

Resolução do exercício da mola

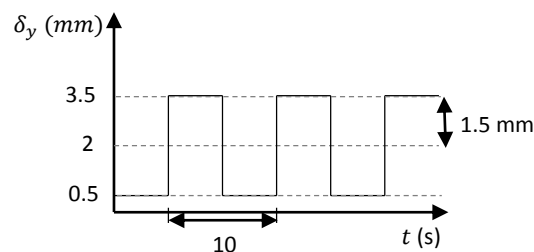
Por André Duarte B.L. Ferreira

Porto, 8 de Novembro de 2014

Revisto a 27 de Janeiro de 2015

Dados:

- 1) Para produzir 10 000 unidades
- 2) Quando montado o conjunto, cada lâmina terá uma deflexão, na sua ponta, de 2mm
- 3) Atua uma força com período de 10s que causa uma variação da deflexão na ponta de cada lâmina de 1.5mm com a forma de uma onda quadrada



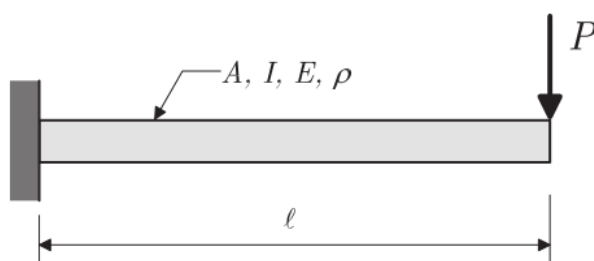
- 4) A força exercida na ponta das lâminas nunca deve descer abaixo dos 15N
- 5) Deve ser capaz de funcionar corretamente durante 2 meses de operação contínua, sem qualquer manutenção
- 6) Tª ambiente $\approx 20^\circ\text{C}$
- 7) Umidade até 100%
- 8) Sujeito a abrasão média por areia
- 9) Sujeito a spray de água salgada
- 10) Protegida da luz direta do Sol.

Determinar:

- 1) O material da mola ;
- 2) O processo de fabrico a ser usado na sua produção ;
- 3) A espessura da mola para tais escolhas.

Análise:

Cantilever = Estrutura em consola =

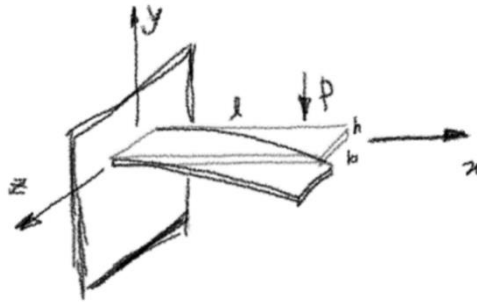


$$\delta = \frac{P\ell^3}{3EI} \quad (1)$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{3EI}{\ell^3}$$

O que nós queremos é determinar a espessura, portanto na expressão de cima temos de tentar explicitá-la.

Relativamente ao segundo momento de área segundo z , I_z : sabemos que é largura x espessura / 12 em que uma delas está ao cubo. Se esta placa tiver uma grande espessura é mais difícil fazê-la rodar segundo z do que se tiver uma grande largura, o que significa que a espessura tem um maior peso no momento de área e portanto é ela que está ao cubo.



$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

Por outro lado também sabemos que a massa da placa é dada por

$$m = \rho V = \rho Lhb$$

No entanto se entrarmos com esta expressão na (1) pondo em ordem a uma variável que não a espessura (porque a queremos ter explícita, e se fizéssemos isso ela desaparecia), a massa vai aparecer na equação da deflexão. Como não é especificado nenhum valor para a massa, significa que esta pode tomar qualquer valor, e portanto não a vamos por a entrar nos cálculos. Então esqueçamos esta expressão.

Entrando então com a eq. (2) na (1) e simplificando resulta em

$$\delta_y = \frac{4PL^3}{Ebh^3}$$

Sabemos b e L . Mas ainda sabemos mais. O valor mínimo que a força pode atingir nas extremidades é de 15N.

$$P = 15N$$

Esse valor mínimo acontece quando a deflexão na extremidade também é mínimo, portanto

$$\delta_y = 0.5mm$$

Como só estamos a considerar a deformação segundo y , chame-se a δ_y , simplesmente δ .

Entrando então com todos os valores

$P \geq 15 N$	$b = 20 mm$
$l = 30 mm$	$\delta = 0.5 mm$

$$0.5 \geq \frac{4 \cdot 15 \cdot 30^3}{E \cdot 20 \cdot h^3} \rightarrow h \geq \left(\frac{4 \cdot 15 \cdot 30^3}{E \cdot 20 \cdot 0.5} \right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow h \geq \frac{54.51}{E^{1/3}}$$

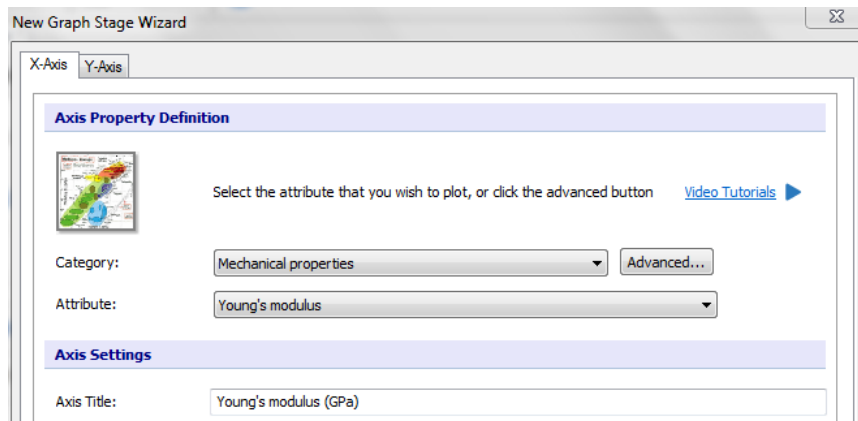
Esta inequação dá-nos o valor que corresponde a $P=15$ N. No entanto $P=20$ N também é aceitável. Ou $P=100$ N. Portanto a espessura dada pela expressão de cima é a espessura mínima (uma espessura maior requer que seja aplicada uma maior força para a mesma deflexão). Então,

$$h_{min} = \frac{54.51}{E^{1/3}} \quad (3)$$

Fica a faltar a espessura (h) e o módulo de elasticidade (E). O que significa isto? Significa que cada material, caracterizado pelo seu E , vai precisar de uma diferente espessura para satisfazer estes requerimentos. O ideal então era obtermos um gráfico que nos desse todos os E 's dos materiais e a espessura necessária se escolhermos esse material. O CES Edupack permite obter um gráfico desses. Basta por a equação (3) num dos eixos e o E no outro.

