), que podem ser vistos na tabela 14 completam a equação de Hollomon $kf = C\varphi^n$ para o aço inoxidável AISI 201 e 304 podendo respectivamente ser escrito por:

$$kf = 1750\varphi^{0,36} \text{ para inoxidável AISI 201; para } \varphi = 0 \therefore kf = 455MPa$$

$$kf = 1510\varphi^{0,42} \text{ para inoxidável AISI 304; para } \varphi = 0 \therefore kf = 308MPa$$

Os resultados obtidos para a constante de escoamento (C) e o índice de encruamento (n), caracterizam que para o inoxidável AISI 201 entrar na região de deformação plástica, exige-se a aplicação carga maior, levando a uma maior tensão de escoamento (kf), quando comparado ao aço inoxidável AISI 304.

O índice de encruamento (n), é maior para o aço inoxidável AISI 304. Isso caracteriza uma maior facilidade de estampagem quando comparado ao aço inoxidável AISI 201. O aço inoxidável AISI 304 possui uma capacidade de encruamento maior, ele distribui melhor as deformações pelo seu volume no momento da estampagem.

Fazendo uma analogia com os resultados apresentados por Toit e Steyn(2012), visto na tabela 15, pode-se escrever as seguintes equações:

Tabela 15 – Equações para Tensão de Escoamento

Materiais Ensaiaados	Resultados de Toit e Steyn(2012)
$kf = 1750\varphi^{0,36}$ para aço inoxidável AISI 201	$kf = 1302\varphi^{0,39}$ para aço inoxidável AISI 202
$kf = 1510\varphi^{0,42}$ para aço inoxidável AISI 304	$kf = 1404\varphi^{0,42}$ para aço inoxidável AISI 304

Conforme equações da tabela 15, os resultados de Toit e Steyn(2012), sugerem uma menor tensão de escoamento para o aço inox AISI 202 em relação ao AISI 304. Já nos resultados obtidos nos ensaios, observa-se uma tensão de escoamento maior para o aço inox AISI 201 quando comparado ao AISI 304. Essas diferenças que existem entre os materiais podem ser associadas à elementos como a composição química dos materiais, elementos de liga, microestrutura, dentre outros.

4.3 Índice de Anisotropia

O valor da anisotropia (r), deformação plástica da largura pela espessura, é a medida da capacidade que um material tem de resistir um afinamento de sua espessura durante a deformação. A anisotropia (r) representa a anisotropia normal, que pode ser determinada a partir de medições tomadas em ângulos diferentes para a direção de laminação. Esse ensaio analisou corpos de prova cortados a 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação, os resultados do ensaio podem ser vistos na tabela 16, onde se obteve a anisotropia média (r_m) com a equação 24.

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) [-] \quad Eq.(24)$$

Tabela 16 - Resultados Índice de Anisotropia aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304

Anisotropia	r [0°]	r [45°]	r [90°]	rm	Δr
AISI 201	1,15	1,12	0,97	1,09	-0,0520
AISI 304	1,21	1,13	1,06	1,13	0,0064

Como mostrado na tabela 16, a anisotropia média (r_m) para o inoxidável AISI 201 é levemente inferior do que para o inoxidável AISI 304, (cerca de 4%). Ambos os aços inoxidáveis possuem valores de anisotropia média (r_m) semelhante e, portanto, espera-se que exibir boas propriedades de estampagem e semelhantes entre si. Os resultados sugerem que AISI 201 deve ter uma resistência levemente menor ao afinamento da espessura durante a deformação e, portanto, possui uma qualidade para deformação inferior em comparação com o aço inoxidável AISI 304.

A anisotropia planar (Δr), calculada pela equação 25, prevê a possibilidade da formação de orelhamento durante a estampagem profunda.

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} [-] \quad Eq.(25)$$

Conforme resultados da tabela 16, observa-se que o aço inoxidável AISI 201, possui maior possibilidade da formação de orelamento no processo de estampagem profunda, quando comparado ao inoxidável AISI 304, já que seu valor de anisotropia planar é maior em relação ao AISI 304.

Uma combinação de um alto valor de anisotropia normal (r_m) e baixo valor de anisotropia planar (Δr) proporcionam excelentes condições de estampagem. Nessas condições, o aço inoxidável AISI 201 possui piores condições de estampagem em relação ao aço inoxidável AISI 304.

