

PORTFÓLIO DE SERVIÇO	
CÓDIGO	LAPMEG01
LABORATÓRIO	LAPM – LABORATÓRIO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS
DIVISÃO	APR – DIVISÃO DE PROPULSÃO
SUBDIRETORIA	SDEG – SUBDIRETORIA DE ENGENHARIA
DESCRIÇÃO	Dureza Shore A e Shore D (Durômetros Shore A Zwick – analógico, Durômetro Shore A Instron - digital e Durômetro Shore D Zwick - analógico

Descrição do STE

Introdução

A reversibilidade a grandes deformações (extensões, compressões) é a característica fundamental que diferencia os elastômeros dos demais materiais. Essencialmente, os polímeros elastoméricos pertencem à classe dos termorrígidos, ou seja, uma vez curados tornam-se infusíveis e se decompõem com o aquecimento. Entretanto, não são rígidos como os termofixos. Nas últimas décadas, foram desenvolvidos de materiais classificados como elastômeros termoplásticos. Esse novos tipos de polímeros possuem a elasticidade da borracha, mas podem ser fundidos por aquecimento e moldados diversas vezes, ou seja, são passíveis de reciclagem.¹⁻²

Essa propriedade elástica singular gerou uma ampla aplicação dos polímeros elastoméricos, tornando-os essenciais para o desenvolvimento da civilização contemporânea.¹⁻²

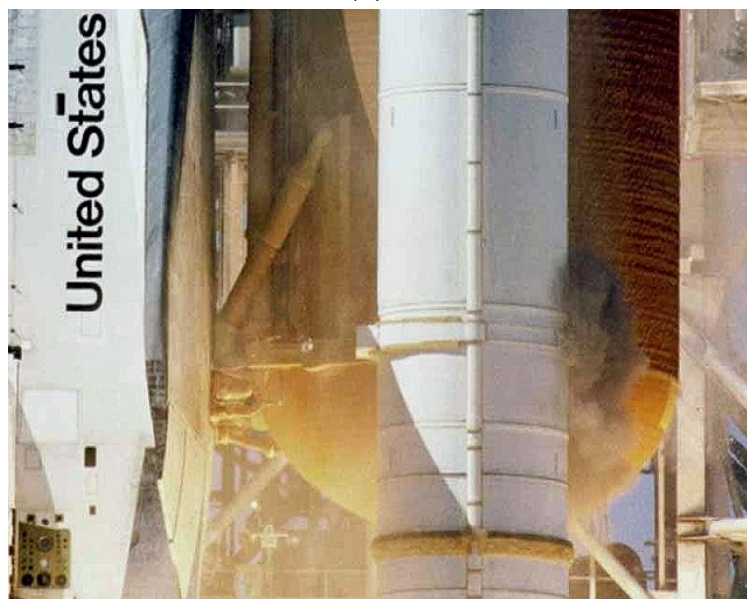
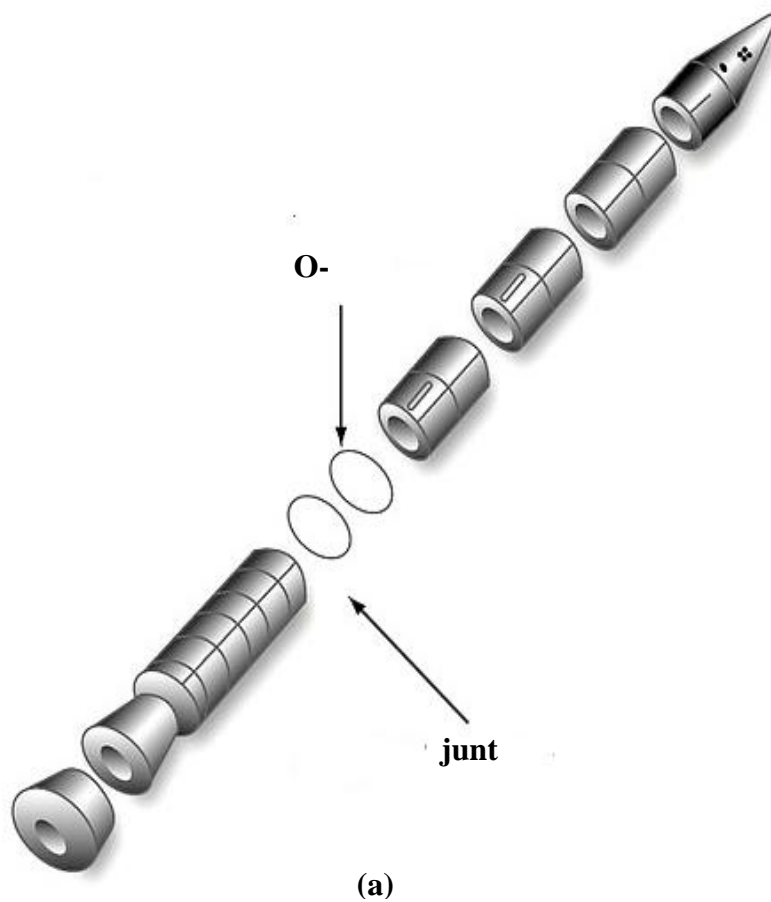
Em função dessa importância, há uma procura constante pelo conhecimento e aprimoramento das propriedades desses materiais, o que acarretou uma significativa demanda pela construção de experimentos e modelos para avaliação e compreensão de suas características primordiais.