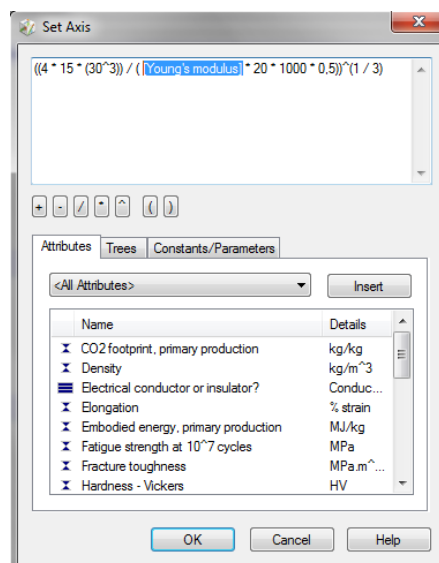
No CES Edupack fazer

File >> New project >> Graph

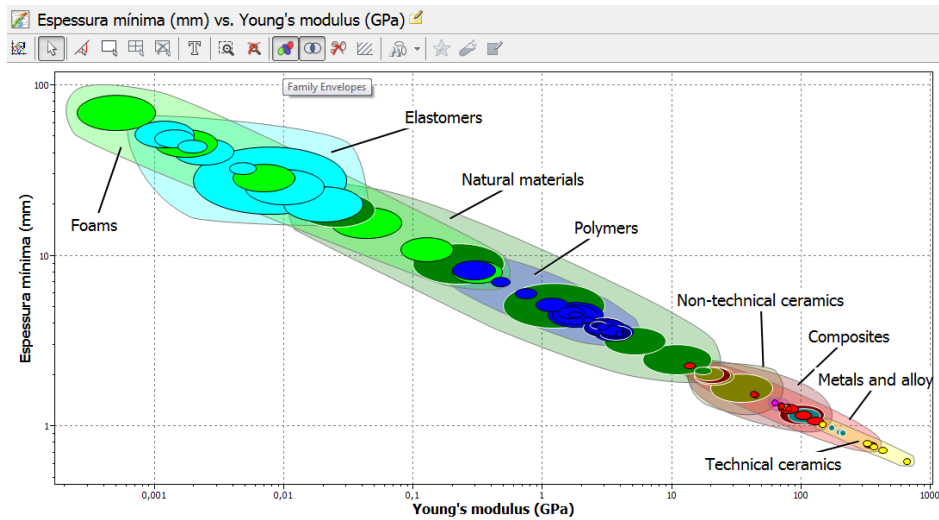


Como o E vem em GPa então à expressão de cima temos que multiplicar o E por 1000 porque como está, sai em MPa (N/mm^2).

Para o eixo y, escolher “Advanced” e pôr lá a fórmula tendo o cuidado de clicar no módulo de elasticidade em baixo, em vez de simplesmente escrever E

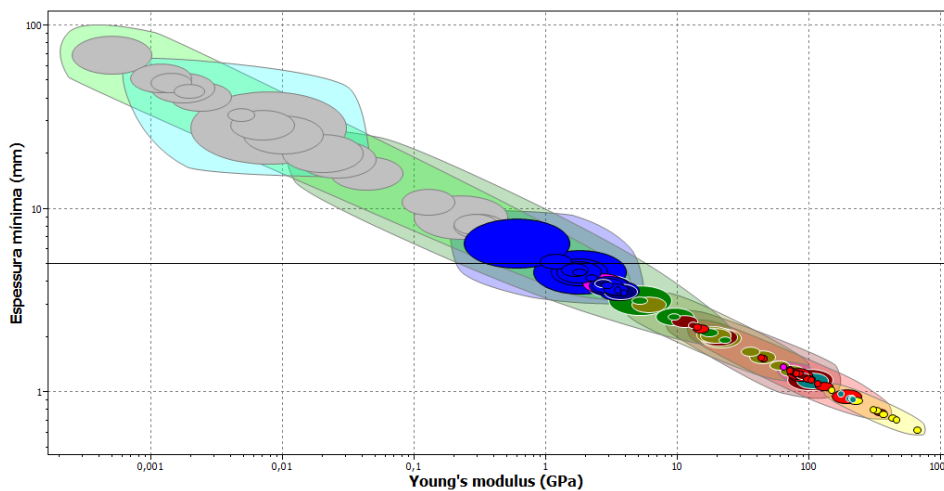


Obtém-se assim um gráfico parecido a este. Para ficar igual é carregar em *Family Envelopes* (para mostrar a família de materiais), clicar nas famílias.



O que é que podemos ver logo deste gráfico? Se quisermos fazer uma mola de elastómeros a lâmina vai ter de ter à volta de 50mm de espessura, se quisermos fazer de polímeros vai ter de ter 2mm-8mm se quisermos de metais vai ter a volta de 1mm. Portanto quanto maior o módulo de Young menor será a espessura necessária.

Não vamos querer espessuras superiores a, digamos, 5mm, caso contrário mais valia a mola ser um triângulo maciço. Entrando com essa limitação obtemos



Antes de escolher o material há ainda outra coisa a ter em consideração. Se nós escolhermos um material para uma espessura de 1mm, quem nos diz que a mola nesse material não parte ($\sigma < \sigma_r$)? Ou que não plastifica ($\sigma < \sigma_e$)? Ou que com o uso continuado não se iniciam fendas acabando por partir antes do tempo de uso previsto ($\sigma < \sigma_f$)? Todos os materiais que passaram até aqui, as únicas coisas que garantem é que para uma mola de 20 mm de largura e 30 mm de comprimento, a fletir da maneira indicada, temos sempre pelo menos 15N de força a ser aplicada para o fazer. Mas por exemplo ao usar um destes materiais nada garante que ao fim de 15 carregamentos a mola parta.

