

ELEMENTOS DE MÁQUINAS (SEM 0241)

Notas de Aulas v.2020

Aula 02 – Materiais e Propriedades Mecânicas

Professores: Carlos Alberto Fortulan
Ernesto Massaroppi Junior
Jonas de Carvalho

2. MATERIAIS

.... desde o início dos tempos, o homem executa trabalhos de engenharia para suprir abrigo, propiciar conforto e proteção.

O primeiro elemento estrutural, isto é, o primeiro material de engenharia foi a madeira, seguida da pedra, metais, cerâmica, vidro e finalmente, os polímeros.

Hoje o número de materiais disponíveis para o Engenheiro é vasto, algo em torno de 200.000. Sua seleção não pode ser feita independentemente da escolha do processo pelo qual o material será conformado, unido, acabado ou tratado posteriormente.

Informações na web: <http://www.matweb.com>
<http://www.webelements.com>

- Existe apenas cerca de 100 tipos de átomos “conhecidos” em todo o universo, porém por volta de 200.000 tipos de materiais disponíveis. ????????
- Desafio na substituição dos materiais:

“Devem os materiais serem mais leves que o aço, mas estruturalmente equivalente”

Quando um material pode ser considerado estrutural ?

$$\sigma_{RT} \sim 340\text{MPa}$$

?

Alta resistência



Baixa resistência

O que fazer para um material se tornar estrutural?

Microestrutura?

Macroestrutura?

Forças de ligação?

De modo geral os Materiais

METÁLICOS

São tenazes, resistentes, pesados e, de modo geral, insuficientemente rígidos

POLÍMEROS

São leves, de fácil processamento, mas não são resistentes nem estáveis com a temperatura.

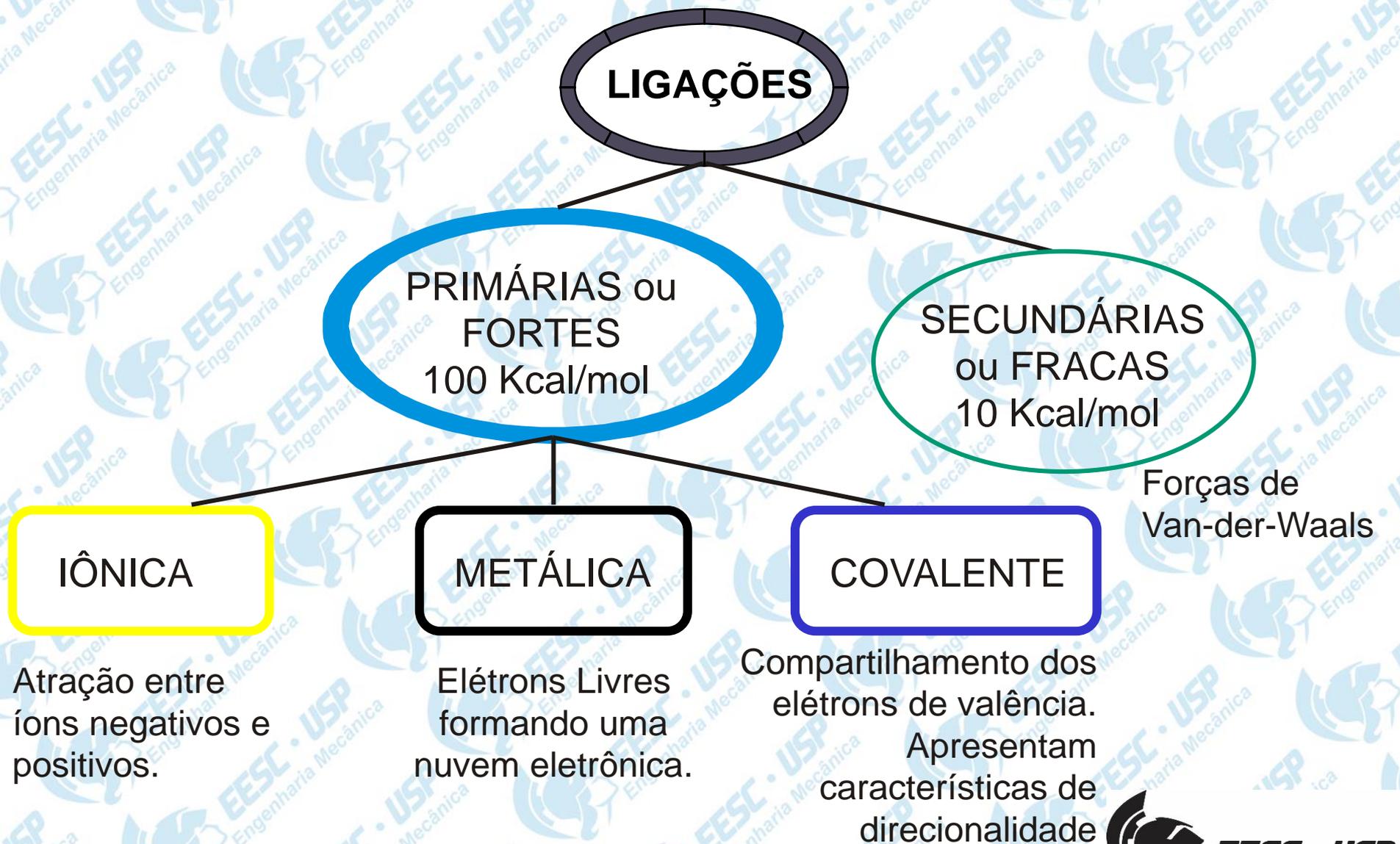
CERÂMICAS

Incluindo os vidros são duros, rígidos mas também frágeis

COMPÓSITOS

São materiais que consistem de pelo menos, dois componentes: a matriz e o agente de reforço. O principal objetivo é o de melhorar determinadas propriedades da matriz com características complementares.

2.1. Ligações químicas dos materiais



2.2. Arranjos atômicos

Estruturas Cristalinas

Se caracterizam pela formação dos cristais, isto é, arranjos ordenados e simétricos dos átomos no espaço.

