



Homenagem ao um  
querido Professor da  
FORP  
Prof. Tomio Nonaka

MODULO 2

Propriedades físico-mecânicas e biológicas dos Materiais odontológicos

# Tensão x Deformação





# ARTÍCULO ORIGINAL

## ANÁLISIS DE TENSIONES COMPRESIVAS EN MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS DE DOS PRÓTESIS FIJAS CON PILAR INTERMEDIO Y DIFERENTES CONECTORES.

### RESUMEN

**OBJETIVO:** Comparar la tensión compresiva entre tramos protésicos rígidos y no rígidos de una prótesis fija de cinco unidades con pilar intermedio a través del análisis de modelos en elementos finitos 3D.  
**MATERIALES Y MÉTODOS:** Se llevaron a cabo dos simulaciones de prótesis parcial fija (PPF) de cinco unidades utilizando los Softwares SolidWorks<sup>®</sup> 2013 y CosmosWorks 2013. El primer diseño con conector rígido con 54357 nodos y 34433 elementos y el segundo con conector no rígido con 88013 nodos y 57900 elementos, conformados por estructura metálica, porcelana, conector no rígido Omega M (CNG solución protésica) y ligamento periodontal. El tramo protésico comprendió un incisivo central, un incisivo lateral, un canino, un primer premolar y un segundo premolar superior. Se aplicó una fuerza de 200 N con dirección oblicua y vertical. Las variables incluidas en el modelado fueron módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. Calculando las máximas tensiones de Von Mises para cada grupo.  
**RESULTADOS:** El modelo no rígido presentó menor tensión (44.5 MPa) en comparación al modelo rígido (51.8 MPa) ante una carga vertical distribuida en todas las piezas, similares resultados se obtuvieron al aplicar las cargas oblicuas.  
**CONCLUSIÓN:** El análisis del comportamiento mecánico indicó que el tramo protésico no rígido tuvo mejor distribución de las tensiones en relación con el modelo rígido. Por lo cual su uso estaría más indicado en la actividad clínica.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de elementos finitos, pilar intermedio, conectores no rígidos, conectores rígidos, prótesis parcial fija.

**COMPRESSIVE STRESSES ANALYSIS ON FINITE ELEMENT MODELS OF TWO FIXED PROSTHESIS WITH INTERMEDIATE ABUTMENT AND DIFFERENT CONNECTORS.**

### ABSTRACT

**OBJECTIVE:** This study aimed to compare the compressive stress between rigid and non-rigid connections of a fixed prosthesis with intermediate pillar through analysis of 3D finite element models.  
**MATERIALS AND METHODS:** Were performed two simulations of fixed partial dentures (FPD) five units using SolidWorks<sup>®</sup> 2013 and Cosmosworks 2013. The first design with rigid connector with 54357 nodes and 34433 elements and the second non-rigid connector with 88013 nodes and 57900 elements. It consisted of periodontal ligament, metal ceramic crowns and Omega M attachment (CNG solution protésica). The fixed dental prosthesis included a central incisor, lateral incisor, canine, first and second upper premolars. A force of 200 N was applied with an oblique and vertical direction. The variables included in the model were modulus of elasticity and Poisson's ratio. Von Mises stresses maximum were calculated for each group.  
**RESULTS:** The non-rigid model showed less stress (44.5 MPa) compared to the rigid model (51.8 MPa) showed higher stress to a vertical load distributed in all parts, similar results were obtained by applying loads oblique.  
**CONCLUSIONS:** The analysis of the mechanical behavior indicated that the non-rigid fixed dental prosthesis showed a better distribution of the stresses in comparison with the rigid model. For this use would be more appropriate in clinical activity.

**KEY WORDS:** Finite element analysis, abutment, non-rigid connectors, rigid connectors, fixed partial denture.

tor rígido y no rígido luego de aplicar una carga icua de 200 N, y se observa que al aplicar la ga en el incisivo central, el MEF 1 presentó yor tensión (39.9 MPa) mientras que la menor sión la presentó el MEF 2 (18.4MPa). Al aplicar carga en el canino, observamos que a nivel de las la mayor tensión se presentó en el MEF 1 (.8 MPa) en comparación a la menor tensión

que presentó el MEF 2 (0.01 MPa). Al aplicar la carga en el premolar, observamos que a nivel de cofias la mayor tensión se presentó en el premolar del MEF 1 (32.5 MPa), mientras que la menor tensión la presentó el MEF 2 (0.01 MPa). Los resultados obtenidos en esta investigación se observan en los gráficos 1 al 14.

TABLA 1

COMPARACIÓN DE MÁXIMAS TENSIONES VON MISES (PA) EN UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO Y NO RÍGIDO ANTE UNA CARGA VERTICAL DE 200 N

TENSIONES COMPRESIVAS		
	MEF 1	MEF 2
pa en todas as	51.8	44.5

1: PPF de cinco unidades con pilar intermedio y conector rígido.  
 2: PPF de cinco unidades con pilar intermedio y conector no rígido.

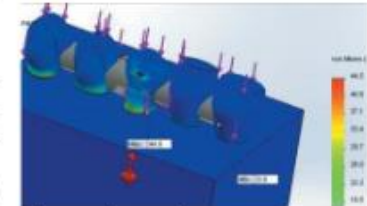


GRÁFICO 1: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) EN UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR NO RÍGIDO ANTE UNA CARGA VERTICAL DE 200 N.

TABLA 2

COMPARACIÓN DE MÁXIMAS TENSIONES VON MISES (PA) ANTE CARGAS OBLICUAS DE 200N APLICADAS EN PORCELANA QUE RECUBRE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO Y NO RÍGIDO

TENSIONES COMPRESIVAS		
	MEF 1	MEF2
tral	39.9	20.8
ino	43.6	63.3
netar	50.6	34.22

1: PPF de cinco unidades con pilar intermedio y conector rígido.  
 2: PPF de cinco unidades con pilar intermedio y conector no rígido.

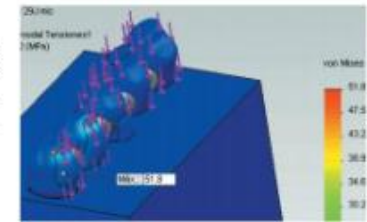


GRÁFICO 2: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) EN UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO ANTE UNA CARGA VERTICAL DE 200 N.

TABLA 3

COMPARACIÓN DE MÁXIMAS TENSIONES VON MISES (PA) EN LA COFIA DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO Y NO RÍGIDO ANTE CARGAS OBLICUAS DE 200 N.

TENSIONES COMPRESIVAS		
	MEF 1	MEF2
tral	39.9	18.4
ino	16.8	0.01
netar	32.5	0.01

1: PPF de cinco unidades con pilar intermedio y conector rígido.  
 2: PPF de cinco unidades con pilar intermedio y conector no rígido.

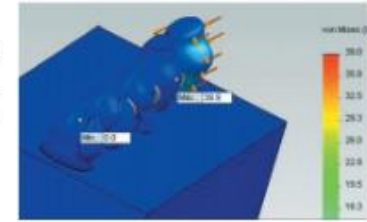


GRÁFICO 3: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) AL APLICAR UNA CARGA OBLICUA DE 200N EN EL INCISIVO CENTRAL DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO.

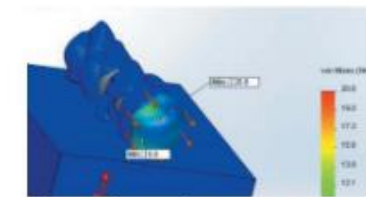


GRÁFICO 4: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) AL APLICAR UNA CARGA OBLICUA DE 200N EN EL INCISIVO CENTRAL DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR NO RÍGIDO.

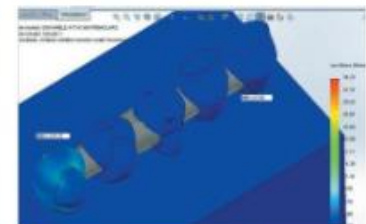


GRÁFICO 5: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) AL APLICAR UNA CARGA OBLICUA DE 200N EN EL PREMOLAR DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR NO RÍGIDO.

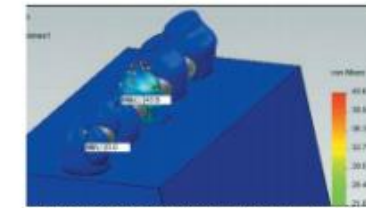


GRÁFICO 6: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) AL APLICAR UNA CARGA OBLICUA DE 200N EN EL CANINO DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO.

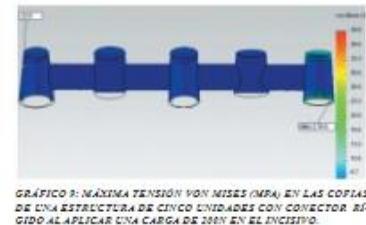


GRÁFICO 7: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) EN LAS COFIAS DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO AL APLICAR UNA CARGA DE 200N EN EL INCISIVO.

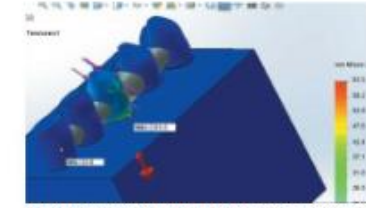


GRÁFICO 8: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) AL APLICAR UNA CARGA OBLICUA DE 200N EN EL INCISIVO DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR NO RÍGIDO.

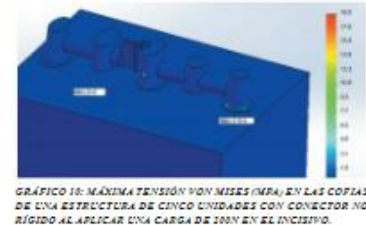


GRÁFICO 9: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) EN LAS COFIAS DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO AL APLICAR UNA CARGA DE 200N EN EL CANINO.

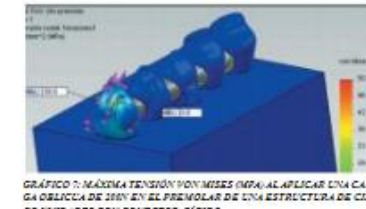


GRÁFICO 10: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) AL APLICAR UNA CARGA OBLICUA DE 200N EN EL PREMOLAR DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR NO RÍGIDO.



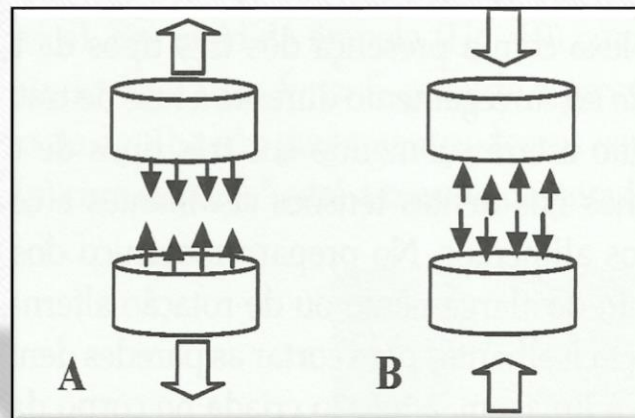
GRÁFICO 11: MÁXIMA TENSION VON MISES (MPa) EN LAS COFIAS DE UNA ESTRUCTURA DE CINCO UNIDADES CON CONECTOR RÍGIDO AL APLICAR UNA CARGA DE 200N EN EL INCISIVO.

# TENSÃO

Quando uma força age sobre um corpo fixo, esse corpo resiste à força.  
Tensão ( resistência interna)

Esta reação interna é igual em magnitude e oposta em direção à força externa aplicada e é chamada de TENSÃO.

Geralmente representada por **S** ou  $\sigma$ (sigma).