Vamos então começar por garantir que a tensão máxima instalada na lâmina seja inferior a σ_e ¹ ou seja

$$\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_e$$

A tensão numa qualquer secção a x distância do ponto de aplicação da força é dada por

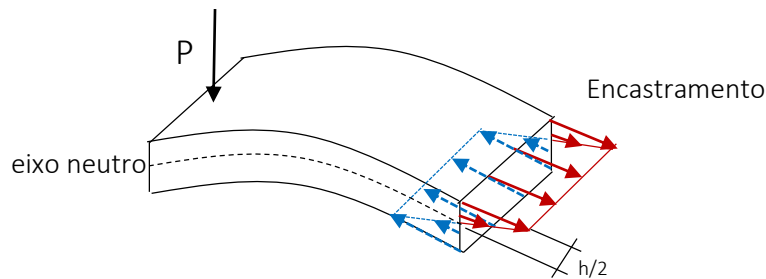
$$\sigma_x = \frac{M_y(x) \cdot y}{I_z}$$

O momento fletor é dado por $M_y(x) = Px$.

Para uma viga encastrada sujeita a uma carga simples, o $M_{m\acute{a}x}$ ocorre no encastramento e vale

$$M_{m\acute{a}x} = M(l) = P \cdot l$$

Como a tensão é máxima na periferia, portanto para uma distância do eixo neutro de $h/2$



Então

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P \cdot l \cdot y}{I_z} = \frac{P \cdot l \cdot \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} \rightarrow \frac{6 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2}$$

Portanto

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2} < \sigma_e \quad (4)$$

A tensão máxima ocorre quando P é máximo, e P é máximo para a deflexão máxima (3.5mm). Portanto $P(y = 3.5mm) \neq 15N$. Então, qual é a força?

A relação entre força e deflexão é

$$\delta = \frac{12Pl^3}{3Ebh^3}$$

Ou seja

$$\delta \propto P$$

¹ Na verdade podíamos logo tentar garantir que a tensão máxima não ultrapassa a resistência à fadiga, visto que é uma imposição mais restritiva, e portanto saltávamos este passo.

Portanto podemos usar a regra três simples. Para $\delta = 0.5 \rightarrow P = 15$ Para $\delta = 3.5 \rightarrow P = x \rightarrow x = 105N$.

Se agora pegarmos na (4) e substituímos os valores obtemos

$$h > \left(\frac{6PL}{b\sigma_e}\right)^{1/2} \rightarrow h_{min} = \left(\frac{6PL}{b\sigma_e}\right)^{1/2}$$

O que isto nos dá são os materiais que aguentam a força máxima de 105N com aquelas dimensões (b,L). No entanto, não garante que quando temos 0,5mm de deflexão a mola faz 15N... pode fazer menos. Por isso é preciso conjugar a eq. (4) que nos garante a resistência mecânica com a (3) que nos garante a força mínima.

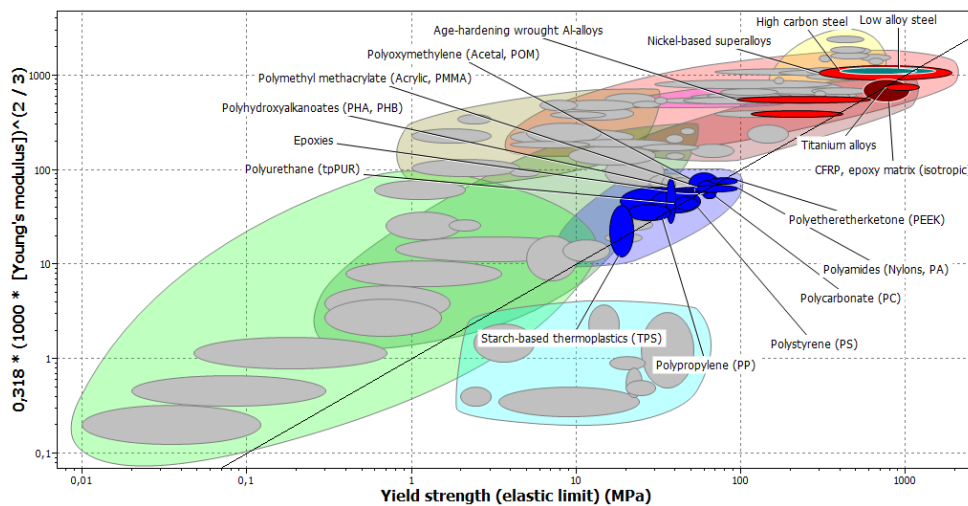
Substituindo a (3) na (4) e pondo valores numéricos

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6 \cdot P \cdot l}{b \cdot \left(\frac{54.51}{E^{1/3}}\right)^2} = \frac{6 \cdot 105 \cdot 30}{20 \cdot \left(\frac{54.51}{E^{1/3}}\right)^2} = 0.3180 \cdot E^{2/3} < \sigma_e$$

No CES põe-se uma reta com declive 1 a passar em (1,1) ou (10,10). Os materiais que estão em cima dessa reta respeitam a igualdade