As propriedades térmicas e mecânicas dos materiais elastoméricos são bastante relevantes, uma vez que os produtos derivados destes são exigidos em condição, muitas vezes drásticas, s com relação a esses parâmetros físicos.¹⁻²

O desconhecimento e/ou a falta de controle dessas propriedades podem gerar situações indesejáveis e mesmo desastres, como foi o caso do acidente do veículo espacial Challenger em 1986. Após a investigação, o físico Richard Feynman, laureado com o Nobel de Física de 1965, mostrou em rede nacional, por meio de experimentos simples, que o material constituinte dos O-rings dos foguetes de propelente sólido reagia lentamente a deformações a baixas temperaturas. Com isso, a vedação dos O-

rings não era efetiva permitindo que gases quentes escapassem do envelope motor, o que culminou na destruição da nave [Figura 1].¹⁻²

Neste trabalho, analisou-se o comportamento dos elastômeros quando solicitados mecanicamente, correlacionando modelos propostos com os resultados empíricos.



(a)
(b)
Figura 1. (a) Protótipo de um foguete da Challenger mostrando O-rings; (b) fumaça preta saindo da junta.

Ensaio mecânicos

As propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas por diversos ensaios, dentre os quais podem ser citados:

- Ensaio de Tração e Compressão: consiste na aplicação gradativa de força uniaxialmente à espécie, então se avalia a variação de seu comprimento conforme a força aplicada [Figura 2].¹⁻²
- Dureza Shore: é um ensaio que avalia a dureza superficial de polímeros ou elastômeros. Contudo, a dureza Shore não se reflete em outras propriedades como acontece com outros tipos de dureza, por isso, não deve ser utilizado como modo de previsão da resistência ao desgaste ou a outra propriedade mecânica. A dureza Shore avalia a resistência relativa à indentação, a qual varia com o tempo, principalmente porque os materiais usados neste tipo de ensaio tem uma grande resiliência e, portanto, uma grande capacidade para absorver a energia e de se adaptar à deformação [Figura 2].¹⁻²
- Ensaio de Resiliência e Histerese: consiste na aplicação gradativa de força ao elastômero (curva de carga) seguido pela remoção progressiva da força (curva descarga), a variação de seu comprimento tanto na carga quanto na descarga é o alvo da análise [Figura 3]. A área entre as curvas representa a histerese (energia dissipada) do material.¹⁻²
- Deformação Permanente: consiste na aplicação de uma deformação ou força constante no material. Após cessar essa solicitação e um período de restauração, avalia-se a variação das medidas (comprimento, espessura) do material [Figura 3].¹⁻²

