

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE ALVES PIRES

**ELABORAÇÃO DE UM MANUAL DE PROCEDIMENTOS PARA
EXPERIMENTOS PRÁTICOS
EM MECÂNICA DOS SÓLIDOS PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014

FELIPE ALVES PIRES

**ELABORAÇÃO DE UM MANUAL DE PROCEDIMENTOS PARA
EXPERIMENTOS PRÁTICOS
EM MECÂNICA DOS SÓLIDOS PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Fernando Henrique de Oliveira Camara

CORNÉLIO PROCÓPIO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

ELABORAÇÃO DE UM MANUAL DE PROCEDIMENTOS PARA EXPERIMENTOS PRÁTICOS EM MECÂNICA DOS SÓLIDOS PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

por

FELIPE ALVES PIRES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de Dezembro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Fernando Henrique de Oliveira Camara
Prof. Orientador

Adailton Silva Borges
Membro titular

Edson Hideki Koroishi
Membro titular

Dedico este trabalho a toda minha família, que sempre me incentivou e apoiou em toda minha trajetória de estudos tornando possível a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pela saúde, entusiasmo e inspiração para a concretização desse sonho.

Aos meus pais, Valdir Wedson Pires e Elizabete Alves Pires, e ao meu irmão Rodrigo Alves Pires pelo apoio, compreensão de meus momentos de ausência do convívio familiar.

Ao Professor e orientador Fernando Henrique de Oliveira Camara pela orientação, atenção, paciência e dedicação durante todo o período de elaboração deste trabalho.

Ao Vanderlei Malaquias e ao Professor Maurício Takano pelo auxílio na confecção das peças necessárias para o trabalho, e também à Professora Sandra Domiciano por ceder equipamentos do laboratório de física para a realização dos experimentos. À empresa Alliance Indústria Mecânica Ltda., onde fiz meu estágio e que disponibilizou alguns materiais utilizados nos experimentos.

Agradeço também a minha namorada Livia Grandini Saraiva pelo apoio, compreensão e carinho, e aos meus amigos que fizeram parte de minha graduação, principalmente ao Vinicius Rodrigues, Vinicius Martins, Lucas Niro, Benedito, Henrique, aos meus amigos de intercâmbio e também aos inúmeros colegas de classe pelo apoio, ajuda, compreensão e amizade nesses cinco anos de convívio.

Aos professores do Curso de Engenharia Mecânica desta instituição, com os quais tive o prazer em aprender e que, com compromisso e competência exercem a sua função.

RESUMO

PIRES, F. A. **Elaboração de um Manual de Procedimentos para Experimentos Práticos em Mecânica dos Sólidos para Obtenção do Módulo de Elasticidade dos Materiais**. 2014. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Este trabalho apresenta um manual de procedimentos para montagem de experimentos práticos para obtenção do módulo de elasticidade dos materiais e também para observar como tais materiais se deformam quando submetidos a esforços mecânicos. Para isso, foram abordadas a conceituação dessa propriedade mecânica e a teoria vinculada à lei de Hooke junto ao diagrama Tensão x Deformação de maneira que seja possível coletar os resultados dos experimentos e compará-los com os valores da teoria.

Palavras-chave: Experimentos práticos. Módulo de Elasticidade. Lei de Hooke. Tensão x Deformação.

ABSTRACT

PIRES, F. A. **Preparation of a Manual of Procedures for Practical Experiments to obtain the Young's Modulus of the Materials.** 2014. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This work presents a manual of procedures to assemble practical experiments in order to obtain the Young's Modulus of the materials and also to observe how these materials deform when forces are applied to them. To be able to do so, the conceptualization of this mechanical property and the theory that is linked to the Hooke's law and Stress-Strain curve were considered here so that it was possible to collect the data and compare them to the theoretical values.

Keywords: Practical experiments. Young's Modulus. Hooke's law. Stress x Strain curve.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento Tensão x Deformação para materiais frágeis e dúcteis	16
Figura 2 – Tensão x Deformação do comportamento elástico linear	18
Figura 3 - Viga engastada com uma força aplicada na extremidade.....	20
Figura 4 - Viga bi apoiada com uma força aplicada no centro.....	21
Figura 5 - Parâmetros para o cálculo do momento de inércia de seções transversais retangulares ...	22
Figura 6 - Parâmetros para o cálculo do momento de inércia de seções transversais circulares	23
Figura 7 - Máquina utilizada para se realizar o ensaio de compressão.....	25
Figura 8 - Corpo de prova utilizado no ensaio de compressão	25
Figura 9 - Corpo de prova colocado na máquina para começar o experimento.....	26
Figura 10 - Corpo de prova na máquina com a câmera focalizando o monitor	27
Figura 11 - Corpo de prova colocado na máquina com fita dupla face	28
Figura 12 - Corpo de prova na máquina após o fim do experimento.....	28
Figura 13 - Corpo de prova achatado após o fim do experimento.....	29
Figura 14 - Arranjo esquemático para o ensaio do fio de cobre	29
Figura 15 - Fio de cobre fixado em uma extremidade	31
Figura 16 - Fio de cobre com laço para pendurar os pesos	31
Figura 17 - Arranjo esquemático para o ensaio de flexão do aço INOX.....	33
Figura 18 - Viga de aço INOX posicionada para o início do experimento	34
Figura 19 - Arranjo esquemático para obtenção de E do aço 1020	35
Figura 20 - Viga de aço 1020 fixada na haste por um parafuso de 4 mm.....	37
Figura 21 - Viga de aço 1020 posicionada para o início do experimento	37
Figura 22 - Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão	39
Figura 23 - Região elástica do diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Deformações causadas no fio de cobre pela força peso.....	41
Quadro 2 - Deflexões na viga de aço INOX causadas pela força peso.....	42
Quadro 3 - Deflexões na viga de aço 1020 devido à força peso	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do módulo de elasticidade para vários metais à temperatura ambiente em GPa..	19
---	----

LISTA DE SIMBOLOS

σ	Tensão
ε	Deformação
δ	Variação no comprimento de referência
E	Módulo de elasticidade longitudinal
G	Módulo de elasticidade transversal
I	Momento de Inércia
ρ	Raio de curvatura
v	Deflexão
b	Base
h	Altura
r	Raio da circunferência
m	Massa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivos Gerais	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 DIAGRAMA TENSÃO x DEFORMAÇÃO E LEI DE HOOKE	15
2.2 DEFLEXÃO DE VIGAS E EIXOS	19
2.2.1 Viga engastada com carga aplicada na extremidade	20
2.2.2 Viga bi apoiada com carga aplicada no meio	21
3 DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	24
3.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO	24
3.1.1 Procedimentos requeridos para realizar o ensaio de compressão	26
3.2 ENSAIO DE OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UM FIO DE COBRE	29
3.2.1 Procedimentos requeridos para realizar o ensaio para obtenção do módulo de elasticidade de um fio de cobre	30
3.3 ENSAIO DE FLEXÃO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO INOX.....	32
3.3.1 Procedimentos requeridos para realizar o ensaio de flexão para obtenção do módulo de elasticidade do aço INOX	33
3.4 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO 1020	35
3.4.1 Procedimentos requeridos para realização do ensaio para obtenção do módulo de elasticidade do aço 1020.....	36
4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	39
4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	39
4.2 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UM FIO DE COBRE	41
4.3 ENSAIO DE FLEXÃO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO INOX.....	42
4.4 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NO AÇO 1020	43
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Para qualquer projeto de engenharia o conhecimento das propriedades mecânicas de um material é de extrema importância. Por meio das propriedades mecânicas de um material, é possível prever como uma estrutura se comporta devido à aplicação de esforços mecânicos e até mesmo monitorar o estado de uma estrutura, podendo prevenir falhas catastróficas de tais materiais.

Uma das propriedades mais importantes no estudo do comportamento mecânico dos materiais é o módulo de elasticidade ou módulo de Young, nome derivado de Thomas Young a qual é representada comumente pela letra E . Tal propriedade mecânica indica a rigidez do material, ou seja, a capacidade de resistir a deformações, sendo assim, pode-se determinar a aplicação do material para diferentes condições.

