



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Mestrado de Engenharia de Estruturas

Comportamento de Materiais Estruturais

Comportamento de Blocos de Elastómero (*Borrachas*)

Luís Guerreiro

Abril 2003

BORRACHA : Termo utilizado numa forma corrente para designar um vasto conjunto de materiais que abrange desde produtos naturais até produtos manufacturados. Na sua origem o termo designava somente o produto natural, mas com o aparecimento de produtos sintéticos substitutos da borracha natural, esta palavra passou a ser utilizada também na designação destes produtos artificiais. Mais correcto será utilizar a designação “elastómero”.

ELASTÓMERO : Material com comportamento semelhante à borracha ou seja, baixa fluência plástica, grande extensibilidade, e capacidade de recuperar rapidamente a forma original após estar sujeito a grandes deformações. Os elastómeros são polímeros.

POLÍMEROS : Materiais compostos por grandes cadeias moleculares (macromoléculas).

Matérias primas para a produção de Elastômeros

Borracha
natural

Latex de
borracha natural



Hevea Brasiliensis

Borracha
sintética

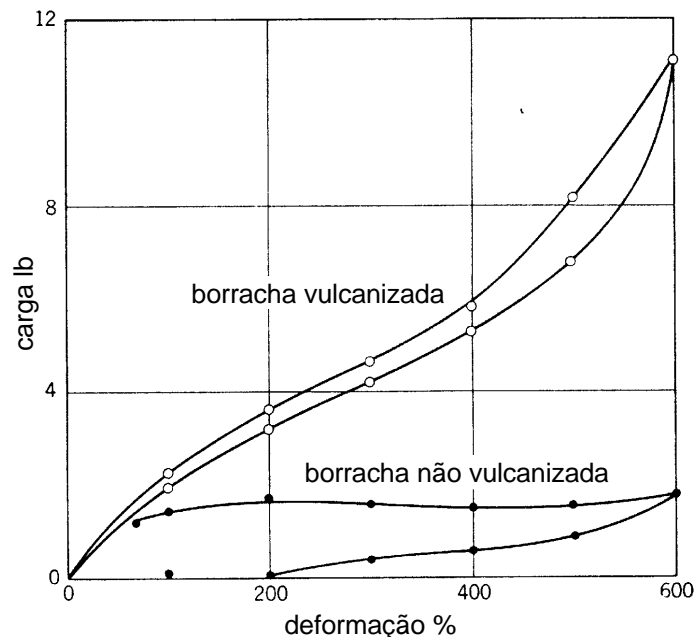
Produtos derivados do petróleo

Produtos derivados do gás natural



Produção de Elastómeros

VULCANIZAÇÃO : Operação através da qual são criadas ligações entre as macromoléculas de um elastômero. Desta forma o elastômero, que à partida se apresenta como uma massa fraca, muito plástica e sem propriedades mecânicas de interesse seja transformado num produto forte, resistente e com boas características elásticas. A vulcanização foi descoberta em 1839 por Goodyear, que aplicou esta técnica à borracha natural, utilizando como agente de vulcanização o enxofre. Esta operação pode ser realizada a quente ou a frio.



Curvas Força-Deformação típicas de borracha **vulcanizada** e **não vulcanizada**. (Adaptado de Billmeyer, 1971)

ADITIVOS PARA REFORÇO : Produtos que melhoram as propriedades mecânicas do elastômero como a rigidez, a resistência à tracção, a resistência à rasgadura ou a resistência à abrasão. Sem a utilização destes aditivos não seria possível a utilização de elastômeros em pneus, por exemplo.

NEGRO DE FUMO: O “negro de fumo” (*carbon black*) é o aditivo de reforço mais importante para a maioria dos elastômeros. Outros exemplos são a sílica ou silicatos.

Embora o negro de fumo melhore as propriedades mecânicas da maioria dos elastômeros, no neoprene não tem efeito especial sobre a resistência à tracção.

Quantidades crescentes de negro de fumo conduzem a uma melhoria crescente das propriedades até se atingir um máximo. O tipo e a dimensão das partículas do aditivo de reforço são parâmetros importantes na obtenção das propriedades pretendidas.

TABELA 1 - Alguns elastómeros comerciais

Designação (ASTM)	Designação comum	Composição Química
NR	Borracha Natural	Poli-isoprene natural
IR	Isoprene	Poli-isoprene sintético
BR	<i>Polybutadiene</i>	<i>Polybutadiene</i>
IIR	<i>Butyl</i>	Copolímero de <i>isobutylene</i> e isoprene
CR	Neoprene	Policloroprene

TABELA 2 - Comparação das propriedades da Borracha e do Neoprene

Propriedade	Borracha Natural	Neoprene
Resistência à tracção	<i>Excelente</i>	<i>Boa</i>
Alongamento	<i>Excelente</i>	<i>Boa</i>
Resiliência	<i>Excelente</i>	<i>Boa</i>
Envelhecimento natural	<i>Boa</i>	<i>Excelente</i>
Resistência ao ozono	<i>Fraca</i>	<i>Excelente</i>
Resistência à luz solar	<i>Fraca</i>	<i>Excelente</i>
Envelhecimento com o calor	<i>Fraca</i>	<i>Boa</i>
Estabilidade térmica	<i>Má</i>	<i>Boa</i>
Comportamento a baixas temperaturas	<i>Boa</i>	<i>Fraca</i>
Fluência	<i>Fraca</i>	<i>Fraca</i>
Relaxação	<i>Fraca</i>	<i>Fraca</i>
Permeabilidade ao ar	<i>Fraca</i>	<i>Boa</i>
Resistência a óleos lubrificantes	<i>Má</i>	<i>Boa</i>

Adaptado de Mantell (1958)

Propriedades típicas dos elastómeros

- Grande deformabilidade

alguns elastómeros podem atingir deformações de 1000% sem rotura e recuperar a forma original

- Baixo Módulo de Elasticidade

permite atingir grandes deformações mesmo com tensões baixas

- Grande capacidade de acumular energia

a sua grande capacidade de recuperação após grande deformação permite acumular mais energia do que qualquer outro material

- Aumento da rigidez com a descida da temperatura

- Envelhecimento

as propriedades do elastómero alteram-se com o tempo essencialmente devido a fenómenos de oxidação. A correcta escolha da composição do elastómero pode minorar este efeito.

Factores que também contribuem para o envelhecimento dos elastómeros são:

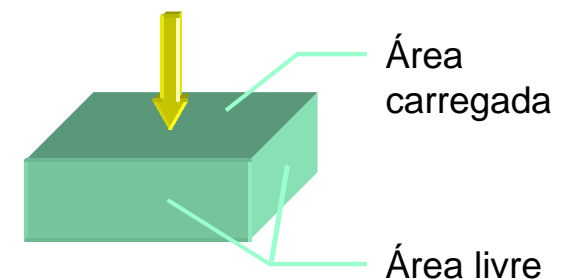
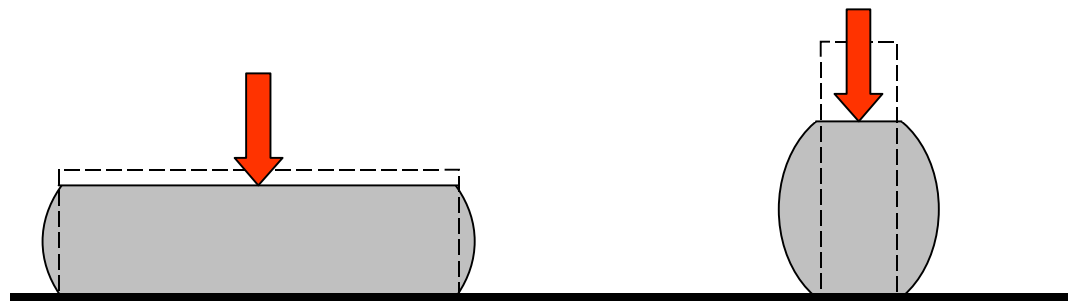
- ◆ exposição à luz solar ou a raios ultra-violeta;
- ◆ exposição a grandes concentrações de ozono (em especial quando sujeitos a tensão);
- ◆ exposição a altas temperaturas;
- ◆ contacto com óleos.

Propriedades mecânicas dos elastômeros

Os elastômeros são substâncias quase incompressíveis que se deformam mais por alteração da forma do que pela variação de volume.

O seu coeficiente de Poisson é aproximadamente igual a 0.5.

A relação tensão-deformação dum bloco de elastômero depende muito da forma do provete utilizado. Se o provete for baixo e com uma grande secção transversal, a sua rigidez será muito maior do que seria se a relação entre a altura e a secção transversal fosse elevada. A rigidez do bloco depende muito da sua capacidade de deformação lateral.