Monocristais

Policristais

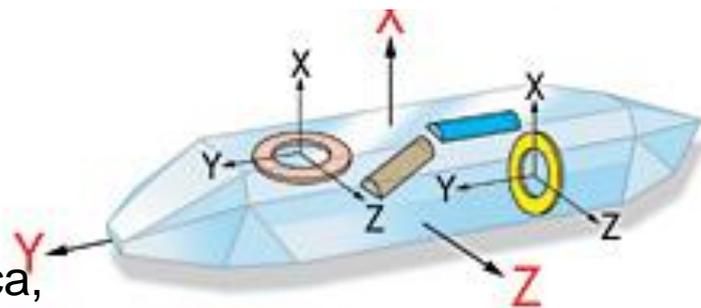
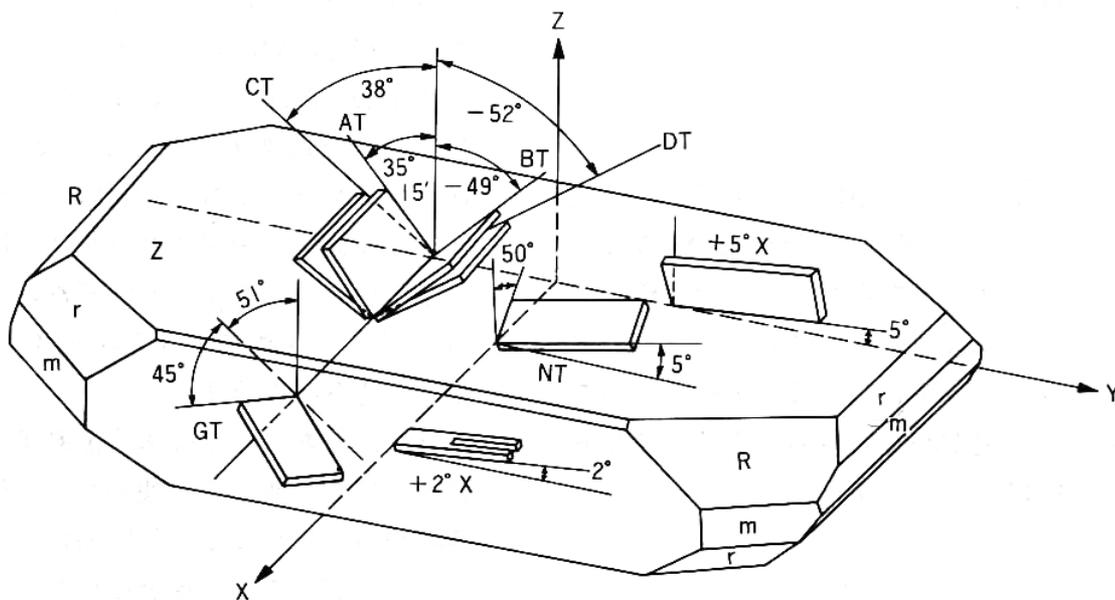
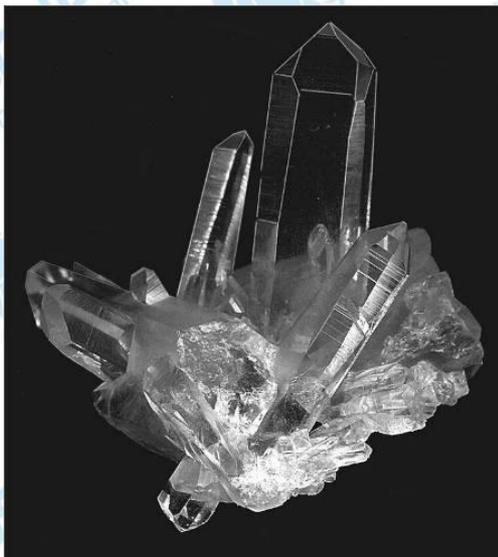
Estruturas Amorfas ou Vítreas

Arranjos desordenados e assimétricos dos átomos, similares à estrutura no estado líquido, embora mais compacta.

Estruturas Moleculares ou Poliméricas

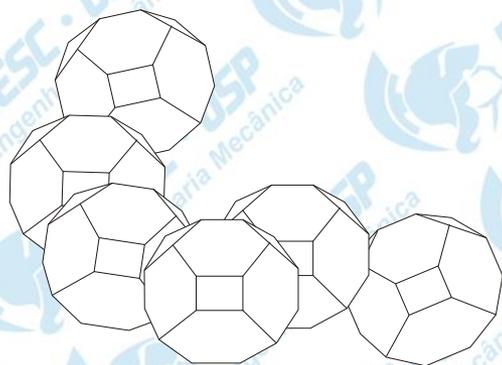
Estrutura típica dos materiais macromoleculares, formado por longas moléculas orgânicas.

2.2.1a. Monocristais

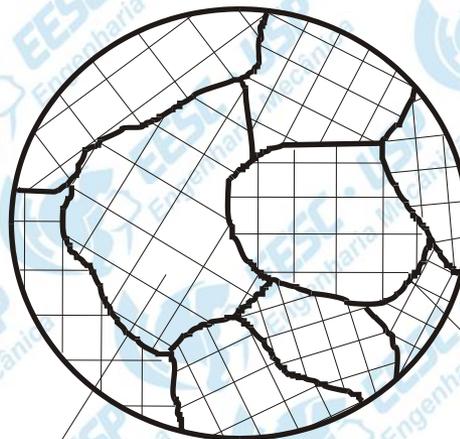


Longitudinal → sensíveis à forças compressivas - força, pressão, deformação e aceleração;
 Transversal (B) → grande carga com a deformação – piezelétricos (sensores de pressão);
 Inclinados (C) – acelerômetros e sensores de força nas 3 direções.

2.2.1b. Estruturas policristalinas



Grãos Cristalinos



Grão cristalino



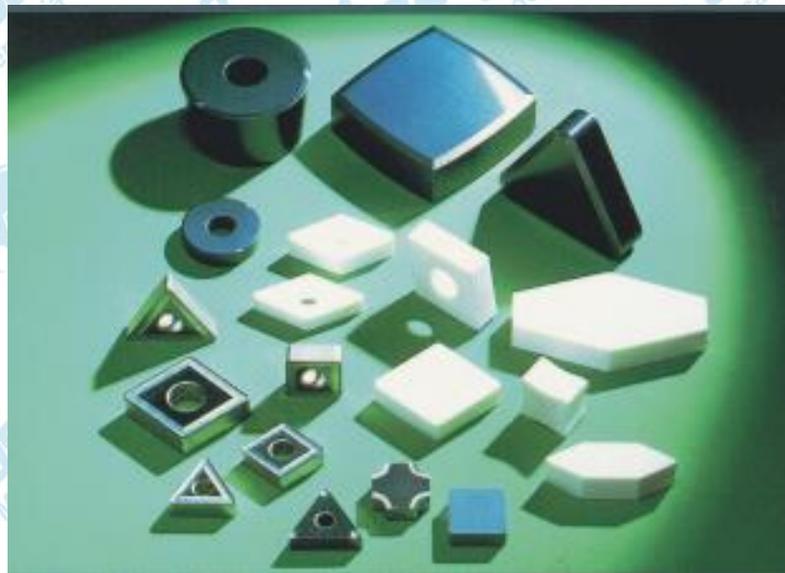
Orientação cristalográfica

Limite de grão

Corte de uma estrutura policristalina



<http://www.petervaldivia.com/ferrous-and-non-ferrous-metals/>

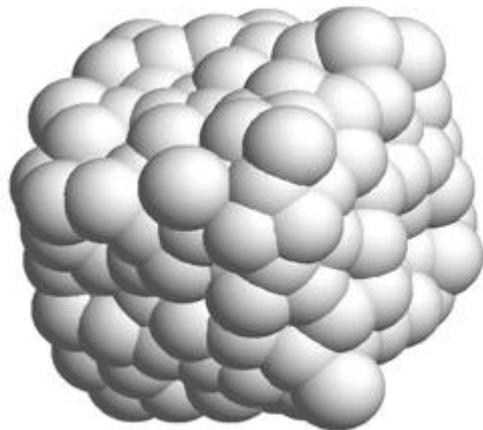


NTK



http://tudogal.com/wp-content/uploads/2014/11/machine_gears_hd_wallpaper.jpg

2.2.2. Estruturas amorfas ou vítreas

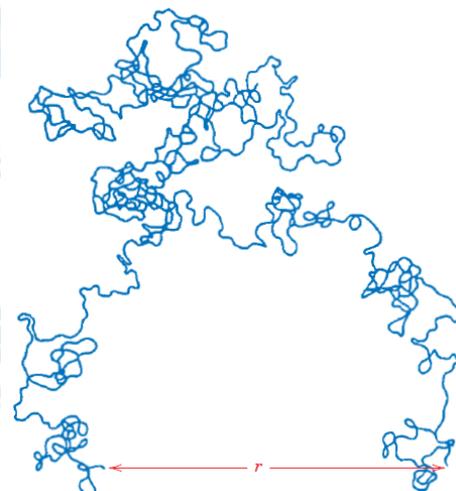
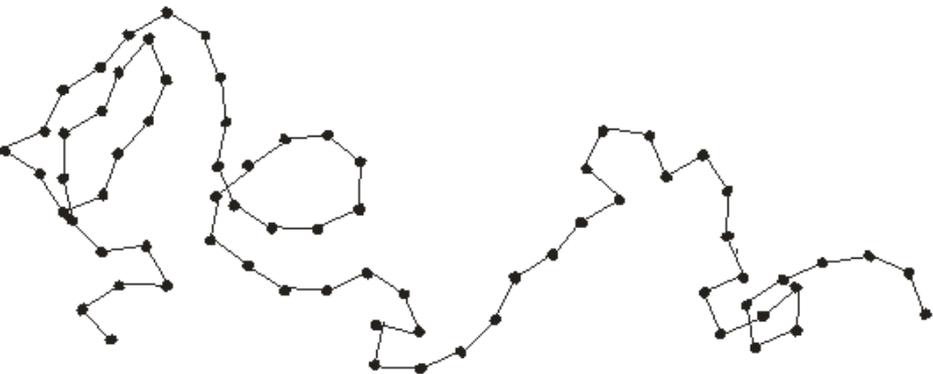


