



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

## PED's responsáveis:

André Henrique Guimarães Gabriel – guimaraes.andreh@gmail.com

Matheus Wischi – matheuspw.unicamp@gmail.com

## EXPERIMENTO 4: ENSAIO DE TRAÇÃO

### Objetivos:

Estudar a influência dos tratamentos térmicos de têmpera, têmpera/revenimento, de solubilização e solubilização/envelhecimento em materiais metálicos assim como da influência da taxa de carregamento em polímeros, nas propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração. Estudar a técnica de análise de deformação através da técnica de correlação digital por imagem (DIC).

### Parte 1 – Ensaio de tração

#### Fundamentação teórica:

Há diversos meios para se medir/determinar as propriedades dos materiais metálicos, entre eles, encontra-se o ensaio de tração. De uma maneira geral, o ensaio de tração fornece diversas propriedades e características do material, determinadas direta ou indiretamente, entre elas: limites de escoamento e de resistência, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade e ductilidade. Sendo assim, este ensaio é amplamente utilizado para o levantamento de informações básicas sobre a resistência dos materiais e como teste de validação de materiais. O ensaio utiliza corpos de prova padronizados, seguindo normas técnicas. No Brasil a norma utilizada para materiais metálicos é a NBR-6152 (ABNT). O resultado do ensaio consiste em uma curva tensão de trabalho pela deformação sofrida pelo corpo de prova. A figura 1 ilustra as curvas típicas obtidas no ensaio de tração.

#### Comportamentos típicos das curvas tensão deformação

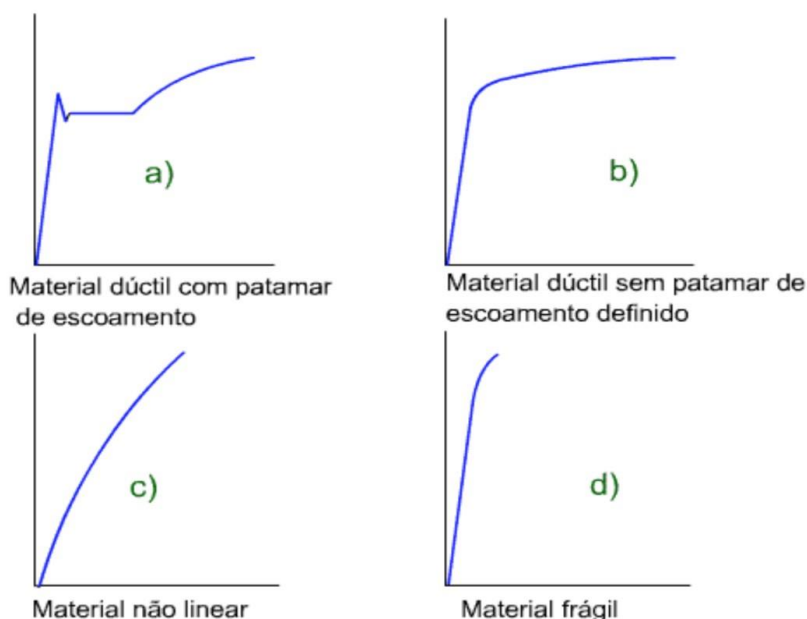


Figura 1. Curvas típicas de tensão x deformação obtidas em ensaios de tração.



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

Um dos recursos disponíveis para alterar o comportamento mecânico é a realização de tratamentos térmicos das peças, como têmpera, revenimento, solubilização e envelhecimento.

No caso de aços, a principal transformação de fase na condição de equilíbrio termodinâmico é a reação eutetóide: austenita (ferro  $\gamma$ )  $\leftrightarrow$  ferrita (ferro  $\alpha$ ) + cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). A austenita, com elevada solubilidade de carbono, se transforma, durante o resfriamento, em ferrita, com menor solubilidade de carbono, e cementita, com concentração muito maior de carbono. A perlita é o produto microestrutural dessa transformação, dado o crescimento cooperativo de lamelas de ferrita e cementita. Fora das condições de equilíbrio, a temperatura e a taxa de resfriamento têm papéis importantes na transformação da austenita durante o resfriamento.