Toit e Steyn(2012), apresentam os resultados se seus experimentos para anisotropia do aço inoxidável AISI 202 e AISI 304 na tabela 17:

Tabela 17 - Resultados Índice de Anisotropia aço Inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012)

Anisotropia	r [0°]	r [45°]	r [90°]	rm	Δr
AISI 202	2,81	3,57	2,05	3,00	-0,57
AISI 304	2,78	2,65	1,66	2,44	-0,22

Toit e Steyn(2012), mostram em seu trabalho, conforme resultados da tabela 17, que o aço inoxidável da série 200, no caso o aço inoxidável AISI 202 possui melhores condições de estampagem em relação ao aço inoxidável da série 300, o inoxidável AISI 304, sob o quesito da anisotropia. Esses aços apresentam também valores de anisotropia bem superiores aos aços que foram ensaiados nesse estudo, o aço inoxidável AISI 201 e o AISI 304. Essas diferenças existem possivelmente pelas diferenças de composição química entre esses materiais, podendo ser atribuída a outros elementos como tamanho de grão e processo de fabricação do aço, elementos que não foram estudados nesse trabalho.

4.4 Índice Erichsen

Os resultados do ensaio de embutimento Erichsen, avaliam a altura máxima até a fratura do corpo de prova, conforme figura 28, apresentada no item 3.4. A tabela 18 apresenta a altura máxima alcançada no momento da ruptura e a força máxima que causou essa ruptura no corpo de prova.

Tabela 18 – Resultados Ensaio Erichsen para aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304

Índice Erichsen	F[kN]	h[mm]
AISI 201	143	18,16
AISI 304	118	19,26

Conforme resultados da tabela 18, observa-se que os materiais possuem uma profundidade de embutimento Erichsen semelhantes. Sendo que o aço inoxidável AISI 201 alcançou uma profundidade 6% menor que a aço AISI 304. No entanto para que fosse alcançada as respectivas profundidades de embutimento, o aço inoxidável AISI 201 utilizou uma força maior que o aço inoxidável AISI 304, (um aumento de cerca de 21%) no momento da ruptura do corpo de prova.

Com esses resultados, entende-se que os materiais possuem propriedades semelhantes para a operação de embutimento, com a observação que o aço inoxidável AISI 201 necessitará de uma força maior para provocar a mesma deformação que no aço inoxidável AISI 304.

4.5 Dureza

Para o ensaio de dureza, foi utilizado corpos de prova para a aço inoxidável AISI 201 e AISI 304, em forma de disco, com 90mm de diâmetro, os dois materiais encontravam-se no estado recozido. Não foi avaliado dureza após a deformação. Para medição da dureza dos materiais foi utilizado a escala de dureza Brinell, a média das medidas de dureza são apresentados na tabela 19:

Tabela 19 – Resultados Ensaio de Dureza para Aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304, comparado com a norma ASTM A240

Dureza	HB Ensaio	HB norma ASTM A240
AISI 201	220±10	217
AISI 304	170±5	201

Conforme resultados da tabela 19, observa-se que aço inoxidável AISI 201 possui uma dureza maior que o aço inoxidável AISI 304(cerca de 30%). Os resultados apresentados são a média das medições feitas, o inoxidável AISI 201 teve uma dureza mínima de 210HB e uma máxima de 230HB, o aço inoxidável AISI 304 variou de um mínimo de 165HB a um máximo de 175HB. Observa-se uma menor homogeneidade no aço inoxidável AISI 201 em relação ao AISI 304, já que seu perfil de dureza teve uma variação maior ao longo do corpo de prova.

O aço inoxidável AISI 304 teve uma dureza menor quando compara a norma ASTM A240, esse fato deve-se a composição química desse material onde o elemento carbono está abaixo do especificado.

O trabalho de Toit e Steyn(2012), também aponta, entre os materiais estudados, o aço inoxidável da série 200 com uma dureza maior que o aço inoxidável da série 300. Esse estudo ainda avaliou o comportamento do perfil de dureza após deformações, obtendo como resultados um perfil de dureza ainda maior para o aço da série 200. O estudo aponta que esse aço possui uma maior taxa de formação de martensita induzida por deformação. Elemento

esse que promove um aumento no perfil de dureza desse aço após a deformação quando comparado com aço da série 300. Esse estudo avaliou o aço inoxidável AISI 202 e AISI 304.