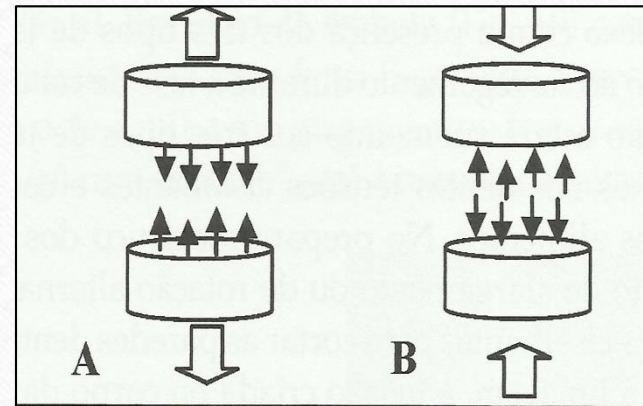
# TENSÃO

Tensão é a força por unidade de área

$$S(\text{tensão}) = \text{Força} / \text{Área}$$

*é expressa*

em quilogramas força por centímetro quadrado ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) ou por milímetro quadrado. ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

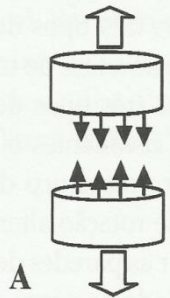


$$1,0 \text{ kgf}/\text{mm}^2 = 9,8 \text{ N}/\text{mm}^2 = 9,8 \text{ Mpa}$$

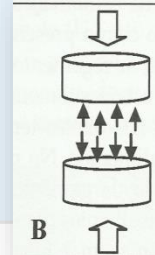
# Classificação das tensões

Tensões Normais  
 $\sigma$  (sigma)

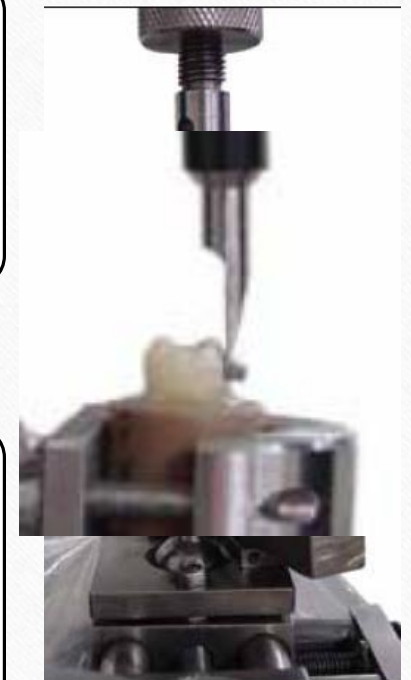
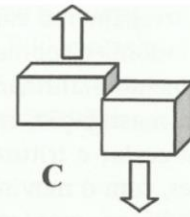
Trativas



Compressivas



Tensões Cisalhantes  
 $\tau$  (tao)



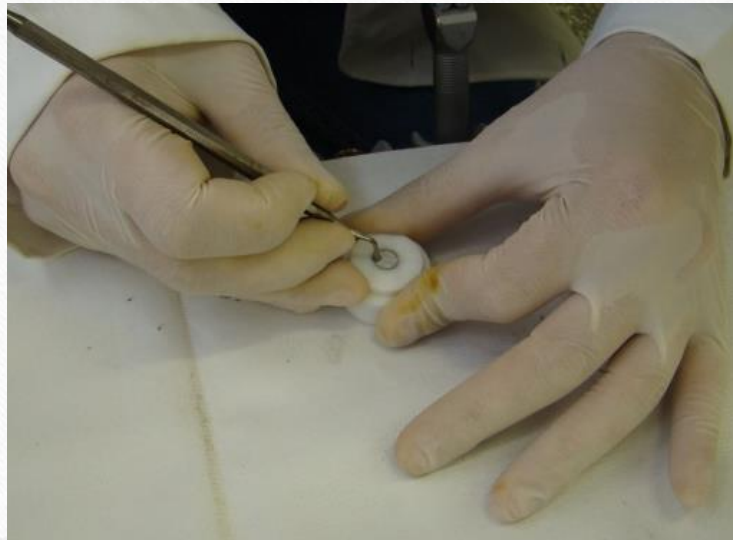
ionamento do dispositivo para o teste de cisalha

É importante considerar a área sob ação de uma força, porque a tensão em uma estrutura varia diretamente com a força e inversamente com a área.

Exercício: Em qual das áreas haverá maior tensão, sendo que a força será a mesma sobre todas as superfícies.

Exemplo = A condensação do amálgama

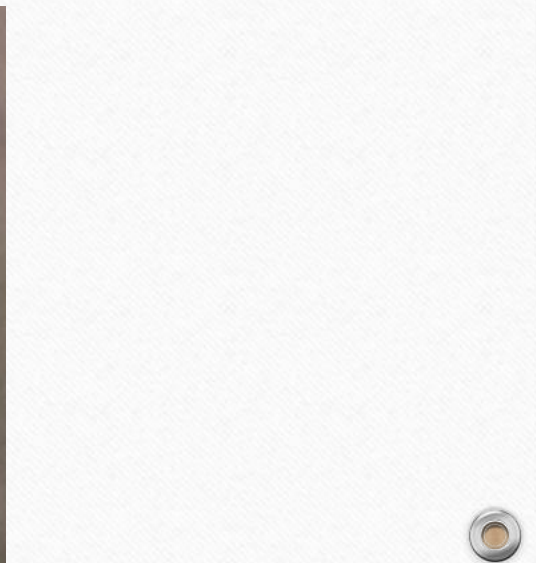
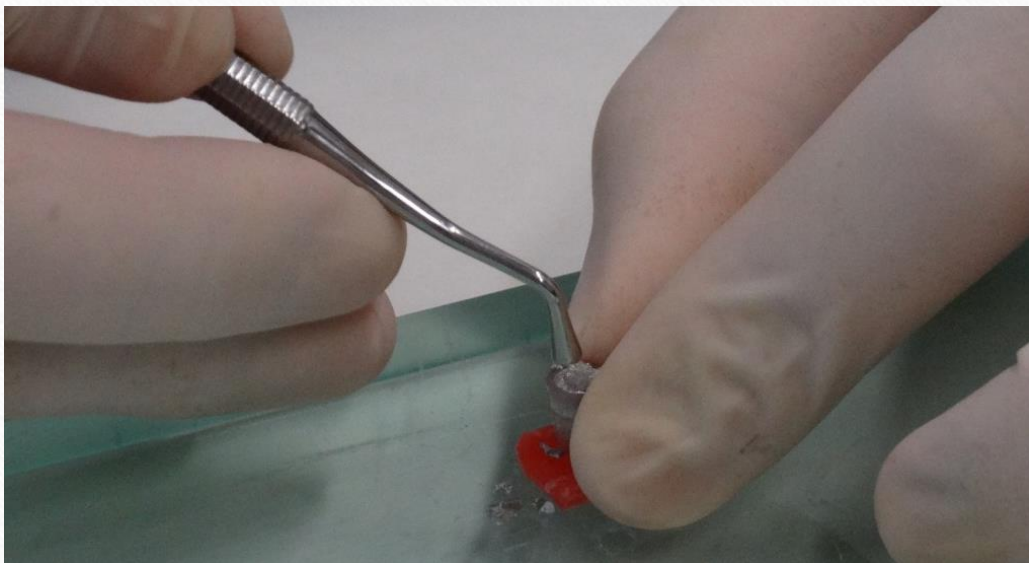
1. **o**
2. **O**
3. **O**



$$S = F/A$$







# Resistência à compressão

$$\sigma_c = F/A$$

$$\sigma_c = F/\pi \cdot r^2$$

$\sigma_c$  = Resistência Compressão em MPa (Mega Pascal)

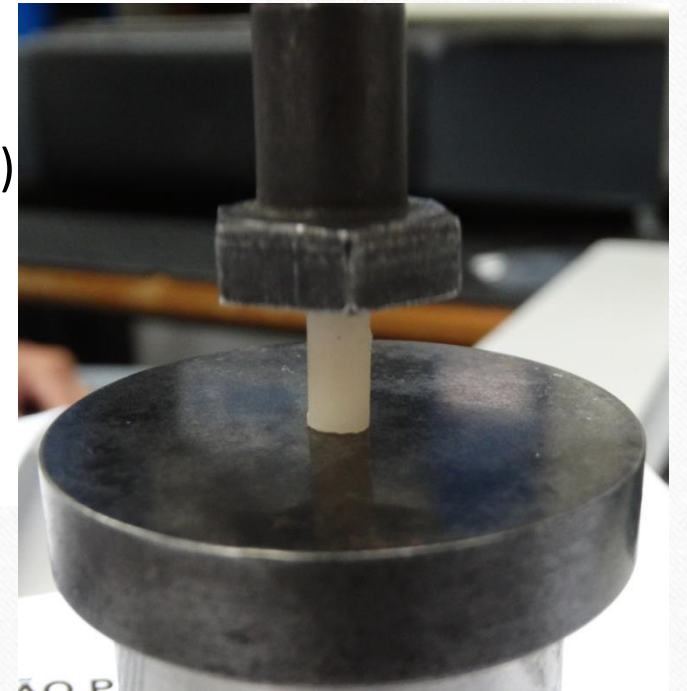
F = Força de Ruptura ou Força Máxima obtida no ensaio em N (Newton)

A = Área Transversal do corpo de prova em mm<sup>2</sup> ( $A = \pi \cdot r^2$ )

r = Raio do corpo de prova em mm

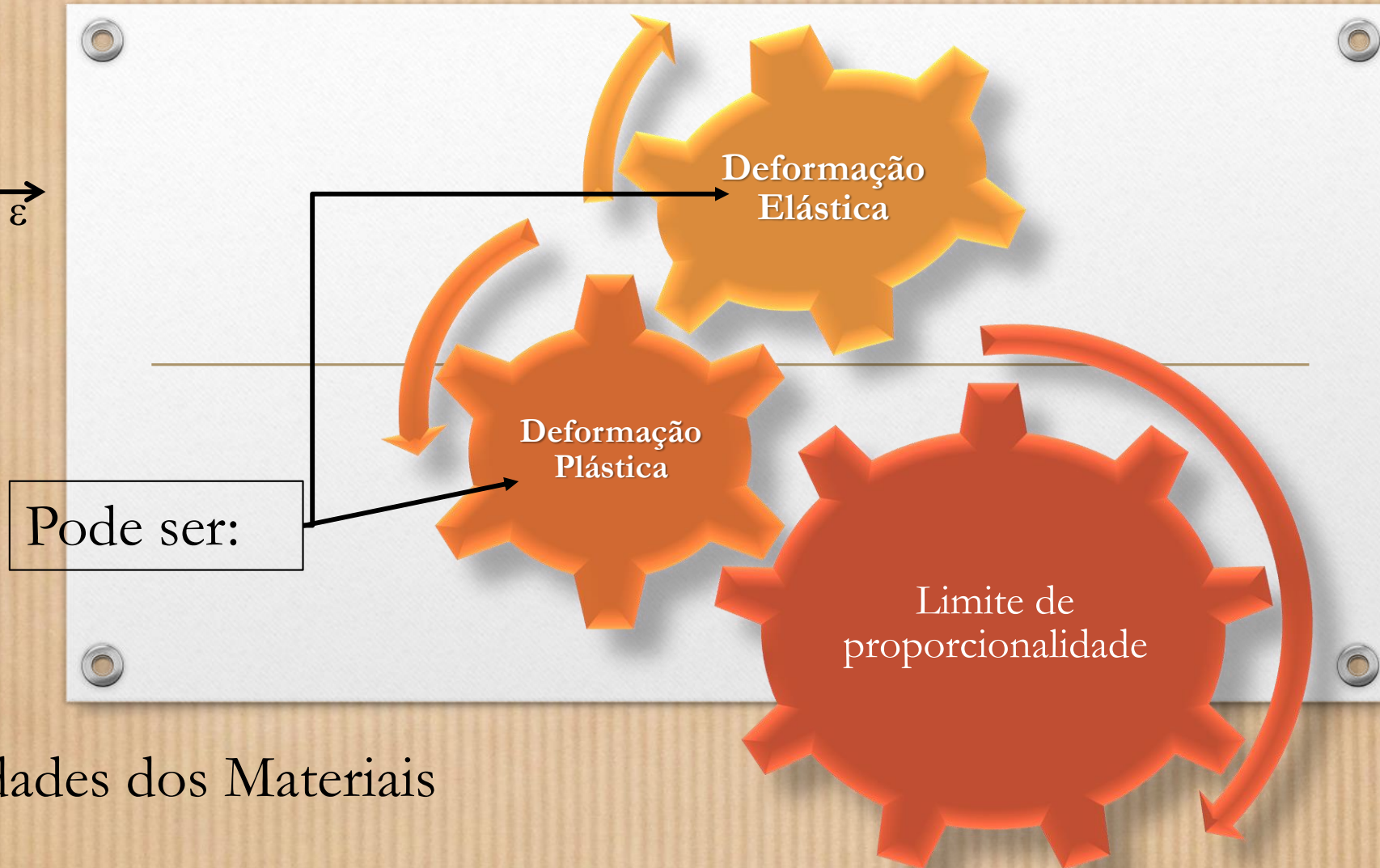
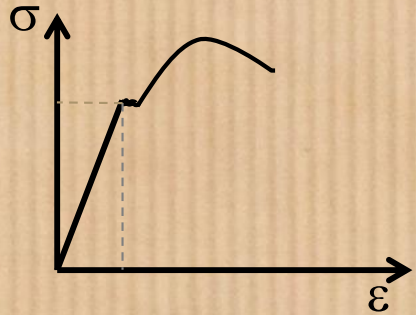
D = Diâmetro do corpo de prova em mm (=  $r \cdot 2$ )