J. Phys. Chem. B, **108** (21), 6772 -6777, 2004



<http://www.impactglassindia.com/images/laminated-safety-glass/benefits-of-laminated-safety-glass.jpg>

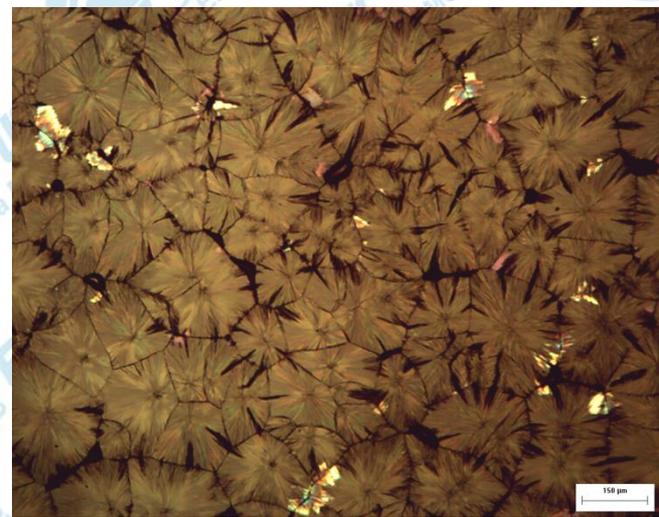
2.2.3 Estruturas Poliméricas



Callister p501



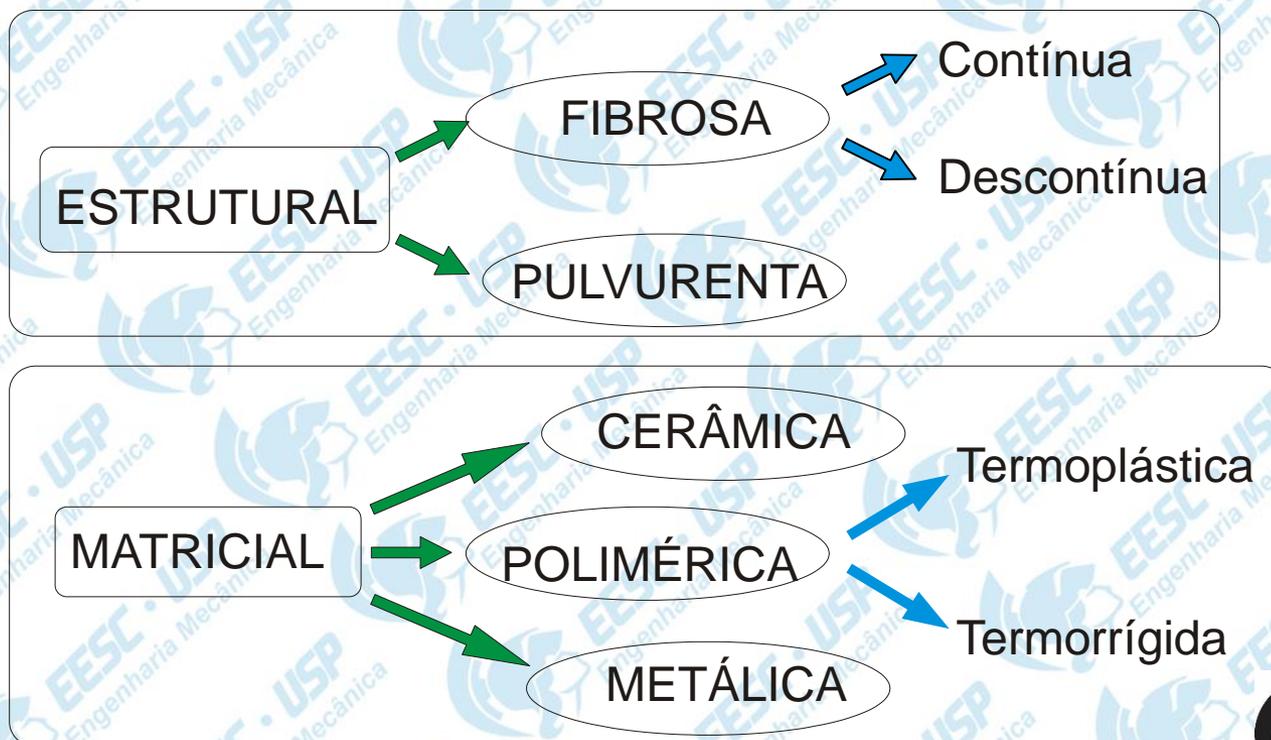
<http://www.calsak.com/polymers-additives/polycarbonate/>

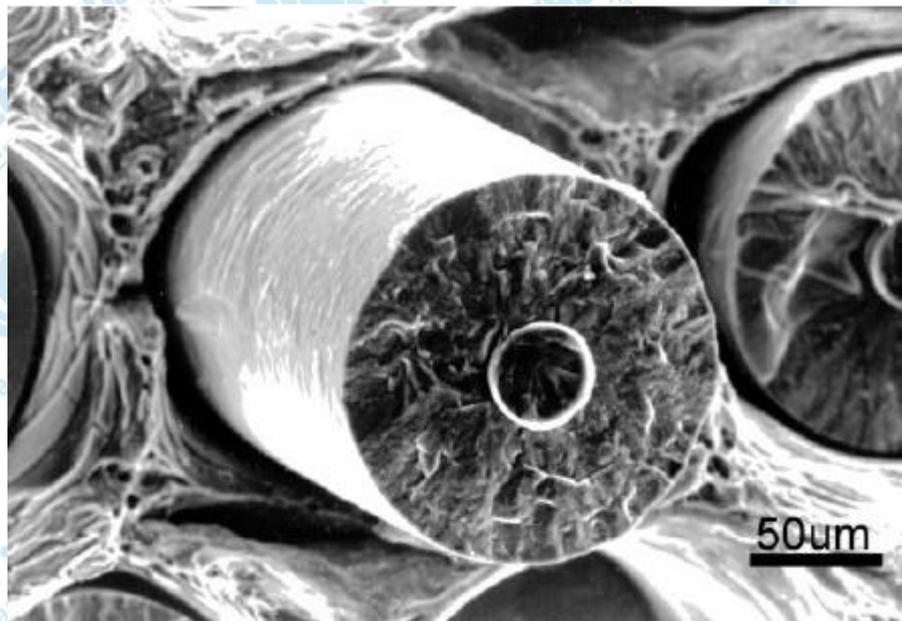


Materiais de Engenharia (SEM 5908) - ROLLO, J.M.D.de A, FORTULAN, C.A. (2014)