4.6 Composição Química

Para identificar a composição química dos materiais, foi realizado um ensaio com os dois materiais estudados, o aço inoxidável AISI 201 e AISI 304. O resultado desse ensaio pode ser observado na tabela 20:

Tabela 20 – Resultados Composição Química Aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304

	C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Ti%	Co%	Cu%
AISI 201	0,079	10,07	0,462	0,037	0,001	14,03	1,029	0,068	0,006	0,123	0,412
AISI 304	0,027	1,254	0,390	0,033	0,005	18,79	5,928	0,108	0,004	0,136	0,129

A principal diferença entre os aços da série 200 em relação a série 300, está na diminuição do elemento níquel e aumento do elemento manganês. Conforme resultados da tabela 20, observa-se que essa condição está atendida.

Conforme norma ASTM A240, a recomendação para a composição química dos aços estudados deve seguir a tabela 21:

Tabela 21 – Composição Química Aço Inoxidável AISI 201 e AISI 304. Fonte: ASTM A240

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)
AISI 201	0,15	5,5 ~7,5	1,0	0,03	0,06	16,0 ~18,0	3,5 ~5,5
AISI 304	0,08	2,0	0,75	0,045	0,03	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5

Conforme indicação da composição química pela tabela 21, observa-se que alguns elementos como cromo(Cr), níquel(Ni), manganês(Mn) e carbono(C) apresentam composição química fora do especificado no caso do aço inoxidável AISI 201. Já para o inoxidável AISI 304 elementos como níquel(Ni), manganês(Mn) e carbono(C) também estão fora do especificado para esse aço. Esses elementos possuem influência direta nas propriedades mecânicas desses materiais. Nota-se um grande problema de qualidade na fabricação dos aços AISI 201 e AISI 304, já que os principais elementos encontram-se fora do especificado conforme tabela 21.

Na consulta de outra literatura, Toit e Steyn.(2012) apresentam como composição química para o aço inoxidável AISI 202 e AISI 304 estudados naquele trabalho os valores da tabela 22:

Tabela 22 - Composição Química Aço Inoxidável AISI 202 e AISI 304. Fonte: Toit e Steyn(2012)

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)
AISI 202	0,007	7,03	0,53	0,0007	0,024	16,31	4,91
AISI 304	0,025	1,80	0,42	0,015	0,03	18,21	8,69

Comparando os resultados da tabela 22 com os resultados dos materiais ensaiados nesse estudo, observam-se elementos fora do especificado para os dois materiais. No caso do aço inoxidável AISI 201 os elementos cromo(Cr), níquel(Ni) e manganês(Mn) apresentam problema na composição química. No caso do aço AISI 304 o níquel(Ni) está fora do especificado.

Nas duas literaturas utilizadas os aços ensaiados nesse estudo apresentam sérios problemas de qualidade em sua fabricação.

4.7 Simulação Computacional do Processo de Estampagem

Os resultados da simulação computacional do processo de estampagem para o aço inoxidável AISI 201 usando a CLC e a espessura como critério de falha pode ser visto na figura 49:

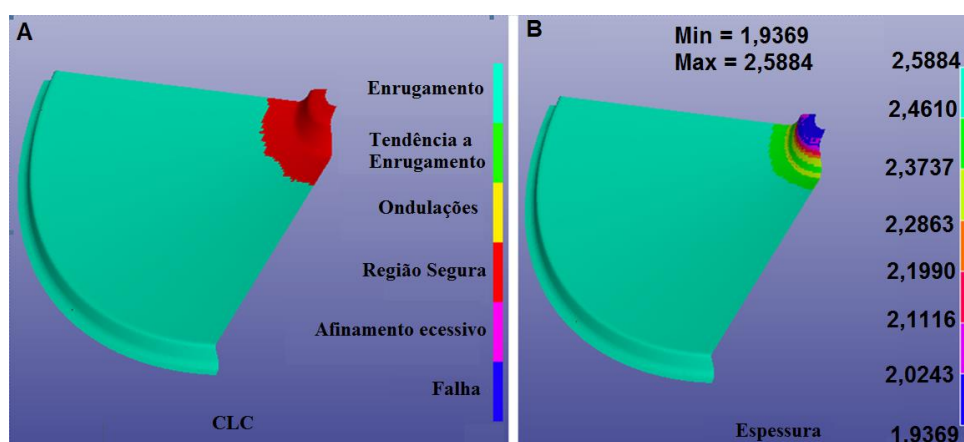


Figura 49 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 201. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.