Para Araújo et al. (2012) a utilização do módulo de elasticidade está frequentemente relacionada com a estimativa dos deslocamentos e deformações de uma estrutura. Existem várias maneiras de calcular estas deformações, dependendo do esforço sofrido pela mesma. Alguns tipos de carregamentos em vigas podem ser usados com o intuito de avaliar e calcular o módulo de elasticidade de alguns materiais utilizando a deflexão sofrida pelo material quando submetido a um esforço.

Outra maneira de avaliar o módulo de elasticidade é utilizando a lei de Hooke junto ao diagrama Tensão x Deformação, em que o módulo de Young é definido pela inclinação da curva do diagrama na região linear elástica (UGURAL, 2009, p. 85). Além do mais, o módulo de elasticidade é a descrição da tendência de um material se deformar elasticamente quando uma força é aplicada a ele.

Para isso, experimentos ou ensaios mecânicos podem ser usados para incorporar os conceitos citados anteriormente de maneira que assim seja possível colocá-los em prática e conseqüentemente verificar como os materiais se comportam e reagem devido a esforços mecânicos em diferentes situações.

Este trabalho constitui-se em elaborar um manual de procedimentos com diferentes tipos de experimentos para a obtenção do módulo de elasticidade, apresentando um passo a passo de como realizar essas práticas de laboratório para então ser possível comparar os resultados obtidos por meio dos ensaios, com aqueles apresentados nas tabelas, os quais geralmente são obtidos por métodos que envolvem propagação de ondas elásticas e não por testes convencionais de Tensão x Deformação (CHAWLA; MEYERS, 2009, p.75) os quais o trabalho se propõe a fazer.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo do projeto em questão é elaborar um manual de procedimentos para práticas de laboratório de Mecânica dos Sólidos para os alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Cornélio Procópio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a teoria ligada ao Módulo de Elasticidade;
- Especificar os materiais;
- Desenvolver um manual de procedimentos para práticas de laboratório;
- Comparar resultados obtidos através dos experimentos com a teoria.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho é de suma importância, pois, os alunos das disciplinas relacionadas à Mecânica dos Sólidos vivenciam a maior parte das aulas estudando apenas a teoria. Este projeto proporcionará aos alunos uma visão prática dos assuntos com o intuito de mostrar como os ensaios podem ser executados e

consequentemente como os materiais realmente se comportam quando submetidos a um esforço mecânico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica consiste em apresentar a teoria das propriedades mecânicas dos materiais levando em conta o módulo de elasticidade e também a Lei de Hooke juntamente com o diagrama Tensão x Deformação além das definições que são válidas para o entendimento do comportamento dos materiais quando estes estão submetidos a esforços mecânicos.

A maior parte dos materiais, quando em utilização, está sujeita a forças ou cargas, como por exemplo, o cobre, utilizado nas tubulações de aparelhos condicionadores de ar, compressores e até mesmo em tubulações em usinas de açúcar e álcool. Outro exemplo é a liga de alumínio a qual é utilizada na construção da asa de aviões e também o aço 1020, utilizado no eixo de automóveis. Em tais situações, é necessário conhecer as características do material para que se possa projetar o equipamento a partir do qual ele é feito, tal que uma deformação resultante não se torne excessiva e cause uma eventual fratura. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre o seu comportamento e um esforço mecânico aplicado.

As propriedades mecânicas dos materiais podem ser verificadas através de diversos experimentos de laboratório. Existem alguns fatores que devem ser considerados como a natureza da carga aplicada e a duração de sua aplicação, além das condições ambientais. As cargas podem ser de tração, compressão ou de cisalhamento e suas magnitudes podem ser constantes ou variar continuamente.

No que diz respeito a ensaios, existem dois tipos: destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos são aqueles que deixam algum sinal no material submetido ao ensaio, podendo ou não ficar inutilizado. Pode-se citar como exemplos os ensaios de tração e compressão. Outro tipo de ensaio é o não destrutivo. Segundo a ABENDE (2002), os ensaios não destrutivos são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Ensaios dinâmicos, de caráter não destrutivo, são uma poderosa ferramenta aos projetistas, por apresentarem a vantagem de fornecer informações integradas e globais da

estrutura a respeito da rigidez e do amortecimento e, além disso, podem ser repetidos e comparados ao longo do tempo (DIOGENES et al.,2011). Em linhas gerais, com estes ensaios, as propriedades mecânicas dos materiais podem ser mensuradas.

Em ensaios mecânicos, é necessário notar-se algumas propriedades intrínsecas dos materiais. A ductilidade é uma medida do grau de deformação plástica que foi suportado até a fratura do material (Callister, 2008). Se um material é dúctil, ele é capaz de experimentar grandes deformações inelásticas sem perder sua capacidade resistente, rompendo-se após um acúmulo de energia inelástica de deformação. Isto é, tal propriedade é uma medida da capacidade da estrutura se deformar antes que a ruptura ocorra. Exemplos de materiais dúcteis é o aço estrutural, além do cobre e do alumínio. Já um material frágil, como o ferro fundido, concreto e vidro, apresenta uma deformação plástica muito pequena ou nenhuma deformação plástica até sua ruptura. Outra propriedade é a resiliência, que é a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e após a remoção da carga, conseguir a recuperação dessa energia. A tenacidade representa a capacidade do material em absorver energia até sua ruptura.

2.1 DIAGRAMA TENSÃO x DEFORMAÇÃO E LEI DE HOOKE

O diagrama de Tensão x Deformação convencional pode ser determinado a partir da tensão nominal que é encontrada dividindo a carga aplicada P pela área de seção transversal inicial de um material. No caso presente, pressupõe-se que a tensão seja constante na seção transversal. Assim tem-se:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

De maneira similar, a deformação nominal pode ser determinada dividindo-se a variação no comprimento de referência, δ , pelo comprimento inicial L_0 . Assim tem-se:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.2)$$

Se os valores correspondentes de σ e ε forem colocados em um gráfico, onde a ordenada seja a tensão e a abscissa seja a deformação, a curva resultante será chamada diagrama Tensão x Deformação convencional, conforme observado na Figura 1.

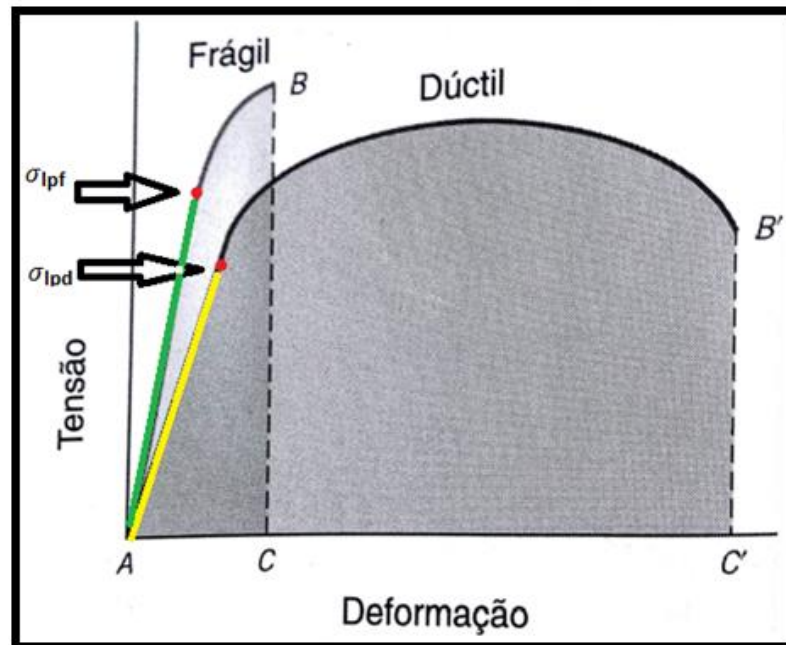


Figura 1 - Comportamento Tensão x Deformação para materiais frágeis e dúcteis

Fonte: Callister, 2008

Na Figura 1, são mostradas as regiões elásticas dos materiais frágeis e dúcteis, representadas pelas retas verde e amarela respectivamente. As linhas escuras representam as regiões plásticas dos materiais. O valor σ_{lpf} representa o limite de proporcionalidade do material frágil e σ_{lpd} o limite de proporcionalidade do material dúctil. Garcia (2008) define limite de proporcionalidade como sendo a máxima tensão acima da qual o material perde a linearidade entre a relação Tensão x Deformação.