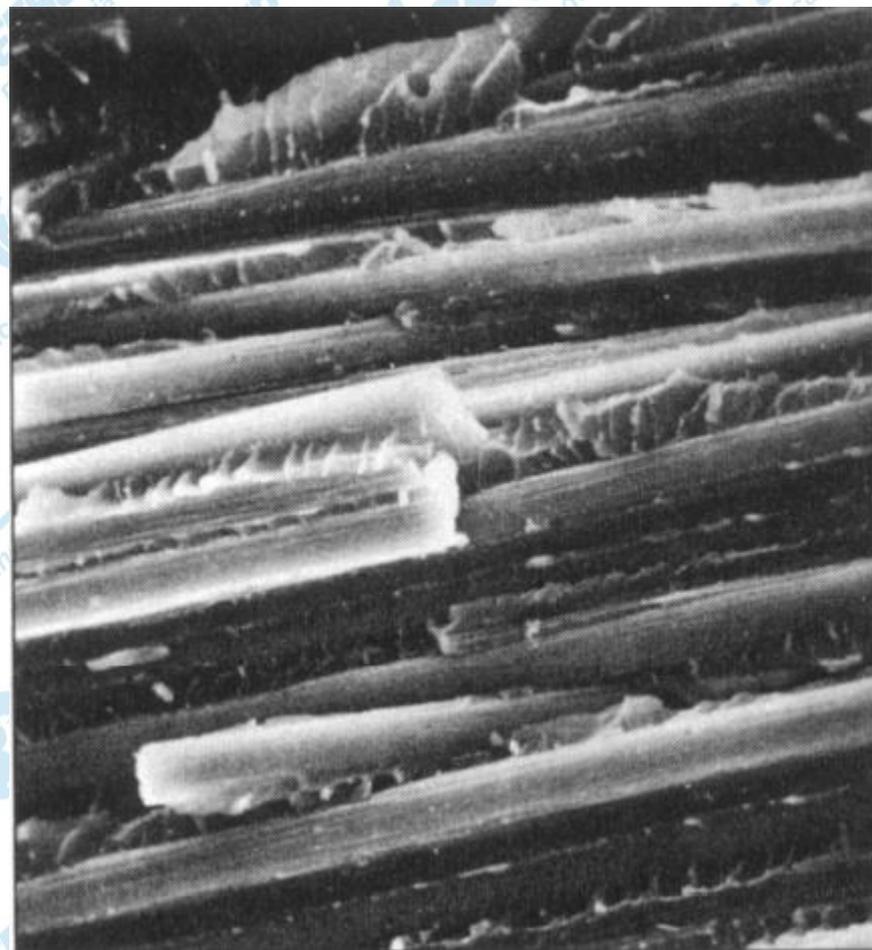
2.3. Compósitos

Constituem de uma classe de materiais heterogêneos multifásicos. Neles um dos componentes descontínuos, fornece a principal resistência ao esforço (**componente estrutural**), e o outro contínuo é o meio de transferência deste esforço (**componente matricial**).



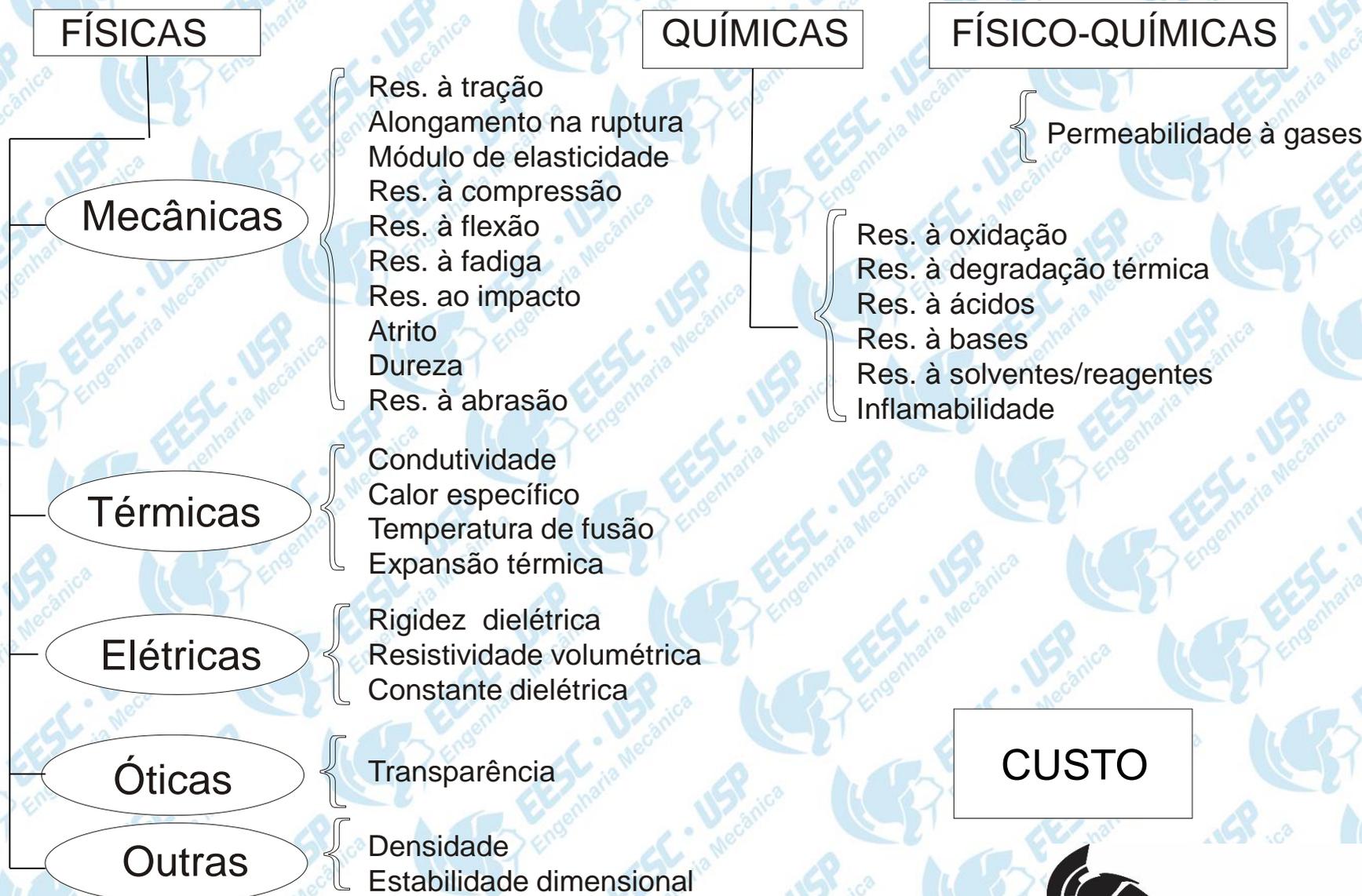


Compósito de fibra polimérica



Compósito de matriz polimérica

2.4. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS



Propriedades específicas do material:

- Mecânicas: Depende da microestrutura.
- Físicas: Independente da microestrutura.
- Químicas: Corrosão; depende da microestrutura e do meio.
- Biológicas: Biocompatibilidade e Bioadesão.

Propriedades específicas do produto

(Técnicas de fabricação):

