



PMR2560 – Robótica Estrutura Mecânica

Eduardo L. L. Cabral

elcabral@usp.br

Objetivos

- Estrutura mecânica - ligamentos:
 - Características;
 - Materiais utilizados;
 - Balanceamento:
 - Estático (contra-peso, mecanismo de 5 barras);
 - Dinâmico.



Ligamentos

- Características desejadas:
 - Alta rigidez \Rightarrow repetibilidade;
(equacionar)
 - Alta resistência mecânica;
 - Baixo peso;
 - Alta relação rigidez/peso **(equacionar)**;
 - Alta relação resistência/peso
(equacionar);
 - Alta relação rigidez/inércia;
 - Alta relação resistência/inércia;
 - Baixo custo.



Ligamentos

- Materiais utilizados:
 - Aço \Rightarrow baixa relação rigidez/peso;
 - Ferro Fundido \Rightarrow baixa relação rigidez/peso;
 - Liga de Alumínio \Rightarrow melhor compromisso;
 - Material composto (fibra de carbono) \Rightarrow melhores características físicas, porém tem alto custo;
 - Tabela comparativa de materiais.



Ligamentos

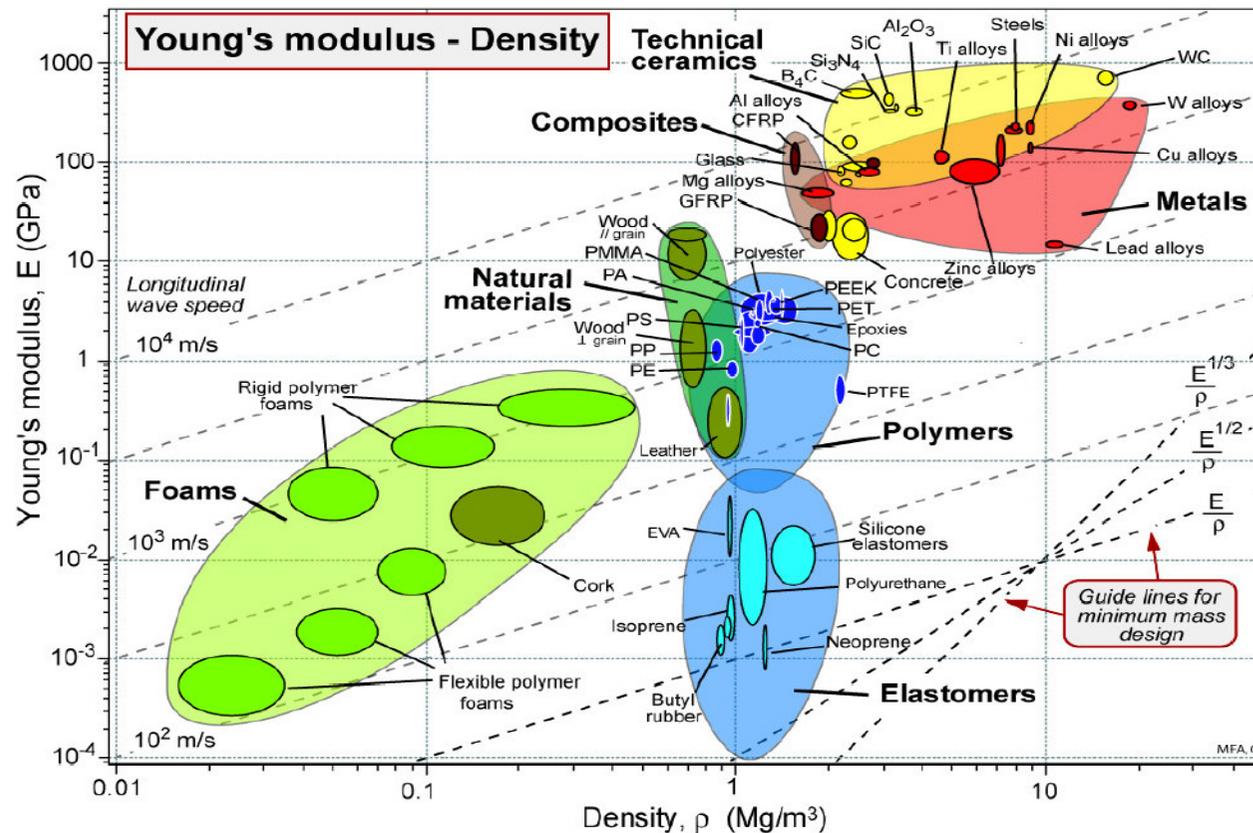
Tabela de propriedades mecânicas dos materiais

