

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

Caracterização de materiais para o processo de Estampagem

JOSÉ LUIZ FERRARINI

Dissertação para obtenção do título de Mestre
Em Engenharia

Porto Alegre
2004

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

Caracterização de materiais para o processo de Estampagem

José Luiz Ferrarini
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Conformação Mecânica da Escola de Engenharia da UFRGS,
Dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre de Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2004

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Espinosa- ODONTO SINTER

Prof. Dr. José Lesina César- ULBRA

Prof. Dr. Alexandre Viecelli – UCS.

Prof. Dr. Carlos Artur Ferreira
Coordenador do PPGEM

Dedico a todas as pessoas que possam desenvolver melhor sua qualificação profissional, contribuindo desta forma para engrandecer esta nação admirável e grandiosa que o Brasil.

AGRADECIMENTOS

A todos os colaboradores deste trabalho, o meu reconhecimento. Em especial:

Ao professor Dr. Lírio Schaeffer, Orientador deste trabalho, pelo apoio, orientação, estímulo, compreensão e dedicação proporcionados, os meus sinceros agradecimentos.

Aos professores convidados da UFRGS: Dr Arno Richter e Dr. Roland Hening pelo apoio e orientação.

Aos colegas do Laboratório de Comformação Mecânica (LdTM) da UFRGS, Nixon Vieira Malveira, Carlos Borsoi, Rafael Crivellaro e Sérgio Eglan Silveira Netto.

Aos professores colegas do Laboratório de Tecnologia e Pesquisa (LTP) da UCS Gilmar Tonietto e Albano Luiz Weber e dos funcionários do LTP Gastão Luiz Rossa e Luiz Antônio Putton pelo apoio técnico.

À UFRGS pela disponibilidade no uso do Laboratório de Transformação Mecânica.

À minha família pelo incentivo e apoio.

SUMÁRIO

Agradecimentos	V
Sumário	VI
Lista de figuras	VIII
Lista de Tabelas	X
Lista de Símbolos	XI
Resumo	XII
Abstract	XIII
1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1- Introdução	4
2.2.1- Considerações Gerais	4
2.2.2- Preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração	5
2.2.3- Ensaio de tração convencional- σ x ϵ	6
2.2.4- Construção da curva de escoamento verdadeira- k_f x φ	9
2.2.5- Índice de encruamento	12
2.3- Anisotropia de chapas	14
2.3.1- Considerações gerais	14
2.3.2- Cálculo do índice de anisotropia	16
2.3.3- Formação de orelhas em copos embutidos	18
2.4- Limite Razão de Estampagem	20
2.5- Limite Razão de Estampagem em função do Estiramento e /ou Estampagem Profunda	23
3- MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	27
3.1- Materiais utilizados	27
3.2- Composição química das amostras	27
3.3- Propriedades mecânicas das amostras	28
3.4- Corpos de prova para ensaios de tração	28
3.5- Equipamentos do ensaio de tração	29

3.5.1- Equipamento para o ensaio de tração do LdTM da UFRGS	29
3.5.2- Equipamento para ensaio de Estampagem do LdTM da UFRGS	30
4- RESULTADOS EXPERIMENTAIS	32
4.1- Estrutura metalográfica	32
4.2- Dureza	35
4.3- Ensaio de tração	35
4.4- Dados dos resultados dos ensaios de tração	37
4.5- Ensaio de anisotropia	37
4.6- Ensaio do Limite Razão de Estampagem β	38
4.6.1- Limite Razão de Estampagem β	40
4.6.2- Limite Razão de Estampabilidade em função do estiramento e /ou estiramento profundo	40
4.7- Gráficos dos ensaios de tração	41
5- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
5.1- Ensaio metalográficos	51
5.2- Dureza	51
5.3- Propriedades mecânicas	52
5.4- Anisotropia dos Materiais	55
5.5- Limite Razão de Estampagem	55
6- CONCLUSÕES	57
7- ANEXOS	59
7.1- Anexos 1	59
7.2- Anexos 2	78
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE FIGURAS

2.1- Corpo de prova tipo A	18
2.2- Corpo de prova tipo B	18
2.3- Gráfico tensão vs. Deformação de um metal	20
2.4- Corpo de prova antes e após deformação	21
2.5- Diagrama tensão convencional vs. Deformação relativa	22
2.6- Tensão de escoamento vs. Deformação verdadeira	23
2.7- Curva de escoamento vs. Deformação logarítmica	25
2.8- Curva de escoamento com eixos de deformação logarítmica	26
2.9- Processo de laminação como origem da anisotropia	27
2.10- Anisotropia normal	29
2.11- Definições das deformações do corpo de prova para obter os índices de anisotropia	30
2.12- Corpo de prova para ensaio de anisotropia	31
2.13- Conformação de três copos de chapas metálicas diferentes	32
2.14- Anisotropia e orelhamento em função do ângulo de laminação	32
2.15 Representação esquemática do punção, disco e copo embutido	33
2.16- Exemplo de estampagem em três operações	35
2.17- Punções para ensaio de estampagem	36
2.18- Gráfico Limite Razão de estampagem	38
2.19- Outro exemplo de Gráfico Limite Razão de Estampagem	39
3.1- Corpos de prova para ensaio de tração	41
3.2- Corpos de prova para ensaio de estampagem	42
3.3- Equipamento do LdTM da UFRGS para ensaio de tração	43
3.4- Ferramenta do LdTM para ensaio de estampagem	44
3.5- Prensa instrumentada para ensaio de tração	44
4.1- Estrutura metalográfica do aço inox AISI 403	45
VIII	
4.2- Estrutura metalográfica do aço inox AISI 430	46

4.3- Estrutura metalográfica do aço carbono EP	46
4.4- Estrutura metalográfica do alumínio 3104	47
4.5- Estrutura metalográfica do cobre liga 110 mole	47
4.6- Estrutura metalográfica do latão liga 268 mole	48
4.7- Efeito da anisotropia dos materiais analisados	51
4.8- Limite Razão de estampagem β	53
4.9- Gráfico tensão convencional x deformação relativa do aço inox. 304	54
4.10- Gráfico tensão de escoamento x def. verdadeira do aço inox.304	55
4.11- Gráfico com eixos com divisão logarítmica	55
4.12- Gráfico tensão convencional x def. relativa do aço inox. 430	56
4.13- Gráfico tensão de escoamento x def. verdadeira do aço inox. 430	56
4.14- Gráfico com eixos com divisão logarítmica do aço inox. 430	57
4.15- Gráfico tensão convencional x deformação relativa do aço EP	57
4.16- Gráfico tensão de escoamento x def. verdadeira do aço EP	58
4.17- Gráfico com eixos com divisão logarítmica do aço EP	58
4.18- Gráfico tensão convencional x def. relativa do Al liga 3104	59
4.19- Gráfico tensão de escoamento x def. verdadeira do Al liga 3104	59
4.20- Gráfico com eixos com divisão logarítmica do Al liga 3104	60
4.21- Gráfico tensão convencional x def. relativa do Cu liga 110 mole	60
4.22- Gráfico tensão de escoamento x def. verdadeira do Cu liga 110 mole	61
4.23- Gráfico com eixos com divisão logarítmica do Cu liga 110 mole	61
4.24- Gráfico tensão convencional x def. relativa do Latão liga 268 mole	62
4.25- Gráfico tensão de escoamento x def. verdadeira do Latão liga 268 mole	62
4.26- Gráfico com eixos com divisão logarítmica do Latão liga 268 mole	63

IX

LISTA DE TABELAS

2.1- Diâmetro do disco em função da profundidade de embutimento	34
2.2- Deslocamento máximo previsto em função do tipo de punção	38
3.1- Composição química das amostras dos materiais	40
3.2- Propriedades mecânicas das amostras do material dos fabricantes	41
4.1- Dureza dos materiais analisados	48
4.2- Resultados dos ensaios de Tração	49
4.3- Propriedades Mecânicas	50
4.4- Resultado do ensaio de anisotropia	50
4.5- Resultado do ensaio de Estampagem	52
4.6- Limite Razão de Estampagem	53
5.1- Comparação do tamanho de grão	64
5.2- Dureza: Fabricante vs. Resultado do ensaio	65
5.4 e 5.5- Propriedades mecânicas: Fabricante vs. Resultado do ensaio	66
5.6 a 5.8- Propriedades mecânicas: Fabricante vs. Resultado do ensaio	67
5.9- Anisotropia do material analisado	68
5.10- Limite Razão de Estampagem dos materiais	69
7.1.1 a 7.1.18 Tabelas resultantes dos ensaios de tração	73
7.2.1 a 7.2.18- Tabelas do ensaio de tração para análise de anisotropia	92

A	(%)	Alongamento
A _g	(%)	Deformação homogênea
A _o	mm ²	Área da seção transversal inicial
A ₁	mm ²	Área da seção transversal instantânea
b _o	mm	Largura inicial do corpo de prova
b ₁	mm	Largura do corpo de prova após o ensaio
β	(-)	Limite razão de Estampagem
β _{tot}	(-)	Limite Razão de Estampagem total
C	N mm ⁻²	Constante do material, usado na equação de Ludwik
E	N mm ⁻²	Módulo de elasticidade
ε	(%)	Deformação relativa
φ	(-)	Deformação verdadeira ou real
φ _{Li}	(-)	Deformação Logarítmica Genérica
h	mm	Profundidade de estampagem
k _f	N mm ⁻²	Tensão de escoamento
k _{fo}	N mm ⁻²	Tensão de escoamento inicial
k _{fi}	N.mm ⁻²	Tensão de escoamento Genérica
L _o	mm	Comprimento inicial
L	mm	Comprimento final
Δl	mm	Deformação longitudinal
n	(-)	Índice de encruamento
r	(-)	Índice de anisotropia
r _m	(-)	Anisotropia média
Δr	(-)	Anisotropia planar
R ²	(-)	Fator de correção
R _m	N.mm ⁻²	Limite de resistência
R _{p 0,2}	N.mm ⁻²	Limite convencional de escoamento
s _o	mm	Espessura inicial do corpo de prova
σ	N.mm ⁻²	Tensão convencional
s	mm	Espessura do corpo de prova

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as características e propriedades mecânicas das chapas metálicas empregadas na fabricação de produtos estampados. Neste trabalho são analisadas seis amostras de chapas metálicas: aço inoxidável AISI 304 e aço inoxidável AISI 430 produzidas pela ACESITA, aço NBR 5915 EP produzida pela USIMINAS alumínio ABNT liga 3104-0 produzida pela ALCAN Alumínio do Brasil Ltda, cobre liga ABNT 110 mole e latão liga ABNT 268 mole fabricados pelo Grupo PARANAPANEMA.

Este trabalho tem como objetivo determinar e analisar as seguintes propriedades mecânicas: estrutura metalográfica, dureza, a tensão convencional ($\sigma \times \epsilon$), curva de escoamento verdadeira ($k_f \times \phi$), índice de encruamento (n), anisotropia média (r_m), anisotropia planar (Δr) e o Limite Razão de Estampagem (β).

Os resultados obtidos dos ensaios mecânicos são confrontados com os dados dos fabricantes da matéria prima e outras referências bibliográficas.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to determine the mechanical characteristics and proprieties of metal sheets used in the manufacturing of drawn products. Six samples of metal sheets were analysed in this work. AISI 304 stainless steel and AISI 430 stainless steel produced by ACESITA, NBR 5915 EP steel produced by USIMINAS, aluminum alloy ABNT 3104-0 produced by ALCAN Alumínio do Brasil Ltda, copper alloy ABNT 110 soft and brass alloy ABNT 268 soft manufactured by Grupo PARANAPANEMA.

The aim of this paper is to determine and analyze the following mechanical proprieties: metallografic structure, hardness, conventional tension curve ($\sigma \times \varepsilon$), true flow curve ($k_f \times \varphi$), hardening index n , mean anisotropy, flat anisotropy and limit draw ratio β .

The results obtained from mechanical tests have been compared with the manufacturers' data

Regarding raw material as well as other bibliographic references.

1- INTRODUÇÃO

Recentemente muitos novos tipos de diferentes qualidades de chapas metálicas estão sendo oferecidas no mercado. Citam-se por exemplos: as chapas IF (intersticial free), BH (Bake hardning), aços dupla fase (Dp), aços martensíticos, aços austeníticos, etc...Cada uma destas qualidades possuem especificações e aplicações típicas. Através de ensaios mecânicos muitas destas propriedades podem ser definidas auxiliando as empresas na definição das especificações necessárias para um determinado produto e para seu processo de fabricação.

Com a globalização, os fabricantes de produtos estampados estão se defrontando com um mercado consumidor cada vez mais exigente, buscando qualidade e preço. Mais do que nunca, as indústrias de matéria prima para estampagem e as indústrias de fabricação de produtos estampados estão se preocupando em investir para reduzir o máximo o custo de produção e de melhorar a qualidade dos produtos. O processo de fabricação depende de um profundo conhecimento da qualidade de sua matéria-prima. A qualidade da matéria-prima é a primeira condição de otimização para os processos de fabricação.

Diante da crescente preocupação com a qualidade das chapas metálicas, para a confecção de produtos estampados e diante de um mercado cada vez mais competitivo é de suma importância desenvolver uma metodologia de caracterização e controle do material das chapas metálicas para estampagem, assegurando produtos de excelente qualidade, baixo custo de produção e um baixo índice de refugo. As indústrias de produtos estampados, no momento atual, devem investir em tecnologia, para melhorar os processos de fabricação e na análise da matéria-prima para obtenção de produtos de qualidade

Nas últimas décadas foram desenvolvidos inúmeros ensaios de laboratório para avaliar a conformação da chapa antes da mesma ser deformada na ferramenta. A maioria desses ensaios esbarra sempre na dificuldade e da complexidade do processo de conformação industrial. Os ensaios de laboratório são necessários e utiliza de equipamentos flexíveis e alta precisão. As deformações que ocorrem a nível industrial, muitas vezes, são

bem mais complexas do que simples estiramento e estampagem profunda. Os ensaios de tração, os testes de conformabilidade e outros ensaios mecânicos para estampagem de produtos das mais variadas formas servem como parâmetros de referência. Um outro fator que muitas vezes ocorre na prática, nas empresas, é a utilização de máquinas com folgas nos guias e o paralelismo entre punção e a mesa nem sempre corresponde ao dimensionado, comprometendo a qualidade do produto. Em geral o melhor procedimento é a realização de mais de um ensaio e comparar os resultados de laboratório com o processado em escala industrial. O desenvolvimento deste trabalho consiste na apresentação de uma metodologia que possa avaliar as características e as propriedades mecânicas dos materiais das chapas metálicas destinadas à estampagem de peças.

Dentro desta temática foi analisado:

- As propriedades mecânicas
- A estrutura metalográfica
- A construção das curvas convencionais ($\sigma \times \epsilon$)
- A construção das curvas de escoamento ($k_f \times \varphi$)
- Índice de anisotropia (r)
- A anisotropia média (r_m)
- A anisotropia planar (Δr)
- O índice de encruamento do material(n)
- O Limite Razão de Estampagem (β).

Para desenvolver esta temática foi estabelecido um cronograma de trabalho:

Coleta nas empresas amostras de chapas metálicas do fabricante com o respectivo laudo técnico.

Preparo dos corpos de prova para os ensaios de tração dentro das normas estabelecidas. Tiras de chapas de 20mm de largura e 250mm de comprimento com as bordas retificadas. Estes corpos de prova foram utilizados para a construção das curvas de escoamento e o cálculo da anisotropia das chapas metálicas.

Foram preparados corpos de prova em forma de discos planos (geratriz) de vários diâmetros para ensaios de estampagem para determinar o Limite Razão de Estampagem (β).

A partir dos resultados dos ensaios mecânicos, foi elaborado um laudo técnico para compará-lo com o laudo técnico do fabricante da matéria prima e compará-lo com referências bibliográficas, certificando-se da qualidade da matéria-prima utilizada na estampagem. Os resultados foram compilados em diagramas, gráficos e tabelas, facilitando a análise e discussão para elaboração de conclusões.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Introdução

Para análise da estampabilidade de chapas metálicas é de fundamental importância uma avaliação a partir de ensaios mecânicos. O ensaio de tração de chapas é amplamente usado para a obtenção de informações básicas das propriedades mecânicas dos materiais metálicos, tais como: limite de resistência (R_m), limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$), índice de encruamento (n), índice de anisotropia (r), anisotropia média (r_m), anisotropia planar (Δr) e alongamento (A). Outros parâmetros não menos importantes são definidos por outros ensaios: Limite Razão de Estampagem (β), dureza, tipo de estrutura e tamanho de grão, etc...

2.2.1- Considerações gerais.

Na literatura atual há muitas referências bibliográficas que tratam dos ensaios mecânicos de materiais metálicos para determinar suas propriedades mecânicas. Entre outras pode-se citar / 1 / a / 14 / .

A aplicação de uma força, num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a alongá-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de forma e dimensões padronizadas, para que os resultados possam ser comparados ou, se necessário reproduzido

A precisão de um ensaio de tração depende da precisão dos aparelhos de medida de que se dispõe. Com pequenas deformações, pode-se conseguir uma precisão maior na tensão do que quando são atingidas grandes deformações do material, onde a leitura dos valores numéricos fica mais difícil, devido á grande variação da deformação em função da tensão aplicada. Mesmo no início do ensaio, se esse não for bem conduzido, grandes erros poderão ser cometidos, como por exemplo, se o corpo de prova não estiver bem alinhado, os esforços assimétricos que aparecerão levarão a falsas leituras das deformações para uma mesma carga aplicada.

A velocidade de ensaio é geralmente dada pelos métodos de ensaio estabelecidas pelas diferentes Associações de normas técnicas; quando porém, se realiza um ensaio de tração para fins de estudo ou pesquisa, essa velocidade pode ser alterada, conforme o caso. O processo de

variação da velocidade de ensaio depende da máquina que se está usando. Essa velocidade é muito importante e dela dependem alguns resultados numéricos de propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio.

2.2.2- Preparação dos Corpos de Prova para o ensaio de Tração.

Detalhes sobre a preparação dos corpos de prova encontra-se nas normas ABNT 6673, DIN 50114 e DIN EN 10002. O ensaio de tração conforme DIN 10 002 é usado para obter valores das propriedades de materiais sólidos. Pode ser efetuado com peças maciças, cabos, fios ou chapas. Para testes de chapas podem ser usados dois tipos diferentes de corpos de prova conforme a norma DIN 50 114. O tipo A (Figura 2.1) tem cabeças para ser colocado nas garras da máquina de ensaio.

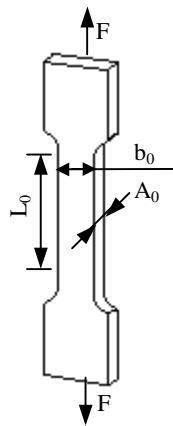


Fig. 2.1- Corpo de prova tipo A, conforme a Norma. Ref. / 9 /.

O tipo B, conforme mostra a Figura 2.2, é mais simples, para facilitar a sua fabricação. Os dois são produzidos em duas etapas: são cortados e depois os cantos são retificados. Para cortar os corpos de prova tipo A precisa-se uma ferramenta de corte especial. Para cortar os corpos de prova tipo B é usado uma guilhotina. Os cantos dos corpos de prova devem ser retificados para eliminar trincas nos cantos que são iniciadas durante o corte. Estas trincas podem iniciar a falha do corpo de prova antes de chegar ao limite de resistência do material.

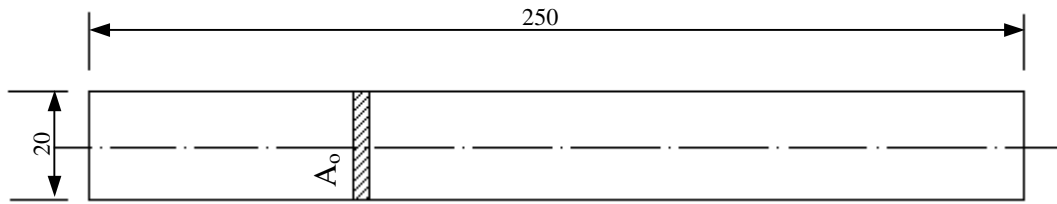


Fig. 2.2- Corpo de prova tipo B conforme a Norma. Ref. / 9 /.

Para ensaios de tração de chapas metálicas são utilizados corpos de prova com espessuras de 0,1 mm até 3,0 mm. Os corpos de prova são tiras de chapas de 20 mm de largura, com as bordas retificadas para evitar trincas de cisalhamento e de 250 mm de comprimento. A eliminação das trincas ou sulcos de usinagem é de suma importância porque elas podem causar uma ruptura prematura durante o ensaio. Os corpos de prova são fixados na máquina de modo que fique um vão livre, entre as garras, de 140 mm. Ref./ 2 /.

2.2.3-Ensaio de tração convencional - $\sigma \times \epsilon$

O ensaio de tração é efetuado em máquinas que tem uma garra fixa e uma garra móvel, para esticar o corpo de prova. As máquinas são equipadas com sensores para registrar a força e o alongamento que atuam no corpo de prova. O fim do ensaio é marcado com a ruptura do corpo de prova.

Neste ensaio o corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial crescente com velocidade constante e sem atrito, enquanto são feitas as observações simultâneas relacionadas com a deformação do corpo de prova.

Tensão é definida genericamente como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área. A deformação relativa, ϵ , é definida como a razão do deslocamento pelo comprimento inicial, quando esse corpo é submetido a uma força, F.

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad (\text{Eq. 2-1})$$

Sendo o deslocamento dado por:

$$\Delta L = L - L_0 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Verifica-se que a deformação relativa, ϵ , é uma grandeza adimensional. Muitas vezes é comum sua referência por

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \times 100 (\%)$$

O termo ensaio de tração “convencional” é empregado para diferenciá-lo do ensaio de tração verdadeiro.

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir o gráfico tensão-deformação, pelas medidas diretas da carga ou tensão e da deformação. A tensão convencional, σ , é calculada pela expressão da Eq. 2.3, onde F é a carga aplicada e A_0 é a área da seção reta inicial do corpo de prova.

$$\sigma = F / A_0 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

A figura 2.3, mostra o gráfico da tensão- deformação convencional de um metal ou liga metálica sem o patamar definido da tensão de escoamento.

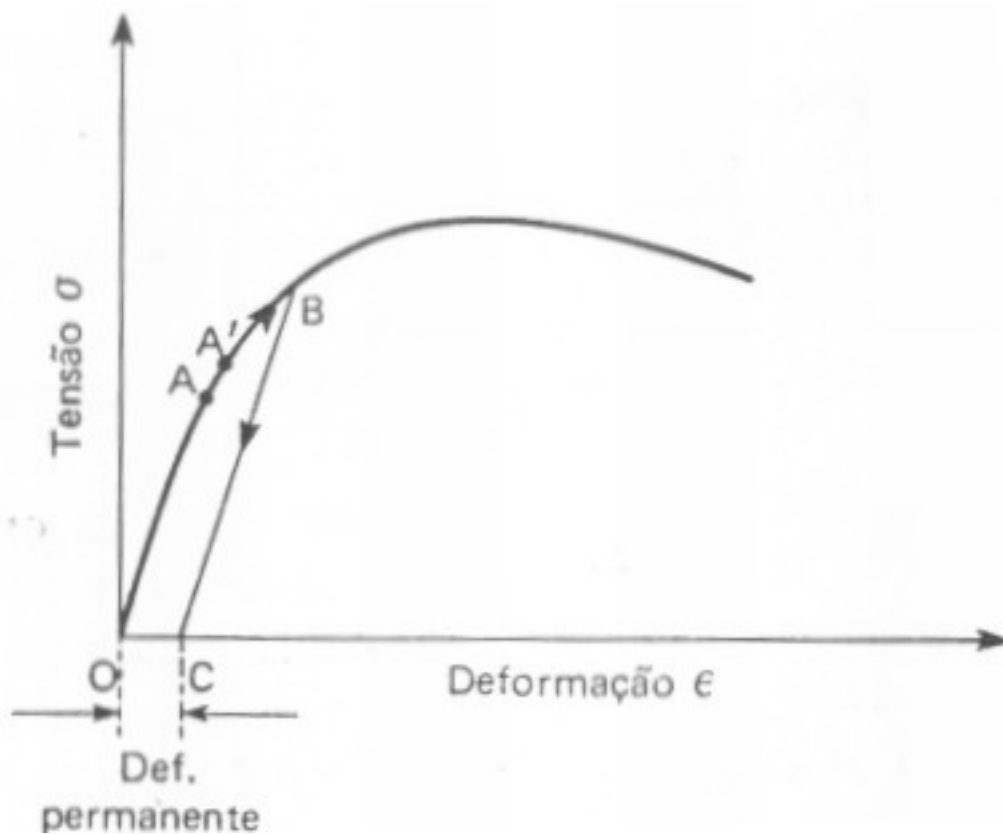


Fig. 2.3. Gráfico tensão-deformação de um metal ou liga metálica. Ref. / 5 /

A Eq. 2.4 mostra o comportamento da grande parte dos materiais metálicos na fase elástica. (Lei de Hooke).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{Eq. 2.4})$$

No gráfico da figura, 2.3, verifica-se inicialmente que o diagrama é linear e é representado pela equação (2.4), que corresponde à Lei de Hooke. A constante de proporcionalidade E, é conhecida por Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young. A linearidade do diagrama termina no ponto A, denominado limite elástico, definido como a maior tensão que o metal pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado. Dentro da faixa AO da curva o material está dentro de sua zona elástica.

Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade e em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente. A figura 2.3, mostra um descarregamento do ponto B na zona plástica até a linha das abscissas. A linha BC é paralela à linha AO, pois o que se perde é a deformação causada na zona plástica, restando a deformação ocorrida na zona elástica.

O início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante a sua maior parte.

No momento que o corpo de prova inicia a extricção, não se tem mais um estado uniaxial de tensão, levando o corpo de prova à ruptura.

O diagrama tensão convencional (σ) versus deformação relativa (ϵ), é calculado com os valores do diagrama força vs. alongamento, obtidos no ensaio de tração de acordo com o corpo de prova da figura 2.4 e usando a expressão (2.3) e a expressão (2.5), que representa a área da secção reta inicial do corpo de prova.

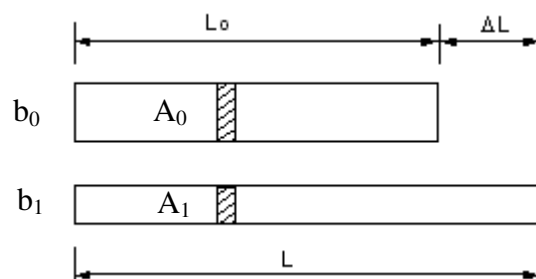


Fig. 2.4 – Corpo de prova antes e após deformação.

$$A_0 = s_0 \times b_0$$

Sendo: A_1 = Seção transversal num instante qualquer

A_0 = Área da Seção transversal inicial

b_0 = Largura inicial

b_1 = Largura após a deformação

L = Comprimento final

L_0 = Comprimento inicial

s_0 = Espessura inicial

Um exemplo da curva da tensão convencional de um ensaio de chapas é apresentado na figura 2.5.

