

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**RICARDO BRAUN SCHNEIDERS**

**DETERMINAÇÃO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO COM O AUXÍLIO DA  
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS (DIC)**

**Alegrete  
2018**

**RICARDO BRAUN SCHNEIDERS**

**DETERMINAÇÃO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO COM O AUXÍLIO DA  
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS (DIC)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Antônio  
Thesing

**Alegrete**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S825

Schneiders, Ricardo Braun

Determinação da curva tensão-deformação com o auxílio  
da correlação de imagens digitais (DIC) / Ricardo Braun  
Schneiders.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2018.  
"Orientação: Leandro Antônio Thesing".

1. Análise de deformação. 2. Curva tensão deformação.  
3. Deformação verdadeira. 4. Correlação de imagens  
digitais. I. Título.

RICARDO BRAUN SCHNEIDERS

DETERMINAÇÃO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO COM O AUXÍLIO DA  
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS (DIC)

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 7 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:



---

Prof. Dr. Leandro Antônio Thesing  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof.ª Dr.ª Ana Claudia Costa de Oliveira  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. Luis Ernesto Roeca Bruno  
UNIPAMPA

Dedico este trabalho especialmente a minha mãe que sempre me apoiou não importando o que acontecesse, e a todos que me ajudaram nesta trajetória de alguma forma.

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Dr. Leandro Antônio Thesing, pela orientação dada, pelo tempo dedicado e pelos materiais disponibilizados.

Ao professor Marco Durlo Tier pelo material disponibilizado.

Às empresas Automate Engenharia e Klabin que me disponibilizaram material para a realização deste TCC.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS que disponibilizou a máquina de ensaio de tração EMIC para os ensaios.

À UNIPAMPA por ser minha segunda casa nesses 5 anos de curso.

Aos meus amigos que sempre me ajudaram, me apoiando em qualquer situação e que foram fundamentais para que eu chegasse a conclusão deste curso.

Aos meus pais, Leane Inês Braun Schneiders e Rone Itamar Schneiders, pela confiança criação e suporte durante toda a minha vida, pois sem eles nada do que eu tenho hoje seria possível.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota. ”

Theodore Roosevelt

## RESUMO

O teste de tração é uma importante ferramenta de engenharia, pois é possível determinar informações importantes sobre as propriedades mecânicas do material. A Correlação de Imagens Digitais surge como o método que se alia aos métodos convencionais, tendo os melhores aspectos destes métodos e facilitando a análise. Este estudo busca testar o método de Correlação de Imagem Digital para construir a curva de tensão-deformação convencional e a verdadeira. O método consiste em filmar um teste de tração com amostras padronizadas que são devidamente pintadas por exemplo, como dados de entrada de programas de simulação na conformação mecânica dos metais. A aquisição de imagens de qualidade durante o ensaio é fundamental para o sucesso deste método. No presente trabalho também são relatadas as dificuldades enfrentadas nesta etapa, para que possam servir de alerta, para futuros trabalhos, das dificuldades encontradas na aplicação prática do método. com um padrão aleatório de forma que o método possa funcionar. A filmagem é analisada e traduzida pelo software GOM Correlate em um campo de deformação e a curva de tensão-deformação é construída com o uso destes dados de deformação conjuntamente com os dados de tensão dados pela máquina de ensaio de tração. O uso desse método foi relativamente satisfatório para construir a curva tensão-deformação convencional e verdadeira de forma mais barata, de modo que este método foi usado para determinar propriedades mecânicas importantes na região plástica dos materiais, como a deformação verdadeira e tensão corrigida na região de pós-estricção, para que essas propriedades possam ser usadas na conformação mecânica dos metais por exemplo, como dados de entrada de programas de simulação na conformação mecânica dos metais. A aquisição de imagens de qualidade durante o ensaio é fundamental para o sucesso deste método. No presente trabalho também são relatadas as dificuldades enfrentadas nesta etapa, para que possam servir de alerta, para futuros trabalhos, das dificuldades encontradas na aplicação prática do método.

Palavras-Chave: Correlação de imagens digitais, deformação verdadeira, curva tensão-deformação.



## ABSTRACT

The tensile test is an important engineering tool because with it is possible to determine important information about the mechanical properties of the material. Digital Image Correlation emerges as the method that combines with conventional methods because it has the best aspects of these methods and facilitate the analysis. The method is to film a traction test with standardized samples that are properly painted with a random pattern so that the method can work. This study seeks to test the method of Digital Image Correlation to construct the stress-strain curve and the true stress-strain curve. The method consists in filming a traction test with standardized specimens and duly painted with a random pattern for the method to work. Filming is analyzed and translated by the GOM Correlate software in a strain field and the stress-strain curve is constructed using this strain data in conjunction with the stress data given by the tensile test machine. The use of this method was relatively satisfactory to construct the conventional and true tensile-strain curve much more cheaply, so that this method was used to determine important mechanical properties in the plastic region of the materials, such as true deformation and corrected tension in the post-stiffness region, so that these properties can be used in the mechanical conformation of the metals for example, as input data from simulation programs in the mechanical conformation of the metals. Acquiring quality images during the trial is critical to the success of this method. In the present work the difficulties faced in this stage are also reported, so that they can serve as a warning for future work of the difficulties encountered in the practical application of the method.

Keywords: Digital image correlation, true deformation, stress-strain curve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barra de seção transversal uniforme (a) não deformada e (b) deformada. .....	16
Figura 2 – Interface do software GOM Correlate. ....	20
Figura 3 – Diagrama tensão-deformação convencional.....	21
Figura 4 – Comparação entre a tensão-deformação convencional (de engenharia) com a tensão-deformação verdadeira.....	22
Figura 5 – Parâmetros da equação de Bridgman. ....	24
Figura 6 – Fluxograma metodológico de atividades que foi empregado neste trabalho.....	25
Figura 7 – Corpo de prova de seção transversal circular segundo Norma NBR-6152. .....	26
Figura 8 – Corpo de prova de seção transversal retangular segundo Norma NBR- 6152. ....	26
Figura 9 – Padrão de pintura do corpo de prova.....	27
Figura 10 – Máquina de ensaio de tração. ....	28
Figura 11 – Esquema de montagem para a realização do ensaio de tração e vídeo. .....	29
Figura 12 – CPs poliméricos retangular e cilíndrico. ....	31
Figura 13 – CPs de aço retangulares de cilíndricos. ....	32
Figura 15 – Campo de deformação convencional do CP polimérico retangular 1 na iminência da falha.....	34
Figura 16 – Campo de deformação convencional do CP polimérico retangular 1 na metade do ensaio de tração. ....	35
Figura 17 – Curva tensão x deformação verdadeira do CP polimérico retangular 1..	36
Figura 18 – Deslocamento em X da linha construída para identificação da redução de área durante o ensaio.....	36
Figura 19 – Campo de deformação verdadeira do CP polimérico retangular 1 na iminência da falha.....	37
Figura 21 – Campo de deformação convencional do CP polimérico retangular 2 na iminência da falha.....	38
Figura 23 – Campo de deformação verdadeira do CP polimérico retangular 1 na iminência da falha.....	39

Figura 24 – Deslocamento em X da linha construída para identificação da redução de área durante o ensaio.....	40
Figura 25 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 1 de chapa de aço. ....	41
Figura 26 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 1 de chapa de aço medido pela EMIC. ....	42
Figura 27 – Curva tensão-deformação convencional da bibliografia. ....	42
Figura 28 – Curva Tensão-deformação verdadeira com a tensão corrigida do CP 1 de chapa de aço. ....	43
Figura 29 – Progressão da deformação convencional no CP (deformação não uniforme no corpo). ....	44
Figura 30 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 2 de chapa de aço. ....	45
Figura 31 – Curva Tensão-deformação verdadeira com a tensão corrigida do CP 2 de chapa de aço. ....	45
Figura 32 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 3 de chapa de aço. ....	46
Figura 33 – Curva Tensão-deformação verdadeira com a tensão corrigida do CP 3 de chapa de aço. ....	47
Figura 34 - Falha na construção do campo de deformação causada pela incidência demasiada de luz em uma só região.....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

- $l_f$  – Deformação final;
- $l_0$  – Deformação inicial;
- $dl$  – Deformação infinitesimal instantânea;
- $\varepsilon$  – Deformação específica normal;
- $\delta$  – Alongamento;
- $V$  – Volume de interesse do CP;
- $A$  – Área da seção transversal do CP;
- $A_0$  – Área inicial da seção transversal do CP;
- $\sigma$  – Tensão normal à seção transversal do CP;
- $P$  – Carga aplicada durante o ensaio;
- $r$  – Raio mínimo da seção transversal do CP;
- $p$  – Raio da estrição do CP;
- $\sigma_c$  – Tensão corrigida;
- $R$  – Raio da curvatura da estrição;
- $a$  – Raio da menor seção transversal;
- $\sigma_{méd}$  – Tensão axial média;
- $k$  – Fator de concentração.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos .....	13
1.2 Justificativa.....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Deformações.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Deformação Convencional.....	16
2.1.2 Deformação Verdadeira .....	16
<b>2.2 Métodos de Medição de Deformações .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Strain gauge .....	18
<b>2.3 Correlação de Imagens Digitais .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Construção da Curva de Escoamento de um Material.....</b>	<b>20</b>
2.4.1 Curva tensão-deformação Convencional.....	20
2.4.2 Curva tensão-deformação Verdadeira .....	21
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
3.1 Preparação do Material .....	26
3.2 Ensaio de tração e vídeo .....	27
<b>4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Testes com polímeros.....</b>	<b>32</b>
4.1.1 Ensaio com CPs poliméricos cilíndricos .....	32
4.1.2 Ensaio com CPs poliméricos retangulares .....	33
<b>4.2 Resultado dos testes com aços.....</b>	<b>40</b>
4.2.1 Ensaio com CPs de aço retangulares.....	40

4.2.2 Ensaio com CPs de aço cilíndricos.....	47
<b>5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O ensaio de tração é uma importante ferramenta da engenharia pois com ele é possível determinar informações importantes sobre as propriedades mecânicas do material como a tensão limite de escoamento, a resistência mecânica, a tensão de ruptura, o módulo de elasticidade, o alongamento percentual, redução de área, a deformação elástica e plástica e a curva de tensão-deformação de engenharia. Seu funcionamento consiste basicamente em aplicar uma força axial num corpo de prova tendendo à alongá-lo até sua ruptura. Esse corpo de prova, padronizado por norma, é geralmente de seção transversal cilíndrica ou retangular. A carga aplicada ao corpo de prova é medida pela própria máquina de tração enquanto que a deformação é medida por outros métodos.

As medições de deformações convencionais, como *strain gages*, clip gages, etc, são métodos simples e relativamente baratos de se fazer. Mas ao se analisar melhor a situação, visto que cada vez mais se necessitam valores mais precisos de medição para aplicações de engenharia, faz-se jus a busca por melhoramentos de métodos e métodos alternativos, pois eles não garantem que a deformação foi uniforme ou homogênea por toda a extensão.

O método de Correlação de Imagens Digitais DIC (do inglês; *Digital Image Correlation*) surge como método que se alia aos métodos convencionais, pois faz o que os outros métodos fazem. Este método ainda analisa a deformação em toda a extensão do corpo de prova, como se houvessem infinitos *strain gages* no corpo de prova, de uma forma mais simples, barata e fácil.

### 1.1 Objetivos

- ❖ Objetivo Geral
  - Construção da curva-deformação através do método de Correlação de Imagens Digitais.
- ❖ Objetivos Específicos
  - Realizar o ensaio de tração pela NBR 6152 juntamente com o método DIC;
  - Avaliar o método DIC quanto a sua aplicabilidade para a medição da deformação específica durante o ensaio de tração;

- Construir a curva tensão-deformação convencional e verdadeira.