Os resultados da simulação computacional do processo de estampagem para o aço inoxidável AISI 304 usando a CLC e a espessura como critério de falha pode ser visto na figura 50:

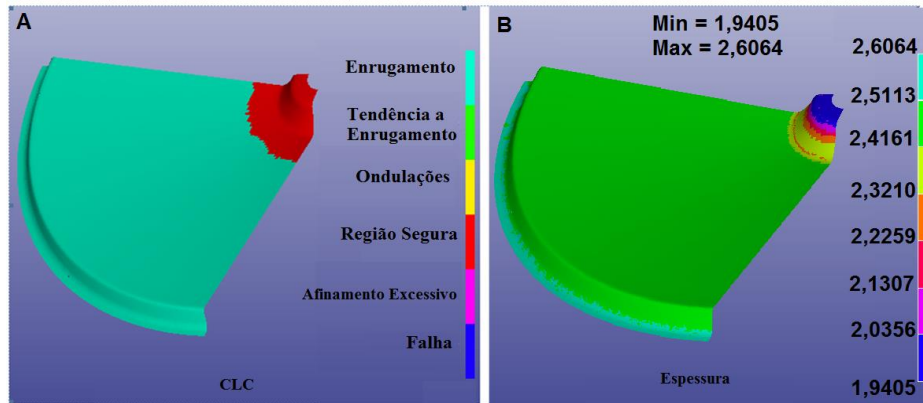


Figura 50 - Resultados da simulação computacional para o aço inoxidável AISI 304. A) utilizando a CLC como critério de falha. B) utilizando a espessura como critério de falha.

Os resultados da simulação computacional do processo de estampagem, para ambos os materiais, não apresentam indícios de trinca. É apontada uma redução de espessura na região mais crítica que pode chegar a 1,93mm para o inoxidável AISI 201 e 1,94mm para o inoxidável AISI 304.

Conforme figura 50 e 51, percebe-se que há riscos de ocorrer um enrugamento na peça, isso ocorre devido o processo de estampagem ser realizado sem a utilização de prensa chapa.

Os blanks preparados por processo de corte a laser, para o aço inoxidável AISI 201 e AISI 304, foram estampados e as deformações verdadeiras no comprimento e na largura da região mais crítica foram avaliadas. As deformações verdadeiras no comprimento e na largura foram medidas usando a técnica da visioplasticidade conforme Blazynski, 1989. A peça estampada pode ser vista na figura 51:



Figura 51 – Peça estampada mostrando a região de medição das deformações

Com as medições das deformações verdadeiras no comprimento (φ_1) e na largura (φ_2), com a lei da constância de volume, obtêm-se as deformações verdadeiras na espessura (φ_3). Os resultados das medições das deformações verdadeiras e o cálculo das deformações verdadeiras na espessura podem ser vistos na tabela 11:

A maior deformação verdadeira na espessura calculada para ambos os materiais foi $\varphi_3 = -0,15$. Assim a espessura inicial $s_0 = 2,50mm$ tem uma redução na região estudada apresentando uma espessura final de $s_1 = 2,35mm$. O resultado obtido pela medição das deformações verdadeira foi uma redução de espessura menor do que o apontado pela simulação computacional. As peças foram estampadas e não houve indícios de trincas conforme previsto pela simulação computacional do processo de estampagem.

5. CONCLUSÕES

A caracterização dos materiais, aço inoxidável AISI 201 e AISI 304, efetuada nesse estudo, mostra que existe diferenças entre esses materiais. Sendo as diferenças evidenciadas pelo resultado obtido em cada ensaio.

No ensaio de tração, o aço inoxidável AISI 201, apresentou maior resistência mecânica e maior limite de escoamento com menor alongamento em relação ao aço inoxidável AISI 304. O encruamento do inoxidável AISI 201, foi menor caracterizando a esse material uma menor capacidade de homogeneização das deformações durante o processo de estampagem. Esse aço apresenta maiores dificuldades de estampagem relacionado ao comportamento do aço inoxidável 304.