$$1,0 \text{ kgf/mm}^2 = 9,8 \text{ N/mm}^2 = 9,8 \text{ Mpa}$$



# Gráfico tensão x deformação

Como efeito da *Tensão*,  
tem-se a *Deformação*



Propriedades dos Materiais

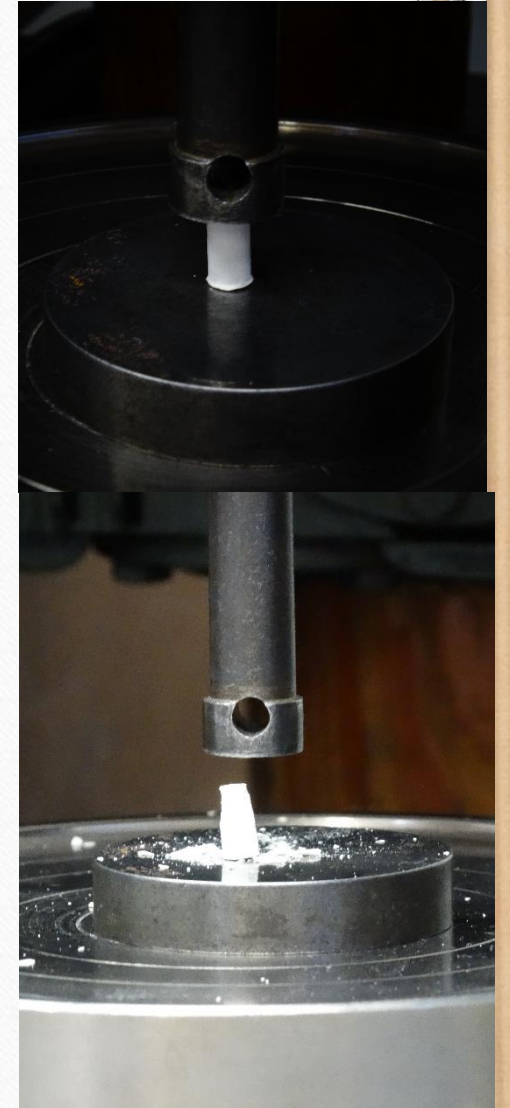
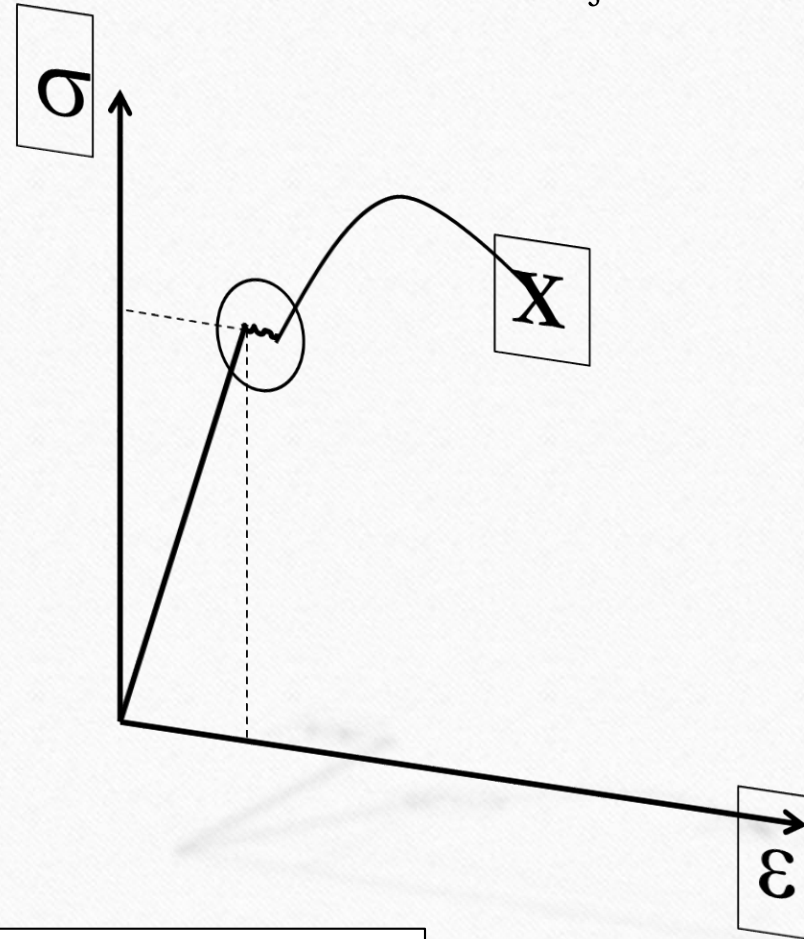
# GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO

*Tensão é a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada por unidade de área.*



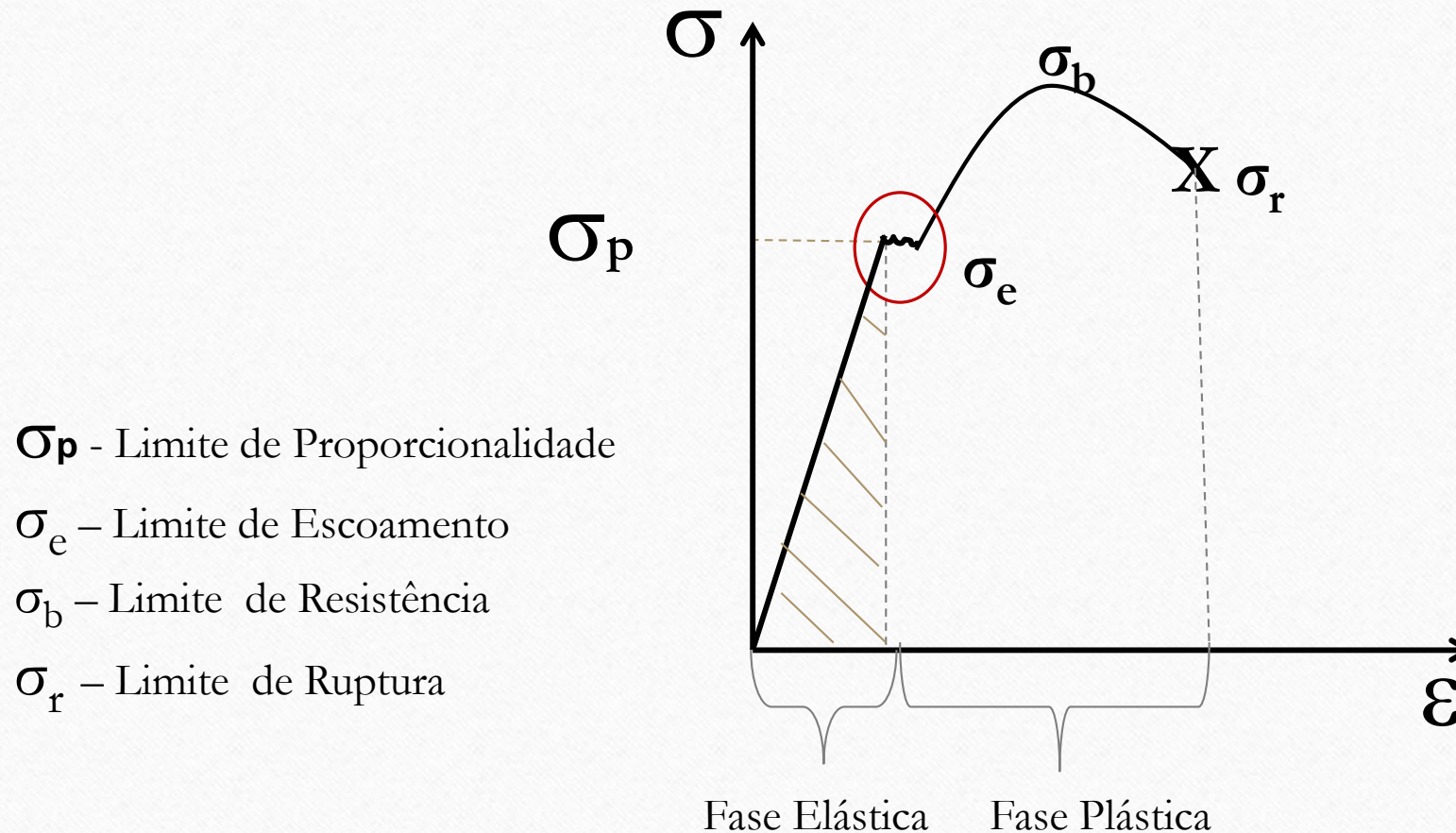
*A Deformação é a variação de uma dimensão qualquer desse corpo por unidade de comprimento quando o corpo é submetido a um esforço.*

*Resistência é o nível de tensão (máxima) necessário para causar fratura ou uma quantidade específica de deformação plástica (limite de escoamento.)*



# GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Como efeito da *Tensão*, tem-se a *Deformação*



$\sigma_p$  - Limite de Proporcionalidade

$\sigma_e$  - Limite de Escoamento

$\sigma_b$  - Limite de Resistência

$\sigma_r$  - Limite de Ruptura

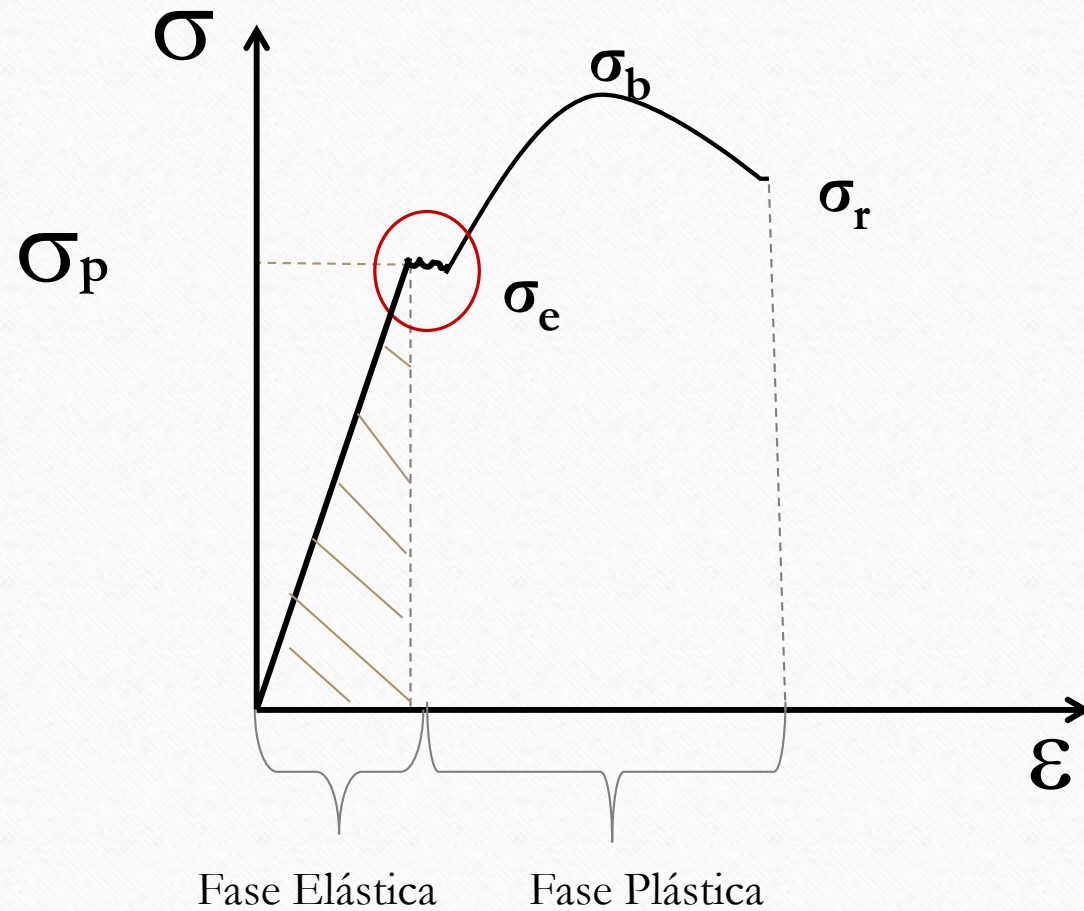


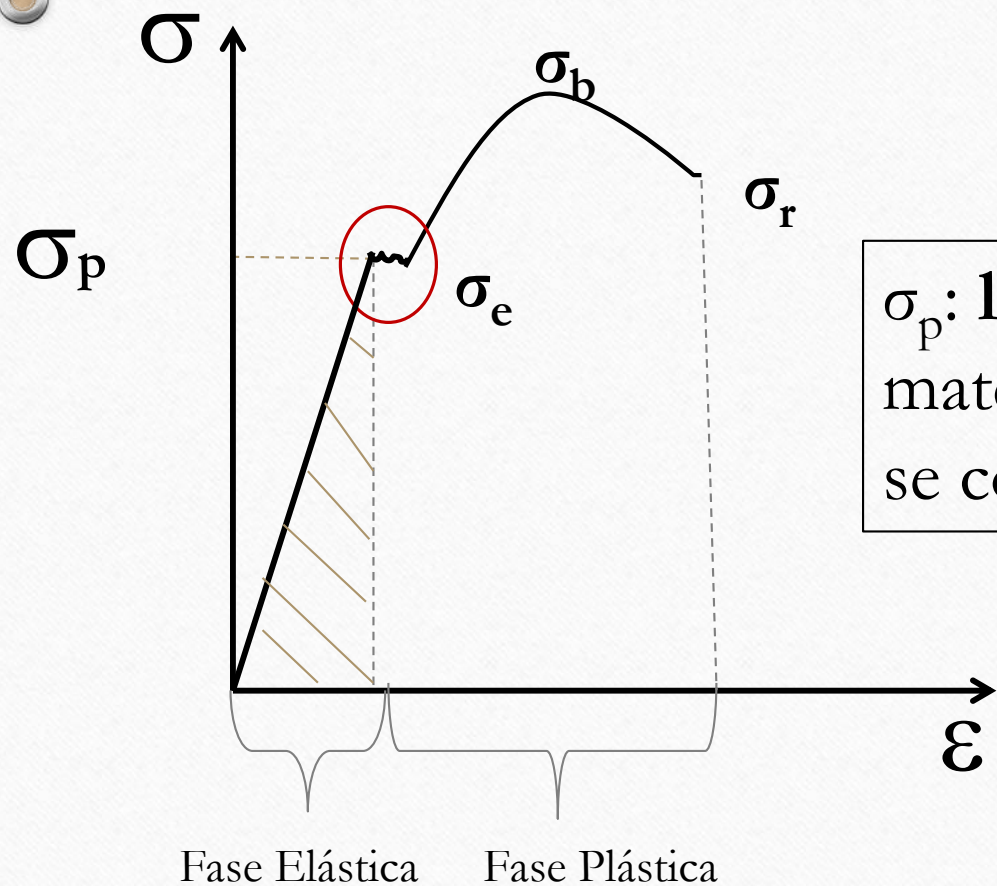
Marcon, L.M. Depósito da UNESP



FIGURA 1

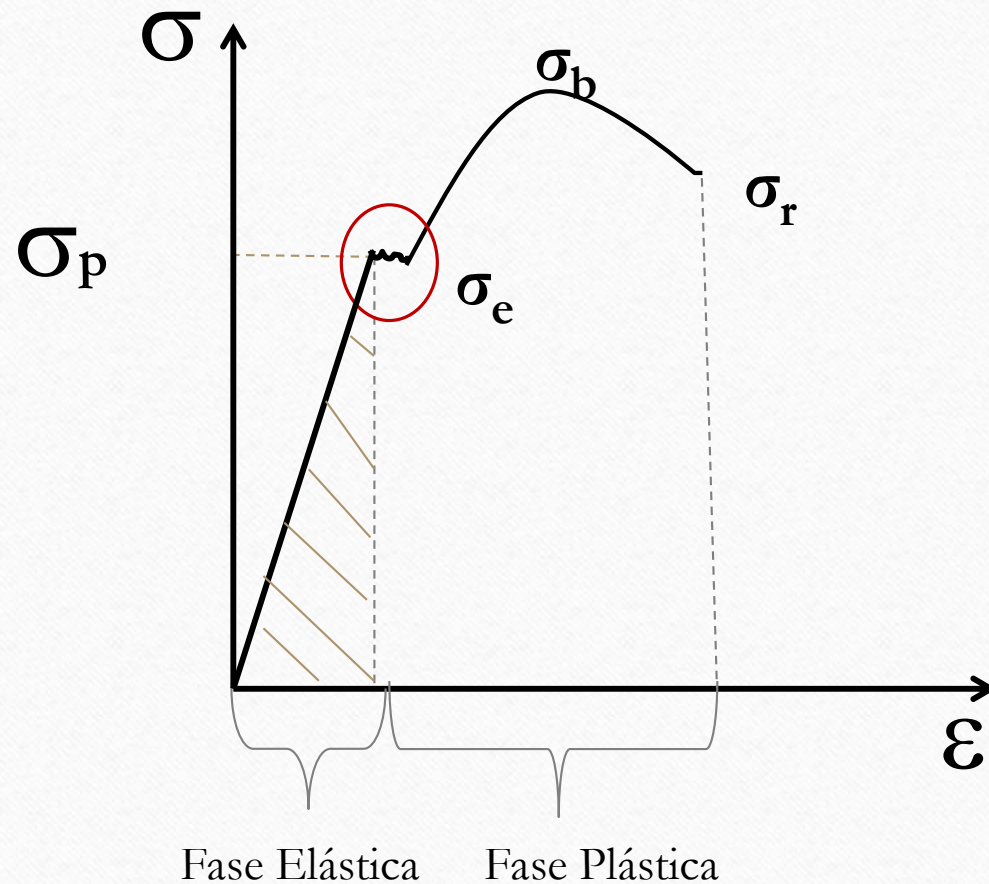
Aspecto inicial do dente 36 com uma restauração Classe II OD de resina composta fraturada





$\sigma_p$ : **limite de proporcionalidade** do material é a tensão abaixo da qual o material se comporta segundo a lei de Hooke

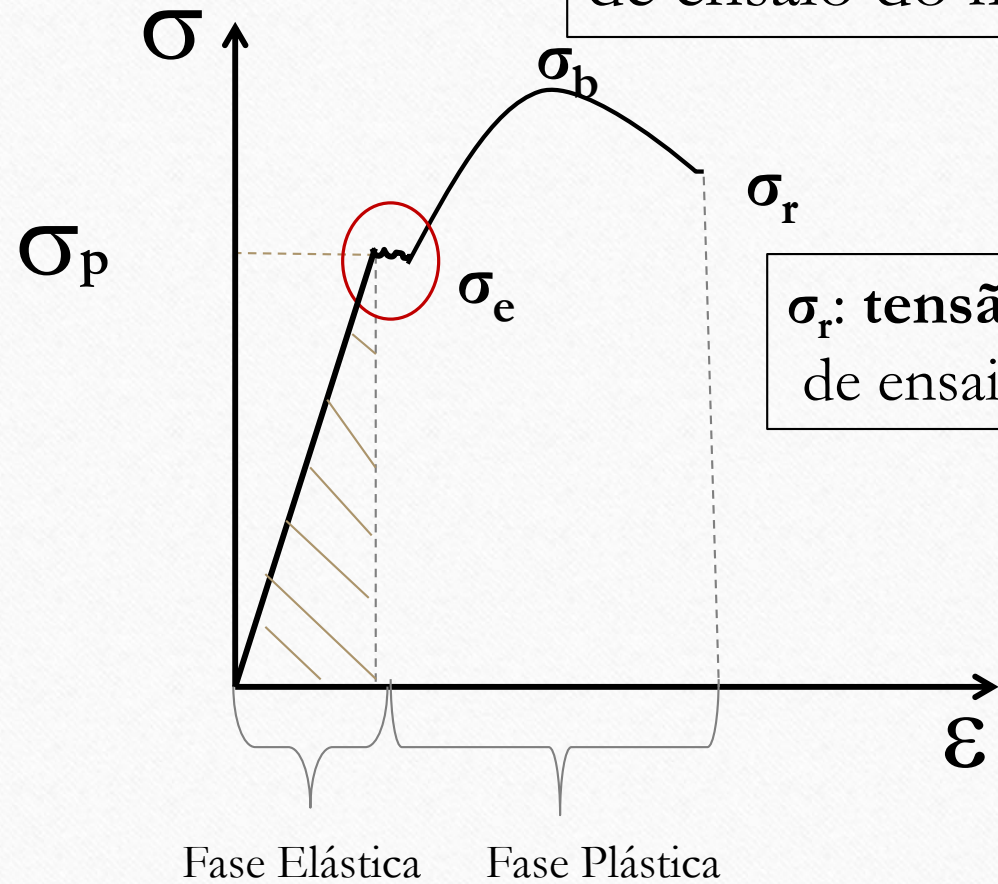
A lei de Hooke é a lei da física relacionada à elasticidade de corpos, que serve para calcular a deformação causada pela força exercida sobre um corpo.



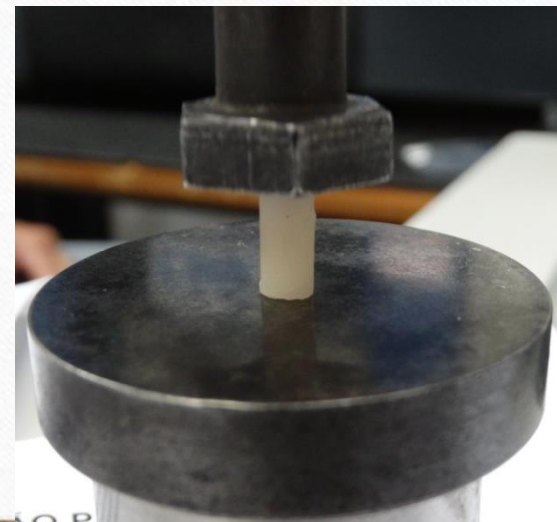
**$\sigma_e$ : limite de escoamento** (tensão a partir da qual as deformações são permanentes.  
Indica o início da **região plástica** do material.