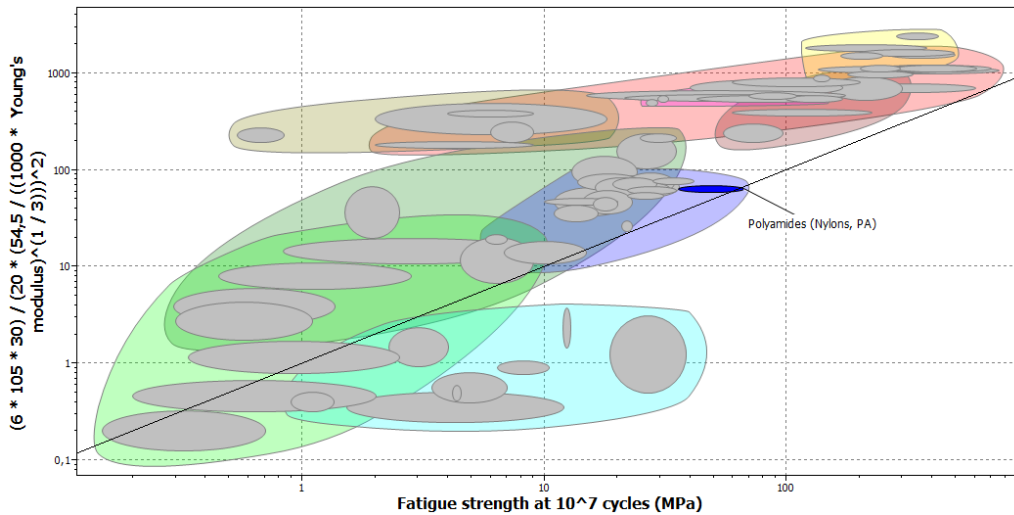
$$(\sigma_{m\acute{a}x} =) 0.3180 \cdot E^{2/3} = \sigma_e$$

Mas como nós queremos, os materiais que a superam, clica-se na parte que se pretende que é a de baixo, onde $\sigma_e > (\sigma_{m\acute{a}x} =) 0.3180 \cdot E^{2/3}$



Se escolhermos algum destes materiais temos a certeza que se escolhermos uma mola com $b=20\text{mm}$, $L=30\text{mm}$ e a pusermos a defletir da maneira proposta, ela faz sempre mais de 15N de força e não parte (pelo menos inicialmente).

No entanto, como o componente vai estar sujeito a vários ciclos, a restrição deve ter em conta a fadiga que as lâminas vão sofrer. Portanto, devemos ser mais restritivos e dizer que $\sigma_{m\acute{a}x} = 0.3180 \cdot E^{2/3} < \sigma_{f,0}$



Verifica-se que para estas condições só as poliamidas servem. No entanto, a maioria dos dados relativos à fadiga dos materiais são obtidos usando procedimentos de teste de flexão rotativa, em que $R=-1$, ou seja $\sigma_m = 0$. Contudo a maioria das situações envolvem tensões médias não nulas, como se passa neste caso. Assim, é importante saber a influência que a tensão média tem sobre os dados de laboratório para se poder utilizar corretamente as resistências à fadiga tabeladas.

Os critérios de dimensionamento à fadiga abaixo apresentados foram feitos, como normalmente o são, para $\sigma_m = 0$.

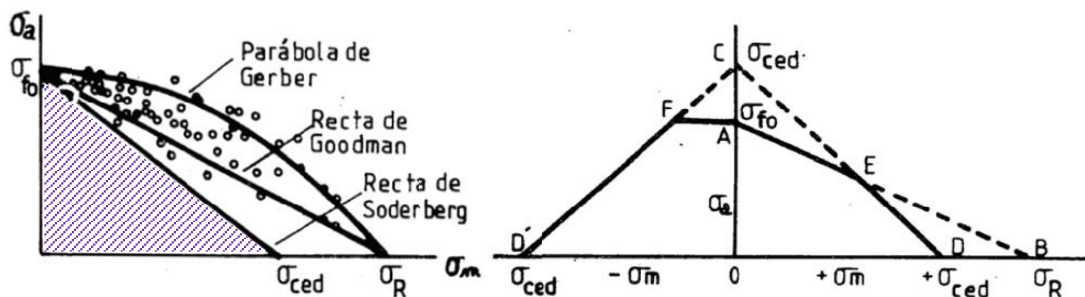


Figura 1: Esq. Retas de Soderberg e de Goodman, e parábola de Gerber. Dª Diagrama $\sigma_a - \sigma_m$, cargas axiais ou de flexão, metais dúcteis. Fonte: Juvinall, R.C. "Engineering considerations of stress and strength", McGraw-Hill, 1967.

Para os casos em que $\sigma_m = 0$, basta olhar para o eixo vertical e comparar o valor da tensão variável com o da tensão de fadiga, visto estarmos no eixo vertical. Se $\sigma_a \leq \sigma_{f0}$ estamos bem. Mas se $\sigma_m \neq 0$, passamos a estar em qualquer parte, onde só na zona roxa (se critério de Soderberg) é que estamos bem.

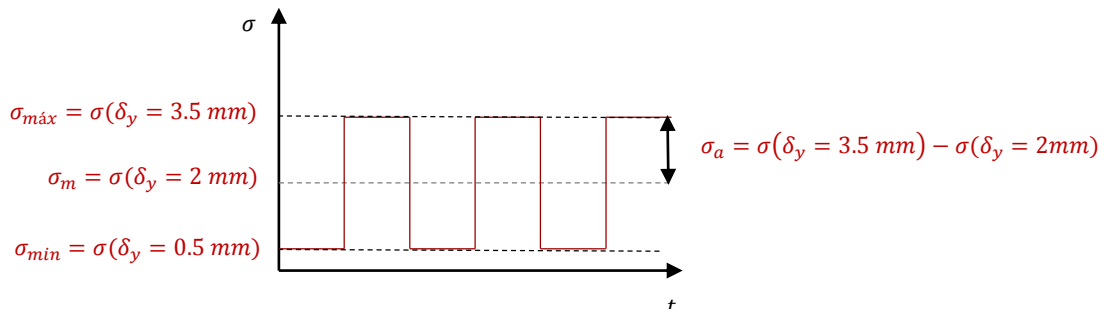


Figura 2: Tensões na mola em função do tempo

Portanto deixa de ser óbvio qual é a tensão limite de fadiga que corresponde a esse estado de tensão dinâmico. Introduzindo o diagrama de Goodman modificado é possível calcular essa nova σ_f corrigida para o facto de $\sigma_m > 0$.