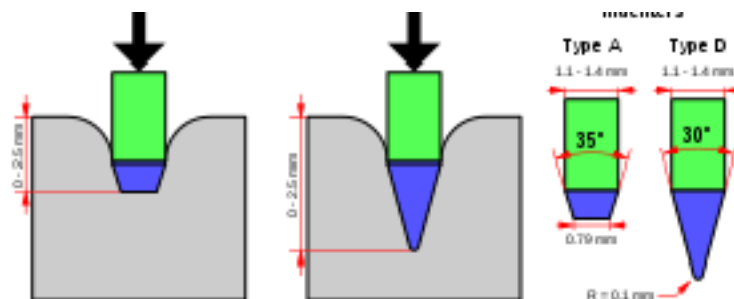


Figura 2. Teste de Dureza Shore: Indutores Tipo A e D

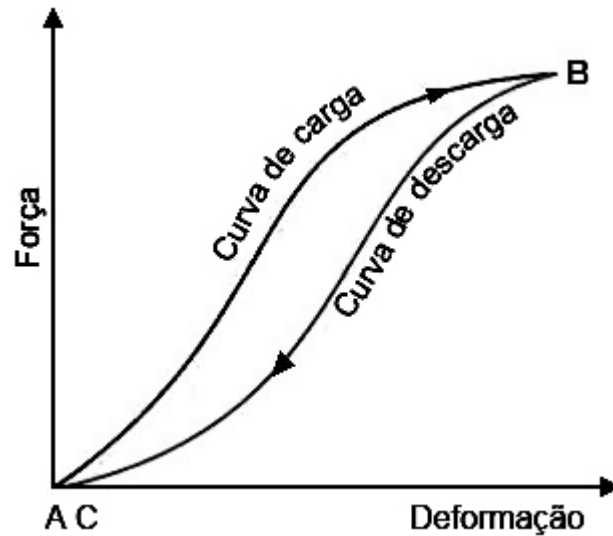


Figura 3. Extensão e retração de um elastômero: AB- carga; BC- descarga; AC- deformação residual permanente. Área delimitada por AB e AC- histerese.

Modelos de um elastômero ideal

Requisitos

Há um consenso entre os pesquisadores de que a elasticidade apresentada pelas borrachas se origina de combinação de três fatores: rotação, enovelamento das cadeias poliméricas com exigência energética desprezível; interações fracas entre as cadeias poliméricas; ligações covalentes que unem as cadeias poliméricas em alguns pontos (“crosslinks”). Assim os modelos de elastômeros ideais baseiam-se nessas considerações.¹⁻²²

As duas propriedades primeiramente citadas permitem a o enovelamento da cadeia e a flexibilidade e a extensão dos elastômeros quando solicitados. Deste modo, elastômeros de cadeias pouco ou com substituintes pequenos como poli-isopreno [Figura 4] apresentam maior elasticidade que aqueles com substituintes maiores como o copolímero de estireno butadieno(SBR) [Figura 5].¹⁻³

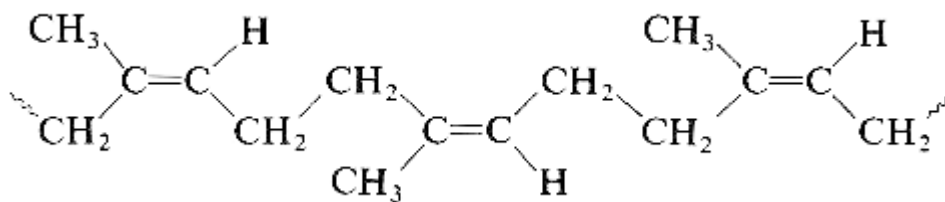


Figura 4. Cadeia de Poli-isopreno na borracha natural com livre rotação.