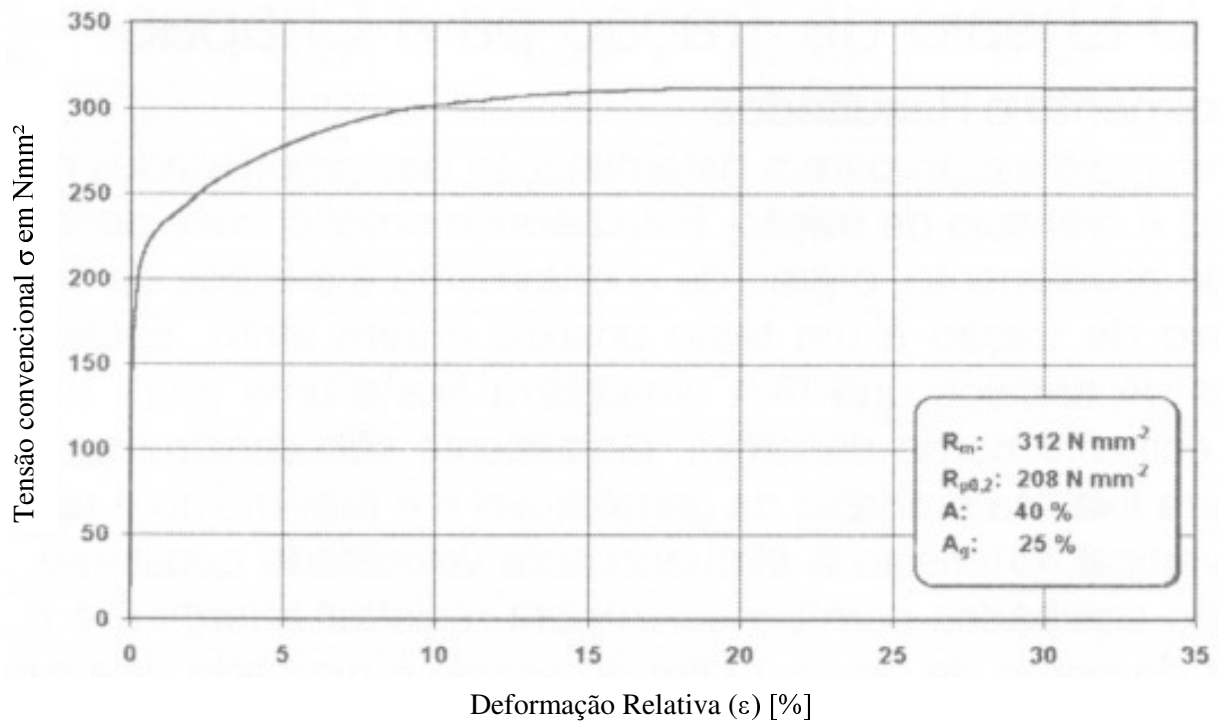


Figura 2.5 - O diagrama tensão convencional vs. Deformação relativa ϵ .

Material Aço Carbono conforme DIN EN 10130, ref. / 2 /.

2.2.4- Construção da curva de escoamento verdadeira ($k_f \times \phi$)

Na construção das curvas de escoamento são empregados vários métodos. Entre estes métodos podemos destacar os principais:

- Ensaio de compressão;
- Ensaio de tração;
- Ensaio após sucessivas deformações;
- Construção através de dados obtidos no ensaio de tração;
- Ensaio de torção.

A curva de escoamento, que também é denominada de curva verdadeira, é construída através da tensão de escoamento (k_f) em função da deformação verdadeira (φ), durante todo o processo, considerando o encruamento do material. A tensão de escoamento é calculada pela relação da força aplicada F e a área instantânea A_1 da seção deformada do corpo de prova e utilizando as seguintes expressões:

$$k_f = F / A_1 \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$\varphi = \ln (1 + \varepsilon) = \ln L / L_0 \quad (\text{Eq.2.7})$$

Sendo a Área instantânea A_1 calculada por

$$A_1 = A_0 / e^\varphi \quad (\text{Eq.2.8})$$

ou

$$A_1 = A_0 / (1 + \varepsilon) = A_0 / \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (\text{Eq.2.9})$$

A figura 2.6, apresenta esquematicamente o diagrama da tensão de escoamento (k_f) ou curva verdadeira em função da deformação verdadeira (φ).

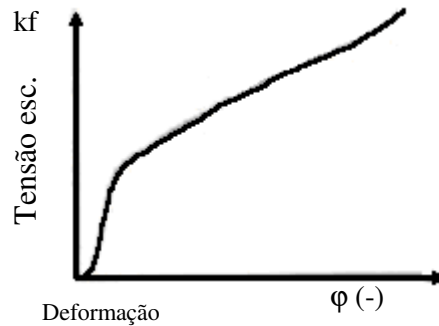


Fig. 2.6 – Tensão de escoamento (k_f) em função da deformação verdadeira (φ). Ref. / 2

Para a construção do diagrama da tensão de escoamento (k_f) vs. deformação verdadeira (φ), o ensaio de tração apresenta maior facilidade, mas apresenta um fator negativo, que o grau de deformação é relativamente pequeno ($\varphi = 0,2$ até $0,3$). No instante que assume a força máxima no ensaio de tração, atinge-se um ponto em que a área da seção reta do corpo de prova diminui, e a força de deformação diminui em decorrência.

Essa condição será atingida em algum ponto do corpo de prova onde se localiza a parte mais fraca. Toda a deformação plástica posterior será concentrada nessa região e o corpo de prova começará a formar localizadamente um pescoço. Devido ao fato da área da seção reta diminuir mais rapidamente do que o aumento da força de deformação pelo encruamento, a força necessária para deformar o corpo de prova diminuirá e a tensão de escoamento também continuará a diminuir até a ruptura. A partir da força máxima fica muito difícil construir a continuação da curva verdadeira.

Na equação, (2.6), a tensão de escoamento é calculada empregando a área instantânea (A_1) da seção deformada do corpo de prova. Por isso a tensão de escoamento é denominada de tensão verdadeira. A área da seção deformada é calculada em função do deslocamento (ΔL) medido (equação 2.9).

Em muitos casos é importante uma representação matemática do comportamento mecânico do material, para estimar a força necessária para a fabricação de uma peça ou para a simulação numérica do processo. Neste caso é adaptado uma função matemática à curva de escoamento do material (eq. 2.10). A curva de escoamento, que também é chamada de curva verdadeira, dá os valores da tensão do escoamento k_f , durante todo o processo de escoamento, considerando o índice de encruamento do material (n). Normalmente no processo de estampagem é realizado a temperatura ambiente, em conseqüência disto todos os materiais apresentam índice

de encruamento maior de zero, com exceção do ouro e cobre. Uma forma geral da representação da curva de escoamento para chapas é a equação de HOLLONOM e LUDWIK.

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad \text{Eq. (2.10)}$$

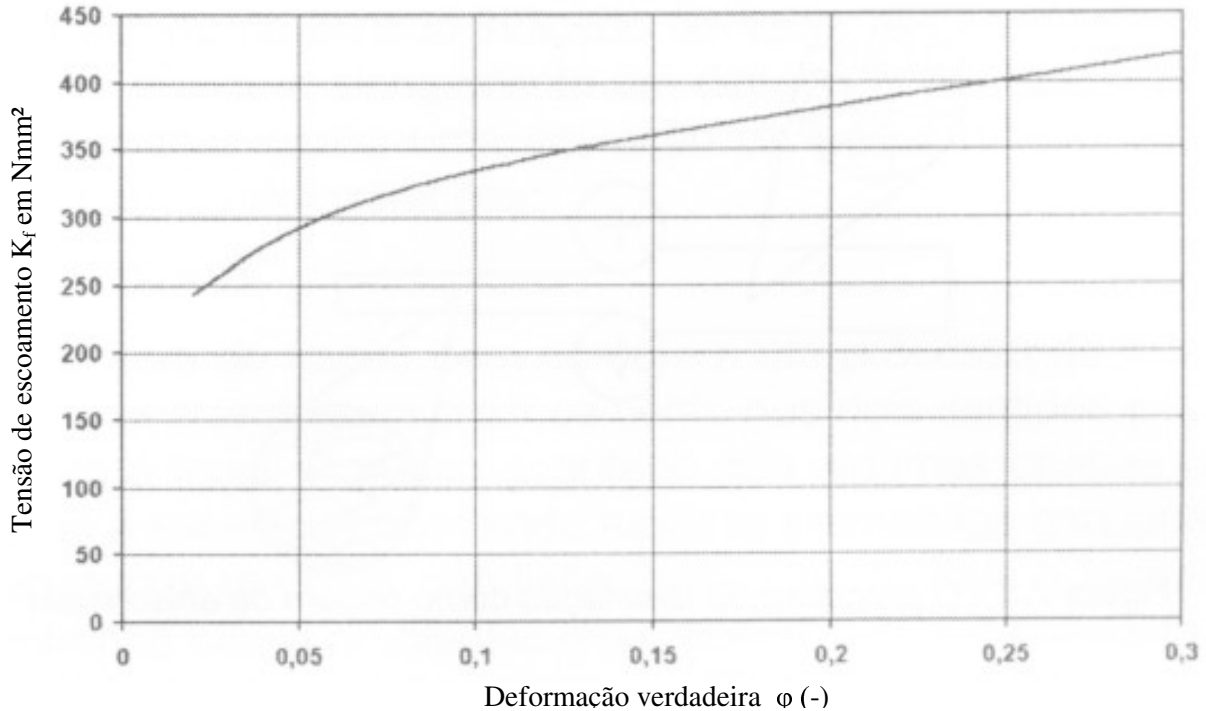
k_f - tensão de escoamento

C = Constante do material

n = índice de encruamento

φ = Deformação verdadeira

A figura 2.7 mostra um exemplo da tensão de escoamento (k_f) vs. deformação verdadeira (φ).



Material: Aço de baixo carbono conforme DIN EN 10130. Ref. / .2 /.

Figura 2.7 – Curva da tensão de escoamento (k_f) em função da deformação verdadeira (φ).

Observa-se que a equação (2.10) não vale para $\varphi = 0$. Esta forma de representação de uma curva de escoamento deve ser acompanhada da informação sobre o valor da Tensão de Escoamento inicial (k_{f0}). Para o caso do aço representado nas figuras 2.5, o valor da Tensão Limite Convencional de Escoamento é $R_{p0,2} = 208 \text{ N.mm}^{-2}$ e o Limite de resistência é $R_m = 312$

N/mm². A curva de escoamento é usada para se avaliar o comportamento plástico do material. Neste caso não é importante a região elástica do material.

2.2.5– Índice de encruamento

A deformação a frio produz alongamento dos grãos na direção principal da deformação. Estas deformações produzem uma reorganização dos grãos numa direção preferencial, ocasionando mudanças nas propriedades à tração e deformação a frio. Para a grande maioria dos materiais empregados nestes processos a temperatura do meio ambiente é muito mais baixa do que a temperatura de recristalização. Isto significa que a tensão de escoamento cresce mais rápido do que a deformação verdadeira porque o valor do índice de encruamento geralmente é maior que 0 (zero).

Somente poucos materiais não mostram um baixo encruamento na conformação à temperatura ambiente: por exemplo ouro e cobre, ref. / 2 /.

O índice de encruamento pode ser determinado a partir da curva de escoamento, representada em um diagrama com eixos com divisão logarítmica, como o da figura 2.4. Neste diagrama a curva de escoamento para aços dúcteis para estampagem profunda tem a forma de uma linha reta. O índice de encruamento é a tangente do ângulo da curva com uma linha horizontal, conforme ilustrado na figura 2.8.

Partindo da equação da curva $k_f = C \cdot \phi^n$ descrita ou plotada em escala bilogarítmica obtém-se o índice de encruamento (n) pela inclinação da reta como mostra a fig. 2.8, com a utilização das expressões (2.11) ou (2.12).

$$\log k_f = \log C + n \log \phi \quad \text{Eq. (2.11)}$$

$$\tan \alpha = n \quad \text{Eq (2.12)}$$

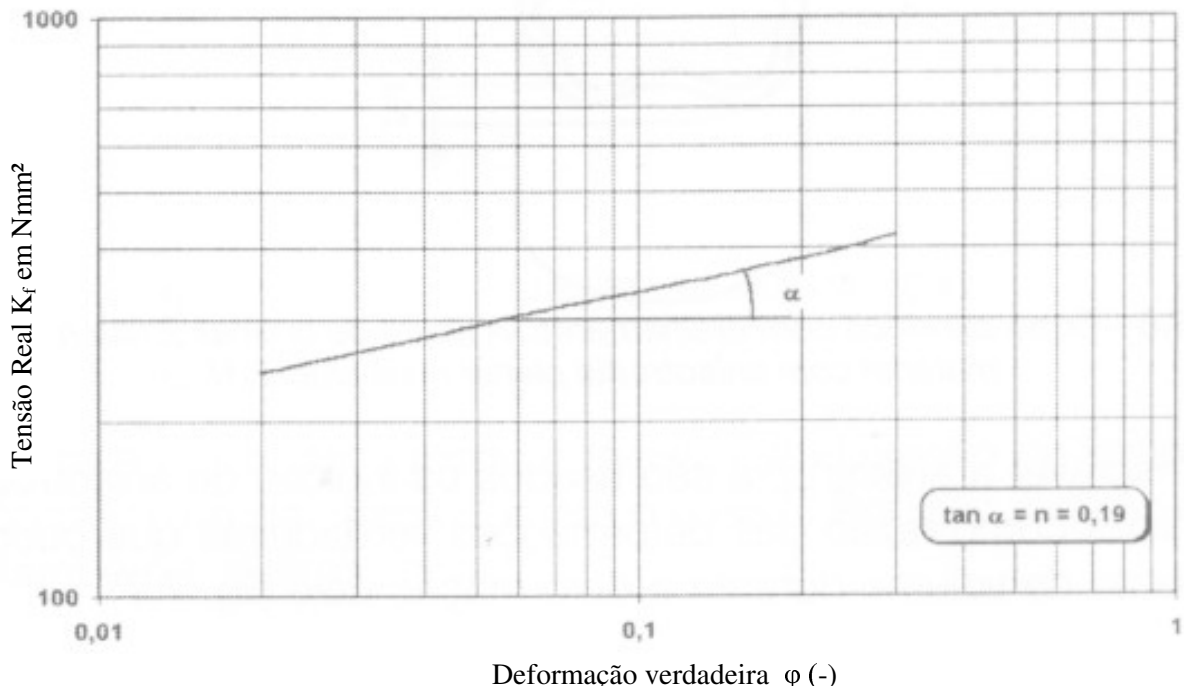


Fig. 2.8- Curva de escoamento em um diagrama com eixos com divisão logarítmica. Material: aço de baixo, conforme DIN EM 10130. Ref. / 2 /

Outro método para determinar o índice de encruamento encontra-se na Norma SEW 1125. Nesta norma o índice de encruamento é calculado usando a expressão (8.23):

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\ln \varphi_{Li} \ln k_{fi}) - \left(\sum_{i=1}^N \ln \varphi_{Li} * \sum_{i=1}^N \ln k_{fi} \right)}{N \sum_{i=1}^N (\ln \varphi_{Li})^2 - \left(\sum_{i=1}^N \ln \varphi_{Li} \right)^2} \quad \text{Eq.(2.13)}$$

Este método é usado principalmente se o ensaio de tração é feito em uma máquina computadorizada.

2.3 - Anisotropia de Chapas metálicas

2.3.1- Considerações gerais

As chapas metálicas utilizadas para estampagem são laminadas, e dependendo do sentido de laminação, ocorrem variações das propriedades mecânicas.

Entre as literaturas existentes que tratam da anisotropia de chapas metálicas e suas influência na estampagem de peças pode-se destacar: / 2 /, /10 /, /13 / a /15 / e /17 / a /23 /.

A anisotropia surge devido a orientação preferencial dos grãos no metal, após uma deformação mecânica o que ocasiona uma anisotropia cristalográfica, ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregações, ou ainda, devido a um alinhamento de uma segunda fase precipitada e também devido à deformação mecânica. A figura 2.9 mostra a orientação dos grãos após trabalho de laminação.

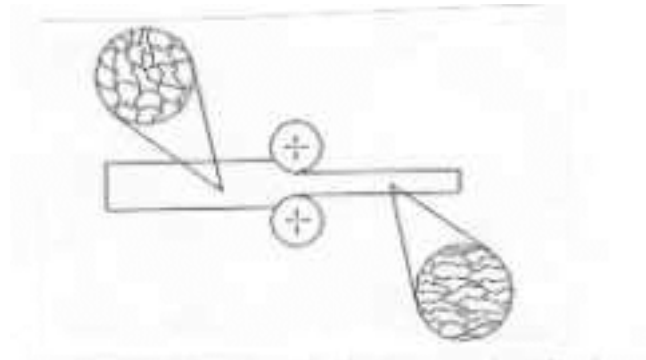


Figura 2.9- O processo de laminação como origem da anisotropia. Ref. / 2 /.

Para avaliar a 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 real de largura pela deformação real da espessura do corpo de prova, num ensaio de tração. Mede-se a largura e a espessura em diversos pontos da parte útil do corpo de prova, antes do ensaio e após o ensaio. Normalmente, dependendo do material, deforma-se de 10% a 20% do corpo de prova.

Em um ensaio de tração, bem como em um processo de estampagem de uma chapa a anisotropia ocorre nos dois sentidos, espessura e largura e não é uniforme. Por isso que em algumas chapas diminuem mais rápido a espessura, ocorrendo rupturas prematuras, enquanto em outras chapas nas mesmas condições diminuem somente a largura, o que geralmente não causam problemas em processos de estampagem. A influência da anisotropia da chapa é visível

especialmente na estampagem profunda, como mostra a figura 2.10. O material escoar melhor nas direções com maior índice de anisotropia. Este comportamento é denominado de anisotropia planar. O conhecimento deste valor é muito importante para estudos sobre estampagem profunda.

O cálculo da anisotropia é um método pelo qual se pode avaliar indiretamente a conformabilidade de chapas metálicas.

Com relação a anisotropia podem ocorrer três situações distintas:

- Primeiro caso: $r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} = 1$ (isotropia total).
- Segundo caso: $r_{0^\circ} = r_{45^\circ} = r_{90^\circ} \neq 1$ (anisotropia normal ou média e anisotropia planar).
- Terceiro Caso: $r_{0^\circ} \neq r_{45^\circ} \neq r_{90^\circ} \neq 1$ (anisotropia média ou normal + anisotropia planar)

A figura 2.10 mostra o escoamento localizado para materiais caracterizados por $r > 1$, $r = 1$ e $r < 1$, para um sistema biaxial de tensões ($\sigma_x = \sigma_y$). 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, enquanto que para materiais isotrópicos a anisotropia média é $r = 1$ e a anisotropia planar é $\Delta r = 0$.

Nos materiais para estampagem profunda um alto valor de anisotropia média é desejado, porque proporciona maior resistência ao afinamento da chapa. O valor da anisotropia média em aços efervescentes variam entre 0,8 e 1,2. Em aços acalmados ao alumínio, adequadamente produzidos, a anisotropia média pode variar entre 1,5 e 1,8. Em alguns aços IF, a anisotropia média pode chegar a 2,2. A textura cúbica do cobre ou de aços inoxidáveis austeníticos a anisotropia média r pode ser tão baixa quanto 0,1. Ref /44/.

Inicialmente, esta propriedade foi considerada indesejável em matérias destinados a operações de estampagem, devido à chance de formação de orelhas. Contudo, é de grande importância no que se refere à estampagem profunda, uma vez que nesta operação não se deseja a diminuição significativa da espessura do material.

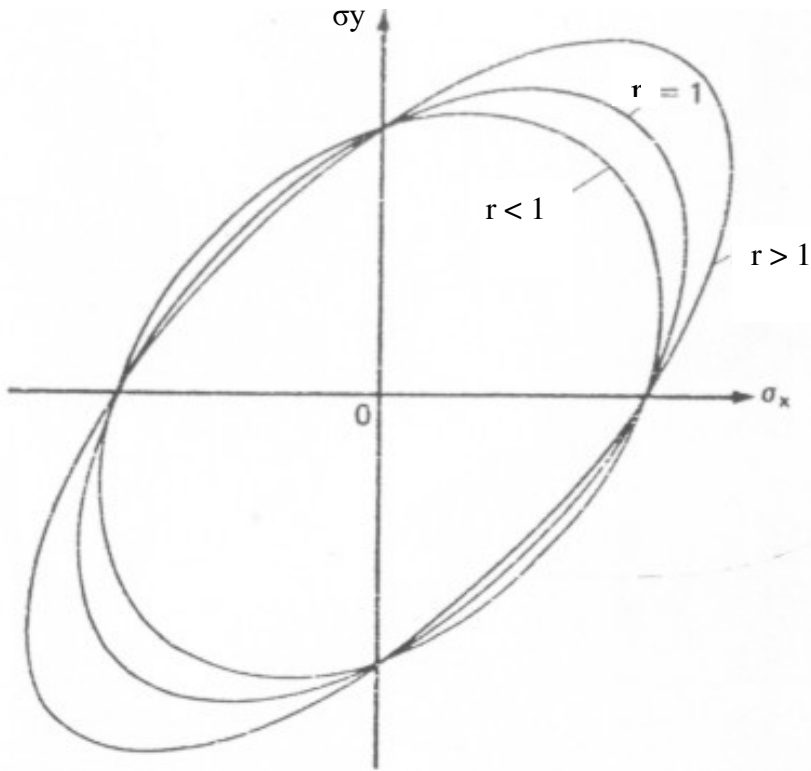


Fig.2.10. –Anisotropia média ou normal. / 15 /.

2.3.2 - Cálculo do índice de anisotropia

A variação dos valores da razão de deformação r , determinados em corpos de prova situados em uma mesma chapa de 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 mostra a figura 2.11 e de acordo com a norma SEW 1126.

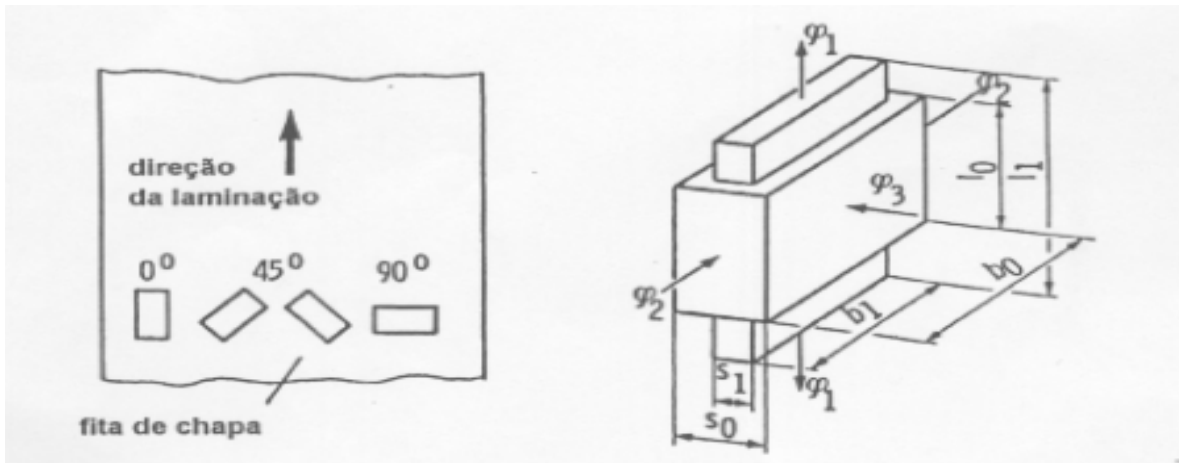


Fig. 2.11 - Definição das deformações do corpo de prova para obter os índices de anisotropia. /14 /

O índice de anisotropia é definido como o quociente das deformações reais da largura e da espessura do corpo de prova como mostra a figura 2.11:

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{s_1}{s_0}} \quad \text{Índice de anisotropia Eq. (2.14)}$$

$$r_m = \frac{1}{4} (r_{0^\circ} + 2^* r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad \text{Anisotropia média Eq. (2.15)}$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad \text{Anisotropia planar Eq. (2.16)}$$

Conforme a norma SEW 1126 a espessura do corpo de prova tem que ser medido sempre em três pontos, tanto antes da deformação como depois de uma deformação de 20%. Na prática é muito difícil medir a deformação da espessura do corpo de prova. Por isso são avaliados a deformação do comprimento e a deformação da largura, conforme mostra a figura 2.12. Isto é possível porque o volume do corpo fica constante durante a deformação plástica:

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

Eq. (2.17)

A figura 2.12 mostra esquematicamente como são confeccionados e como são feitas as medidas dos corpos de prova para o ensaio de anisotropia. A princípio os corpos de prova são do tipo B descritos na secção 2.2.2. O corpo de prova possui um comprimento inicial $L_0 = 100$ mm. Marca-se o ponto médio e marca-se e mede-se as larguras iniciais b_{01} , b_{02} , b_{03} . Após o ensaio de tração mede-se os valores de L_1 , b_{11} , b_{12} , b_{13} , para calcular o índice de anisotropia.

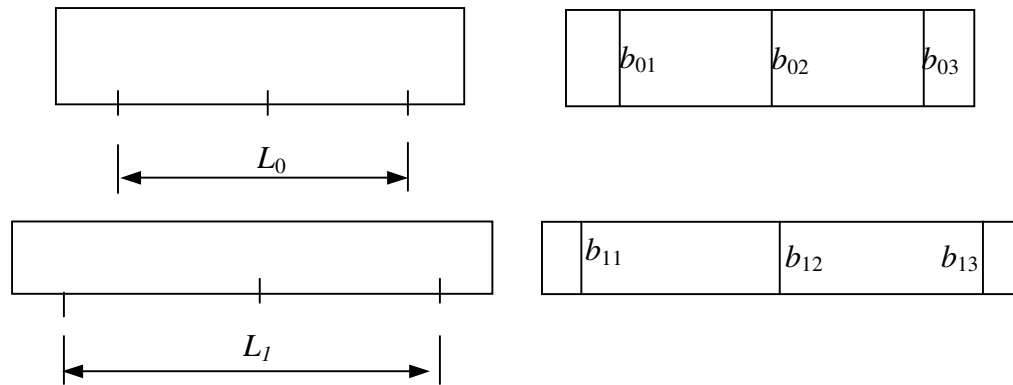


Fig. 2.12 – A figura mostra o esquema para efetuar as medidas do corpo de prova antes e após a deformação.

O valor do índice de anisotropia é calculado por:

$$r = \frac{\varphi_2}{-(\varphi_1 + \varphi_{b1})} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{b_0 * l_0}{b_1 * l_1}} \quad \text{Eq. (2.18)}$$

2.3.3 - Formação de orelhas em copos estampados

Para uma estampagem profunda o ideal é que o material apresente uma anisotropia próxima de zero para evitar a formação de "orelhas". No topo da orla dos copos estampados não são completamente planos. Há pontos altos ou "orelhas" entre orlas mais baixas, como mostra a figura 2.13.

O mais comum é o aparecimento de quatro "orelhas", mas ocasionalmente pode surgir duas, seis ou oito "orelhas". O orelhamento é uma consequência da anisotropia planar. A figura 2.13 mostra o comportamento da anisotropia na conformação de três copos de diferentes chapas metálicas.

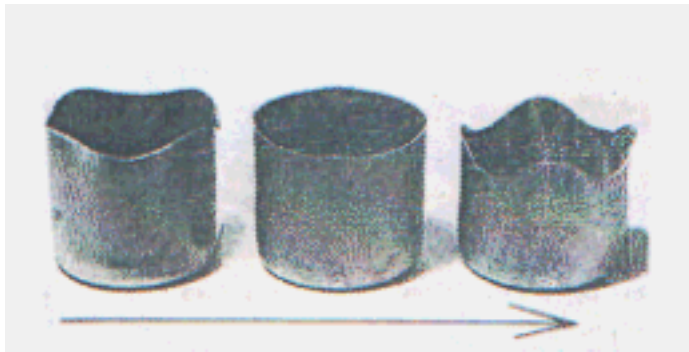


Fig. 2.13- Conformação de três copos de chapas de material diferente. A seta indica o sentido de laminação das chapas. / 15/.

O primeiro copo representa a conformação com $\Delta r < 1$, o copo do meio com $\Delta r = 0$ e o terceiro copo com $\Delta r > 1$. Quando $\Delta r > 0$ o orelhamento ocorre entre 0° e 90° . Se $\Delta r < 0$ a formação de orelhas ocorre próximo de 45° . Materiais com maior anisotropia planar apresentam orelhas com maior altura, como pode ser observado no terceiro copo da figura 2.13

A figura 2.14 mostra a variação da anisotropia planar e a formação de orelhas em função do ângulo em relação ao sentido de laminação da chapa metálica. O valor de h representa a altura da parede estampada. Para a posição do ângulo com $\Delta r < 0$, mais afinamento ocorre e mais alta a parede ocasionando uma maior orelha. Em pontos em que o valor de $\Delta r > 0$ a orla da parede é mais baixa.

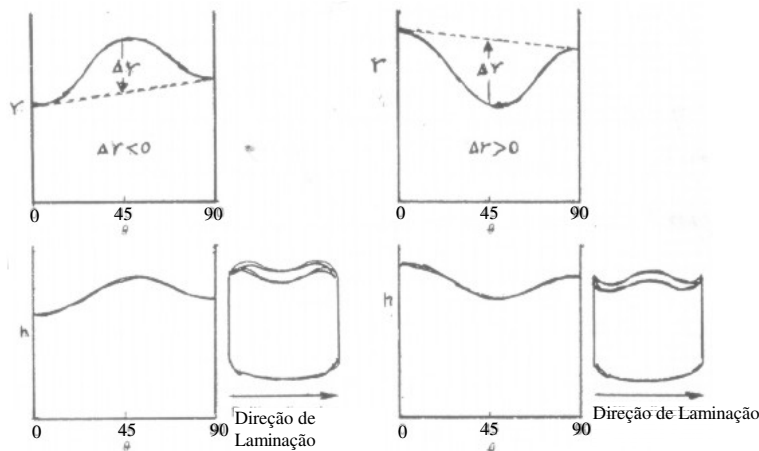


Fig. 2.14-
Anisotropia e
orelhamento em
função da
variação do
ângulo de
laminação.
/ 15/.