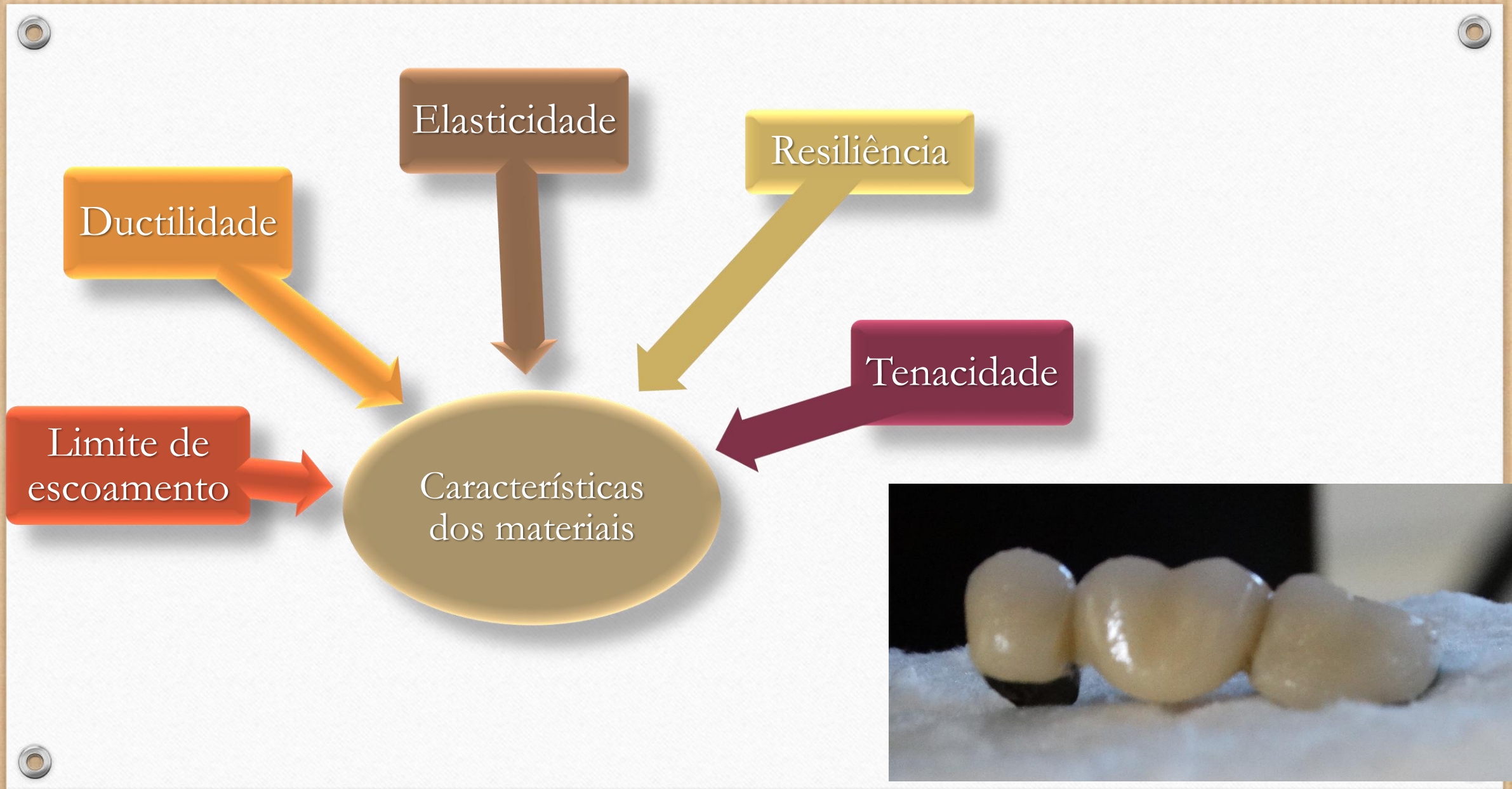


$\sigma_b$ : tensão máxima de ensaio do material.



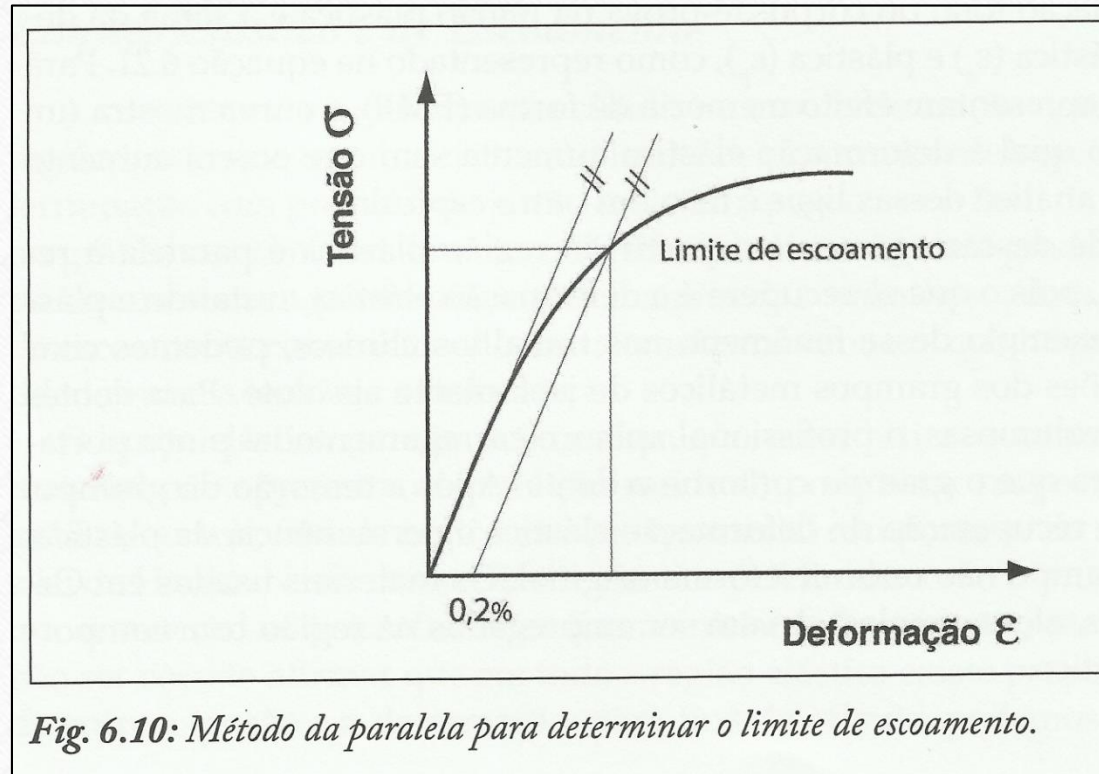
$\sigma_r$ : tensão de ruptura de ensaio do material.



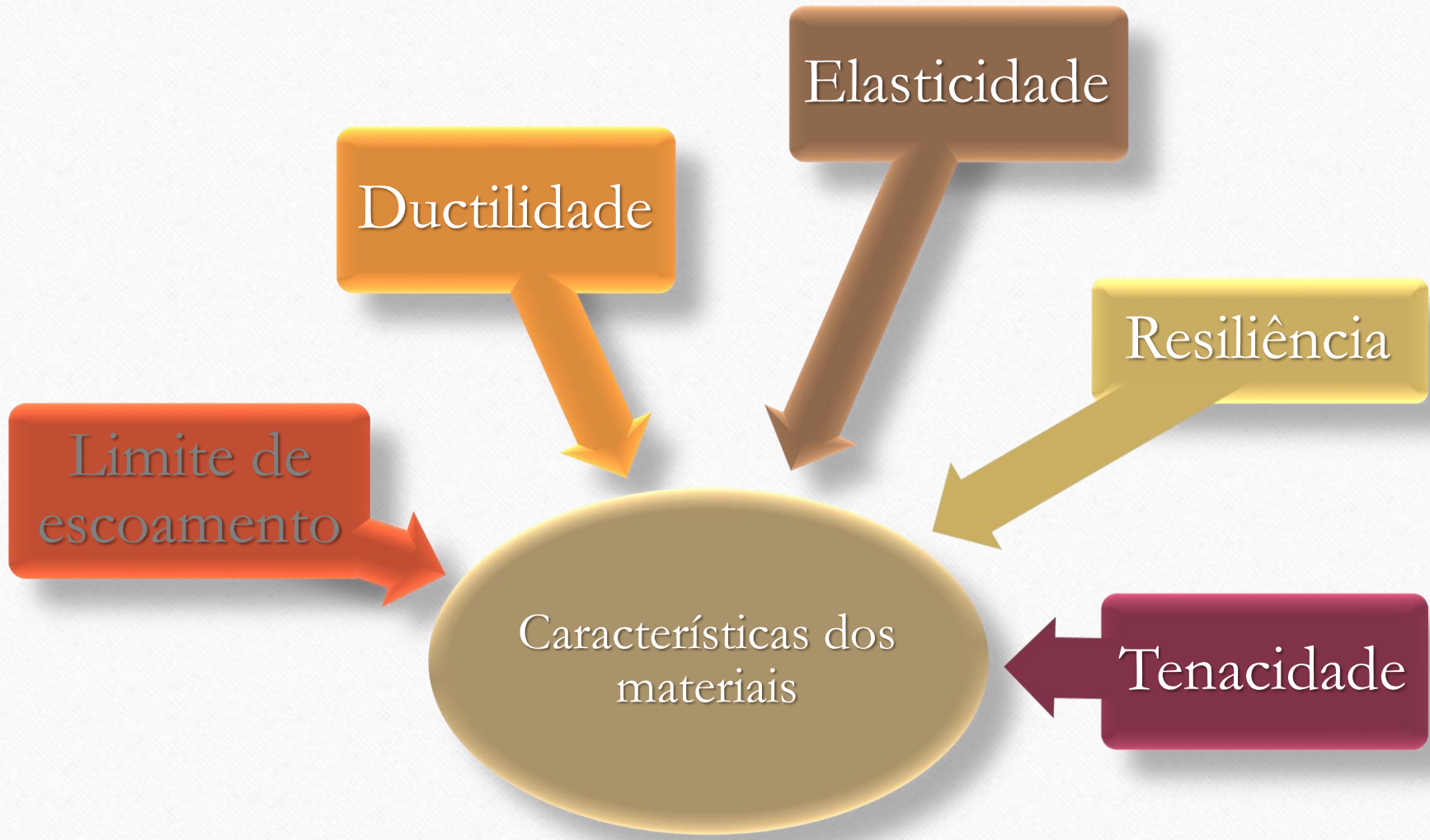


## Limite de escoamento

O limite de escoamento do material é o ponto em que a tangente traçada deixa de tocar a curva da Tensão( $\sigma$ )



