

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

OTAVIO KIYATAKE NICESIO

**Avaliação das propriedades mecânicas e da anisotropia do
aço AISI 1006 através de software de análise de imagem**

SÃO PAULO
2021

OTAVIO KIYATAKE NICESIO

**Avaliação das propriedades mecânicas e da anisotropia do
aço AISI 1006 através de software de análise de imagem**

SÃO PAULO
2021

OTAVIO KIYATAKE NICESIO

**Avaliação das propriedades mecânicas e da anisotropia do
aço AISI 1006 através de software de análise de imagem**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica
e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Claudio Geraldo
Schön

SÃO PAULO
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Nicesio, Otavio

Avaliação das propriedades mecânicas e da anisotropia do aço AISI 1006 através de software de análise de imagem / O. Nicesio -- São Paulo, 2021.
56 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Aço AISI 1006 2.Anisotropia 3.Software de análise de imagem
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a minha mãe Aurita que sempre esteve ao meu lado e me incentivou nos momentos mais difíceis, dando toda força necessária para que pudesse concluir mais uma etapa da minha vida.

Dedico a toda minha família por me apoiar incessantemente, em especial minha irmã Aldine, minha tia Sandra e minha avó América, que sempre torceram pelas minhas conquistas.

Dedico ao meu falecido pai Fabio, que embora não esteja presente neste momento, continua sendo minha maior fonte de inspiração. Sua lembrança, que me faz persistir nas dificuldades, nunca será esquecida.

Aos docentes que serão modelos para minha carreira e contribuíram direta e indiretamente para a finalização desse trabalho com os conhecimentos adquiridos no decorrer do curso.

E, por fim, ao Prof. Dr. Claudio Geraldo Schön, por ter me orientado durante todo o processo e pela sua grande compreensão perante minhas dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. Cláudio Geraldo Schön, por sua exímia orientação, compreensão e paciência na orientação deste trabalho, que seria impossível de se completar sem a sua ajuda.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier, que muito me motivou e possui fundamental importância na minha formação técnica em metalurgia, e ao Dr. Antenor Ferreira Filho, por terem se disponibilizado a me prestigiar neste trabalho.

Agradeço também ao funcionário do departamento José Rubens Beserra de Carvalho, que me ajudou na parte prática deste trabalho.

E, por fim, agradeço ao Eng. Daniel Augusto Ferro e à Brasmetal Waelzholz S.A. pelo fornecimento do material utilizado neste trabalho.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King

RESUMO

NICESIO, O. **Avaliação das propriedades mecânicas e da anisotropia do aço AISI 1006 através de software de análise de imagem.** 2021. 55 f. Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

As propriedades mecânicas de uma chapa de aço baixo carbono para estampagem são dependentes, dentre outros fatores, dos parâmetros anisotrópicos do material. Sendo assim sua definição torna-se essencial, pois, em conjunto com parâmetros anisotrópicos, revela a homogeneidade ou a variação de propriedades em determinada chapa de acordo com seu processamento. Estes parâmetros são definidos por ensaios mecânicos padronizados, com o propósito de indicar determinadas propriedades e classificá-las conforme a norma ABNT e normas internacionais aplicadas ao setor metalúrgico. No presente trabalho, foram utilizados nove corpos de prova de tração, divididos em três grupos extraídos dos blanks de estampagem com seu comprimento em orientações diferentes relativa à direção de laminação da chapa (DL), ou seja, três corpos de prova para cada ângulo analisado: 0°, 45° e 90°. Foram gravados em vídeo, ensaios de tração realizados em cada grupo, estimando também propriedades mecânicas na curva tensão-deformação. Com a gravação desses ensaios, foi realizada uma análise via software de análise de imagem para determinar dos parâmetros anisotrópicos (coeficiente de anisotropia plástica, normal e planar).

Palavras-chave: Aço AISI 1006, propriedades mecânicas, anisotropia, software de análise de imagem.

ABSTRACT

NICESIO, O. **Evaluation of mechanical properties and anisotropy of deformed AISI 1006 steel through image analysis software.**2021. 55 f. Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

The mechanical properties of a low carbon steel sheet for drawing applications is dependent, among other factors, on the anisotropic parameters of the material. Therefore, its definition becomes essential, as the anisotropic parameters reveals the homogeneity or the variation of properties in a given blank, according to its processing. These parameters are defined by standard mechanical tests, which have the purpose of indicating certain properties and of classifying them, according to ABNT norm and international norms applied to the metallurgical sector. In the present work, nine tensile specimens were cut out from a single blank and were divided into three orientation groups of the length in relation to the rolling direction (DL), that is, three specimens for each analyzed angle: 0°, 45° and 90°. Tensile tests carried out in each group were video recorded, also estimating mechanical properties in the stress-strain curve. With the recording of these tests, an analysis was performed via image analysis software to determine the anisotropic parameters (plastic anisotropy coefficient, normal and planar).

Keywords: AISI 1006 steel, mechanical properties, anisotropy, image analysis software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura típica (ferrítica) do aço AISI 1006 em estado recozido	16
Figura 2 – Representação de um ensaio de tração.....	18
Figura 3 – Extensômetro mecânico do fabricante Biopdi	19
Figura 4 - Representação esquemática de uma curva $\sigma \times \epsilon$ de ensaio de tração para um material metálico convencional	20
Figura 5 - Representação esquemática da construção gráfica para a determinação do limite de escoamento (com desvio de 0,2%) de um material metálico	23
Figura 6 - Representação esquemática da construção gráfica para a determinação do limite de escoamento (com desvio de 0,2%) de um material metálico	25
Figura 7 - Comparação entre as curvas tensão-deformação convencional (engenharia), real (verdadeira) e corrigida.	27
Figura 8 - Sentidos dos corpos de prova.....	29
Figura 9 - Direção de laminação	30
Figura 10 – Resumo gráfico da relação entre “orelhas” e o ângulo com a DL	31
Figura 11 - Extensômetro de vídeo modelo Epsilon acoplado a uma máquina de ensaio universal	32
Figura 12 – Representação do extensômetro de vídeo em uso	32
Figura 13 – Máquina universal de ensaios EMIC utilizada neste trabalho	36
Figura 14 – Esboço do corpo de prova tipo gravata utilizado no ensaio de tração ...	37
Figura 15 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tração. Todos foram fornecidos marcados pela sua orientação. Nota-se falta de padronização em seus formatos. ...	37
Figura 16 – Instante t_0 (sem deformação). Média do comprimento calculada em: 536,842 pixels.	38
Figura 17 – Resultados obtidos em ensaio de tração nos corpos de prova de chapa de aço AISI 1006. A legenda indica a orientação dos corpos de prova em relação à direção de laminação.	40
Figura 18 – Curva Tensão-Deformação de Engenharia construída a partir dos resultados do ensaio de tração (sem extensômetro).....	42
Figura 19 – Medida do comprimento útil no instante $t = 172,97s$, quando é atingido o limite de resistência à tração.	43

Figura 20 – Visualização do instante em que ocorre a estrição. a) momento antes da estrição e b) momento após a estrição. O quadro desejado está entre ambos.	44
Figura 21 – Ruptura do corpo de prova. a) instante anterior à ruptura e b) instante em que ocorre a ruptura, visualizado através da perda de foco da imagem.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista parcial da denominação normativa ABNT, AISI/SAE.....	15
Tabela 2 - Módulo de rigidez de alguns metais e ligas à temperatura ambiente	22
Tabela 3 – Composição química do aço fornecido.....	35
Tabela 4 - Medições de largura inicial dos corpos de prova no instante t_0 do ensaio (sem deformação).	41
Tabela 5 - Medições de largura final dos corpos de prova no instante $t_{20\%}$ do ensaio (20% de deformação).	41
Tabela 6 - Medições dos limites de escoamento (L.E) e de resistência à tração (L.R) do aço AISI 1006 fornecido em cada orientação	43
Tabela 7 - Medições das propriedades mecânicas do aço AISI 1006 fornecido em cada orientação	45
Tabela 8 – Propriedades mecânicas de um material que atende o grau EEP 2, norma NBR 5915.....	45
Tabela 9 - Medições do coeficiente de anisotropia plástica r para cada corpo de prova	47
Tabela 10 - Resultado dos coeficientes de anisotropia planar Δr e normal r	47

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CIMM	Centro de Informação Metal Mecânica
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP's	Corpos de Prova
DN	Direção Normal
et. al.	Entre outros autores
Fig.	Figura
Graf.	Gráfico
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de resistência à tração
NBR	Norma Brasileira
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{r}	Coeficiente de anisotropia normal
Δr	Coeficiente de anisotropia planar
r	Coeficiente de anisotropia plástica (Lankford)
L	Comprimento
ϵ	Deformação
t	Instante
w	Largura
\ln	Logaritmo neperiano
σ	Tensão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. GENERALIDADES SOBRE O AÇO	14
2.2. AÇOS DE BAIXO CARBONO	15
2.3. AÇO DE BAIXO CARBONO AISI 1006	16
2.4. ESTAMPAGEM PROFUNDA DOS AÇOS DE BAIXO CARBONO	17
2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO	17
2.5.1. Obtenção dos valores de força e deformação	18
2.5.2. Tensão e deformação na tração	19
2.5.3. Região de comportamento elástico	21
2.5.4. Módulo de rigidez	21
2.5.5. Região de comportamento plástico	22
2.5.6. Limite de Escoamento	23
2.5.7. Limite de resistência à tração	24
2.5.8. Alongamento total e uniforme	24
2.5.9. Limite de ruptura.....	25
2.6. Curva tensão-deformação real	25
2.7. ANISOTROPIA.....	27
2.7.1. Anisotropia cristalográfica.....	28
2.7.2. Coeficiente de anisotropia plástica	28
2.7.3. Anisotropia Normal	30
2.7.4. Anisotropia Planar	30
2.8. Extensometria de vídeo.....	31
2.8.1. Princípio.....	32
2.8.2. Aplicações	33
2.8.3. Recursos.....	33

2.8.4. Desempenho no mundo real.....	33
2.9. Software de análise de imagem ImageJ	34
3. MÉTODOS.....	35
3.1. MATERIAIS	35
3.1.1. Aplicações dos aços AISI 1006	35
3.1.2. Condições de fornecimento do aço AISI 1006.....	35
3.2. METODOLOGIA DO ENSAIO DE TRAÇÃO	35
3.3. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE IMAGEM	37
3.4. Metodologia para os parâmetros anisotrópicos	38
4. RESULTADOS	40
4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO	40
4.2. ANÁLISE DE IMAGEM.....	40
5. DISCUSSÃO.....	42
5.1. Propriedades mecânicas do aço AISI 1006	42
5.2. Anisotropia	46
6. CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve por objetivo a avaliação das propriedades mecânicas e dos parâmetros anisotrópicos numa chapa típica de estamparia do aço AISI 1006, através de software de análise de imagem.