A formação de orelhas na estampagem profunda é indesejável, pois necessita de mais material para a conformação da peça e um aumento do Limite Razão de estampagem (β), porque aumenta o diâmetro do disco ou geratriz para a estampagem.

Um outro inconveniente relacionado com o orelhamento é que na parte mais alta da orla da peça estampada sofre um maior estiramento ficando com a espessura da parede menor do que na parte mais baixa onde ocorre menor estiramento.

2.4 - Limite Razão de Estampagem

Um fator muito 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 que é representado por beta (β). Entre as literaturas que tratam do Limite Razão de Estampagem de chapas metálicas e sua influência na estampagem de peças, entre outras, pode-se citar /2 /, /16/, /26/ a /39/.

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) é calculado pela relação entre o diâmetro da geratriz ou disco e o diâmetro do punção cilíndrico, ou seja:

$$\beta = D/d$$

Eq.(2. 19)

D = Diâmetro disco

d = Diâmetro do punção

h = Prof. de estampagem

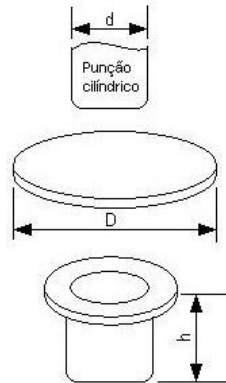


Figura 2.15 – Representação esquemática do punção, disco e copo embutido.

O ensaio para determinar β , consiste em utilizar a chapa em forma de disco ou geratriz de espessura constante e diâmetros variáveis, com a utilização de um punção cilíndrico de diâmetro 50 mm, conforme mostra a figura 2.15. A tabela 2.1, apresenta os diâmetros dos discos sugeridos a partir de 80 mm ,variando de cinco em cinco milímetros, até um diâmetro final de 115mm ou 120mm. O valor de h, representa a profundidade de embutimento sugerido para cada diâmetro do disco correspondente. O Limite Razão de Estampagem é determinado pela razão entre o máximo diâmetro do disco e o diâmetro do punção em que atinge a profundidade h especificada na tabela 2.1, sem a ruptura do corpo de prova.

Tabela 2.1.Diâmetro do disco com sua correspondente profundidade de estampagem.Ref. /30/.

Diâmetro do disco (mm)	80	85	90	95	100	105	110	115
Profundidade h (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50

Numa aplicação prática, quando o valor de β calculado entre o diâmetro do disco e o diâmetro do punção for superior ao Limite Razão de Estampagem do material em referência, não é possível efetuar a peça numa única operação. Neste caso a peça deve ser fabricada em duas ou mais operações. Para a 1ª operação usa-se um valor de β_1 , aproximadamente, de 5 a 10% inferior do valor β do material. Para as demais operações, $\beta_2, \beta_3...$ não deve ultrapassar de 1,3.

Para a 1ª operação.
$$\beta_1 = \frac{D}{d_1}$$
 Eq. (2.20)

d_1 = diâmetro do punção da 1ª operação

D = diâmetro do disco ou geratriz

Para a 2ª operação. $\beta_2 = \frac{d_1}{d_2}$

d_2 = diâmetro punção da 2ª operação

e assim por diante.

Com vários passos de estampagem a razão total de estampagem é igual ao produto das razões individuais de estampagem.

$$\beta_{\text{tot.}} = \beta_1 \cdot \beta_2 \dots \beta_n. \quad \text{Eq.(2.22)}$$

A figura 2.16, mostra um exemplo de cálculo da razão de estampagem. Para fabricar uma jarra de aço inoxidável AISI 304, com diâmetro da geratriz de 380 mm, são necessárias três operações:

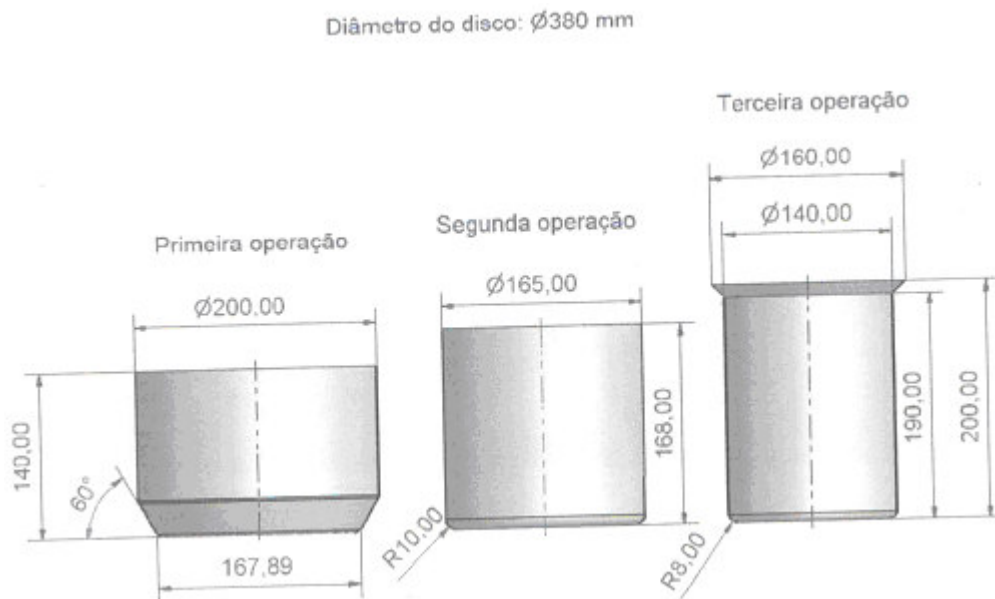


figura 2.16 - exemplo de estampagem em três operações. / 39 / . .

$$\beta = \frac{D \text{ (geratriz)}}{d \text{ (peça)}} = \frac{380 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 2,71$$

Considerando para a primeira operação, $\beta_1 = 1,9$, que é no máximo de 5 a 10 % inferior do β do material, cujo valor é igual a 2. Os valores de $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$, não devem ultrapassar o valor de 1,3.

$$d_1 = \frac{D}{\beta_1} = \frac{380 \text{ mm}}{1,90} = 200 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{d_1}{\beta_2} = \frac{200 \text{ mm}}{1,21} = 165 \text{ mm}$$

Para a terceira operação, conforme o projeto, $d_3 = 140 \text{ mm}$. Então:

$$\beta_3 = \frac{d_2}{d_3} = \frac{165 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 1,18$$

$$\text{Sendo } \beta_{\text{tot}} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 = 1,90 \times 1,21 \times 1,18 = 2,71$$

2.5. Limite Razão de Estampagem em função do estiramento e /ou estampagem profunda. (Método com múltiplos punções).

O ensaio para determinar o fator de estampagem β caracterizado pelos fenômenos de estiramento ou estampagem profunda de forma isolado ou simultânea, consiste em utilizar a chapa em forma de disco com espessura constante e diâmetros variáveis com os punções mostrados na figura 2.17, numa máquina instrumentada que será apresentada no próximo capítulo.

Utilizando-se os punções da figura 2.17, com as profundidades h de estampagem apresentadas na tabela 2.2 em função dos diâmetros dos discos ou geratrizes, pode-se reproduzir

os fenômenos de estampagem profunda e/ou estiramento que ocorrem no processo de conformação mecânica.

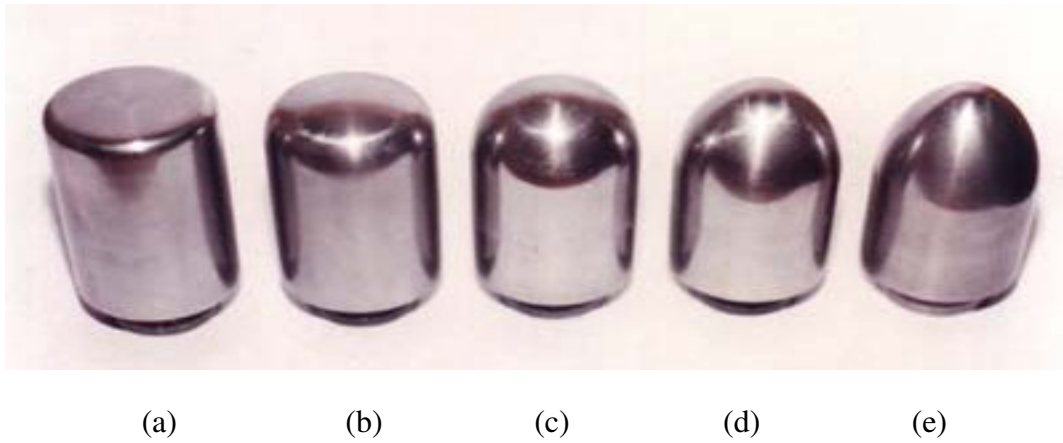


Fig. 2.17 -Punções utilizados no teste-(a) punção cilíndrico, (b) punção elipse rasa, (c) punção hemisférico, (d) punção elipse profunda e (e) punção elipse extra profunda. | Ferramenta do LdTM da UFRGS |.

Os punções da figura 2.17, foram projetados de uma forma para produzirem nas chapas estampadas, os fenômenos de estiramento ou estampagem profunda de forma isolada ou simultânea. O primeiro fenômeno é caracterizado pela redução localizada da espessura da chapa, enquanto que no segundo pela redução da espessura de forma mais homogênea ao longo da peça.

O punção (a) gera preferencialmente estampagem profunda devido a seu formato cilíndrico e sua grande área de contato inicial com a chapa. Para o punção (b) o raio de concordância é maior, o que gera estampagem profunda menor devido à redução da área inicial de contato, iniciando o estiramento da chapa.

À medida que o raio de curvatura vai aumentando, o punção toma a forma mais aguda, punções (c) e (d), o fenômeno de estiramento é mais evidente.

O punção (e) apresenta uma geometria mais aguda submetendo a chapa estampada preferencialmente ao fenômeno de estiramento, por ter uma área de contato inicial com a chapa muito pequena.

No processo de estampagem ocorre a mistura destes dois tipos de fenômenos devido à geometria mais complexa das peças estampadas. Dificilmente eles ocorrem isoladamente, por

isso, saber o comportamento do material frente a estes fenômenos é importante para evitar no processo de estampagem possíveis falhas do material.

O uso de diferentes formas de punções, com diferentes raios no fundo é para forçar condições semelhantes à realidade da estampagem e muitas vezes provocar rupturas prematuras do material e assim, prever possíveis regiões das ferramentas onde podem ocorrer falhas na estampagem ou mesmo regiões onde o estiramento pode impedir o processo de conformação da chapa causando a ruptura, prevendo o comportamento real do material utilizado. Utilizando-se discos com diferentes diâmetros e punções com formas geométricas diferentes, pode-se obter o Limite da Razão de Estampagem (β) do material utilizado, e melhor avaliar o comportamento do material e qualificar materiais similares para a estampagem profunda.

A tabela 2.2, mostra a profundidade máxima de estampagem prevista, h (em mm), para cada tipo de punção (em mm), em função do diâmetro do disco (em mm).

Tabela 2.2- Profundidade máxima de embutimento h previsto para cada punção. Ref. / 30 /.

Diam. do disco	Cilíndrico (a)	Elipse Rasa (b)	Hemisf. (c)	Elipse Prof. (d)	E.E. Prof. (e)
115	50	55	60	65	70
110	45	50	55	60	65
105	40	45	50	55	60
100	35	40	45	50	55
95	30	35	40	45	50
90	25	30	35	40	45
85	20	25	30	35	40
80	15	20	25	30	35

Com os valores de β é possível construir o gráfico do limite razão de estampagem em função dos fenômenos de estiramento e/ou estampagem profunda, determinando o potencial de deformação do material. A figura 2.18 mostra um exemplo do limite de razão de estampagem para o alumínio, aço EEP e aço inoxidável.

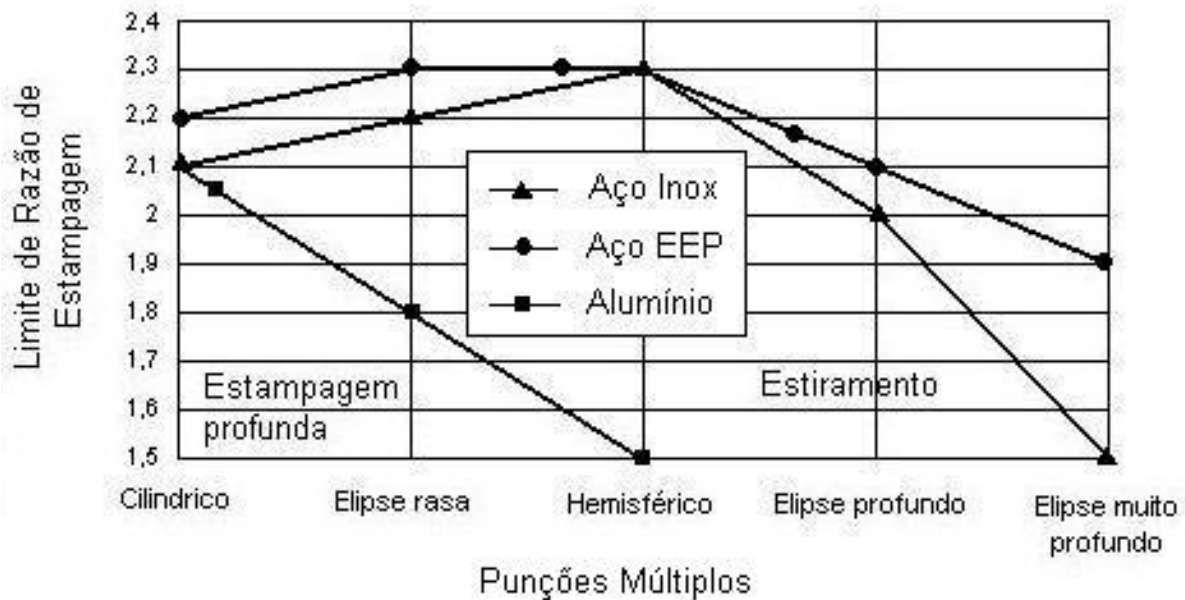


Fig.

2.18 .Gráfico Limite Razão de Estampagem β . Ref /13 /

Analisando o gráfico verifica-se que o aço inoxidável não resiste a um grau elevado de estiramento. Para o punção elipse rasa e punção cilíndrico ocorre um β superior (zona de estampagem profunda), quando comparado com os punções elipse profundo e extra profundo (faixa de estiramento).

À medida que o grau de estiramento aumenta a resistência do material à estampagem diminui. O aço EEP apresenta um β de estampagem máximo para o punção hemisférico, enquanto que, para o alumínio a resistência ao estiramento cai bruscamente, apresentando estiramento zero para o punção Hemisférico.

Um outro exemplo do Limite Razão de Estampagem está representado na figura 2.19. O gráfico apresenta o valor de β para o aço inoxidável normal, aço EEP e alumínio com 99% de pureza.

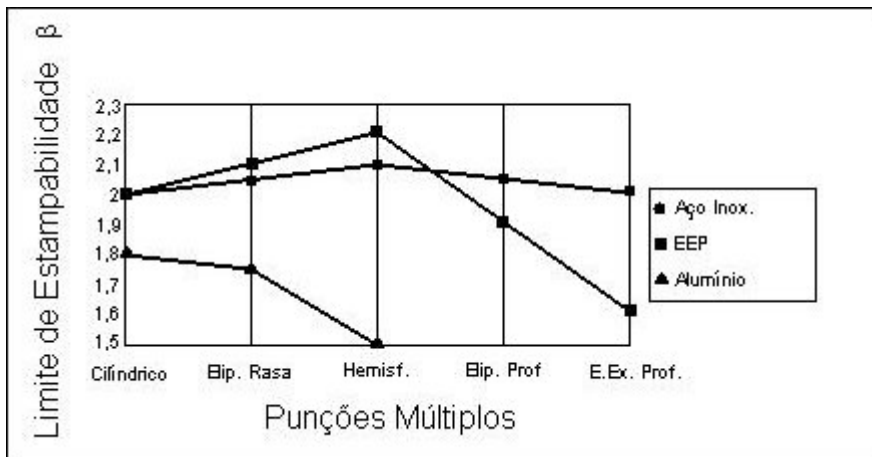


Fig. 2.19. Gráfico Limite Razão de Estampagem com punções múltiplos. Ref./ 30/.

3- MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os equipamentos utilizados no desenvolvimento da dissertação que tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia na caracterização de chapas para estampagem.

3.1- Materiais utilizados

Para desenvolver este trabalho foram selecionadas seis amostras de materiais utilizadas para estampagem de peças.

Amostra A: Aço inoxidável AISI 304 da ACESITA

Amostra B: Aço inoxidável AISI 430 da ACESITA

Amostra C: Aço ao carbono EP NBR 5915 da USIMINAS.

Amostra D: Alumínio ABNT 3104-0 da ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL.

Amostra E: Cobre ABNT Liga 110 Mole do grupo PARANAPANEMA

Amostra F: Latão ABNT Liga 268 Mole do grupo PARANAPANEMA

3.2- Composição química das amostras

A tabela 3.1 apresenta a composição química dos materiais fornecida pelos fabricantes dos materiais selecionadas.

Tabela 3.1- Composição química do material analisado.

Material TIPO	%C	%Mn	%Cr	%Si	%P	%Al	%Cu	%Zn	%Ni	%Fe	%Mg	Outros %
AISI304	0,042	1,40	18,13	0,404	0,026	0,007	-	-	8,34	71,37	-	1,281
AISI430	0,08	0,417	16,21	0,331	-	-	-	-	0,27	82,41	-	0,282
EP	0,56	0,103	-	0,034	-	-	-	-	-	99,53	-	0,277
Al	-	0,86	-	-	-	97,00	-	-	-	0,43	1,22	1,350
Cu 110	-	-	-	-	-	-	99,99	-	-	-	-	0,01
Latão268	-	-	-	-	-	-	66,19	33,79	-	0,02	-	-

3.3- Propriedades mecânicas das amostras.

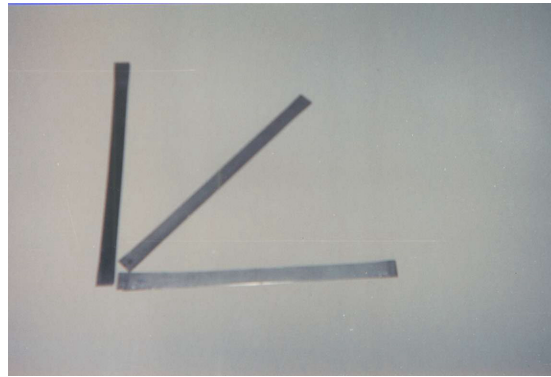
A tabela 3.2 mostra as propriedades mecânicas dos materiais fornecidas pelos fabricantes dos materiais analisados.

Tabela 3.2- Propriedades mecânicas do material dos fabricantes

Material	R_m (MPa)	R_{p02} (MPa)	A.(50mm) (%)	Dureza	Tamanho de Grão
Inox AISI 304	700	300	54	85HRB (162 HB)	-
Inox AISI 430	480	330	27	80HRB (147 HB)	-
Aço EP NBR 5915	270 ~ 350	140 ~ 200	38	-	-
Alumínio Liga 3104 – 0	178	79	17	45 HB	NB ASTM 7
Cobre Liga 110 Mole	200 ~ 250	80	45	65 RF (21HB)	0,020 ~ 0,025mm
Latão Liga 268 Mole	360	130	55	58 ~ 78 RB 100 ~ 143 HB	0,040 mm

3.4- Corpos de prova para ensaios mecânicos.

Para determinar as curvas de escoamento e a anisotropia foi preparado corpos de prova conforme a Norma DIN 50 114 e cortados a 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação da chapa , como mostra a figura 3.1.



—————▶ Sentido de laminação

Fig. 3.1- Corpos de prova cortados a 0°, 45° e 90° do sentido de laminação.

Na preparação dos corpos de prova para a construção das curvas de escoamento e determinar a anisotropia foi utilizado uma guilhotina para o corte dos mesmos e uma retificadora para remover as rebarbas do corte

No ensaio para determinar o valor de β , foram utilizados discos de chapa de diâmetros de 80 mm, 85 mm, 90 mm, 95 mm, 100 mm, 105 mm, 110 mm 115 mm e 120 mm , de cada amostra como mostra a figura 3.2.com a utilização de um punção cilíndrico de $d = 50$ mm.

Na preparação dos discos (blanques) das seis amostras selecionadas foi utilizada uma prensa hidráulica com as ferramentas de corte com diâmetros de 80 mm até 120 mm, variando de cinco em cinco milímetros.



Fig. 3.2- Corpos de prova para ensaio de estampagem.

3.5- Equipamentos do ensaio de tração.

Para o ensaio de tração foi utilizado uma máquina de ensaio Universal de capacidade de 100 KN do LdTM da UFRGS como mostra a figura 3.3. Durante o ensaio de tração uma força é aplicada ao corpo de prova que promove uma deformação na direção do esforço. A força é aplicada pelas duas garras da máquina de ensaio de tração. A garra inferior é fixa e a superior é móvel, produzindo um movimento vertical.

3.5.1- Equipamento para ensaio de tração do LdTM da UFRGS.

- Máquina universal de ensaios KRATOS K 10.000, célula de carga com capacidade 100 KN, ano de fabricação 1981.
- Sensor (clip-gage) para medição do alongamento. INSTRON 2630-100, comprimento inicial 50 mm. Ano de fabricação 1998.
- Condicionador de sinais para extensometria.
- Registrador plotter.
- Calculadora programável.

O ensaio é realizado seguindo a norma DIN EM 10002 “Zugversuch ensaio de tração” considerando o formato dos corpos de prova. Fixação do corpo de prova nas garras da máquina de ensaio. Considerando a velocidade da máquina para o ensaio de tração de 40 mm/min.



Fig.3.3- Equipamento do LdTM da UFRGS para ensaio de tração.

3.5.2- Equipamentos para ensaio de Estampagem do LdTM da UFRGS

No ensaio de embutimento profundo na conformação de copos para determinar o Limite Razão de Estampagem β , e para avaliar a formação de orelhas é utilizado uma matriz e punção cilíndrico, como mostra a figura 3.4 é acoplada a uma prensa hidráulica do modelo DAN PRESSE, figura 3.5, acoplada a uma célula de carga para determinar a força de estampagem, com um sensor de pressão para avaliar a pressão do prensa chapa evitando a formação de rugas. O Limite Razão de Estampagem β é determinado combinando os diâmetros dos discos com as respectivas profundidades h mostradas na tabela 2.1.

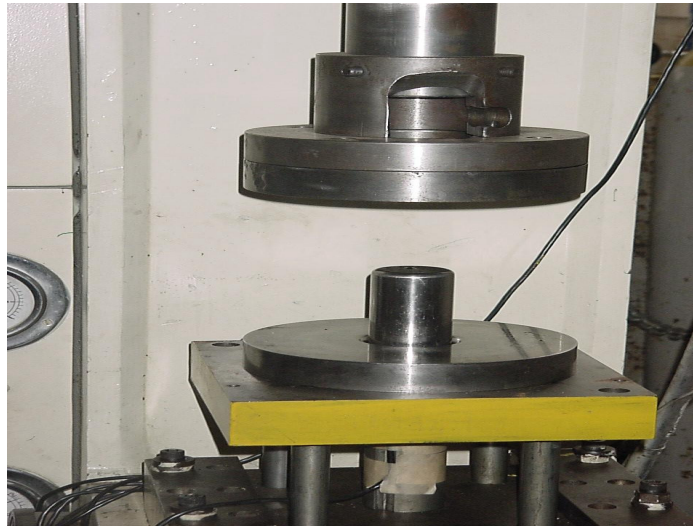


Figura 3.4- Ferramenta do LdTM da UFRGS.

A ferramenta com matriz e punção, conforme mostra a figura 3.4 é acoplada à prensa instrumentada conforme mostra a figura 3.5.



Fig. 3.5 –Prensa instrumentada do LdTM da UFRGS para ensaio de estampagem.

Para determinar β em função do efeito do estiramento e/ou estampagem profunda, de forma isolada ou simultânea, utiliza-se a ferramenta da figura 3.4 com combinação dos punções da figura 2.17, os discos da figura 3.2 e as profundidades h da tabela 2.2.

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Através do trabalho realizado foi possível obter os dados necessários para a construção de tabelas, diagramas e gráficos para compilar os resultados dos ensaios. Neste capítulo foi apresentado os resultados dos ensaios das seis amostras de materiais selecionados.

4.1- Estrutura metalográfica

O material para a confecção dos corpos de prova para análise da estrutura metalográfica, foi removido em locais centralizados da chapa metálica. Para o ataque químico da superfície do material foram utilizados os seguintes compostos químicos: Ácido oxálico 10 em água para aço inox. 304, mistura de ácido clorídrico + 10 % de metanol, para o aço inox. 430, Nital 2% em água para o aço EP, ácido fluorídrico 0,5% para alumínio, hidróxido de amônia e peróxido de hidrogênio para o cobre e ácido ortofosfórico, mistura de 150 ml de ácido e 250 ml de água para o latão.

Amostra A: Inox AISI 304.

Matriz: Austenita com grãos de tamanho 7 e 8 ASTM.

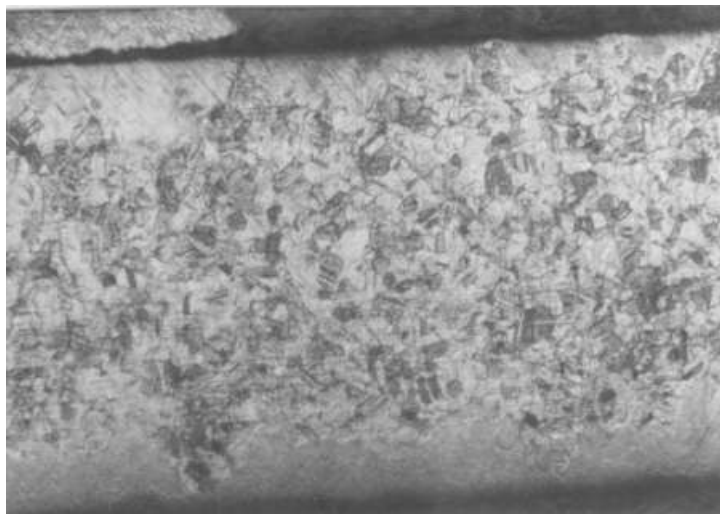


Figura 4.1- Aço Inox. AISI 304. Aumento 100X

Amostra B: INOX AISI 430

Matriz: Austenita + Ferrita, com carbonetos dispersos de cromo.

Tamanho de Grão: 10, conforme ASTM E-112.

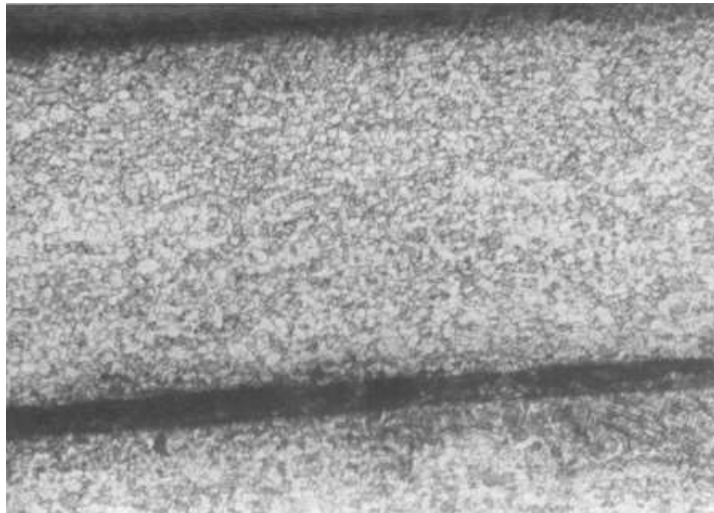


Figura 4.2- Aço Inox. AISI 430. Aumento 100X

Amostra C: Aço NBR 5915 Ep.