Geralmente, as estruturas são projetadas de modo a sofrerem apenas pequenas deformações, que não ultrapassem os valores do diagrama Tensão x Deformação correspondentes aos trechos retos mostrados no diagrama. Na parte

inicial desse diagrama, a tensão e a deformação são proporcionais entre si e podemos escrever:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.3)$$

A equação 2.3 é conhecida como a lei de Hooke. Para Callister (2008) a lei de Hooke é a relação entre a tensão de engenharia e deformação de engenharia para uma deformação elástica. O coeficiente ou constante de proporcionalidade E é chamado então de módulo de elasticidade do material. Essa propriedade mecânica indica a rigidez do material, em outras palavras, indica a capacidade do material em resistir a deformações, ou seja, quanto maior for o módulo, mais rígido será o material, ou menor será a deformação elástica que irá resultar quando uma dada tensão é aplicada.

A região representada pelos trechos retos em verde e amarelo na Figura 1 é a região onde os materiais sofrem a chamada deformação elástica. Segundo Van Vlack (1984), esse tipo de deformação ocorre quando a tensão aplicada sobre o material é removida de maneira a permitir que o corpo de prova retorne às dimensões originais. O autor ainda diz que a deformação elástica é um resultado de um pequeno alongamento da célula unitária na direção da carga trativa (em caso de tração), ou uma pequena contração na da carga compressiva (em caso de compressão). Para Arruda et al. (2011), isso ocorre, pois há o afastamento entre os átomos do material, mas a distância é tal que a força de atração ou repulsão interatômica faz com que os átomos retornem à posição inicial após a retirada da carga. A Figura 2 representa com mais clareza a região que identifica tal tipo de deformação.

A outra região do gráfico, representada pelas linhas em cinza e preta para os materiais frágeis e dúcteis, respectivamente, mostram a região onde tais materiais sofrem a chamada deformação plástica. A deformação plástica ocorre quando a quantidade de carga é superior à força de atração entre os átomos e após a retirada da carga, a deformação elástica desaparece e o corpo permanece deformado. Enquanto a deformação elástica só existe no material ativado, a deformação plástica é permanente (ARRUDA et al., 2011).

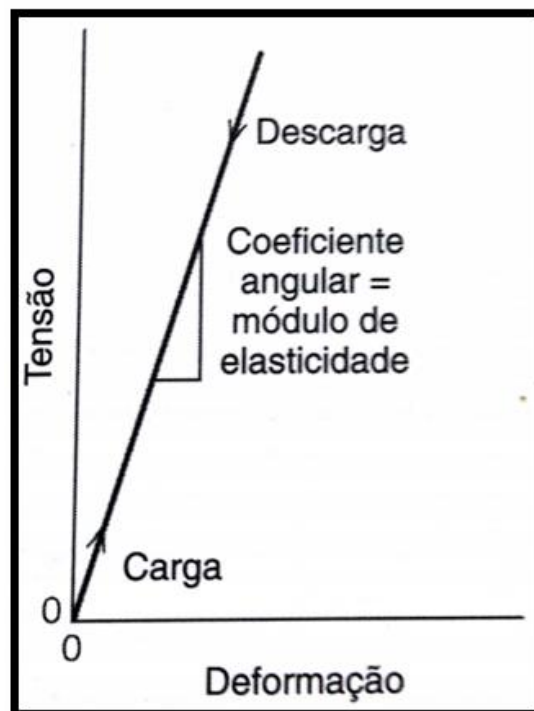


Figura 2 – Tensão x Deformação do comportamento elástico linear

Fonte: Callister, 2008

A Figura 2 mostra uma maneira alternativa para o cálculo do módulo de Young. Desde que o material esteja em seu regime elástico, o módulo de elasticidade pode ser calculado achando-se o coeficiente da reta linear do diagrama.

Se as equações 2.1, 2.2 e 2.3 foram combinadas, uma quarta equação pode ser escrita e utilizada para o cálculo do módulo de Young:

$$E = \frac{PL}{\delta A} \quad (2.4)$$

Para a utilização de tal equação, é necessário fazer-se algumas hipóteses. O material deve ser homogêneo, as tensões atuantes segundo a equação 2.1, não excedam o limite de proporcionalidade e que essas tensões não sejam grandes o suficiente para mudar a área da seção transversal do material.

De acordo com Christoforo (2011), o módulo de elasticidade está dentre as principais propriedades requisitadas para o dimensionamento de uma estrutura. Em um projeto de vigas, assim como de outros elementos estruturais, o conhecimento

dos módulos de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) é de fundamental importância. No presente trabalho será considerado o cálculo do módulo de elasticidade convencional.

Na Tabela 1 são mostrados os valores do módulo de elasticidade longitudinal para algumas ligas metálicas. Vale ressaltar que os valores providos em tabelas para tal propriedade são geralmente obtidos por métodos que envolvem propagação de ondas elásticas e são dados em GPa.

Tabela 1 - Valores do módulo de elasticidade para vários metais à temperatura ambiente em GPa.

LIGA METÁLICA	MÓDULO DE ELASTICIDADE
Aço 1020	207
Aço INOX	193
Cobre	110
Níquel	207
Tungstênio	407

Fonte: Callister, 2008

2.2 DEFLEXÃO DE VIGAS E EIXOS

Quando o eixo longitudinal de uma viga reta é deslocado devido aos esforços mecânicos, forma-se uma curva chamada curva de deslocamentos ou linha elástica.

No caso em que uma viga se encurva devido a uma força, forma-se um arco de circunferência. Segundo Ugural (2009), para uma viga elástica linear que possui seção transversal simétrica em relação ao plano de carregamento, a curvatura que a viga sofre pode ser expressa pelas equações:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.6)$$

Na equação 2.5, $\frac{d^2v}{dx^2}$ é a declividade, ou seja, a taxa em que a inclinação varia ao longo da viga, onde v é a deflexão. Já na equação 2.6, ρ representa o raio

de curvatura, E é o módulo de elasticidade do material e I o momento de Inércia da seção transversal da viga, em relação à linha neutra. Ou seja,

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.7)$$

Existem algumas restrições que são impostas às vigas devido a seus apoios, as chamadas condições de contorno. Por meio destas, as constantes de integração são determinadas de maneira que a equação 2.7 poderá ser solucionada, pelo então chamado método de integração, dependendo da condição em que a viga se encontra.

A determinação de cada equação devido as diferentes condições de contorno vai além dos objetivos do presente trabalho, portanto estarão presentes apenas as equações já deduzidas.

A seguir estarão representadas as equações da linha elástica e do deslocamento máximo das vigas em diferentes tipos de carga e apoios.

2.2.1 Viga engastada com carga aplicada na extremidade

Para o caso apresentado na Figura 3, uma viga é engastada em uma extremidade e na extremidade livre aplica-se uma carga P .

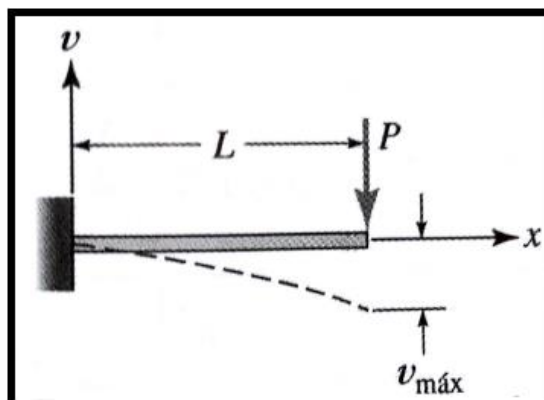


Figura 3 - Viga engastada com uma força aplicada na extremidade

Fonte: Ugural, 2009

A equação da linha elástica para essa condição é dada por

$$v = \frac{P x^2}{6 E I} (x - 3L) \quad (2.8)$$

Mas para $x = L$, local onde o esforço está aplicado, a deflexão máxima em módulo é escrita como

$$v_{max} = \frac{P L^3}{3 E I} \quad (2.9)$$

2.2.2 Viga bi apoiada com carga aplicada no meio

Será considerada uma viga bi-apoiada com a aplicação de uma força no centro, conforme Figura 4.