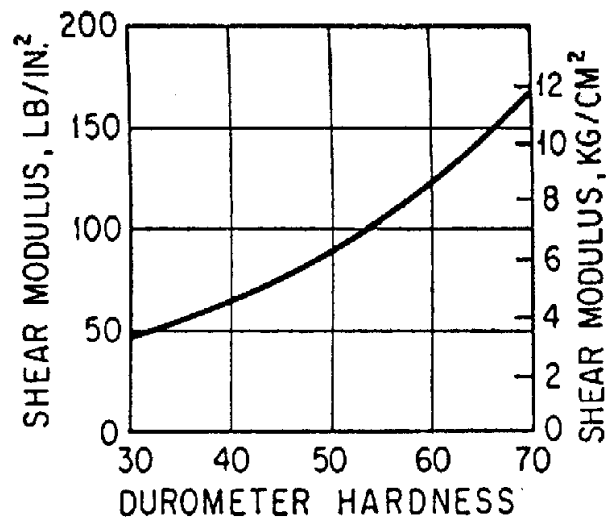
$$\text{Factor de Forma} = (\text{Área carregada})/(\text{Área livre})$$

Propriedades mecânicas dos elastômeros

1- Dureza

Para que se possa fazer uma classificação da rigidez dum determinado elastômero, qualquer que seja a forma do bloco em que ele se apresenta, é necessário utilizar outra característica, a **dureza**. A dureza pode ser medida através dum aparelho (“*durómetro*”) que mede a força necessária para fazer uma pequena punção na superfície do elastômero a classificar.

A dureza do elastômero não é uma grandeza importante só por si. Só tem interesse como um indicador da rigidez do composto, com a vantagem da sua medida não depender da forma do bloco de elastômero.



Relação entre o **Módulo de Distorção (G)** e a **dureza**, válida para pequenas deformações.
(Adaptado de Harris, 1997)

2 - Rigidez Vertical

A deformação vertical dum a lâmina de elastómero resulta da soma de duas componentes de deformação de origem distinta. Uma primeira parcela é devida à deformação da lâmina por distorção ($K_v(\gamma)$), enquanto a outra componente resulta da variação de volume da camada de elastómero ($K_v(\nu)$). Assumindo que a deformação total é a soma das duas componentes de deformação, obtém-se a seguinte expressão para o cálculo da rigidez vertical:

$$K_v = \frac{K_v(\gamma) K_v(\nu)}{K_v(\gamma) + K_v(\nu)}$$

$$K_v(\gamma) = \beta_2 \frac{G S^2 A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez vertical devida à distorção})$$

$$K_v(\nu) = \frac{E_b A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez por variação de volume})$$

2 - Rigidez Vertical (cont.)

$$K_v(\gamma) = \beta_2 \frac{G S^2 A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez vertical devida à distorção})$$

$$K_v(v) = \frac{E_b A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez por variação de volume})$$

com,

E_b - módulo de compressibilidade do elastómero ($E_b \sim 2000$ MPa);

G - módulo de distorção do elastómero ($G \sim 0.7$ a 2.0 MPa);

β_2 - coeficiente que depende da forma da secção:

β_2	(Kelly, 1993)	(CEN/TC 167, 2001)
bloco com secção circular	6	5
bloco com secção quadrada	6.73	5

2 - Rigidez Vertical (cont.)

A deformação vertical de um conjunto de lâminas de elastômero pode ser calculada a partir da rigidez vertical de cada uma das camadas K_{vi} :

$$K_v = \frac{l}{\sum \frac{l}{K_{vi}}} \quad (\text{rigidez vertical de um conjunto de camadas})$$

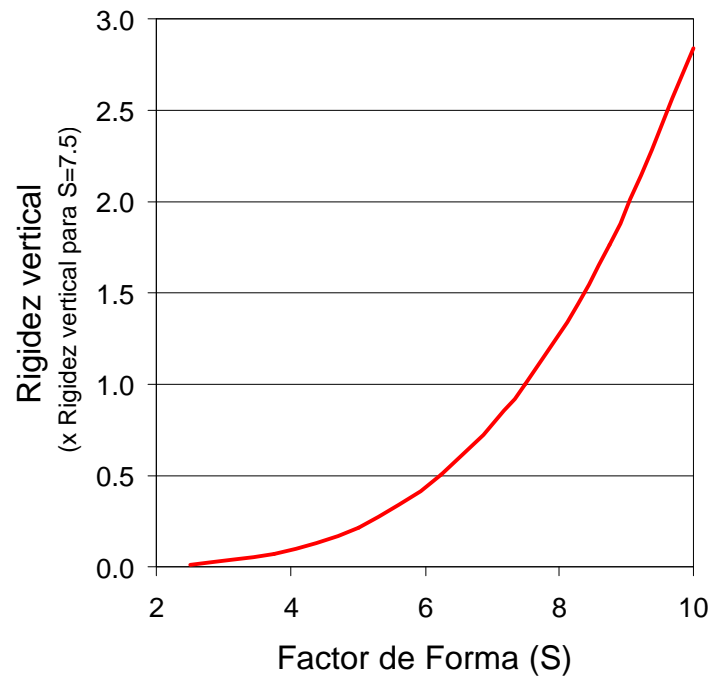
Se as camadas forem todas iguais, a expressão anterior pode ser simplificada tomando a seguinte forma:

$$K_v = \frac{K_{vi}}{n}$$

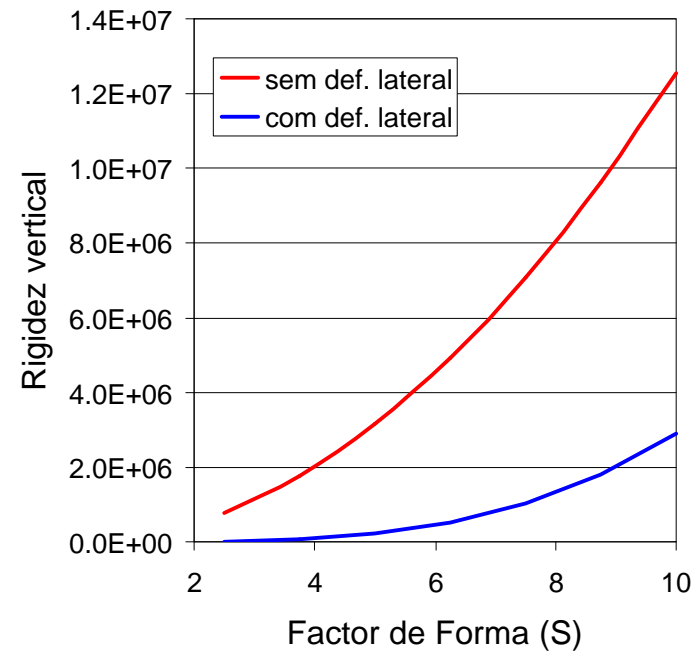
sendo n o número de camadas.

2 - Rigidez Vertical (cont.)

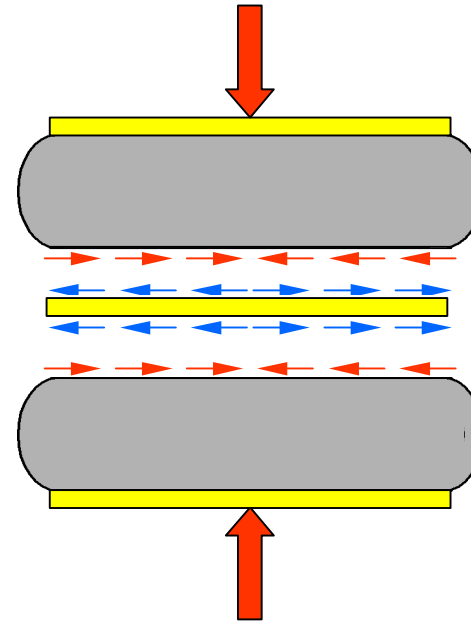
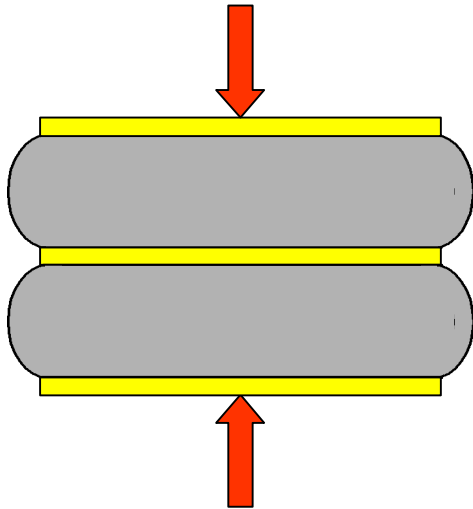
Influência do Factor de Forma (S) na rigidez dum camada de elastómero



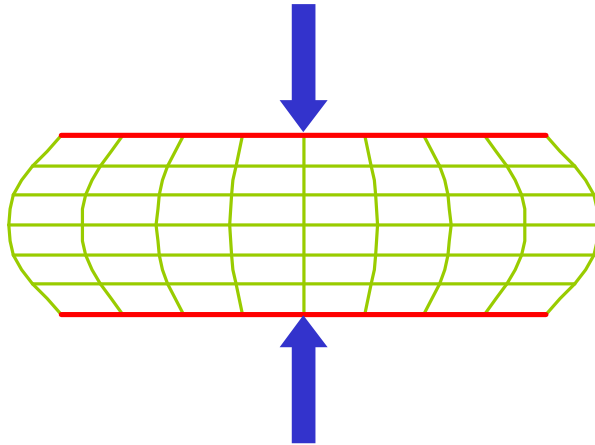
Influência da deformação lateral na rigidez dum camada de elastómero



2 - Rigidez Vertical (cont.)