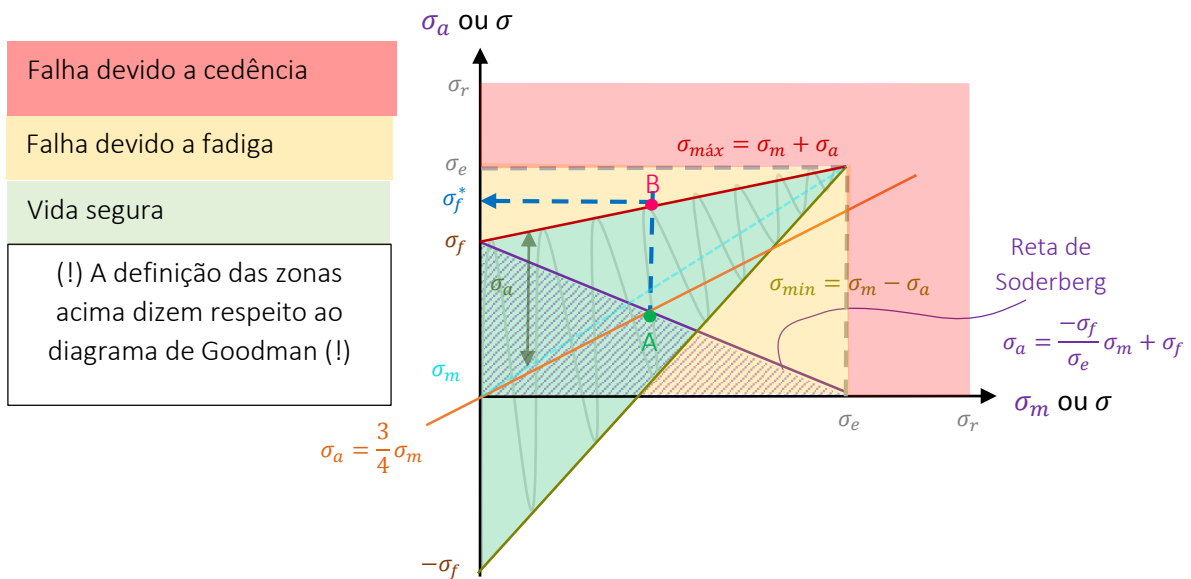


Figura 3: Diagrama de Goodman modificado + reta de Soderberg.

Nesta fase há outra coisa que é preciso entender, que é que o estado de tensão não está totalmente definido. Dependendo da espessura também a tensão vai variar. A única coisa que sabemos é a relação entre σ_a e σ_m que podemos retirar de Figura 2 e que representada dá a reta a laranja.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{3.5 - 2}{2} = \frac{3}{4} \rightarrow \sigma_a = \frac{3}{4} \sigma_m$$

Isto significa que podemos estar em qualquer parte da zona roxa, incluindo a reta roxa (de Soderberg). Em cima da reta de Soderberg estamos a dizer que a mola irá falhar à volta dos 10^7 ciclos (digo “à volta de” porque isto não é certo, mas sim provável). Como podemos estar em qq ponto da reta, digamos que estamos também em cima da reta de Soderberg, ou seja, que o estado de tensão é tal, que ao fim de aprox. 10^7 ciclos a mola falha. Então o estado de tensão é o do ponto A caracterizado por σ_a e σ_m .

Obter o valor de σ_m do ponto A²

$$\begin{cases} \sigma_a = \frac{-\sigma_f}{\sigma_e} \sigma_m + \sigma_f \\ \sigma_a = \frac{3}{4} \sigma_m \end{cases} \rightarrow \left\{ \frac{3}{4} \sigma_m = \frac{-\sigma_f}{\sigma_e} \sigma_m + \sigma_f \rightarrow \left\{ \sigma_m \left(\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e} \right) = \sigma_f \rightarrow \left\{ \sigma_m = \frac{\sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} \right. \right. \right.$$

² Ao projetarmos a mola para se encontrar no ponto A, estamos a projetá-la para falhar à volta dos 10^7 ciclos. Se projetássemos a mola para estar abaixo da reta de Soderberg ela **nunca** iria falhar no caso de ser de um aço ou outro material com um patamar de fadiga bem definido (σ_f), ou só ao fim de mais de 10^7 ciclos no caso de outros materiais como pex ou Al (σ_{f0}). Neste caso como vamos ver adiante, até podíamos por o ponto A acima da reta de Soderberg porque 10^7 ciclos é tempo demais, ela só precisa de durar 2 meses. Outra coisa, cuidado que o gráfico em cima é uma sobreposição de dois gráficos que geralmente se vêem separados. No final desenhei apenas o de Goodman modificado para melhor se entender isto.

Introduzir o valor de σ_m do ponto A na reta de $\sigma_{m\acute{a}x}$ para obter o ponto B. Para isso é preciso determinar a reta de $\sigma_{m\acute{a}x}$.³

$$\sigma = \frac{\sigma_e - \sigma_f}{\sigma_e - 0} \sigma_m + \sigma_f \rightarrow \sigma = \frac{\sigma_e - \sigma_f}{\sigma_e} \sigma_m + \sigma_f$$

Introduzindo então σ_m nessa equação

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_e - \sigma_f}{\sigma_e} \sigma_m + \sigma_f \rightarrow \sigma = \frac{\sigma_e - \sigma_f}{\sigma_e} \cdot \frac{\sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} + \sigma_f \rightarrow \sigma = \frac{\sigma_e \sigma_f - \sigma_f^2}{\frac{3}{4} \sigma_e + \sigma_f} + \sigma_f \\ &= \frac{\sigma_e \sigma_f - \sigma_f^2 + \frac{3}{4} \sigma_e \sigma_f + \sigma_f^2}{\frac{3}{4} \sigma_e + \sigma_f} = \frac{\frac{7\sigma_e \sigma_f}{4}}{\frac{3}{4} \sigma_e + \sigma_f} \\ \rightarrow \sigma &= \frac{\frac{7}{4} \sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} \end{aligned}$$

O valor da ordenada é σ_f^* , o que equivale a dizer $\sigma = \sigma_f^*$ ou seja

$$\sigma_f^* = \frac{\frac{7}{4} \sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}}$$

Agora dizemos então qe $\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_f^*$ ou seja

$$0.3180 \cdot E^{\frac{2}{3}} < \frac{\frac{7}{4} \sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} \quad (5)$$