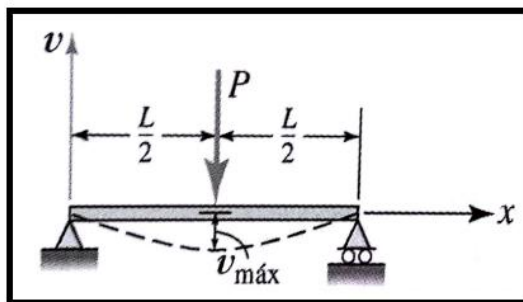


Figura 4 - Viga bi apoiada com uma força aplicada no centro

Fonte: Ugural, 2009

Já a equação da linha elástica para essa condição é dada por

$$v = \frac{P x}{48 E I} (4x^2 - 3L^2) \quad (2.10)$$

Mas para $x = L/2$, local onde o esforço está aplicado, tem-se que a deflexão máxima em módulo é escrita como

$$v_{max} = \frac{P L^3}{48 E I} \quad (2.11)$$

Para efeito de cálculo utilizando as equações acima, será necessário fazer-se uso das equações dos momentos de inércia para cada viga, de acordo com a

seção transversal. As Figuras 5 e 6 mostram como tal propriedade geométrica pode ser calculada, visto que no presente trabalho apenas serão utilizadas seções transversais retangulares e circulares.

Os parâmetros para o cálculo do momento de inércia para seções transversais retangulares estão representados abaixo pela Figura 5 e dado pela equação 2.12.

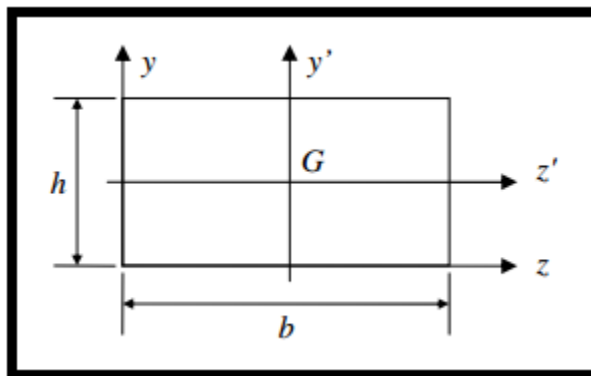


Figura 5 - Parâmetros para o cálculo do momento de inércia de seções transversais retangulares

Fonte: Disponível em:
http://www.lem.ep.usp.br/pef2308/Materiais_d_e_apoio/momentos_de_inercia.pdf. Acesso 10 Set 2014

$$I_r = \frac{b h^3}{12} \quad (2.12)$$

Já para seções transversais circulares o cálculo é feito utilizando a equação 2.13 e os parâmetros estão esquematizados pela Figura 6.

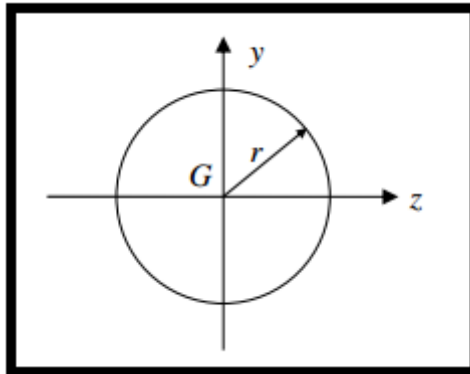


Figura 6 - Parâmetros para o cálculo do momento de inércia de seções transversais circulares

Fonte: Disponível em: http://www.lem.ep.usp.br/pef2308/Materiais_de_apoio/momentos_de_inercia.pdf. Acesso em 10-Set-2014

$$I_C = \frac{\pi r^4}{4} \quad (2.13)$$

3 DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

De início, vale ressaltar que é de suma importância durante os experimentos fazer o uso de óculos de proteção, pois grandes esforços mecânicos estarão presentes e os materiais podem romper-se e caso isso aconteça os corpos de prova ou materiais podem atingir os alunos. Em todos os experimentos serão utilizadas bases para massas de prova e massas de aproximadamente 100 g, 500 g e 1 Kg para gerar os esforços nos materiais. Os materiais que serão utilizados nos experimentos serão a poliuretana enriquecida com carbonato de cálcio, cobre, aço INOX e aço 1020. A hipótese de que tais materiais são homogêneos será considerada em todas as práticas para que então seja possível o uso das equações da teoria.

3.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Nesta seção é escrito um passo a passo para a prática de um ensaio de compressão e como mensurar o módulo de elasticidade do material. O material utilizado foi a poliuretana enriquecida com carbonato de cálcio.

Para tal prática, utilizou-se a máquina para ensaios de tração e compressão MICROCOMPUTER CONTROLLED ELETRONIC UNIVERSAL TESTING MACHINE, modelo WDW-100E, classe 1, número de serial 374, de origem chinesa do laboratório de materiais da UTFPR-CP, ilustrada na Figura 7.



Figura 7 - Máquina utilizada para se realizar o ensaio de compressão

Foram confeccionados vários corpos de prova, utilizando um torno mecânico do laboratório da mecânica da UTFPR-CP, porém no experimento utilizou-se apenas um corpo de prova, identificado com o número 1 (um) conforme Figura 8.

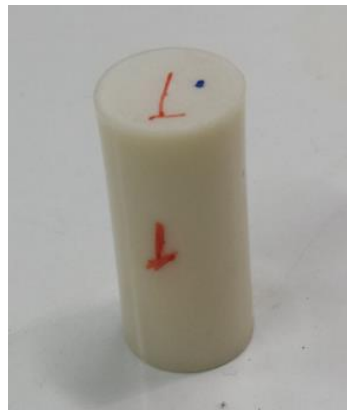


Figura 8 - Corpo de prova utilizado no ensaio de compressão

3.1.1 Procedimentos requeridos para realizar o ensaio de compressão

Os procedimentos necessários para a montagem e realização do ensaio de compressão com a poliuretana enriquecida com carbonato de cálcio estão apresentados na seguinte ordem:

1º Utilizar um paquímetro para medir o diâmetro do corpo de prova. A medição deve ser feita nas regiões de cima, do meio e de baixo do material e se fazer uma média dos diâmetros das três partes.

2º Após as medições, colocar o corpo de prova na máquina de ensaio, mostrado na Figura 9, de modo a parear o material exatamente no centro das placas da máquina, e o configure no *software* que vem embutido junto à máquina. Deve-se informar o diâmetro mensurado anteriormente e o comprimento. Automaticamente, tal *software* calculará a área de seção transversal do material.

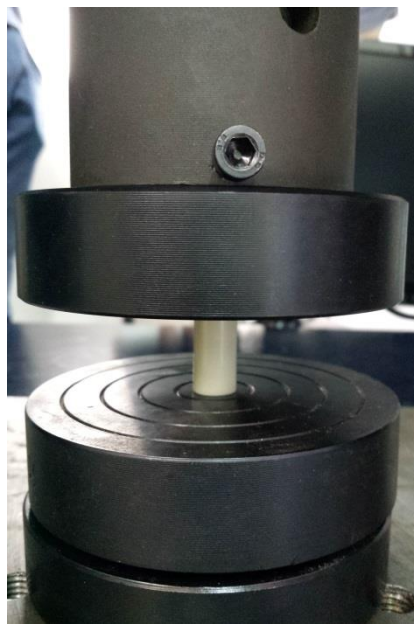


Figura 9 - Corpo de prova colocado na máquina para começar o experimento

3º Nesse experimento, além da aquisição dos dados pelo *software* da máquina, pode-se usar uma câmera fotográfica para mensurar as deformações do

corpo de prova, utilizando a opção de vídeo, filmando o ensaio. Tal câmera deve ser posicionada de maneira que focalize o material e



Figura 10 - Corpo de prova na máquina com a câmera o focalizando

4º Utilizou-se uma escala para converter as medidas de pixels para a grandeza métrica. Para isso, foi colocada uma régua ao lado do material para que depois seja possível analisar a deformação sofrida pelo corpo de prova, ilustrado na Figura 10 também. Visto que, conhecida a força e a deformação, pode-se calcular a tensão verdadeira.