Na operação de estampagem, existem muitos tipos de testes e formas de análise para otimizar a produção e torná-la menos suscetível a defeitos. O projetista e o operador de uma prensa, assim como os responsáveis técnicos caracterizam os parâmetros do processo, visando a melhor qualidade. Nesse contexto, para atingir a melhor estampabilidade, é importante que se busque continuamente novas formas de análise.

A análise habitual dos parâmetros anisotrópicos de estampabilidade ocorre durante o ensaio de tração, no qual o corpo de prova retirado de uma chapa deformada numa determinada direção de laminação, é submetido a uma deformação longitudinal máxima entre 10% a 20%, de acordo com a norma ASTM E517-00. Antes do ensaio, são medidas suas dimensões iniciais de largura e espessura com o uso de um instrumento de medida como paquímetro ou micrômetro. Quando a máquina de teste indica que esta deformação longitudinal foi atingida, o corpo de prova é retirado e, então, são medidas novamente suas dimensões. Com o uso desses dados de dimensões finais e iniciais, são calculadas as deformações e, por consequência, os coeficientes de anisotropia.

Outras formas de se analisar tais propriedades, além dos instrumentos de medida convencionais, é diretamente, por meio de instrumentos que calculam a deformação do material durante o ensaio como extensômetros mecânicos ou de vídeo. Nesse caso, com precisão muito maior.

Todavia, há ocasiões em que não é possível utilizar o extensômetro, seja por sua falta ou outras limitações técnicas. Além disso, não sendo prático o método de medição manual com os instrumentos de medida convencionais, é possível a utilização de uma extensometria de vídeo com análise de imagem para a obtenção da deformação no corpo de prova.

No presente trabalho, será desenvolvido um método para simular a extensometria de vídeo, obtendo as deformações no corpo de prova utilizando imagens retiradas das gravações do ensaio pela câmera de um celular comum acoplado na máquina de ensaio e o software de análise de imagem *ImageJ*,

abordando em seguida os coeficientes de anisotropia. A motivação são as possíveis dificuldades advindas da falta do extensômetro e da quantidade limitada de corpos de prova. Por fim, os resultados das propriedades mecânicas e os parâmetros anisotrópicos do material serão comparados com a literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERALIDADES SOBRE O AÇO

Aço é o nome comumente dado a uma liga cujos principais elementos são o ferro e o carbono, mas sempre contendo elementos secundários presentes devido aos processos de fabricação ou para fornecimento de alguma propriedade. O aço contém geralmente entre 0,008% até 2,11% de carbono. O valor de 0,008% corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e o valor de 2,11% depende da presença de elementos de liga no aço, mas corresponde ao limite de solubilidade máximo de carbono na fase cúbica de corpo centrado (CFC) (SCHEER, 1977).

Existem várias entidades que estabelecem normas para classificação dos aços de acordo com o teor de carbono e elementos de liga. Uma das classificações mais generalizadas é a que considera a composição química dos aços, como a da *American Iron and Steel Institute* (AISI) e da *Society of Automotive Engineers* (SAE).

A designação normativa dessas entidades estabelece uma chave alfanumérica para a identificação dos aços, que segue o seguinte critério:

yyAxxB

Em que:

yy - tipo de aço (ao carbono, ao manganês, ao cromo etc...)

A - acréscimo de elementos de liga especiais (acrescentar quando aplicável)

Aços ao boro – xyBxx: B denota aço ao Boro

Aços ao chumbo – xxLxx : L denota aço ao Chumbo

Aços ao vanádio – xxVxx : V denota aço ao Vanádio

xx - percentual de carbono contido no aço x 100

B - requisitos adicionais de qualidade (temperabilidade) (acrescentar quando aplicável)

Na Tabela 1, são mostradas algumas dessas classificações.

Tabela 1 - Lista parcial da denominação normativa ABNT, AISI/SAE

Chave numérica	Tipo de aço
10xx	Aço carbono
11xx	Aço Ressulfurado
12xx	Aço Ressulfurado e refosforizado
13xx	Aço manganês Mn 1.75%
23xx	Aço níquel Ni 3.50%
25xx	Ni 5.00%
31xx	Aço níquel cromo Ni 1.25% ; Cr 0.65 e 0.80%
32xx	Ni 1.75% ; Cr 1.07%
33xx	Ni 3.50% ; Cr 1.50% e 1.57%
34xx	Ni 3.00% ; Cr 0.77%
40xx	Aço molibdênio Mo 0.20 e 0.25%
44xx	Mo 0.40 e 0.52%
41xx	Aço cromo molibdênio Cr 0.50, 0.80 e 0.95% ; Mo 0.12 , 0.20 , 0.25 e 0.30%
43xx	Aço níquel cromo molibdênio Ni 1.82%; Cr 0.50 e 0.80% ; Mo 0.25% 43xx
47xx	Ni 1.05%; Cr 0.45%; Mo 0.20 e 0.35%
81xx	Ni 0.30%; Cr 0.40%; Mo 0.12%
86xx	Ni 0.55%; Cr 0.50%; Mo 0.20%
87xx	Ni 0.55%; Cr 0.50%; Mo 0.25%
88xx	Ni 0.55%; Cr 0.50%; Mo 0.35%
93xx	Ni 3.25%; Cr 1.20%; Mo 0.12%
94xx	Ni 0.45%; Cr 0.40%; Mo 0.12%
97xx	Ni 0.55%; Cr 0.20%; Mo 0.20%
98xx	Ni 1.00%; Cr 0.80%; Mo 0.25%
46xx	Aço níquel molibdênio Ni 0.85 e 1.82%; Mo 0.20 e 0.25%
48xx	Ni 3.50% ; Mo 0.25%
50xx	Aços cromo Cr 0.27, 0.40, 0.50 e 0.65%
51xx	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 e 1.05%
52xx	Cr 1.45% ; C 1.00% min
61xx	Aço cromo vanádio Cr 0.60, 0.80 e 0.95% ; V 0.10 e 0.15%
72xx	Aço cromo tungstênio W 1.75 ; Cr 0.75%

Fonte: Infomet, 1998

2.2. AÇOS DE BAIXO CARBONO

Os aços de baixo carbono são o material metálico mais produzido no mundo. Seu segmento de maior importância no âmbito econômico é a estampagem, em particular a estampagem profunda (SIMIÃO, 2011). Contém, na maioria dos casos, um teor de carbono menor que 0,1% aproximadamente, sendo sua microestrutura constituída por ferrita e perlita. A liga possui relativamente baixa dureza e resistência, mas alta ductilidade e tenacidade. Suas aplicações típicas consistem em componentes de carcaças de automóveis, formas estruturais (vigas, canaletas e cantoneiras) e chapas que são usadas em tubulações, edificações, pontes e latas estanhadas (CALLISTER, 2012).

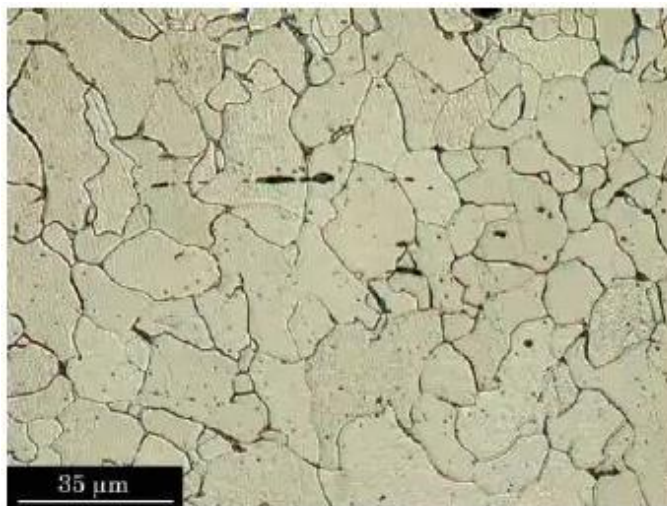
De acordo com Simião (2011, p. 22)

No Brasil e em muitos países, bobinas laminadas a quente, com espessura na faixa de aproximadamente 2 a 10 mm, são fornecidas para as empresas relaminadoras. O processamento nas empresas relaminadoras envolve etapas de decapagem, corte e laminação a frio, recozimento e em muitos casos, tratamentos de superfície tais como galvanização, cobreamento e niquelação, entre outros.

2.3. AÇO DE BAIXO CARBONO AISI 1006

O aço de baixo carbono AISI 1006 é amplamente utilizado em operações de estampagem profunda, aplicado em perfis, tubos soldados, fitas relaminadas, peças estampadas e componentes industriais de baixa resistência. Esta série de aços representa uma grande parcela na cadeia produtiva nos mais diversos segmentos de aplicações existentes no mundo (SIMIÃO, 2011). Sua microestrutura é ferrítica com grãos tipicamente equiaxiais (COLPAERT, 2009), conforme visto na Figura 1.

Figura 1 - Microestrutura típica (ferrítica) do aço AISI 1006 em estado recozido



Fonte: Ouba e Yamashiro, 2013

O processo de produção dos aços da série SAE 1006 é realizado em usinas integradas, numa mesma planta e em três fases: a redução, o refino, o lingotamento e posteriormente a laminação (SILVA; MEI, 2006).