O índice de anisotropia é semelhante para os materiais. O aço inoxidável AISI 201 apresentou resultado de anisotropia média levemente inferior ao aço inoxidável AISI 304, cerca de 4%. Esse resultado mostra o que o aço inoxidável AISI 201 possui uma maior possibilidade de afinamento da espessura durante o processo de deformação do que o aço inoxidável AISI 304. A anisotropia planar foi semelhante para os dois materiais, mostrando uma maior possibilidade de orelhamento para o aço inoxidável AISI 201.

O ensaio de embutimento apresentou resultados muito semelhantes para ambos os materiais. As profundidades alcançadas até a deformação foram muito parecidas para os dois materiais. A força máxima alcançada no momento da ruptura foi maior para o aço inoxidável AISI 201. A dureza do aço inoxidável AISI 201 foi cerca de 30% maior que o aço inoxidável AISI 304. As variações obtidas nas medições de dureza também foram maior para o aço inoxidável AISI 201. Com esses resultados, observa-se que o aço inoxidável AISI 201 possui uma menor homogeneidade em relação ao aço inoxidável AISI 304. Devido a dureza ser maior para o aço inoxidável AISI 201, a força máxima no ensaio de embutimento também foi maior para esse aço.

Um item que chama atenção é a composição química, o ensaio mostrou que elementos como o cromo, níquel e manganês apresentam percentual fora do especificado para o aço inoxidável AISI 201. Já para o AISI 304 o elemento que apresentou percentual fora do especificado foi o níquel. Dessa forma a qualidade de fabricação do aço mostra-se comprometida uma vez que a composição química determinada não é atendida e descaracteriza esses aço, que modo que podem ser caracterizados como outros aços que não seja o inoxidável AISI 201 e AISI 304.

Conforme os resultados da composição química, fica evidenciado que os materiais estão fora do especificado. Dessa forma em caso de uso desses materiais com composição química diferente da apresentada nesse trabalho os ensaios devem ser refeitos.

De um modo geral os resultados obtidos em cada ensaio e também na simulação computacional do processo de estampagem, indicam a possibilidade de fabricação do componente “Disco Distribuidor Fertilizantes”, utilizando ambos os materiais. Os blanks foram estampados utilizando os dois materiais e todos os recursos estudados. Os resultados da estampagem foram peças boas.

Com uso do aço inoxidável AISI 201 em substituição ao AISI 304 pode-se chegar a uma redução de custo da ordem de 30%, e estando os materiais nas condições apresentadas nesse estudo não há problemas durante a fabricação.

6. SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS

Estudo do consumo de energia para o processo de estampagem do aço inoxidável AISI 201 e AISI 304.

Avaliação no desgaste do ferramental para estampagem do aço inoxidável AISI 201 e AISI 304.

Avaliação quanto a resistência à corrosão de um aço inoxidável AISI 201 e AISI 304.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6152 – Norma Brasileira específica para o ensaio de tração em materiais metálicos a temperatura ambiente – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALTAN, T., OH, S. e GEGEL, H. L.: **Conformação de Metais – Fundamentos e Aplicações**. São Carlos/SP: EESC – USP, p350, 1999.

ArcelorMittal Inox Brasil. *Catálogo dos aços elétricos*. www.arcelormittalinoxbrasil.com.br. Acessado em 06 de março de 2014

BLAZYNSKI, T. Z.: **Plasticity and Modern Metalforming Technology**. London: Elsevier, p359, 1989.

BORSOI, C. A., HENING, R. e SCHAEFFER, L., **Novo Teste Tecnológico no LdTM para Melhorar a Determinação da Conformabilidade de Chapas Metálicas**. Anais da III Conf. Nacional de Conformação de Chapas. Pg. 50 a 59. Porto Alegre, 2000.

CAMPOS, H. B., BUTUC, M. C., GRACIO, J. J., ROCHA, J. e DUARTE, J. M. F.: **Theoretical and Experimental Determination of the Forming Limit Diagram for the AISI 304 Stainless Steel**. Journal of Materials Engineering and Performance, v.179, p56-60, 2006.

CHARLES, J.: **The New 200Series – An Alternative Answer to Ni Surcharge? Dream of Nightmare?** Proceeding of the Fifth Stainless Eteel Science abd Market Congress, Sevilla. 2005.