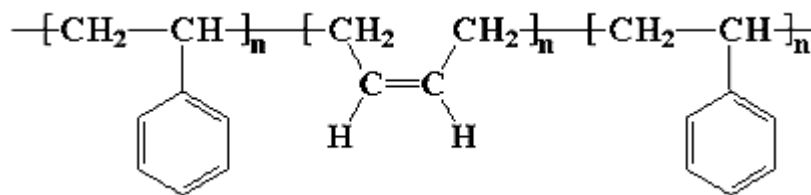


Figura 5. Cadeia Da borracha SBR com rotação mais impedida em função da presença dos substituintes fenilas.

A terceira característica é fundamental para garantir a reversibilidade à deformação. Essas ligações cruzadas (crosslinks) são formadas na vulcanização da borracha, processo descoberto por Goodyear e Hancock em meados do século XIX, que se apresenta como um dos mais relevantes na indústria moderna.¹⁻²

A vulcanização é o processo em que ocorre a formação de ligações químicas entre as cadeias poliméricas dos elastômeros resultando uma rede de crosslinks tridimensional [Figura 6] que garante suas propriedades elásticas e melhora suas propriedades físico-químicas com relação as do material não vulcanizado. Dentre essas melhorias, destacam-se o aumento da estabilidade dimensional, da resistência térmica (tanto ao amolecimento em temperaturas elevadas ou o aumento da rigidez em temperaturas baixas) e da resistência química. Essas propriedades dependem diretamente da quantidade de ligações cruzadas por unidade de volume, ou seja, da densidade de ligações cruzadas do material. Assim, a obtenção de características desejadas em um produto relaciona-se com o controle dessa densidade de crosslinks. A quantidade de crosslinks em uma borracha ideal deve ser de tal forma que não seja baixa e a reversibilidade não seja assegurada e nem elevada para se evitar um aumento da rigidez que impossibilite as suas flexibilidade e habilidade de se estender.¹⁻²



Figura 6. Borracha: (a) não vulcanizada; (b) vulcanizada.

Elastômero ideal - Força x Alongamento

Os modelos construídos para representarem o comportamento físico das borrachas estão fortemente correlacionados com o modelo de um gás ideal.¹⁻²

O comportamento termodinâmico de um elastômero ideal ao ser submetido a um processo reversível, por exemplo, alongamento lento, segue:

- partindo da primeira lei da termodinâmica - $dU = dq + dw$

desprezando as mudanças de volume (V), o trabalho w é apenas a integração do produto entre a força aplicada (F) e o deslocamento produzido (dL)

- a diferencial torna-se $dw = FdL$ e $dU = dq + FdL$
- em processos reversíveis a variação de calor $dq = TdS$ e $dU = TdS + FdL$
- o comportamento do sistema com relação ao comprimento a temperatura (T)

constante é obtido pela diferenciação $\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T + F$ ou

$$F = \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T - T\left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T$$

- como é um processo reversível, a força aplicada é em módulo igual a força restauradora do elastômero, assim há essa força possui uma componente dependente da mudança da energia interna e outra da entropia com relação ao comprimento.
- Como na proposição de um elastômero ideal custo energético nas mudanças conformacionais dos elastômeros em função da livre rotação, dobra das cadeias, considera-se que energia interna (U) desse material não muda com variações no seu comprimento (L) durante as deformações, assim como os gases ideais não alteram U devido a mudanças no volume (V) que ocupam. A energia interna é, então, uma função apenas da temperatura (T) em um elastômero ideal e

$$\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T = 0$$

- Assim a força restauradora em elastômeros ideais é função da mudança de entropia do sistema $F = -T\left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T$, por isso essas espécies são conhecidas como molas de entropia (“entropy springs”).¹⁻²
- Conhecendo a função de estado que relaciona força e deslocamento do elastômero ideal é possível calcular as propriedades do sistema.

- Um modelo simples unidimensional com N unidades de comprimento b com nR apontando para a direita e nL para a esquerda [Figura 7], em que $N = nR + nL$ e $L = b(nR - nL)$.