## **1.2 Justificativa**

A realização do ensaio de tração busca determinar com precisão as propriedades mecânicas do material em estudo, pois essas propriedades são fatores importantes no dimensionamento de projetos e dados de entrada em simulações computacionais, por isso, cada vez mais procura-se métodos que aumentem essa precisão e ao mesmo tempo sejam relativamente simples e baratos de se implementar. A Correlação de Imagens Digitais faz-se importante nesse contexto pois busca atender todos os parâmetros mencionados sendo parte importante do escopo desse trabalho que busca avaliar este método quanto a sua aplicabilidade na determinação da curva tensão-deformação.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica é indispensável para um trabalho científico pois através dela delimita-se o problema, obtém-se o estado atual dos conhecimentos acerca do tema, suas lacunas e a contribuição que o trabalho trará para o desenvolvimento do conhecimento (Lakatos; Marconi, 2010).

Tendo isso em vista, faz-se necessário abordar nesta seção os conceitos de deformação, os métodos de medição de deformação, o método de correlação digital de imagens e o software GOM Correlate.

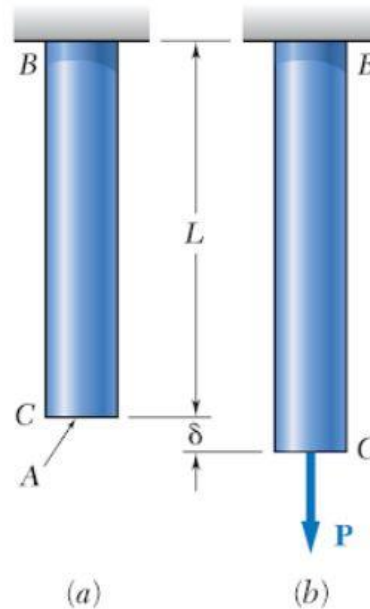
### 2.1 Deformações

Segundo Beer e Russel (2015) a análise de deformações é importante para se evitar deformações grandes o suficiente que possam impedir a estrutura de atender à finalidade para qual ela foi destinada.

A deformação específica normal em um componente é definida como a deformação do componente por unidade de comprimento. Considerando uma barra *BC* de comprimento *L* com seção transversal uniforme de área *A* suspensa em B, ao aplicar-se uma força *P* na extremidade *C* a barra tem um alongamento  $\delta$ , como mostra a Figura 1. Porém esse alongamento não pode ser usado para prever o alongamento de uma barra de mesmo material com dimensões diferentes e, portanto, o conceito de deformação específica é introduzido ao notar que a relação entre a deformação e o comprimento é igual nos dois casos (BEER; RUSSEL, 2015). A equação 1 descreve esse conceito.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (1)$$

Figura 1 – Barra de seção transversal uniforme (a) não deformada e (b) deformada.



Fonte: BEER e RUSSEL (2015).

### 2.1.1 Deformação Convencional

O processo de deformação onde a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica, um gráfico da tensão em função da deformação resulta em uma relação linear onde o coeficiente angular (inclinação) corresponde ao módulo de elasticidade  $E$ . A deformação elástica não é permanente, ou seja, quando a carga é retirada a peça volta a sua forma original (CALLISTER, 2008).

À medida que o material é deformado, ele passa seu limite de elasticidade e logo a tensão não é mais proporcional a deformação (a Lei de Hooke deixa de ser válida), ocorre então uma deformação permanente e não recuperável chamada de deformação plástica (CALLISTER, 2008).

### 2.1.2 Deformação Verdadeira

A curva tensão-deformação verdadeira é uma importante ferramenta na mecânica, especialmente no estudo da plasticidade, para descrever e avaliar as propriedades do material. Ela fornece as informações essenciais para a resposta do

material na faixa de deformação plástica. Esta informação pode ser usada no projeto de conformação do metal, no estudo do encruamento plástico, na análise de fraturas, etc (FARIDMEHR e OSMAN, 2014).

As deformações verdadeiras são os parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação e o conhecimento destas deformações neste processo oferecem informações importantes, tais como, a situação das tensões internas, possibilidades da redução de etapas de processos e conhecimento do limite máximo de deformação (SCHAEFFER, 2004).

Na Conformação Mecânica o material é sujeito a grandes deformações plásticas. Para grandes deformações a tanto a tensão quanto a deformação de engenharia (ou convencional) afastam-se dos valores verdadeiros a que o material é submetido.

A deformação verdadeira em um ensaio de tração é dada pela Equação 2.

$$\emptyset = \int_{l_0}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right) \quad (2)$$

Pela Lei da Constância de Volume a equação (2) pode ser modificada como é mostrado abaixo.

$$V = A_0 l_0 = A l_f \quad (3)$$

Logo:

$$\frac{l_f}{l_0} = \frac{A_0}{A} \quad (4)$$

Assim:

$$\emptyset = \ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (5)$$

A deformação verdadeira e a deformação convencional podem ser relacionadas pela equação 6.

$$\emptyset = \ln(1 + \epsilon) \quad (6)$$

## 2.2 Métodos de Medição de Deformações

Muitos métodos são utilizados para se medir as deformações de um corpo de prova durante um ensaio sendo diferenciados por sua aplicabilidade ao tipo de situação e material, a sua precisão de medição e sua complexidade de utilização. Nesta seção é discutido sobre o método de medição de deformações mais usado.

### 2.2.1 Strain gauge

O strain gage, ou extensômetro, é um sensor que é colocado na superfície de uma peça em medição que mede a deformação deste material em resposta a um carregamento. O funcionamento deste dispositivo se dá pela alteração da resistência elétrica do fio resistivo, que está colado na peça, devido a deformação da peça gerando sinais elétricos que são interpretados por uma placa e transformados em valores de deformação (GUILHERME, 2016).

O uso de *strain gages* é geralmente restrito a variações na faixa de  $\pm 3000$   $\mu\text{m}/\text{m}$ . No entanto, para medições em materiais sintéticos ou para investigações na região de deformação plástica de metais, esse intervalo pode ser excedido. Permanece a questão de até que ponto os *strain gages* podem ser usados para medir grandes deformações (HOFFMANN, 1989).

Medidas de deformação perto da fratura com strain-gages de resistência elétrica usualmente não informam uma medida confiável devido ao escoamento local, efeitos tridimensionais e regiões limitadas de fixação dos strain-gages (DALLY; SANFORD, 1987, p. 381).

No caso de *strain gages* posicionados em locais não ideais, a ordem do erro no valor do fator de intensidade de tensão medido experimentalmente pode ser tão alta quanto quase 49%, o erro na medição usando *strain gages* localizados em locais não ideais indica a importância do conhecimento prévio dos locais de medição válidos para a medição precisa através do uso de elementos finitos (CHAKRABORTY; MURTHY; CHAKRABORTY, 2017).

## 2.3 Correlação de Imagens Digitais

A Correlação de Imagens Digitais (DIC) é uma técnica óptica-numérica que utiliza uma metodologia de correlação matemática para calcular o deslocamento plano de superfícies sujeitas a solicitações mecânicas ou físicas. Esse método se vale da comparação de padrões de imagens existentes antes e após um carregamento, para assim determinar o campo de deslocamento e deformações; as imagens analisadas também podem ser chamadas de imagem de referência e imagem deformada (MAXWELL, 2009).

A diferença entre DIC e outras técnicas de medição convencionais é o fato de que ela permite a medição de forma não invasiva e de baixo custo. Os métodos ópticos são utilizados na mecânica experimental para se obter diretamente dados cinemáticos, além de que a DIC tem uma abordagem não destrutiva e por isso permite a obtenção do campo de deslocamento sem danos ao material em teste (GONZÁLES, 2014).

DIC pode ser usado para amostras com distribuição de tensão não uniforme em todo o material onde, nesses casos, extensômetros e strain gauges não providenciam muita informação sobre a tensão e a deformação da amostra (BAILEY, 2014).

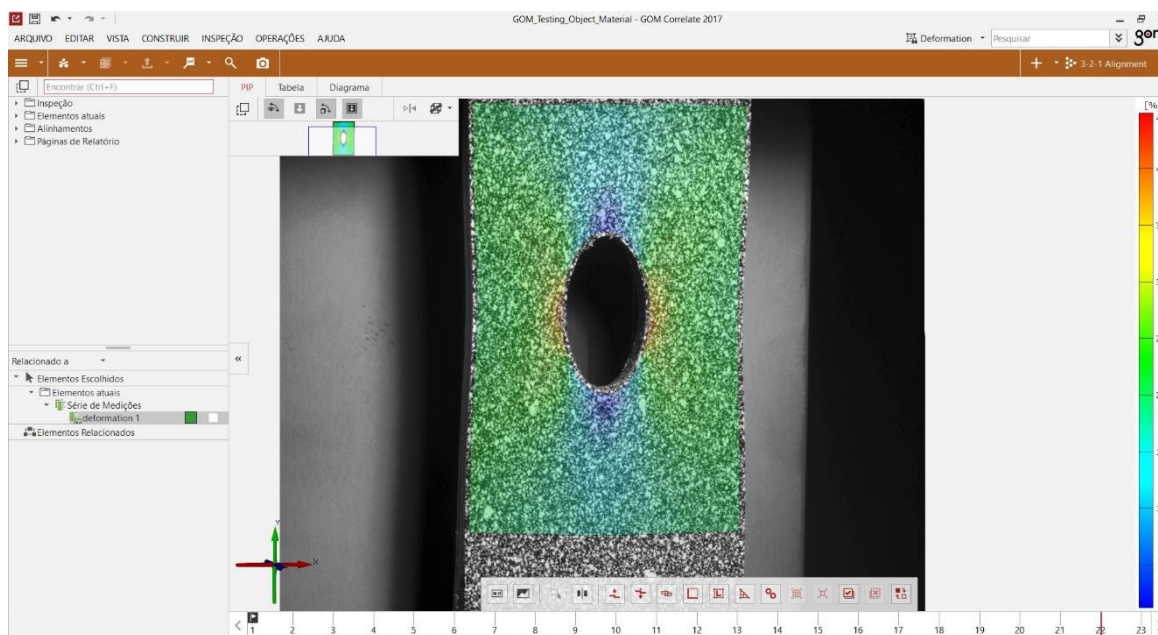
A correlação digital de imagens (DIC) tornou-se uma das ferramentas mais valiosas para a medição de deformações plásticas de ligas metálicas, uma vez que prontamente fornece deformações plásticas além da estricção difusa, as quais não podem ser obtidas com o uso de extensômetros (SAVIC; HECTOR; FEKETE, 2010).

### 2.3.1 GOM Correlate

O GOM Correlate é um software que utiliza o princípio do DIC para construir mapas de tensão e deformação de forma 2D e 3D. Ele pode ser usado para medir sem contato a mudança de comprimento, teste simultâneo em duas ou mais direções e rastreamento da alteração do comprimento durante uma medição ao vivo.

A Figura 2 mostra um exemplo do uso deste software na medição de deformações e sua interface.

Figura 2 – Interface do software GOM Correlate.



Fonte: Acervo do autor.