2.4. ESTAMPAGEM PROFUNDA DOS AÇOS DE BAIXO CARBONO

Estampagem profunda ou repuxo é o processo de estampagem em que as chapas metálicas são conformadas na forma de copo, ou seja, um objeto oco. As aplicações mais comuns correspondem à fabricação de cápsulas, carrocerias e pára-lamas de automóveis, estojos, latas para armazenagem de bebidas, etc (FREITAS, 2003).

Durante a operação de repuxo o material (chapa) sofre esforços de compressão (nas bordas da matriz) e esforços de estiramento. Um elemento importante no estampo repuxador é o sujeitador (disco de retenção), que tem a função de garantir uma conformação regular, com bom acabamento (POLACK, 1976).

Três fatores principais regulam o comportamento de uma chapa na estampagem: grau de anisotropia, coeficiente de encruamento e qualidade de superfície (PERO-SANZ, et al. 1999), sendo apenas o grau de anisotropia analisado neste trabalho.

2.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

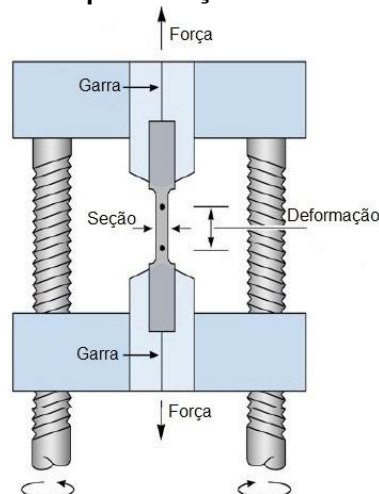
Consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura.

Segundo Callister (2012, p.79)

Normalmente a seção reta é circular, porém corpos de prova retangulares também são usados. Durante os ensaios, a deformação fica confinada a região central, mais estreita do corpo de prova, que possui uma seção reta uniforme ao longo do seu comprimento. O corpo de prova é preso pelas suas extremidades nas garras de fixação do dispositivo de testes. A máquina de ensaios de tração alonga o corpo de prova a uma taxa constante, e também mede contínua e simultaneamente a carga (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes (com um extensômetro). Tipicamente, um ensaio de tensão-deformação leva vários minutos para ser executado e é destrutivo, isto é, até a ruptura do corpo de prova.

Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido às vantagens de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, entre as principais, destacam-se o limite de resistência à tração (σ_u), limite de escoamento (σ_e), módulo de rigidez (E), módulo de resiliência (U_r), módulo de tenacidade (U_t), ductilidade, coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k) (GARCIA; SPIM, 2000).

Figura 2 – Representação de um ensaio de tração



Fonte: Biopdi, 2021

2.5.1. Obtenção dos valores de força e deformação

A força aplicada durante o ensaio de tração é medida instantaneamente através de uma célula de carga, enquanto a deformação é medida através do *encoder* do equipamento ou pelo uso de extensômetros. Caso o extensômetro não seja utilizado, a deformação é medida através do movimento da travessa móvel da máquina de ensaio, considerando não só o alongamento da amostra, mas também as deformações elásticas de todo o sistema (máquina, a célula, os elementos de fixação) (BIOPDI, 2021).

No geral, os extensômetros podem ser divididos em dois tipos: extensômetros de contato e sem contato. Entre os extensômetros de contato, os mais comuns são os mecânicos (Figura 3), que medem o alongamento através do afastamento entre suas pontas, e os elétricos que funcionam pela variação de tensão elétrica causada pela deformação da amostra (CIMM, 2012).

Figura 3 – Extensômetro mecânico do fabricante Biopdi



Fonte: Biopdi, 2021

Os extensômetros sem contato foram desenvolvidos com o passar do tempo pelos fabricantes de sistemas de testes de materiais, no intuito de eliminar possíveis erros do operador e a influência devido ao contato com amostras pequenas e frágeis. Neste contexto, os extensômetros baseados em laser foram um dos primeiros dispositivos a aparecer, normalmente utilizados para materiais que podem ser danificados pelo extensômetro de contato. No geral, são menos precisos para deformações muito baixas. Sua operação se dá pela difração de luz monocromática: a superfície do corpo de prova é iluminada com um laser, ocorrendo a captura dos reflexos do laser à medida que a força é aplicada. As reflexões são medidas com o uso de um software avançado (AMETEK INC, 2015).

2.5.2. Tensão e deformação na tração

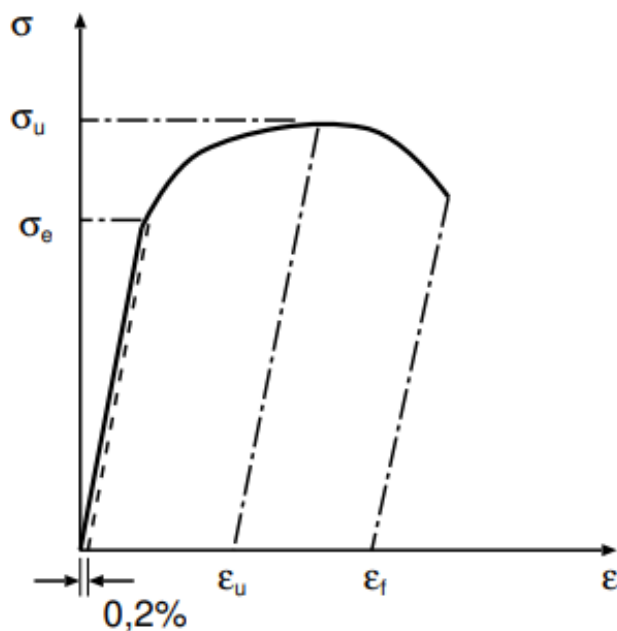
Tensão é definida genericamente como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele por unidade de área. Mais claramente, a tensão corresponde à força dividida pela área da seção sobre a qual a força é aplicada. Enquanto isso, deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer (SOUZA, 1982).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

Aplicando a Equação (1) descrita acima, pode se encontrar os valores da tensão e construir o gráfico conhecido como tensão-deformação. Na Figura 4, é representada a curva e os principais parâmetros obtidos dela, sendo eles:

- O limite de escoamento (yield stress, σ_e)
- O limite de resistência (ultimatetensile stress, σ_u) ^
- O alongamento uniforme (ϵ_u)
- O alongamento total (ϵ_f)

Figura 4 - Representação esquemática de uma curva $\sigma \times \epsilon$ de ensaio de tração para um material metálico convencional



Fonte: Schön, 2013

A curva pode ser dividida em duas regiões: a região de regime elástico e a região de regime plástico.

2.5.3. Região de comportamento elástico

Até este ponto, assume-se que a deformação elástica é independente do tempo, ou seja, quando uma carga é aplicada, a deformação elástica permanece constante durante o período em que a carga é mantida constante. Também é assumido que após a remoção da carga, a deformação é totalmente recuperada, ou seja, a deformação imediatamente retorna para o valor zero. Na fase elástica os metais obedecem a Lei de Hooke. Suas deformações são diretamente proporcionais às tensões aplicadas (SOUZA, 1982).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

A constante de proporcionalidade E, módulo de Young ou módulo de rigidez, fornece uma indicação da rigidez do material. Quanto maior for o módulo, menor será deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão.

A deformação convencional ou de engenharia é dada pela Equação (3) (SCHÖN, 2013).

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3)$$

Onde: l_0 = comprimento inicial;

l = comprimento final para cada carga aplicada.

2.5.4. Módulo de rigidez

O valor de E é constante para cada metal ou liga metálica. Valores aproximados desse módulo para alguns metais e ligas são dados na Tabela 2. Para determiná-lo, basta aproximar dois pontos da região elástica e calcular a inclinação da reta que os une, embora num ensaio sem extensômetro haverá um erro associado à deformação da máquina de ensaio (SOUZA, 1982).

Tabela 2 - Módulo de rigidez de alguns metais e ligas à temperatura ambiente

Metal	Módulo de rigidez (kgf./mm ²)	Liga	Módulo de rigidez (kgf./mm ²)
Ferro, níquel, cobalto	21 000	Aços-carbono e aços-liga em geral	21 000
Molibdênio, tungstênio	35 000	Aços-inoxidáveis austeníticos	19 600
Cobre	11 900	Ferro fundido nodular	14 000
Alumínio	7 000	Bronzes e latões	7 700-11 900
Magnésio	4 550	Bronzes de manganês e ao Silício	10 500
Zinco	9 800	Bronzes de alumínio	8 400-13 300
Zircônio	10 150	Ligas de alumínio	7 000-7 450
Estanho	4 200	Monel (liga de níquel)	13 000-18 200
Berílio	25 700	Hastelloy (liga de níquel)	18 900-21 500
Ósmio	56 000	Invar (liga níquel-ferro)	14 000
Titânio	10 000	Inconel (liga de níquel)	16 000
Chumbo	1 750	Illium (liga de níquel)	18 700
Rádio	29 750	Ligas de titânio	11 200-12 100
Nióbio	10 500	Ligas de magnésio	4 550
Ouro, prata	7 850	Ligas de estanho	5 100-5 400
Platina	15 800	Ligas de chumbo	1 400-2 950

Fonte: Souza, 1982

2.5.5. Região de comportamento plástico

Nesta região, existem dois limites importantes para a caracterização das propriedades de um material. Durante o ensaio de tração, conforme a tensão aumenta, a região de comportamento elástica é superada e os materiais começam a se deformar plasticamente, ou seja, deformam-se de modo permanente. O ponto na qual estas deformações permanentes começam a se tornar significativas é chamado de limite de escoamento. Já o limite de resistência à tração é a máxima tensão na curva tensão-deformação de engenharia. Toda a deformação até este ponto é uniforme na seção. No entanto, após este ponto, começa a se formar uma estricção, na qual toda a deformação subsequente está confinada e, é nesta região que ocorrerá ruptura. A tensão corresponde à fratura é chamada de limite de ruptura (SOUZA, 1982).