5º No centro do objeto, é necessário colar uma fita dupla face com o objetivo de estabelecer um ponto de referencia, como na Figura 11.

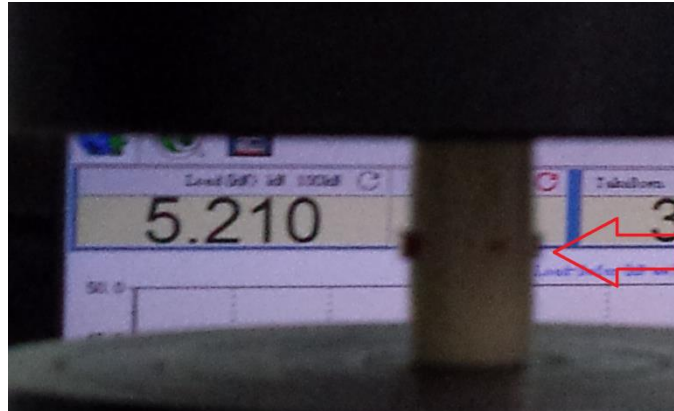


Figura 11 - Corpo de prova colocado na máquina com fita dupla face

6º Ao passo que o experimento está sendo feito, o *software* mostra o diagrama Força x Deformação. Recomenda-se que se pare o experimento um pouco antes de o material romper-se, visto que, com apenas a região linear do gráfico, o módulo de elasticidade do material pode ser calculado.

7º Quando o experimento é interrompido, espera-se que o material tenha deformado plasticamente de maneira que sua forma fique achatada, como mostrado nas Figuras 12 e 13.

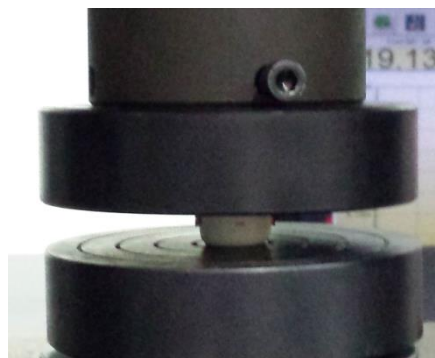


Figura 12 - Corpo de prova na máquina após o fim do experimento



Figura 13 - Corpo de prova achatado após o fim do experimento

3.2 ENSAIO DE OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UM FIO DE COBRE

Nesse experimento, serão medidas as dimensões de um fio de cobre. Forças, então, serão aplicadas no material para verificar quanto ele vai se estender. O arranjo para por em prática o ensaio está mostrado na Figura 14 abaixo. Com isso, espera-se que o módulo de elasticidade do cobre possa ser determinado.



Figura 14 - Arranjo esquemático para o ensaio do fio de cobre

Para a realização desse experimento, será utilizado um fio de cobre de comprimento de aproximadamente 1500 mm, quatro blocos de madeira sendo que um será usado para prender o material em uma extremidade, outro para prender

uma roldana e dois para fixar a régua de uma maneira que se possa ler a deformação, uma roldana, uma régua de 30 cm de aço INOX, fita adesiva, uma tesoura, uma base para pesos e pesos para gerar as forças, um gancho e dois grampos para varais e um paquímetro. Para a fixação dos blocos de madeira serão necessárias duas morsas de bancada, sendo que ambas terão que estar alinhadas entre si.

3.2.1 Procedimentos requeridos para realizar o ensaio para obtenção do módulo de elasticidade de um fio de cobre

Os procedimentos necessários para a montagem e realização do ensaio com o fio de cobre estão apresentados na seguinte ordem:

1º Primeiramente, o diâmetro d do fio de cobre deve ser medido utilizando um paquímetro. As medições devem ser repetidas algumas vezes ao longo do comprimento para verificar se a área de seção transversal do material está relativamente uniforme.

2º Um gancho para varais deve ser fixado em um bloco de madeira. Após isso, o fio de cobre é preso a um grampo de varais através de um laço, como mostrado na Figura 15. O laço será fixado no bloco de madeira por meio do gancho. Visto que tal bloco de madeira será fixado na mesa utilizando uma morsa de bancada. É importante verificar se o material está bem preso para que não haja escorregamento na hora do experimento.

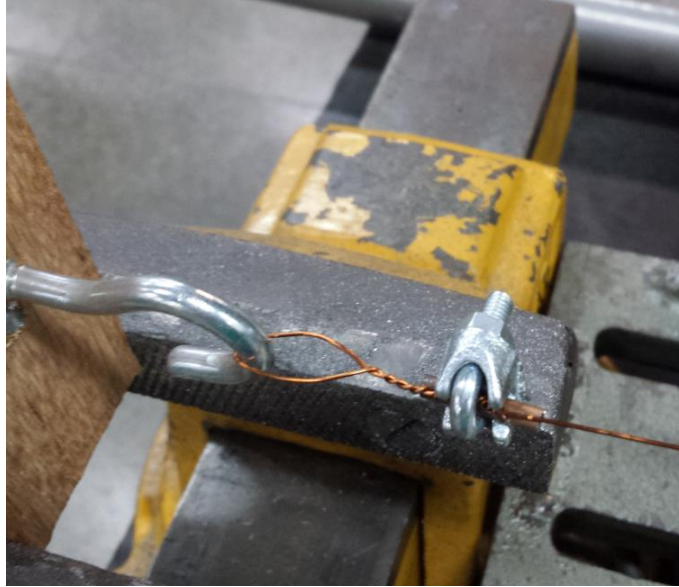


Figura 15 - Fio de cobre fixado em uma extremidade

3º É necessário fazer um laço na outra extremidade do fio para que se possa pendurar os pesos. Depois de feito o laço, utilizando o outro grampo, a base para pesos, onde as massas serão colocadas, deve ser adicionada, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16 - Fio de cobre com laço para pendurar os pesos

4º Uma roldana deve ser anexada em um ângulo de 45º a um bloco de madeira no final da mesa que será utilizada na realização do experimento e o fio de cobre deve passar sobre essa roldana de maneira que o material fique com a extremidade conectada aos pesos apoiada na roldana. O bloco de madeira será fixado na mesa utilizando a outra morsa de bancada.

5º É necessária a fixação de uma régua na mesa do experimento logo abaixo do fio para que se possa medir quanto o material se estenderá.

6º Deve-se colocar um pedaço pequeno de fita numa distancia de maneira que fique emparelhada em 0 cm com a régua, do 5º passo, que será utilizada para mensurar a deformação, que será chamada de δ , sofrida pelo material.

7º Deve-se garantir que o fio de cobre esteja bem esticado e sem nós, caso contrário, o resultado dos experimentos se modificará e o erro será maior.

8º Utilizando uma trena, o comprimento do fio deve ser medido, desde o gancho onde o laço está fixado até onde a fita, citada no 6º passo, está posicionada.

9º Deve-se adicionar uma massa $m = 0.50$ kg na base para pesos que está pendurada. Após um pequeno intervalo de tempo, então, deve-se medir quanto variou o comprimento do fio de cobre.

10º Deve-se acrescentar, gradativamente, as massas de prova. Para cada massa colocada, o material deve estabilizar antes de computar o valor da deformação sofrida pelo cobre. Deve-se tomar cuidado quando as massas forem adicionadas, pois o material pode se romper.

3.3 ENSAIO DE FLEXÃO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO INOX

No presente experimento, serão medidas as dimensões de uma barra de aço INOX. Forças, então, serão aplicadas na região intermediária do material para verificar quanto ele vai se estender. O arranjo esquemático para o ensaio está mostrado na Figura 17 abaixo. Com isso, espera-se que o módulo de elasticidade do aço INOX possa ser calculado.