## 2.4 Construção da Curva de Escoamento de um Material

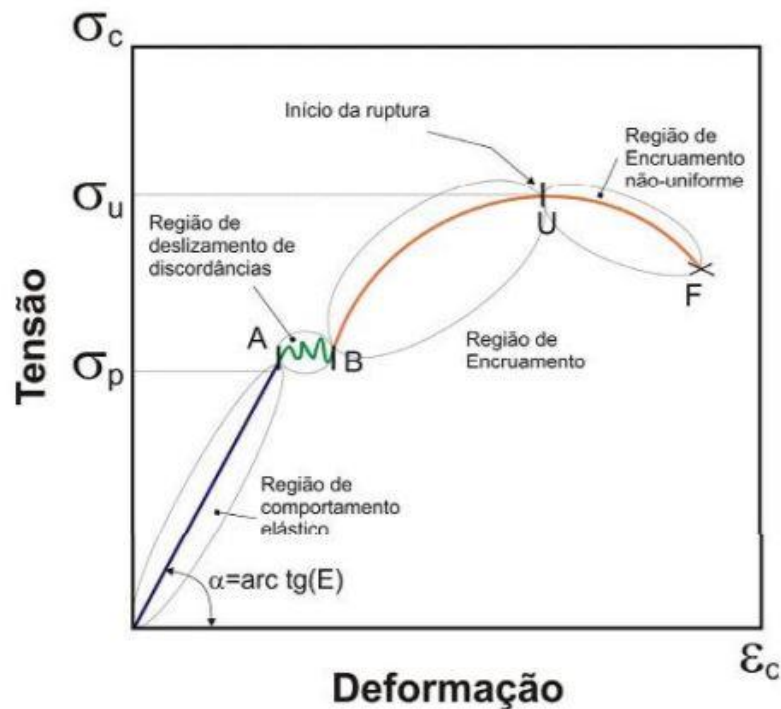
Para este trabalho é importante saber como se determinam as curvas tensão-deformação convencional e verdadeira, pois, cada uma tem sua importância em cada tipo de aplicação. A seguir são explicados os detalhes de construção das curvas tensão-deformação.

### 2.4.1 Curva tensão-deformação Convencional

A curva tensão-deformação convencional (ou de engenharia) é feita a partir da tensão aplicada no ensaio que utiliza a carga aplicada pela máquina de tração e a área inicial do corpo de prova, a deformação utilizada é a convencional (equação 1). Desse modo ao se plotar a curva de tensão *versus* a deformação medida espera-se que corpos de prova de diferentes dimensões, mas de mesmo material tenham curvas iguais ou equivalentes (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A Figura 3 mostra o diagrama da curva tensão-deformação convencional com seus respectivos pontos de interesse como a região elástica, região de deslizamento de discordâncias, região de encruamento e região de encruamento não-uniforme.

Figura 3 – Diagrama tensão-deformação convencional.



Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012.

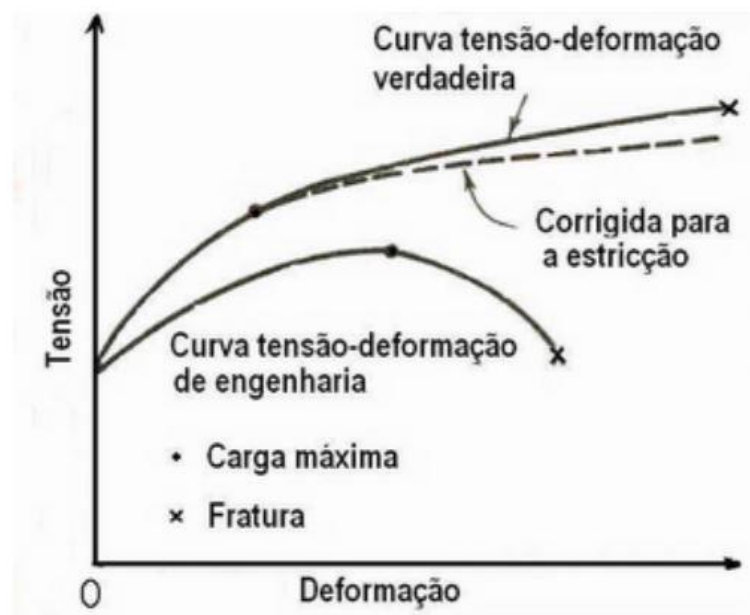
#### 2.4.2 Curva tensão-deformação Verdadeira

Embora a curva tensão-deformação seja usualmente obtida por um teste de tração usando amostras cilíndricas, é difícil obter a curva para uma grande variedade de deformações que excede a deformação para a resistência à tração (tensão pós-estricção). Para avaliar a fratura dúctil em uma ponta de trinca ou em uma porção afinada na parede, a curva tensão-deformação verdadeira, incluindo a deformação pós-estricção, é indispensável (KAMAYA, KAWAKUBO, 2011).

A deformação verdadeira de um material pode ser obtida por ensaio de punção de esfera, de indentação, compressão e por ensaio de tração. Além disso, o teste de punção e o teste de entalhe são eficazes para obter a curva a partir de componentes reais, porque uma pequena amostra pode ser usada. Entretanto, nessas técnicas, apenas alguns parâmetros podem ser identificados assumindo uma equação constitutiva para a curva tensão-deformação, a fim de manter a robustez da análise inversa (KAMAYA, KAWAKUBO, 2011).

A deformação de um corpo de prova retangular após a deformação plástica segue um regime de proporcionalidade, a redução de área da seção transversal mantém seu formato retangular, durante a fase de pré-estricção essa é a única componente da variação da área da seção transversal. Após a estricção do corpo de prova surge uma componente de variação não-proporcional da área da seção transversal, sendo esta componente responsável pela mudança da seção retangular do corpo de prova originalmente retangular para o formato semelhante a um entalhe suave. Sendo a quantificação e monitoramento da variação da área após o surgimento da estricção difusa o maior desafio para se determinar a curva tensão-deformação verdadeira em corpos de prova retangulares (NEMOTO, 2004). A Figura 4 compara a curva tensão-deformação de engenharia com a curva tensão-deformação verdadeira.

Figura 4 – Comparação entre a tensão-deformação convencional (de engenharia) com a tensão-deformação verdadeira.



Fonte: NEMOTO, 2004.

Para o cálculo da tensão usa-se a área instantânea medida durante todo o ensaio ao invés da área inicial, a equação 7 mostra isso.



$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Segundo Schaeffer (2004), durante o ensaio de tração e antes da estrição o cálculo da tensão pode ser feito pela equação 8 de Siebel. Após a estrição, para o CP de seção transversal circular, a tensão é calculada pela equação 9 conforme Siebel.

$$k_f = \frac{P}{A_0} e^{\phi} \quad (8)$$

Após a estrição, para o CP de seção transversal circular, a tensão é calculada pela equação 9.

$$k_f = \frac{P}{A(1 + r/4p)} \quad (9)$$

Para o cálculo da tensão uniaxial corrigida, pois o estado de tensões introduzido pela deformação da estrição a eleva de forma dissimulada, Bridgman propôs a equação 10, em que se baseia na tensão longitudinal média e variações na geometria do corpo de prova (DIETER, 1961). A tensão média de ensaio é multiplicada por um fator de correção “k” de forma que esta tensão corrigida leve em conta a concentração de tensões na estrição. A Figura 5 identifica os parâmetros envolvidos na equação.

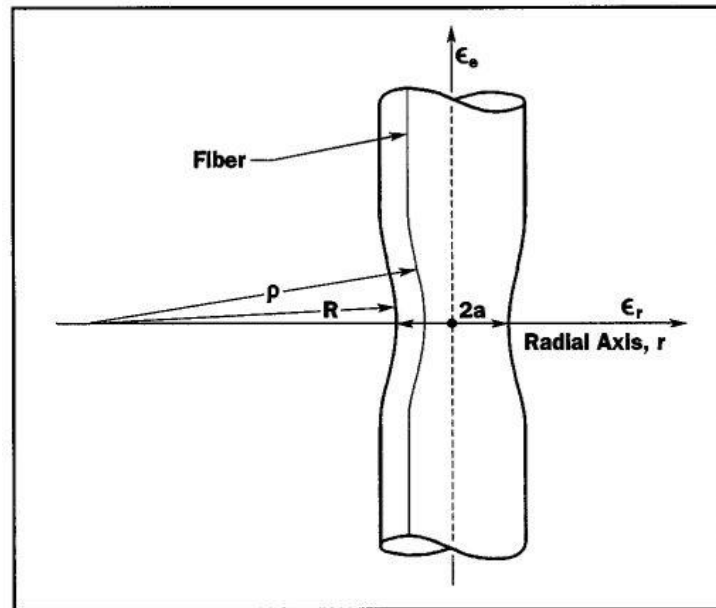
$$\sigma_c = k \cdot \sigma_{méd} \quad (10)$$

Onde:

$$\sigma_{méd} = \frac{P}{A} \quad (11)$$

$$k = \left[ \left( 1 + \frac{2R}{a} \right) \ln \left( 1 + \frac{a}{2R} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

Figura 5 – Parâmetros da equação de Bridgman.

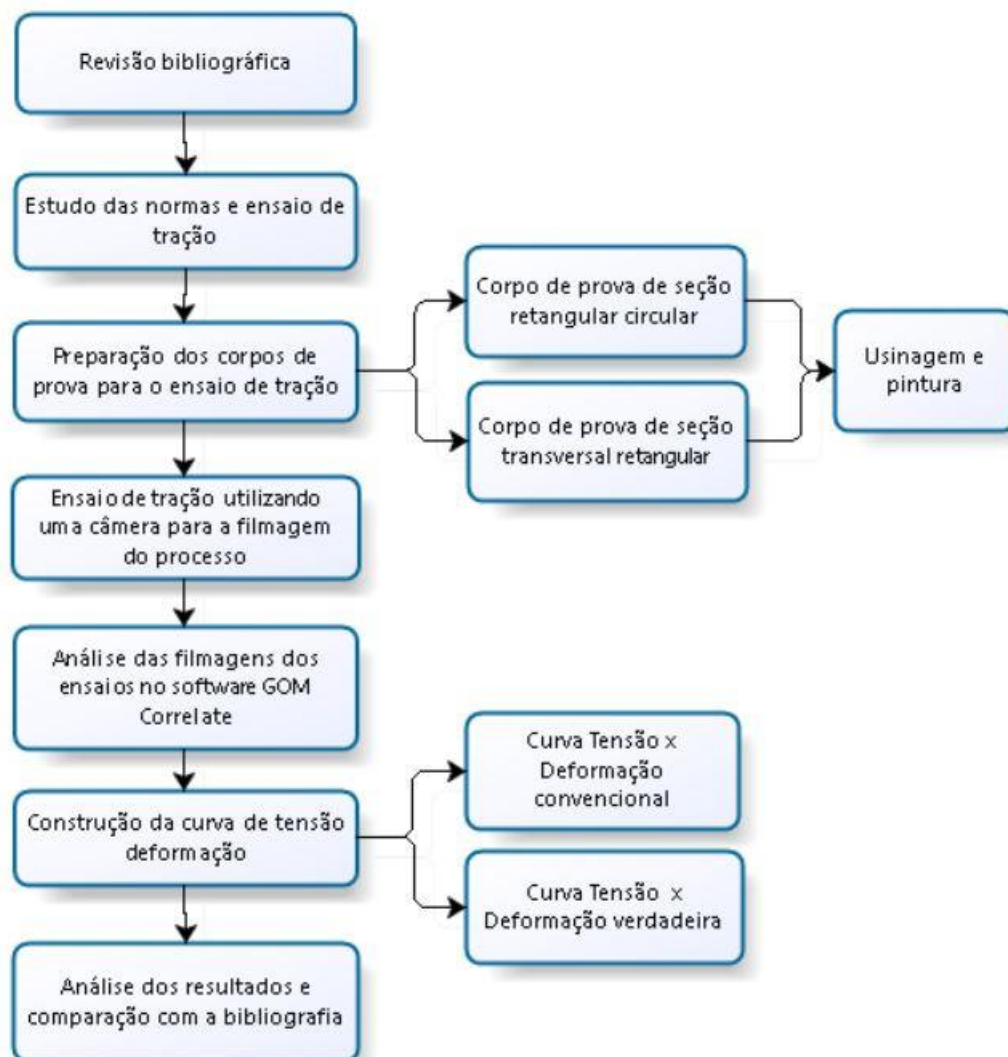


Fonte: LING, 1996.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia usada no trabalho é explicada nos itens a seguir, a Figura 6 traz um fluxograma de funcionamento que foi aplicado neste trabalho.