Matriz: Ferrita com carbonetos de cementita dispersos

Tamanho de grão: 9 e 10 conforme ASTM E-112

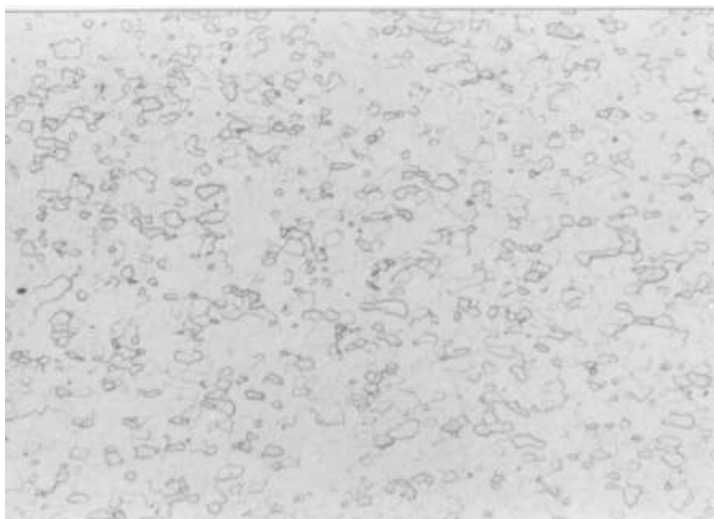


Figura 4.3- Aço ao carbono EP. Aumento 100X

Amostra D: Alumínio liga 3104-0.

Matriz: Alumínio.

Tamanho de grão: ASTM 7

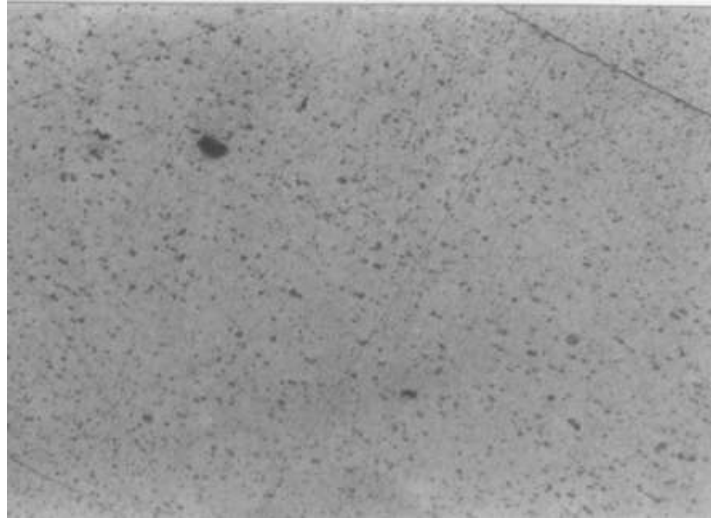


Figura 4.4 – Alumínio Liga 3104-0. Aumento 100X

Amostra E: Cobre liga 110-Mole

Matriz Cobre devido a alta pureza.

Tamanho de grão: 0,025 mm

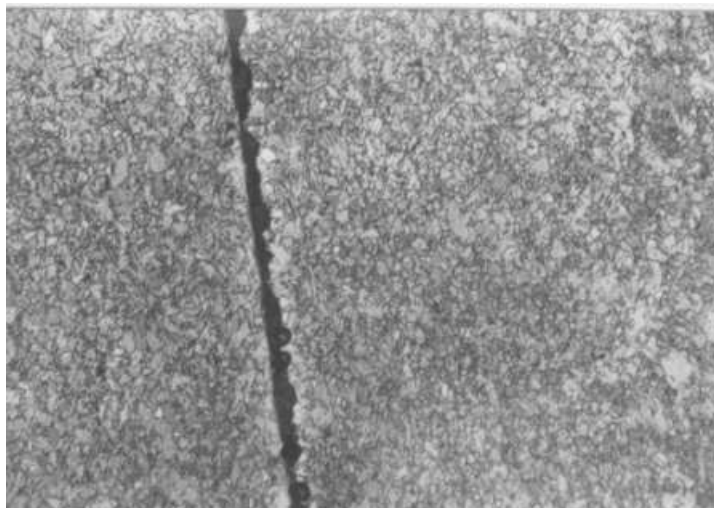


Figura 4.5 – Cobre Liga 110 Mole. Aumento 100X

Amostra F: Latão liga 268 Mole

Matriz: Cobre e Zinco

Tamanho de grão: 0,05 mm

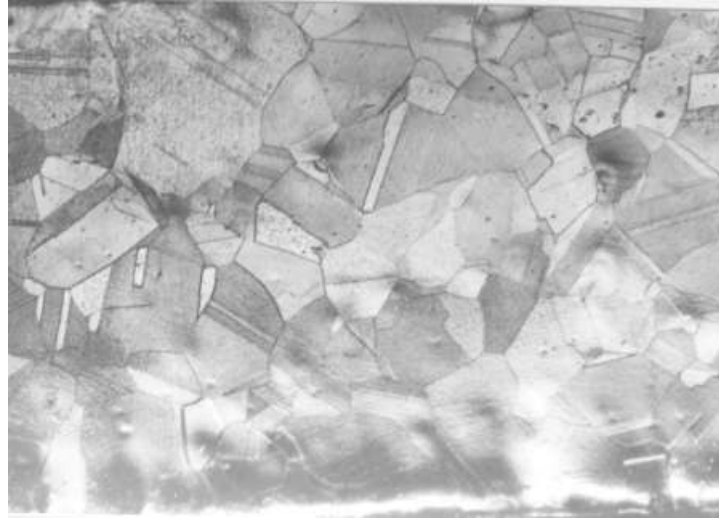


Figura 4.6 – Latão Liga 268 Mole. Aumento 100X

4.2- Dureza.

Para as amostras A, B e C a dureza é medida em dureza Vicker e convertida em Brinel. Para as amostras D, E e F a dureza é medida em Brinel, com esfera de diâmetro 2,5 mm com uma carga de 31,25 kgf. A tabela 4.1 apresenta o resultado dureza medida das amostras selecionadas.

Tabela 4.1-Dureza dos materiais analisados.

Material	Inox 304	Inox 430	Aço EP	Alumínio	Cobre	Latão
Dureza	165,8 HV10 156 HB	179 HV10 170 HB	76,6 HV10 72HB	45 HB	71,6 HB	43,4 HB

4.3- Ensaios de tração

Através dos ensaios de tração foi possível determinar as curvas da tensão convencional (σ) x deformação relativa (ϵ), a curva de escoamento (k_f) x deformação verdadeira (ϕ), índice de encruamento (n) calculado utilizando a equação 2.12, o índice de encruamento (n) através dos gráficos, limite de resistência (R_m), limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$), alongamento

(A), a constante C da equação de Hollomon e Ludwik e a tensão de escoamento inicial (k_{fo}). Com os resultados dos ensaios de tração, é possível compilar os dados da tabela 4.2, com os sentidos de laminação de 0° , 45° e 90° .

Tabela 4.2-Resultados do ensaio de tração

	Ângulo do sentido de Laminação	Unidade	Inox AISI 304	Inox AISI 430	Aço EP	Alumínio ABNT 3404-0	Cobre ABNT liga 110 mole	Latão ABNT liga 268 mole
so		mm	0,72	0,70	0,94	0,80	0,50	0,70
Rm	0°	N/mm ²	654,0	490,5	296,5	211,9	277,1	298,0
	45°	N/mm ²	620,3	490,5	310,1	198,7	238,4	237,7
	90°	N/mm ²	627,5	505,6	303,4	237,4	281,0	275,4
Rp _{0,2}	0°	N/mm ²	261,6	316,9	151,1	96,8	254,8	98,1
	45°	N/mm ²	274,1	316,9	167,2	82,9	235,4	45,3
	90°	N/mm ²	274,1	332,0	146,1	124,9	275,1	67,9
k_{fo}	0°	N/mm ²	275	335	170	124	258	140
	45°	N/mm ²	290	348	185	107	230	78
	90°	N/mm ²	275	365	170	150	280	100
A	0°	%	57,4	28,7	51,8	20,0	23,9	64,7
	45°	%	59,8	26,6	49,8	19,0	31,0	70,2
	90°	%	61,7	29,7	50,0	19,0	30,8	61,6
n (Eq. 2.12)	0°	-	0,473	0,221	0,229	0,199	0,103	0,570
	45°	-	0,419	0,278	0,213	0,271	0,102	0,698
	90°	-	0,451	0,212	0,255	0,198	0,082	0,770
n (gráfico)	0°	-	0,373	0,190	0,227	0,259	0,085	0,537
	45°	-	0,351	0,181	0,223	0,283	0,071	0,713
	90°	-	0,355	0,183	0,260	0,221	0,078	0,641
Constante C	0°	-	1.259,1	800,7	505,4	410,8	369,8	704,2
	45°	-	1.181,2	792,6	530,8	398,2	315,3	640,6
	90°	-	1.169,8	807,0	558,2	416,0	383,0	715,1

4.4- Dados dos resultados médios dos ensaios de tração.

Na tabela 4.3, estão os resultados médios das propriedades mecânicas resultantes dos ensaios das seis amostras analisadas. Os dados referentes a R_m , $R_{p0,2}$, A , constante C , n e k_{fo} são obtidos através da média ponderada dos ensaios a 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação, tirados da tabela 4.2, sendo que os resultados a 45° tem peso 2.

Tabela 4.3-Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados

Material	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	$A(50mm)$ %	C (MPa)	n	K_{fo} (MPa)
Inox 304	630	271	59	1.198	0,357	282,5
Inox 430	494	320,5	28	798	0,183	349
Aço EP	305	158	50	513	0.233	177,5
Al(3104)	212	97	19	406	0,261	122
Cobre	259	250	29	346	0,076	249,5
Latão	262	64	66	675	0,650	99

4.5 - Ensaio de anisotropia

Para determinar a anisotropia, os materiais A, B, C e F foram tracionados 20%, enquanto que os materiais D e E foram tracionados 10%, devido à baixa deformação ref./ 14/. Utilizando as tabelas, anexo 7.3, e as equações 2.14, 2.15 e 2.16 calcula-se o índice de anisotropia para as direções de laminação 0° , 45° e 90° , a anisotropia média e a anisotropia planar. Os resultados encontram-se na tabela 4.4

Tabela 4.4-Resultado do ensaio de anisotropia

Material	AISI 304	AISI 430	Aço EP	Al L.3104	Cu L. 110	Latão L.268
r_{0°	0,775	0,958	2,330	0,705	0,721	0,820
r_{45°	1,133	0,787	1,581	0,804	0,593	0,856
r_{90°	0,924	1,303	1,930	0.739	0,850	0,833
r_m	0,991	0,959	1,856	0,763	0,689	0,841
Δr	- 0,283	0,343	0,549	- 0,081	0,192	- 0,030



Figura 4.7 – Efeito da anisotropia dos materiais analisados.

A figura 4.7 mostra o resultado do efeito da anisotropia que será analisada e discutida no próximo capítulo.

4.6 - Ensaio do Limite Razão de Estampagem β .

Os resultados dos ensaios para determinar o Limite Razão de estampagem β das seis amostras de material, com os cinco tipos de punções para produzir os efeitos de estampagem profunda e/ou estiramento, estão representados na tabela 4.4.

Na tabela 4.5 a denominação “Ruptura”, significa que o corpo de prova rompeu antes de atingir a profundidade (h) prevista para cada punção e diâmetro do disco. A designação “Bom”, significa que o punção atingiu a profundidade (h) prevista de acordo com a tabela 2.2 apresentada no capítulo 2.

Tabela 4.5. Resultado dos ensaios de Estampagem.

Material	Diâmetro do blank	Punção Cilíndrico	Punção Elipse rasa	Punção Hemisfério	Punção Elipse Profunda	Elipse extra Profunda
Inox 304	110	-	-	Ruptura	-	-
	105	Ruptura	-	Bom	Ruptura	-
	100	Bom	Ruptura	Bom	Bom	-
	95	Bom	Bom	Bom	Bom	Ruptura
	90	-	Bom	-	Bom	Bom
Inox 430	100	Ruptura	Ruptura	-	-	-
	95	Bom	Bom	Ruptura	Ruptura	-
	90	Bom	Bom	Bom	Ruptura	-
	85	-	Bom	Bom	Bom	Ruptura
	80	-	-	-	Bom	Bom
EP	115	-	Ruptura	Ruptura	-	-
	110	Ruptura	Ruptura	Bom	Ruptura	-
	105	Ruptura	Bom	Bom	Ruptura	-
	100	Bom	-	-	Bom	Ruptura
	95	Bom	-	-	Bom	Bom
Alumínio	95	Ruptura	-	-	-	-
	90	Bom	Ruptura	-	-	-
	85	Bom	Bom	Ruptura	-	-
Cobre	100	Ruptura	Ruptura	-	-	-
	95	Bom	Bom	Ruptura	Ruptura	-
	90	Bom	Bom	Bom	Bom	-
	85	-	-	Bom	Bom	Ruptura
	80	-	-	-	-	Bom
Latão	100	Ruptura	Ruptura	Ruptura	-	-
	95	Ruptura	Bom	Bom	Ruptura	-
	90	Bom	Bom	Bom	Bom	Ruptura
	85	Bom	-	-	Bom	Bom
	80	-	-	-	-	Bom

4.6.1- Limite Razão de Estampagem.

Com os resultados dos ensaios de embutimento com o punção cilíndrico é obtido o LRE β das seis amostras analisadas que está apresentado na tabela 4.6.

Tabela 4.6- Limite Razão de estampagem β

Material	Inox 304	Inox 430	Aço EP	Al 3104-0	Cu 110	Latão 268
β	2,0	1,9	2,0	1,8	1,9	1,8

4.6.2- Limite Razão de Estampagem em função do efeito de estiramento e/ou Estampagem profunda (Método com punções múltiplos).

Com os resultados dos ensaios de estampagem da tabela 4.3 é possível construir o gráfico da figura 4.8, que apresenta o efeito dos fenômenos de estiramento e estampagem profunda atuando de forma isolada e/ou conjunta com o estiramento, que também será analisado no próximo capítulo.

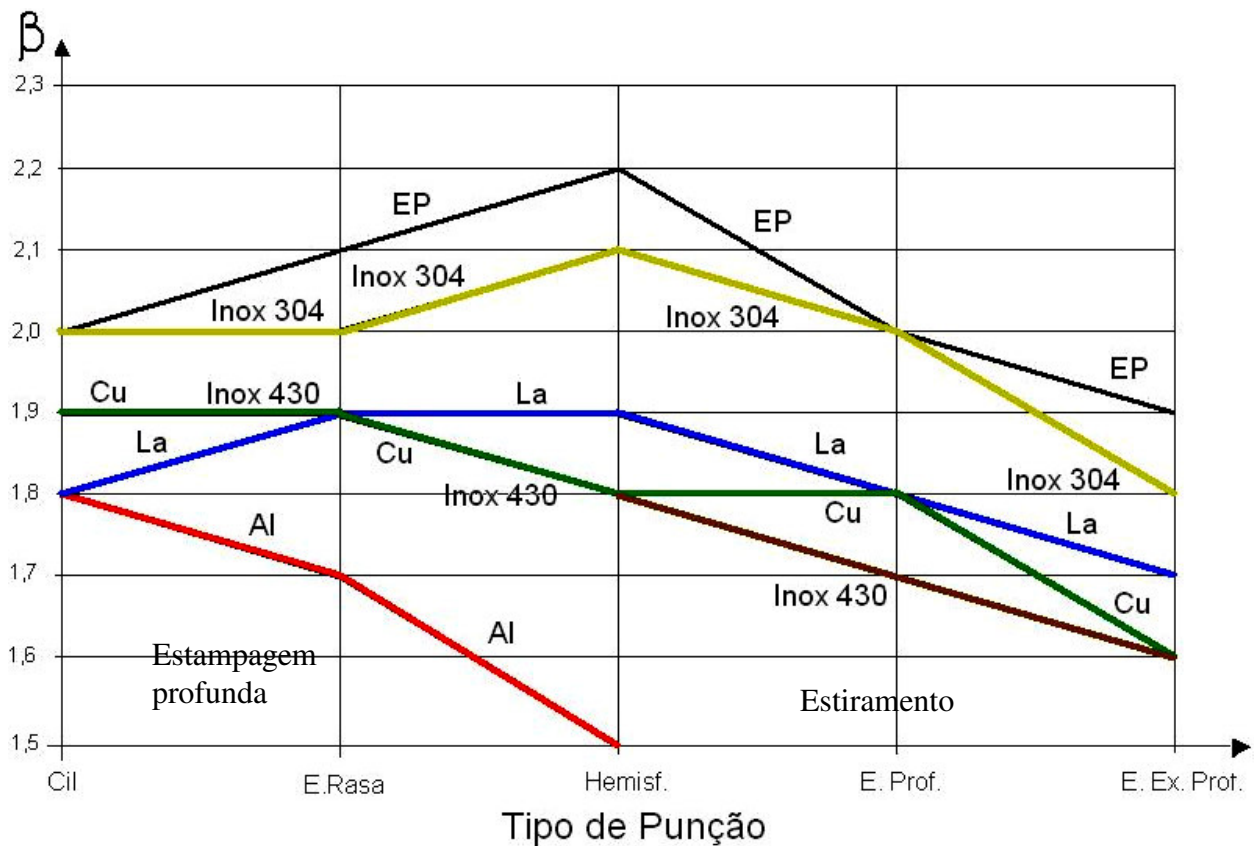


Figura 4.8-Limite Razão de Estampagem com punções múltiplos (β).

4.7 – Gráficos dos ensaios de tração.

Nas páginas a seguir, são apresentados os gráficos, tensão convencional vs deformação relativa, tensão de escoamento verdadeira (k_f) vs deformação verdadeira (φ) e o gráfico bilogárímico da tensão de escoamento vs deformação verdadeira das seis amostras de materiais analisadas, para uma melhor visualização, análise e determinar as seguintes propriedades: Limite de resistência (R_m), limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$), alongamento (A), tensão de escoamento inicial (k_{f0}), constante C da equação de Hollomon Ludwik, índice de encruamento (n), tensão de escoamento máxima (k_f) e o coeficiente de correlação (R^2).

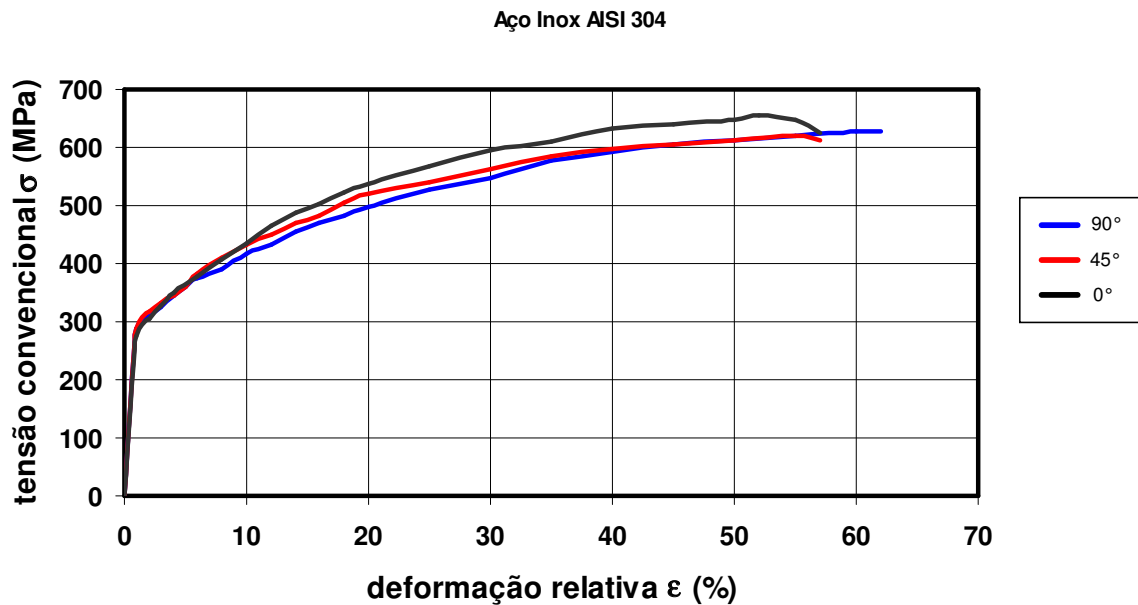


Fig. 4.9. Gráfico tensão convencional σ x deformação relativa ϵ

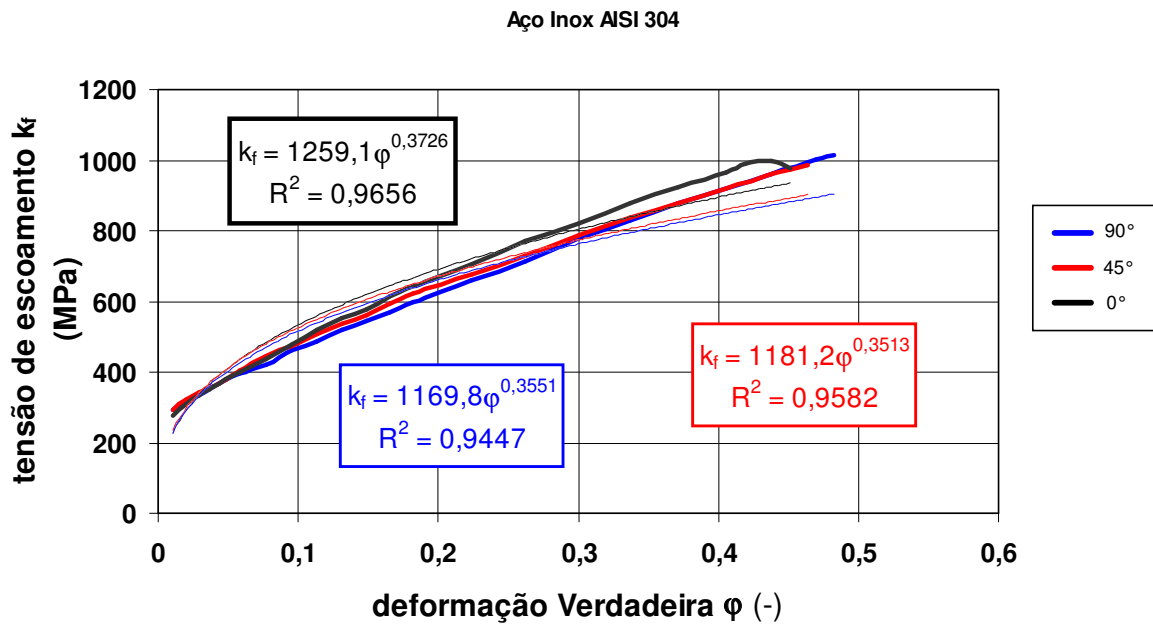


Fig. 4.10. Gráfico tensão de escoamento k_f x deformação verdadeira ϕ .