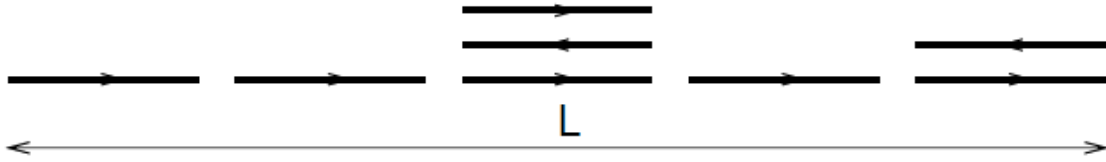


Figura 7. Modelo 1D de um elastômero ideal.

- um tratamento estatístico revela a função de partição $Z = 2(e^{-\beta Fb} + e^{\beta Fb})^N$
- e o alongamento $L = \frac{1}{\beta} \frac{d \ln Z}{dF} = Nb \frac{(e^{\beta Fb} - e^{-\beta Fb})}{(e^{-\beta Fb} + e^{\beta Fb})}$ [Figura 8]
- em situações em que $\beta Fb \ll 1$, $e^{\beta Fb} = 1 + \beta Fb$
- $L = Nb^2 \beta F$ ou $F = \frac{k_B T}{Nb^2} L$
- por comparação com $F = -T \left(\frac{\partial S}{\partial L} \right)_T$
- $\left(\frac{\partial S}{\partial L} \right)_T = -\frac{k_B}{Nb^2} L$ e $\Delta S = \int_{L_0}^L -\frac{k_B L}{Nb^2} dL = \frac{k_B}{2Nb^2} (L_0^2 - L_f^2)$
- Com $\Delta S > 0$ para a restauração e $\Delta S < 0$ para o alongamento.¹⁻²
- A expressão completa para entropia segue a relação

$$S = -\frac{d \ln Z}{d\beta} = Nk_B \left[\ln \left(\frac{2}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{Nb} \right)^2}} \right) - \left(\frac{L}{Nb} \right) \left(\frac{e^{\frac{L}{Nb}} - e^{-\frac{L}{Nb}}}{e^{\frac{L}{Nb}} + e^{-\frac{L}{Nb}}} \right) \right] \quad \text{[Figura 9]}$$

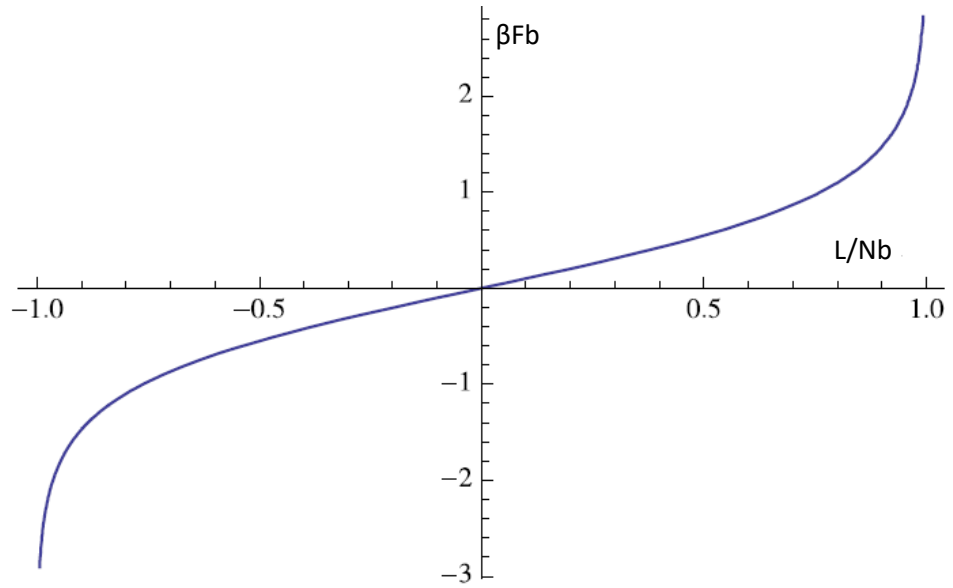


Figura 8. Comportamento da força com a deformação de um elastômero ideal no modelo 1D.