Figura 6 – Fluxograma metodológico de atividades que foi empregado neste trabalho.

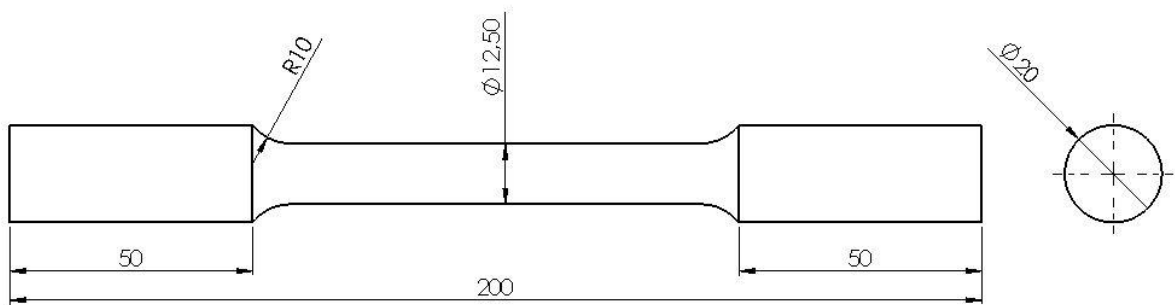


Fonte: Acervo do autor.

### 3.1 Preparação do Material

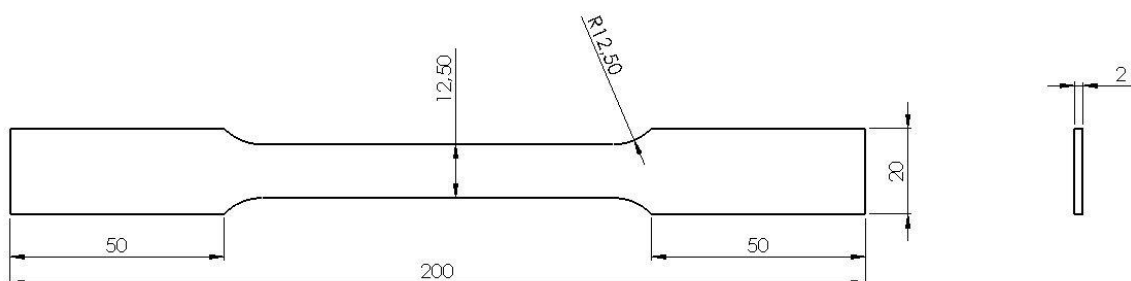
As dimensões dos corpos de prova foram determinadas segundo as normas ASTM E-8M e a NBR-6152 seguindo os padrões mais utilizados. O formato e as dimensões do corpo de prova de seção transversal circular é mostrado na Figura 7, enquanto que os parâmetros do corpo de prova de seção transversal retangular são mostrados na Figura 8.

Figura 7 – Corpo de prova de seção transversal circular segundo Norma NBR-6152.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 8 – Corpo de prova de seção transversal retangular segundo Norma NBR-6152.



Fonte: Acervo do autor.

Após a usinagem dos materiais nos formatos de norma, estes precisam ser pintados primeiramente com uma tonalidade mais clara (branco neste trabalho), e posteriormente um padrão aleatório deve ser pintado com uma cor mais escura, (preta neste trabalho) (RIBEIRO; LOPES; VAZ, 2009). Este padrão é imposto para que o método DIC funcione, permitindo assim que o software GOM Correlate rastreie o movimento de cada ponto e trace um campo de deformação no material. A Figura 9 mostra como o material fica após este procedimento.

Figura 9 – Padrão de pintura do corpo de prova.



Fonte: Acervo do autor.

### 3.2 Ensaio de tração e vídeo

No ensaio de tração utilizou-se a máquina de tração que possui duas garras, uma fixa e uma móvel, para acoplar o material e executar uma força uniaxial no CP. Nesta máquina foi medida a carga aplicada ao material. A capacidade desta máquina EMIC é de 600 kN. A Figura 10 mostra como é esta máquina.

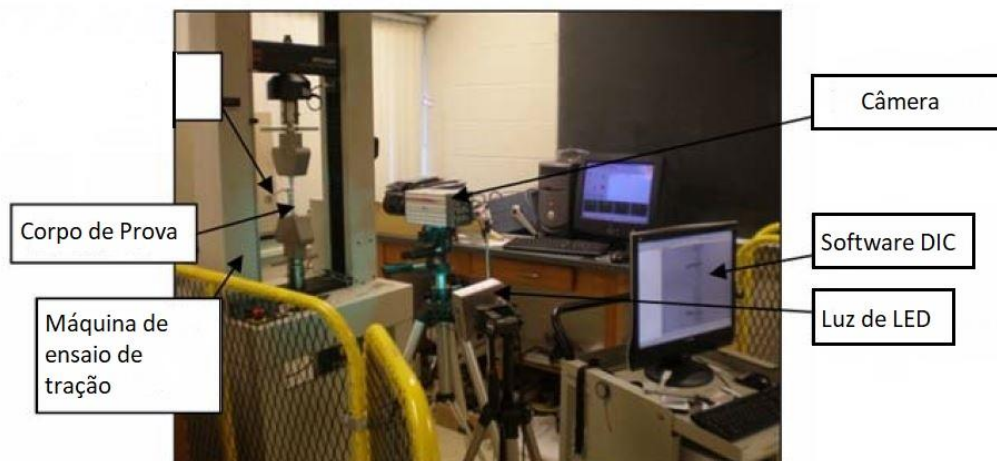
Figura 10 – Máquina de ensaio de tração.



Fonte: Acervo do autor.

Para medir a deformação do CP no ensaio de tração um esquema como o mostrado na Figura 11 foi montado, para isso foi necessário apenas uma câmera para medir a deformação 2D. A câmera é colocada na frente do CP em um tripé estável para medir a deformação durante todo o ensaio (YANG, 2010). Após o ensaio as imagens captadas foram tratadas e analisadas no software de DIC.

Figura 11 – Esquema de montagem para a realização do ensaio de tração e vídeo.



Fonte: Adaptado de YANG, 2010.

### 3.3 Procedimento de construção da curva tensão-deformação utilizando DIC

Para a construção da curva tensão-deformação amostras do tipo seção transversal circular e retangular foram usadas. A carga aplicada foi medida diretamente pela máquina de ensaio de tração. A deformação do CP e as medidas relacionadas a estrição são medidas pela Correlação de Imagens Digitais. Para o caso do CP com seção transversal circular a suposição feita é a de que esta seção se mantém como um círculo durante o ensaio de tração (AZEVEDO; DONATO, 2010). Um esquema do procedimento está sumarizado abaixo.

❖ 1º Passo: Realização do ensaio de tração;

O ensaio de tração pela NBR 6152 foi realizado conjuntamente com a filmagem. A velocidade do ensaio foi de 7mm/min. A carga aplicada foi medida pela própria máquina de tração enquanto que a filmagem foi feita com uma câmera posicionada de modo a captar todo o processo.

❖ 2º Passo: Análise da deformação pelo método DIC pelo software GOM Correlate;

A deformação foi medida pelo software GOM Correlate durante todo o processo, mais especificadamente no regime plástico antes e após a

estricção, o cálculo da deformação verdadeira foi feito utilizando-se as equações da Revisão Bibliográfica.

❖ 3º Passo: Construção da curva tensão-deformação.

Usando-se a carga aplicada medida no primeiro passo e a deformação específica convencional e verdadeira medida no segundo passo o diagrama tensão-deformação foi construído plotando-se essas informações num gráfico obtendo-se então as curvas tensão-deformação convencional e verdadeira.



#### 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram confeccionados 3 (três) CPs de formato cilíndrico e de material polimérico, porém de dimensões fora de norma para CPs poliméricos cilíndricos. 3 (três) CPs de formato retangular e de material polimérico, porém de dimensões somente aproximadas às dimensões de norma para CPs retangulares poliméricos. Estes CPs poliméricos foram feitos fora de norma e somente foram usados para se aprender o processo de marcação dos CPs e filmagem, e por isso não têm valor de pesquisa.

Ainda foram fabricados 3 (três) CPs de formato cilíndrico de aço Sae 1020 e totalmente de acordo a norma de ensaio de tração de CPs metálicos (NBR-6152), e 3 (três) CPs de formato retangular e material aço SAE 1020 com dimensões adequadas a norma de ensaio de CPs metálicos retangulares (NBR-6152). A Figura 12 mostra os CPs poliméricos enquanto que na Figura 13 é apresentado os CPs de aço.

Figura 12 – CPs poliméricos retangular e cilíndrico.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 13 – CPs de aço retangulares de cilíndricos.



Fonte: Acervo do autor.

As filmagens dos ensaios foram tratadas no software AFTER EFFECTS para que as tonalidades das cores dos padrões feitos nos CPs fossem ressaltadas e as análises feitas no GOM Correlate ficassem melhores e para transformar a filmagem em uma série de imagens, o que também facilita a análise no GOM Correlate.

#### **4.1 Testes com polímeros**

Neste tópico serão apresentados os ensaios com CPs poliméricos. Primeiramente serão mostrados os dados obtidos nos testes com CPs cilíndricos e posteriormente com CPs retangulares. Os testes feitos com polímeros serviram somente para entender o processo de marcação dos corpos de prova e como realizar a filmagem, e devido a isso, os resultados não serão comparados com a literatura.

##### **4.1.1 Ensaio com CPs poliméricos cilíndricos**

Os ensaios com polímeros cilíndricos foram feitos com a máquina de ensaio de tração da marca SHIMATZU que possui como característica uma medição mais

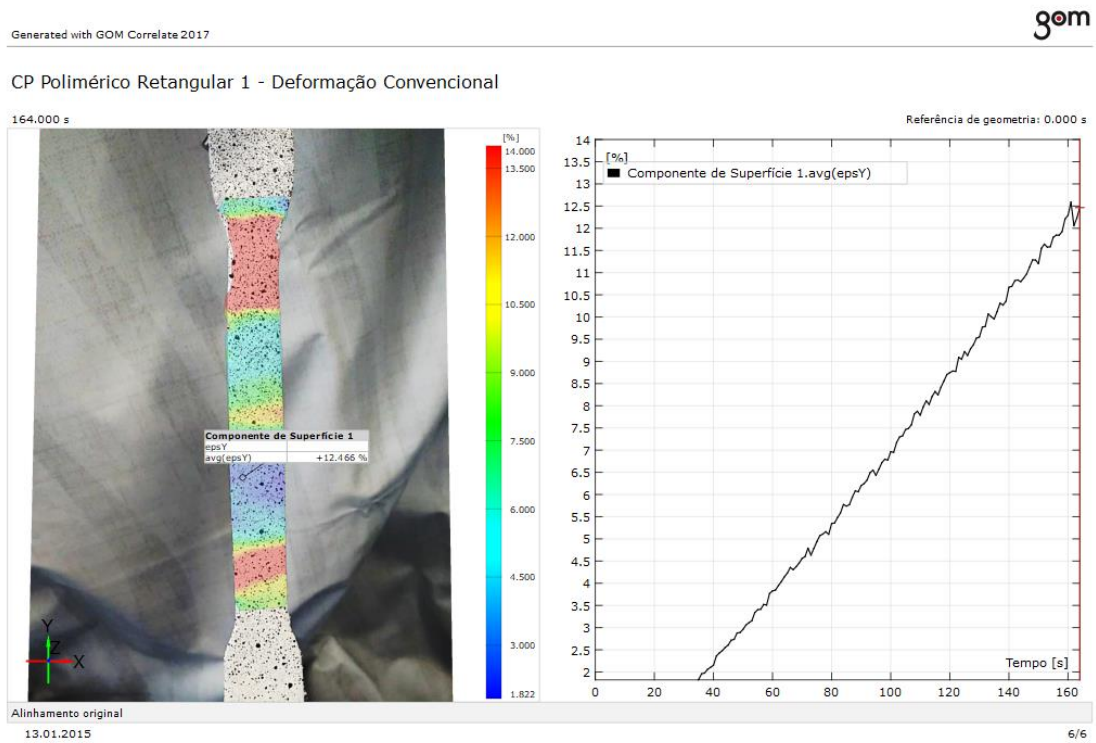
precisa, porém uma carga aplicada menor, ideal para a pouca carga da qual os CPs poliméricos resistem. Nenhum dos ensaios foi satisfatório pois todos escorregaram nas garras da máquina e os ensaios não puderam continuar. A falha deste tipo de ensaio se deu por conta de os polímeros serem termoplásticos e muito dúcteis o que acabou por os comprimir demais e o escorregamento inicial, algo normal que ocorre no início de todos os ensaios de tração e que prende firmemente o CP às garras, gerou atrito com os CPs que por fim gerou calor, e o polímero como sendo termoplástico se deformou demais e se soltou das garras todas as vezes, inviabilizando o ensaio com este tipo de material e formato.