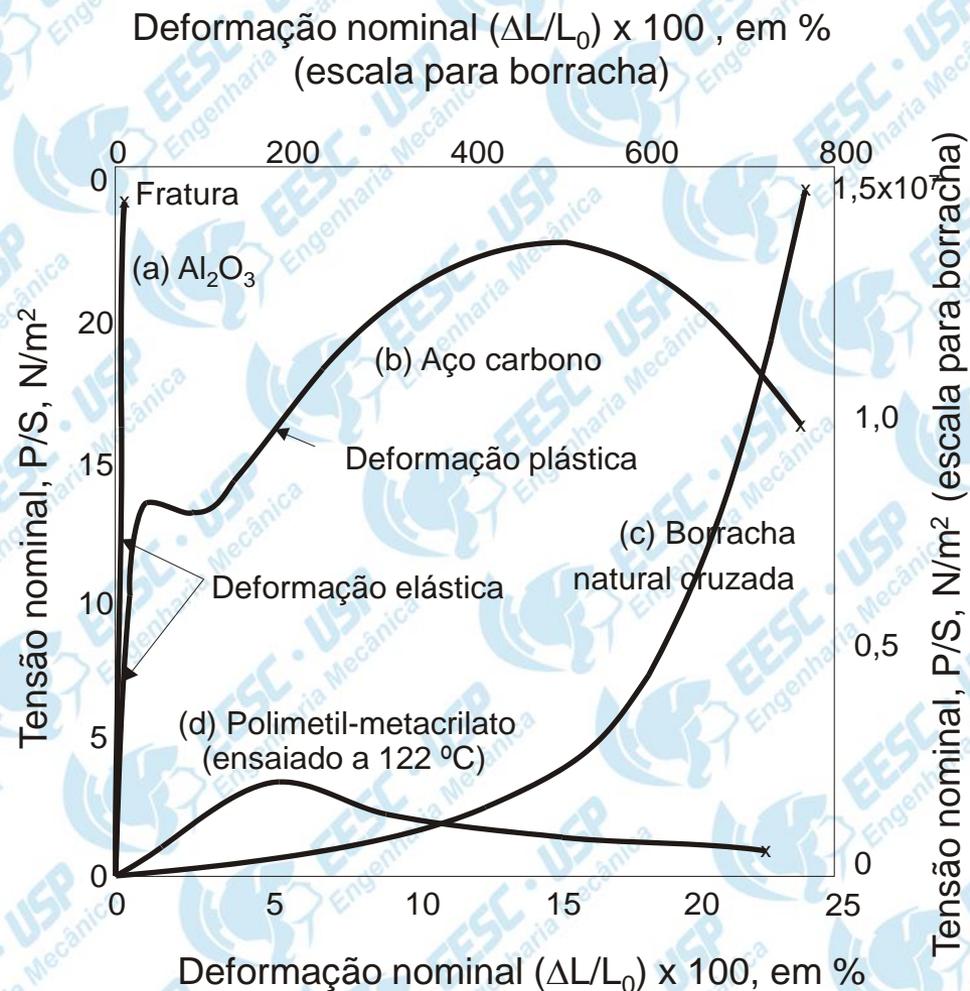
- Processo de fabricação: Primário / Secundário
- Custo
- Aparência
- Disponibilidade

Ensaio de Tração



Aplicada uma tensão no material, há uma deformação que é relativa à uma pequena variação que ocorre nos espaçamentos atômicos. A quantidade e o tipo de deformação é dependente da força das ligações atômicas do material, da tensão e da temperatura.

Metais puros apresentam elevado grau de ductilidade. Adição de elementos de liga pode reduzir a ductilidade até o ponto de os tornarem frágeis.



Tensão e Deformação

$$\sigma = \frac{P}{S_0}$$

P = força aplicada

S₀ = área inicial da seção transversal

Deformação específica, ou simplesmente deformação é a mudança de comprimento por unidade de comprimento.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l}$$

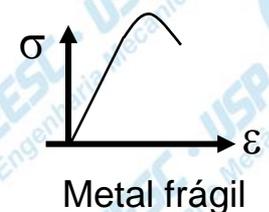
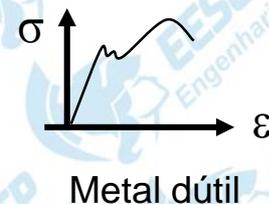
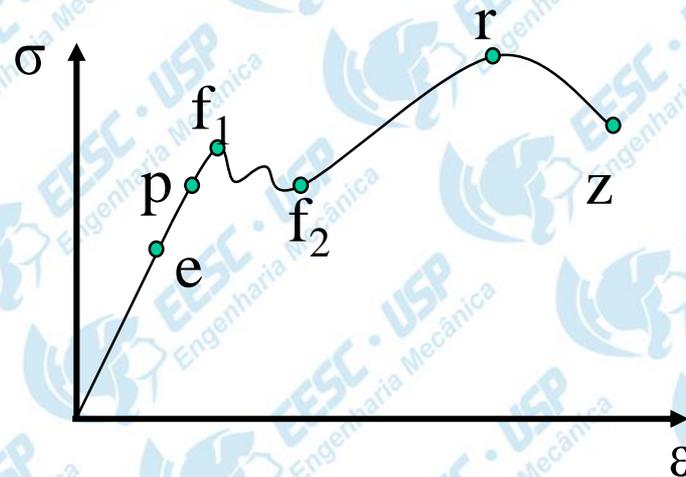
l₀ = comprimento inicial

l = comprimento sob a ação da força

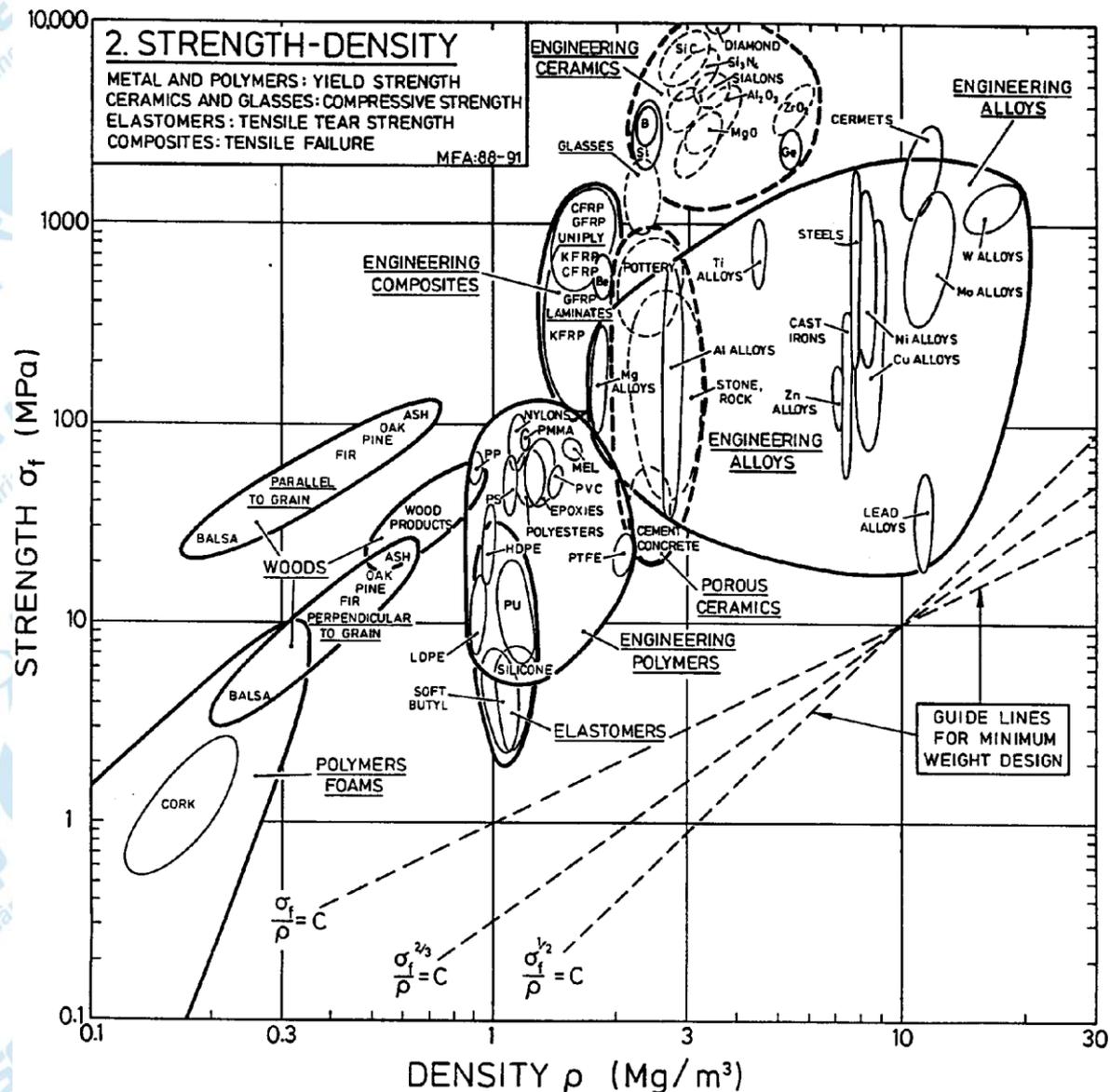
Pontos Notáveis do Ensaio de Ruptura à Tração

σ : tensão de engenharia = P/A_0

ε : deformação de engenharia = $\Delta l/l_0$



- e - fim da região linear
- p - fim da região elástica
- f_1, f_2 - região de escoamento
- r - ponto de máxima tensão (instabilidade \cong plástica)
- z - ruptura
- σ_E - tensão limite de elasticidade \cong (ε_E 0,03%)
- σ_p - tensão limite de proporcionalidade
- σ_e (σ_y) - tensão de escoamento (f_1 ou ε_e 0,2%)
- σ_R (σ_u) - tensão de ruptura.