*Fig. 6.10: Método da paralela para determinar o limite de escoamento.*



Limite de escoamento

Ductilidade

Elasticidade

Resiliência

Tenacidade

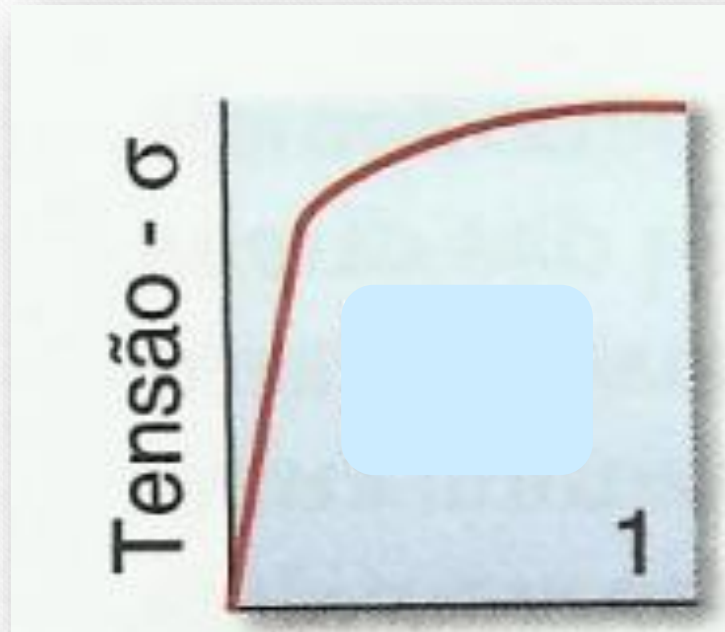
Características dos materiais

# Ductilidade



Características  
dos materiais

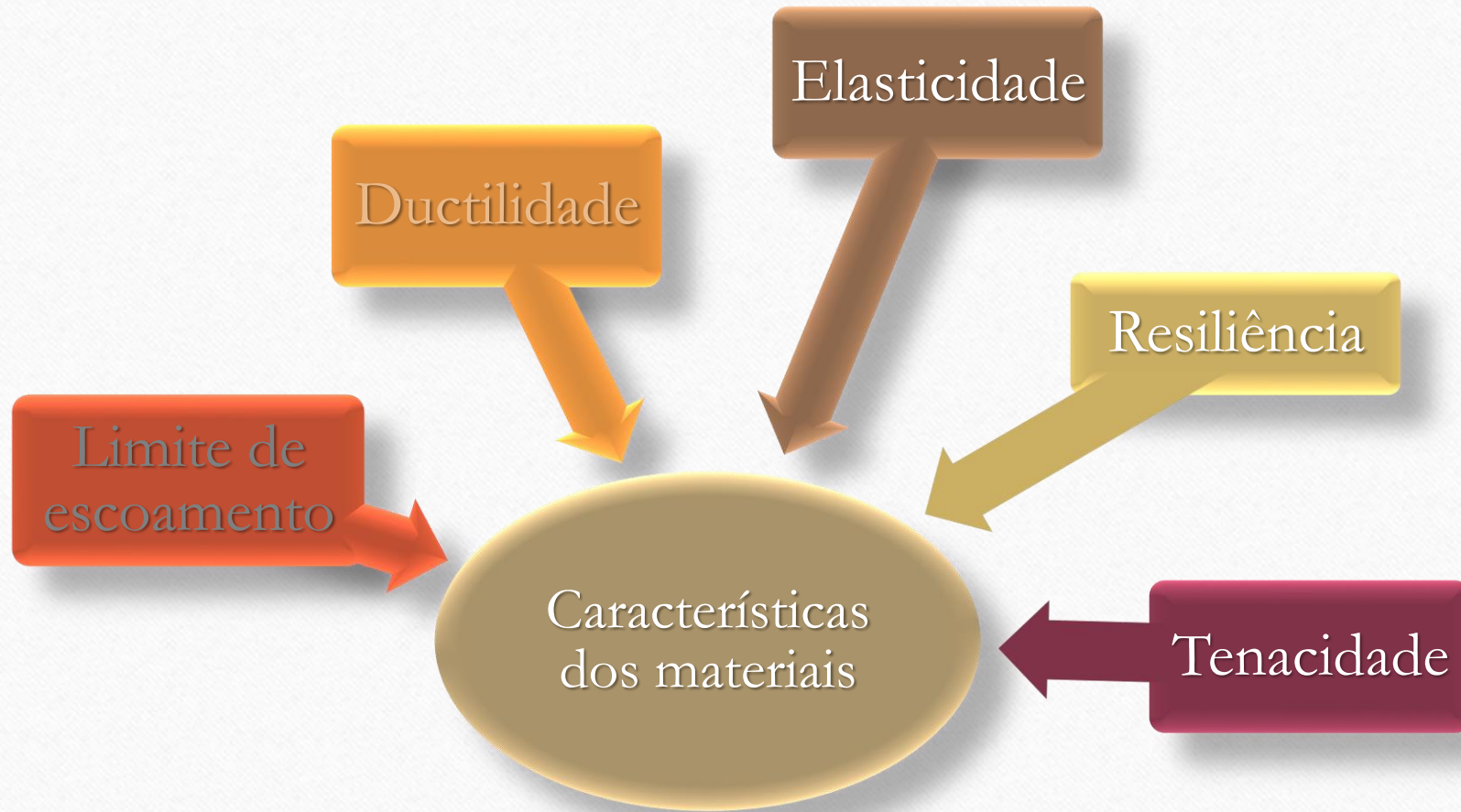
Representa a habilidade de um material em apresentar uma grande deformação permanente sob tensões de tração até o ponto de fratura.  
A liga de Prata é um exemplo.



# Ductilidade

FIGURA 4.12 Curvas tensão-deformação para materiais com várias combinações de propriedades.





Limite de escoamento

Ductilidade

Elasticidade

Resiliência

Características dos materiais

Tenacidade

Robert Hooke (1635 - 1703).

Em 1676 expressou: "a tensão resultante da aplicação de uma força em um material é diretamente proporcional à sua deformação".

Esta expressão ficou conhecida como Lei de Hooke.

A lei de Hooke é a lei da física relacionada à elasticidade de corpos, que serve para calcular a deformação causada pela força exercida sobre um corpo.

Matematicamente a Lei de Hooke pode ser expressa da seguinte maneira:

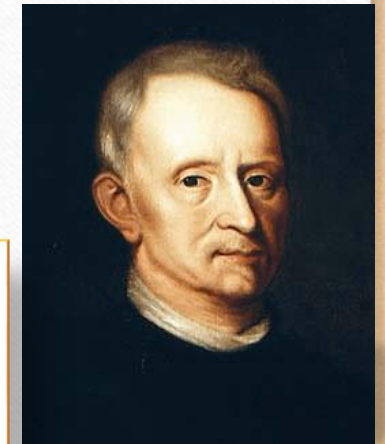
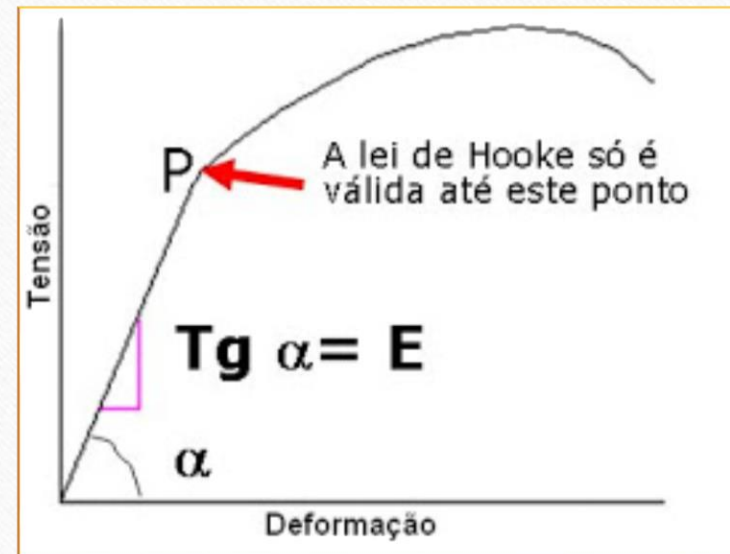
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Onde:

$\sigma$ : tensão

$\varepsilon$ : deformação

$E$ : modulo de elasticidade





**TABELA 4-1** Módulo de Elasticidade (GPa)  
de Alguns Materiais Dentários

<b>Material</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
Esmalte	84
Dentina	17
Liga de ouro (tipo IV)	90-95
Amálgama	28-59
Liga de cobalto-cromo para prótese parcial removível	218-224
Porcelana Feldspática	69-70
Compósito resinoso híbrido	17-21
Poli(metacrilato de metila)	2,4
Elastômero à base de silicone para prótese maxilofacial	0,002-0,003

***Módulo de Elasticidade***

# Rigidez

- É a capacidade do material resistir às deformações impostas pelos esforços aplicados *na região elástica*.
- Essa propriedade é quantificada pelo módulo de elasticidade.

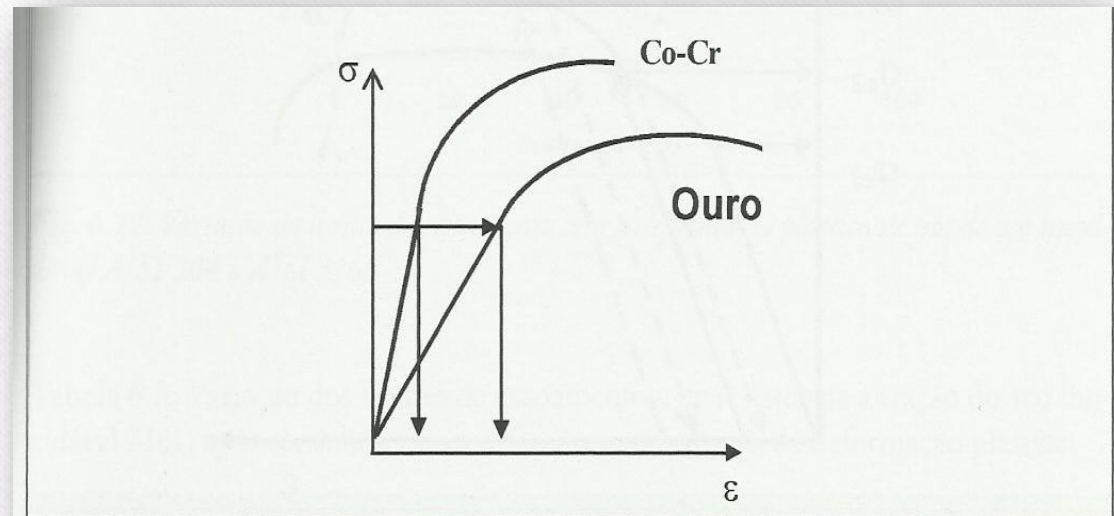
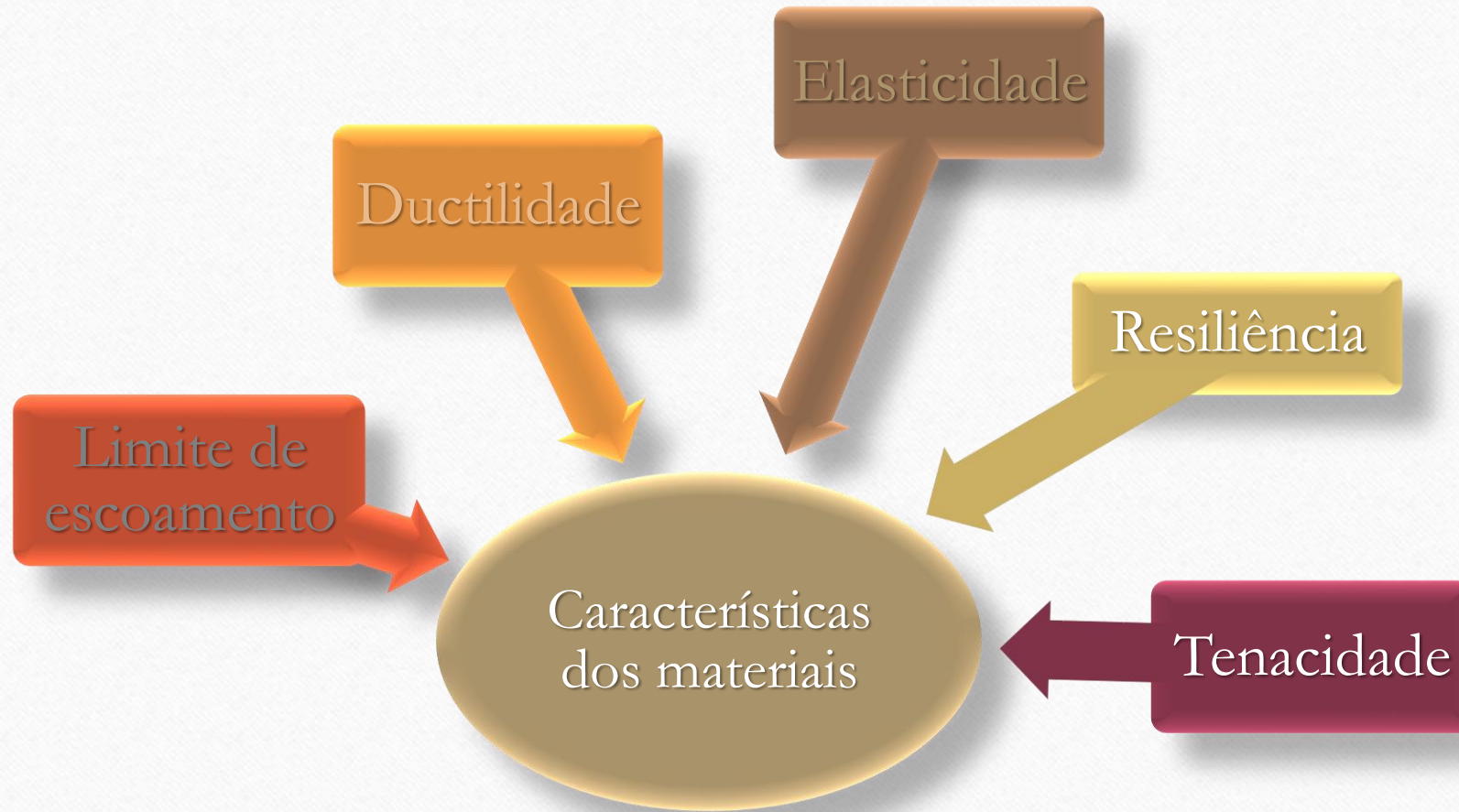
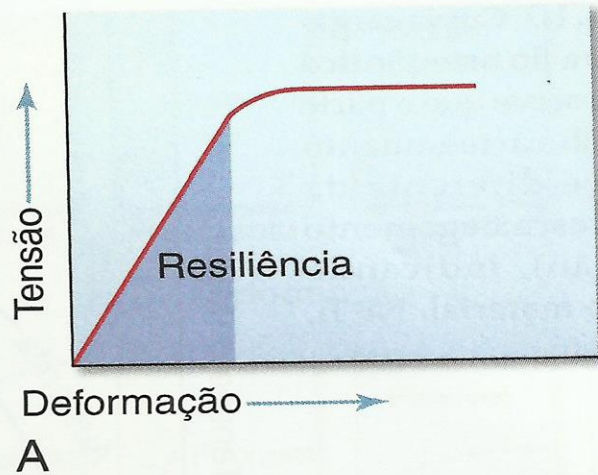
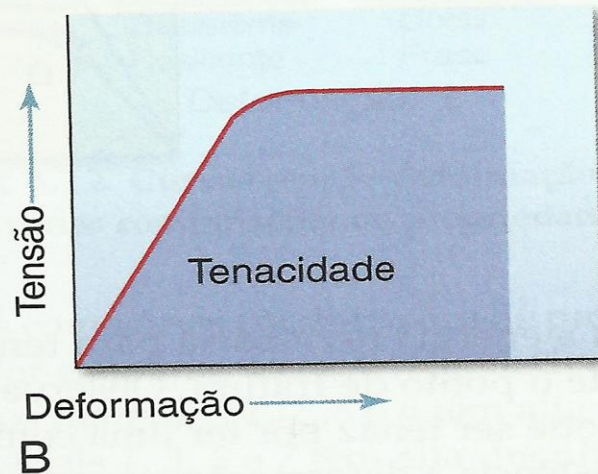