Material	E (GPa)	σ_{\max} (MPa)	ρ (g/cm ³)	E/ ρ	σ_{\max}/ρ
Aço	207	450	7,8	26,5	57,7
Ligas Alumínio	85	255	2,7	31,5	94,4
Ligas Cobre	110	250	9,0	12,2	27,8
Ligas Titânio	107	550	4,7	22,8	117,0
Ligas Tungstênio	407	550	11,0	37,0	50,0
Ligas Níquel	207	580	9,0	23,0	64,4
Ligas Zinco	85	120	6,0	14,2	20,0
Madeira	15	50	0,7	21,4	71,4
Composto Carbono	50	200	1,5	33,3	133,3



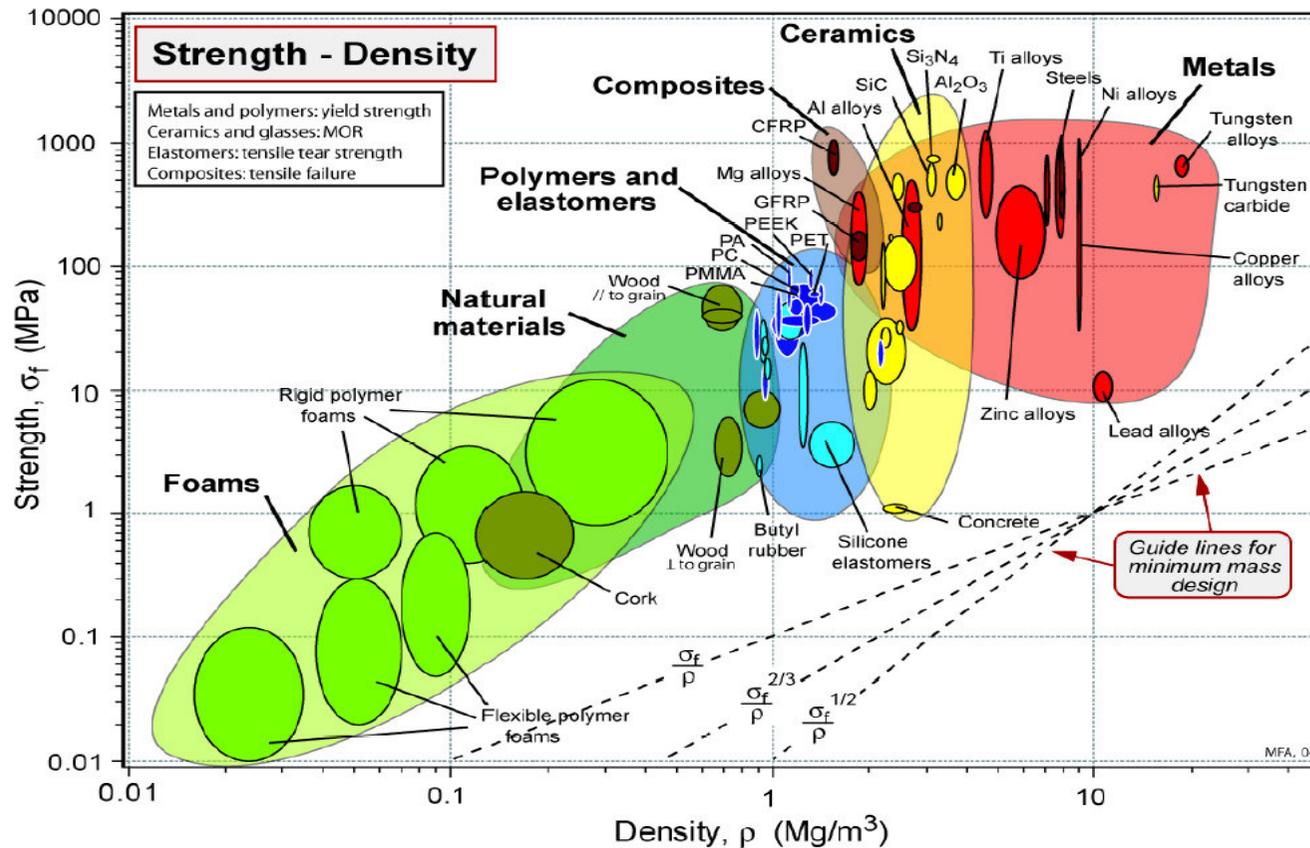
Ligamentos

Módulo de elasticidade versus densidade



Ligamentos

Máxima tensão versus densidade



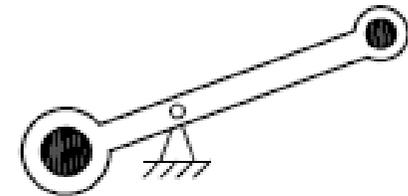
Balanceamento

- Para que balancear?
 - Reduzir esforços gravitacionais \Rightarrow diminuir potência e custo do atuadores:
 - \Rightarrow Mecanismos especiais adaptados na estrutura para reduzir peso visto pelos atuadores.
- Balanceamento estático:
 - Contra-pesos;
 - Uso de pistões e molas;
 - Mecanismo de 5 barras.
- Balanceamento dinâmico.



Balanceamento estático

- Balanceamento estático com contra-pesos:
 - Somente para ligamentos com articulações de rotação.
 - Escolha da massa e posição do contra-peso para localizar a posição do centro de massa do ligamento no eixo da articulação \Rightarrow CM no eixo da articulação elimina o torque devido à gravidade.