Figura 17 - Arranjo esquemático para o ensaio de flexão do aço INOX

Para a prática do experimento, será utilizada uma barra de aço INOX de aproximadamente 500 mm, 2 hastes de base com 3 pontos e disponibilidade para variação da altura, uma base para pesos e pesos para gerar as forças, um fio de nylon de aproximadamente 150 mm para ser possível pendurar a base para pesos no meio da viga, uma régua de 60 cm de aço INOX, um bloco de madeira com um rasgo servindo como base para a régua, uma tesoura, uma caneta pincel para quadros brancos e um paquímetro.

3.3.1 Procedimentos requeridos para realizar o ensaio de flexão para obtenção do módulo de elasticidade do aço INOX

Os procedimentos necessários para a montagem e realização do ensaio de flexão com o aço INOX estão apresentados na seguinte ordem:

1º Deve-se medir as dimensões da seção transversal da viga, que é retangular, com um paquímetro. Deve-se repetir as medições algumas vezes ao longo do comprimento para verificar se a área de seção transversal do material está relativamente uniforme.

2º Com a caneta pincel e uma trena, o material deve ser medido de uma maneira que a distância dos apoios fique constante e também o meio da viga.

3º Pega-se o fio de nylon, e adiciona-se alguns nós de maneira que ele não afrouxe. Esse fio de nylon será usado para pendurar a base para pesos e consequentemente os pesos na barra de aço INOX. O fio de nylon deve ser fixado no meio da viga, vide passo 2.

4º Uma régua deve ser fixada na mesa do experimento na posição vertical. Para isso, se faz necessário a utilização de um bloco de madeira com um rasgo no meio para servir como base para a régua.

5º As duas hastes devem ser colocadas a uma distância definida no passo 3. A barra de aço INOX deve ser posicionada sobre as hastes, como ilustrado na Figura 18. Também é necessário deixá-las na altura que a régua foi posicionada para que seja possível verificar quanto o material vai deformar, ou seja, a barra de INOX deve estar na posição 0 cm da régua.

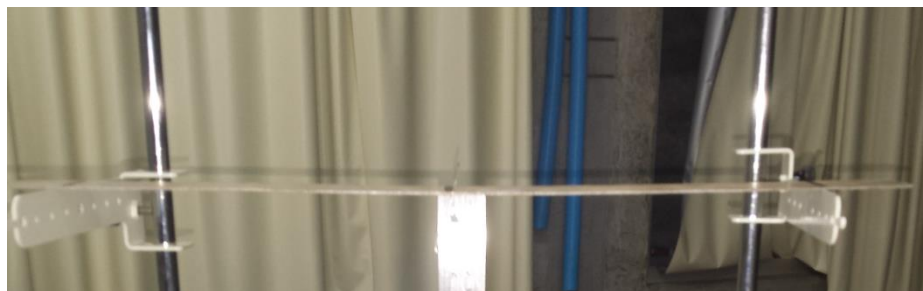


Figura 18 - Viga de aço INOX posicionada para o início do experimento

6º Deve-se verificar se a viga de aço INOX está posicionada corretamente de maneira que a distância entre os apoios esteja uniforme e seu meio esteja pareado com a régua.

7º A base para pesos deve ser pendurada no fio de nylon que está posicionado na distância média entre os apoios.

8º Adiciona-se uma massa $m = 1 \text{ Kg}$ na base para pesos. Após um pequeno intervalo de tempo, deve-se medir quanto a viga de INOX se deformou checando a posição da viga por meio da régua.

9º As massas devem ser aumentadas de 1 Kg em 1 Kg até totalizar 3 Kg. Para cada massa colocada, deve-se deixar o material estabilizar e, então, computar o valor da deformação sofrida pela viga. Após isso, a carga deve ser aumentada de 0.50 Kg em 0.50 Kg até totalizar 6 Kg de uma maneira que se tenha pelo menos nove medições das massas e a posição que a barra de INOX está em relação à régua.

3.4 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO 1020

Nessa prática, as dimensões de uma barra de aço 1020 serão medidas. Massas de aproximadamente 500 g serão aplicadas na extremidade da viga, que estará engastada, servindo como esforços para deformar o material. O arranjo esquemático para o experimento está ilustrado na Figura 19. Com isso, espera-se que o módulo de elasticidade do aço 1020 seja calculado.



Figura 19 - Arranjo esquemático para obtenção de E do aço 1020

Para este ensaio, será utilizada uma barra de aço 1020 de aproximadamente 455 mm, uma haste de base com três pontos e disponibilidade para variação da altura, uma base para pesos e pesos para gerar as forças, uma braçadeira, um fio de nylon de aproximadamente 150 mm para ser possível pendurar a base para

pesos na extremidade da viga, uma régua de 60 cm de aço INOX, um bloco de madeira com um rasgo servindo como base para a régua, uma tesoura, um paquímetro. Além disso, será necessário preparar a viga para o ensaio. Um furo de aproximadamente 3 mm tem de ser feito na extremidade da barra de aço 1020 para que se possa colocar o fio de nylon e ser possível pendurar os pesos.

3.4.1 Procedimentos requeridos para realização do ensaio para obtenção do módulo de elasticidade do aço 1020

Os procedimentos necessários para a montagem e realização do ensaio com o aço 1020 estão apresentados na seguinte ordem:

1º O passo inicial é medir as dimensões da seção transversal, que é retangular, da viga com um paquímetro. É importante repetir as medições algumas vezes ao longo do comprimento para verificar se a área de seção transversal do material está relativamente uniforme.

2º Utilizando o fio de nylon, deve-se fazer alguns nós de maneira que ele não afrouxe. Esse fio de nylon será usado para pendurar a base para pesos e conseqüentemente os pesos na barra de aço 1020. O fio de nylon deve ser fixado na extremidade do material onde o furo de preparação da barra foi feito.

3º Fixa-se uma régua na mesa do experimento na posição vertical. Para isso, um bloco de madeira com um rasgo no meio será utilizado como base para a régua.

4º Uma das hastes deve ser posicionada a uma distância de aproximadamente 300 mm da régua. Uma das extremidades da viga deve ser dobrada e um furo de 4 mm deve ser adicionado nessa parte, de maneira que será possível fixá-la na haste com um parafuso de 4 mm, como na Figura 20. É necessário deixar tal haste na altura que a régua foi posicionada para que seja possível observar o quanto o material vai deformar, ou seja, a barra de 1020 deve estar na posição 0 cm da régua.



Figura 20 - Viga de aço 1020 fixada na haste por um parafuso de 4 mm

5º Deve-se verificar se a barra de aço 1020 está posicionada corretamente de maneira que sua extremidade esteja pareada com a régua, como na Figura 21.



Figura 21 - Viga de aço 1020 posicionada para o início do experimento

6º Pendura-se a base para pesos no fio de nylon que está posicionado na extremidade do material.

7º Adiciona-se uma massa $m = 100$ g na base para pesos. Após um pequeno intervalo de tempo, mede-se o quanto a viga de 1020 se deformou verificando qual sua posição em relação à régua.

8º Adiciona-se as massas de 100 g em 100 g. Para cada massa colocada, espera-se o material estabilizar e computa-se o valor da deformação sofrida pela viga. Aumenta-se a carga até totalizar pelo menos 6 medições de forças e deflexões.

4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Para tal prática, necessitou-se importar os dados do experimento do próprio *software* da máquina utilizada, citada anteriormente. Após isso, foi utilizado como apoio para gerar os gráficos da experiência o *software* Matlab®.

Nesse passo, o que vale lembrar é que todas as tensões e deformações envolvidas nos cálculos foram as tensões e deformações nominais visto que, utilizou-se a lei de Hooke para encontrar o módulo de elasticidade.

A Figura 22 mostra o formato do diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão.