Fig. 6.15: A inclinação da curva indica a rigidez do material. A liga Co-Cr é mais rígida que o Au.





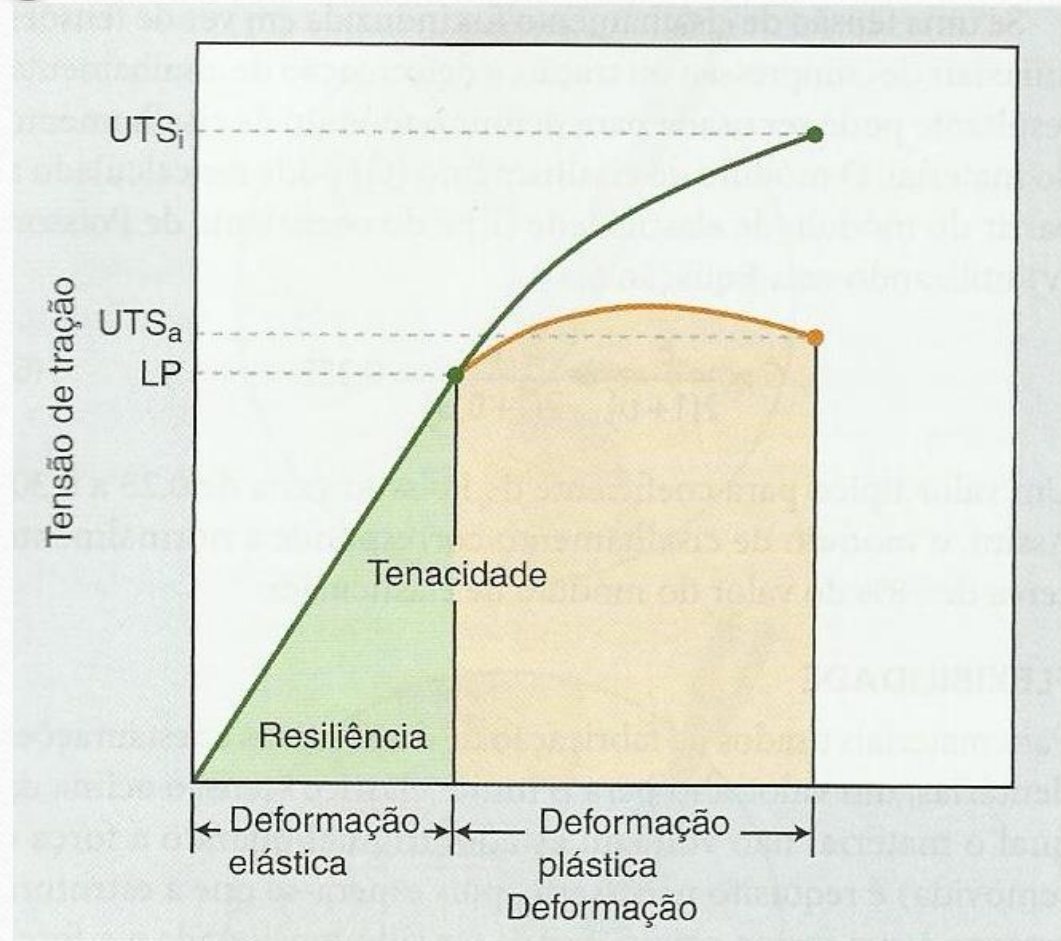
Resiliência - Capacidade de um corpo de absorver energia sem se deformar de maneira permanente.



Tenacidade é a medida de energia necessária para fraturar um material.

Portanto, ela pode ser representada pela área sob a curva de tensão x deformação.

**FIGURA 4.9** Curvas tensão-deformação mostrando **A**, a área indicando a resiliência e **B**, a área representando a tenacidade de um material.



A resiliência pode ser calculada determinando-se a área dentro da região elástica.

A Tenacidade é calculada pela área total dentro das regiões elástica e plástica.

O Limite de proporcionalidade (LP) permanece constante neste caso, mas a tenacidade e a resistência à fratura são diferentes.

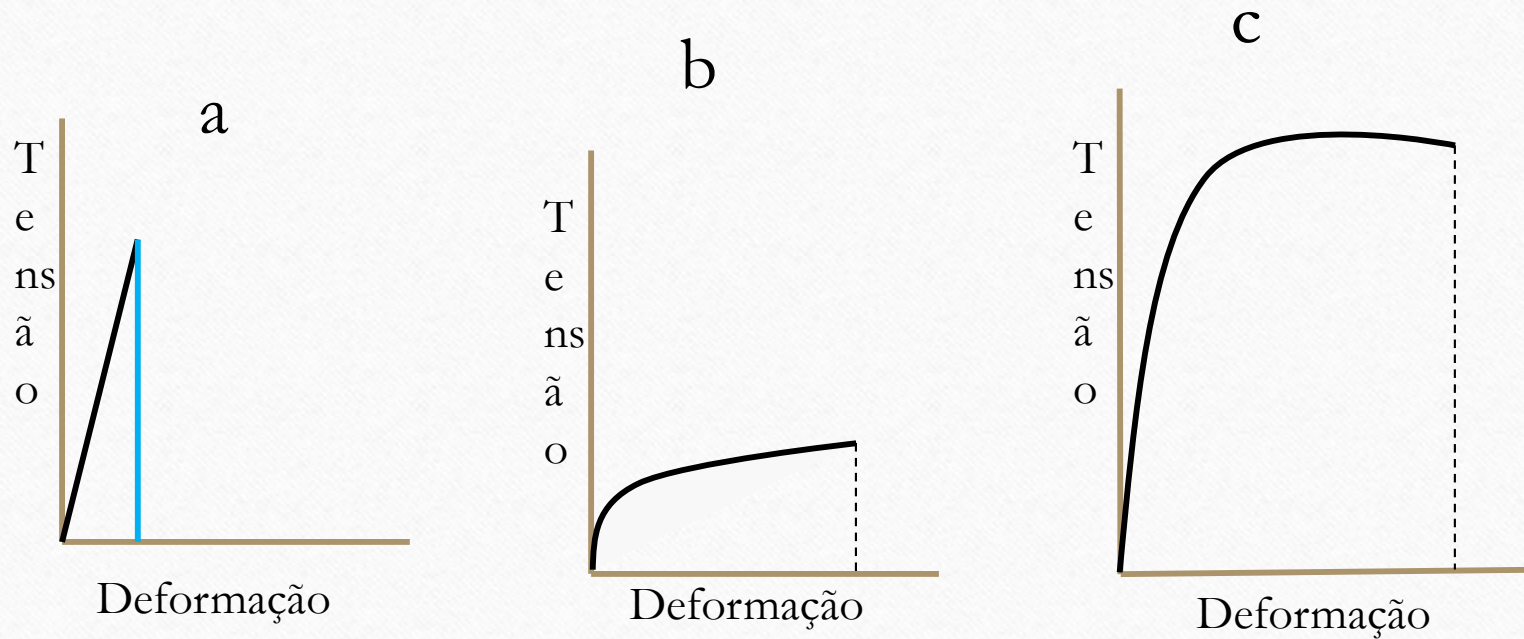
# **Materiais frágeis**

São aqueles materiais que apresentam pouco ou nenhum escoamento.

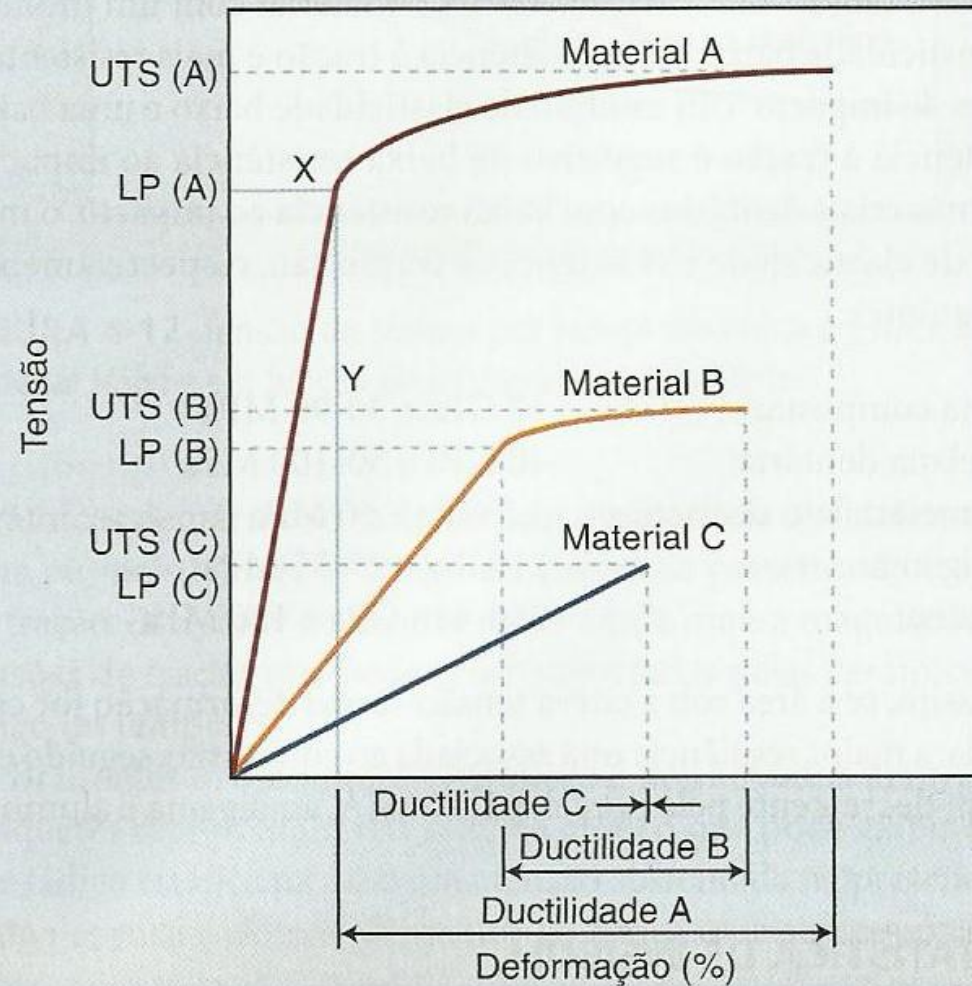
Um material frágil rompe-se facilmente , ainda na fase elástica.