A transformação para perlita ocorre em baixas taxas de resfriamento. Em tratamentos isotérmicos, abaixo de aproximadamente 540 °C, ocorre a transformação de austenita para bainita, um microconstituente que também é formado pelas fases ferrita e cementita. Já em taxas mais elevadas de resfriamento, forma-se o microconstituente martensita, que é metaestável e gerado por uma transformação adifusional. Por não ser dependente de difusão, a transformação martensítica não depende do tempo, apenas da temperatura e da taxa de resfriamento. Em termos de desempenho mecânico, a microestrutura perlítica possui boa tenacidade, porém baixa resistência mecânica, comparativamente aos demais microconstituintes. No outro oposto, a martensita apresenta maior resistência mecânica, porém é muito frágil. Por isso, geralmente, um aço temperado requer revenimento para aumento de sua tenacidade. Já a bainita representa um aumento de resistência mecânica sem grande perda de ductilidade.

No caso do alumínio e suas ligas, fala-se em solubilização e envelhecimento. A solubilização consiste no aquecimento da liga a uma temperatura bem elevada, próximo ao ponto de fusão, permitindo a migração dos átomos no material e logo a dissolução completa das fases secundárias inicialmente presentes. Após a solubilização, é possível realizar o envelhecimento da liga, para crescimento controlado de precipitados no material. Esse tratamento é realizado a temperaturas inferiores à de solubilização e geralmente por um tempo mais prolongado.

## Parte 2 - Correlação digital por imagem, resumo teórico:

A análise por Correlação Digital de Imagem surgiu nos anos 80 e é definida por uma técnica óptica-numérica para medição de campos de deslocamento e deformação na superfície de um corpo de prova. Sua importância se dá pelo caráter não-destrutivo e por não precisar de contato com a amostra, ou seja, possibilitando a aferição das deformações de maneira localizada no material e sem o uso de um extensômetro. Além disso é possível criar campos completos de deformação tridimensionais e adaptar o sistema para diversas condições experimentais.

### Materiais Utilizados:

Dispositivo para realização do ensaio;

Corpo de prova (Borracha preta com o padrão aleatório aplicado);

Régua com escala visível;

Celular com câmera;

Software Gratuito GOM Correlate:

(<https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate/download.html>)

Tutoriais no Youtube:

(<https://www.youtube.com/watch?v=ZR4tHr0EL-I&list=PLuGIgkKQklolrwpYIUcxpBJrXNHZrZMo1>)

### Pré-teste:

Para o teste deverão ser estudados os seguintes tópicos:

- 1) Definição dos aços, ligas alumínio e materiais poliméricos;



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

- 2) Estrutura dos materiais;
- 3) Diagrama de fases;
- 4) Tratamentos térmicos e temperabilidade dos aços;
- 5) Solubilização e precipitação;
- 6) Processamento de polímeros;
- 7) Definição de ensaio de tração e suas propriedades;
- 8) Correlação Digital de Imagem.

**Obs.: A breve fundamentação teórica dada acima não aborda todo o conteúdo que será exigido no pré-teste. Sendo assim, a leitura das referências bibliográficas é de fundamental importância para um bom desempenho no teste**

## Procedimento Experimental

Serão entregues aos alunos corpos de prova (cp) de tração em aço 4340 (2 peças), liga de alumínio 6351-T6 (2 peças e plásticos de engenharia injetado. O seguinte procedimento deverá ser seguido:

- a) Anotar qual o material está sendo analisado;
- b) Para as amostras em aço realizar a austenitização ( $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) seguido do processo de têmpera (1 cp) e posterior revenimento ( $550\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ ) (1 cp);
- c) Para as amostras em alumínio realizar a solubilização ( $550\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$ ) seguido de resfriamento em água (1 cp) e posterior envelhecimento ( $200\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ h}$ ) (1 cp);
- d) Tomar nota das dimensões iniciais do corpo-de-prova (área útil e comprimento útil) e das condições do ensaio;
- e) Realizar o ensaio de tração para os cps nas seguintes condições:
  - i. Amostra em aço temperada e amostra temperada e revenida;
  - ii. Amostra em liga de alumínio solubilizada e solubilizada e envelhecida;
  - iii. Amostras em material poliméricas tracionadas sob diferentes taxas de carregamento.
- f) Tomar nota das dimensões finais do corpo-de-prova (área final e comprimento final) e da região da fratura;

## Parte 2 - Análise experimental por Correlação Digital de Imagem (DIC)

Os alunos deverão se reunir em seus respectivos grupos e juntos analisar por correlação digital de imagem 2D um ensaio de tração. Para isso, será necessário que cada grupo obtenha as imagens do ensaio utilizando um corpo de prova existente e com o padrão de superfície já aplicado. Após a captura das imagens e com o auxílio de um software, os alunos irão analisar o comportamento da amostra e criar um relatório diretamente do software para apresentar os resultados.

### Correlação digital de imagem (DIC) - Etapa Inicial (Ensaio de Tração)

1. Aplicação do padrão na superfície:
  - a) Padrão aleatório de alto contraste empregado na superfície do corpo de prova necessário para que o software consiga correlacionar a imagem de uma região antes e após a deformação.
2. Instalar o programa:
  - a) Utilizar o link para o download;
  - b) Criar uma pasta diretório para armazenar os arquivos.
3. Montagem no dispositivo:
  - a) Posicionar o corpo de prova já com o padrão aleatório no dispositivo para ser tracionado;
  - b) Posicionar uma régua para se obter uma escala de referência;



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

- c) Posicionar o celular de forma que a imagem do corpo de prova esteja centralizada e com foco.
4. Realização do ensaio:
  - a) Iniciar a gravação/sequência de fotos no celular;
  - b) Tracionar o corpo de prova lentamente (Rotacionar cada  $\frac{1}{4}$  de volta por vez).
5. Importar as imagens/vídeo:
  - a) A gravação deve ser exportada para o computador;
  - b) Na sequência, as imagens devem ser importadas no programa.

Note que: Caso o aluno tenha gravado um vídeo, o programa converterá o vídeo em uma sequência de imagens

## Etapa Final (DIC)

1. Seleção da superfície de análise (Áreas retangulares, retirando falhas do padrão de superfície e/ou furos)
  - a. Após incluir as imagens na área de trabalho do programa, será criada automaticamente uma linha do tempo, na qual é possível ver a deformação do corpo de prova de acordo com o tempo a linha do tempo torna-se uma sequência de frames da imagem;
  - b. Nessa etapa deve-se selecionar os componentes de superfície por meio da seleção de polígonos e de círculos para o furo;
  - c. Após a conclusão dessa etapa é possível correr o mouse pela linha do tempo mostrando apenas os componentes de superfície. Nesse momento o software já realizou uma correlação com a imagem e faz as componentes de superfície obterem um comportamento de deformação semelhante ao do corpo de prova
2. Criar um sistema de coordenadas alinhá-lo com a geometria do corpo de prova
  - a. No menu superior direito é possível criar um sistema de coordenadas, utilizaremos o método por pontos 3-2-1, no qual serão selecionados três pontos que representarão os eixos de coordenadas
3. Introduzir parâmetro de escala. Utilizar como referência a régua contida na imagem
  - a. No menu inferior esquerdo faremos a calibração das dimensões da imagem introduzindo um valor de distância correspondente a dois pontos escolhidos na imagem;  
A partir desta calibração é possível obter resultados numéricos de distância entre dois pontos antes e após a deformação da amostra.
4. Selecionar as propriedades a serem analisadas
  - a. Após esses passos iremos selecionar a propriedade desejada para a análise. Será escolhida Epsilon Y, a qual representa a deformação da amostra na direção do eixo Y do sistema de coordenadas criado. Selecionando Epsilon Y será incluída na imagem uma representação do campo de deformações caracterizada por uma escala de cores. Desta forma obtemos a porcentagem de deformação da amostra sobre toda a superfície selecionada;
  - b. É possível também selecionar qual é o estágio de referência para a escala de deformação;
  - c. Podemos também fazer a análise pontual da deformação selecionando um ou mais pontos quaisquer através da seleção "Labels" no menu superior esquerdo.
5. Criar um relatório
  - a. No botão representado por uma câmera faremos a criação da página do relatório em que aparecerá a análise visível na área de trabalho, no caso será criada uma página com a representação gráfica de Epsilon Y;
  - b. Utilizando o menu de Relatório podemos alterar as características da página do relatório, assim como criar texto, incluir tabelas e gráficos.