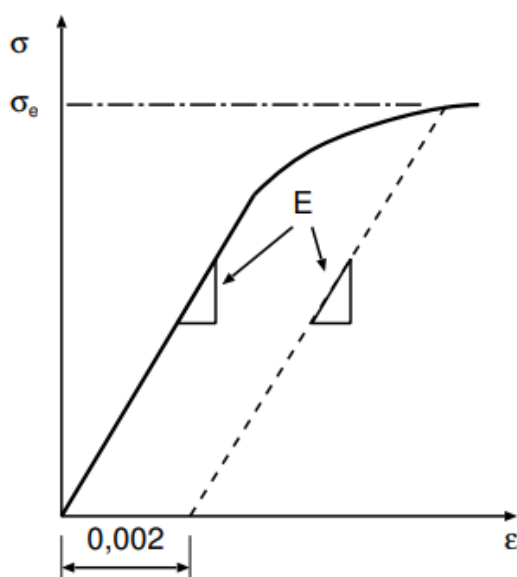
2.5.6. Limite de Escoamento

O limite de escoamento fornece uma estimativa da máxima tensão suportada pelo material sem que este apresente deformação plástica apreciável. Esse parâmetro substitui o limite de proporcionalidade, muito complexo, que é o limite a partir do qual deixa de valer a lei de Hooke. Em casos genéricos, o limite de escoamento é determinado a partir de um critério subjetivo como o valor da tensão que resulta numa quantidade definida de deformação permanente após o descarregamento (usualmente, $\epsilon = 0,002$) (SCHÖN, 2013).

Na Figura 5, está esquematizado o procedimento para medir o limite de escoamento. O valor da deformação residual (neste caso 0,2%) deve ser informado e indicado, por exemplo, e seguindo a norma ASTM A370-90 como: “limite de escoamento (0,2% de desvio) = 120 MPa.

É importante ressaltar que o limite de escoamento é uma propriedade consideravelmente insensível à geometria do corpo de prova utilizado e as condições do ensaio. Se o ensaio é executado com ou sem extensômetro, o limite de escoamento obtido é praticamente o mesmo, pois os erros associados à determinação da deformação do corpo de prova devidos à desconsideração da deformação da máquina são cancelados no esquema da Figura 5, pois são de natureza elástica (SCHÖN, 2013).

Figura 5 - Representação esquemática da construção gráfica para a determinação do limite de escoamento (com desvio de 0,2%) de um material metálico



Fonte: Schön, 2013

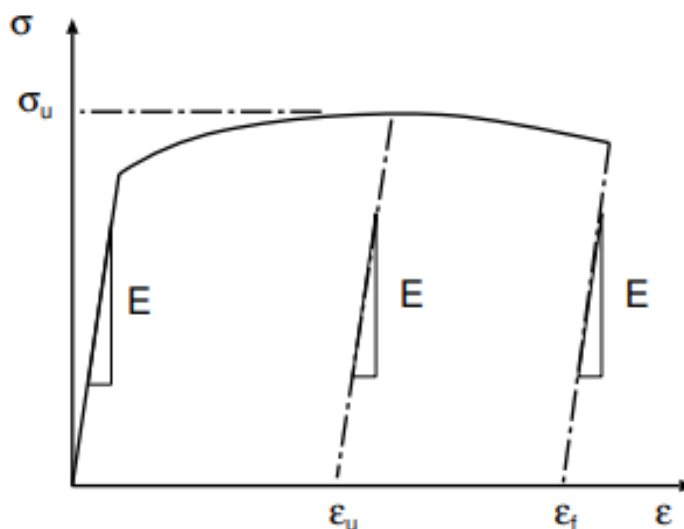
2.5.7. Limite de resistência à tração

Durante o ensaio, após o escoamento, ocorre o endurecimento causado pela contínua deformação plástica a frio (encruamento). O material resiste à tração de modo que a tensão para deformá-lo se torna cada vez maior. É nessa fase que a tensão começa a subir até atingir um valor máximo, chamado de limite de resistência à tração. Esta é a tensão correspondente ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio (SOUZA, 1982).

2.5.8. Alongamento total e uniforme

Os alongamentos são deformações plásticas e, portanto, devem ser calculados desconsiderando a quantidade de deformação elástica, conforme Figura 6. O alongamento uniforme, ϵ_u , corresponde ao limite de resistência, marcando o limite máximo para ocorrência de deformação homogênea no corpo de prova. Em tensões acima do limite de resistência, começa a ocorrer o fenômeno de estricção, uma instabilidade plástica caracterizada pela redução da área transversal da seção do corpo de prova, levando-o à fratura. A determinação de ϵ_u é difícil e imprecisa, porque a curva obtida na máquina de ensaio é muito plana próxima ao máximo. Enquanto isso, o alongamento total, ϵ_f , pode ser facilmente determinado após o ensaio de tração ao se juntar as duas metades do corpo de prova fraturado e medindo seu comprimento, geralmente, coincidindo com o valor calculado pela máquina. Possui grande importância para mensurar a ductilidade de um material (SCHÖN, 2013).

Figura 6 - Representação esquemática da construção gráfica para a determinação do limite de escoamento (com desvio de 0,2%) de um material metálico



Fonte: Schön, 2013

2.5.9. Limite de ruptura

Continuando a tração do corpo de prova, chega-se à ruptura do material, no chamado Limite de Ruptura. Nota-se que a tensão no limite de ruptura é menor do que no limite de resistência, devido à diminuição de área que acontece no corpo de prova depois que se atinge a carga máxima.

2.6. Curva tensão-deformação real

As propriedades mecânicas mais comuns definidas anteriormente são usadas para avaliar e especificar as propriedades dos metais. Entretanto, os resultados obtidos são valores sujeitos a erros, porque são baseados na seção inicial do corpo-de-prova, dimensões estas que se alteram à medida que o ensaio prossegue. Entretanto, na zona elástica, principalmente para os metais dúcteis, onde a deformação é pequena, esses valores podem ainda ser considerados. Assim, a curva convencional tensão-deformação não fornece uma indicação precisa das características de deformação do metal, principalmente nos metais dúcteis, onde ocorre ainda a estricção que instabiliza completamente a distribuição das deformações pelo estado triplo de tensões que se estabelece na região estrita (SCHÖN, 2013).

A tensão verdadeira ou real é definida como o quociente entre a carga em qualquer instante e a área da seção transversal do corpo-de-prova no mesmo instante, A_i , isto é:

$$\sigma_v = \frac{P}{A_i} \quad (4)$$

A deformação verdadeira ou real é baseada na mudança do comprimento com relação à sua medida instantânea (l_i), em vez do comprimento inicial de medida.

$$\varepsilon_v = \ln \frac{l_i}{l_o} \quad (5)$$

Observa-se que a tensão verdadeira é maior que a tensão convencional, mesmo porque a área da seção transversal diminui após a aplicação de uma carga na zona plástica.

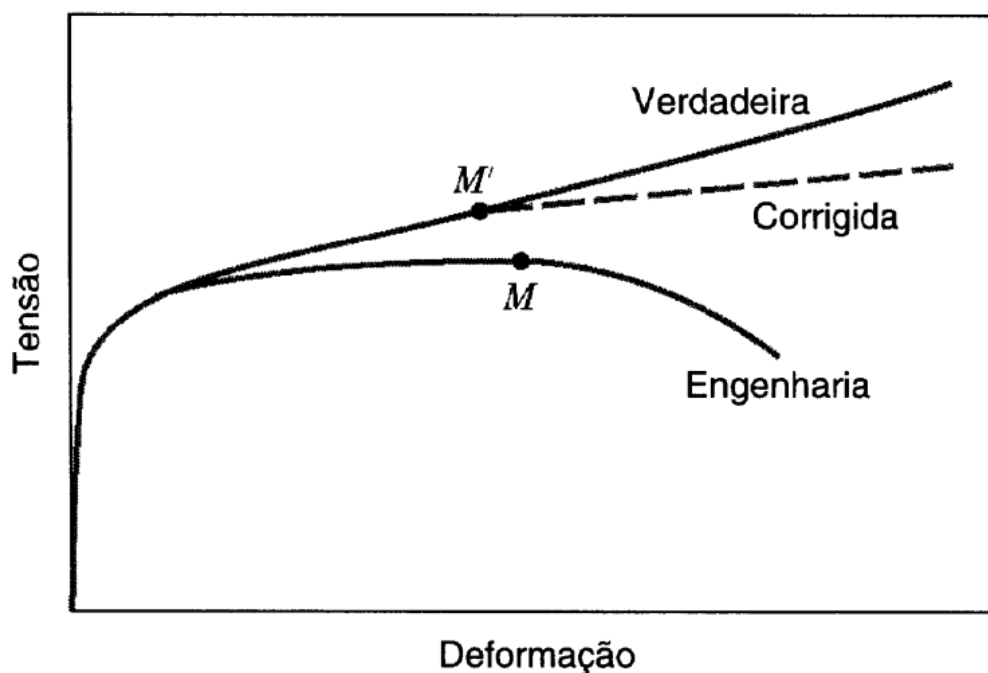
As relações entre a tensão e deformação verdadeiras com tensão e deformações convencionais são dadas pelas seguintes equações, válidas até o início do empescoçamento (pontos M e M' na Figura 7):

$$\sigma_v = \sigma (1 + \varepsilon) \quad (6)$$

$$\varepsilon_v = \ln (1 + \varepsilon) \quad (7)$$

A Figura 7 compara a curva tensão-deformação real e convencional. A curva corrigida leva em consideração a existência de um estado tensão-deformação diferenciado na região de empescoçamento.

Figura 7 - Comparação entre as curvas tensão-deformação convencional (engenharia), real (verdadeira) e corrigida.



Fonte: Pedrini, 2021

2.7. ANISOTROPIA

Anisotropia é a característica de um material de apresentar diferentes propriedades a partir da variação na direção em que essas são medidas. Esse aspecto da anisotropia é caracterizado por uma textura cristalográfica, obtida por meio da deformação e do alongamento sofrido pelos grãos durante determinada operação. O coeficiente de anisotropia r é aquele que define os outros (com exceção do coeficiente de encruamento). Sua medição se baseia na deformação ocorrida tanto na largura como na espessura (CIMM, 2012).