2 - Rigidez Vertical (cont.)



3 - Rigidez Horizontal

No caso de blocos de elastómero cintado, o valor da rigidez do conjunto pode ser calculado a partir do valor do módulo de distorção (G) do elastómero que o constitui. Como o bloco é constituído pela justaposição de camadas de elastómero, a deformação horizontal do conjunto é o somatório das deformações individuais de cada camada. Por seu lado, a deformação de cada camada, devido à sua pequena espessura, é essencialmente por corte. Desta forma a relação entre a rigidez do bloco e o módulo de distorção obedece à seguinte expressão:

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}}$$

G - módulo de distorção;

A - área em planta do bloco;

h_{el} - altura total em elastómero (somatório das espessuras das várias camadas).

3 - Rigidez Horizontal (cont.)

Se a carga vertical sobre o bloco for próxima da carga crítica (N_{cr}), então a rigidez horizontal do bloco deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}} \left(1 - \frac{N^2 h_{el}}{G A h_T N_E} \right)$$

em que,

G - módulo de distorção;

A - área em planta do bloco;

h_{el} - altura total de elastómero (somatório das várias camadas);

h_T - altura total do bloco;

N - carga vertical sobre o bloco;

N_E - carga vertical de Euler.

3 - Rigidez Horizontal (cont.)

A carga vertical de Euler pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$N_E = \beta_I \pi^2 \frac{G S^2 I}{h_T h_{el}}$$

sendo,

S - factor de forma da secção, obtido pela relação entre a área carregada e a área livre de carga do bloco, considerando somente a altura total de elastómero:

bloco com secção circular de diâmetro ϕ - $S = \frac{\phi}{4 t}$

bloco com secção rectangular (a x b) - $S = \frac{a b}{2 (a + b) t}$

I - momento de inércia da secção.

t - espessura duma camada de elastómero.

β_I - coeficiente definido em função da forma do bloco:

bloco com secção circular - $\beta_I = 2$

bloco com secção quadrada - $\beta_I = 2.214$

4 - Rigidez à Rotação

Rigidez à rotação é a relação entre momentos e rotações em torno de um eixo horizontal, paralelo a uma das faces no caso de blocos rectangulares, ou em qualquer direcção para os blocos de secção circular. Esta rigidez pode ser calculada através das seguintes expressões:

$$K_{\theta} = \frac{G a^5 b}{n t^3 \beta_3} \quad (\text{secção rectangular})$$

$$K_{\theta} = \frac{G \phi^6 \pi}{n t^3 512} \quad (\text{secção circular})$$

sendo,

- n - número de camadas de elastómero;
- β_3 - constante definida em função da relação (b/a) (ver Quadro);
- a, b - dimensões em planta dos blocos de secção rectangular (b refere-se à direcção paralela ao eixo em torno do qual se considera a rotação).

4 - Rigidez à Rotação (cont.)

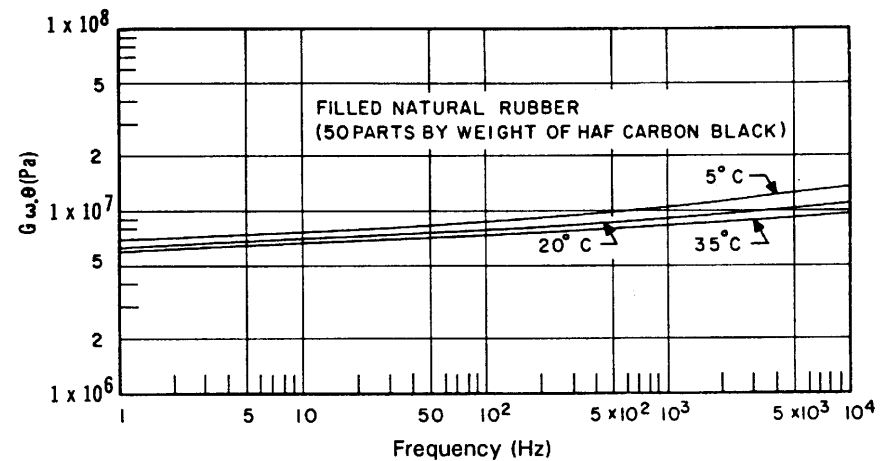
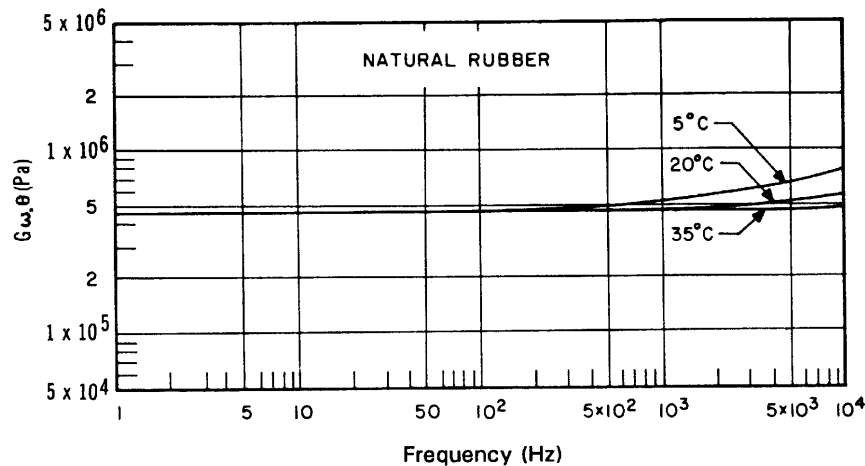
Quadro - Valores da variável β_3 (CEN, 1993).

a/b	β_3		a/b	β_3
0.50	137.0		1.60	74.1
0.75	100.0		1.70	73.1
1.00	86.2		1.80	72.2
1.20	80.4		1.90	71.5
1.25	79.3		2.00	70.8
1.30	78.4		2.50	68.3
1.40	76.7		10.0	61.9
1.50	75.3		∞	60.0

Propriedades dinâmicas dos elastômeros

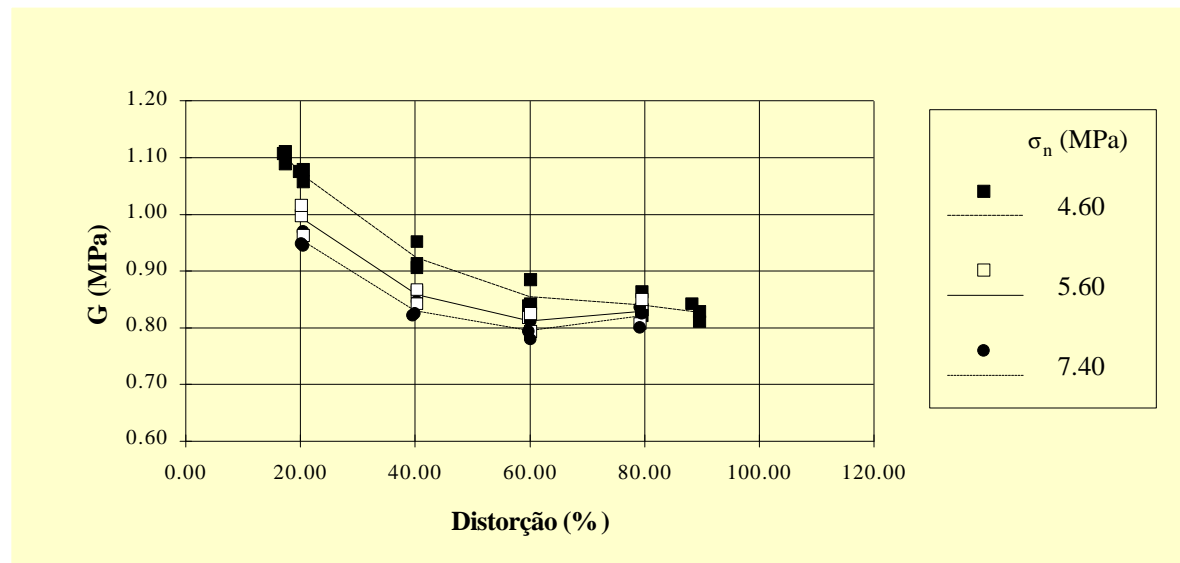
1- Influência da frequência no valor de G

Os elastômeros não são perfeitamente elásticos, apresentam algum amortecimento interno e a rigidez tem tendência a aumentar quando a frequência de deformação aumenta. Esta última característica só é aparente para frequências de deformação muito superiores às que ocorrem em aparelhos de apoio de estruturas.