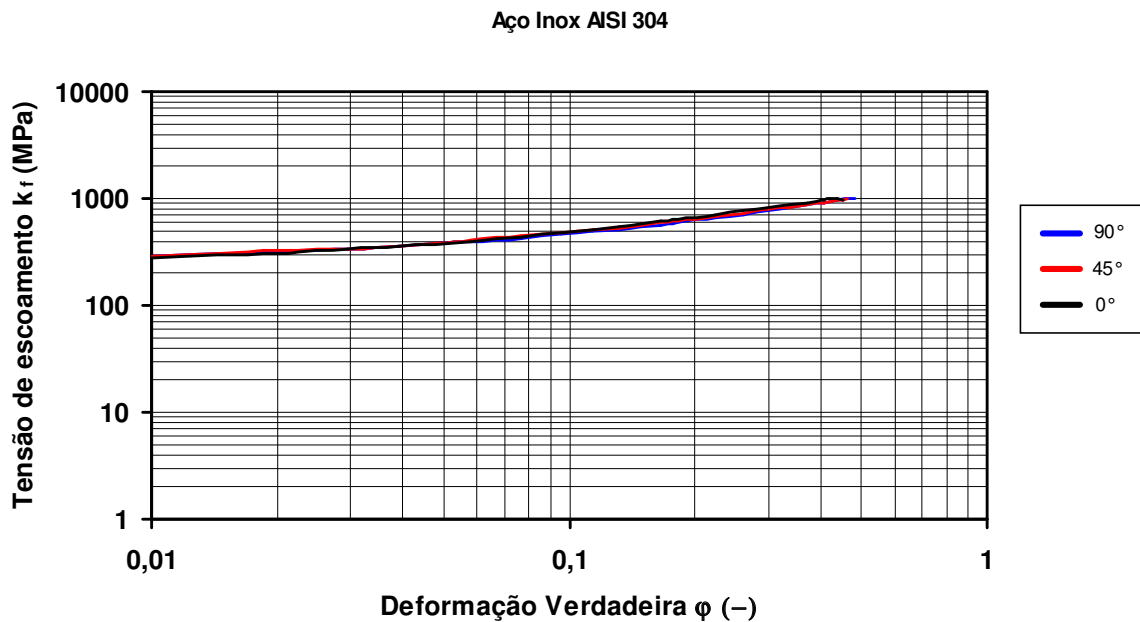


Fig. 4.11. Gráfico com eixos com divisão logarítmica

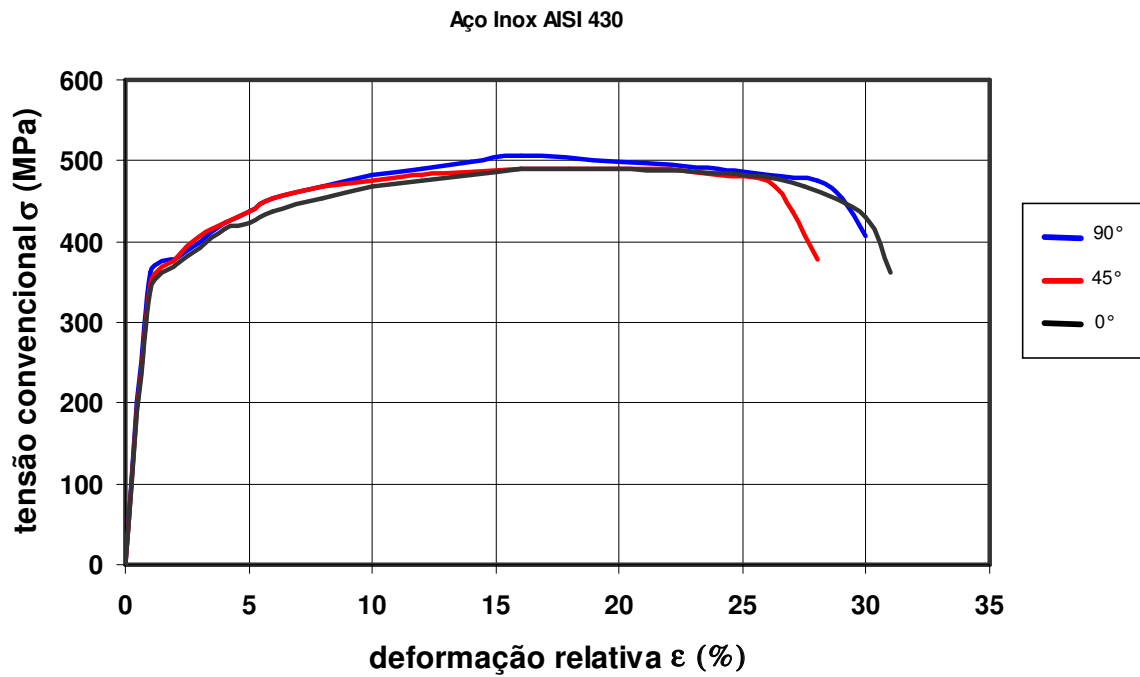


Fig. 4.12. Gráfico tensão convencional σ x deformação relativa ϵ

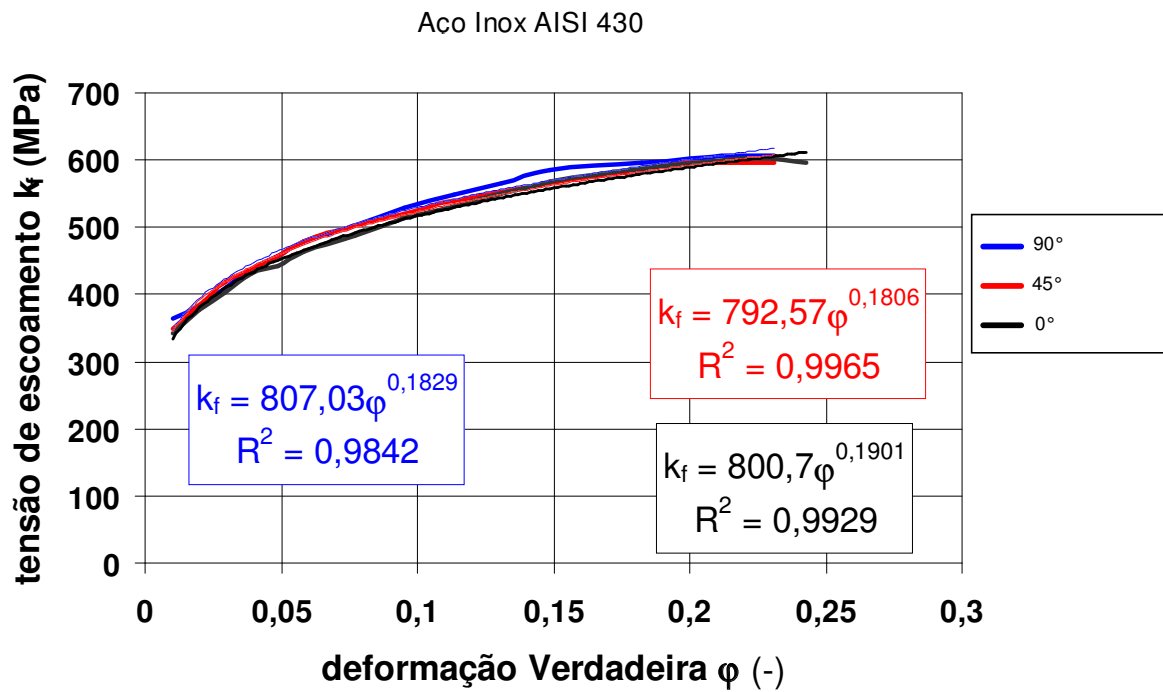


Fig. 4.13. Gráfico tensão de escoamento k_f x deformação verdadeira φ

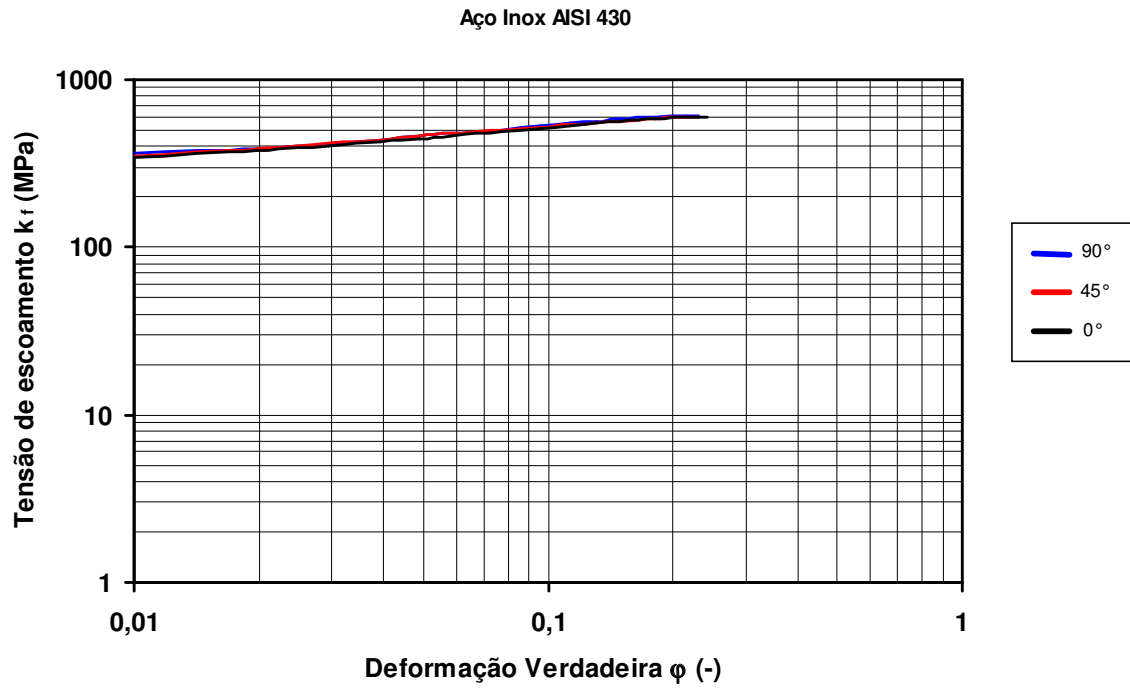


Fig. 4.14. Gráfico com eixos com divisão logarítmica

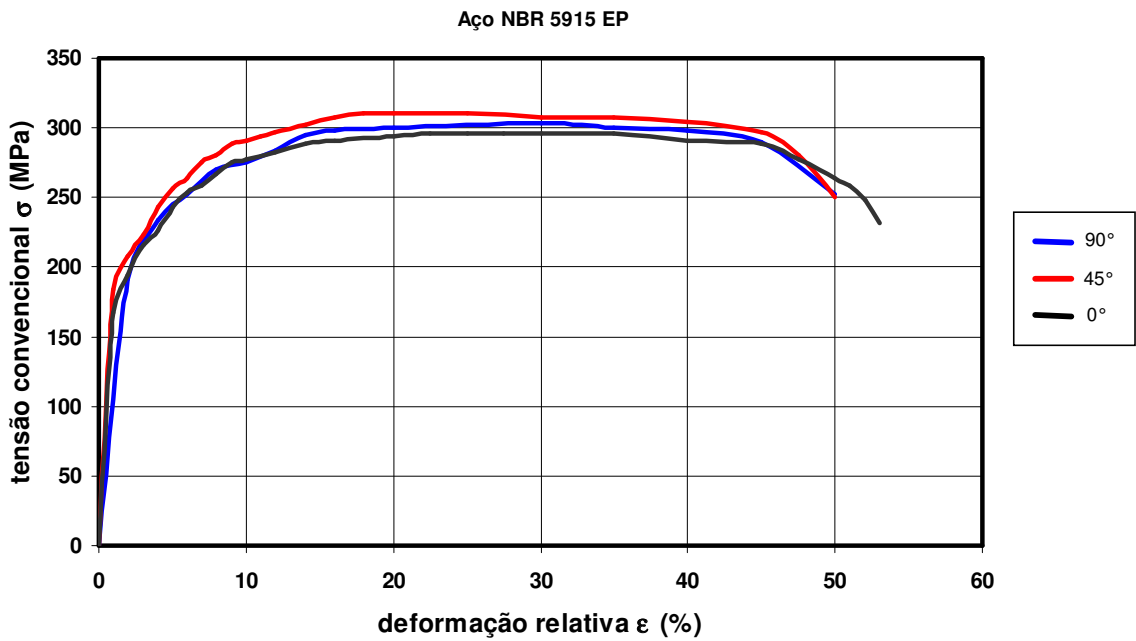


Fig. 4.15. Gráfico tensão convencional σ x deformação relativa ϵ

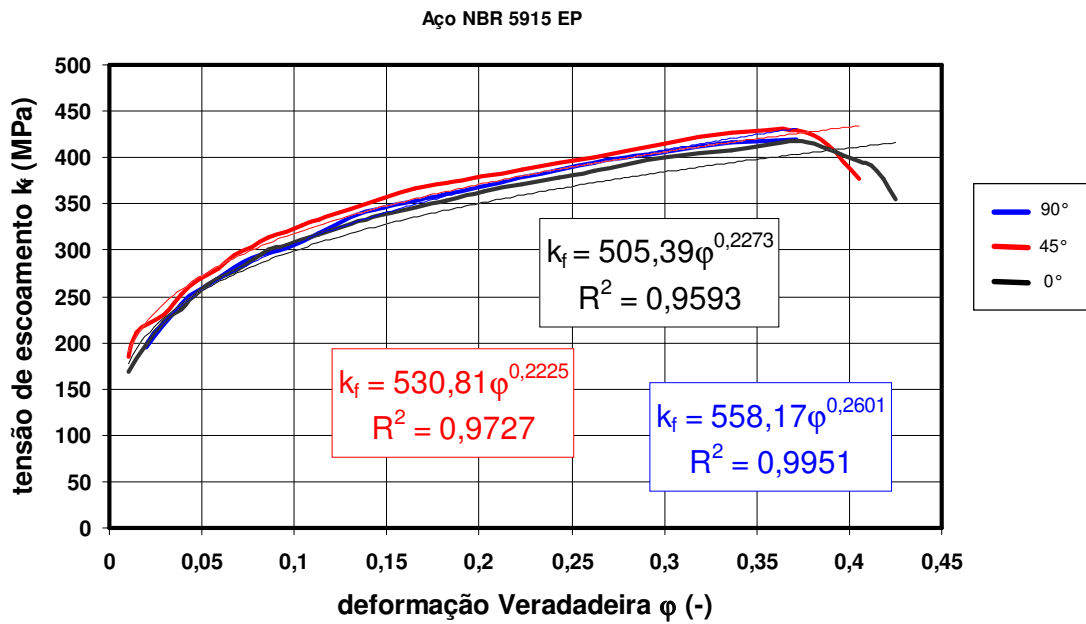


Fig. 4.16. Gráfico tensão de escoamento k_f x deformação verdadeira ϕ

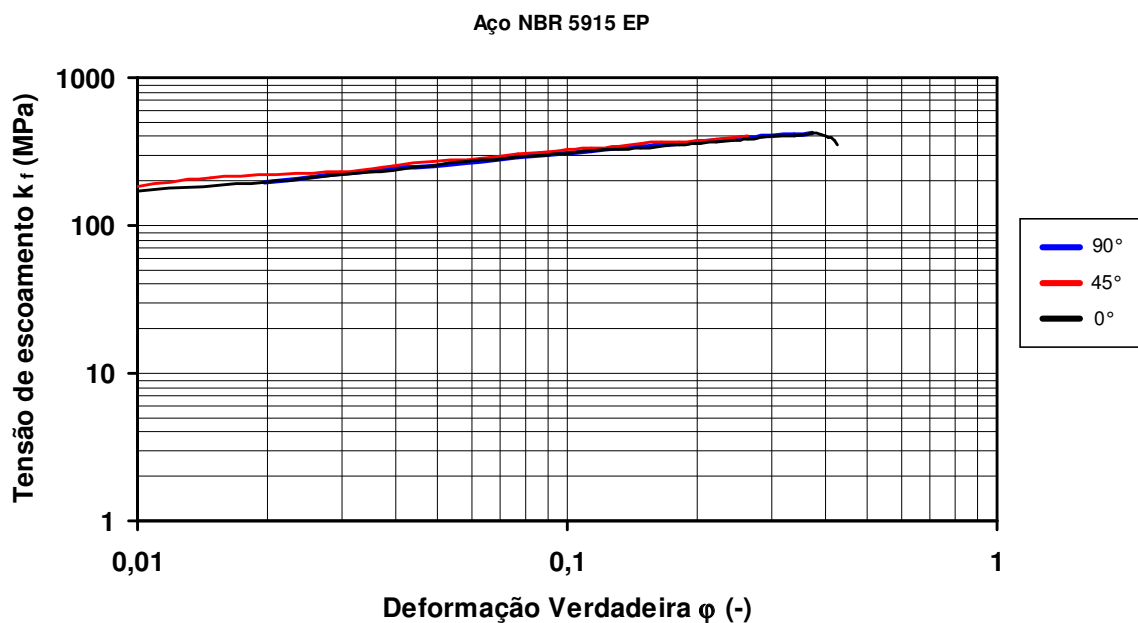


Fig. 4.17. Gráfico com eixos com divisão logarítmica

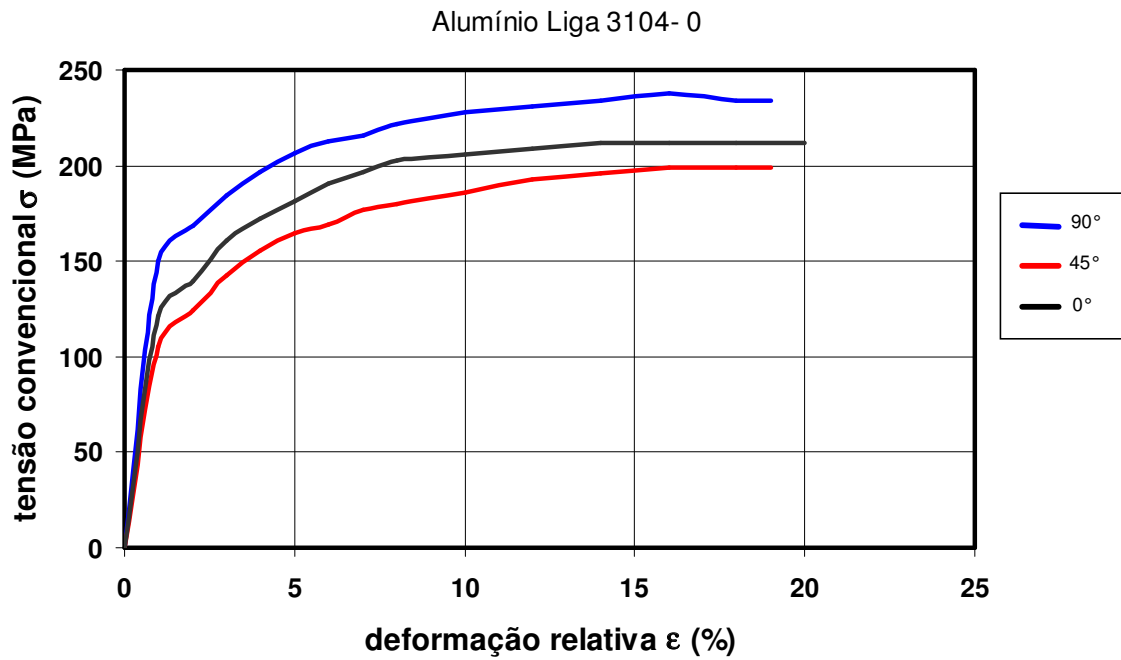


Fig. 4.18. Gráfico tensão convencional σ x deformação relativa ϵ

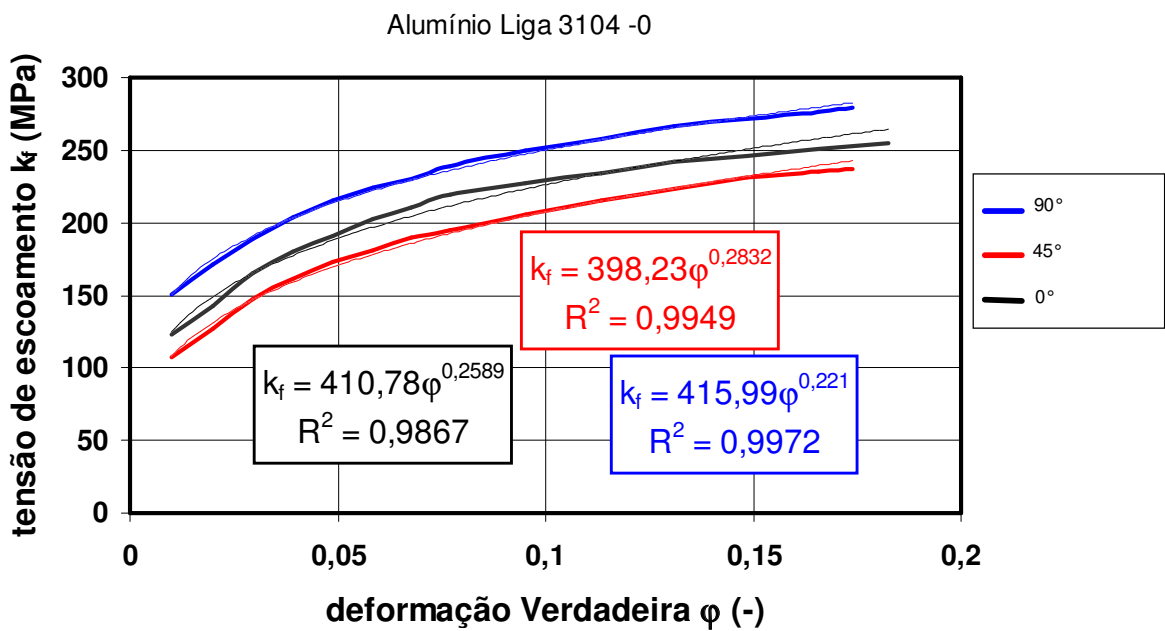


Fig. 4.19. Gráfico tensão de escoamento k_f x deformação verdadeira ϕ

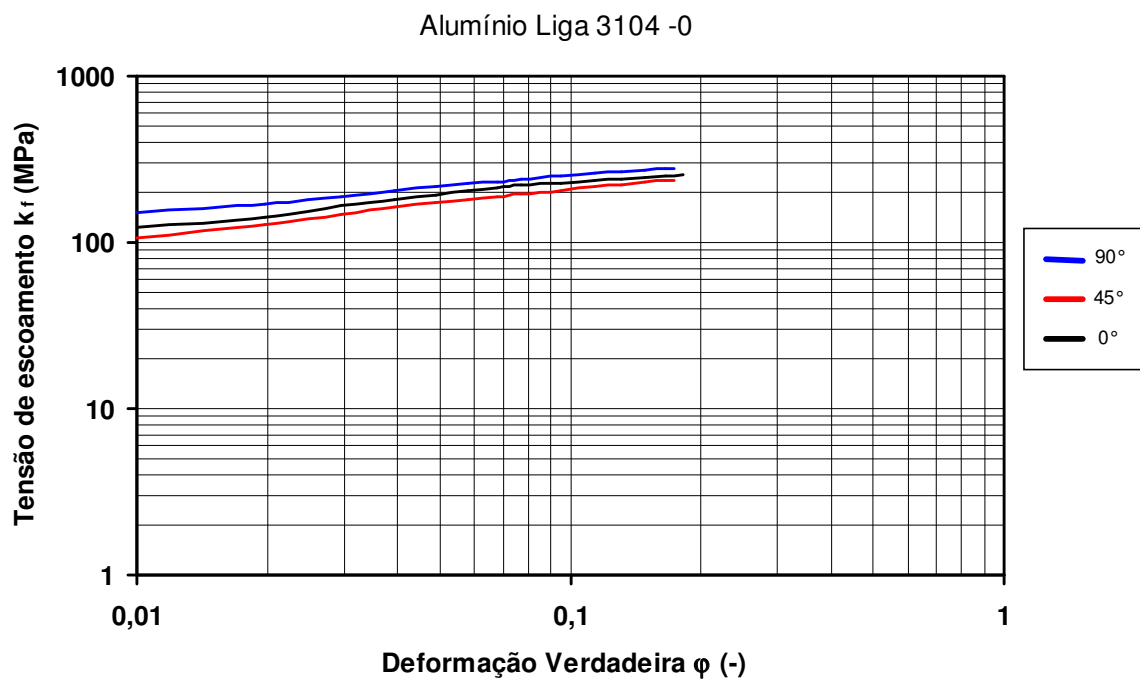


Fig. 4.20. Gráfico com eixos com divisão logarítmica

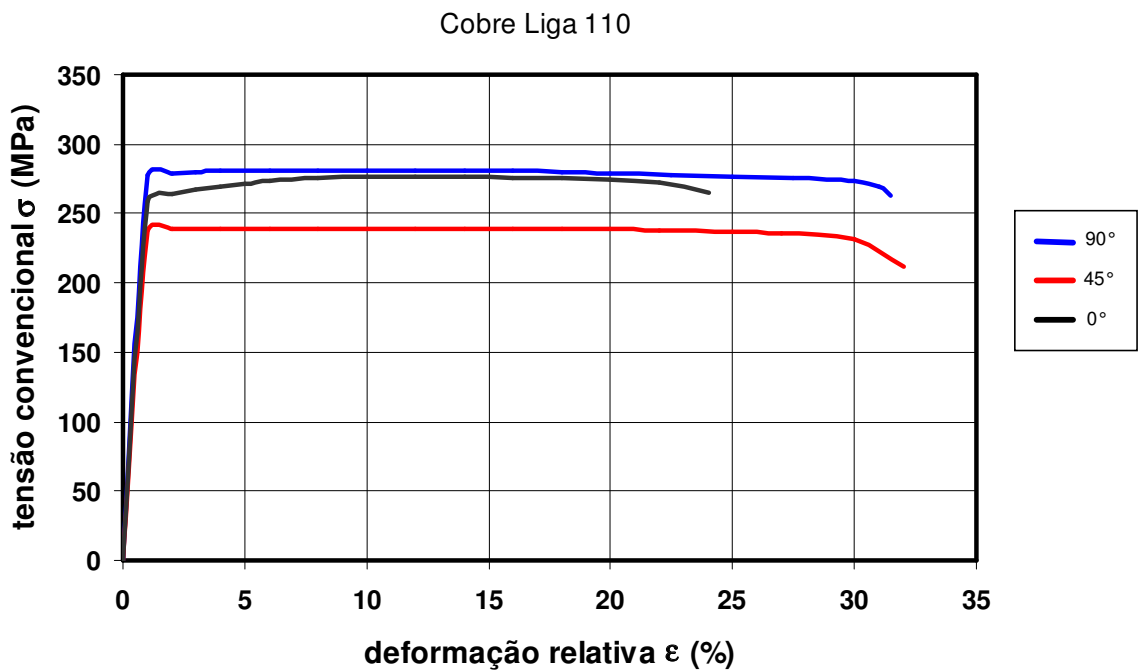


Fig. 4.21. Gráfico tensão convencional σ x deformação relativa ϵ

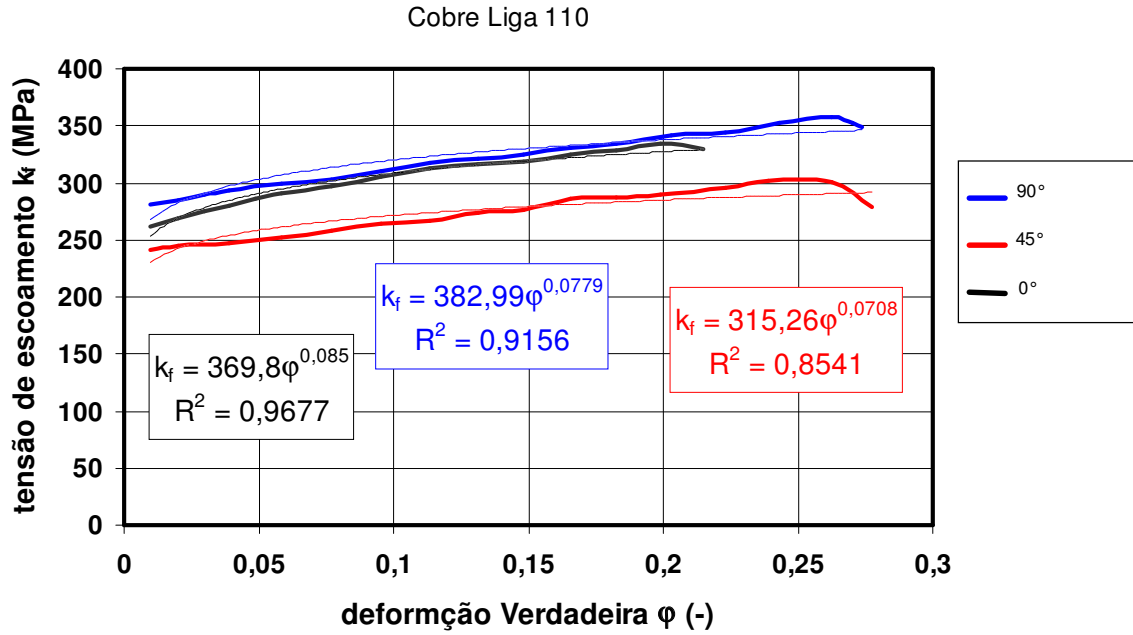


Fig. 4.22. Gráfico tensão de escoamento k_f x deformação verdadeira ϕ

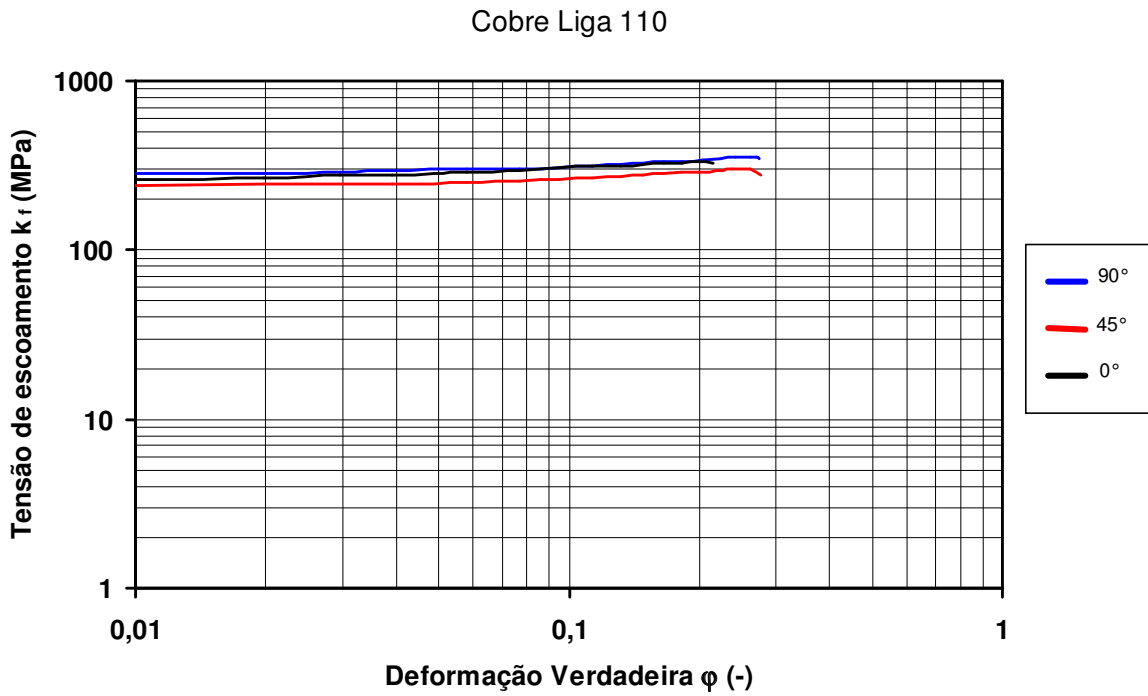


Fig. 4.23. Gráfico com eixos com divisão logarítmica

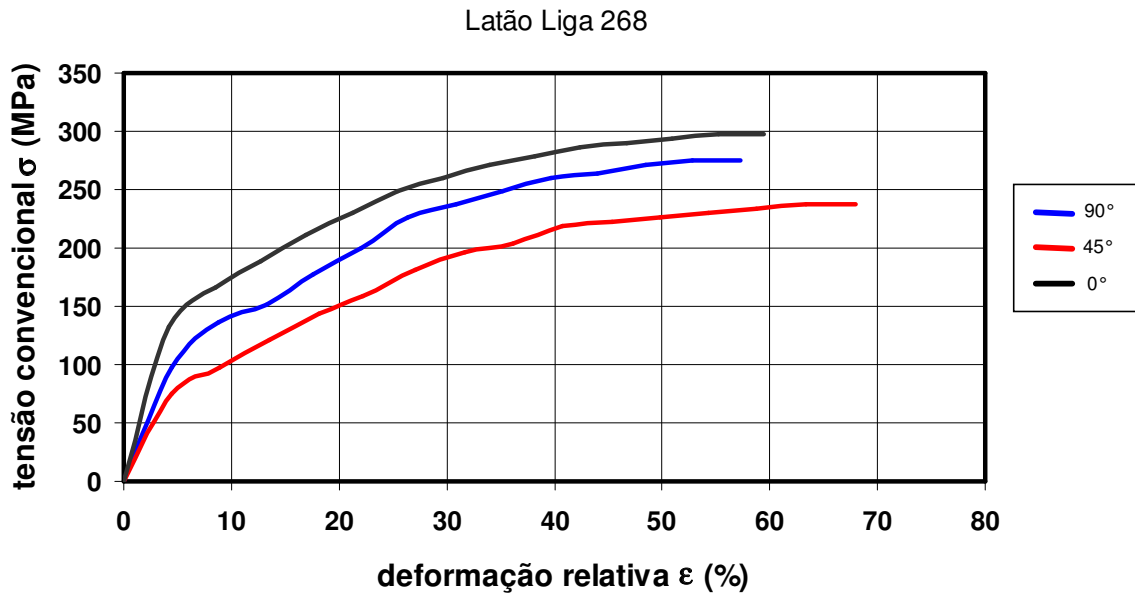


Fig.4.24. Gráfico tensão convencional σ x deformação relativa ϵ

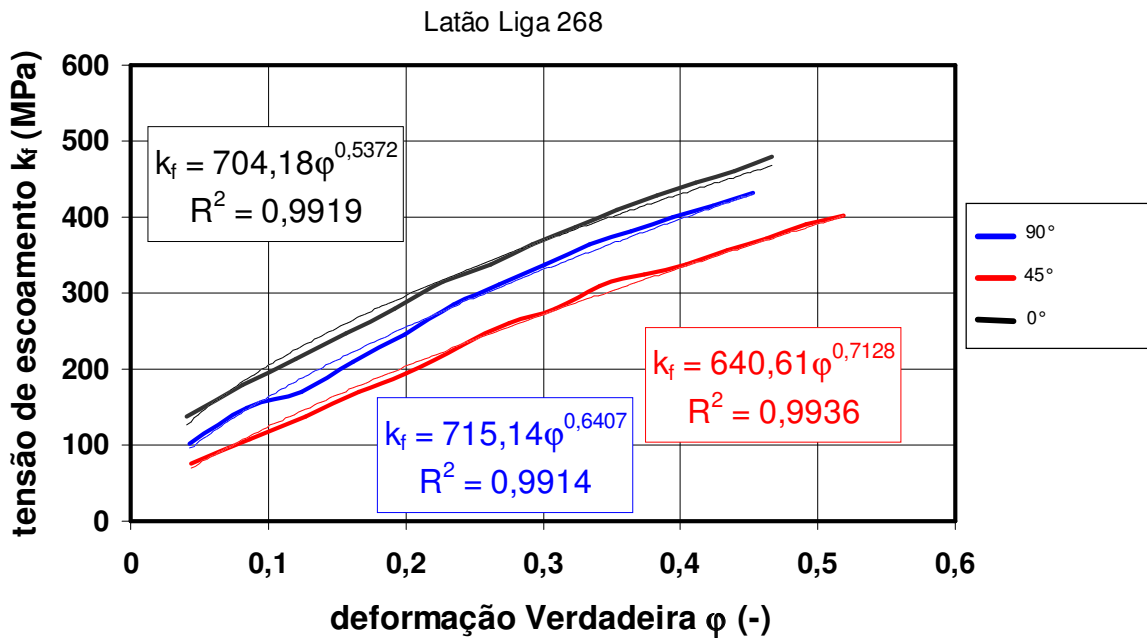


Fig. 4.25. Gráfico tensão de escoamento k_f x deformação verdadeira ϕ

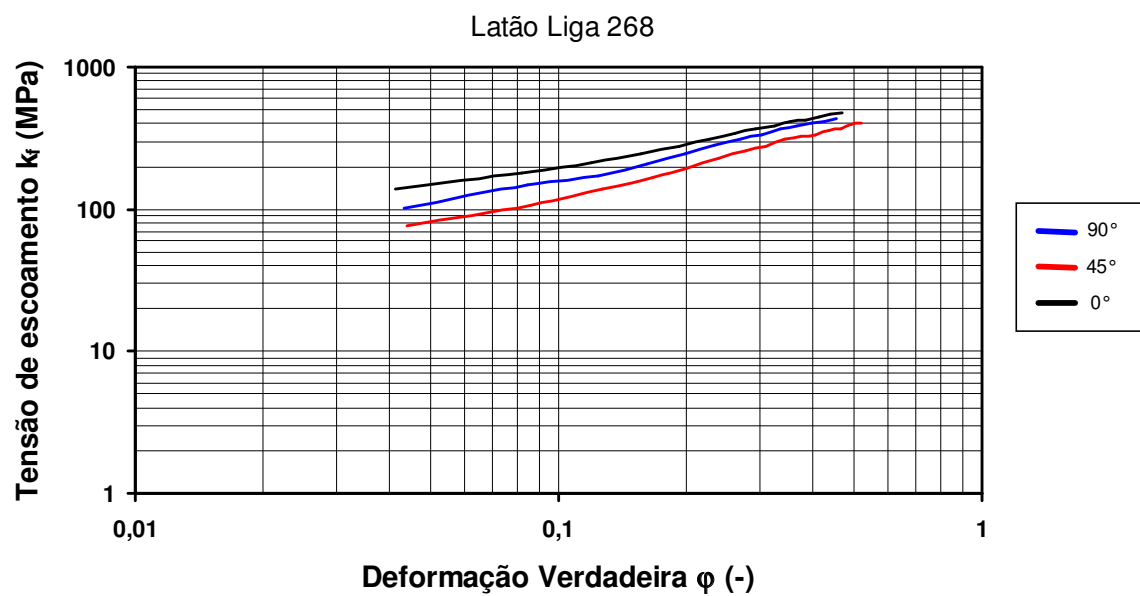


Fig. 4.26. Gráfico com eixos com divisão logarítmica

5- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é feita uma análise e discussão com os dados dos fabricantes dos materiais, dados obtidos nos ensaios mecânicos e com referências bibliográficas.

5.1- Ensaios metalográficos

Os resultados dos ensaios metalográficos obtidos são comparados e analisados com os dados dos fabricantes, dados do resultado dos ensaios com base na referência bibliográfica / 8.40 /. Os dados estão apresentados na tabela 5.1. Os espaços em branco significa que os valores não foram fornecidos.

Tabela 5.1- Tamanho de grão: Fornecedor vs.Resultado do ensaio

Material	AISI 304	AISI 430	AÇO EP	Al 3104-0	Cu L 110	Latão 268
Fabricante	-	-	-	ASTM 7	0,020 mm a 0,025 mm	0,040 mm
Ensaio	ASTM 7 e 8	ASTM 10	ASTM 9 e 10	ASTM 7	0,025 mm	0,05 mm

De acordo com a referência bibliográfica /41/ o tamanho de grão para o aço AISI 304 deve ser maior que 7 ASTM., e o tamanho de grão para o aço AISI 430 é de 7 ASTM.

O tamanho de grão tem uma grande influência na estampagem. Um tamanho de grão de ASTM 7 a 10 apresenta uma excelente estampabilidade. À medida que o tamanho de grão aumenta acima destes valores a capacidade de estampabilidade diminui. No caso do latão liga 268 mole, apesar da grande capacidade de estiramento, a sua estampabilidade torna-se difícil devido ao elevado tamanho de grão.

5.2- Dureza

Os valores de dureza dos materiais analisados são compatíveis com os valores apresentados pelos fabricantes e de outras referências bibliográficas.

Tabela 5.2-Dureza: Fornecedor vs. Resultado do ensaio

Material	AISI 304	AISI 430	AÇO EP	Al 3104-0	Cu L 110	Latão 268
Fabricante	85 HBR	80 HBR	-	45 HB	65 RF	58-78 RB
Ensaio	165,8 HV 156 HB	179 HV 170 HB	76,6HV 72 HB	45 HB	71,6 HB	43,4 HB

De acordo com a Ref. Bibl. / 6 /, a dureza do cobre varia de 45 a 105 HB. Segundo a Ref. Bibl. /6 /, o latão apresenta uma dureza que varia de 65 a 165 HB, conforme o teor de liga.

5.3- Propriedades mecânicas.

Os dados referentes às propriedades mecânicas, Limite de resistência (R_m), Limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$), Alongamento (A), índice de encruamento (n), constante C de Hollomon Ludwik e Tensão de escoamento inicial (k_{fo}) resultantes dos ensaios mecânicos e os valores da propriedades fornecidos pelos fabricantes da matéria prima estão relacionados nas tabelas a seguir. Para comparar os resultados, também são fornecidos valores de referências bibliográficas

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado do ensaio.

AISI 304	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A(50mm)%	n	C(MPa)	k_{fo} (MPa)
Fabricante	700	300	54	-	-	-
Ensaio	630	271	59	0,357	1.198	282,5

A referência bibliográfica /38 /, para velocidade de deformação $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, o valor médio de 0° , 45° , 90° apresenta os seguintes valores $R_m = 644,3 \text{ MPa}$; $R_{p0,2} = 272,4 \text{ MPa}$. Para uma velocidade de deformação de $9 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$, apresenta os valores de $R_m = 616,5 \text{ MPa}$ e $R_{p0,2} = 312,7 \text{ MPa}$.

Na referencia bibliográfica /12 / para o aço inoxidável normal apresenta os valores $R_m = 658 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 287 \text{ MPa}$ e $A = 55,6 \%$

Na referência /30 / o aço inox normal com 18% de cromo apresenta $R_m = 663 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 272 \text{ MPa}$ e $A = 57\%$.

Na referência /41 /, através da curva Tensão x deformação relativa para o aço inox AISI 304 o valor de $R_m = 700 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 260 \text{ MPa}$ e $A = 49\%$

O aço inox X5CrNi18.10, referência /12/ apresenta: $R_m = 642 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 321 \text{ MPa}$, $A = 49,9\%$ e $n = 0,40$

Tabela 5.4. Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado do ensaio

AISI430	$R_m(\text{MPa})$	$R_{p0,2}(\text{MPa})$	A(50mm) %	n	C (MPa)	$K_{fro}(\text{MPa})$
Fabricante	480	330	27	-	-	-
Ensaio	494	320,5	28	0,183	513	349

Na referência /42 /, no gráfico Tensão convencional x deformação relativa para o aço inox AISI 430 apresenta os seguintes valores: $R_m = 490 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 310 \text{ MPa}$ e $A = 28\%$

Tabela5.5- Propriedades mecânicas;Fornecedor vs. Resultado do ensaio

Aço EP	$R_m(\text{MPa})$	$R_{p0,2}(\text{MPa})$	A(50mm)%	n	C(MPa)	$K_{fo}(\text{MPa})$
Fabricante	270 a 330	140 a 200	38	-	-	-
Ensaio	305	158	50	0,261	406	122

Para o aço EP NBR 5915, a referência /43 /, apresenta os seguintes valores: $R_m = 370 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 200 \text{ MPa}$ e $A = 34\%$ (80mm).

A referência /10 /e /12 /, norma DIN St 12,equivalente à norma NBR 5915 EP, fornece os valores: $R_m = 325 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 227 \text{ MPa}$ e $A = 40\%$, obtidos pela média ponderada a 0° , 45° , 90° em relação ao sentido de laminação com peso 2 no sentido de 45° .

Na referência / 7 /, os valores de C e n , para o aço 1006 com porcentagem de carbono próxima ao aço EP analisado (0,056% de C.) são; $C = 618 \text{ MPa}$ e $n = 0,31$.

De acordo com a norma DIN 1541- aço St12 apresenta os valores $R_m = 270 \text{ a } 410 \text{ MPa}$ e $R_{p0,2} = 260 \text{ MPa}$.

Tabela 5.6–Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado do ensaio

Al-3104	Rm(MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A(50mm)	n	C(MPa)	k _{fo} (MPa)
Fabricante	178	79	17	-	-	-
Ensaio	212	97	19	0,233	513	177,5

Na referência /43 /, para a liga de alumínio com 99,5% de Al, que pode servir de referência para a liga analisada apresenta os valores: C = 150 MPa e n = 0,222. Para a liga 99,4%, laminado a frio e recozido a 200°C, referência /7 /, apresenta : C = 174 MPa e n = 0,304.

Tabela 5.7- Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado do ensaio

Cu-L 110	Rm(MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A(50mm)%	n	C(MPa)	k _{fo} (MPa)
Fabricante	200 a 250	80	45	-	-	-
Ensaio	259	250	29	0,076	346	249,5

Para a liga CDA 110 laminado e recozido a 400°C, referência / 7 /, apresenta os valores: C = 372 MPa e n = 0,057. A referência / 6 /, fornece os seguintes valores: Rm = 220 a 450 MPa, R_{p0,2} = 50 a 350 MPa e A = 6 a 48 %.

Tabela 5.8- Propriedades mecânicas: Fornecedor vs. Resultado do ensaio

Latão 268	Rm(MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A(50mm)%	n	C (MPa)	k _{fo} (MPa)
Fabricante	360	130	55	-	-	-
Ensaio	262	64	66	0,650	675	99

A referência / 6 / para o cobre liga 268 fornece os seguintes dados: Rm = 340 a 860 MPa, R_{p0,2} = 130 a 550 MPa e A = Até 60%.

5.4- Anisotropia dos materiais.

A tabela 5.9 apresenta os resultados da anisotropia média (r_m) e a anisotropia planar (Δr).

Tabela 5.9 –Anisotropia do material analisado

Material	AISI 304	AISI 430	Aço EP	Al.-3104	Cobre 110	Latão 268
r_m	0,991	0,959	1,856	0,763	0,689	0,841
Δr	-0,283	0,343	0,549	-0,081	0,192	-0,030

Não temos dados referentes à anisotropia média e planar das amostras fornecidas pelos fabricantes das chapas metálicas analisadas e nas referências bibliográficas citadas também não temos referências da anisotropia média e planar dos materiais analisados. Analisando os dados da tabela 5.9 e a figura 4.7 verifica-se que: O aço inox AISI 304, Al liga 3104-0 e o Latão 268, a anisotropia é negativa ($\Delta r < 0$), ocasionando um orelhamento próximo de 45°. Na figura 4.7, o orelhamento produzido no alumínio e o latão não é perceptível devido ao baixo valor da anisotropia planar. Para o aço inox AISI 304 é bem visível.

No caso do Inox 430, Aço EP e do cobre liga 110 o resultado da anisotropia é positiva ($\Delta r > 0$), produzindo um orelhamento entre 0° e 90°. Na figura 4.7 o orelhamento produzido no aço inox AISI 430 e aço EP é bem visível, enquanto que no cobre não tem muita influência devido ao baixo valor da anisotropia planar.

5.5- Limite Razão de Estampagem.

Ao comparar os resultados de estampagem obtidos na tabela 4.3 verifica-se que os resultados se aproximam de outros ensaios de materiais similares como, o aço inox, o aço EEP e o alumínio, apresentados nas referências / 30 /, /31 / e / 32 /.

Os valores do Limite Razão de Estampagem (β), no ensaio de estampagem profunda com punção cilíndrico apresenta valores próximos ou iguais se comparados com os valores de β para aço inox 304, aço EEP e alumínio. conforme as referências / 30 / e / 32 /.

Analisando o gráfico da figura 4.8, do capítulo anterior, verifica-se que:

- Para o aço EP o valor de $\beta = 2,2$, considerando um grau médio de estiramento é maior do que $\beta = 2,0$, se considerado apenas estampagem profunda. O mesmo fato ocorre para o aço inox AISI 304.
- Para o aço inox AISI 430 e o cobre liga 110 apresentam o mesmo valor de β para estampagem profunda e apresentando uma leve resistência ao estiramento.
- O latão apresenta um $\beta = 1,9$ considerando um estiramento médio, maior do que $\beta = 1,8$, considerando apenas estampagem profunda.