Um destes outros coeficientes é o de anisotropia normal, que é de grande utilidade na estampagem de uma chapa, visto que durante tal procedimento, os grãos se alongam para uma orientação preferencial, em direção específica causada pela textura provinda de processos anteriores, como a laminação e o recozimento. Para seu cálculo, são necessárias as medições dos coeficientes r em direções definidas por ângulos diferentes.

O coeficiente de encruamento, basicamente, é definido pela deformação uniforme de certo material, até que ocorra sua estricção. É dado por um cálculo mais complexo, que não será abordado neste trabalho.

O coeficiente de anisotropia planar tem o diferencial de referir-se às diferenças de uma chapa deformada, utilizando um plano como referência. Também é calculado em função do coeficiente de anisotropia r , mas é recomendável que tenha baixos valores, devido a ser um determinante na formação de “orelhas de estampagem”.

2.7.1. Anisotropia cristalográfica

O processo de estampagem de chapas é diretamente influenciada tentativa de obtenção de um material com extrema característica de estampabilidade. Essa propriedade depende de ensaios de tração (no qual se obtém o limite de escoamento e de resistência, a razão elástica, o alongamento total até a fratura, o coeficiente de encruamento, os coeficientes de anisotropia normal e planar), de ensaios de dureza, da medida da rugosidade do material, da metalografia, entre outros fatores. Os coeficientes entre parênteses descrevem outra característica chamada de anisotropia, que é a variação de propriedades físicas de um material conforme a direção. O oposto da anisotropia é a isotropia, quando se pode dizer que as propriedades direcionais de um ponto do material representam as propriedades direcionais de toda a estrutura (CIMM, 2012).

2.7.2. Coeficiente de anisotropia plástica

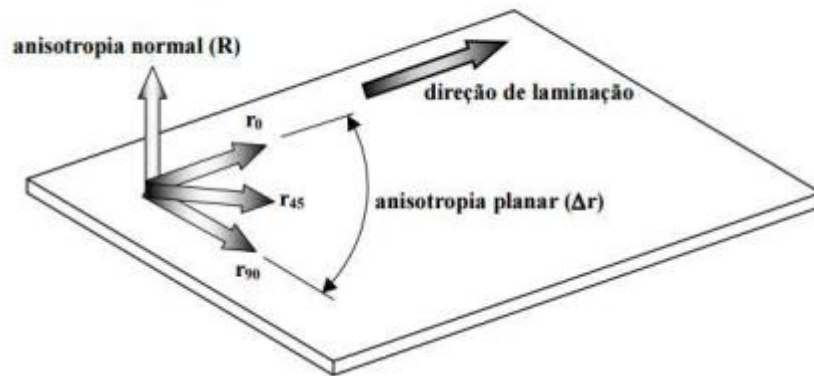
Segundo ASTM (2010), o coeficiente de anisotropia plástica (r) é um parâmetro que indica a capacidade de uma chapa de metal em resistir à deformação na espessura quando sujeita a forças de tração ou compressão no plano da chapa, e está relacionada às orientações cristalográficas preferenciais dentro um metal policristalino. Esse coeficiente, além de ser um dos principais determinantes da anisotropia, também será responsável por participar das fórmulas matemáticas do coeficiente planar e do normal.

Por definição, r representa a razão entre a deformação verdadeira na largura (ϵ_w) e na espessura (ϵ_t) de um corpo de prova de tração, após uma deformação longitudinal pré-definida. ϵ_w é calculada por $\ln(w_f/w_o)$, enquanto ϵ_t por $\ln(t_f/t_o)$.

A norma ASTM E517 determina um método de ensaio para realizar a medição do coeficiente de anisotropia plástica em laminados metálicos, voltados a

aplicações em estampagem profunda (ASTM, 2010). Por comumente haver erros nas medições da espessura, há como alternativa utilizar um cálculo com o comprimento da peça.

Figura 8 - Sentidos dos corpos de prova



Fonte: Santos, 2017

Coeficiente de anisotropia ou de Lankford:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (8)$$

Por erros na medição de ε_t , e como $\Delta V = 0$, usa-se:

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_w + \varepsilon_l) \quad (9)$$

$$r = \frac{-\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_l} \quad (10)$$

$$Our = \frac{\ln(w_0/w_f)}{\ln(l_f w_f / l_0 w_0)} \quad (11)$$

ε_l é a deformação verdadeira ao longo do comprimento.

2.7.3. Anisotropia Normal

A anisotropia normal indica a habilidade de certa chapa metálica resistir ao afinamento, quando submetida a forças de tração e/ou compressão, no plano.

Coeficiente de anisotropia normal

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (12)$$

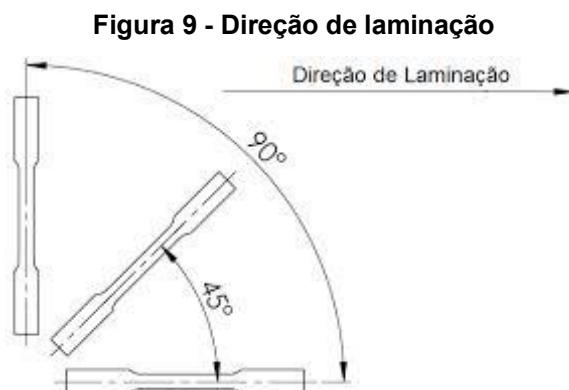
É, portanto, o mais importante dos parâmetros analisados, tendo em vista que designará o aspecto mais crítico de um processo de estampagem. Para que isso fique claro, basta conjecturar que uma chapa sendo estampada não pode perder espessura ao sofrer a ação do punção, mas em contrapartida, seu material deve atingir uma alta altura de copo.

2.7.4. Anisotropia Planar

A anisotropia planar tem a função de medir a variação planar na direção longitudinal e transversal de laminação.

Coeficiente de anisotropia planar

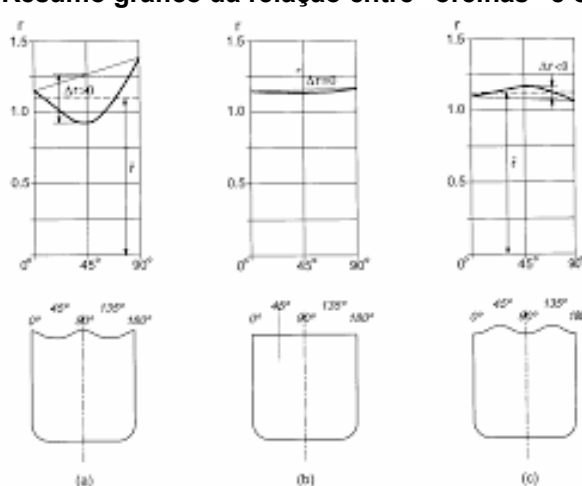
$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (13)$$



Fonte: Fabricio, 2015

De acordo com o resultado obtido, tem-se a probabilidade e a tendência do aparecimento de orelhas durante a estampagem. Δr alto representa que o material tem alta variação em seu plano, como visto na fórmula que possui no numerador o valor da diferença entre os sentidos 0° , 90° e 45° . Um resultado negativo de anisotropia planar indica maiores tendências à formação de orelhas na direção de 45° . Quando positivo, nas direções de 0° e 90° .

Figura 10 – Resumo gráfico da relação entre “orelhas” e o ângulo com a DL



Fonte: EEL – USP (2021)

Os valores de r podem ser plotados com função do ângulo. Então Δr é a diferença entre r_{45} e a média dos valores de r_0 e r_{90} .

2.8. Extensometria de vídeo

Um extensômetro de vídeo (Figura 11) é um dispositivo de medição de deformação sem contato que não contribui com nenhuma influência sobre o espécime que está sendo testado. Essa tecnologia funciona bem para testes nos quais o alongamento e variação da medição da seção são necessários e testes onde o alongamento transversal e os valores de r (coeficiente de anisotropia plástica) e n (coeficiente de encruamento) são necessários. Nos testes em metais, é possível ainda calcular módulo de rigidez, coeficiente de Poisson, deformação na ruptura, limite de escoamento e outros valores calculados automaticamente pelo software.

Figura 11 - Extensômetro de vídeo modelo Epsilon acoplado a uma máquina de ensaio universal



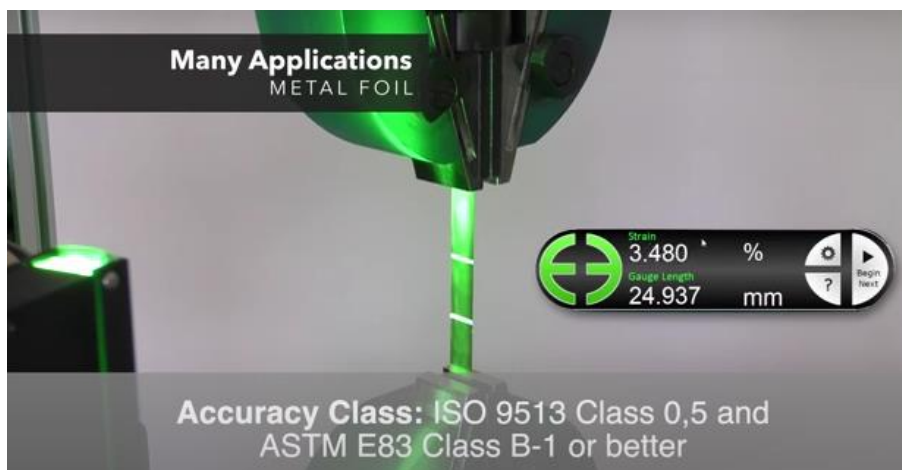
Fonte: EPSILON TECHNOLOGY, 2021

Os extensômetros de vídeo mais recentes são uma substituição atraente para extensômetros mecânicos, ópticos e elétricos, pois seus benefícios em comparação com os extensômetros de contato são muitos: não exercem influência na amostra de teste, não possuem erros devido à inércia das peças móveis ou devido a peças desgastadas e nenhum dano é causado no equipamento pela liberação de energia na fratura (TINIUS OLSEN, 2019).

2.8.1. Princípio

O equipamento faz uso de uma câmera digital de alta resolução que transfere os dados para um PC ou laptop com processamento em tempo real. A deformação longitudinal é determinada medindo a mudança na distância entre duas linhas retas marcadas no corpo de prova com tinta, marcadores de cor ou adesivos conforme a Figura 12.