#### 4.1.2 Ensaio com CPs poliméricos retangulares

- **Deformação Convencional do CP 1**

A Figura 15 mostra o campo de deformação convencional 2D no CP na iminência da falha. Nesta Figura podem-se observar as regiões de maior deformação no corpo de prova, onde já se vê claramente em qual região a estrição ocorre além de revelar outra região altamente deformada.

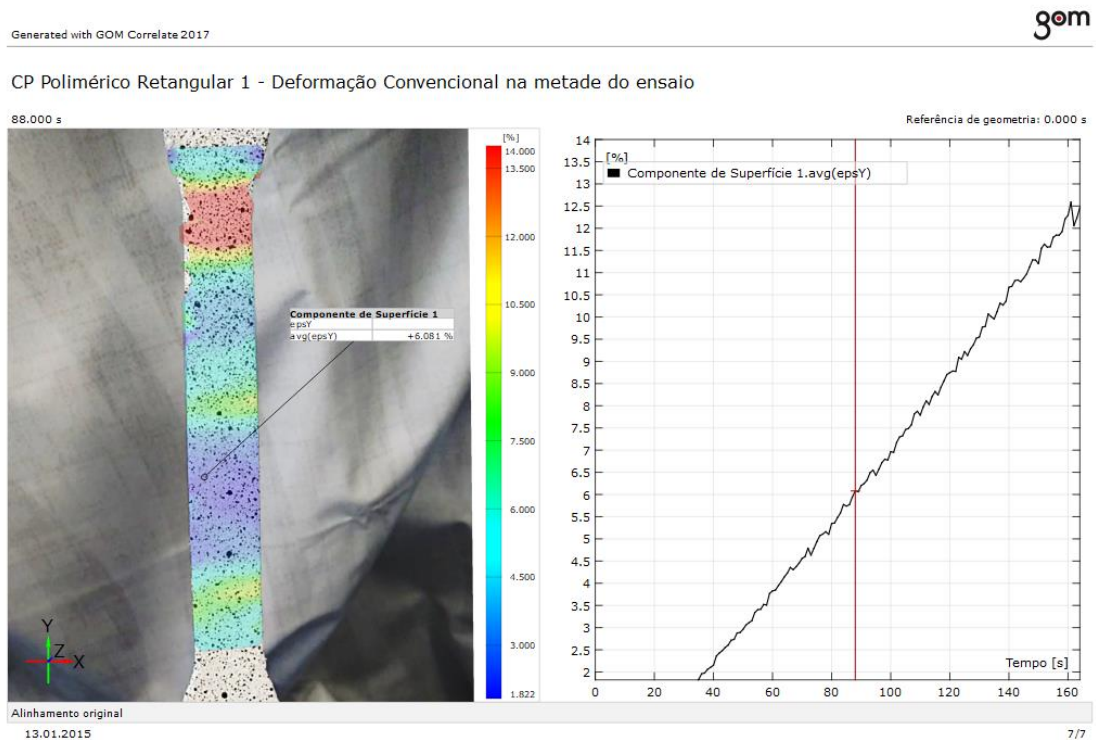
Figura 14 – Campo de deformação convencional do CP polimérico retangular 1 na iminência da falha.



Fonte: Acervo do autor.

A Figura 15 mostra o campo de deformação convencional no CP na metade do ensaio onde se pode ver claramente em qual região o CP sofrerá estricção e romperá.

Figura 15 – Campo de deformação convencional do CP polimérico retangular 1 na metade do ensaio de tração.



Fonte: Acervo do autor.

- **Deformação Verdadeira do CP 1**

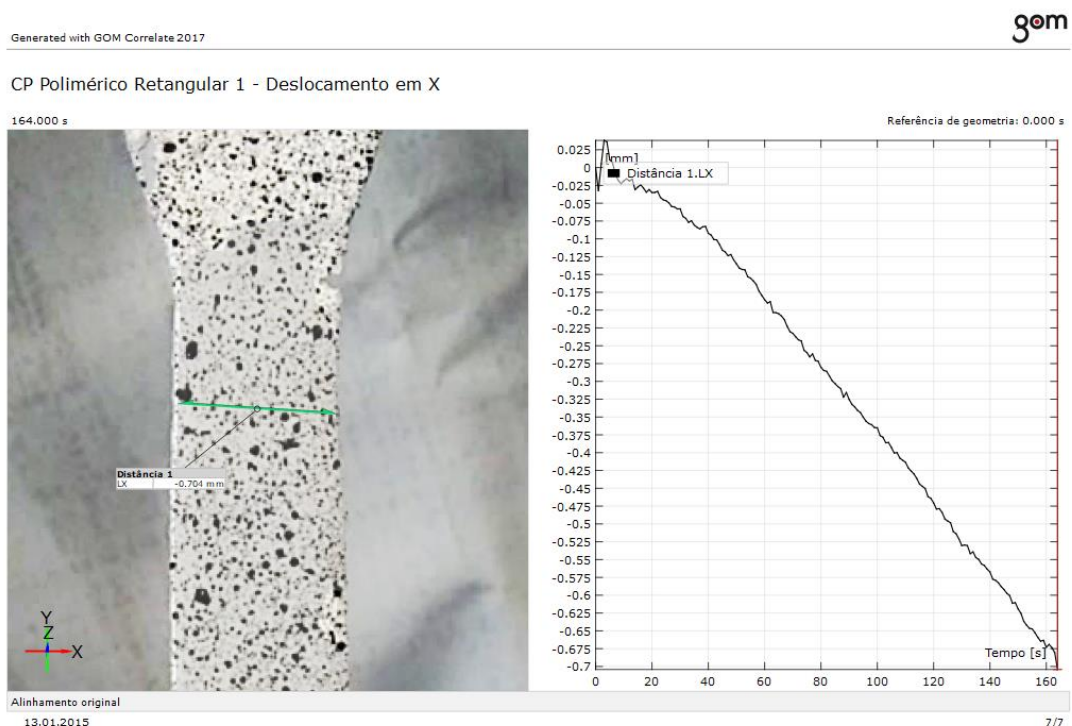
Os dados utilizados para a construção da curva tensão x deformação verdadeira são os mesmos utilizados para a construção da curva tensão x deformação convencional, porém, com uma maior análise e tratamento. A deformação verdadeira foi obtida através do software GOM Correlate enquanto que a força foi obtida da máquina de ensaio de tração da SHIMATZU. A redução da seção resistente do corpo de prova foi obtida como se mostra na Figura 17, e a partir disso a tensão verdadeira foi encontrada. A Figura 16 apresenta a curva gerada desta forma.

Figura 16 – Curva tensão x deformação verdadeira do CP polimérico retangular 1.

Fonte: Acervo do autor.

Para encontrar a área da seção transversal instantânea foi necessário desenhar uma linha no CP dentro do GOM Correlate e analisar o deslocamento em X desta linha, assumiu-se que a redução da espessura do CP foi desprezível (espessura original de 1 mm) e por fim o gráfico da Figura 17 foi gerado com este deslocamento.

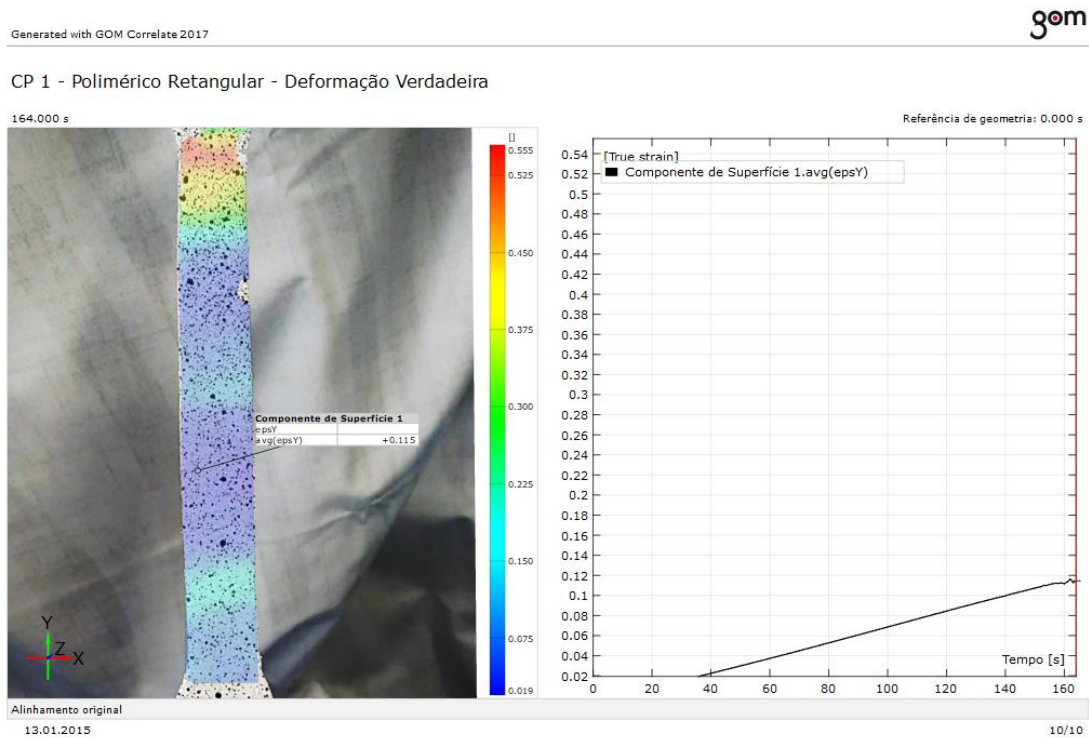
Figura 17 – Deslocamento em X da linha construída para identificação da redução de área durante o ensaio.



Fonte: Acervo do autor.

A Figura 18 mostra o campo de deformação verdadeira no CP, nota-se que a deformação é menor que a mostrada na Figura 14.

Figura 18 – Campo de deformação verdadeira do CP polimérico retangular 1 na iminência da falha.