- O alumínio apresenta uma resistência ao estiramento praticamente zero e o Limite Razão de Estampagem $\beta = 1,8$.

Na análise do gráfico da figura 4.8, verifica-se que nas seis amostras analisadas o valor de β devido ao fenômeno de estiramento e/ou estampagem diminui à medida que aumenta o estiramento.

Através da tabela 5.10 a seguir é possível comparar os valores do Limite Razão de estampagem envolvendo somente estampagem profunda e o valor de β devido ao fenômeno de estiramento e/ou estampagem profunda.

Tabela 5.10- Limite Razão de Estampagem β

Material	Inox 304	Inox 430	Aço EP	Al 3104-0	Cu 110	Latão 268
β (est. profunda)	2,0	1,9	2,0	1,8	1,9	1,8
β (estiramento e/ou est. prof.)	2,1	1,9	2,2	< 1,8	1,9	1,9

A referência bibliográfica / 30 / fornece o valor de β para materiais como o aço inox normal ($\beta = 2,0$), aço EEP ($\beta = 2,0$) e alumínio ($\beta = 1,8$), que são materiais com composição química básica similar a dos materiais analisados, aço inox AISI 304, aço EP e Al liga 3104-0.

6- CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo proposto, que consiste em desenvolver uma metodologia de trabalho, para determinar as propriedades mecânicas do material de uma chapa metálica, verificando se correspondem com as propriedades fornecidas pelo fabricante.

Com relação aos materiais analisados conclui-se que:

1º) -As propriedades mecânicas tais como: Dureza do material, análise metalográfica, limite de resistência (R_m), limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$) e alongamento(A). Os dados obtidos nos ensaios estão de acordo com os dados fornecidos pelos fabricantes e referências bibliográficas apresentadas nos pontos 5.1, 5.2 e 5.3 no capítulo 5.

2º)-Referente às propriedades mecânicas: Índice de encruamento do material(n), constante C da equação Hollomon e Ludwik, tensão de escoamento inicial (k_{f0}), anisotropia média (r_m) e anisotropia planar(Δr), os fabricantes não forneceram os dados. Os resultados obtidos e valores de algumas referencias bibliográficas ,se encontram nos itens 5.3 e 5.4 no capítulo 5.

3º) –Com relação ao Limite Razão de Estampagem (β), também não temos referências dos fabricantes. Para materiais similares do inox AISI 304, aço EP e Al a referência / 30/, apresenta valores que podem ser comparados aos resultados obtidos no ensaio. Os resultados dos ensaios do Limite Razão de Estampagem são apresentados no item 5.5 do capítulo 5.

4º) -Analisando os materiais sob o efeito da conformabilidade simultâneo dos fenômenos de estiramento e/ou da estampagem profunda verifica-se que para o aço inox AISI.304 $\beta = 2,1$ com um grau médio de estiramento. $\beta = 2,2$ para o aço EP indicando um grau de estiramento devido ao punção hemisférico. Para o latão liga 268 $\beta = 1,9$ com leve estiramento devido ao punção elipse rasa. Para o inox. AISI 430 e cobre liga 110, apresentam $\beta = 1,9$ com um leve estiramento, também devido ao punção elipse rasa. O alumínio mostra que apresenta resistência ao estiramento próxima de zero. Em todos os materiais verifica-se que o Limite Razão de Estampagem β reduz com o aumento do estiramento.

De acordo com os resultados dos ensaios mecânicos realizados e dos laudos técnicos emitidos pelos fabricantes conclui-se que as propriedades analisadas dividem-se em dois grupos:

1º Grupo: Propriedades cujos valores são fornecidos pelo laudo técnico do fabricante: Limite de resistência (R_m), Limite convencional de escoamento ($R_{p0,2}$), Alongamento (A), Dureza e Tamanho de Grão.

2º Grupo: Propriedades mecânicas cujos valores não são fornecidos pelo laudo técnico do fabricante: Índice de encruamento (n), constante C , tensão de escoamento inicial (k_{f0}), anisotropia média (r_m), anisotropia planar (Δr) e Limite Razão de Estampagem (β).

No 1º grupo os valores fornecidos pelos fabricantes estão em consonância com os dados obtidos nos ensaios mecânicos e referências bibliográficas.

No 2º grupo, apesar de não existirem dados dos fabricantes e referências bibliográficas, servem de referências para trabalhos posteriores.

7- ANEXOS

7.1- Anexo 1

O anexo 1, refere-se às tabelas compiladas a partir do ensaio de tração, onde consta a deformação relativa ϵ , o grau de deformação ϕ , a força aplicada, a área da secção inicial A_0 , a área deformada instantânea A_1 e o valor da tensão de escoamento k_f . Apresenta também a tabela da tensão convencional $\sigma \times \epsilon$ e a tensão de escoamento $k_f \times \phi$. Estas tabelas foram utilizadas para construir os gráficos apresentados no ítem 4.7 do capítulo 4.

Tabela - 7.1.1

Aço Inox AISI 304- 0º (Longitudinal) espessura: 0,72mm, largura: 18,85mm							
N.º	ε (%)	φ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm²)	A1 (mm²)	Kf (N/mm²)
1	0,2	0,00199	18	3531,6	13,5	13,47	262,18
2	1	0,00995	19	3727,8	13,5	13,40	277,41
3	2	0,0198	21	4120,2	13,5	13,30	309,65
4	3	0,029558	2,5	4414,5	13,5	13,20	335,02
5	4	0,03922	24	4708,8	13,5	13,00	360,82
6	6	0,05827	26	5101,2	13,5	12,80	398,41
7	8	0,07696	28	5493,6	13,5	12,50	437,15
8	10	0,09531	30	5886	13,5	12,30	477,05
9	12	0,11333	32	6278,4	13,5	12,10	518,11
10	14	0,13103	33,5	6572,7	13,5	11,90	552,08
11	16	0,14842	34,5	6768,9	13,5	11,70	578,54
12	18	0,16551	36	7063,2	13,5	11,50	614,1
13	20	0,18232	37	7259,4	13,5	11,30	641,85
14	25	0,22314	39	7651,8	13,5	10,80	704,74
15	30	0,26236	41	8044,2	13,5	10,40	770,52
16	35	0,3001	42	8240,4	13,5	10,00	819,66
17	40	0,33647	43,5	8534,7	13,5	9,70	880,38
18	45	0,37156	44	8632,8	13,5	9,40	922,3
19	50	0,40546	44,5	8130,9	13,5	9,00	964,95
20	52	0,41871	45	8829	13,5	8,90	988,8
21	55	0,43825	44,5	8730,9	13,5	8,70	997,12
22	57	0,45107	43	8436,6	13,5	8,60	975,94
tensão convencional vs. Deformação relativa				tensão de escoamento vs. Def. real			
F(N)	Ao (mm²)	ε (%)	σ(N/mm²)	φ (-)	Kf(N/mm²)		
3531,6	13,5	0,2	261,600	0,00199	262,18		
3727,8	13,5	1	276,133	0,00995	277,41		
4120,2	13,5	2	305,200	0,0198	309,65		
4414,5	13,5	3	327,000	0,029558	335,02		
4708,8	13,5	4	348,800	0,03922	360,82		
5101,2	13,5	6	377,867	0,05827	398,41		
5493,6	13,5	8	406,933	0,07696	437,15		
5886	13,5	10	436,000	0,09531	477,05		
6278,4	13,5	12	465,067	0,11333	518,11		
6572,7	13,5	14	486,867	0,13103	552,08		
6768,9	13,5	16	501,400	0,14842	578,54		
7063,2	13,5	18	523,200	0,16551	614,1		
7259,4	13,5	20	537,733	0,18232	641,85		
7651,8	13,5	25	566,800	0,22314	704,74		
8044,2	13,5	30	595,867	0,26236	770,52		
8240,4	13,5	35	610,400	0,3001	819,66		
8534,7	13,5	40	632,200	0,33647	880,38		
8632,8	13,5	45	639,467	0,37156	922,3		
8730,9	13,5	50	646,733	0,40546	964,95		
8829	13,5	52	654,000	0,41871	988,8		
8730,9	13,5	55	646,733	0,43825	997,12		
8436,6	13,5	57	624,933				

Tabela - 7.1.2

Aço Inox AISI 304- 45° (diagonal), espessura: 0,72mm, largura: 18,90mm							
N.º	ε (%)	φ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm²)	A1 (mm²)	Kf (N/mm²)
1	0,2	0,00199	19	3727,8	13,6	13,57	274,70
2	1	0,00995	20	3924	13,6	13,50	291,24
3	2	0,0198	22	4316,4	13,6	13,40	323,54
4	3	0,02956	23	4515,6	13,6	13,20	341,56
5	4	0,03922	24	4708,8	13,6	13,10	359,87
6	5	0,04879	25	4905	13,6	12,90	378,47
7	6	0,05827	26,5	5199,3	13,6	12,80	405
8	8	0,07696	28,5	5591,7	13,6	12,60	443,78
9	10	0,09531	30	5886	13,6	12,40	475,79
10	12	0,11333	31,5	6108,3	13,6	12,20	508,66
11	14	0,13103	32,5	6376,5	13,6	11,90	534,18
12	16	0,14842	33,5	6572,7	13,6	11,70	560,28
13	18	0,16551	35	6867	13,6	11,50	595,46
14	20	0,18232	36	7063,2	13,6	11,30	622,85
15	25	0,22314	37,5	7357,5	13,6	10,90	675,84
16	30	0,26236	39	7651,8	13,6	10,50	730,99
17	35	0,3001	40,5	7946,1	13,6	10,10	788,3
18	40	0,33647	41,5	8142,3	13,6	9,70	837,68
19	45	0,37156	42	8240,8	13,6	9,40	878,05
20	50	0,40546	42,5	8338,5	13,6	9,10	919,15
21	55	0,43825	43	8436,5	13,6	8,80	960,96
22	57	0,45107	43	8338,5	13,6	8,60	973,36
23	59	0,46373	43	8436,6	13,6	8,50	985,75
tensão convencional vs. Deformação relativa					tensão de escoamento vs. Def. real		
F(N)	Ao (mm²)	ε (%)	σ (N/mm²)		φ (-)	Kf (N/mm²)	
3727,8	13,6	0,2	274,10		0,00199		274,70
3924	13,6	1	288,53		0,00995		291,24
4316,4	13,6	2	317,38		0,0198		323,54
4515,6	13,6	3	332,03		0,02956		341,56
4708,8	13,6	4	346,24		0,03922		359,87
4905	13,6	5	360,66		0,04879		378,47
5199,3	13,6	6	382,30		0,05827		405
5591,7	13,6	8	411,15		0,07696		443,78
5886	13,6	10	432,79		0,09531		475,79
6108,3	13,6	12	449,14		0,11333		508,66
6376,5	13,6	14	468,86		0,13103		534,18
6572,7	13,6	16	483,29		0,14842		560,28
6867	13,6	18	504,93		0,16551		595,46
7063,2	13,6	20	519,35		0,18232		622,85
7357,5	13,6	25	540,99		0,22314		675,84
7651,8	13,6	30	562,63		0,26236		730,99
7946,1	13,6	35	584,27		0,3001		788,3
8142,3	13,6	40	598,70		0,33647		837,68
8240,8	13,6	45	605,94		0,37156		878,05
8338,5	13,6	50	613,13		0,40546		919,15
8436,5	13,6	55	620,33		0,43825		960,96

Tabela - 7.1.3

Aço Inox AISI 304- 90° (transversal), espessura: 0,72mm, largura: 18,90mm							
N.º	ε (%)	φ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm²)	A1 (mm²)	Kf (N/mm²)
1	0,2	0,00199	19	3728	13,6	13,57	274,70
2	1	0,00995	20	3924	13,6	13,5	291,24
3	2	0,0198	21,5	4218,3	13,6	13,3	316,18
4	3	0,02956	22,5	4414,5	13,6	13,2	334,13
5	4	0,03922	24	4708,8	13,6	13,1	359,87
6	5	0,04879	25	4905	13,6	12,9	378,47
7	6	0,05827	26	5101,2	13,6	12,8	397,36
8	8	0,07696	27	5297,4	13,6	12,6	420,43
9	10	0,09531	29	5689,8	13,6	12,4	459,93
10	12	0,11333	30	5886	13,6	12,2	487,44
11	14	0,13103	31,5	6180,3	13,6	11,9	517,75
12	16	0,14842	32,5	6376,5	13,6	11,7	543,56
13	18	0,16551	33,5	6572,7	13,6	11,5	569,94
14	20	0,18232	34,5	6768,9	13,6	11,3	596,9
15	25	0,22314	36,5	7161,3	13,6	10,9	657,82
16	30	0,26236	38	7455,6	13,6	10,5	712,25
17	35	0,3001	40	7848	13,6	10,1	778,57
18	40	0,33647	41	8044,2	13,6	9,7	827,59
19	45	0,37156	42	8240,4	13,6	9,4	878,05
20	50	0,40546	42,5	8338,5	13,6	9,1	919,14
21	55	0,43825	43	8436,6	13,6	8,8	960,96
22	60	0,47	43,5	8534,7	13,6	8,5	1003,5
23	62	0,48242	43,5	8534,7	13,6	8,4	1016,03
tensão convencional vs. Deformação relativa				tensão de escoamento vs. Def. real			
F(N)	Ao (mm²)	ε (%)	σ (N/mm²)	φ (-)	Kf (N/mm²)		
3728	13,6	0,2	274,12	0,00199	274,70		
3924	13,6	1	288,53	0,00995	291,24		
4218,3	13,6	2	310,17	0,0198	316,18		
4414,5	13,6	3	324,60	0,02956	334,13		
4708,8	13,6	4	346,24	0,03922	359,87		
4905	13,6	5	360,66	0,04879	378,47		
5101,2	13,6	6	375,09	0,05827	397,36		
5297,4	13,6	8	389,51	0,07696	420,43		
5689,8	13,6	10	418,37	0,09531	459,93		
5886	13,6	12	432,79	0,11333	487,44		
6180,3	13,6	14	454,43	0,13103	517,75		
6376,5	13,6	16	468,86	0,14842	543,56		
6572,7	13,6	18	483,29	0,16551	569,94		
6768,9	13,6	20	497,71	0,18232	596,9		
7161,3	13,6	25	526,57	0,22314	657,82		
7455,6	13,6	30	548,21	0,26236	712,25		
7848	13,6	35	577,06	0,3001	778,57		
8044,2	13,6	40	591,49	0,33647	827,59		
8240,4	13,6	45	605,91	0,37156	878,05		