Isto indica a pouca capacidade de absorver deformações permanentes.

Qual desses gráficos representa o material mais Tenaz?  
Qual dos materiais é mais dúctil?



## Vamos analisar



**FIGURA 4-13** Curvas tensão-deformação de materiais que exibem propriedades mecânicas diferentes. UTS, tensão de ruptura sob tração (*ultimate tensile stress*); LP, limite de proporcionalidade.

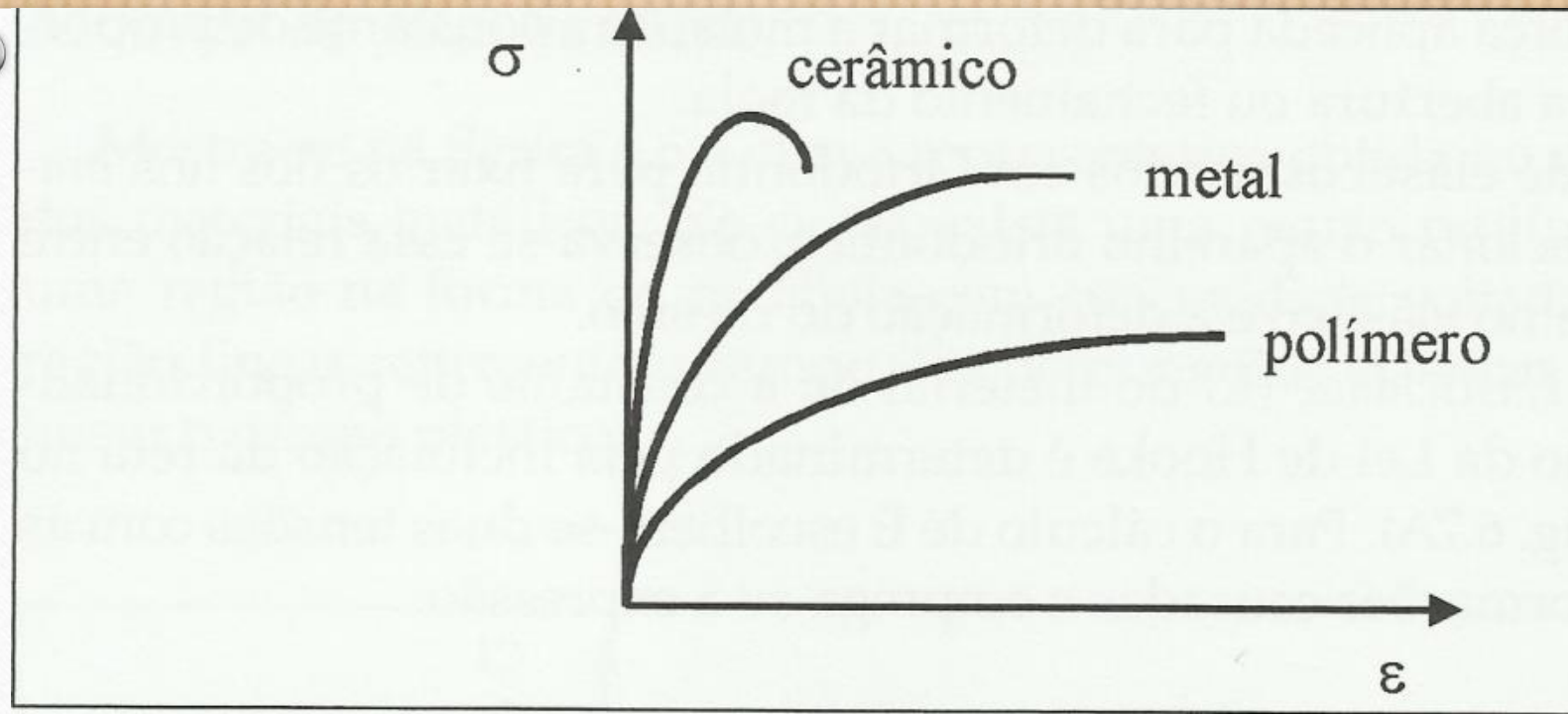
Resistência  
Elasticidade  
Ductilidade

A é + resistente + rígido e + dúctil que B e C

B tem <resistência < menor ductilidade e + frágil que A

C não é dúctil, tem menor resistência e é frágil.



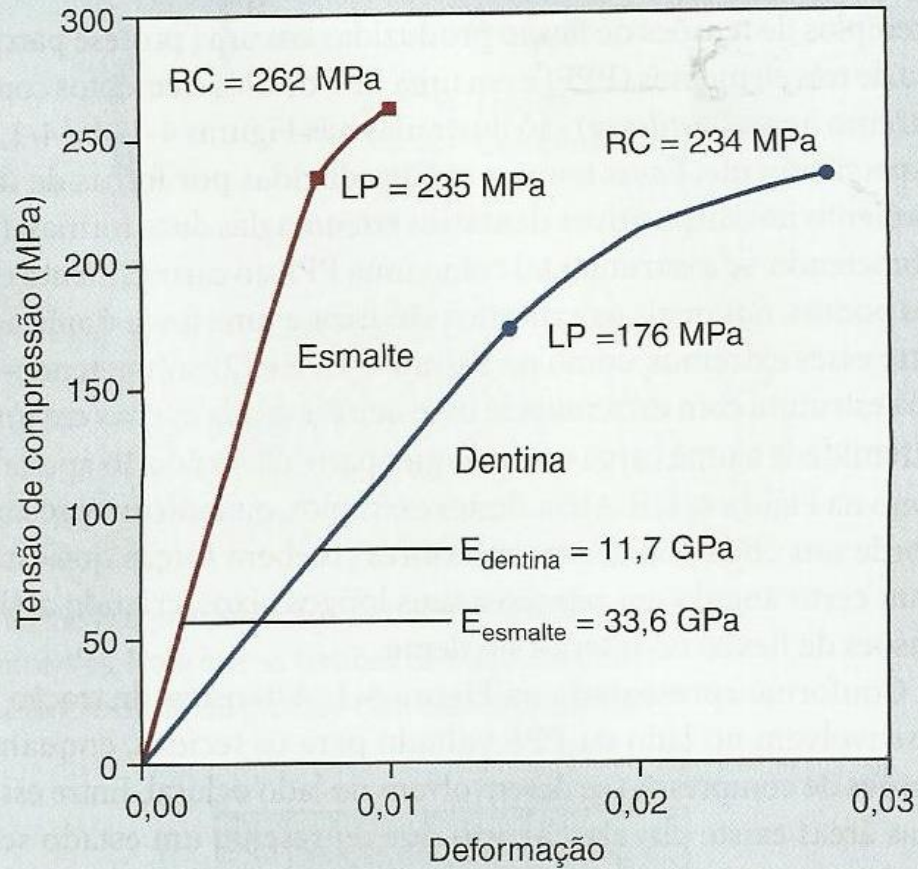


*Fig. 6.8: Desenho representativo das curvas obtidas nos ensaios de tração*

Quais desses materiais tem maior capacidade de deformação.

Qual dos materiais é mais rígido e por que?

Para os polímeros, a região não-linear é maior que a linear, indicando que esses materiais possuem maior capacidade de deformação que os metais e os cerâmicos.



**FIGURA 4-5** Gráfico tensão-deformação para esmalte e dentina que foram submetidos à compressão. Os valores de resistência à fratura sob compressão (RC), limite de proporcionalidade (LP) e módulo de elasticidade (E) são mostrados. (Dados de Stanford JW, Weigel KV, Paffenbarger GD e Sweeney WT: Compressive properties of hard tooth tissue. J Am Dent Assoc 60:746,1960.)

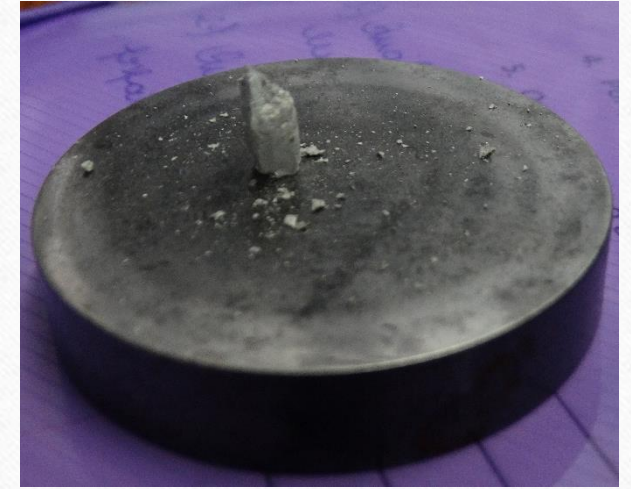
# Ensaio de Resistência à compressão em Materiais dúcteis e Frágeis

Materiais com estas características, especificamente os metais, comportam-se de maneira diferente no ensaio de compressão.

Os metais frágeis rompem praticamente sem fase plástica.



Os metais dúcteis sofrem grande deformação na fase plástica, às vezes sem atingir a ruptura.



Análise dos gráficos - Exercício

# Análise dos Gráficos

Rigidez

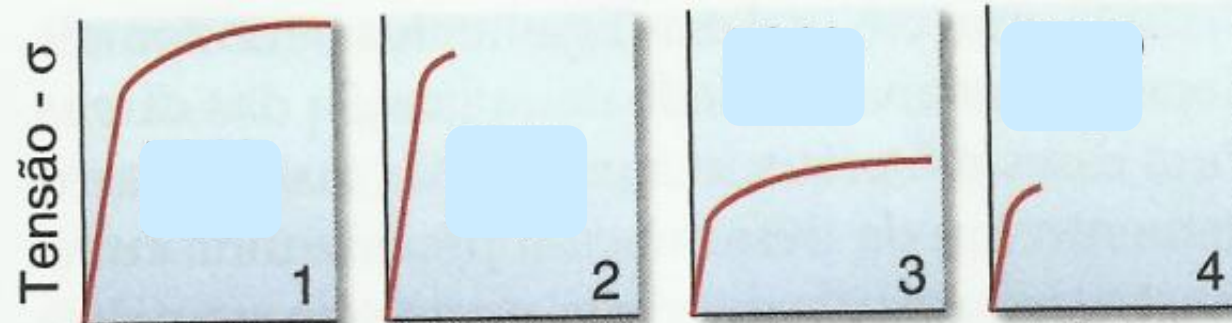
(Módulo de Elasticidade)

Ductilidade

Tenacidade

Resistência

Características  
dos materiais



O que pode ser observado em cada gráfico?

Deformação -  $\epsilon$

FIGURA 4.12 Curvas tensão-deformação para materiais com várias combinações de propriedades.

*Logo estaremos juntos*





*Olhem o que nos espera para  
vivermos juntos. Paciência!!!!!!*