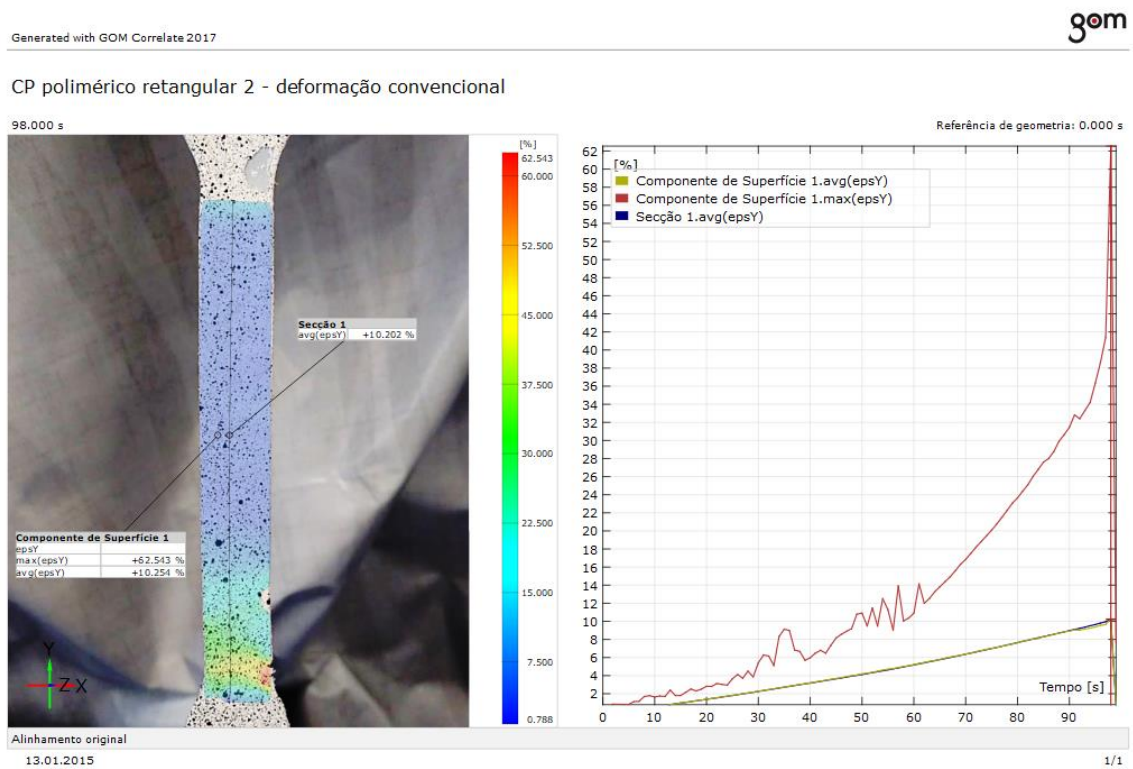


Fonte: Acervo do autor.

- **Deformação Convencional do CP 2**

A Figura 19 mostra que a região da estricção já formada através da análise de deformação e que no CP esta região está recebendo praticamente toda a carga do ensaio.

Figura 19 – Campo de deformação convencional do CP polimérico retangular 2 na iminência da falha.



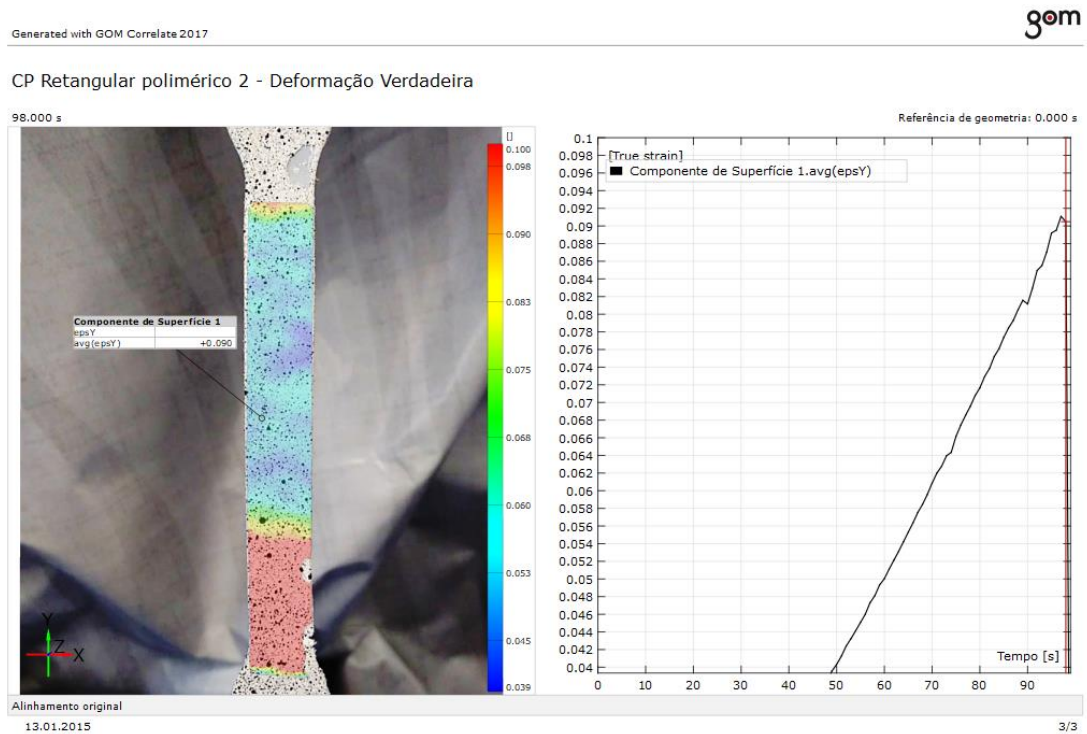
Fonte: Acervo do autor.

- **Deformação Verdadeira do CP 2**

Na Figura 20 pode se observar a deformação predominantemente na região de estrição, porém há também uma região na outra extremidade do CP se deformando mais em relação a região central.



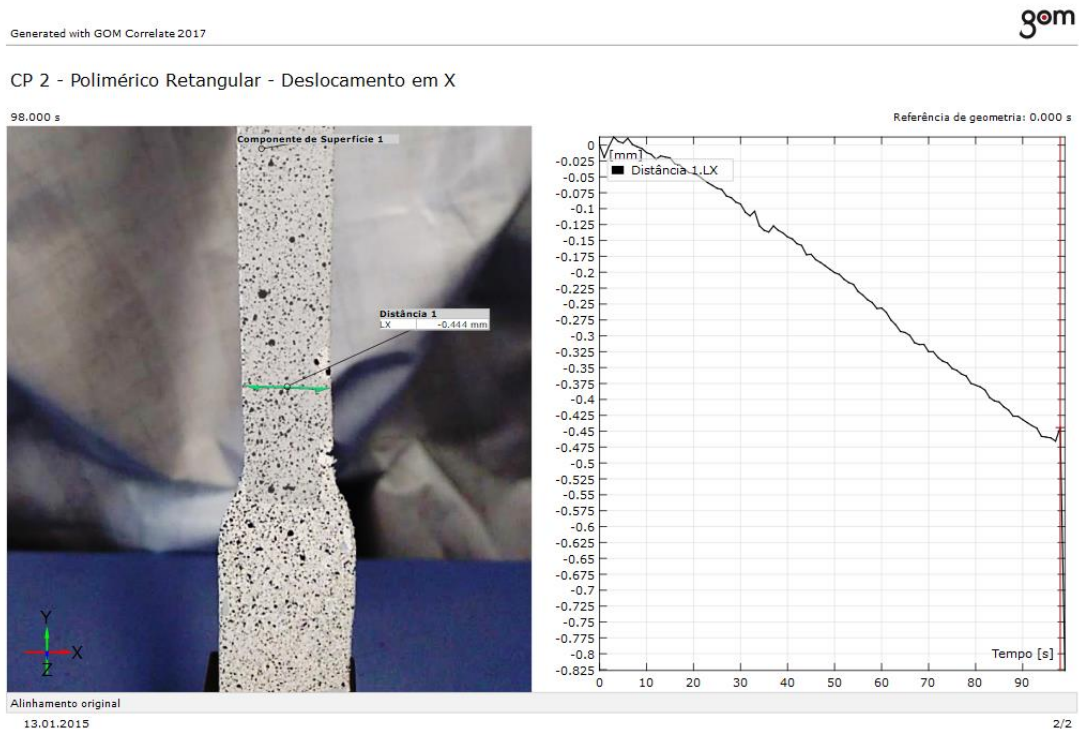
Figura 20 – Campo de deformação verdadeira do CP polimérico retangular 1 na iminência da falha.



Fonte: Acervo do autor.

A Figura 21 apresenta a metodologia utilizada para a obtenção da redução da área resistente.

Figura 21 – Deslocamento em X da linha construída para identificação da redução de área durante o ensaio.



Fonte: Acervo do autor.

## 4.2 Resultado dos testes com aços

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios com CPs de aço. Primeiramente serão mostrados os dados obtidos nos testes com CPs retangulares e posteriormente com CPs cilíndricos.

### 4.2.1 Ensaio com CPs de aço retangulares

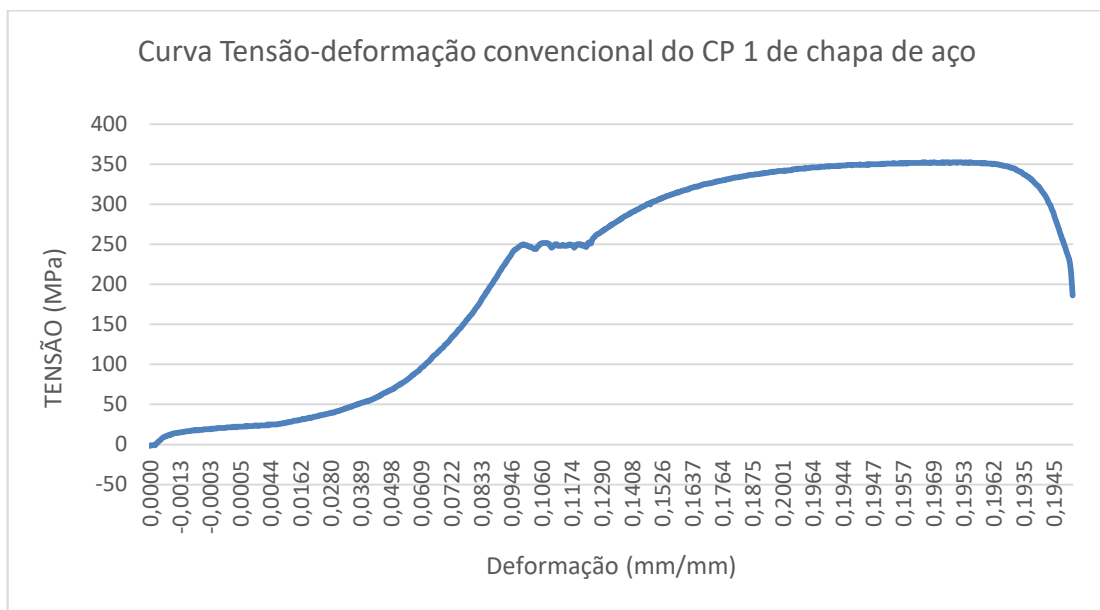
Para a construção da curva tensão x deformação, os dados de força usados foram extraídos da máquina de ensaio de tração da EMIC (Figura 10), e os dados de deformação foram retirados do software GOM Correlate, estes dados foram tratados no software MATLAB para que fossem correlacionados de forma que os tempos de início e fim além de o tamanho destes correspondessem. Por fim, utilizou-se o

software Microsoft Excel para gerar os gráficos das curvas. A curva tensão deformação convencional gerada desta forma é apresentada na Figura 22.

A seguir são apresentadas as curvas tensão deformação convencional e verdadeira com a tensão corrigida para os CPs de chapa de aço SAE 1020.