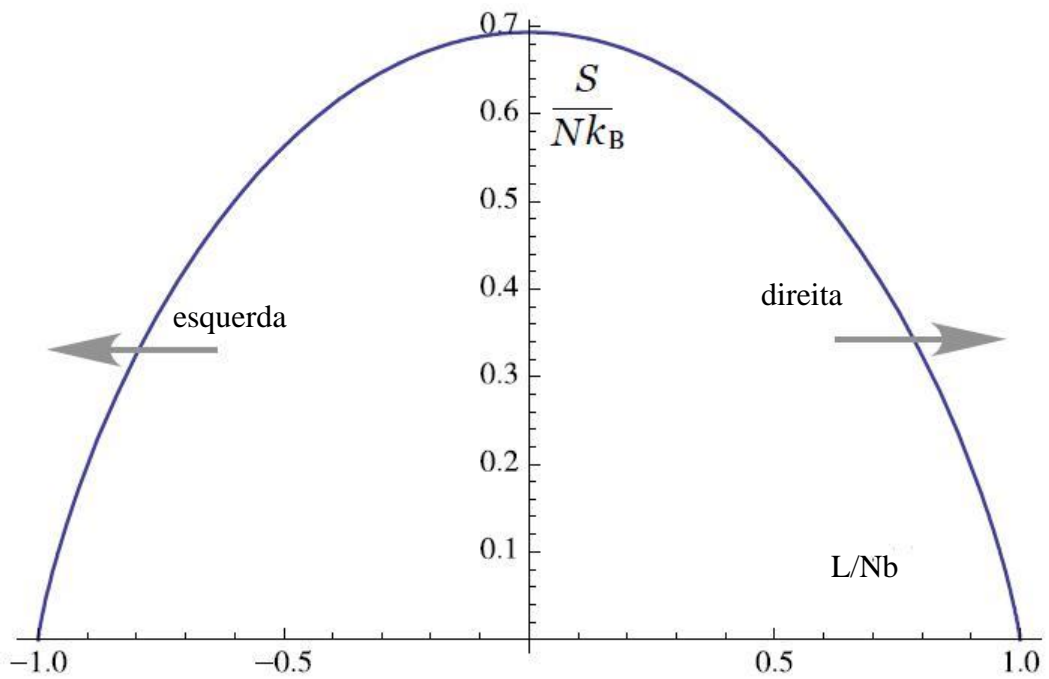


Figura 9. Relação entre entropia e deformação de um elastômero ideal no modelo 1D.

Elastômero ideal alongamento rápido - Temperatura

- considere um sistema em que ocorre um processo adiabático (ou quasi-adiabático), por exemplo um alongamento rápido, em que não há troca de calor com a vizinhança nesse período de tempo. Pela primeira lei $dU = dq + dw$
- como $dq = 0$, obtém-se $dU = dw$ e $dw = FdL$
- segue que $dU = FdL$
- como U é uma função de estado sua diferencial exata pode ser representada como função da temperatura (T) e do comprimento (L) - $dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_L dT + \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T dL$
- então $FdL = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_L dT + \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T dL$
- como em um elastômero ideal $\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T = 0$
- chega-se a $FdL = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_L dT$
- definindo a capacidade calorífica a comprimento constante $C_L = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_L$
- $FdL = C_L dT$
- Pelo modelo de elastômero ideal $F = -T \left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T$
- $C_L dT = -T \left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T dL$
- pela aproximação unidimensional e o tratamento de termodinâmica estatística $\left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T = -\frac{k_B}{Nb^2} L$
- e a relação entre a temperatura e o alongamento $C_L dT = \frac{k_B T}{Nb^2} L dL$
- considerando C_L constante $\int_{T_0}^{T_f} \frac{C_L dT}{T} = \int_{L_0}^L \frac{k_B L}{Nb^2} dL$
- que resulta em $\ln\left(\frac{T_f}{T_0}\right) = \frac{k_B}{2Nb^2} (L_f^2 - L_0^2)$
- Com $T_f > T_0$ para alongamento. ¹⁻³