Figura 12 – Representação do extensômetro de vídeo em uso



Fonte: EPSILON TECHNOLOGY, 2021

O extensômetro de vídeo determina a posição dos marcadores por meio de mudanças no brilho das bordas dos próprios marcadores. A câmera digitaliza a imagem e os algoritmos de análise de imagem medem a mudança na escala de cinza ao longo de uma linha da imagem na superfície do corpo de prova. Esses algoritmos permitem que o instrumento meça as posições das bordas com precisão de subpixel. Os dados são então enviados para a máquina de teste por uma interface digital ou analógica (TINIUS OLSEN, 2019).

2.8.2. Aplicações

A tecnologia do extensômetro de vídeo possui vasta gama de aplicação, desde materiais rígidos, como metais e compósitos, até polímeros e fibras têxteis.

2.8.3. Recursos

A tecnologia utilizada na extensometria de vídeo da nova geração é extremamente avançada, possuindo interfaces de usuário modernas e configuráveis, com processadores multi-core, de modo que conectá-lo a uma máquina de teste de tração permite uma operação totalmente automática. Além disso, sistemas de câmeras múltiplas permitem a medição simultânea de diferentes lados da amostra em até 360°, para obter um módulo E preciso e curvas de tensão-deformação completas (TINIUS OLSEN, 2019).

Dependendo do tipo de câmera (alta precisão versus alta velocidade), o VE é capaz de taxas de amostragem e precisão significativamente diferentes. Com uma câmera de 2 megapixels de alta precisão, a precisão é 0,002% de deformação (1 μm) e uma taxa de amostragem é de até 100Hz.

2.8.4. Desempenho no mundo real

Entre todos os tipos de extensômetro, o de vídeo é o mais versátil. Com ele, o laboratório pode realizar testes cujas medidas sejam de apenas alguns milímetros com precisão de 0,1 μm até 100 milímetros com apenas duas distâncias focais. Este

tipo de equipamento também é compatível com todas as máquinas de teste de tração de laboratório (TINIUS OLSEN, 2019).

2.9. Software de análise de imagem ImageJ

O ImageJ é um software para processamento e análise de imagens, utilizado para processar, salvar e imprimir imagens de 8, 16 e 32 bits. Foi desenvolvido por Wayne Rasband no National Institute of Mental Health, USA, em linguagem Java. Ele pode ler muitos formatos de imagem, incluindo TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS, além de calcular estatísticas de área e valor de pixel de seleções definidas pelo usuário. Também mede distâncias e ângulos, além de criar histogramas de densidade e gráficos de perfil de linha. Possui funções de processamento, como manipulação de contraste, nitidez, suavização, detecção de bordas e filtragem mediana (RASBAND; FERREIRA, 2012).

3. MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para o experimento, foi utilizado o aço AISI 1006 que é um dos aços carbono mais utilizados e de grande aplicabilidade, possuindo boa soldabilidade e estampabilidade, baixa resistência mecânica e usinabilidade. A composição química do aço utilizado se encontra na Tabela 3 e foi obtida pela empresa fornecedora.

Tabela 3 – Composição química do aço fornecido

Composição Química	
C	0,03%
Mn	0,217%
P	0,013%
S	0,0099%
N	0,0019%

Fonte: Brasmetal Waelzholz S.A.

3.1.1. Aplicações dos aços AISI 1006

É aplicado em produtos semi-acabados para trabalho a quente e a frio, como estampagem extra-profunda e laminação de produtos não planos.

3.1.2. Condições de fornecimento do aço AISI 1006

O material desta pesquisa, AISI 1006, foi fornecido pela empresa Brasmetal Waelzholz S.A, relaminado para atender repuxo profundo, e seu processamento foi feito para atender o grau EEP grau 2, conforme norma NBR 5915. A bitola de partida do material foi de 2 mm e sua espessura final de 0,6 mm.

3.2. METODOLOGIA DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT-USP), utilizando a

máquina universal de ensaios modelo EMIC. Um telefone celular foi acoplado à máquina para que sua câmera gravasse os ensaios.

Figura 13 – Máquina universal de ensaios EMIC utilizada neste trabalho

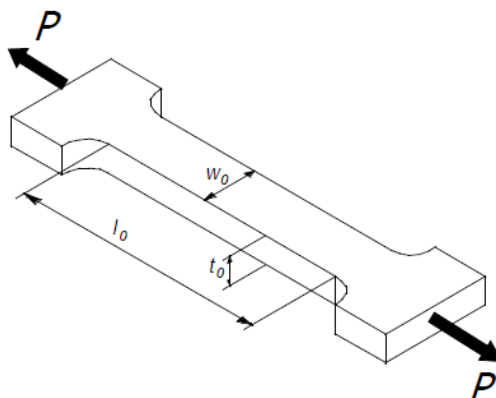


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

As propriedades mecânicas como limite de escoamento e limite de resistência de cada uma das orientações foram obtidas pelo ensaio de tração através da medida da força. O software da máquina entrega como resultado o tempo de ensaio, a deformação total do sistema e a força em cada instante. Os ensaios foram conduzidos segundo a norma ASTM E517-00, mantendo-se uma taxa de deformação constante de 6,00 mm/min até os 20% de alongamento com o rompimento do material ao final do ensaio.

O comprimento total dos corpos-de-prova foi de 250 mm, espessura de 0,6 mm e largura inicial de 20 mm, mas nem todos vieram padronizados, com pequenas diferenças de tamanho entre eles (Figura 15).

Figura 14 – Esboço do corpo de prova tipo gravata utilizado no ensaio de tração



Fonte: Fabricio, 2015

Figura 15 – Corpos de prova utilizados no ensaio de tração. Todos foram fornecidos marcados pela sua orientação. Nota-se falta de padronização em seus formatos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

3.3. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE IMAGEM

O software de análise utilizado foi o ImageJ. Cada imagem analisada no software foi retirada de um instante t_x , sendo x a deformação naquele instante. No instante t_0 (sem deformação) da gravação, três linhas para medir o comprimento útil do corpo de prova em pixels. O comprimento útil inicial, L_0 , calculado pelo software será então a média desses três comprimentos de linha. Um exemplo está representado na Figura16.

Figura 16 – Instante t_0 (sem deformação). Média do comprimento calculada em: 536,842 pixels.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Diretamente no software, foi fixado para determinado corpo de prova uma escala de pixels para milímetros. Todos os corpos de prova foram riscados, demarcando um comprimento útil, conforme norma ASTM E517-00, de 50 mm. Desse modo, utilizando o corpo de prova da Figura 17 como exemplo, o cálculo da escala ficaria como representado abaixo:

$$\frac{536,842 \text{ pixels}}{50 \text{ mm}} \sim 1 \text{ mm} : 10,74 \text{ pixels}$$

Com a escala já definida, a gravação é avançada e são retiradas diversas imagens em instantes diferentes. Para cada uma dessas imagens obteve-se a média do comprimento útil, encontrando-se o instante $t_{20\%}$ em que o comprimento equivale a 60 mm, ou seja, 20% de deformação longitudinal. Na imagem em que o instante mostra a deformação de 20%, obtém-se por método análogo a média da largura.

Desse modo, para qualquer instante do ensaio é possível calcular a largura e o comprimento útil.

3.4. Metodologia para os parâmetros anisotrópicos

Com os dados obtidos dos ensaios de tração acima relatados pode-se construir a curva verdadeira de tensão-deformação de cada material, os ensaios

foram realizados em todas as chapas dos dois grupos, visando a obtenção dos dados necessários para o estudo da anisotropia.

As medidas do comprimento, espessura e a largura inicial em conjunto com as medidas após o ensaio permitem os cálculos dos índices de anisotropia utilizando as equações (11), (12) e (13), sendo que os corpos-de-prova sofreram 20% de alongamento para a obtenção das medidas.

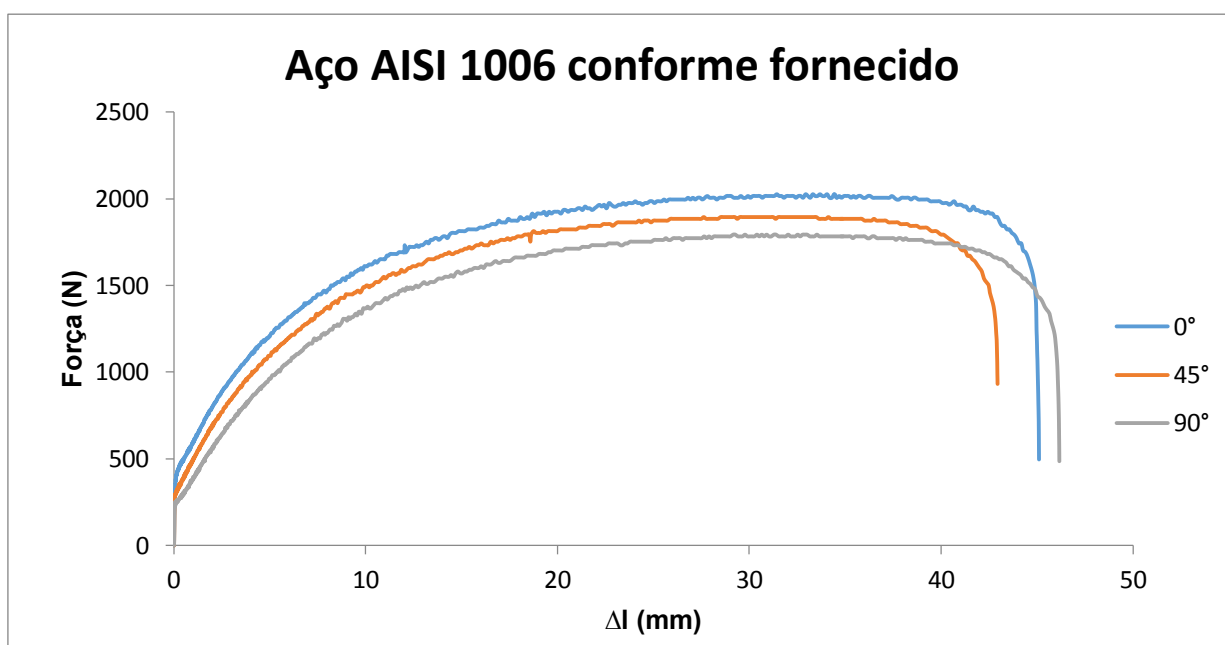
4. RESULTADOS

4.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

A Figura 17 resume os resultados obtidos nos ensaios de tração realizado em cada corpo de prova de aço AISI 1006 na condição fornecida e nas três orientações relativas à direção de laminação (0° , 45° e 90°).