Influência da frequência no Módulo de Distorção (G) do elastômero.
(Adaptado de Kelly, 1993)

2 - Influência do nível de deformação no valor de G



Para valores de distorção inferiores a 100% verifica-se uma diminuição do valor de G com a distorção. Esta diminuição é mais acentuada para valores de distorção inferiores a 50%.

Para grandes valores de distorção (> a 300%) volta a registrar-se um aumento da rigidez.

3 - Influência do esforço normal no valor de G

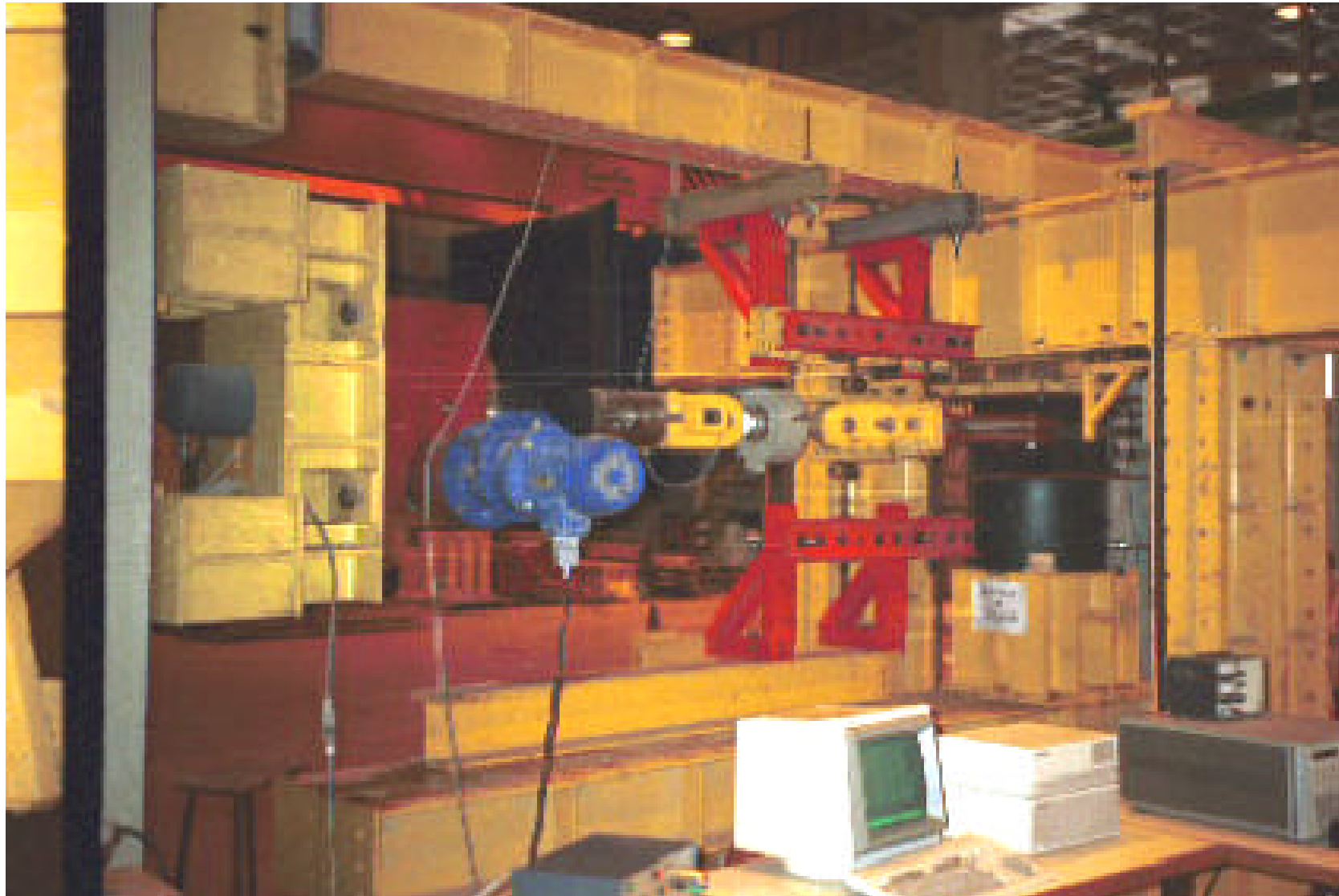
A influência do esforço normal no valor de G é desprezável



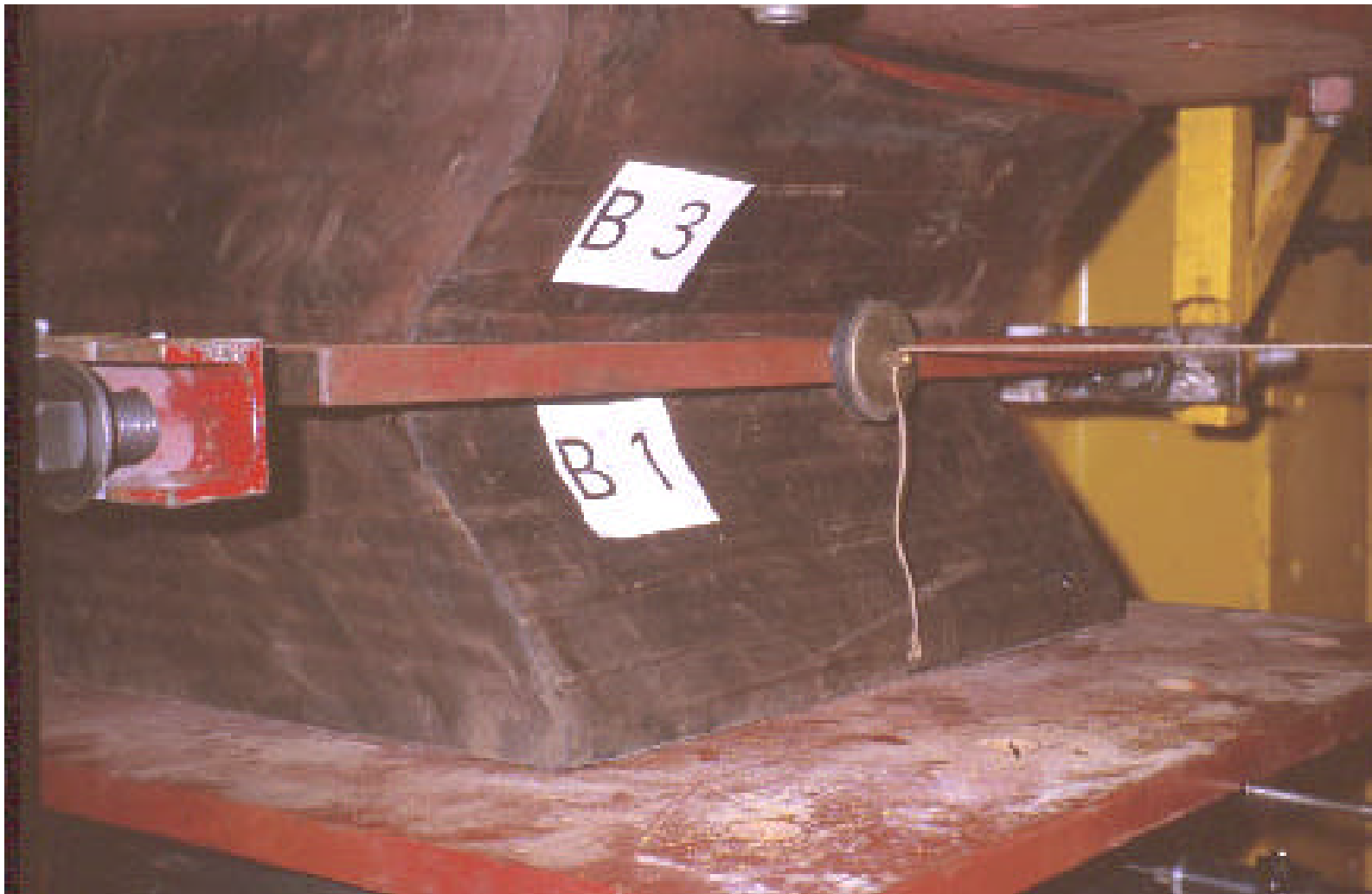
Bloco de Elastómero Cintado



Bloco de Elastómero Cintado (Corte)