Ao fim do experimento os grupos devem obter imagens/vídeos que demonstrem o campo de deformações da superfície do corpo de prova de acordo com a solicitação mecânica. Os alunos também irão adquirir conhecimento sobre as técnicas empregadas, seus recursos e suas diversas aplicações.



# FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - FEM/UNICAMP

Rua Mendeleev, 200 - CEP 13083-860

Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo

Campinas - SP [www.fem.unicamp.br](http://www.fem.unicamp.br)

## Relatório:

1. Introdução:  
Deverá conter texto tratando sobre:
    - a) Aços, ligas de alumínio e plásticos de engenharia;
    - b) Tratamentos térmicos em metais;
    - c) Processamento de polímeros;
    - d) Ensaios de tração e suas particularidades (equipamentos, células de carga, extensômetros, etc);
    - e) Correlação Digital de Imagem, aplicações.
  2. Objetivos do experimento.
  3. Metodologia experimental.
  4. Resultados e discussões:
    - a) Apresentação dos gráficos de tração na forma de curva de engenharia (Tensão (MPa) x deformação (%)) de todos os materiais analisados.
    - b) Determinação das propriedades: Módulo de elasticidade (GPa); Limite de escoamento (MPa); Resistência a tração (MPa); Alongamento final (%); Módulo de resiliência (MJ/m<sup>2</sup>); Módulo de tenacidade (MJ/m<sup>2</sup>).
    - c) Comparação entre as curvas/propriedades como também das superfícies de fratura (para os metais), dos conjuntos de amostras de mesmo material (aço 4340 (2 cp's) , liga 6351 (2 cp's), amostras de polímero (3 cp's)) e justificando o motivo de tal diferenciação, seja causado pelo tratamento térmico (no caso dos metais) ou pela taxa de carregamento (no caso dos polímeros).
    - d) Comparação dos resultados obtidos com a da literatura. Justificando motivos para tais diferenças.
    - e) Apresentação do relatório gerado no GOM, apresentando as vantagens do uso da técnica DIC, indicando nas imagens estas vantagens.
- OBS 1: Dados com unidades diferentes das solicitadas terão descontos na nota final.
- OBS 2: Relatórios ausentes da parte 2 do experimento (DIC) terão valor de 50%.
5. Conclusões  
Confrontamento dos objetivos com os resultados e discussões. Foram atendidos, sim, não, por quê?
  6. Referências bibliográficas

## Observações:

- 1) Para execução do procedimento experimental, deve-se utilizar Equipamento de Proteção Individual - EPI ou Equipamento de Proteção Coletivo - (EPC) indicado, nos laboratórios, para cada operação;
- 2) Cuidado com a manipulação de objetos quentes;
- 3) Segurança máxima para evitar o contato de metal aquecido.

## Referências bibliográficas:

Garcia, A., Spim, J. A. & Santos, C. A. Ensaios dos Materiais - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012. Callister Jr, W.D. Materials Science and Engineering – Na Introduction, J. Wiley & Sons, 3a. edição, 1994. Askeland, D.R. The science and engineering of materials. 6 ed, Cengage Learning, 652p, 2008.

Souza, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Editora Edgard Blucher, 5a. edição, 1989. Dieter, G. E. Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill Book Co., 3a. edição, 1986.

ASM Metals Handbook, Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation, American Society for Metals, 2012. (Disponível em <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>)