Nota: se fizermos

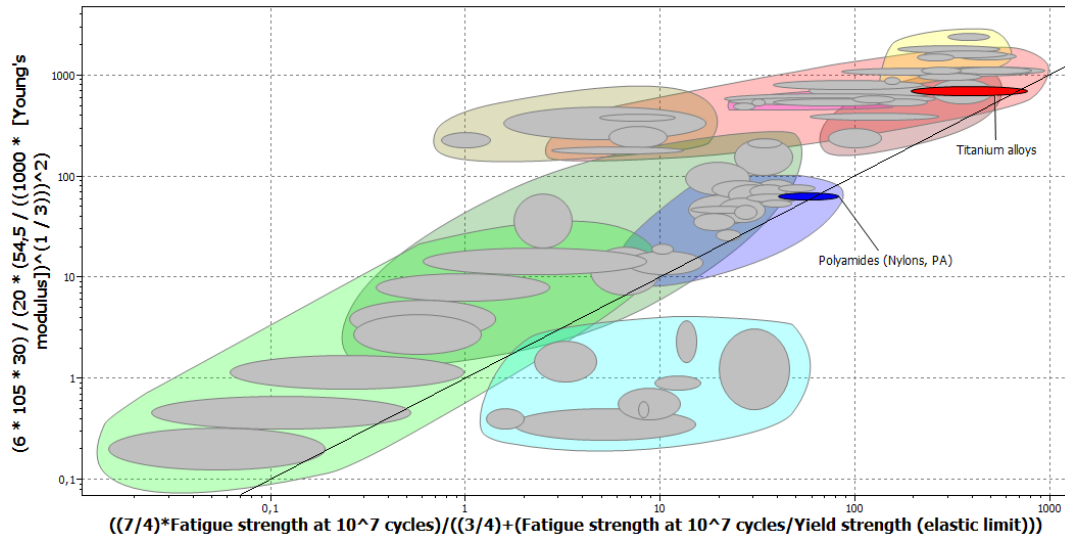
$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_m + \sigma_a$$

Decidíamos tal como no caso anterior projetar para falha aos 10^7 ciclos, e tirávamos o estado de tensão definido no ponto A caracterizado por σ_m e σ_a , e substituíamos os seus valores na equação de cima,

$$\begin{aligned} \sigma_{m\acute{a}x} &= \frac{\sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} \\ \sigma_{m\acute{a}x} &= \frac{7}{4} \cdot \frac{\sigma_f}{\frac{3}{4} + \frac{\sigma_f}{\sigma_e}} \end{aligned}$$

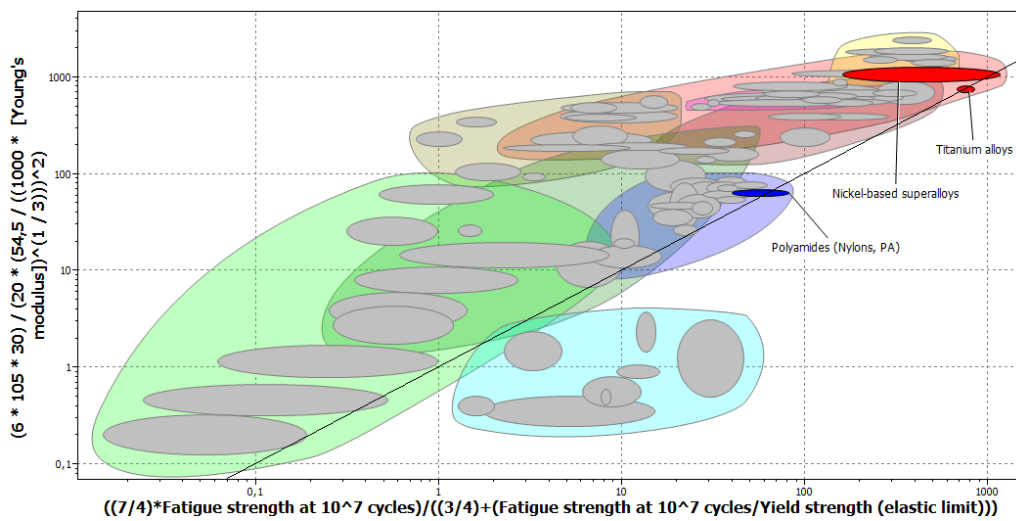
Em que esta nova $\sigma_{m\acute{a}x}$ vale σ_f^* . Depois era dizer o mesmo que dissemos logo antes de xermos à eq. 5.

³ Esta equação foi obtida considerando que a reta de $\sigma_{m\acute{a}x}$ termina no ponto (σ_e, σ_e) . Como está desenhado isso não acontece.

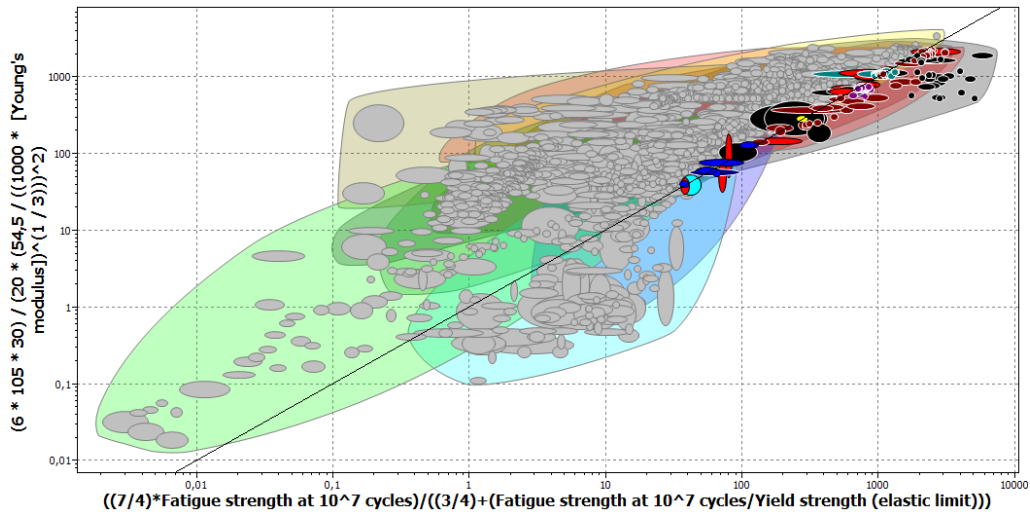


Esta condição, eq. 5, pode então substituir as duas anteriores $\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_e$ e $\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_f$. Se quiséssemos até podíamos ter feito logo só esta.