 - Vantagens:
 - Equacionamento relativamente simples;
 - sistema totalmente passivo.
 - Apresenta algumas limitações:
 - Pode provocar aumento do torque gravitacional em outros atuadores;
 - Nem sempre é possível eliminar o torque gravitacional de todos os atuadores de um robô;
 - Contra-peso elimina o torque gravitacional mas aumenta a inércia do ligamento.



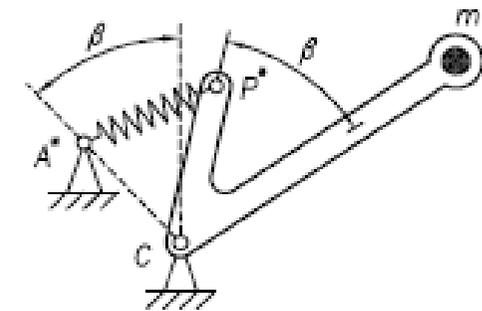
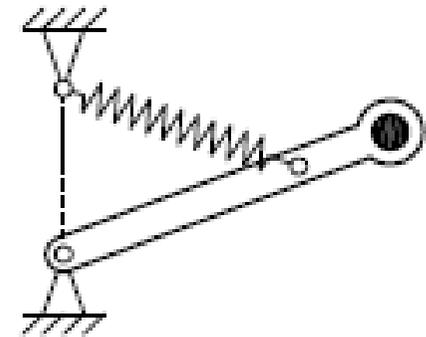
Balanceamento estático

- Balanceamento estático com contra-pesos:
 - Nos robôs industriais \Rightarrow motores elétricos sempre são usados com redutores de velocidade.
 - A inércia de um sistema vista pelo eixo de entrada do redutor é N^2 vezes menor do que a inércia do sistema vista pelo eixo de saída do redutor **(Equacionar)**.
 - Em um sistema de redução de velocidades tem-se que:
 - O torque devido à gravidade visto pelo eixo do motor diminui com a relação de redução;
 - A inércia vista pelo eixo do motor diminui com o quadrado da relação de redução.
 - **(Equacionar)**
 - **É vantagem aumentar a inércia do sistema para se obter uma redução no torque gravitacional.**