Montagem para ensaio de blocos de elastômero



Ensaio de bloco de elastómero (Pormenor)



Bloco de Elastómero Cintado (Pormenor)



Bloco de Elastómero Cintado (Pormenor)

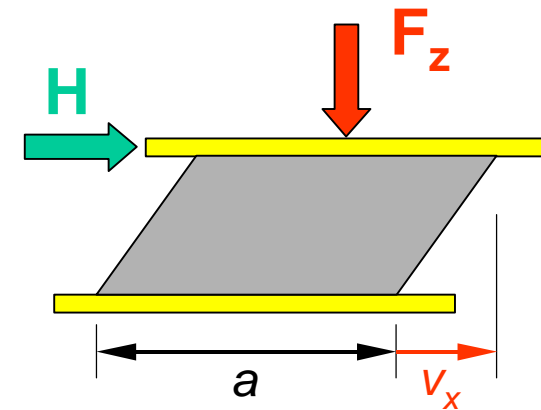
Máxima distorção:

$$e_{t,d} = e_{c,d} + e_{q,d} + e_{a,d}$$

$\epsilon_{c,d}$ – distorção devido às cargas de compressão

$\epsilon_{q,d}$ – distorção devido aos movimentos horizontais

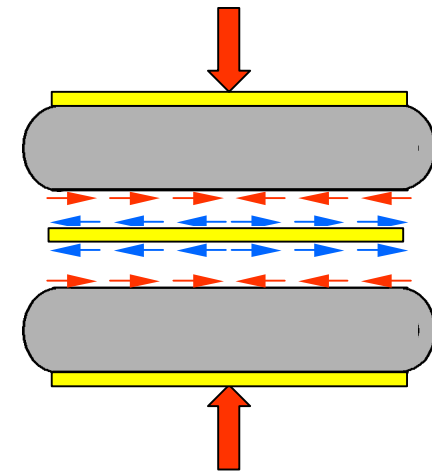
$\epsilon_{\alpha,d}$ – distorção devido à rotação



$$e_{t,d} < 5$$

$$e_{c,d} = \frac{1.5 F_{z,d}}{G A_r S}$$

$$A_r = A \left(1 - \frac{V_{x,d}}{a} - \frac{V_{y,d}}{b} \right)$$



$$\varepsilon_{q,d} = \frac{V_{xy,d}}{T_q} \quad \varepsilon_{q,d} < 0.7$$

$V_{xy,d}$ – máximo deslocamento horizontal

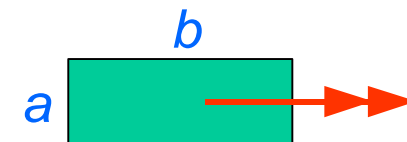
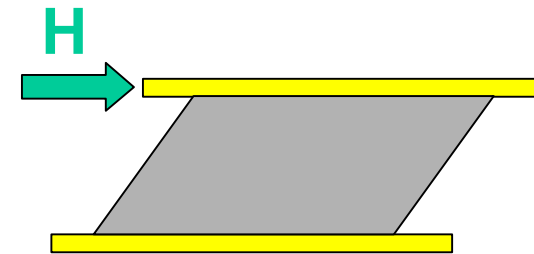
t_q – espessura total de elastómero

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a^2 \alpha_{a,d} + b^2 \alpha_{b,d}) t_i}{2 \Sigma (t_i^3)}$$

$\alpha_{a,d}$ – ângulo de rotação ao longo de **a**

$\alpha_{b,d}$ – ângulo de rotação ao longo de **b**

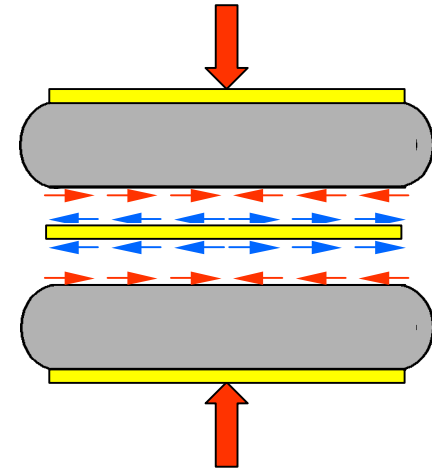
t_i – espessura de cada camada de elastómero



Chapas de reforço:

$$t_s = \frac{K_p F_{z,d} (t_1 + t_2) \gamma_m \gamma_f}{A_r f_y}$$

$t_s \geq 2\text{mm}$



t_1 e t_2 – espessura de elastómero de cada lado da chapa de aço

f_y – tensão de cedência do aço

γ_m – Factor de segurança parcial

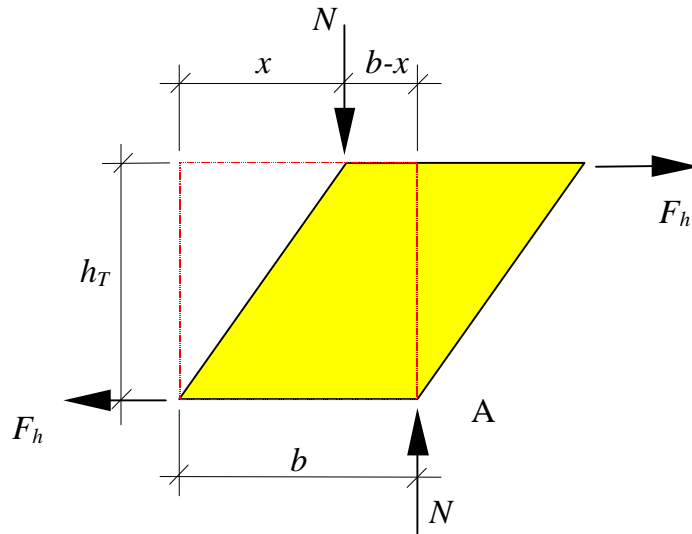
$\gamma_m = 1$ (sem buracos)

$\gamma_m = 2$ (com buracos)

γ_f – factor de segurança parcial ($\gamma_f = 1$)

K_p – factor de correcção ($K_p = 1.3$)

Verificação da estabilidade ao rolamento



$$F_h = K_h x_{max}$$

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A}$$

$$N (b - x_{max}) = h_T F_h \quad \Rightarrow$$

$$\frac{x_{max}}{b} = \frac{1}{1 + \frac{G h_T}{\sigma_N h_{el}}}$$

Propriedades do Material

1 - Geral.

O elastômero utilizado no fabrico dos blocos de apoio deve ser a borracha natural (NR - natural rubber) ou o Cloroprene (CR), também conhecido como neoprene. No processo de fabrico pode ainda ser utilizado outro polímero desde que a percentagem deste material não ultrapasse 5% da mistura.

A composição de NR ou CR no composto dever ser no mínimo:

60% do peso para blocos de apoio com $G=0.7$ MPa

55% “ “ “ “ “ “ “ “ $G=0.9$ Mpa

50% “ “ “ “ “ “ “ “ $G=1.15$ MPa

Nota - Os blocos de borracha natural podem ser revestidos por uma camada de policloroprene.

Propriedades Físicas e Mecânicas dos Elastômeros

Characteristics	Requirements			Test Methods
	0.7	0.9	1.15	
G. Modulus (MPa)	0.7	0.9	1.15	
Tensile strength (MPa)				
Moulded Test Piece	≥ 16	≥ 16	≥ 16	ISO 37 (1994)
Test Piece from Bearing	≥ 14	≥ 14	≥ 14	ISO 37 (1977) type 2
Minimum Elongation at break (%)				
Moulded Test Piece	450	425	300	
Test Piece from Bearing	400	375	250	
Minimum Tear Resistance (kN/m)				ISO 34 1 (1994)
CR	≥ 7	≥ 10	≥ 12	ISO 34 (1979) Trouser (Method A)
NR	≥ 5	≥ 8	≥ 10	
Compression Set (%) 24 h ; 70°C		CR ≤ 15 NR ≤ 30		ISO 815 (1991) ISO 815 (1972) φ29 x 12.5 mm Spacer 9.38 25 %

(adaptado de CEN/TC 167/WG) (versão de 2001)

Propriedades
Físicas e
Mecânicas dos
Elastômeros

(cont.)