Agora será uma boa altura para elevar o nível dos dados que o CES Edupack está a usar para obtermos os materiais porque já estamos muito restringidos. Vamos passar do nível básico para o médio.



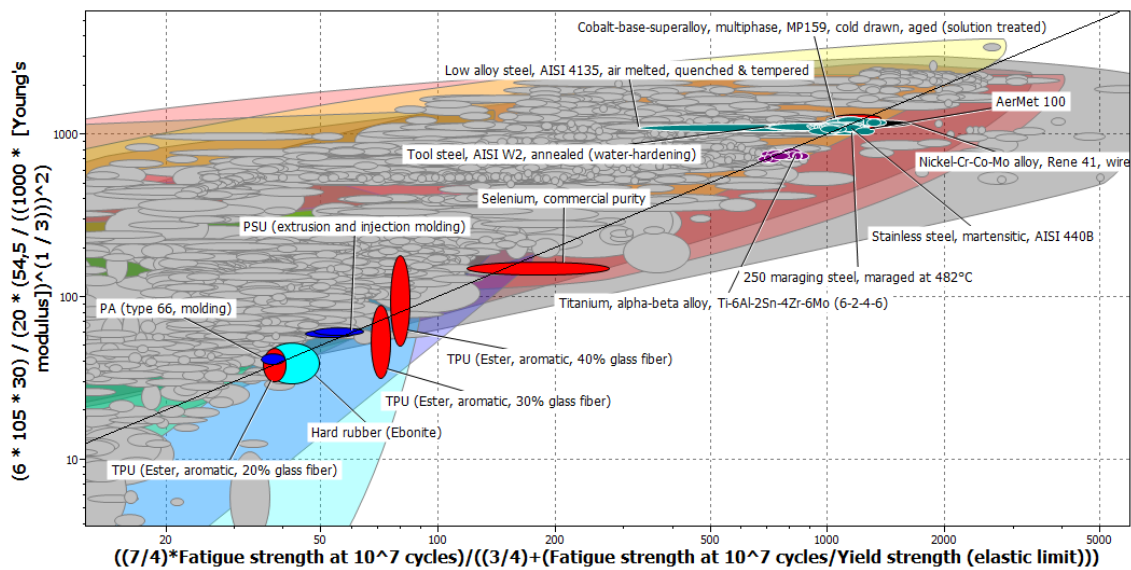
E do nível médio para o avançado.



Vamos agora adicionar algumas restrições:

- 1) Eliminar todos os materiais qe não sejam poliméricos ou metais;
- 2) Qe tenham preço < 20 €/kg para remover materiais exóticos.

E fazer um zoom ao canto superior direito



Destes materiais, vamos então ser um pouco conservadores e analisar apenas os mais conhecidos:

- 1) Aços inox martensíticos ;
- 2) Aços mola (low alloy steel) ;
- 3) Aços ferramenta (tool steel) ;
- 4) Ligas Ti ;
- 5) PA (Nylon).

Chega agora a altura de analisar o cumprimento das especificações 6-10.

- O comportamento com umidade foi baseado na rubrica “durabilidade em água doce (*fresh water*)”.

- A resistência à abrasão foi estimada do seguinte modo:
- A areia comum (sílica) tem uma dureza aproximada de 7 Mohs (escala de dureza mineral), o que corresponde a 982 HV. Se um material obtiver dureza superior a esse valor obterá a nota de excelente. A cada $982/4 = 245\text{HV}$ a menos que tiver, reduz um nível. Então:
 - > 982 → excelente
 - 982-737 → Bom
 - 737-492 → Razoável
 - 492-247 → Fraco
 - 0-247 → Mau
- Nessa tabela, admitiu-se que os aços mola e os ferramenta levarão uma proteção de tinta c/ ou s/ galvanização, portanto as resistências à água e à abrasão na verdade refletem mais a qualidade dessa proteção do que dos aços em si.
- Entrou-se com o fator preço para revelar a proximidade ao valor limite de 20€/kg. Como há 5 níveis de qualidade, cada 4€/kg corresponde a um nível
 - 0-4 → Excelente
 - 4-8 → Bom
 - 8-12 → Razoável
 - 12-16 → Fraco
 - 16-20 → Mau
- Como existem muitos materiais para cada grupo, o preço utilizado é o preço médio.
- Análise do comportamento a 20°C
 - Temperatura de transição vítrea para o Nylon,
 - Temperatura de fusão e temperatura mínima de serviço para os metais.

Uma das características mais distintas dos polímeros é a extrema dependência das suas propriedades mecânicas com o tempo e temperatura.

Um dos primeiros aspetos que podemos analisar é o facto de devido à propriedade de visco-elasticidade dos polímeros, a taxa de deformação influenciar o módulo de elasticidade, tensão de limite elástico e de rotura. Neste caso a deformação é (praticamente?) instantânea portanto obtemos os valores máximos.

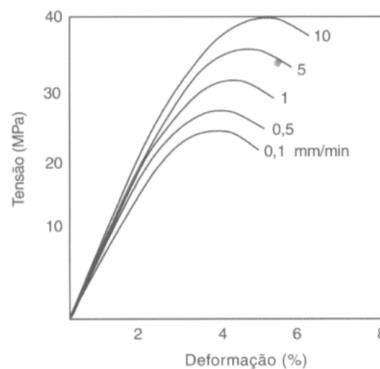


Figura 4: Efeito da taxa de deformação (velocidade de deformação em mm/min) nas curvas de tração do epóxi. ^[4]

Outras duas das formas que tal dependência com o tempo se manifesta é pela fluência ou pela relaxação de tensão, os quais são exacerbados pelo aumento de temperatura. Neste caso a imposição é a deformação da mola, visto que ela é sujeita a dois estados de flexão de 3.5mm e 0.5mm. Assim o parâmetro a analisar é a relaxação de tensões, o que significa que quando a mola é sujeita a uma deformação a tensão aplicada para manter essa deformação diminui com o tempo. Também a imposição de 15N para o estado de flexão de 0.5mm deixará de se verificar com o tempo devido ao efeito de relaxação.