CHUAIPAN, W. and SRIJAROENPRAMONG, L.: **Effect of Welding Speed on Microstructures, Mechanical proprieties and Corrosion Behavior of GTA – Welding AISI 201 Stailless Steel Sheets**. Journal of Materials Engineering and Performance, v.214, p402-408, 2014.

DAVIS, J. R., ed. ASM International Handbook. Specialty Handbook: **Stainless Steel. Materials Park**. ASM International, p.10, 1994

DAVIS, J. R., ed. ASM International Handbook. Specialty Handbook: **Stainless Steel. Materials Park**. ASM International, p.13, 1994

DAVIS, J. R., ed. ASM International Handbook. Specialty Handbook: **Stainless Steel. Materials Park**. ASM International, p.20, 1994

DAVIS, J. R., ed. ASM International Handbook. Specialty Handbook: **Stainless Steel. Materials Park**. ASM International, p.22, 1994.

DAVIS, J. R., ed. ASM International Handbook. Specialty Handbook: **Stainless Steel. Materials Park**. ASM International, p.25, 1994

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

FERRARINI, J. L.: **Caracterização dos Materiais para o Processo de Estampagem**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GAU, J.T., CHEN, P.H., GU, H. e LEE, R. S.: **The Coupling Influence of Size Effects and Strain Rates on the Formability of Austenitic Stainless Steel 304 Foil**. Journal of Materials Processing Technology, v.213, p376-382, 2013.

GONZALEZ, B. M., CASTRO, C. S. B., BUONO, V. T. L., VILELA, J. M. C., ANDRADE, M. S., MORAES, J. M. D. e MANTEL, M. J.: **The Influence of Copper Addition on the Formability of AISI 304 Stainless steel**. Materials Science and Engineering, v 343, p51-56, 2003.

GOODWIN, G. M.: **Application of the strain analysis to sheet metal forming in the press shop**. La Metallurgia Italiana, v. 8, p767-774, 1968.

GUIDA, R. B.: **Comparação da Estampabilidade de Chapas de Aço Inoxidável Ferrítico Estabilizado ao Nióbio Obtidas Através de Duas Rotas de Fabricação**. Dissertação de

Mestrado. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG, Belo Horizonte/MG, 2006.

HAEBNER, F., PLAUT, R. L. e PADILHA, A. F.: **Separation of Static Recrystallization and Reverse Transformation of Deformation-Induced Martensite in an Austenitic, Stainless Steel by Calorimetric Measurements**. ISIJ International, v.43, n.9, p1472-1474, 2003.

ISSF – International Stainless Steel Forum: New 200 series steels – **An Opportunity or a Threat to the Image of Stainless Steel** Belgium, November 2005, 14p. Disponível em: www.worldstainless.org. Acesso em 10 de abril de 2014.

KAMERUD, K.L., HOBBIE, K.A., ANDERSON, K.A.: **Stainless Steel Leaches Nickel and Chromium into Foods During Cooking**. J. Agric. Food Chem, v 39, p9495–9501, 2013.

KEELER, S. P.: **Application and Forming of Higher Strength Steel**. Journal of Materials Processing Technology, v 46, p443–454, 1994.

KEELER, S. P.: **Properties Related to Forming. Understanding Sheet Metal Formability**. Machinery, v.74, n. 8, p. 94-103, 1968.

KIM, J. H.: **The effects of Nickel and Carbon Concentrations on the Wear Resistance of Fe-Ni-C Austenitic Alloys**. Wear, v. 266, p1137-1140, 2009.

KIM, H. W. e LIM, C. Y.: **Annealing of Flexible-Rolled Al-5.5 wt%Mg Alloy Sheets for Auto Body Application**. Materials and Design, v31, p71-75, 2010.

KUMAR, D. R.: **Formability Analysis of Extra-Deep Drawing Steel**. Journal of Materials Processing Technology, v 130-131, p31-41, 2002.

LANGE, K. **Umformtechnik – Band 3 – Blechbearbeitung**. Springer – Verlag. Heidelberg, Alemanha, 1990,

LO, K. H., SHEK, C. H. e LAI, J. K. L.: **Recent Developments in Stailess Steels**. Materials Science and Engineering, v. 65, p.39-104, 2009.

MARCINIAK, Z. e KUCZYNSKI, K.: **Limit strains in the processes of stretchforming sheet metal**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 9, p609–620, 1967.