Balanceamento estático

- Balanceamento estático com molas ou pistões:
 - Somente para ligamentos com articulações de rotação.
 - Realizado pela escolha correta da rigidez da mola e dos pontos de fixação da mola no ligamento.
 - Equacionamento não tão simples (**equacionar**).
 - Vantagens e desvantagens:
 - Não aumenta massa nem inércia;
 - Nem sempre é possível eliminar o torque gravitacional de todos os atuadores de um robô;
 - Altamente eficiente;
 - Molas \Rightarrow sistema passivo;
 - Pistões \Rightarrow sistema não passivo.
- **Robôs articulados atuais de alta capacidade de carga são balanceados com contrapeso e pistão.**



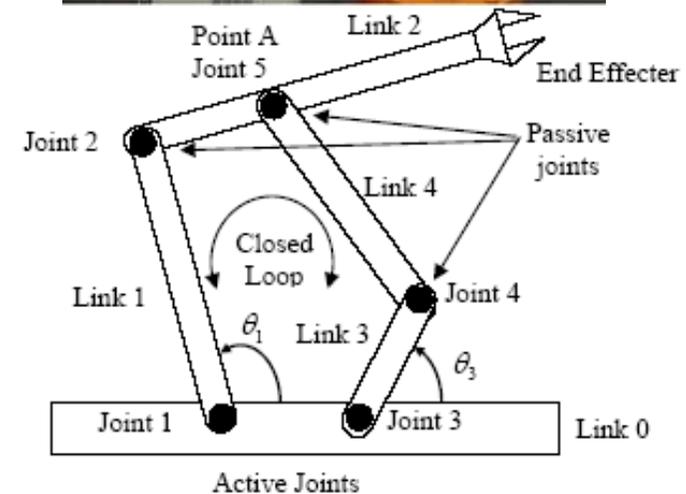
Balanceamento estático

- Balanceamento estático com molas ou pistões.



Balanceamento estático

- Balanceamento estático com mecanismo de 5 barras:
 - Em geral não é possível eliminar o torque gravitacional visto por todos os atuadores de um robô.
 - Mecanismo de 5 barras
⇒ permite balanceamento estático quase que completo de um braço robótico.
 - Mecanismo de 5 barras paralelas.



Balanceamento estático

- Balanceamento estático com mecanismo de 5 barras:
 - Vantagens e desvantagens:
 - Motores ficam na base:
 - ⇒ Diminuição do peso dos ligamentos;
 - ⇒ Não necessita de sistema de transmissão de movimento;
 - Fácil de balancear ⇒ uso de contra-pesos;
 - Causa limitação de movimento das articulações.



Balanceamento dinâmico

- Vantagens e desvantagens:
 - Dinâmica do robô se torna linear e invariante no tempo;
 - Desacoplamento da dinâmica de todos os ligamentos.
 - Menor carga nos atuadores;
 - Maior facilidade de controle;
 - Exige eixos de articulações consecutivas perpendiculares entre si:
 - Limitação no volume de trabalho;
 - Configuração cinemática nem sempre desejável.
- Complicado de ser realizado.
- Robôs industriais não utilizam.