Fonte: ASHBY, M.F. *Materials selection in mechanical design*. Editora Pergamon Press, 311p. 1992

Resistência à tração

Ou tração na ruptura é a carga aplicada no material por unidade de área, no momento da ruptura

Ferro fundido nodular,	480 a 930 MPa
Ferro fundido cinzento, classe 20	138 MPa
Aço fundido,	450 a 1380 MPa
Aço carbono comum,	414 a 1034 MPa
Polímeros	28 - 152 MPa
Titânio (cp)	σ_y 140 – σ_u 200 MPa*
Titânico Liga	σ_y 850 - σ_u 950 MPa*
Al ₂ O ₃ policristalina	400 MPa

* <http://www.matweb.com>

Aço carbonos : 1020 ~ 1050

Aços liga: Cr, Mn, Mo (86XX, 43XX)

Aço	σ_e [MPa]	σ_{Rt} [MPa]
1020	260	420 ~ 500
1030	300	500 ~ 600
1040	340	700 ~ 720
1050	370	700 ~ 850
8620	600	800 ~ 1100
8640	700	1000 ~ 1300
4320	650	900 ~ 1200
4340	700	900 ~ 1050

A fragilidade do aço (tanto aço liga como ao carbono) depende da porcentagem de carbono:

Até XX35 : dúctil

Acima XX40 : frágil

Propriedades de alguns Aços carbono x processamento

	1	2	3	4	5	6	7	8
	UNS nº	Nº SAE e/ou AISI	Proces- samento	Resistência à tração MPa (kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Redução em área, %	Dureza Brinell
HR – laminado a quente CD – repuxado a frio	G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
			CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
	G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
			CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
	G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27,5)	28	50	101
			CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
	G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
			CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
	G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
			CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
	G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37,5)	20	42	137
			CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
	G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39,5)	18	40	143
			CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
	G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
			CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
	G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
			CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
	G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49,5)	15	35	179
			CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
	G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
	G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61,5)	10	25	229
	G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Fonte: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

Fonte: SHIGLEY, JE, Projeto de engenharia mecânica, Ed. Bookman, 7ed, 2005, p.930

Elementos de Máquina (SEM 0241) – FORTULAN CA (2020)

Propriedades de Alguns aços Termotratados

1	2	3	4	5	6	7	8
AISI nº	Tratamento	Temperatura °C (°F)	Resistência à tração MPa (kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (kpsi)	Alongamento %	Redução em área, %	Dureza Brinell
1030	Q&T*	205 (400)	848 (123)	648 (94)	17	47	495
	Q&T*	315 (600)	800 (116)	621 (90)	19	53	401
	Q&T*	425 (800)	731 (106)	579 (84)	23	60	302
	Q&T*	540 (1000)	669 (97)	517 (75)	28	65	255
	Q&T*	650 (1200)	586 (85)	441 (64)	32	70	207
	Normalizado	925 (1700)	521 (75)	345 (50)	32	61	149
	Recozido	870 (1600)	430 (62)	317 (46)	35	64	137
1040	Q&T	205 (400)	779 (113)	593 (86)	19	48	262
	Q&T	425 (800)	758 (110)	552 (80)	21	54	241
	Q&T	650 (1200)	634 (92)	434 (63)	29	65	192
	Normalizado	900 (1650)	590 (86)	374 (54)	28	55	170
	Recozido	790 (1450)	519 (75)	353 (51)	30	57	149
1050	Q&T*	205 (400)	1120 (163)	807 (117)	9	27	514
	Q&T*	425 (800)	1090 (158)	793 (115)	13	36	444
	Q&T*	650 (1200)	717 (104)	538 (78)	28	65	235
	Normalizado	900 (1650)	748 (108)	427 (62)	20	39	217
	Recozido	790 (1450)	636 (92)	365 (53)	24	40	187
4140	Q&T	205 (400)	1770 (257)	1640 (238)	8	38	510
	Q&T	315 (600)	1550 (225)	1430 (208)	9	43	445
	Q&T	425 (800)	1250 (181)	1140 (165)	13	49	370
	Q&T	540 (1000)	951 (138)	834 (121)	18	58	285
	G&T	650 (1200)	758 (110)	655 (95)	22	63	230
	Normalizado	870 (1600)	1020 (148)	655 (95)	18	47	302
	Recozido	815 (1500)	655 (95)	417 (61)	26	57	197
	Q&T	315 (600)	1720 (250)	1590 (230)	10	40	486
4340	O&T	425 (800)	1470 (213)	1360 (198)	10	44	430
	Q&T	540 (1000)	1170 (170)	1080 (156)	13	51	360
	Q&T	650 (1200)	965 (140)	855 (124)	19	60	280

Fonte: ASM Metals Reference Book, 2d ed., American Society of Metal, Metals Park, Ohio, 1983.

* Temperado em banho de água

Propriedades de Alguns Metais

Número	Material	Condição	Resistência (tração)					Expoente m , resistência à deformação	Deformação de fratura ϵ_f
			Escoamento S_y MPa (kpsi)	Último S_{ur} MPa (kpsi)	Fratura σ_{fr} MPa (kpsi)	Coefficiente σ_{or} MPa (kpsi)			
1018	Aço	Recozido	220 (32,0)	341 (49,5)	628 (91,1) [†]	620 (90,0)	0,25	1,05	
1144	Aço	Recozido	358 (52,0)	646 (93,7)	898 (130) [†]	992 (144)	0,14	0,49	
1212	Aço	Laminado a quente	193 (28,0)	424 (61,5)	729 (106) [†]	758 (110)	0,24	0,85	
1045	Aço	Temperado e revenido a 600°F	1520 (220)	1580 (230)	2380 (345)	1880 (273) [†]	0,041	0,81	
4142	Aço	Temperado e revenido a 600°F	1720 (250)	1930 (210)	2340 (340)	1760 (255) [†]	0,048	0,43	
303	Aço inoxidável	Recozido	241 (35,0)	601 (87,3)	1520 (221) [†]	1410 (205)	0,51	1,16	
304	Aço inoxidável	Recozido	276 (40,0)	568 (82,4)	1600 (233) [†]	1270 (185)	0,45	1,67	
2011	Liga de alumínio	T6	169 (24,5)	324 (47,0)	325 (47,2) [†]	620 (90)	0,28	0,10	
2024	Liga de alumínio	14	296 (43,0)	446 (64,8)	533 (77,3) [†]	689 (100)	0,15	0,18	
7075	Liga de alumínio	T6	542 (78,6)	593 (86,0)	706 (102) [†]	882 (128)	0,13	0,18	

Fonte: J. Datsko, "Solid Materials," chap. 7 em Joseph E. Shigley e Charles R. Mischke (eds.-in-chief), *Standard Handbook of Machine Design*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1996, p. 7.47-7.50

* Valores de um ou dois tratamentos térmicos e que se acredita serem obtíveis usando especificações apropriadas de compra. A deformação de fratura pode variar tanto quanto 100%.