MAZIERO, N. L.: **Apostila Mecânica Aplicado II**. Faculdade de Engenharia e Arquitetura – FEAR. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

MESQUITA, E. L. A.: **Conformação dos Aços Inoxidáveis** – Acesita. São Paulo, 1997

MESQUITA, E. L. A.: **Estampagem dos Aços Inoxidáveis**. Acesita. São Paulo, 1997.

MÉSZÁROS, I., PROHÁSZKA, J.: **Magnetic Investigation of the Effect of Martensite on the Properties of Austenitic Stailess Steel**. Journal of Materials Processing Technology, v. 161, p162-168, 2005.

MILAD, M.: **The Effect of Cold Work on Structure and Properties os AISI 304 Stailess Steel**. Journal of Materials Processing Technology, v. 203. P80-85, 2008.

MOALLEMI, M., NAJAFIZADEH, A., KERMANPUR, A. e REZAEI, A.: **Effect of Reversion Annealing on the Formation of Nano/Ultrafine Grained Structure in 201 Austenitic Stainless Steel**. Materials Science and Engineering, v 530, p378-381, 2011.

NIKULIN, I. e. KAIBYSHEV, R.: **Deformation Behavior and the Portevin-Le Chatelier Effect in a Modified 18Cr–8Ni Stainless Steel**. Materials Science and Engineering, v 528, p1340-1347, 2011.

OLIVEIRA, S. A. G.: **Simulação Numérica de Processos de Conformação Mecânica**. In: 13º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia/MG, 2003

PADILHA, A. F. e SICILIANO, F. J.: **Encruamento, Recristalização Crescimento de Grão e Textura**. 3º ed., ABM, São Paulo, p13, 2005.

PADMANABHAN, R., OLIVEIRA, M. C., ALVES, J. L. e MENEZES, L. F.: **Influence of Process Parameters on the Deep Drawing of Stainless steel**. Finite Elements in Analysis and Design, v 43, p1062-1067, 2007.

RICHTER, A.: **Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação**. In: Anais da VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 24-29, Porto Alegre, 2003.

SALES, F. De, JOAQUIN, V. **Repuxo Cilíndrico e Prismático**, trabalho de conclusão de curso. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2002.

SCHAEFFER, L: **Conformação de Chapas Metálicas** – Porto Alegre: Ed Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, L: **Conformação Mecânica** – Porto Alegre: Ed. Imprensa Livre, 1999.

SCHULER, **Metal Forming Handbook**. Springer-Verlag Heidelber, Alemanha, 1998.

SEDRIKS, A. A.: **Corrosion of Sailess Steel**. Second ed. John Wiley & Sons Inc, New York, 1996.

SILVA, A. L. V. C. e MEI, P. R.: **Aços e Ligas Especiais**. 2º ed., Edgard Blucher, São Paulo, p408-409, 2006.

SILVA, A. L. V. C. e MEI, P. R.: **Aços e Ligas Especiais**. 2º ed., Edgard Blucher, São Paulo, p417, 2006.

SOMRERK, C., WICHAN, C., SUKWATTANA, N.C. e NARIN, P.: **Plasma Arc Welding Between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels Using a Technique of Mixing Nitrogen in Shielding Gas**. Adv. Mater. p538-541, 1464–1468, 2012.

SOUZA, S. A.: **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. Edgard Blucher, 1974.

SPIM, J.A., GARCIA, A. e SANTOS, C.: **Ensaio dos Materiais**. Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos, p247, 2000.

TALYAN, V., WAGONER, R. H., e LEE, J. K.: **Formability of Stainless Steel**. Metallurgical and Materials Transactions, v 29, p2161–2172, 1998.

TAVARES, S. S. M: **Deformation Induced martensitic Transformation in a 201 Modified Austenitic Stainless Steel**. Material Characterization, v.60, p907-911, 2009.

TOIT, M. D. e STEYN, H.G.: **Comparing the Formability of AISI 304 and AISI 202 Stainless Steels**. Journal of Materials Engineering and Performance, v.21, p1491-1495, 2012.

TSCHÄTSCH, H.: **Praxiswissen Umformtechnik**. Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig/Wiesbaden, 5ª edição, 1997

ZHANG, Q. F., CAI, Z. Z., ZHANG, Y. e LI, M.: **Springback Compensation Method for Doubly Curved Plate in Multi-Point Forming**. Materials and Design, v. 47, p377–385, 2013.