Characteristics	Requirements	Test Methods
<p>Accelerated Ageing Maximum change from unaged value</p> <p>- <u>Hardness</u> (IRHD) NR 7 d, 70°C CR 3 d, 100°C</p> <p>- <u>Tensile strength</u> (%) NR 7 d, 70°C CR 3 d, 100°C</p> <p>- <u>Elongation at break</u> (%) NR 7 d, 70°C CR 3 d, 100°C</p>	<p>- 5 +10 ± 5</p> <p>± 15 ± 15</p> <p>± 25 ± 25</p>	<p>ISO 188 (1998)</p> <p>ISO 188 (1982)</p>
<p>Ozone Resistance <u>Elongation</u> : 30 % - 96 h 40°C ± 2°C NR 25 pphm CR 100 pphm*</p>	<p>No cracks</p>	<p>ISO 1431-1 (1989)</p> <p>ISO 1431 (1980)</p>

(adaptado de CEN/TC 167/WG) (versão de 2001)

Exemplo de Caderno de Encargos para neoprene em juntas e aparelhos de apoio

Composição:

- Policloroprene > 60%
- Negro de Fumo < 25%
- Aditivos < 15%

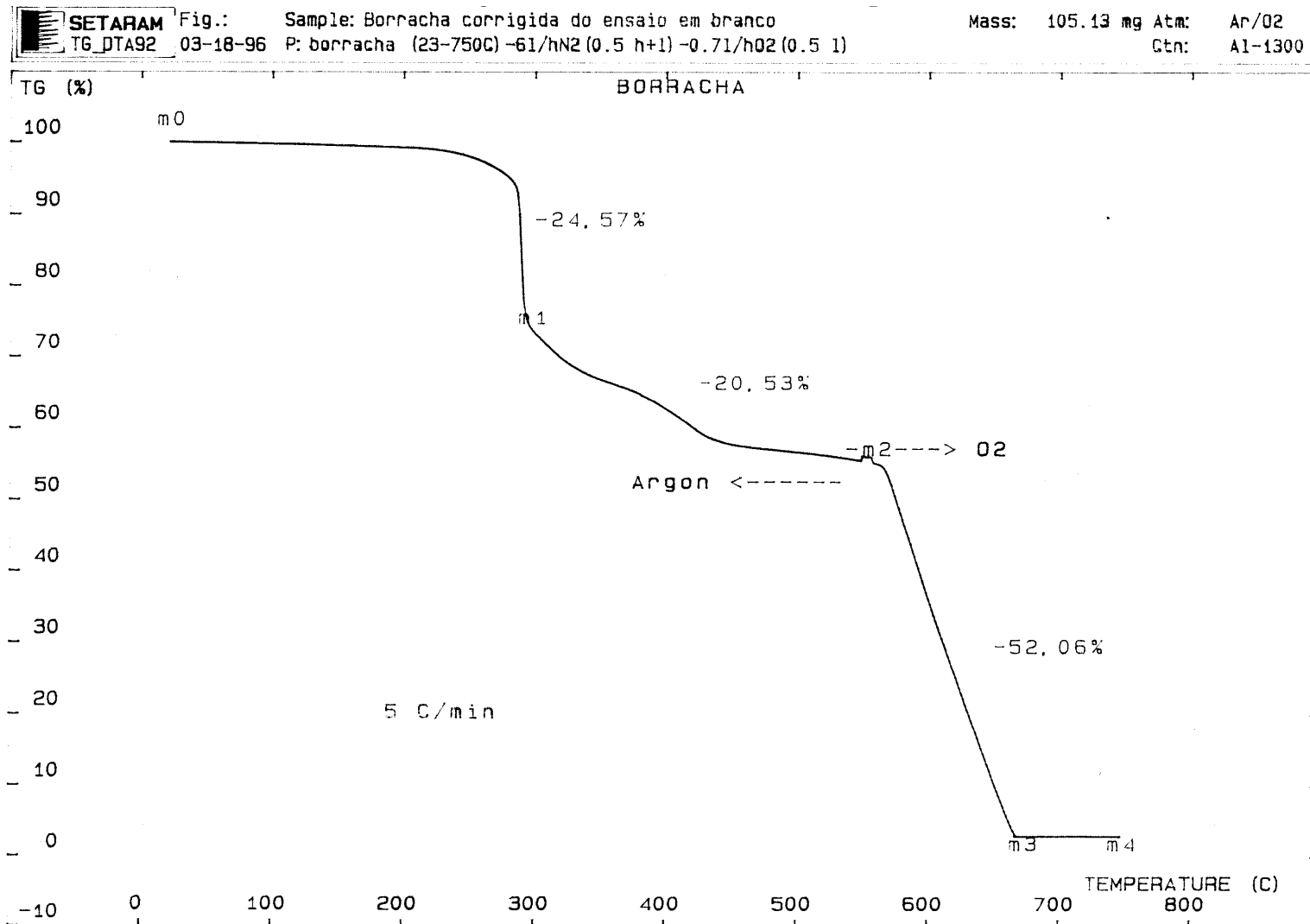
Características de Qualidade:

- Dureza “shore” $60^{\circ} \pm 5$
- Resistência à tracção > 17 N/mm²
- Alongamento na rotura > 450%
- Deformação residual sobre compressão:
 - a 70°C (durante 24 horas) < 15%
 - a 22°C (durante 28 dias) < 15%
- Módulo de elasticidade transversal (G) para $0.2 < \tan \delta < 0.9$ 1 ± 0.2 N/mm²

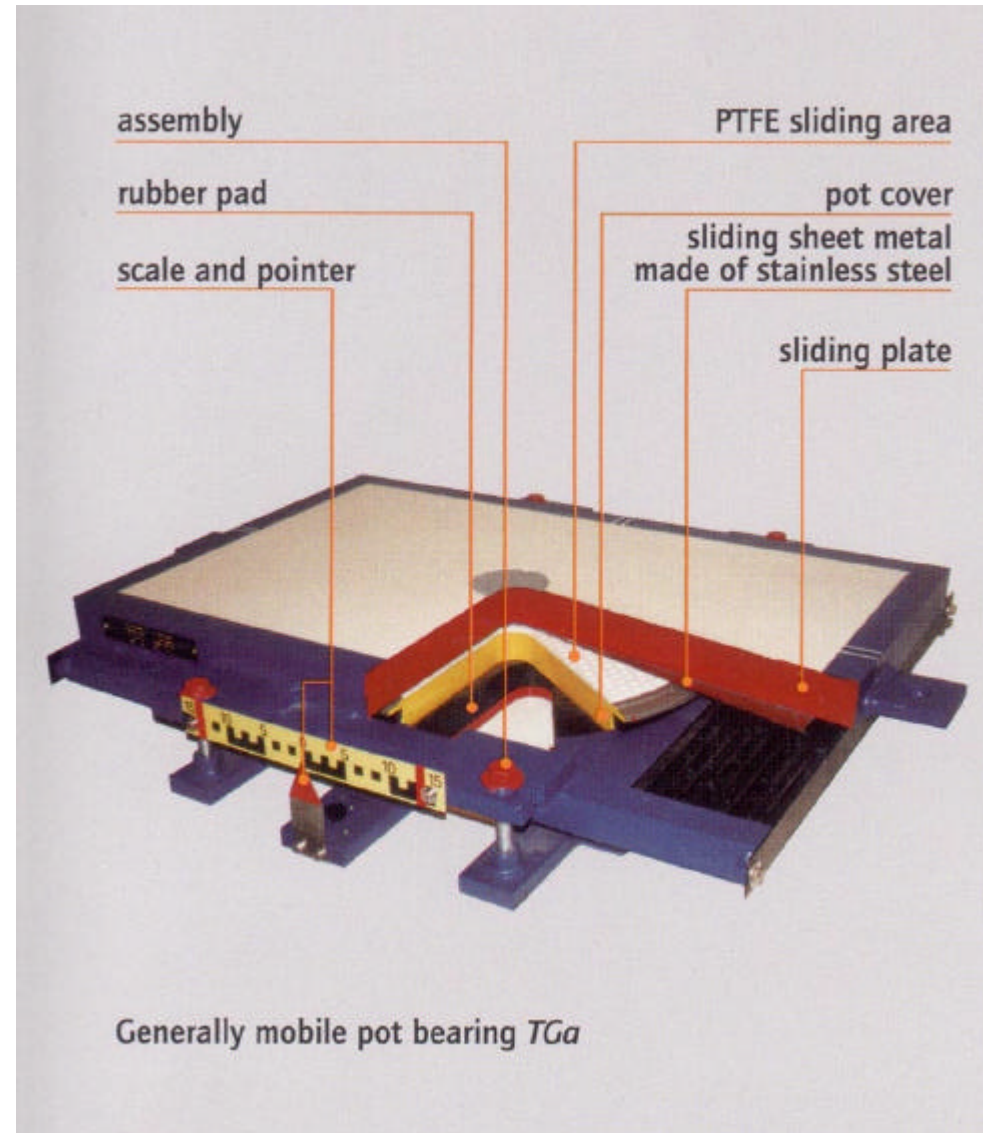
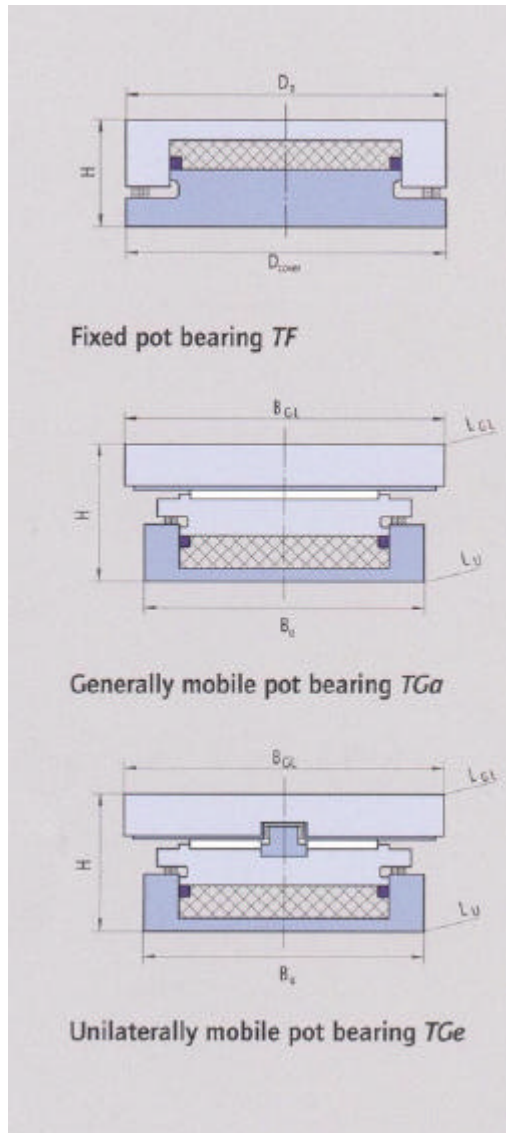
Outras Características que o *neoprene* deve verificar:

- não apresentar fissuras quando submetidos a ensaios de resistência ao ozono
- respeitar a condições especificadas nas normas DIN 53512 (resiliência), DIN 53515 (propagação de rasgaduras) e DIN 53508 (envelhecimento acelerado em estufa)

Resultado de Ensaio de Termogravimetria

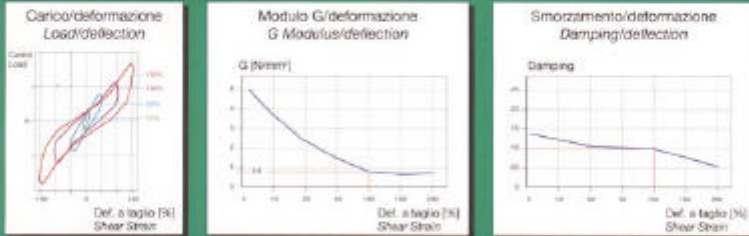


"POT BEARINGS"



HDN

MESCOLA NORMALE - NORMAL COMPOUND



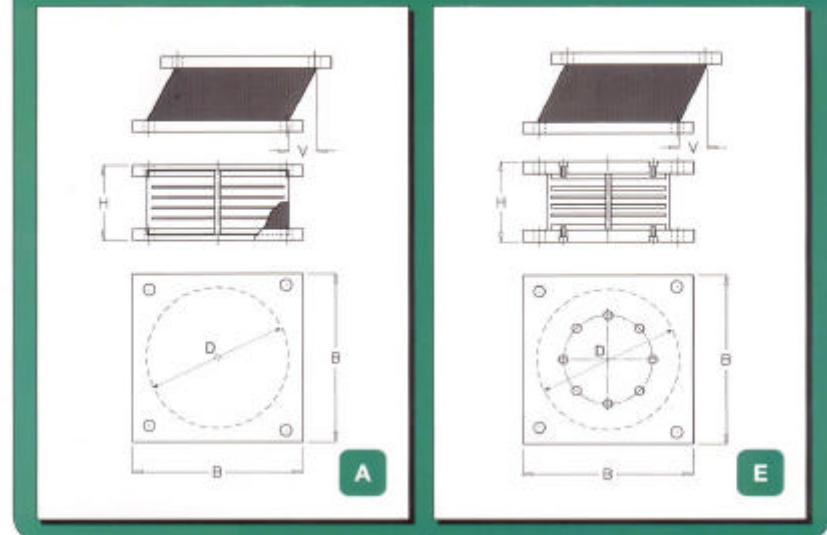
HDN.A	Carico vert. Vertical load max [kN]	Deformazione Displacement max [mm]	Rigidezza orizzontale Horiz. stiffness at 100% strain [kN/mm]	Dimensioni - Dimensions Te = spessore totale gomma total rubber thk. [mm]			
	Fz	V	k_{H1}	D	H	B	Te
HDN.A 300	700	112	0.71	300	177	380	80
HDN.A 400	1700	146	0.97	400	210	460	104
HDN.A 500	2900	179	1.23	500	243	560	128
HDN.A 600	4000	218	1.45	600	274	680	156
HDN.A 700	5700	252	1.71	700	326	800	180
HDN.A 800	7500	280	1.97	800	374	900	204
HDN.A 900	9500	280	2.49	900	374	1000	204
HDN.A 1000	11000	280	2.99	1000	398	1140	210
HDN.A 1100	14000	280	3.62	1100	398	1240	210
HDN.A 1200	16000	280	4.31	1200	398	1340	210

HDN.E	Carico vert. Vertical load max [kN]	Deformazione Displacement max [mm]	Rigidezza orizzontale Horiz. stiffness at 100% strain [kN/mm]	Dimensioni - Dimensions Te = spessore totale gomma total rubber thk. [mm]			
	Fz	V	k_{H1}	D	H	B	Te
HDN.E 300	500	150	0.71	300	197	350	80
HDN.E 400	1200	200	0.97	400	230	450	104
HDN.E 500	2200	250	1.23	500	263	550	128
HDN.E 600	2700	300	1.45	600	294	650	156
HDN.E 700	4000	350	1.71	700	346	750	180
HDN.E 800	5900	400	1.97	800	394	850	204
HDN.E 900	8800	400	2.49	900	394	950	204
HDN.E 1000	10000	400	2.99	1000	428	1050	210
HDN.E 1100	14000	400	3.62	1100	428	1150	210
HDN.E 1200	16000	400	4.31	1200	428	1250	210

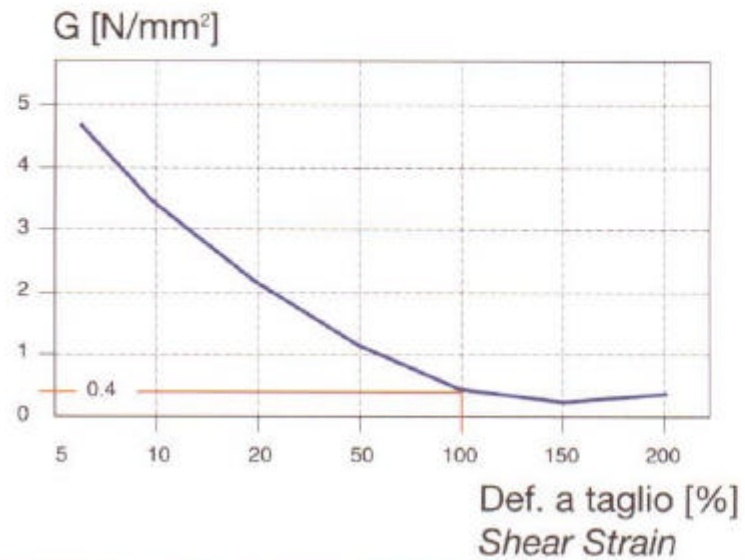
Blocos de apoio em borracha de Alto Amortecimento

(HDRB)