Elastômero ideal restauração abrupta - Temperatura

- considere um sistema em que ocorre a relaxação do sistema ocorre sem restrições
- pela primeira lei $dU = dq + dw$
- como a restauração é rápida, em que não há troca de calor com a vizinhança nesse período de tempo e $dq = 0$.
- como não há uma força opositora também $dw = 0$
- conseqüentemente $dU = 0$, ou seja, o processo ocorre com U constante, esse processo se relaciona com a expansão livre de um gás.
- então a variação de T com relação a L segue $dT = \left(\frac{\partial T}{\partial L}\right)_U dL$
- pela função de estado $dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_L dT + \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T dL = 0$ ou $C_L dT = -\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T dL$
- pela regra de Euler $\left(\frac{\partial T}{\partial L}\right)_U \left(\frac{\partial L}{\partial U}\right)_T \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_L = -1$ ou $\left(\frac{\partial T}{\partial L}\right)_U = -\frac{1}{C_L} \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T$,
- assim $dT = -\frac{1}{C_L} \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T dL$, para o elastômero ideal $\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T = 0$
- e $dT = 0$, ou seja a temperatura não varia em uma relaxação abrupta.
- Pode-se provar para o modelo 1D que $\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T = 0$
- considerando a energia livre de Helmholtz $A = U - TS$ assim $\left(\frac{\partial A}{\partial L}\right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T - T \left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T$ ou $\left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T = \left(\frac{\partial A}{\partial L}\right)_T + T \left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T$
- como $dA = dU - TdS - SdT$ e $dU = TdS + FdL$
- logo $dA = FdL - SdT$, assim $\left(\frac{\partial A}{\partial L}\right)_T = F$ e pelas relações de Maxwell $\left(\frac{\partial S}{\partial L}\right)_T = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_L$
- resultando $dT = -\frac{1}{C_L} \left(\frac{\partial U}{\partial L}\right)_T dL = [F - T \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_L] dL$

- para o modelo de uma borracha ideal unidimensional $F = \frac{k_B T}{Nb^2} L$ e

$$\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_L = \frac{k}{Nb} L$$

- logo $dT = \left[\frac{k_B T}{Nb^2} L - T \frac{k_B}{Nb^2} L\right] dL$ e portanto, $dT = 0 dL = 0$
- Já $\Delta S = \Delta S_{\text{universo}}$ em que $\Delta S = \int_{L_0}^L -\frac{k_B L}{Nb^2} dL = \frac{k_B}{2Nb^2} (L_0^2 - L_f^2) > 0$ ¹⁻²

Esse modelo consegue abordar razoavelmente as propriedades dos elastômeros, mas constitui apenas uma primeira aproximação e construções mais robustas já existem.

Descrição

O LAPM possui as atribuições de executar: ensaios mecânicos de materiais elastoméricos, corte, usinagem e estocagem de propelente sólido e de proteções térmicas empregados em veículos espaciais conforme o art. 242 do Regimento Interno do IAE (RICA 21-93/24).

O Sistema de Gestão da Qualidade desse laboratório atende aos requisitos das normas ABNT NBR ISO 17025 e do Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA).

As condições ambientais de suas instalações são controladas, monitoradas e registradas em temperaturas de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidades relativas menores que $(50 \pm 5)\%$ ur

Os ensaios realizados são de: Dureza Shore A e Shore D, Resistência à Tração, Resistência ao Rasgo, Resistência à Compressão, Relaxação e Adesão em temperaturas e velocidades variadas. A competência do LAPM para realização desses experimentos é garantida pelo desempenho satisfatório no Programa de Ensaios de Proficiência por Comparação Interlaboratorial em Elastômeros (PEP-elastômeros) coordenado anualmente pelo SENAI/ RS.