Tabela 7.1.4

Aço Inox AISI 430- 0º (Longitudinal) espessura: 0,70mm, largura: 18,61mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	K(f) N/mm ²
1	0,2	0,00199	21	4120	13	12,97	317,70
2	1	0,00995	22,5	4414,5	13	12,90	342,26
3	2	0,0198	24,5	4806,9	13	12,70	376,37
4	3	0,029558	26	5101,2	13	12,60	403,33
5	4	0,03922	27,5	5395,5	13	12,50	430,74
6	5	0,04879	28	5493,6	13	12,40	442,79
7	6	0,05827	29	5689,8	13	12,30	462,97
8	8	0,07696	30	5886	13	12,00	487,97
9	10	0,09531	31	6082,2	13	11,80	513,58
10	12	0,11333	31,5	6180,2	13	11,60	531,35
11	14	0,13103	32	6278,4	13	11,40	549,42
12	16	0,14842	32,5	6376,5	13	11,20	567,8
13	18	0,16551	32,5	6376,5	13	11,00	577,59
14	20	0,18232	32,5	6376,5	13	10,80	587,38
15	25	0,22314	32	6278,4	13	10,40	602,44
16	27,5	0,24294	31	6082,2	13	10,20	595,28
17	30	0,26236	28,5	5591,7	13	10,00	558,01
18	31	0,27003	24	4708,8	13	9,90	473,52

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
4120	13	0,2	316,92
4414,5	13	1	339,58
4806,9	13	2	369,76
5101,2	13	3	392,40
5395,5	13	4	415,04
5493,6	13	5	422,58
5689,8	13	6	437,68
5886	13	8	452,77
6082,2	13	10	467,86
6180,2	13	12	475,40
6278,4	13	14	482,95
6376,5	13	16	490,50
6376,5	13	18	490,50
6376,5	13	20	490,50
6278,4	13	25	482,95
6082,2	13	27,5	467,86
5591,7	13	30	430,13
4708,8	13	31	362,22

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	317,70
0,00995	342,26
0,0198	376,37
0,029558	403,33
0,03922	430,74
0,04879	442,79
0,05827	462,97
0,07696	487,97
0,09531	513,58
0,11333	531,35
0,13103	549,42
0,14842	567,8
0,16551	577,59
0,18232	587,38
0,22314	602,44

Tabela 7.1.5

Aço Inox AISI 430- 45º(Diagonal) espessura: 0,70mm, largura: 18,65mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	21	4120	13	12,97	317,70
2	1	0,00995	23	4512,6	13	12,90	349,11
3	2	0,0198	25	4905	13	12,80	383,23
4	3	0,02956	27	5297,4	13	12,60	417,95
5	4	0,03922	28	5493,6	13	12,50	437,63
6	5	0,04879	29	5689,8	13	12,40	457,62
7	6	0,05827	30	5886	13	12,30	477,91
8	8	0,07696	31	6082,2	13	12,10	503,16
9	10	0,09531	31,5	6180,3	13	11,80	520,74
10	12	0,11333	32	6278,4	13	11,60	538,63
11	16	0,14842	32,5	6376,5	13	11,20	566,58
12	20	0,18232	32,5	6376,5	13	10,80	586,12
13	22	0,19885	32,5	6376,5	13	10,70	595,88
14	24	0,24511	32	6278,4	13	10,50	596,34
15	26	0,23111	31,5	6180,3	13	10,30	596,49
16	27	0,23902	29	5689,8	13	10,20	553,51
17	28	0,24686	25	4905	13	10,20	480,91

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
4120	13	0,2	316,92
4512,6	13	1	347,12
4905	13	2	377,31
5297,4	13	3	407,49
5493,6	13	4	422,58
5689,8	13	5	437,68
5886	13	6	452,77
6082,2	13	8	467,86
6180,3	13	10	475,41
6278,4	13	12	482,95
6376,5	13	16	490,50
6376,5	13	20	490,50
6376,5	13	22	490,50
6278,4	13	24	482,95
6180,3	13	26	475,41
5689,8	13	27	437,68
4905	13	28	377,31

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	317,70
0,00995	349,11
0,0198	383,23
0,02956	417,95
0,03922	437,63
0,04879	457,62
0,058268	477,91
0,07696	503,16
0,09531	520,74
0,11333	538,63
0,14842	566,58
0,18232	586,12
0,19885	595,88
0,21511	596,34
0,23111	596,49

Tabela 7.1.6

Aço Inox AISI 430- 90º (transversal), espessura: 0,70mm, largura: 18,63mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	22	4316,4	13	12,97	332,80
2	1	0,00995	24	4708,8	13	12,90	364,68
3	2	0,0198	25	4905	13	12,80	383,64
4	3	0,02956	26,5	5199,3	13	12,60	410,65
5	4	0,03922	28	5493,6	13	12,50	438,1
6	5	0,04879	29	5689,8	13	12,40	458,11
7	6	0,05827	30	5886	13	12,30	478,42
8	8	0,07696	31	6082,2	13	12,10	502,7
9	10	0,09531	32	6278,4	13	11,80	529,58
10	12	0,11333	32,5	6376,5	13	11,60	547,62
11	14	0,13103	33	6474,6	13	11,40	565,98
12	16	0,14842	33,5	6572,7	13	11,20	584,64
13	20	0,18232	33	6474,6	13	10,80	595,77
14	24	0,21511	32,5	6376,5	13	10,50	606,3
15	26	0,23111	32	6278,4	13	10,30	606,61
16	28	0,24686	31,5	6180,3	13	10,20	606,61
17	29	0,25464	30	5886	13	10,10	582,23
18	30	0,26236	27	5297,4	13	10,00	528,07

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	(N/mm ²)
4316,4	13	0,2	332,03
4708,8	13	1	362,22
4905	13	2	377,31
5199,3	13	3	399,95
5493,6	13	4	422,58
5689,8	13	5	437,68
5886	13	6	452,77
6082,2	13	8	467,86
6278,4	13	10	482,95
6376,5	13	12	490,50
6474,6	13	14	498,05
6572,7	13	16	505,59
6474,6	13	20	498,05
6376,5	13	24	490,50
6278,4	13	26	482,95
6180,3	13	28	475,41
5886	13	29	452,77
5297,4	13	30	407,49

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	332,80
0,00995	364,68
0,0198	383,64
0,02956	410,65
0,03922	438,1
0,04879	458,11
0,05827	478,42
0,07696	502,7
0,09531	529,58
0,11333	547,62
0,13103	565,98
0,14842	584,64
0,18232	595,77
0,21511	606,3
0,23111	606,61

Tabela 7.1.7

Aço EP, 0º (longitudinal), largura 19,34mm; espessura 0,94mm							
N.º	ε (%)	φ (-)	F (mm)	F (N)	Ao (mm²)	A1 (mm²)	Kf (N/mm²)
1	0,2	0,00199	28	2746,8	18,2	18,14	151,40
2	1	0,00995	31	3041,1	18,2	18,00	168,95
3	2	0,0198	36	3531,6	18,2	17,80	198,15
4	3	0,02956	40	3924	18,2	17,60	222,32
5	4	0,03922	42	4120,2	18,2	17,50	235,7
6	5	0,04879	45	4414,5	18,2	17,30	254,97
7	6	0,05827	47	4855,9	18,2	17,10	268,84
8	7	0,06766	48	4708,8	18,2	16,90	277,15
9	8	0,07696	49,5	4855,9	18,2	16,80	288,48
10	9	0,08618	51	5003,1	18,2	16,70	299,97
11	10	0,09531	51,5	5052,2	18,2	16,50	305,69
12	12	0,11333	52,5	5450,2	18,2	16,20	317,29
13	14	0,13103	53,5	5248,3	18,2	15,90	329,11
14	16	0,14842	54	5297,4	18,2	15,70	338,02
15	20	0,18232	54,5	5346,4	18,2	15,10	352,9
16	22,5	0,20294	55	5395,5	18,2	14,80	363,56
17	25	0,22314	55	5395,5	18,2	14,50	370,98
18	27,5	0,24294	55	5395,5	18,2	14,20	378,4
19	30	0,26236	55	5395,5	18,2	13,90	385,82
20	35	0,3001	55	5395,5	18,2	13,40	400,66
21	40	0,33647	54	5297,4	18,2	13,00	407,74
22	45	0,37156	53,5	5248,3	18,2	12,50	418,39
tenção convencional vs deformação relativa				tenção de escoamento vs. Def. real			
F (N)	Ao (mm²)	ε (%)	σ (N/mm²)	φ (-)	Kf (N/mm²)		
2746,8	18,2	0,2	150,92	0,00199	151,40		
3041,1	18,2	1	167,09	0,00995	168,95		
3531,6	18,2	2	194,04	0,0198	198,15		
3924	18,2	3	215,60	0,02956	222,32		
4120,2	18,2	4	226,38	0,03922	235,7		
4414,5	18,2	5	242,55	0,04879	254,97		
4610,7	18,2	6	253,34	0,05827	268,84		
4708,8	18,2	7	258,73	0,06766	277,15		
4855,9	18,2	8	266,81	0,07696	288,48		
5003,1	18,2	9	274,90	0,08618	299,97		
5052,2	18,2	10	277,59	0,09531	305,69		
5150,2	18,2	12	282,98	0,11333	317,29		
5248,3	18,2	14	288,37	0,13103	329,11		
5297,4	18,2	16	291,07	0,14842	338,02		
5346,4	18,2	20	293,76	0,18232	352,9		
5395,5	18,2	22,5	296,46	0,20294	363,56		
5395,5	18,2	25	296,46	0,22314	370,98		
5395,5	18,2	27,5	296,46	0,24294	378,4		
5395,5	18,2	30	296,46	0,26236	385,82		
5395,5	18,2	35	296,46	0,3001	400,66		
5297,4	18,2	40	291,07	0,33647	407,74		
5248,3	18,2	45	288,37	0,37156	418,39		

Tabela 7.1.8

Aço EP 45° (Diagonal), largura 19,35mm; espessura 0,94mm							
N.º	ε (%)	φ (-)	F (mm)	F (N)	Ao (mm²)	A1 (mm²)	Kf (N/mm²)
1	0,2	0,00199	31	3041	18,19	18,15	167,50
2	1	0,00995	34	3335,4	18,19	18,00	185,20
3	2	0,0148	38,5	3776,8	18,19	17,80	211,79
4	3	0,02955	41,5	4071,1	18,19	17,60	230,54
5	4	0,03922	45	4414,5	18,19	17,50	252,41
6	5	0,04879	47,5	4659,7	18,19	17,30	268,99
7	6	0,05872	49	4806,9	18,19	17,10	280,13
8	7	0,06766	51	5003,1	18,19	16,90	294,31
9	8	0,07696	52	5101,2	18,19	16,80	302,89
10	9	0,08617	53,5	5248,3	18,19	16,70	314,51
11	10	0,09531	54	5297,4	18,19	16,50	320,36
12	11	0,10436	54,5	5346,4	18,19	16,40	326,27
13	12	0,11332	55	5395,5	18,19	16,20	332,23
14	14	0,13103	56	5493,6	18,19	15,90	344,31
15	16	0,14842	57	5591,7	18,19	15,70	356,61
16	18	0,16551	57,5	5640,7	18,19	15,40	365,94
17	20	0,18232	57,5	5640,7	18,19	15,10	372,14
18	25	0,22314	57,5	5640,7	18,19	14,50	387,64
19	30	0,26236	57	5591,7	18,19	13,90	399,65
20	35	0,3001	57	5591,7	18,19	13,50	415,02
21	40	0,33647	56,5	5542,6	18,19	13,00	426,83
22	45	0,37156	55	5395,5	18,19	12,50	430,34
tensão convencional vs. deformação relativa				tensão de escoam. vs def. real			
F (N)	Ao (mm²)	ε (%)	σ(N/mm²)	φ (-)	Kf (N/mm²)		
3041	18,19	0,2	167,18	0,00199	167,50		
3335,4	18,19	1	183,36	0,00995	185,2		
3776,8	18,19	2	207,63	0,0148	211,79		
4071,1	18,19	3	223,81	0,02955	230,54		
4414,5	18,19	4	242,69	0,03922	252,41		
4659,7	18,19	5	256,17	0,04879	268,99		
4806,9	18,19	6	264,26	0,05872	280,13		
5003,1	18,19	7	275,05	0,06766	294,31		
5101,2	18,19	8	280,44	0,07696	302,89		
5248,3	18,19	9	288,53	0,08617	314,51		
5297,4	18,19	10	291,23	0,09531	320,36		
5346,4	18,19	11	293,92	0,10436	326,27		
5395,5	18,19	12	296,62	0,11332	332,23		
5493,6	18,19	14	302,01	0,13103	344,31		
5591,7	18,19	16	307,41	0,14842	356,61		
5640,7	18,19	18	310,10	0,16551	365,94		
5640,7	18,19	20	310,10	0,18232	372,14		
5640,7	18,19	25	310,10	0,22314	387,64		
5591,7	18,19	30	307,41	0,26236	399,65		
5591,7	18,19	35	307,41	0,3001	415,02		
5542,6	18,19	40	304,71	0,33647	426,83		
5395,5	18,19	45	296,62	0,37156	430,34		

Tabela 7.1.9

Aço EP, 90º (transversal), largura 18,58mm; espessura 0,94mm							
Nº	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	26	2550,6	17,46	17,43	146,30
2	2	0,019802	34	3335,4	17,46	17,10	194,79
3	4	0,03922	41,5	4071,2	17,46	16,80	242,42
4	6	0,05827	45	4414,5	17,46	16,50	267,93
5	8	0,07696	48	4708,8	17,46	16,20	291,18
6	10	0,09531	49	4806,9	17,46	15,90	302,75
7	12	0,11333	50,5	4954,1	17,46	15,60	317,69
8	14	0,13103	52,5	5150,3	17,46	15,30	336,17
9	16	0,14842	53	5199,3	17,46	15,10	345,33
10	20	0,18232	53,5	5248,4	17,46	14,60	360,6
11	30	0,26236	54	5297,4	17,46	13,40	394,31
12	35	0,3001	53,5	5248,4	17,46	12,90	405,68
13	40	0,33647	53	5199,3	17,46	12,50	416,77
14	45	0,37156	51,5	5052,1	17,46	12,00	419,44
15	50	0,40546	45	4414,5	17,46	11,60	379,13
16	52	0,41871	42	4120,2	17,46	11,50	358,58

tensão convencional vs. deformação relativa				
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)	
2550,6	17,46	0,2	146,082	
3335,4	17,46	2	191,031	
4071,2	17,46	4	233,173	
4414,5	17,46	6	252,835	
4708,8	17,46	8	269,691	
4806,9	17,46	10	275,309	
4954,1	17,46	12	283,740	
5150,3	17,46	14	294,977	
5199,3	17,46	16	297,784	
5248,4	17,46	20	300,596	
5297,4	17,46	30	303,402	
5248,4	17,46	35	300,596	
5199,3	17,46	40	297,784	
5052,1	17,46	45	289,353	
4414,5	17,46	50	252,835	
4120,2	17,46	52	235,979	

tensão de escoa. vs. Def. real		
ϕ (-)	kf (N/mm ²)	
0,00199	146,30	
0,01980	194,79	
0,03922	242,42	
0,05827	267,93	
0,07696	291,18	
0,09531	302,75	
0,11333	317,69	
0,13103	336,17	
0,14842	345,33	
0,18232	360,6	
0,26236	394,31	
0,3001	405,68	
0,33647	416,77	
0,37156	419,44	

Tabela 7.1.10

Alumínio 0° (Longitudinal) espessura: 0,82mm, largura: 19,72mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	16	1569	16,2	16,16	97,1
2	1	0,00995	20	1962	16,2	16,00	122,54
3	2	0,0198	23	2256,3	16,2	15,80	142,32
4	3	0,02956	26,5	2599,6	16,2	15,70	165,58
5	4	0,03922	28,5	2795,8	16,2	15,50	179,81
6	5	0,04879	30	2943	16,2	15,40	191,1
7	6	0,05827	31,5	3090,1	16,2	15,20	202,56
8	7	0,06765	32,5	3188,2	16,2	15,10	210,96
9	8	0,07696	33,5	3286,3	16,2	14,90	219,49
10	10	0,09531	34	3335,4	16,2	14,70	226,89
11	12	0,11333	34,5	3384,4	16,2	14,40	234,41
12	14	0,13103	35	3433,5	16,2	14,20	242,06
13	16	0,14842	35	3433,5	16,2	13,90	246,3
14	18	0,16551	35	3433,5	16,2	13,70	250,55
15	20	0,18232	35	3433,5	16,2	13,50	254,8

tensão convencional vs. Deformação relativa				
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)	
1569	16,2	0,2	96,85	
1962	16,2	1	121,11	
2256,3	16,2	2	139,28	
2599,6	16,2	3	160,47	
2795,8	16,2	4	172,58	
2943	16,2	5	181,67	
3090,1	16,2	6	190,75	
3188,2	16,2	7	196,80	
3286,3	16,2	8	202,86	
3335,4	16,2	10	205,89	
3384,4	16,2	12	208,91	
3433,5	16,2	14	211,94	
3433,5	16,2	16	211,94	
3433,5	16,2	18	211,94	
3433,5	16,2	20	211,94	

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	97,1
0,00995	122,54
0,0198	142,32
0,02956	165,58
0,03922	179,81
0,04879	191,1
0,05827	202,56
0,06765	210,96
0,07696	219,49
0,09531	226,89
0,11333	234,41
0,13103	242,06
0,14842	246,3
0,16551	250,55
0,18232	254,8

Tabela 7.1.11

Alumínio 45° (diagonal), espessura: 0,80mm, largura: 19,72mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	14	1373,4	15,8	15,76	87,14
2	1	0,00995	17	1667,7	15,8	15,60	106,76
3	2	0,0198	20	1962	15,8	15,40	126,85
4	3	0,02956	23	2256,3	15,8	15,40	147,31
5	4	0,03922	25	2452,5	15,8	15,20	161,67
6	5	0,04879	26,5	2599,6	15,8	15,00	173,02
7	6	0,05827	27,5	2667,7	15,8	14,90	181,26
8	7	0,067666	28,5	2795,8	15,8	14,70	189,62
9	8	0,07696	29	2844,9	15,8	14,60	194,75
10	10	0,09531	30	2943	15,8	14,30	205,2
11	12	0,11333	31	3041,1	15,8	14,10	215,9
12	14	0,13103	31,5	3090,1	15,8	13,80	223,3
13	16	0,14842	32	3139,2	15,8	13,60	230,82
14	18	0,16551	32	3139,2	15,8	13,40	234,8
15	19	0,17395	32	3139,2	15,8	13,20	236,79

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
1373,4	15,8	0,2	86,92
1667,7	15,8	1	105,55
1962	15,8	2	124,18
2256,3	15,8	3	142,80
2452,5	15,8	4	155,22
2599,6	15,8	5	164,53
2667,7	15,8	6	168,84
2795,8	15,8	7	176,95
2844,9	15,8	8	180,06
2943	15,8	10	186,27
3041,1	15,8	12	192,47
3090,1	15,8	14	195,58
3139,2	15,8	16	198,68
3139,2	15,8	18	198,68
3139,2	15,8	19	198,68

tensão de escoam, vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	87,14
0,00995	106,76
0,0198	126,85
0,02956	147,31
0,03922	161,67
0,04879	173,02
0,05827	181,26
0,067666	189,62
0,07696	194,75
0,09531	205,2
0,11333	215,9
0,13103	223,3
0,14842	230,82
0,16551	234,8
0,17395	236,79

Tabela 7.1.12

Alumínio 90° (transversal), espessura: 0,80mm, largura: 19,70mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	20	1962	15,7	15,67	124,96
2	1	0,00995	24	2354,4	15,7	15,60	150,88
3	2	0,0198	27	2648,7	15,7	15,40	171,42
4	3	0,02956	29,5	2893,95	15,7	15,30	189,13
5	4	0,03922	31,5	3090,1	15,7	15,10	203,92
6	5	0,04879	33	3237,3	15,7	15,00	215,68
7	6	0,05827	34	3335,4	15,7	14,80	224,33
8	7	0,06765	34,5	3384,4	15,7	14,70	229,78
9	8	0,07696	35,5	3482,5	15,7	14,60	238,65
10	10	0,09531	36,5	3580,6	15,7	14,30	249,92
11	12	0,11333	37	3629,7	15,7	14,00	257,95
12	14	0,13103	37,5	3678,7	15,7	13,80	266,1
13	16	0,14842	38	3727,8	15,7	13,60	271,87
14	18	0,16551	37,5	3678,7	15,7	13,30	276,56
15	19	0,17395	37,5	3678,7	15,7	13,20	278,9

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
1962	15,7	0,2	124,968
2354,4	15,7	1	149,962
2648,7	15,7	2	168,707
2893,95	15,7	3	184,328
3090,1	15,7	4	196,822
3237,3	15,7	5	206,197
3335,4	15,7	6	212,446
3384,4	15,7	7	215,567
3482,5	15,7	8	221,815
3580,6	15,7	10	228,064
3629,7	15,7	12	231,191
3678,7	15,7	14	234,312
3727,8	15,7	16	237,439
3678,7	15,7	18	234,312
3678,7	15,7	19	234,312

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	124,96
0,00995	150,88
0,0198	171,42
0,02956	189,13
0,03922	203,92
0,04879	215,68
0,05827	224,33
0,06765	229,78
0,07696	238,65
0,09531	249,92
0,11333	257,95
0,13103	266,1
0,14842	271,87
0,16551	276,56
0,17395	278,9

Tabela 7.1.13

Cobre 0^o (Longitudinal) espessura: 0,50mm, largura: 19,65mm							
N. ^o	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	126	2472,2	9,7	9,68	255,4
2	1	0,00995	128	2511,4	9,7	9,60	261,6
3	2	0,0198	130,5	2560,4	9,7	9,50	269,5
4	3	0,02956	132	2589,8	9,7	9,40	275,5
5	4	0,03922	133	2609,4	9,7	9,30	280,6
6	5	0,04879	134	2629,1	9,7	9,20	285,7
7	6	0,05827	135	2648,7	9,7	9,10	291,1
8	8	0,07696	136	2668,3	9,7	9,00	296,5
9	10	0,09531	137	2687,9	9,7	8,80	305,5
10	12	0,11333	137	2687,9	9,7	8,60	312,5
11	14	0,13103	137	2687,9	9,7	8,50	316,2
12	16	0,14842	136,5	2678,1	9,7	8,40	318,8
13	18	0,16551	136	2668,3	9,7	8,20	325,4
14	20	0,18232	135,5	2658,5	9,7	8,10	328,2
15	22	0,19885	134,5	2638,9	9,7	7,90	334,08
16	24	0,21511	131	2570,2	9,7	7,80	329,5

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
2472,2	9,7	0,2	254,866
2511,4	9,7	1	258,907
2560,4	9,7	2	263,959
2589,8	9,7	3	266,990
2609,4	9,7	4	269,010
2629,1	9,7	5	271,041
2648,7	9,7	6	273,062
2668,3	9,7	8	275,082
2687,9	9,7	10	277,103
2687,9	9,7	12	277,103
2687,9	9,7	14	277,103
2678,1	9,7	16	276,093
2668,3	9,7	18	275,082
2658,5	9,7	20	274,072
2638,9	9,7	22	272,052
2570,2	9,7	24	264,969

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	255,4
0,00995	258,16
0,0198	265,81
0,02956	271,5
0,03922	276,22
0,04879	280,97
0,05827	285,76
0,07696	293,31
0,09531	300,93
0,11333	306,41
0,13103	311,88
0,14842	316,19
0,16551	320,47
0,18232	324,7
0,19885	327,68
0,21511	324,38

Tabela 7.1.14

Cobre 45° (diagonal), espessura: 0,50mm, largura: 19,70mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	117	2295	9,75	9,73	235,8
2	1	0,00995	118	2315,2	9,75	9,60	241,2
3	2	0,0198	118,5	2325	9,75	9,50	244,7
4	4	0,03922	118,5	2325	9,75	9,40	247,3
5	6	0,05827	118,5	2325	9,75	9,20	252,7
6	8	0,07696	118,5	2325	9,75	9,00	258,3
7	10	0,09531	118,5	2325	9,75	8,80	264,2
8	12	0,11333	118,5	2325	9,75	8,70	267,2
9	14	0,13103	118,5	2325	9,75	8,50	273,5
10	16	0,14842	118,5	2325	9,75	8,40	276,8
11	18	0,16551	118,5	2325	9,75	8,30	286,1
12	20	0,18232	118,5	2325	9,75	8,10	287
13	22	0,19885	118	2315,2	9,75	8,00	289,4
14	25	0,22314	117,5	2305,3	9,75	7,80	295,5
15	27	0,23902	117	2295,5	9,75	7,60	302
16	30	0,26236	115	2256,3	9,75	7,50	300,8
17	32	0,27763	105	2060,1	9,75	7,40	278,4

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
2295	9,75	0,2	235,38
2315,2	9,75	1	237,46
2325	9,75	2	238,46
2325	9,75	4	238,46
2325	9,75	6	238,46
2325	9,75	8	238,46
2325	9,75	10	238,46
2325	9,75	12	238,46
2325	9,75	14	238,46
2325	9,75	16	238,46
2325	9,75	18	238,46
2325	9,75	20	238,46
2315,2	9,75	22	237,46
2305,3	9,75	25	236,44
2295,5	9,75	27	235,44
2256,3	9,75	30	231,42
2060,1	9,75	32	211,29

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	235,8
0,00995	241,2
0,0198	244,7
0,03922	247,3
0,05827	252,7
0,07696	258,3
0,09531	264,2
0,11333	267,2
0,13103	273,5
0,14842	276,8
0,16551	286,1
0,18232	287
0,19885	289,4
0,22314	295,5
0,23902	302
0,26236	300,8
0,27763	278,4

Tabela 7.1.15

Cobre 90° (transversal), espessura: 0,50mm, largura: 19,66mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	136	2668,3	9,7	9,68	275,6
2	1	0,00995	137,5	2697,7	9,7	9,60	281
3	2	0,0198	138	2707,5	9,7	9,50	285
4	3	0,02956	138,5	2717,4	9,7	9,40	289,1
5	4	0,03922	139	2727,2	9,7	9,30	293,2
6	6	0,05827	139	2727,2	9,7	9,10	299,7
7	8	0,07696	139	2727,2	9,7	9,00	303
8	10	0,09531	139	2727,2	9,7	8,80	309,9
9	12	0,11333	139,5	2727,2	9,7	8,60	317,1
10	14	0,13103	139	2727,2	9,7	8,50	320,8
11	16	0,14842	139	2727,2	9,7	8,40	324,6
12	18	0,16551	138,5	2717,4	9,7	8,20	331,4
13	20	0,18232	138	2707,5	9,7	8,10	334,2
14	22,5	0,20294	137,5	2697,7	9,7	7,90	341,5
15	25	0,22314	137	2687,9	9,7	7,80	344,6
16	27,5	0,24294	136,5	2678,1	9,7	7,60	352,4
17	30	0,26236	135	2648,7	9,7	7,40	357,9
18	31	0,27003	133	2609,5	9,7	7,40	352,6
19	31,5	0,27385	130	2550,6	9,7	7,30	349,4

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
2668,3	9,7	0,2	275,08
2697,7	9,7	1	278,11
2707,5	9,7	2	279,12
2717,4	9,7	3	280,14
2727,2	9,7	4	281,15
2727,2	9,7	6	281,15
2727,2	9,7	8	281,15
2727,2	9,7	10	281,15
2727,2	9,7	12	281,15
2727,2	9,7	14	281,15
2727,2	9,7	16	281,15
2717,4	9,7	18	280,14
2707,5	9,7	20	279,12
2697,7	9,7	22,5	278,11
2687,9	9,7	25	277,10
2678,1	9,7	27,5	276,09
2648,7	9,7	30	273,06
2609,5	9,7	31	269,02
2550,6	9,7	31,5	262,95

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	275,6
0,00995	281
0,0198	285
0,02956	289,1
0,03922	293,2
0,05827	299,7
0,07696	303
0,09531	309,9
0,11333	317,1
0,13103	320,8
0,14842	324,6
0,16551	331,4
0,18232	334,2
0,20294	341,5
0,22314	344,6
0,24294	352,4
0,26236	357,9