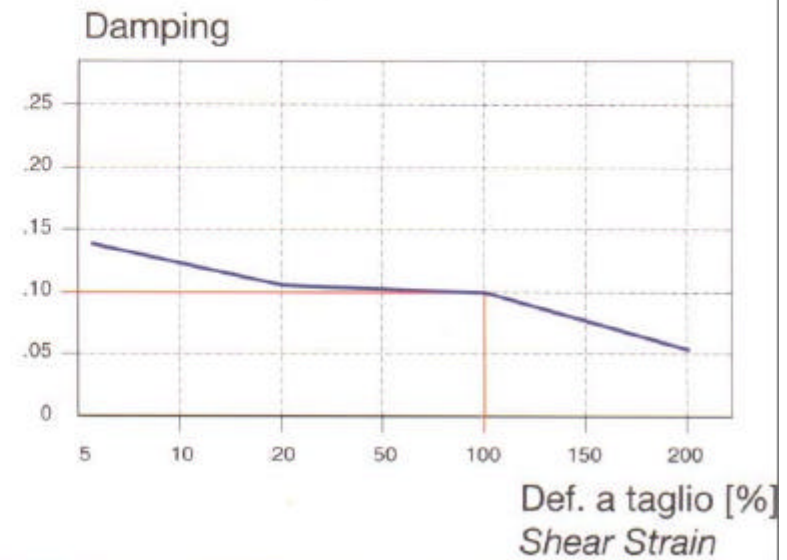
SISTEMA D'ANCORAGGIO - ANCHOR SYSTEM



Modulo G/deformazione
G Modulus/deflection

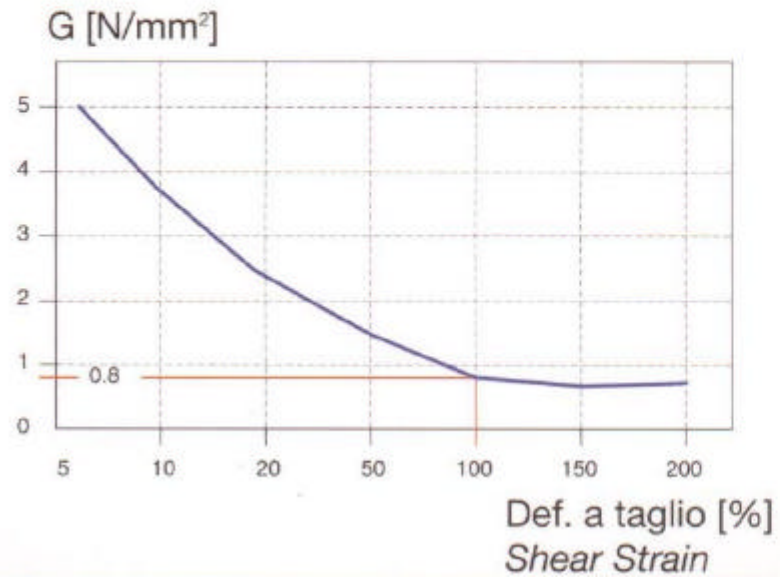


Smorzamento/deformazione
Damping/deflection

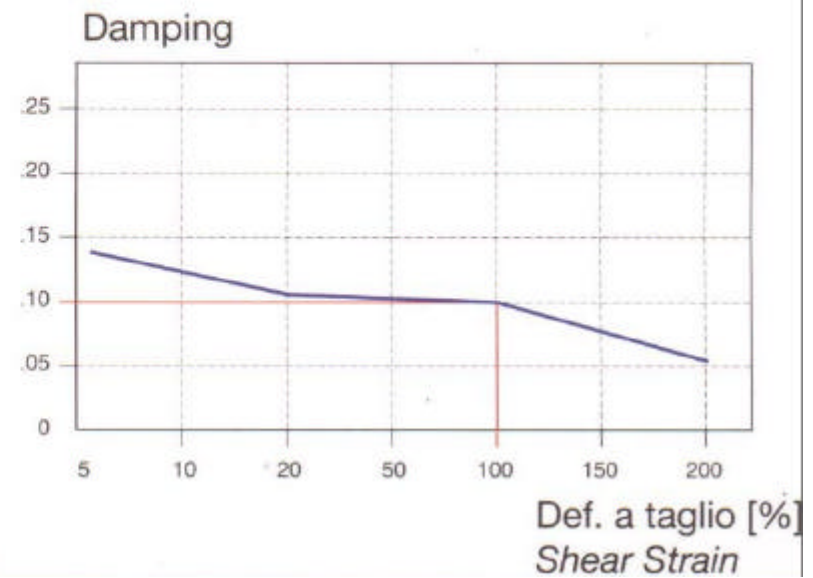


Mistura menos rígida (Soft Compound)

Modulo G/deformazione
G Modulus/deflection

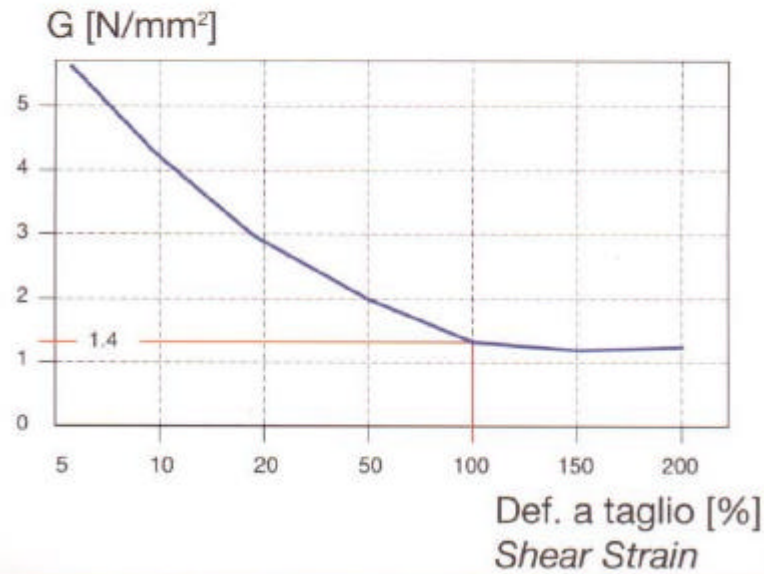


Smorzamento/deformazione
Damping/deflection

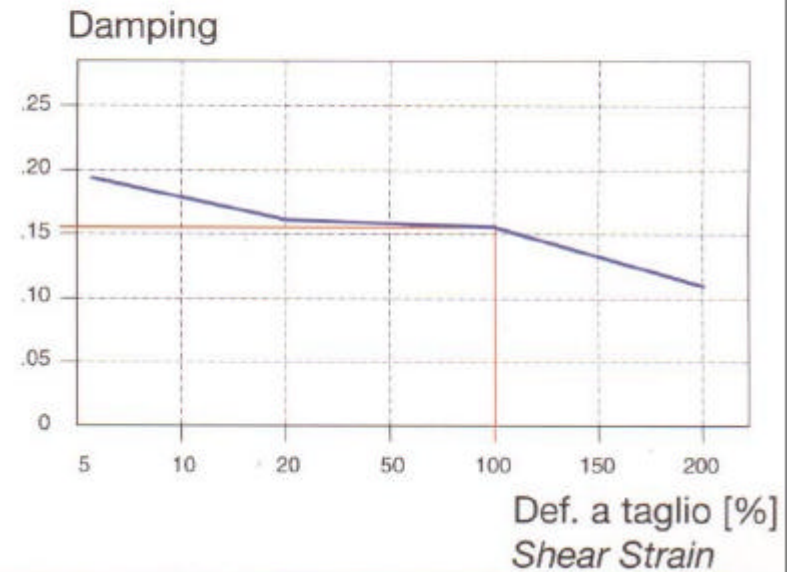


Mistura normal (Normal Compound)

Modulo G/deformazione
G Modulus/deflection



Smorzamento/deformazione
Damping/deflection



Mistura mais rígida (Hard Compound)

Bibliografia

- Billmeyer, F. W.: “Textbook of Polymer Science”, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- Hall, C.: “Polymer Materials - An Introduction for Technologists and Scientists”, Macmillan Education, 2nd Edition, 1989.
 - Mantell, C. L. (editor): “Engineering Materials Handbook”, McGraw-Hill Book Company, 1st Edition, 1958.
 - Kelly, J.: “Earthquake-Resistant Design with Rubber”, Springer-Verlag, 1st Edition, 1993.
 - Naeim, F. and Kelly, J.: “Design of Seismic Isolated Structures”, John Wiley & Sons, Inc., 1st Edition, 1999.
 - Guerreiro, L.: “Isolamento Sísmico de Edifícios”, Tese de Doutoramento, IST, 1996.
 - Guerreiro, L. e Azevedo, J.: “Ensaio de Caracterização de Aparelhos de Apoio para as Obras de Arte do IP6: Viaduto sobre a Ribeira de Rio de Moinhos e Ponte sobre o Rio Zêzere”, Relatório ICIST EP 37/95, 1995.
 - CEN/TC 167/WG: “European Standard on Structural Bearings”, 1993.
 - CEN/TC 167/WG: “European Standard on Structural Bearings”, 2001.