Nota-se que não houve uso do extensômetro no ensaio, por isso os valores de Δl devem ser desconsiderados.

Figura 17 – Resultados obtidos em ensaio de tração nos corpo de prova de chapa de aço AISI 1006. A legenda indica a orientação dos corpos de prova em relação à direção de laminação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

4.2. ANÁLISE DE IMAGEM

As análises de imagem foram realizadas através do software *ImageJ*, pelo procedimento descrito na Seção 3.3, gerando as tabelas a seguir.

Tabela 4 - Medições de largura inicial dos corpos de prova no instante t_0 do ensaio (sem deformação).

Corpo de Prova	Largura Inicial (w_0)		
	0°	45°	90°
1	19,93 ± 0,08	19,74 ± 0,11	19,88 ± 0,05
2	17,55 ± 0,19	19,68 ± 0,11	19,70 ± 0,11
3	19,68 ± 0,07	19,66 ± 0,09	19,55 ± 0,14

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 5 - Medições de largura final dos corpos de prova no instante $t_{20\%}$ do ensaio (20% de deformação).

Corpo de Prova	Largura Final (w_f)		
	0°	45°	90°
1	18,02 ± 0,11	17,85 ± 0,05	17,65 ± 0,07
2	16,20 ± 0,11	17,91 ± 0,05	17,78 ± 0,03
3	17,65 ± 0,07	17,58 ± 0,05	17,44 ± 0,05

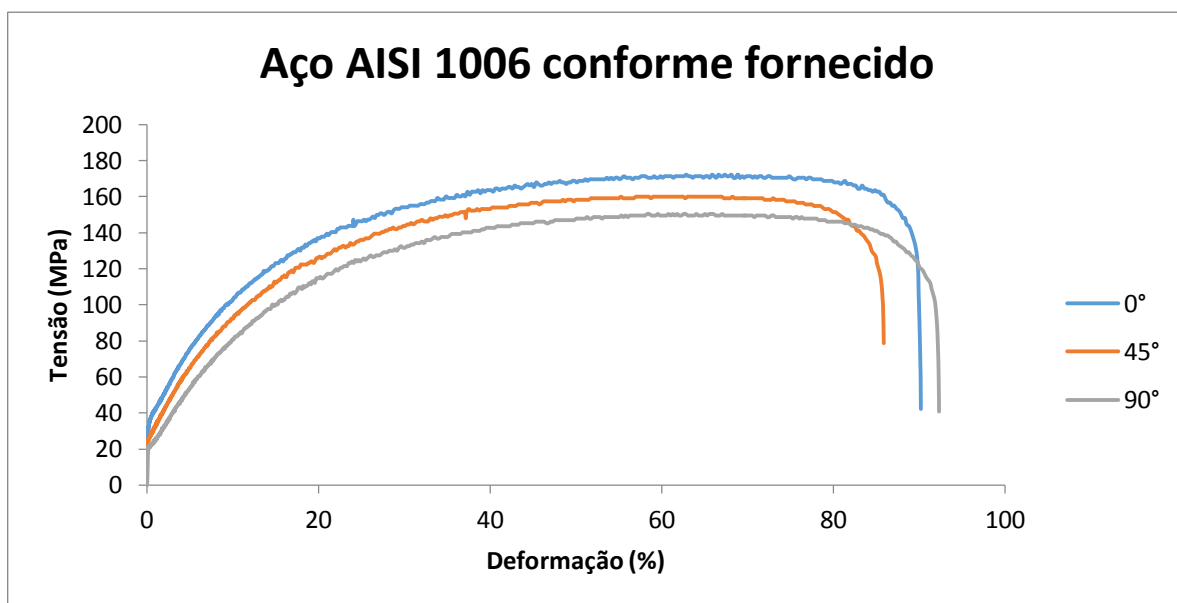
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

5. DISCUSSÃO

5.1. Propriedades mecânicas do aço AISI 1006

Utilizando os resultados do ensaio de tração, é possível construir as curvas de tensão-deformação de engenharia para cada orientação (Figura 18).

Figura 18 – Curva Tensão-Deformação de Engenharia construída a partir dos resultados do ensaio de tração (sem extensômetro).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Como o ensaio foi realizado sem o uso do extensômetro, desta curva é possível extrair apenas as propriedades relacionadas à tensão. Iniciando pelo limite de escoamento, conforme o procedimento descrito na Seção 2.5.6, deve-se traçar uma reta com inclinação igual ao módulo de rigidez e deslocá-la de um valor de deformação, que será um desvio pré-definido. Neste caso, será calculado o limite de escoamento com desvio de 0,2% de deformação. Para obter os limites de resistência à tração, basta encontrar o ponto cuja tensão é máxima em cada curva. Os resultados foram dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Medições dos limites de escoamento (L.E) e de resistência à tração (L.R) do aço AISI 1006 fornecido em cada orientação

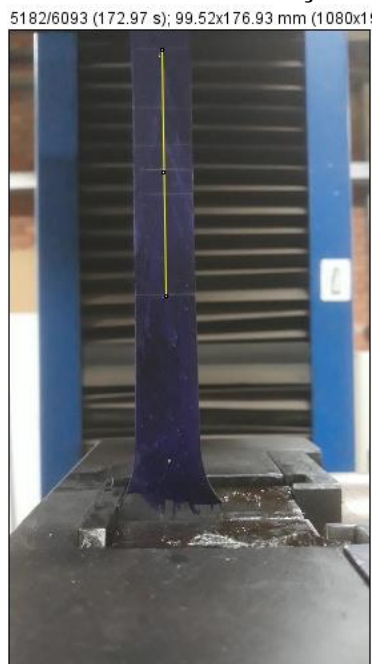
Corpo de Prova	0°	45°	90°
L.E $\sigma_e^{0,002}$ (MPa)	100 ± 5	90 ± 4	75 ± 5
L.R σ_u (MPa)	172,4 ± 3	160,2 ± 4	143,8 ± 5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A obtenção dos parâmetros que necessitam da deformação mais precisa, como os módulos de rigidez e os alongamentos uniformes e totais de cada curva, pode ser realizada utilizando análise de imagem com o procedimento descrito na Seção 3.3. Para isso, basta relacionar o tempo de ensaio demarcado pela máquina com o tempo da gravação.

Primeiro, define-se o instante da gravação em que o valor da tensão é igual ao limite de resistência. De acordo com a Tabela 6, o limite de resistência para o corpo de prova na direção 0° equivale a 172,4 MPa. O instante do ensaio em que este valor é atingido, de acordo com a máquina é $t = 172,97$ s. Com a imagem deste instante de ensaio (Figura 19), é possível medir o comprimento útil através dos recursos do *ImageJ* e encontrar a deformação naquele ponto.

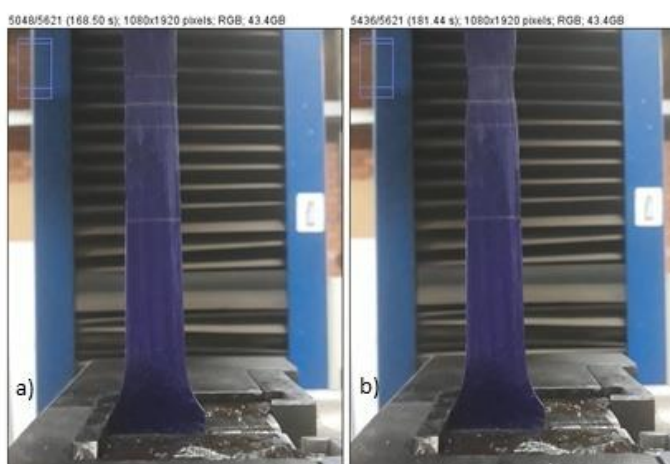
Figura 19 – Medida do comprimento útil no instante $t = 172,97$ s, quando é atingido o limite de resistência à tração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Entretanto, o valor de alongamento uniforme ainda será impreciso devido aos dados da curva tensão-deformação de engenharia: a região próxima do limite de resistência é muito plana (SCHÖN, 2013). No entanto, a gravação da imagem permite estimar de modo visual, quadro a quadro, o instante exato em que começa a ocorrer a estricção do corpo de prova, conforme visto na Figura 20. Calculando-se a deformação naquele quadro, é possível determinar o alongamento uniforme. O mesmo procedimento é válido para o instante em que ocorre a ruptura do material, visto de modo ainda mais contrastado, dado que o quadro fica desfocado (Figura 21).

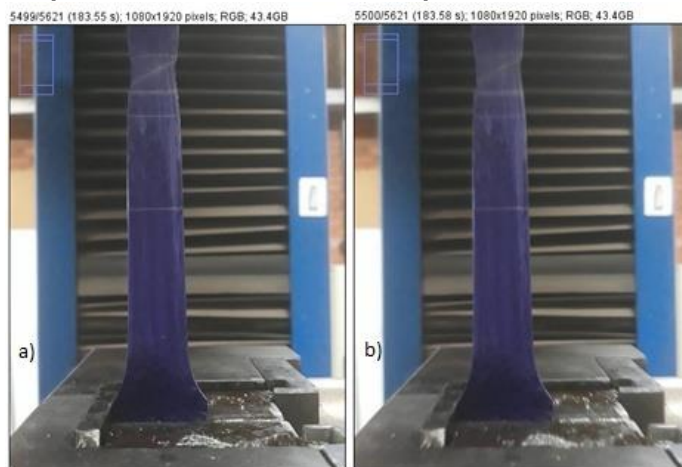
Figura 20 – Visualização do instante em que ocorre a estricção. a) momento antes da estricção e b) momento após a estricção. O quadro desejado está entre ambos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Para obter o alongamento uniforme basta descontar o valor encontrado pela deformação no limite de escoamento (que pode ser definida do mesmo modo usando os tempos de ensaio), assim desconsiderando a deformação elástica. Logo, é possível realizar este procedimento para qualquer corpo de prova e encontrar os valores de alongamento total e uniforme a partir da definição de três instantes: o instante em que se atinge o limite de escoamento o de tensão máxima e o instante de ruptura. Os resultados foram dispostos na Tabela 7.