[†] Valor derivado.

Liga de titânio	Condição	Escoamento, S_y (0,2% de deformação) MPa (kpsi)	Resistência à tração, S_{ur} MPa (kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Dureza (Brinell ou Rockwell)
Ti-35A [†]	Recozido	210 (30)	275 (40)	30	135 HB
Ti-50A [†]	Recozido	310 (45)	380 (55)	25	215 HB
Ti-0,2 Pd	Recozido	280 (40)	340 (50)	28	200 HB
Ti-5 Al-2,5 Sn	Recozido	760 (110)	790 (115)	16	36 HRC
Ti-8 Al-1 Mo-1 V	Recozido	900 (130)	965 (140)	15	39 HRC
Ti-6 Al-6 V-2 Sn	Recozido	970 (140)	1030 (150)	14	38 HRC
Ti-6Al-4V	Recozido	900 (130)	830 (120)	14	36 HRC
Ti-13 V-11 Cr-3 Al	Solução + envelhecimento	1207 (175)	1276 (185)	8	40 HRC

[†] Titânio alfa comercializante puro.

Módulo de elasticidade, ou módulo de Young, ocorre na região elástica, sob ação de tensão de tração. Refere-se à tensão necessária para aumentar os espaçamentos atômicos. É uma medida da rigidez do material em sua região elástica e tem as mesmas unidades da tensão. Varia com a direção cristalográfica. Em materiais policristalinos apresenta valores intermediários.

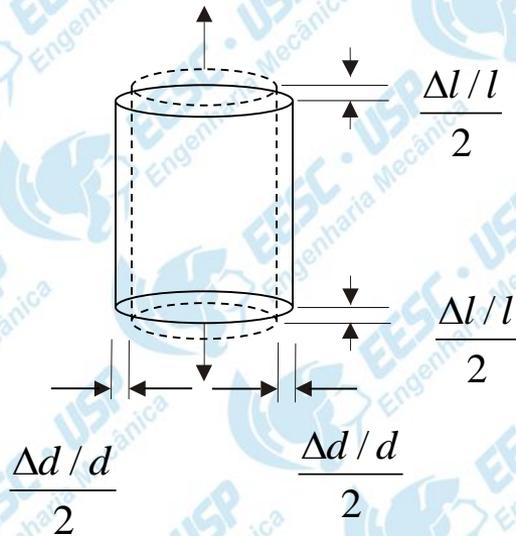
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Módulo Elástico Médio GPa

Borrachas.....	0,0035-3,5	PMMA.....	3,5	Nylon.....	2,8
Ligas de alumínio....	69	Superliga a base de Ni (IN-100)..	210	Alumínio	71,8
Latão, bronze	16	Ferro fundido cinzento	104	Ferro fundido dútil	166
Aço em geral	207	Ferro.....	197	Magnésio	44,8
Titânio	114			Aço inoxidável.....	190
Diamante.....	1035	Vidros em geral.....	69	Si ₃ N ₄	304
ZrO ₂ - t.....	210	SiO ₂ fundida.....	69	Al ₂ O ₃	380
Grafite.....	6,9			SiC.....	414

Coeficiente de Poisson

Aplicada uma tensão de tração em um corpo, o comprimento aumenta e a espessura diminui. A razão do decréscimo da espessura pelo aumento do comprimento é referenciada como coeficiente de Poisson.



$$\nu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l} = -\frac{\Delta d / d}{\Delta l / l} = -\frac{\Delta d \cdot l}{d \cdot \Delta l}$$

Material	Coeficiente de Poisson aproximado
Aços	0,25 - 0,30
Metais em geral	0,33
Alumínio	0,34
Cobre	0,35
Ferro	0,28
Magnésio	0,33
Titânio	0,34
SiC	0,14
MoSi ₂	0,17
Concreto	0,20
Si ₃ Ni ₄	0,24
Al ₂ O ₃	0,26

Módulo de elasticidade transversal

Ou módulo transversal, ou módulo de rigidez, é análogo ao modo elástico e é devido a ação da força de cisalhamento ou força cortante.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad \gamma = \text{distorção ou deformação angular}$$

Para materiais isotrópicos pode ser relacionado com o módulo elástico e com o coeficiente de Poisson.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Em um ensaio de torção

$$\tau = \frac{G \cdot r \cdot \theta}{l_0}$$

r = raio do corpo de prova

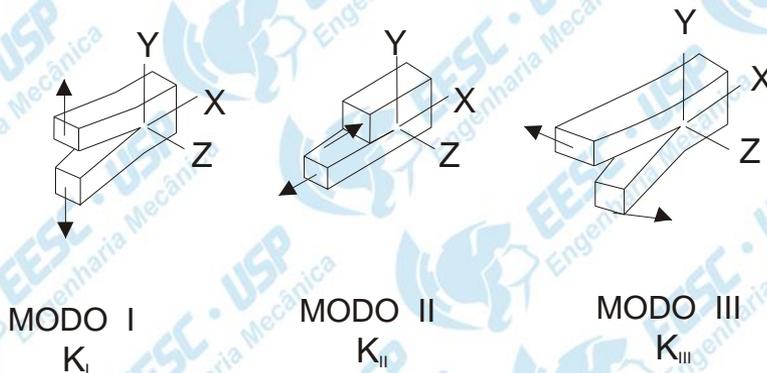
θ = rotação em radianos

l_0 = comprimento da medida

Tenacidade de fratura

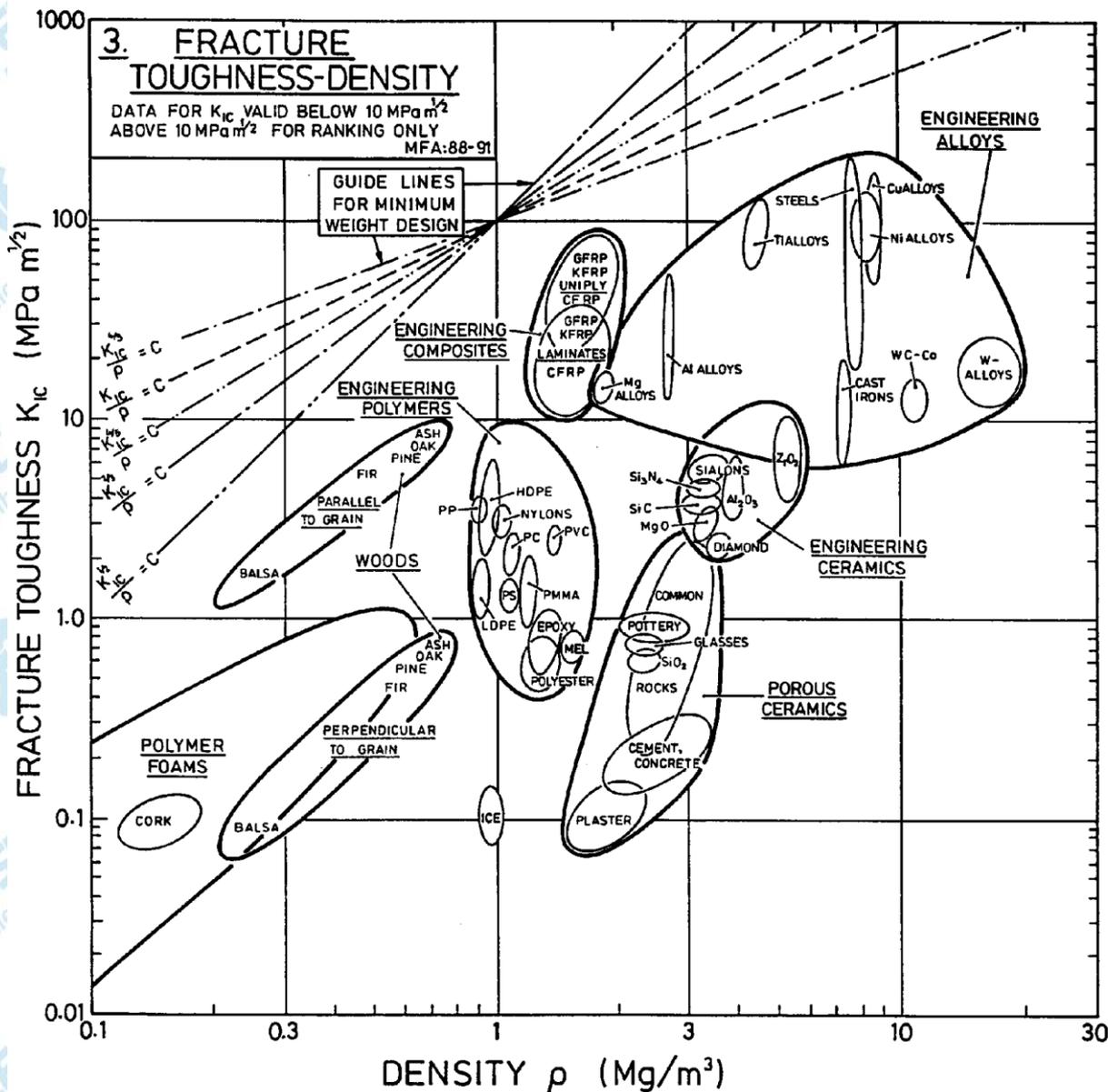
A resistência de fratura de um material é determinada pelo tamanho crítico de uma trinca. A fratura ocorre pelo deslocamento e tensão na ponta desta trinca.