Tabela 7.1.16

Latão 0° (Longitudinal) espessura: 0,70mm, largura: 18,63mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	13	1275,3	13	12,97	98,3
2	4,2	0,04114	17,5	1716,7	13	12,5	137,3
3	8,5	0,08158	22	2158,2	13	12	179,8
4	12,7	0,11956	25	2452,5	13	11,5	213,3
5	16,9	0,15615	28	2746,8	13	11,1	247,4
6	21,2	0,19227	30,5	2992,1	13	10,7	279,6
7	25,5	0,22713	33	3237,3	13	10,3	314,3
8	29,7	0,26205	34,5	3384,4	13	10	338,4
9	34	0,29267	36	3531,6	13	9,7	364,1
10	38,2	0,32353	37	3629,7	13	9,4	386,1
11	42,4	0,35347	38	3727,8	13	9,1	409,6
12	46,7	0,38322	38,5	3776,8	13	8,8	429,2
13	50,9	0,41145	39	3825,9	13	8,6	444,8
14	55,2	0,43954	39,5	3874,9	13	8,4	461,3
15	59,4	0,46624	39,5	3874,9	13	8,1	478,4

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
1275,3	13	0,2	98,1
1716,7	13	4,2	132,05
2158,2	13	8,5	166,02
2452,5	13	12,7	188,65
2746,8	13	16,9	211,29
2992,1	13	21,2	230,16
3237,3	13	25,5	249,02
3384,4	13	29,7	260,34
3531,6	13	34	271,66
3629,7	13	38,2	279,21
3727,8	13	42,4	286,75
3776,8	13	46,7	290,52
3825,9	13	50,9	294,30
3874,9	13	55,2	298,07
3874,9	13	59,4	298,07

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	kf (N/mm ²)
0,04114	137,3
0,08158	179,8
0,11956	213,3
0,15615	247,4
0,19227	279,6
0,22713	314,3
0,26205	338,4
0,29267	364,1
0,32353	386,1
0,35347	409,6
0,38322	429,2
0,41145	444,8
0,43954	461,3
0,46624	478,4

Tabela 7.1.17

Latão 45° (diagonal), espessura: 0,50mm, largura: 18,61mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	6	588,6	13	12,97	45,4
2	4,5	0,04401	10	981	13	12,90	76
3	9	0,08618	13	1275,3	13	11,90	107,2
4	13,6	0,12751	16	1569,6	13	11,40	137,7
5	18,1	0,16636	19	1863,9	13	11,00	169,4
6	22,2	0,20049	21	2060,1	13	10,60	194,3
7	27,1	0,23988	24	2354,4	13	10,20	230,8
8	31,7	0,27535	26	2550,6	13	9,80	260,2
9	36,2	0,30895	27	2648,7	13	9,50	278,8
10	40,7	0,34146	29	2844,9	13	9,20	309,2
11	45,3	0,37363	29,5	2893,9	13	8,90	325,1
12	49,8	0,40413	30	2943	13	8,70	338,3
13	54,3	0,43373	30,5	2992	13	8,40	356,2
14	58,8	0,46247	31	3041,1	13	8,20	370,8
15	63,4	0,49103	31,5	3090,1	13	7,90	391,1
16	68	0,51879	31,5	3090,1	13	7,70	401,3

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
588,6	13	0,2	45,28
981	13	4,5	75,46
1275,3	13	9	98,10
1569,6	13	13,6	120,74
1863,9	13	18,1	143,38
2060,1	13	22,2	158,47
2354,4	13	27,1	181,11
2550,6	13	31,7	196,20
2648,7	13	36,2	203,75
2844,9	13	40,7	218,84
2893,9	13	45,3	222,61
2943	13	49,8	226,38
2992	13	54,3	230,15
3041,1	13	58,8	233,93
3090,1	13	63,4	237,70
3090,1	13	68	237,70

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	45,4
0,04401	76
0,08618	107,2
0,12751	137,7
0,16636	169,4
0,20049	194,3
0,23988	230,8
0,27535	260,2
0,30895	278,8
0,34146	309,2
0,37363	325,1
0,40413	338,3
0,43373	356,2
0,46247	370,8
0,49103	391,1
0,51879	401,3

Tabela 7.1.18

Latão 90° (transversal), espessura: 0,50mm, largura: 18,60mm							
N.º	ϵ (%)	ϕ (-)	F(mm)	F(N)	Ao (mm ²)	A1 (mm ²)	Kf (N/mm ²)
1	0,2	0,00199	9	882,9	13	12,97	68,1
2	4,4	0,04306	13	1275,3	13	12,50	102
3	8,8	0,08434	18	1765,8	13	11,90	148,4
4	13,2	0,12398	20	1962	13	11,50	170,6
5	17,6	0,16212	23,5	2305,3	13	11,00	209,6
6	22	0,19885	26,5	2599,6	13	10,60	245,2
7	26,4	0,23428	30	2943	13	10,30	285,7
8	30,8	0,2685	31,5	3090,1	13	9,90	312,1
9	35,2	0,30158	33	3237,3	13	9,60	337,2
10	39,6	0,33361	34,5	3384,4	13	9,30	363,9
11	44	0,36464	35	3433,5	13	9,00	381,5
12	48,4	0,39474	35,5	3531,6	13	8,70	400,3
13	52,8	0,42396	36	3580,6	13	8,50	415,5
14	57,2	0,45235	36,5	3580,6	13	8,30	431,4

tensão convencional vs. Deformação relativa			
F(N)	Ao (mm ²)	ϵ (%)	σ (N/mm ²)
882,9	13	0,2	67,915
1275,3	13	4,4	98,100
1765,8	13	8,8	135,831
1962	13	13,2	150,923
2305,3	13	17,6	177,331
2599,6	13	22	199,969
2943	13	26,4	226,385
3090,1	13	30,8	237,700
3237,3	13	35,2	249,023
3384,4	13	39,6	260,338
3433,5	13	44	264,115
3531,6	13	48,4	271,662
3580,6	13	52,8	275,431
3580,6	13	57,2	275,431

tensão de escoam. vs. Def. real	
ϕ (-)	Kf (N/mm ²)
0,00199	68,1
0,04306	102
0,08434	148,4
0,12398	170,6
0,16212	209,6
0,19885	245,2
0,23428	285,7
0,2685	312,1
0,30158	337,2
0,33361	363,9
0,36464	381,5
0,39474	400,3
0,42396	415,5
0,45235	431,4

7.2 – Anexo 2

O anexo 2 refere-se às tabelas construídas a partir do ensaio de tração para calcular a anisotropia das seis amostras das chapas metálicas analisadas.

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço AISI 304*

Espessura: *0,72mm*

Tabela 7.2.1- Ensaio de tração a 0°

		0°	0°	0°
b_0	1	18,86	18,92	18,94
	2	18,86	18,91	18,90
	3	18,89	18,95	18,92
	b_0	18,87	18,92	18,92
	l_0	100	101,00	100,75
b_1	1	17,68	17,65	17,71
	2	17,61	17,65	17,65
	3	17,62	17,70	17,67
	b_1	17,64	17,67	17,68
	l_1	116,90	117,80	117,60
	φ_b	-0,067	-0,068	-0,068
	φ_l	0,156	0,154	0,155
	r	0,752	0,791	0,782
	r_{0°	0,775		
	r_m	0,991		
Δ_r	-0,283			

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço AISI 304*

Espessura: *0,72mm*

Tabela 7.2.3- Ensaio de tração a 90°

		90°	90°	90°
b_0	1	18,90	18,93	18,92
	2	18,94	18,94	18,91
	3	18,94	18,94	18,90
	b_0	18,93	18,94	18,91
	l_0	98,80	98,80	98,80
b_1	1	17,55	17,57	17,62
	2	17,60	17,56	17,60
	3	17,62	17,63	17,58
	b_1	17,59	17,59	17,60
	l_1	115,00	115,00	115,00
	φ_b	-0,073	-0,074	-0,072
	φ_l	0,152	0,152	0,152
	r	0,924	0,949	0,900
	r_{90°	0,924		
	r_m	0,991		
Δ_r	-0,283			

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço AISI 304*

Espessura: *0,72mm*

Tabela 7.2.2- Ensaio de tração a 45°

		45°	45°	45°
b_0	1	18,87	18,90	18,91
	2	18,86	18,86	18,87
	3	18,90	18,85	18,85
	b_0	18,88	18,87	18,88
	l_0	100,70	101,20	101,30
b_1	1	17,36	17,44	17,40
	2	17,36	17,38	17,36
	3	17,39	17,36	17,34
	b_1	17,37	17,39	17,37
	l_1	117,80	117,90	118,50
	φ_b	-0,083	-0,082	-0,083
	φ_l	0,157	0,153	0,157
	r	10122	1,155	1,122
	r_{45°	1,133		
	r_m	0,991		
	Δ_r	-0,283		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço AISI Inox 430*

Espessura: *0,70*

Tabela 7.2.4- Ensaio de tração a 0°

		0°	0°	0°
b_0	1	18,59	18,52	18,63
	2	18,59	18,53	18,61
	3	18,61	18,53	18,60
	b_0	18,60	18,53	18,61
	l_0	99,75	98,70	98,60
b_1	1	17,13	17,02	17,04
	2	17,12	17,13	16,96
	3	17,22	17,20	16,90
	b_1	17,16	17,12	16,97
	l_1	118,30	115,93	118,35
	φ_b	-0,080	-0,079	-0,092
	φ_l	0,170	0,161	0,182
	r	0,889	0,963	1,022
	r_{0°	0,958		
	r_m	0,959		
	Δ_r	0,343		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço AISI Inox 430*

Espessura: *0,70*

Tabela 7.2.6- Ensaio de tração a 90°

		90°	90°	90°
b_0	1	18,60	18,62	18,64
	2	18,61	18,61	18,64
	3	18,60	18,61	18,62
	b_0	18,60	18,61	18,63
	l_0	99,30	98,70	98,55
b_1	1	17,14	17,02	17,14
	2	16,88	16,90	16,87
	3	16,82	17,14	16,72
	b_1	16,95	17,02	16,91
	l_1	116,95	115,85	116,75
	φ_b	-0,093	-0,089	-0,097
	φ_l	0,164	0,160	0,169
	r	1,310	1,253	1,347
	r_{90°	1,303		
	r_m	0,959		
Δ_r	0,343			

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: Aço AISI Inox 430

Espessura: 0,70

Tabela 7.2.5- Ensaio de tração a 45°

		45°	45°	45°
b_0	1	18,64	18,60	18,64
	2	18,63	18,62	18,63
	3	18,61	18,63	18,60
	b_0	18,63	18,62	18,62
	l_0	99,20	99,25	97,95
b_1	1	17,43	17,28	17,43
	2	17,26	17,28	17,26
	3	17,19	17,25	17,08
	b_1	17,29	17,27	17,26
	l_1	117,55	117,75	116,30
	ϕ_b	-0,075	-0,075	-0,076
	ϕ_l	0,170	0,171	0,172
	r	0,789	0,781	0,792
	r_{45°	0,787		
	r_m	0,959		
	Δ_r	0,343		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço Carbono EP*

Espessura: *0,94*

Tabela 7.2.7- Ensaio de tração a 0°

		0°	0°	0°
b₀	1	19,34	19,36	19,36
	2	19,34	19,36	19,36
	3	19,34	19,35	19,35
	b ₀	19,34	19,36	19,36
	l ₀	98,85	99,00	99,30
b₁	1	17,26	17,34	17,28
	2	17,19	17,22	17,21
	3	17,25	17,23	17,25
	b ₁	17,23	17,26	17,25
	l ₁	116,05	117,35	117,05
	φ _b	-0,115	-0,115	-0,115
	φ _l	0,160	0,170	0,164
	r	2,555	2,090	2,347
	r _{0°}	2330		
	r _m	1,856		
	Δ _r	0,549		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço Carbono EP*

Espessura: *0,94*

Tabela 7.2.8- Ensaio de tração a 90°

		90°	90°	90°
b_0	1	18,56	18,57	18,57
	2	18,57	18,57	18,59
	3	18,59	18,60	18,60
	b_0	18,57	18,58	18,58
	l_0	99,00	99,70	99,40
b_1	1	16,61	16,58	16,58
	2	16,55	16,52	16,57
	3	16,64	16,64	16,65
	b_1	16,60	16,58	16,60
	l_1	117,05	118,90	118,10
	φ_b	-0,112	-0,114	-0,113
	φ_l	0,167	0,176	0,172
	r	2,036	1,839	1,915
	r_{90°	1,930		
	r_m	1,856		
Δ_r	0,549			

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Aço Carbono EP*

Espessura: *0,94*

Tabela 7.2.9- Ensaio de tração a 45°

		45°	45°	45°
b₀	1	19,36	19,33	19,35
	2	19,35	19,34	19,35
	3	19,35	19,35	19,34
	b ₀	19,35	19,34	19,35
	l ₀	99,15	99,90	99,90
b₁	1	17,54	17,45	17,40
	2	17,40	17,40	17,30
	3	17,45	17,44	17,35
	b ₁	17,46	17,43	17,35
	l ₁	117,60	118,55	118,95
	φ _b	-0,103	-0,104	-0,109
	φ _l	0,171	0,171	0,174
	r	1,515	1,552	1,677
	r _{45°}	1,581		
	r _m	1,856		
	Δ _r	0,549		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Alumínio*

Espessura: *0,80*

Tabela 7.2.10- Ensaio de tração a 0°

		0°	0°	0°	
b_0	1	19,71	19,76	19,70	
	2	19,71	19,74	19,73	
	3	19,69	19,73	19,75	
	b_0	19,70	19,74	19,73	
	l_0	100,75	100,15	100,40	
b_1	1	18,91	19,08	19,01	
	2	18,90	19,05	19,00	
	3	18,83	19,04	19,02	
	b_1	18,88	19,06	19,01	
		l_1	111,05	109,45	110,05
		φ_b	-0,043	-0,035	-0,037
		φ_l	0,097	0,089	0,092
		r	0,796	0,648	0,673
		r_{0°	0,705		
		r_m	0,763		
	Δ_r	-0,0815			

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Alumínio*

Espessura: *0,80*

Tabela 7.2.11- Ensaio de tração a 45°

		45°	45°	45°
b_0	1	19,74	19,74	19,70
	2	19,73	19,73	19,68
	3	19,73	19,73	19,71
	b_0	19,73	19,73	19,70
	l_0	100,50	100,50	100,15
b_1	1	18,98	18,93	18,94
	2	19,04	18,91	18,89
	3	18,95	18,98	18,99
	b_1	18,99	18,94	18,94
	l_1	109,60	110,25	109,05
	φ_b	-0,038	-0,041	-0,039
	φ_l	0,087	0,093	0,039
	r	0,775	0,788	0,848
	r_{45°	0,804		
	r_m	0,763		
	Δ_r	-0,0815		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Alumínio*

Espessura: *0,80*

Tabela 7.2.12- Ensaio de tração a 90°

		90°	90°	90°
b_0	1	19,66	19,70	19,62
	2	19,64	19,66	19,62
	3	19,63	19,62	19,66
	b_0	19,64	19,66	19,63
	l_0	100,15	100,35	100,40
b_1	1	18,91	18,90	18,90
	2	18,91	18,83	18,89
	3	18,94	18,83	19,05
	b_1	18,92	18,85	18,95
	l_1	109,40	109,95	109,85
	φ_b	-0,037	-0,042	-0,035
	φ_l	0,088	0,091	0,090
	r	0,725	0,857	0,636
	r_{90°	0,739		
	r_m	0,763		
	Δ_r	-0,0815		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Cobre*

Espessura: *0,50*

Tabela 7.2.13- Ensaio de tração a 0°

		0°	0°	0°
b₀	1	19,62	19,61	19,55
	2	19,62	19,61	19,60
	3	19,60	19,56	19,54
	b ₀	19,62	19,59	19,56
	l ₀	100,25	100,20	100,35
b₁	1	18,93	18,88	18,78
	2	18,88	18,75	18,80
	3	18,89	18,76	18,74
	b ₁	18,90	18,80	18,77
	l ₁	109,65	110,50	110,50
	φ _b	-0,037	-0,041	-0,041
	φ _l	0,090	0,098	0,096
	r	0,698	0,719	0,745
	r _{0°}	0,721		
	r _m	0,689		
	Δ _r	0,192		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Cobre*

Espessura: *0,50*

Tabela 7.2.14- Ensaio de tração a 45°

		45°	45°	45°
b_0	1	19,59	19,59	19,60
	2	19,63	19,62	19,55
	3	19,65	19,64	19,46
	b_0	19,62	19,62	19,54
	l_0	99,65	100,25	100,60
b_1	1	18,94	18,92	18,04
	2	18,89	18,93	18,90
	3	19,06	19,19	18,88
	b_1	18,96	19,01	18,88
	l_1	109,10	109,70	109,80
	φ_b	-0,034	-0,032	-0,034
	φ_l	0,091	0,090	0,088
	r	0,596	0,552	0,630
	r_{45°	0,593		
	r_m	0,689		
	Δ_r	0,192		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Cobre*

Espessura: *0,50*

Tabela 7.2.15- Ensaio de tração a 90°

		90°	90°	90°
b_0	1	19,47	19,60	19,50
	2	19,53	19,53	19,53
	3	19,50	19,58	19,52
	b_0	19,50	19,60	19,55
	l_0	100,70	100,85	100,75
b_1	1	18,59	18,82	18,88
	2	18,78	18,81	18,85
	3	18,60	18,70	18,79
	b_1	18,65	18,78	18,84
	l_1	110,45	110,50	110,20
	φ_b	-0,045	-0,043	-0,037
	φ_l	0,092	0,091	0,090
	r	0,957	0,896	0,698
	r_{90°	0,850		
	r_m	0,689		
	Δ_r	0,192		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Latão*

Espessura: *0,70*

Tabela 7.2.16- Ensaio de tração a 0°

		0°	0°	0°
b_0	1	18,59	18,52	18,65
	2	18,62	18,52	18,65
	3	18,65	18,52	18,64
	b_0	18,62	18,52	18,65
	l_0	100,60	100,20	100,10
b_1	1	14,19	17,14	17,28
	2	17,25	17,16	17,33
	3	17,31	17,18	17,27
	b_1	17,25	17,16	17,29
	l_1	118,90	118,70	118,60
	φ_b	-0,076	-0,076	-0,076
	φ_l	0,167	0,169	0,170
	r	0,835	0,817	0,809
	r_{0°	0,820		
	r_m	0,841		
	Δ_r	-0,03		

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Latão*

Espessura: *0,70*

Tabela 7.2.17- Ensaio de tração a 45°

		45°	45°	45°
b_0	1	18,57	18,55	18,68
	2	18,55	18,56	18,65
	3	18,55	18,61	18,60
	b_0	18,56	18,57	18,64
	l_0	100,45	100,35	100,40
b_1	1	17,30	17,22	17,30
	2	17,31	17,24	17,25
	3	17,30	17,26	17,20
	b_1	17,30	17,24	17,25
	l_1	117,18	117,70	119,70
	φ_b	-0,070	-0,074	-0,077
	φ_l	0,154	0,159	0,166
	r	0,833	0,871	0,865
	r_{45°	0,856		
	r_m	0,841		
Δ_r	-0,03			

Tabela para calcular o índice de anisotropia

Material: *Latão*

Espessura: *0,70*

Tabela 7.2.18- Ensaio de tração a 90°

		90°	90°	90°
b_0	1	18,58	18,56	18,40
	2	18,53	18,55	18,45
	3	18,50	18,53	18,46
	b_0	18,54	18,55	18,44
	l_0	100,30	100,35	100,05
b_1	1	17,21	17,20	17,13
	2	17,16	17,17	17,22
	3	17,12	17,13	17,16
	b_1	17,16	17,17	17,17
	l_1	118,55	118,70	118,00
	φ_b	-0,077	-0,077	-0,071
	φ_l	0,167	0,168	0,156
	r	0,855	0,846	0,797
	r_{90°	0,833		
	r_m	0,841		
	Δ_r	-0,03		

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Mielnik, E.M. **Metalworking Sciencend Engineering**. Ed. McGraw-Hill, 1991.
- 2- Schaeffer, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Ed. Empresa Livre, 1999.
- 3- Schaeffer, L. **Conformação dos Metais-Metalurgia e Mecânica**. Porto Alegre: Ed. Rígel, 1995.
- 4- Garcia, Spin J.S.C. **Ensaaios dos Materiais**. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro: Ed. Rio de Janeiro, 2000.
- 5- Souza, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais metálicos**. 4ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1979
- 6- Chiaverini, V. **Tecnologia Mecânica**, Vol.1, São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1977.
- 7- Altan, T.O. S.G.H. **Conformação de Metais**. São Carlos: Ed. Publicação EESC-USP, 1999.
- 8- Norma DIN EN 10 002. **Prüfung metallischer Werkstoffe Hrsg. Deutsches Institut für Normung E.V.** Berlin. Colônia: Beuth, abril 1991.
- 9- Norma DIN 50 114, **Zugversuch Ohne Feindehnungsnessung an Blechen. Bänchen Oder. Streifen mit liner Dicke unter 3 mm. Husg. Deutsches Institut für Normung E.V.** Berlin. Colonia: Beuth Verlog, abril 1978.
- 10- Lorenz, R. Gilapa G.M. **Avaliação da conformabilidade de chapas de aço plano**. Anais da I Conf. Nacional de Conformação de Chapas. Pg. 141 a 150. Porto Alegre: Outubro de 1998.
- 11- Prediger, S. A., Schaeffer, L. **Levantamento de curvas de escoamento em chapas**. Anais da II Conf. Nacional de Conformação de Chapas. Pg. 117 a 127. Porto Alegre: Novembro de 1999.
- 12- Prediger, S.A, Henning, R., Schaeffer, L. **Aproximação matemática de curvas de escoamento para simulação**. Anais da II Conf. Nacional de conformação de Chapas. Pg. 141 a 150. Porto Alegre: Novembro de 1999.
- 13- Hening, R., Richter, A., Schaeffer, L. **Tecnologia de Ensaaios de Chapas para Estampagem**. Curso de Extensão sobre ensaios de chapas metálicas para estampagem. Material de Apoio. Caxias do Sul. Dezembro de 1999.
- 14- Richter, A. **Ensaio de Tração para Chapas**. Material de Apoio do LdTM da UFRGS. Porto Alegre. 1998.

- 15- Hosford, W.F., Caaddell, R.M. **Metal Forming**, University of Michigan. Michigan. 1993
- 16- Schuler. **Metal Forming Handbook**. Springer-Verlag, Heidelberg, Alemanha, 1998.
- 17- SEW 1126. **Ermittlung der senkrechten Anisotropie**. (r-Wert) von Feinblech aus dem Zugversuch, Düsseldorf: Veriag Stahleisen. Alemanha: novembro 1984.
- 18- Reis, A. Santos, A.D. Duarte Ferreira J. Hoferlin S.L.E. , Bael Van ^a , Houtte Van P. , Teodosiu C. **F.E. Prediction and Experimental Validation of a Plasticity Model of Texture and Strain Induced Anisotropy**. Anais da SheMet (Internation Conference on Sheet Metal). FEUP-DEMEGI, Portugal, Dept. MTM, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, LPMTM-CNRS, University Paris Nord, France, 04/2001.
- 19- Hwatashi S.hunji, Bael Van Albert, Houtte Van Paul, Tcodosiu Cristian. **Modelling of plastic anisotropy based on testure and dislacation Structure Computacional Materials Science** , Vol. 9 , pp 274-284, 1997
- 20- Winther Grethe, Jensen Duarte Juul, Hansen Niels, **Modelling Flow Stress Anisotropy caused by deformation induced dislocation Boundaries*** Vol. 45 , pp 2455-2465, 1997.
- 21- Sanchez , L. R. **A new cyclic anisotropic model for plane Strain Sheet metal forming**, International Journal of Mechanical Science, Vol.42, pp 705-728, 2000.
- 22- Caviglia G. , Morro A. **Wave Propagation Condition in Linear Anisotropic Viscoelastic media**, FEM-Theory and Aplication, Vol.33, pp 1059-1074, 1995.
- 23- SEW 1125: **Ermittlung der Verfestigungsexponenten** (n-Wert) von Feinblech aus dès Zugversuch, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, novembro 1984.
- 24- Rosi, M. **Estampado em Frio de La Chapa**. Barcelona: Editorial Científico, 1966.
- 25- Wills J. **Deep Drawing**, Butter Worths Scientific Publications. London, 1954.
- 26- Lange, K. **Umformtechnik- Band 3 – Blechbearbeitung**. Springer – Verlag.Heidelberg, Alemanha, 1990.
- 27-Grüning K. **Tecnica da Conformação**. São Paulo: Ed. Polígono, 1966.
- 28- Polack, ^a V. **Manual Prático de Estampagem**. São Paulo: Ed. e Livraria Hemus, 1974.
- 29- Provenza, F., **Estampos III, PROTEC**, Edição 1993.
- 30- Borsoi, C.A., Hening, R., Shaeffer, L., **Novo teste tecnológico no LTdm para melhor determinação da conformabilidade de chapas metálicas**. Anais da III Conf. Nacional de Conformação de Chapas. Pg. 50 a 59. Porto Alegre, 10/2000.

- 31- Hening, R. ,Schaeffer, L. **Novo teste de Benchark para programas de simulação de conformaçãode chapas.**Anais da III Cof. Nacional de Conformação de Chapas. Pg. 112 a 118. Porto Alegre. 10/2000.
- 32- Borsoi, C. A., Schaeffer, L , Hening, G.R. Crivelaro, R. S. **Análise de conformabilidade para a industria de estampagem.** Anais da IV Conf. Nacional de Conformação de Chapas. Pg. 80 a 90. Porto Alegre.10/ 2001.
- 33- Hening, R.. **Vergleichende Untersuchungen zur numerischen Simulation dès Tiefziehens nichtzylindrischer rotationssymmetrischer und nichtrotationssymmetrischer Teile,** Dissertação de Doutorado. Dresden, Alemanha 1997.
- 34- Al-Qureshi H.A., Santos B. **Deep-Drawing of Circular Blanks of Sheet Metal Using Elastomer Rigs,** Anais da SheMet. (International Conference on Sheet Metal). Instituto tecnológico de Aeronáutica . São José dos Campos, 04/2001.
- 35- Hferlin E., Bael Van A, Houtte Van P., Bresseur E.,Moriau O, Rostenberghe Van S. Steyaert G. **Strain-Localisation during Non-Linear Deep Drawing: Texture and Microstructural Anisotropy, Predictions and Validations,** Anais da SheMet. (International Conference on Sheet Metal). OCAS Research Centre Belgium , Dept. MTM- Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 04/2001.
- 36- Hiwatashi Si, Bael Van A, Houtte Van P, Teodosiu C. **Predictan of forming Limit Strains under Strain-Tath changes: Application of an anisotropic Model Based on texture and Dislocation Sructure.** Internentional Jounal of Plasticity, Vol 14, pp 647-669, 1998.
- 37- Hu Jian Guo, Ishikawa Tadashi, Jonas John J. **Finite element analysis of damage evolution and the prediction of the limiting Draw Ratio in textured aluminium Sheets.** Journal of Materials Processing Technology , 103, pp 374-382, 2000.
- 38- Thiruvarudchelvan S. **A movel hydraulic-pessure augmented deep-Drawing process for high draws rations.,** Journal of Materials Processing Technology . 54 pp 355- 361, 1995.
- 39-De Sales F. Joaquin V. **Repuxo Cilíndrico e Prismático,** Trabalho de conclusão de Curso. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 12/ 2002.
- 40- American Society for Metal. **Metals HandBook ,**Vol. 7, 8ª Ed. Atlas of Microstrutures of Industrial Alloys – 1972.

- 41- Serrano, A. **Características dos aços inoxidáveis para Estampagem**. Anais da VI Conf Nac. de conformação de chapas para Estampagem. Pg. 96 a 108. Porto Alegre, 2003.
- 42- Voelkner, W. Recent Developments in Sheet Metal Forming. - Select Examples- **Flow Curves of Al 99,5, Experiment – Approximation**. Anais da I Conf,Nac. de Conformação de chapas para Estampagem. Pg. 11 a 28. Porto Alegre, 10/1998.
- 43- CD-ROM- COSIPA – São Paulo
- 44- [http:// www. CIMM. Com.br](http://www.CIMM.Com.br). Acesso em 11/11/2004.