Figura 21 – Ruptura do corpo de prova. a) instante anterior à ruptura e b) instante em que ocorre a ruptura, visualizado através da perda de foco da imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 7 - Medições das propriedades mecânicas do aço AISI 1006 fornecido em cada orientação

Corpo de Prova	0°	45°	90°
Alongamento uniforme ϵ_u (%)	36,4± 4	31,3±3	39,5± 5
Alongamento total ϵ_f (%)	44,2± 3	41,4± 3	45,4± 2

Algumas das propriedades mecânicas obtida pelo ensaio de tração estão de acordo com a norma NBR 5915 de material grau EEP 2, conforme fornecido. Na Tabela 8, são indicados os valores esperados para um ensaio de tração com o corpo de prova retirado na direção transversal (90°):

Tabela 8 – Propriedades mecânicas de um material que atende o grau EEP 2, norma NBR 5915

	LE (MPa)	LR (MPa)	ϵ_f (%)	r
EEP Grau 2	140-230	270-350	37 ($L_o = 50$ mm) mín.	1,9 mín.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota-se, portanto, que há uma visível dissonância entre os valores de limite de escoamento e de resistência encontrados neste trabalho. Os motivos pode ter sido advindo das medidas de força da máquina universal de ensaios.

Contudo, as medidas de alongamento estão em conformidade com a norma, que indica que seu valor mínimo pode ser até 37%. Este fato pode indicar que uma câmera acoplada à máquina de tração e o subsequente uso de um software de

análise de imagem pode substituir o uso do extensômetro em operações simples, nas quais não é necessária uma precisão tão alta.

É válido ressaltar que um extensômetro de vídeo real terá uma precisão maior, pois além da câmera possuir qualidade superior, o processamento das imagens ocorre em tempo real com softwares preparados especialmente para essa operação (TINIUS OLSEN, 2019). Para efeito de comparação, todo o processamento de imagem realizado no *ImageJ* neste trabalho foi manual, posterior ao ensaio, com o operador definindo o posicionamento das linhas no espécime para o cálculo do comprimento e da largura num instante qualquer (conforme descrito no procedimento). Não somente isso, a escolha das imagens também foi de responsabilidade do operador, com o auxílio do tempo de gravação da câmera. Sendo assim, é de se esperar pequenas diferenças entre o tempo indicado na câmera e o indicado nos dados da máquina de ensaio.

Conforme esperado e apesar da possível imprecisão nos valores de limites de resistência e escoamento, a Tabela 6 e a

Tabela 7 7 mostram as propriedades mecânicas do aço em relação aos ângulos citados, 0°, 45° e 90°, evidenciando os efeitos da anisotropia cristalográfica frente às propriedades mecânicas básicas.

Simião (2011) obteve, utilizando extensômetros na direção longitudinal e transversal, valores de alongamento total maiores na orientação transversal (90°), seguidos pela orientação longitudinal (0°) e na orientação de 45° para chapas laminadas a frio de aço AISI 1006. Em relação a limite de escoamento e limite de resistência, a ordem foi: 45° > 0° > 90°. Neste trabalho, os corpos de prova da direção 0° obtiveram limites maiores que os da direção 45°, por sua vez maiores que os de 90°, mas a ordem dos valores para o alongamento total é a mesma.

5.2. Anisotropia

Utilizando os resultados da análise de imagem, é possível calcular os parâmetros de anisotropia. O coeficiente de anisotropia plástica r foi obtido utilizando a equação (11) em todos os nove corpos de prova ensaiados (Tabela 9). Para cada orientação calculou-se uma média visando uma maior precisão no valor final. O coeficiente de anisotropia planar foi calculado com a equação (12) e o coeficiente de anisotropia média, usando a equação (13) (Tabela 10).

Tabela 9 - Medições do coeficiente de anisotropia plástica r para cada corpo de prova

Corpo de Prova	0°	45°	90°
1	1,22	1,21	1,93
2	0,74	1,02	1,28
3	1,40	1,57	1,71
Média	1,12 ± 0,34	1,26 ± 0,28	1,64 ± 0,33

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 10 - Resultado dos coeficientes de anisotropia planar Δr e normal \bar{r}

Coeficiente Planar	Coeficiente Normal
0,11	1,32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Segundo Simião (2013), há um consenso em relação ao estudo da anisotropia em chapas de aço de baixo carbono quanto aos parâmetros para uma boa estampabilidade isto é, um alto valor de anisotropia normal e um valor de anisotropia planar mais próximo de zero, indicando que o material em questão possui pouca tendência ao defeito de orelhas, mas que essa tendência seria nas direções de 0° e 90° pelo valor ser positivo.

O valor do coeficiente de anisotropia médio foi calculado em 1,32. Na Tabela 8, foi visto que o valor mínimo para o coeficiente de anisotropia normal para um material que segue a classificação EEP grau 2 era de, no mínimo, 1,9. Isso pode indicar erros nas medidas de largura e comprimento encontradas manualmente pelo software. Em contrapartida, esse valor é compatível com o grau EP (estampagem profunda), cujo valor mínimo para o coeficiente de anisotropia normal é de 1,3.

6. CONCLUSÕES

- As propriedades mecânicas do aço AISI 1006 com processamento atendendo à norma NBR 5915 para estampagem extra profunda (EEP grau 2) medidas segundo ângulo 0° , 45° e 90° indicaram que o material é anisotrópico.
- A extensometria de vídeo utilizando o software de análise de imagem *ImageJ* e uma câmera de celular acoplada à máquina de ensaio obteve valores de alongamento total semelhantes à literatura.
- Possíveis imprecisões nos valores de limite de escoamento e limite de resistência ocorridas devido ao processamento do material ou aos valores de força indicados pela máquina não influenciaram a obtenção dos valores de deformação pelo software de análise de imagem.
- O material possui pouca tendência ao defeito de orelhas de estampagem, pois o valor do coeficiente de anisotropia planar é próximo de zero.
- O coeficiente de anisotropia normal de 1,32 atende a norma para estampagem profunda, mas não para estampagem extra-profunda grau 2.

REFERÊNCIAS

AMETEK INC, 2015. A users guide to vídeo extensometers. Disponível em: <<https://www.ametektest.com/learningzone/library/articles/a-users-guide-to-video-extensometers>>. Acesso em 13 de nov. 2021.

BIOPDI. Ensaio de tração. Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>>. Acesso em: 08 nov. de 2021.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8ª Edição, 2012. CHERNIK, G. G.

CIMM, 2012. A Estampabilidade dos Materiais Metálicos. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6487-a-estampabilidade-dos-materiais-metalicos#.VlxxXldBf5M>. Acesso em: 10 nov. de 2021.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

EEL – USP, 2021. Processo de Estampagem. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3004/Aula10CM.pdf>>. Acesso em: 15 dez. de 2021.

FABRICIO, D. **Garantia de qualidade de ensaios mecânicos de materiais metálicos**. 2015. 70 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

FREITAS, et. al. **Adequabilidade das Condições de Laminação de um Aço de Baixo Carbono à Estampagem Profunda**. JORNADAS SAN/ CONAMET / SIMPOSIO MATERIAL, 2003, p.04-31.

GARCIA, A.; SPIM, J. **Ensaio dos materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

INFOMET, 1998. Sistemas de Classificação dos Aços. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=4>> Acesso em: 10 de out. de 2021.

LYMAN, T. **Metals Handbook**. 8.ed. United States of America: ASM International, 1961.

PERO-SANZ, J.; et al. **Annealing Textures for Drawability: Influence of the Degree of Cold Rolling Reduction For Low-Carbon And Ferritic Steels**. Materials Characterization, 1999, p. 303-309.

OUBA, A; YAMASHIRO, C. **Estudo da Recristalização de um aço SAE 1006 laminado a frio**. 2013. 71f. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

PEDRINI, C. Propriedades mecânicas dos metais. Disponível em: <<http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/pedrini/PROPRIEDADES%20MEC%C3%82NICAS%20DOS%20METAIS.pdf>>. Acesso em 15 de Nov. de 2021.

POLACK, A. **Manual prático de estampagem**. 1. ed. São Paulo: Hemus, 1976.

RASBAND, W; FERREIRA, T. ImageJ User Guide – IJ 1.46. ImageJ, 2010. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/>>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

SANTOS, A. **Análise de textura cristalográfica por difração de raios X em aços IF com diferentes adições de titânio, nióbio e fósforo**. 2017. 70 f. Dissertação de Mestrado – UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2017.

SOUZA, S. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

SILVA, A.; MEI, P. **Aços e Ligas Especiais**. Vol. 2. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

SIMIÃO, M. **Avaliação da anisotropia em chapas de aço de baixo carbono SAE 1006, extra low carbon e aços livres de intersticiais**. 2011. 84 f. Dissertação de Mestrado – Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2011.

SCHEER, L. **O que é aço?** 1. ed. São Paulo: EPU, 1977.

SCHÖN, C. G. **Mecânica dos Materiais: Fundamentos e Tecnologia do Comportamento Mecânico**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

ASTM E 517-00 / **Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal**. 2010.

NBR 5915 / **Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem**. 2003.

TINIUS OLSEN. The Testing Times, 2019. Shawn Byrd, Technical Manager at Tinius Olsen, takes a look at the revolution in the world of extensometry. Disponível em: <<https://thetestingtimes.blogspot.com/2019/09/shawn-byrd-technical-manager-at-tinius.html>>. Acesso em: 10 nov.2021.