- **Análises do CP1**

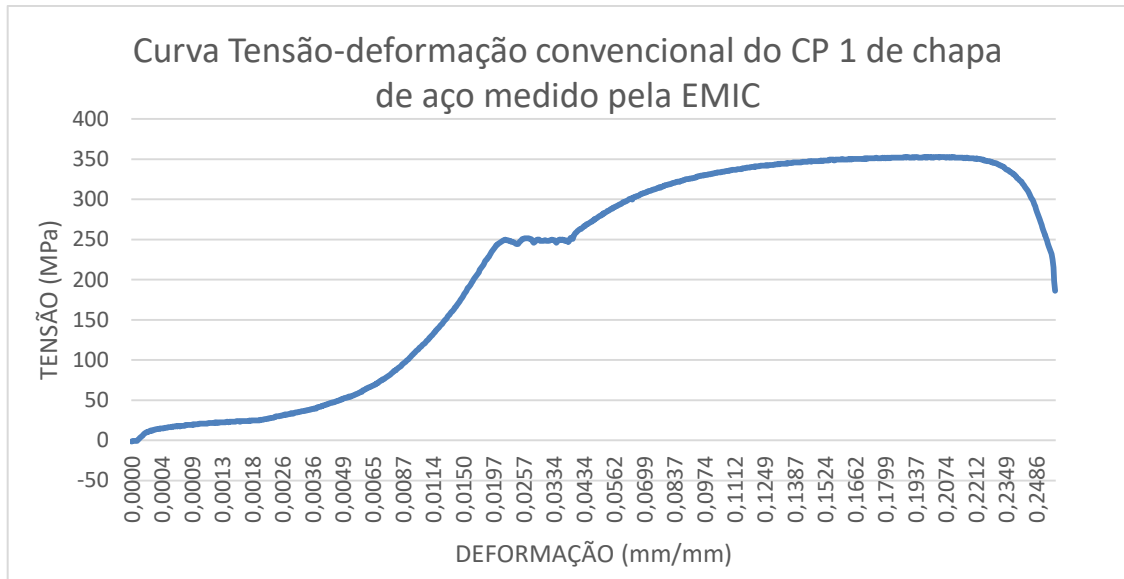
Figura 22 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 1 de chapa de aço.



Fonte: Acervo do autor.

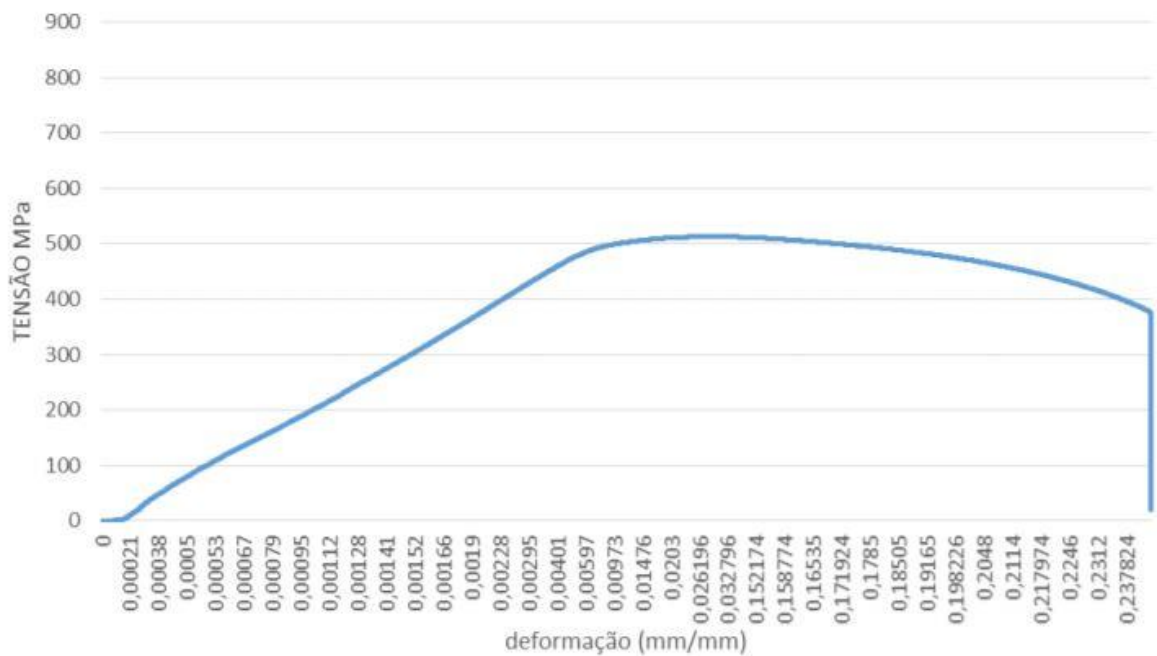
Os valores de deformação da Figura 23 foram obtidos com o Gom Correlate e correlacionados com os valores de tensão fornecidos pela máquina EMIC. Para comparação, um gráfico da tensão-deformação com somente os dados da Figura 24 foi feito. A deformação final medida pelo GOM Correlate foi de 0,1963 enquanto que a medida pela máquina EMIC foi de 0,2445. Comparando a deformação medida na bibliografia (Figura 24) o resultado foi parecido com a deformação medida pelo método DIC.

Figura 23 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 1 de chapa de aço medido pela EMIC.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 24 – Curva tensão-deformação convencional da bibliografia.



Fonte: DATRES et. all (2017).

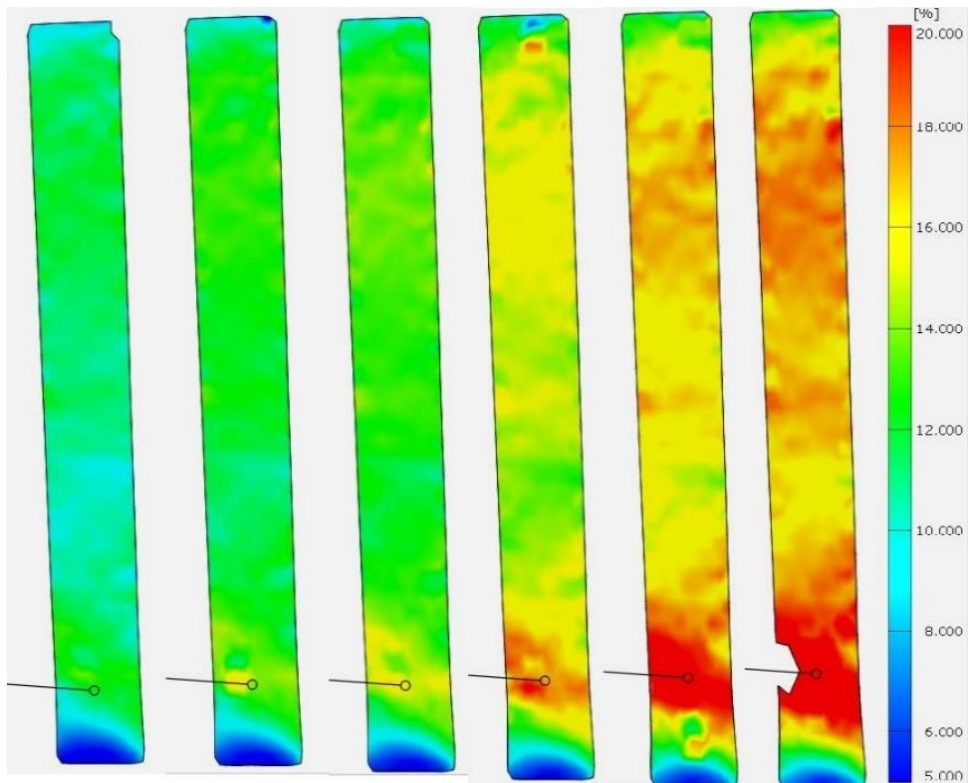
Figura 25 – Curva Tensão-deformação verdadeira com a tensão corrigida do CP 1 de chapa de aço.



Fonte: Acervo do autor.

Na Figura 25 é apresentada a curva tensão deformação verdadeira com sua tensão corrigida através dos dados de redução de seção resistente retirados do GOM Correlate.

Figura 26 – Progressão da deformação convencional no CP (deformação não uniforme no corpo).

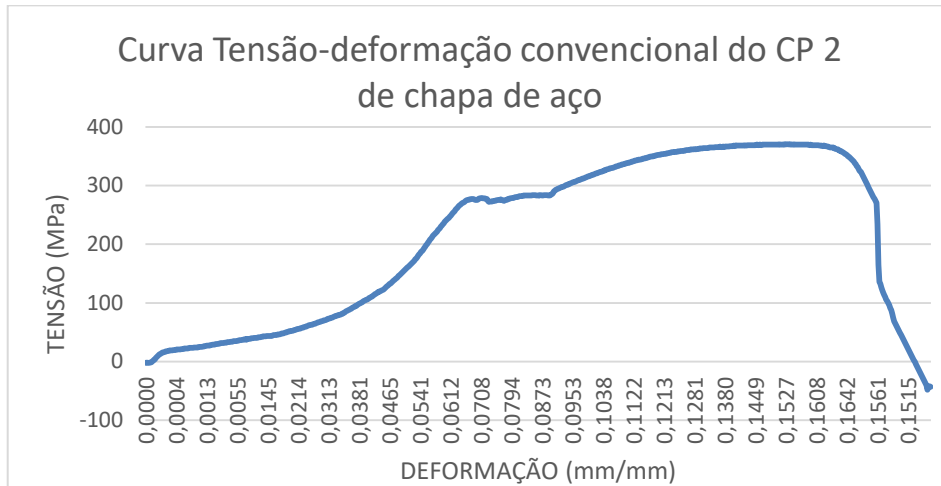


Fonte: Acervo do autor.

A Figura 26 mostra a evolução das deformações no CP. Observa-se que a deformação não é uniforme no material, a partir de uma certa deformação percebe-se a deformação passa a estar concentrada em uma só região, essa região vem a ser na conclusão do ensaio a região de rompimento do material.

- **Análises do CP2**

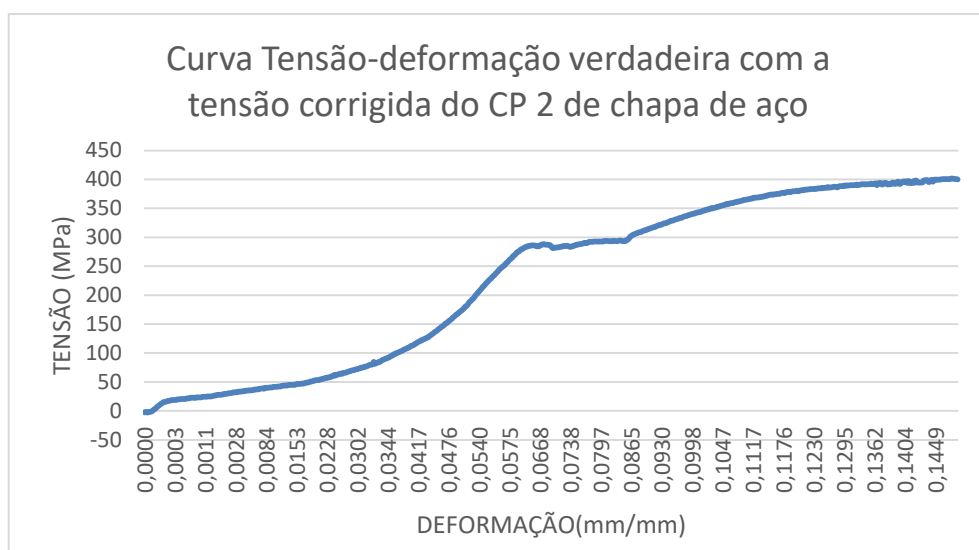
Figura 27 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 2 de chapa de aço.