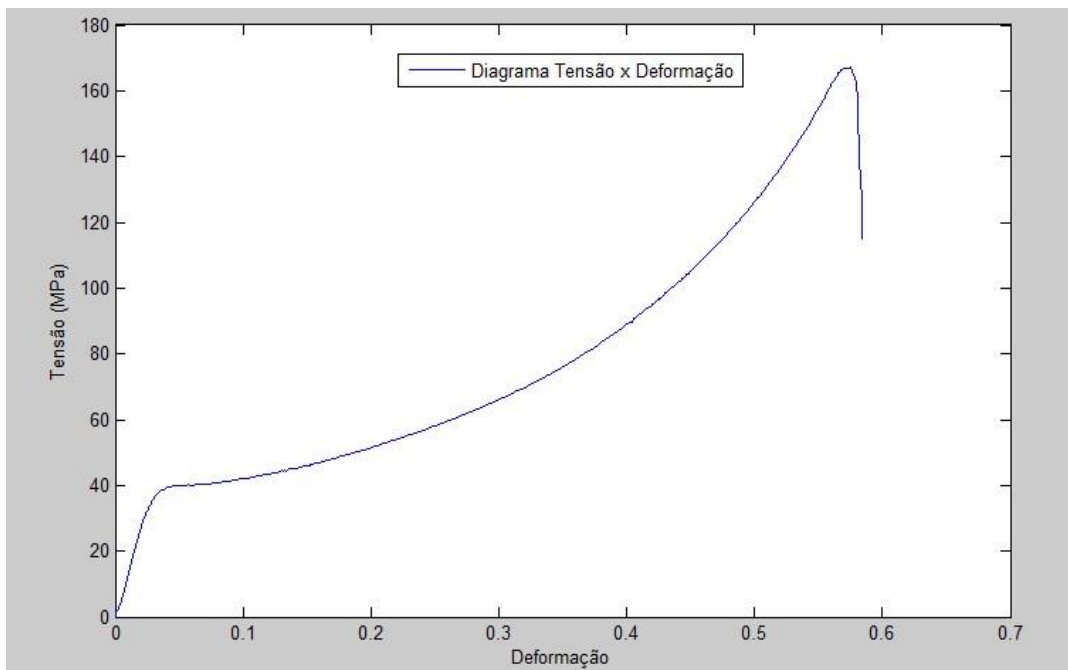


Figura 22 - Diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão

Observa-se que o formato da curva se difere um pouco comparado com a teoria, porém como contém regiões e pontos que se assemelham a um diagrama Tensão x Deformação convencional tal gráfico é válido.

Na Figura 23 pode-se observar a região elástica da Figura 22, ou seja, a região do gráfico onde há uma reta linear.

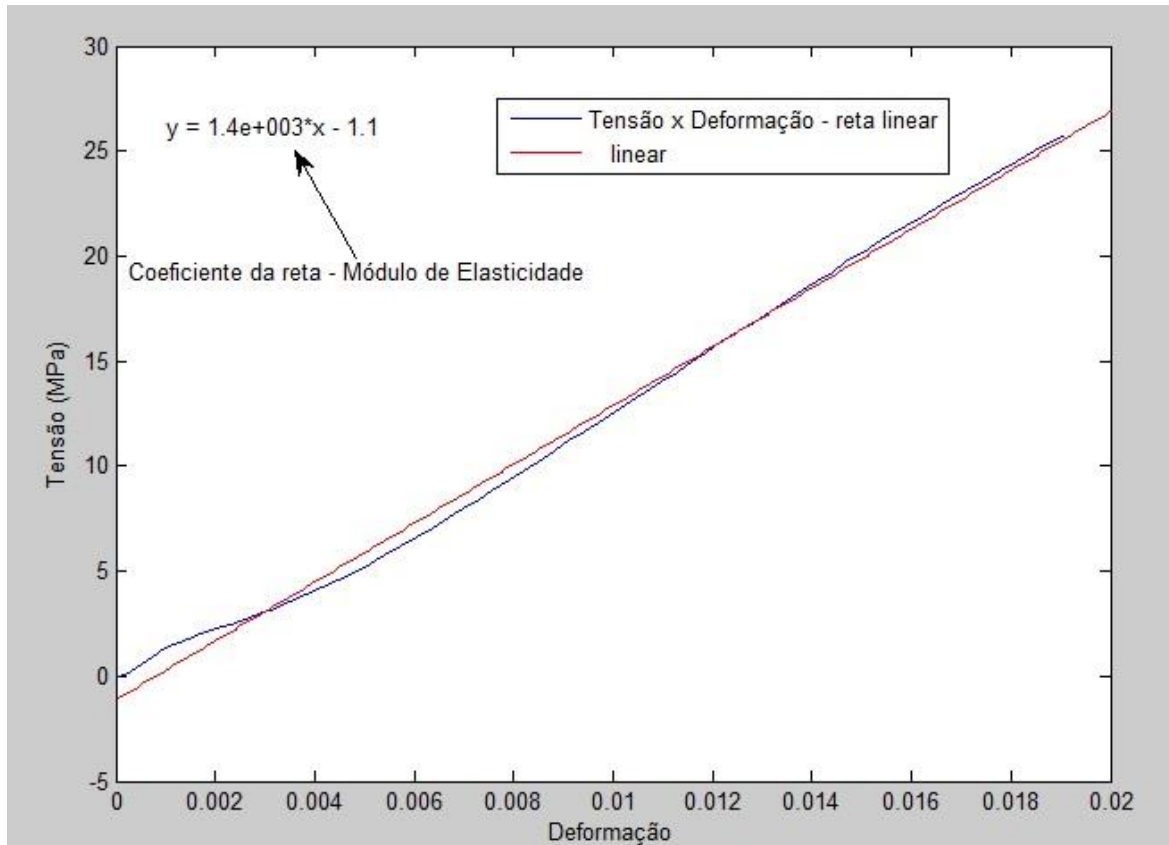


Figura 23 - Região elástica do diagrama Tensão x Deformação para o ensaio de compressão

Nesse caso, o *software* Matlab® oferece o recurso de aproximar uma reta linear à curva ilustrada e também a equação dessa reta, mostrando inclusive o coeficiente angular da curva.

Da teoria, sabe-se que o módulo de elasticidade do material é a inclinação, ou seja, o coeficiente angular da reta que está contida na região elástica do gráfico. Então, para o material em questão, o valor encontrado para seu módulo de Young foi 1.4 GPa.

O valor obtido para $E = 1.4$ GPa é válido pois esperava-se um valor entre 1.3 GPa e 1.5 GPa de acordo com Costa (2007).

4.2 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE UM FIO DE COBRE

Para este experimento, é necessário verificar o comprimento L do fio de cobre e com um paquímetro, medir o diâmetro do fio de cobre.

Para o fio de cobre, os valores de L, e de seu diâmetro foram 250 mm e 0.6 mm, respectivamente. Com esses valores, é possível calcular a área da seção transversal do fio. Então,

$$A = \pi \frac{d^2}{4} = \frac{\pi * 0.0006^2}{4} = 2.83 * 10^{-7} m^2$$

O quadro 3 mostra os valores da deformação devido a força peso causada pelas massas que foram sendo colocadas na base para pesos.

Deformação (m)	Massa (Kg)	Força (N)
0	1.09975	10.788548
0.0005	2.22459	21.823228
0.0005	3.33274	32.694179
0.0005	3.833649	37.608097
0.001	4.34179	42.59296
0.001	4.84179	47.49796
0.0015	5.33909	52.376473
0.0015	5.46735	53.634704
0.002	5.55771	54.521135
0.0025	5.73203	56.231214

Quadro 1 - Deformações causadas no fio de cobre pela força peso

Fonte: Autoria própria

Substituindo os valores da deformação δ , força P, área da seção transversal A, comprimento L e isolando E na equação 2.4, tem-se que o valor do módulo de elasticidade calculado a partir do experimento é,

$$E = \frac{P L}{\delta A} = \frac{37.61 * 0.25}{0.0005 * 2.83 * 10^{-7}} = 66.5 GPa$$

O valor da literatura para o módulo de elasticidade do cobre é 110 GPa. O valor encontrado dessa propriedade mecânica do material está aproximadamente

40% abaixo do esperado quando comparado com a teoria. Isto pode ser explicado pelo fato do uso de uma régua para a verificação da deformação, o que é suscetível a erros de leitura. Vale lembrar que o valor encontrado em tabelas provém de ensaios e corpos de prova padronizados por norma ISO.