Fatores de intensidade de tensão:



Quanto maior K_{IC} , maior será o defeito crítico admissível, ou seja, \rightarrow maior será o σ_f .

	σ_f (MPa)	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})
Aços liga para reatores	2000	200
PMMA		1,7
Si ₃ N ₄	600	5,0
Al ₂ O ₃	500	4,0
ZrO ₂ -c	180	2,4



Resistência à Fadiga

ou resistência à flexão dinâmica, exprime a tensão máxima desenvolvida alternadamente como tração e compressão, a que um material pode resistir quando a peça é exposta à flexões e a flexões consecutivas.

Resistência ao Impacto

Representa a tenacidade ou a resistência de um material rígido à deformação a uma velocidade muito alta.

Polímeros, como o LDPE, apresentam boa resistência. Plásticos de engenharia chegam a superar o alumínio.

Cerâmicas em geral tendem a ser frágeis.

Metais são materiais tenazes.

Dureza

Mede a resistência à penetração, ou ao risco. Os materiais poliméricos são menos duros que os materiais cerâmicos, vítreos e metálicos.

Materiais	dureza RB	Materiais	dureza RC	Materiais	dureza Vickers kgf/mm ²
Latão	30	SAE 1040	22	Alumina	2370
UHMWPE	30	SAE 4340	52	BeO	1140
Titânio (cp)	70	VC 131	69	NaCl	21
		Titânio Ti6Al4V	36	Diamante	9000
				Sílica fundida	540
				Titânio (cp)	60
				Titânio Ti6Al4V	349

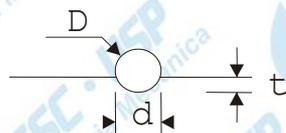
Medidas de dureza

ENSAIO

IMPRESSÃO

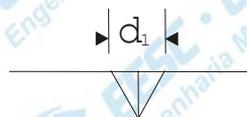
MATERIAIS

BRINELL



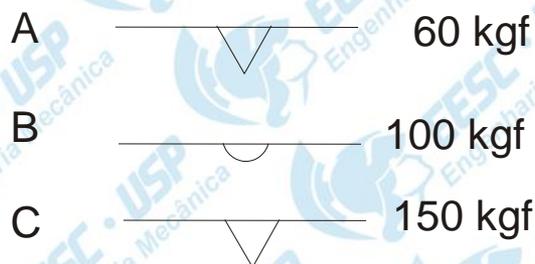
Para metais em geral

VICKERS



Metais duros, cerâmica

ROCKWELL



Metais dúcteis e duros

Metais dúcteis

Metais duros

DUREZA SHORE

Durômetro tipo A

Polímeros mais flexíveis

Durômetro tipo D

Polímeros mais rígidos

Resistência à abrasão

Significa a capacidade que um material tem de resistir ao desgaste produzido pelo atrito.

MATERIAIS

Coeficientes de atrito

PTFE - PTFE

 μ_e

0,04

PTFE - AÇO

0,04

GRAFITE - GRAFITE

0,1

GRAFITE - AÇO

0,1

POLIETILENO-POLIETILENO

0,2

NYLON - NYLON

0,2

POLIETILENO - AÇO

0,2

CROMO - CROMO

0,4

AÇO - AÇO

0,8

VIDRO - AÇO

0,6

VIDRO - VIDRO

0,6

ALUMINA - ALUMINA *

0,5 - 0,7

Densidade, ou densidade absoluta ou massa por unidade de volume.

Para os metais, as densidades variam na faixa de 1,7 a 21 g/cm³.

A maior parte dos polímeros apresenta densidade na faixa 0,9 - 1,15 g/cm³, com a maior concentração de valores em torno de 1, para eles reflete a sua estrutura química e a sua organização molecular. Assim, as regiões cristalinas são mais compactas que as regiões amorfas.

As cerâmicas ocupam valores intermediários.

Aço	7,8 a 8,1	g/cm ³	PA 6.6 (Nylon)	1,13 a 1,15	g/cm ³
Titânio	4,4	g/cm ³	PC	1,2	g/cm ³
Magnésio	1,7	g/cm ³	PTFE	2,13 a 2,20	g/cm ³
Alumínio	2,7	g/cm ³	HDPE	0,94 a 0,97	g/cm ³
Al ₂ O ₃	3,8 a 3,99	g/cm ³	Vidro de Janela	2,5	g/cm ³

Expansão térmica, variações na temperatura provocam deformações dos materiais. Em materiais isotrópicos homogêneos uma variação de ΔT K ($^{\circ}$ C) causa a deformação expressa por:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot \Delta T$$

α = coeficiente de expansão térmica

Para materiais isotrópicos a ΔT não causa deformações angulares.

ABNT 1045,	20-250 $^{\circ}$ C	13,0x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
ABNT 4340,	20-100 $^{\circ}$ C	11,5x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
ABNT 8620,	20-100 $^{\circ}$ C	11,6x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
ABNT 304,	20-200 $^{\circ}$ C	17,1x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Fofo cinzento	37,8-548 $^{\circ}$ C	12,7x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Ligas de alumínio – geral –	20-250 $^{\circ}$ C	25,0 x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Ligas de titânio – geral-	20-250 $^{\circ}$ C	9,2x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Al ₂ O ₃ 99,9%	20-400 $^{\circ}$ C	7,4x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C
Nylon 6.6	10-100 $^{\circ}$ C	100x10 $^{-6}$ m/m. $^{\circ}$ C

2.5. Referências

- Callister, WD.Jr. *Materials science and engineering: an introduction*. Ed. John Wiley & Sons, Inc. Ed.3, 811p, 1994.
- Shigley, JE; Mitchell, LD. *Projeto de Engenharia Mecânica*, 7th ed., Bookman, Porto Alegre 2005
- Ashby MF. *Materials selection in mechanical design*. Editora Pergamon Press, 311p. 1992
- Guy AG. *Ciência dos materiais*. Tradução: Silva JRG. LTC/EDUSP. São Paulo, 1980.
- Mano EB. *Polímeros como materiais de Engenharia*. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1991.
- <http://www.matweb.com>
- <http://www.webelements.com>
- ASTM C373-88 (reapproved 1999) –Water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products.
- ASTM G 99 - 90. Standard test method for wear testing with a pin-on-disc apparatus, 5p, 1990.