Fonte: Acervo do autor.

Tanto a curva convencional quanto a verdadeira do CP 2 ficaram muito parecidas com às do CP 1.

Figura 28 – Curva Tensão-deformação verdadeira com a tensão corrigida do CP 2 de chapa de aço.

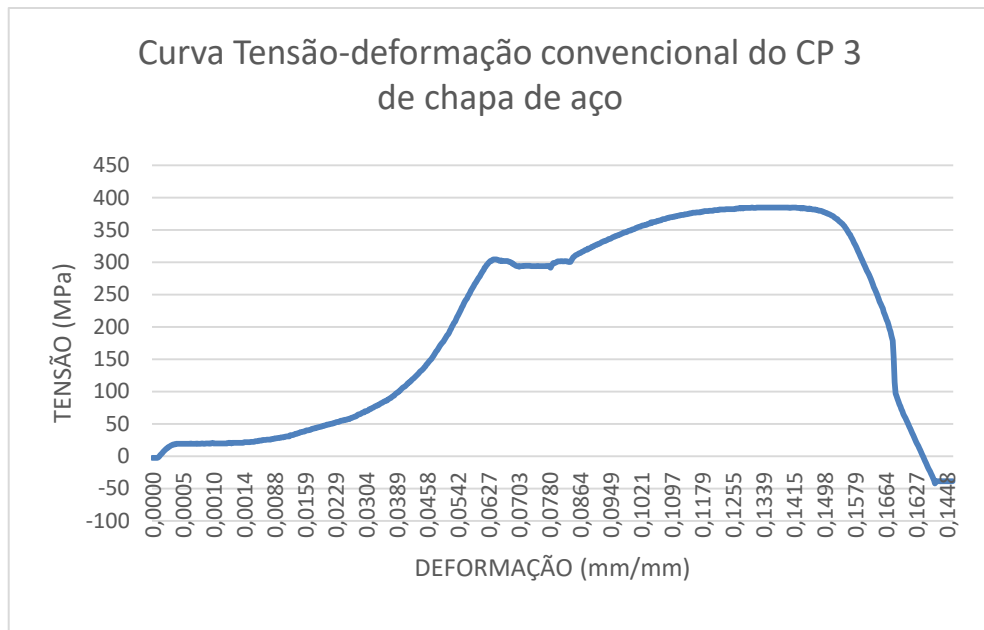


Fonte: Acervo do autor.

- **Análises do CP3**

As curvas tensão-deformação convencional e verdadeira do CP 3 se assemelharam muito às do CPs 2 e 3.

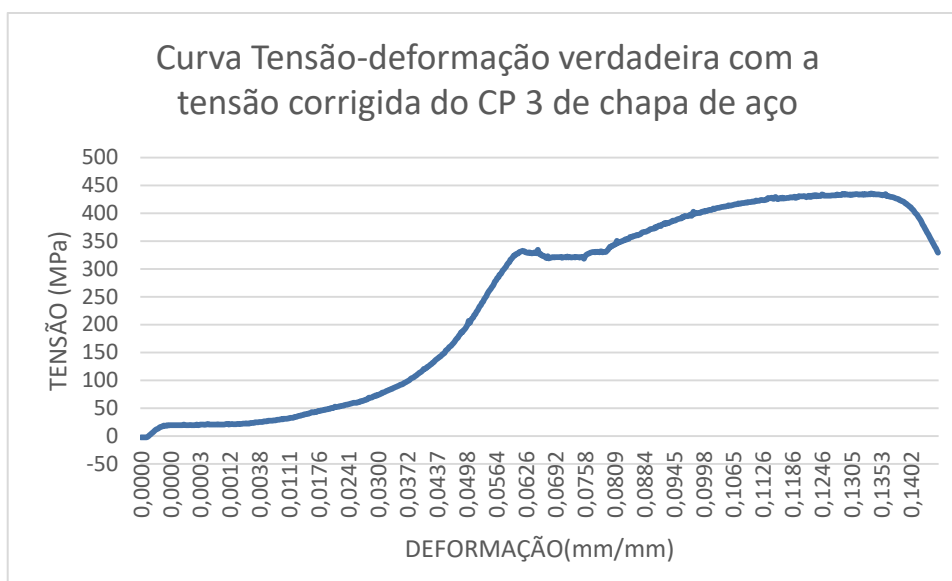
Figura 29 – Curva Tensão-deformação convencional do CP 3 de chapa de aço.



Fonte: Acervo do autor.



Figura 30 – Curva Tensão-deformação verdadeira com a tensão corrigida do CP 3 de chapa de aço.



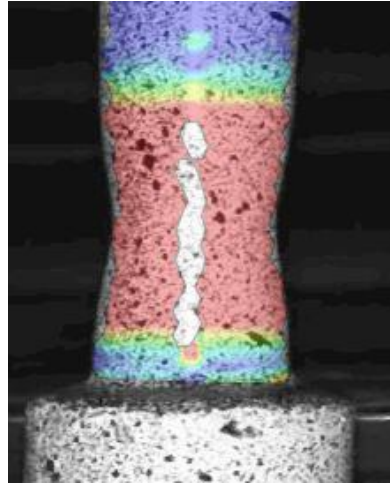
Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.2 Ensaio com CPs de aço cilíndricos

Os ensaios envolvendo CPs de aço cilíndricos falharam durante a análise da deformação no software GOM Correlate devido às condições de filmagem como iluminação, posicionamento de câmera e foco da câmera.

O tipo de geometria deste CP ainda trouxe outro problema de iluminação na qual a luz que incide sobre este corpo de prova reluz não importando a posição da câmera e ofusca uma região da superfície causando nesta região a impossibilidade de acompanhamento da deformação pelo software devido ao brilho demasiado que dificulta o acompanhamento do deslocamento do padrão aleatório de tom escuro do CP (Figura 31).

Figura 31 - Falha na construção do campo de deformação causada pela incidência demasiada de luz em uma só região.



Fonte: Acervo do autor.

## 5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método se mostrou satisfatório para a análise de deformações nos materiais e para a construção da curva tensão-deformação convencional e verdadeira, porém, algumas questões de metodologia e materiais de pesquisa inviabilizaram melhores resultados.

Os fatores determinantes para a excelência da análise estão listados a seguir:

- Iluminação do CP – Pouca iluminação faz com que o padrão de pintura não seja bem filmado pela câmera como também a iluminação excessiva tem um efeito parecido. Para os CPs cilíndricos, a iluminação reluz sobre a forma geométrica do CP ofuscando parte dele, não importando o posicionamento da câmera sendo este CP o menos indicado por este motivo;
- Posicionamento da câmera – O bom posicionamento da câmera é indispensável para este tipo de análise, tendo esta influência direta nos resultados das medições feitas pelo software, para o caso da análise 2D (escopo deste trabalho) a câmera deve ficar o mais paralelo possível com a superfície longitudinal do corpo de prova. A distância também influencia muito uma vez que a resolução da filmagem para posterior análise em software deve ser a melhor possível.
- Foco e exposição de luz fixos – O foco e exposição de luzes devem ficar travados durante o ensaio inteiro pois se isto não for feito a análise ficará comprometida por ter o padrão não reconhecido pelo software.

Outro problema encontrado durante o trabalho foi correlacionar os dados do ensaio fornecidos pela máquina de ensaio de tração EMIC com os dados obtidos das análises das filmagens no GOM Correlate. Os tamanhos dos dados sempre serão diferentes, a filmagem geralmente tem de ser cortada para coincidir com o início do ensaio bem como com o fim do ensaio. Outro problema é o número de dados no mesmo intervalo, pois a máquina fornece um determinado número dependendo da velocidade do ensaio e do tempo de ensaio enquanto que a filmagem fornece um certo número de quadros por segundo, estes quadros serão analisados no software como uma série de imagens e cada imagem gerará um valor.

Ainda, deve-se atentar quanto a qualidade da pintura feita no corpo de prova, quanto a sua aderência, pois a tinta pode se desprender do CP durante o ensaio

devido a deformação sofrida pelo corpo de prova, quanto ao seu padrão de tom escuro aleatório que é fundamental na análise pelo software.

Como sugestão para trabalhos futuros os ensaios devem levar em conta o que foi mencionado neste trabalho para obterem resultados esplêndidos, do contrário, a análise não será totalmente precisa. Outra sugestão é a elaboração de um método de correlação de dados da máquina de tração e dados do GOM Correlate visto que os dados sempre serão de tamanhos diferentes.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E8M-04. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]**. United States. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6152: Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro. 2002.

AZEVEDO, Nick B. DONATO, Gustavo H. B. **Metodologia para determinação de curvas tensão-deformação verdadeiras pós-estricção**. Centro Universitário da FEI. [S.I.]. 2010.

BEER, Ferdinand P. RUSSELL, Johnston Jr. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2006.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. São Paulo: Editora LTC, 2008.

CHAKRABORTY Debaleena; MURTHY K.S.R.K.; CHAKRABORTY D. **Experimental determination of mode I stress intensity factor in orthotropic materials using a single strain gage**. Journal of Engineering Fracture Mechanics (2017) vol. 173. pg.130-145.

DALLY J. W.; R. J. SANFORD. **Strain-gage methods for measuring the opening-mode stress-intensity factor,  $K_I$** . Society for Experimental Mechanics (1987) 27: 381.

DATRES et. all (2017). **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Araçatuba, SP, v. 02, n. 01, p. 70-82, jan./ago. 2017.

DIETER, G.E.Jr., **Mechanical Metallurgy**, International student edition, MacGrawHill,1961.

FARIDMEHR I, OSMAN MH, ADNAN AB, NEJAD AF, HODJATI R, AZIMI M. **Correlation between engineering stress-strain and true stress-strain curve**. Am J Civil Eng. Arch 2014 January 23;2(1):53–9.

GARCIA A. SPIM J. A. SANTOS C. A. **Ensaio dos materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

GONZÁLES, G. L. G. **Medição de deformações elastoplásticas em regiões de concentração de tensões utilizando métodos sem malha e visão computacional**. [S.I.]: [s.n.], 2014.

GUILHERME José. **Extensometria (Strain Gauge) – O que é? Quando utilizar?** 2016. Disponível em: <http://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>. Acesso em: 21 mai. 2018.

HOFFMANN, Karl. **An Introduction to Measurements using *Strain gages***. Publicado por Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.

Masayuki Kamaya. Masahiro Kawakubo. **A procedure for determining the true stress–strain curve over a large range of strains using digital image correlation and finite element analysis**. *Mechanics of Materials*, Volume 43, Issue 5. Pages 243-253, 2011.

LING Yun. **Uniaxial True Stress-Strain after Necking**. *AMP Journal of Technology*. Vol. 5 June, 1996.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. [S.l.]: Editora Atlas, 2003.

MAXWELL. **Correlação digital de Imagem**. [S.l.]: Pontifícia Universidade católica do Rio de Janeiro, 2009.

NEMOTO, Yoshiro Lima. **Determinação da Curva de Tensão-Deformação Verdadeira de metais isotrópicos usando corpos de prova de chapa fina**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

RIBEIRO, J.; LOPES, H.; VAZ, M. **Estudo Numérico E Experimental Do Campo De Deformações Na Interface Osso-Implante**. 2009.

SAVIC V. HECTOR L.G. Jr. FEKETE J.R. **Digital Image Correlation Study of Plastic Deformation and Fracture in Fully Martensitic Steels**. *Society for Experimental Mechanics*. 50:99–110, 2010.

SHAEFFER, Lírio. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

YANG, Lianxiang. **Measurement of Strain Distribution Using Digital Image Correlation (DIC) For Tensile Tests**. The Advanced High Strength Steel Stamping Team of the Auto/Steel Partnership (A/SP). [SI]. 2010.