EQUIPAMENTOS

- Durômetro Shore A Instron - digital
- Durômetro Shore A Zwick - analógico
- Durômetro Shore D Zwick - analógico

COMPETÊNCIAS

Ensaio	Intervalo de medição	Capacidade de medição	Norma
Dureza Shore A	0-100 ShA	0,1 ShA	ASTM D2240
Dureza Shore D	0-100 ShD	0,1 ShD	ASTM D2240

Mão de Obra e Apoios

Mão de Obra Dedicada	Atividade	Carga Horária	Valor por Hora	Valor	
Nível Superior	ENSAIO	0.4	R\$ 189.81	R\$ 75.92	Quantidade
Nível Técnico		2	R\$ 109.24	R\$ 218.48	
			SUBTOTAL	R\$ 294.40	
Nível Superior	RELATÓRIO	0.2	R\$ 189.81	R\$ 37.96	Quantidade:
Nível Técnico		0.5	R\$ 109.24	R\$ 54.62	
			SUBTOTAL	R\$ 92.58	

Equipamentos (Consumo Energético e Depreciação)

Atividade	Tipo de Equipamento (Dedicado ou de Apoio)	BMP (nº de carga)	Potência do Equipamento (kW)	Tempo de Equipamento ligado (h)	Custo de Energia (R\$0,78 por kWh)	Custo de Manutenção por hora de uso (R\$/h)	Custo do Equipamento (r\$)	TEMPO DE USO (ANOS)	Valor Depreciado durante o tempo de uso em R\$	
ENSAIO	Equipamento									
	Dedicado	Durômetro Shore A e D	686247	0.5	2	R\$0.78	1	4000	10	R\$0.09
	Apoio	Condicionador de ar	2275716	2	2	R\$3.12	1	4000	5	R\$0.18
	Apoio	Datalogger	2115206	0.004	2	R\$0.01	1	3000	5	R\$0.14
	Apoio	Bomba de Vácuo	700664	0.2	1	R\$0.16	1	3000	5	R\$0.07
	Apoio	Desumidificador	675575	0.4	2	R\$0.62	1	4000	5	R\$0.18
				SUBTOTAL	R\$4.69		SUBTOTAL		R\$0.66	
RELATÓRIO	Dedicado	Computador	1788185	0.020	0.5	R\$0.01	1	8000	5	R\$0.09
	Dedicado	Condicionador de ar	2275717	4	2.5	R\$7.80	1	4000	5	R\$0.23
				SUBTOTAL	R\$7.81		SUBTOTAL		R\$0.32	

PREÇO FINAL

	ENSAIO	RELATÓRIO
Mão de Obra Dedicada	R\$ 294.40	R\$ 92.58
Custos com Bombeiro		
Custos com Ambulância / Assistência Médica		
Custos com Segurança do Trabalho		
Custos com Segurança e Defesa		
Consumo Energético	R\$ 4.69	R\$ 7.81
Depreciação dos Equipamentos	R\$ 0.66	R\$ 0.32
Depreciação de Instalações		
TOTAL	R\$ 299.75	R\$ 100.71

Informações para Contato:

DCTA/IAE/APR-P/LAPM

Endereço: Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila Das Acácias - São José Dos Campos/SP – Brasil

CEP: 12228-904

Responsável Pelo Laboratório - Lucas Sousa Madureira

Telefone - (12) 3947-4519

e-mail - lucasism3@fab.mil.br



Informações que a contratante deve apresentar para apreciação do grau de inovação do STE

De acordo com o estabelecido na Política de Inovação da ICT/IAE, a contratante deve apresentar mediante Carta ao Instituto um compêndio de informações acerca da necessidade de realização de STE e que estejam enquadrados nos objetivos da Lei de Inovação de nº 10.973/04, mais especificamente os artigos 4º, 6º, 8º, 9º e 22º, e devidamente verificados pelo Chefe da VDIR-GI. Um encaminhamento formal será enviado para a Coordenadoria de Gestão da Inovação (DCTA-CGI), para enfim serem aprovados pelo Diretor da ICT/IAE.