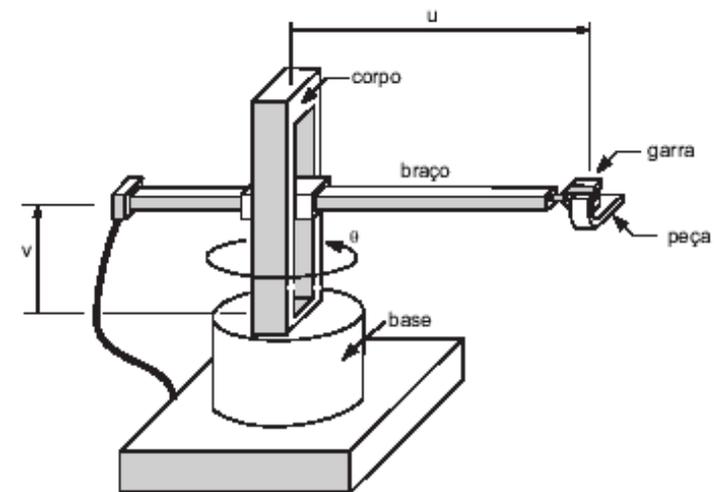


Exemplos

- 1) O posicionamento de uma peça em um processo produtivo automatizado é realizado por um manipulador robótico, com três graus de liberdade: rotação (θ) do corpo em relação a base, translação vertical (v) do braço e translação horizontal (u) do braço, tal qual mostrado na figura. Considere que os deslocamentos correspondentes aos graus de liberdade sejam definidos nos seguintes intervalos: $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$; $0,2 \text{ m} \leq v \leq 1,2 \text{ m}$ e $0,2 \text{ m} \leq u \leq 0,8 \text{ m}$.

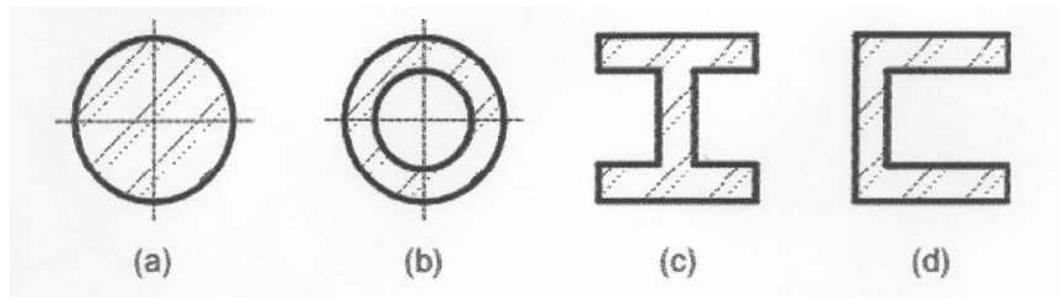
Pede-se:

- Faça um esboço do envelope de trabalho do manipulador, ou seja, do volume correspondente ao lugar geométrico dos pontos possíveis de serem atingidos pela garra;
- Admita que a peça pese no máximo 6 Kg. Quais esforços solicitantes estariam presentes no braço e no corpo, na condição de u e v máximos? Faça as hipóteses de julgar necessárias.
- Sob que condições de movimentação do manipulador, o dimensionamento do braço deve considerar os efeitos inerciais?



Exemplos

- 2) O conceito de rigidez é um dos mais importantes em projeto de manipuladores. A esse respeito, responda ao solicitado abaixo.
- Explique em poucas palavras o que é rigidez
 - Quais fatores determinam a rigidez de um componente mecânico
 - Entre os perfis apresentados abaixo, qual você escolheria como o mais adequado à estrutura de robô manipulador de médio porte que será submetido a carregamentos combinados de flexão e torção, variáveis em intensidade e direção, de modo que o mesmo possa ter rigidez satisfatória com um peso relativamente reduzido ? Justifique sua resposta.



Exemplos

- 3) Um robô de duas articulações de revolução no plano apresenta as seguintes características funcionais: carga máxima 50kg; comprimento de cada ligamento 500mm; não considerando o motor e o redutor, o centro de gravidade de cada ligamento está localizado no seu centro geométrico; os motores e os redutores de velocidade estão localizados diretamente nas articulações do robô e a massa de cada conjunto é 5kg; a massa do primeiro ligamento é de 60kg e do segundo ligamento 40kg. Pede-se:
- Faça o balanceamento estático da segunda articulação do robô utilizando contra-pesos. Forneça a posição e a massa do contrapeso de forma a cancelar o esforço gravitacional para o robô manipulando a carga máxima.
 - Faça o balanceamento estático da primeira articulação do robô utilizando mola. Forneça a posição de fixação da mola na base e no robô e a rigidez da mola para o robô manipulando a carga máxima