4.3 ENSAIO DE FLEXÃO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO INOX

Nesse ensaio, primeiramente mediu-se o comprimento L da viga com uma trena. Na seção transversal, utilizou-se um paquímetro para verificar a altura h e largura b.

Para essa viga de aço INOX, os valores de L, h e b foram 400 mm, 1.8 mm e 41.4 mm, respectivamente. Com esses valores, é possível calcular o momento de inércia da seção transversal utilizando a equação 2.12.

Logo,

$$I_r = \frac{b h^3}{12} = 0.0414 * \frac{0.0018^3}{12} = 2.01204E - 11 \text{ m}^4$$

O quadro 2 mostra os valores da deflexão devido a força peso causada pelas massas que foram sendo colocadas na base para pesos.

Deflexão (m)	Massa (Kg)	Força (N)
0	0.385	3.77685
0.003	1.1	10.791
0.006	2.2	21.582
0.009	2.713	26.61453
0.012	3.227	31.65687
0.015	4.377	42.93837
0.018	5.477	53.72937
0.02	5.983	58.69323
0.025	6.497	63.73557

Quadro 2 - Deflexões na viga de aço INOX causadas pela força peso

Fonte: Autoria própria

Substituindo os valores da deflexão v , força P , momento de inércia I_r , comprimento L e isolando E na equação 2.11, tem-se que o valor do módulo de elasticidade calculado a partir do experimento é,

$$E = \frac{P L^3}{48 v I_r} = \frac{63.74 * 0.4^3}{48 * 0.025 * 2.01204E - 11} = 169 \text{ GPa}$$

O valor de tabela para o módulo de elasticidade do aço INOX é de 193 GPa. O valor obtido experimentalmente para o material está 12% abaixo do valor encontrado na literatura. Isto pode ser explicado, também, pelo fato do uso de uma régua para a verificação da deflexão, o que é suscetível a erros de leitura. Vale ressaltar que o valor encontrado na literatura provém de ensaios e corpos de prova normalizados.

4.4 ENSAIO PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NO AÇO 1020

No ensaio para a obtenção do módulo de Young do aço 1020, mediu-se, a priori, o comprimento L da viga com uma trena. Para a seção transversal, foi utilizado um paquímetro para verificar a altura h e largura b .

Tal barra de aço 1020, os valores de L , h e b foram 306 mm, 2.1 mm e 29.9 mm, respectivamente. Encontrados esses valores, é possível calcular o momento de inércia da seção transversal utilizando a equação 2.12.

$$I_r = \frac{b h^3}{12} = 0.0299 * \frac{0.0021^3}{12} = 2.3075E - 11 \text{ m}^4$$

O quadro 3 mostra os valores da deflexão sofrida pela viga de aço 1020 devido à força peso causada pelas massas que foram sendo colocadas na base para pesos em sua extremidade.

Deflexão (m)	Massa (Kg)	Força (N)
0.011	0.38496	3.7764576
0.017	0.51322	5.0346882
0.023	0.64358	6.3135198
0.027	0.7779	7.631199
0.032	0.89026	8.7334506
0.04	1.01856	9.9920736
0.048	1.04019	10.2042639

Quadro 3 - Deflexões na viga de aço 1020 devido à força peso

Fonte: Autoria própria

Fazendo-se a substituição dos valores da deflexão v , força P , momento de inércia I_r , comprimento L e isolando E na equação 2.9, temos que o valor do módulo de elasticidade calculado a partir do experimento é,

$$E = \frac{P L^3}{3 v I_r} = \frac{3.78 * 0.306^3}{3 * 0.011 * 2.3075E - 11} = 142 \text{ GPa}$$

O valor de tabela para o módulo de elasticidade do aço 1020 é 207 GPa. O valor obtido experimentalmente para o aço 1020 está aproximadamente 30% abaixo do valor da literatura. O fato do uso de uma régua para a verificação da deflexão é suscetível a erros de leitura. Pode ser que a maneira como a viga de aço 1020 foi engastada na haste não foi eficaz, visto que foi utilizado um parafuso para o engaste do material, o que explica também a diferença de valores entre experimental e teórico. Convém ressaltar que o valor encontrado nas tabelas provém de ensaios e corpos de prova normalizados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados através dos experimentos, apesar de estarem abaixo dos valores da literatura, são pertinentes, pois não se pode esquecer que qualquer experimento está sujeito a erros de leitura. Além disso, os materiais contêm imperfeições, certamente não são homogêneos, ou seja, não apresentam propriedades idênticas ao longo de seu volume e conseqüentemente não são isotrópicos, embora tenham sido considerados hipoteticamente homogêneos. É certo que, os valores da literatura para os módulos de elasticidade dos materiais são obtidos através de ensaios com um corpo de prova normalizado, em uma máquina totalmente configurada e em condições propícias para esse objetivo específico. Isso explica o porquê dos valores encontrados nas práticas terem sido diferentes dos valores das tabelas. Convém ressaltar que o ensaio de compressão, que foi realizado em uma máquina normalizada para ensaio de tração e compressão, apresentou um resultado mais coerente com a literatura devido às suas condições, as quais são menos suscetíveis a erros de leitura e posicionamento do material.

Como esse trabalho tem o intuito didático de explicar como montar experimentos simples de maneira que seja possível coletar dados para encontrar o módulo de elasticidade e ao mesmo tempo mostrar aos alunos que farão as práticas como os materiais se deformam quando submetidos a esforços mecânicos, o objetivo do trabalho foi atingido.

Para trabalhos futuros, pode-se utilizar uma câmera fotográfica para a verificação das deformações e deflexões que os materiais sofrem devido aos esforços mecânicos aplicados a eles, usando a opção de vídeo e aplicando a conversão de pixels para milímetros. Isso diminuiria o erro dos resultados dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, S. S.; GUIMARAES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 5, n. 5, Oct. 2012.

ARRUDA, P. C.; DA MATTA, E. N. R.; DA SILVA, S. C. Influência do Grau de Ativação na Deformação Plástica de Elásticos Ortodônticos em Cadeia. **Pesq Bras Odontoped Clin Integr**, João Pessoa, 11(1):85-90, Jan./Mar. 2011.

Aplicações do cobre. Disponível em: <<http://www.metallica.com.br/o-cobre-e-suas-aplicacoes>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

Associação brasileira de ensaios não-destrutivos. Disponível em: <http://www.abende.org.br/analise_vibracoes.html>. Acesso em: 09 set. 2014.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Makron, c1995. xx, 1255 p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. xx, 705 p.

CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T.H.; BATISTA, F.B.; BORGES, P.H.R.; LAHR, F.A.R. Numerical evaluation of the modulus of longitudinal elasticity in structural round timber elements of the Eucalyptus genus. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, Oct. 2011.

CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T.H.; BATISTA, F.B.; BORGES, P.H.R.; LAHR, F.A.R. Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, Apr. 2013.

Conceitos Clássicos de Ductilidade. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5867/5867_4.PDF>. Acesso em 20 set. 2014.

COSTA, R. R. C. **Aplicabilidade de modelos constitutivos para analisar o comportamento de biopolímero**. 2007. 171f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Definição das Propriedades Mecânicas dos Materiais. Disponível em: <http://www.tecnofixparafusos.com.br/v2/propri_materiais.php>. Acesso em 30 set. 2014.

DIOGENES, H. J. F.; COSSOLINO, L.C.; PEREIRA, A.H.A.; EL DEBS, M.K.; EL DEBS, A.L.H.C. Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo , v. 4, n. 5, Dec. 2011.

Ensaio destrutivo e não destrutivo. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/46079912/Ensaio-Destrutivo-e-Nao-Destrutivo>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247 p.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2004. xi, 670 p.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical behavior of materials**. 2nd ed. Cambridge; New York: Cambridge University Press, c2009. xxii, 856 p.

Momentos de Inércia. Disponível em: <http://www.lem.ep.usp.br/pef2308/Materiais_de_apoio/momentos_de_inercia.pdf>. Acesso em 10 out. 2014.

UGURAL, A. C. **Mecânica dos materiais**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009. xx 638 p.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. ed. atual. e ampl. Rio de Janeiro, RJ: Campus, c1984. 567 p.