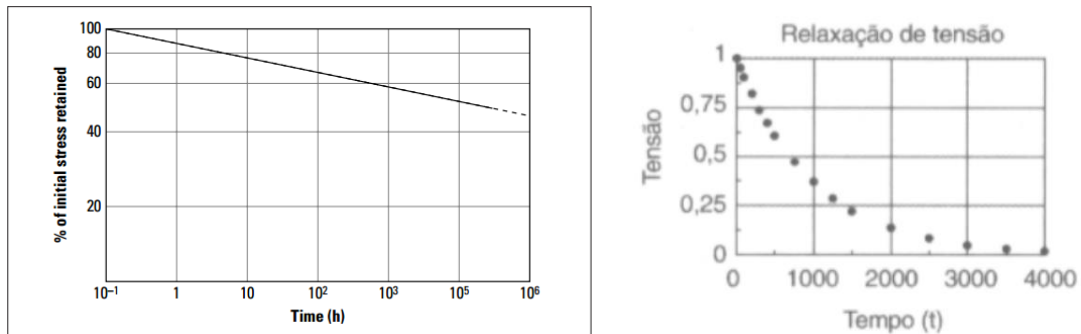


Figura 5: Esq. Relaxação de tensões numa em vigas cantilever de Zytel 101 Nylon. Tensão inicial de 13.8 MPa.^[5] D^a: Curva de relaxação de tensões usando um modelo teórico (Maxwell), que geralmente espelham bem a realidade. ^[4]

A figura em baixo representa, de uma forma exagerada para melhor se entender, o argumento que se está a defender.

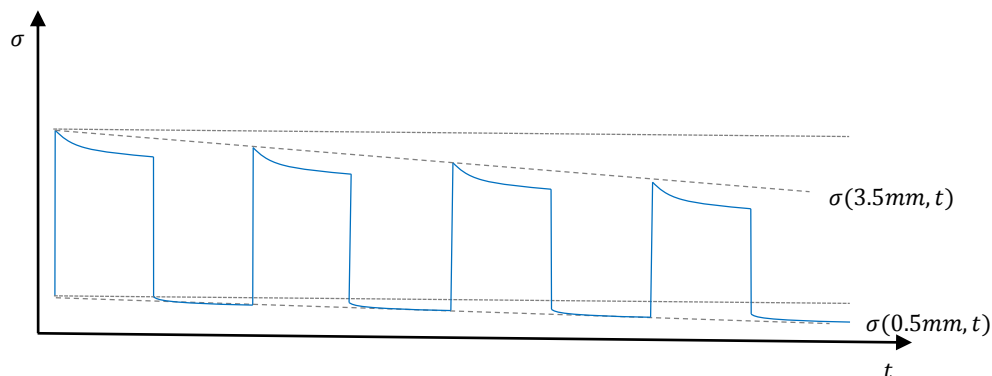


Figura 6: O efeito da relaxação de tensões na tensão aplicada à mola para suster as deformações cíclicas de 3.5 e 0.5mm ao longo do tempo.

Além disso há ainda qe considerar o facto de o número de ciclos ser elevado e a mola estar a uma temperatura de 20°C. Ao contrário dos metais cuja variação das propriedades com a temperatura é suave e apenas distinta para grandes variações de temperaturas, tal não é o caso com os polímeros. Com efeito, enquanto que os blocos de lego dos metais são pequenos e facilmente se organizam em estruturas cristalinas, as dos polímeros são grandes e têm formas de cadeias compridas qe resultam num estrutura emaranhada. A falta de uma estrutura padronizada dá lugar a uma situação em que mudanças na temperatura modestas influenciam sempre as propriedades mecânicas do polímero. O Nylon 66 é um polímero semi-cristalino pelo qe tem um mix das duas estruturas.

A maioria desta alteração das propriedades ocorre à temperatura de transição vítrea, T_g . Como se pode ver nas figuras, o módulo de elasticidade varia muito nessa fase. Só não vai para zero como por exemplo o PC, porque a parte da estrutura do Nylon que é cristalina está lá. O PC vai a zero porque é amorfo.

Para a escolha da mola, podemos ver que existe uma grande variação de T_g entre fornecedores. O Nylon Ultramid® A3K conditioned | PA66 é certamente inaceitável para a mola, enquanto que o Zytel® 101L NC010 dry | PA66 será uma possível escolha.

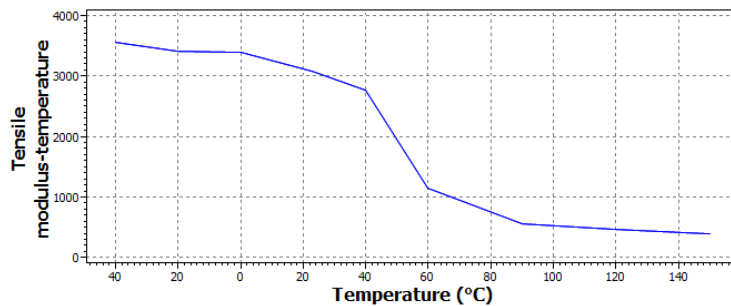


Figura 7: Zytel® 101L NC010 dry | PA66 [3]

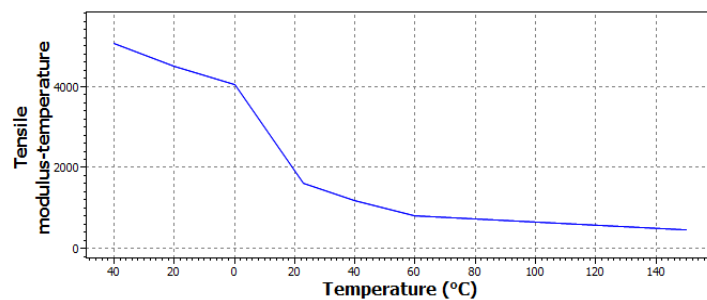





























Figura 8: Ultramid® A3K conditioned | PA66 [3]

(O valor do E no CES é entre 1.3-1.6 GPa para o PA66, no entanto aqui vemos valores na ordem dos milhares... que se passa? Além disso não consegui encontrar em lado nenhum a temperatura a que é feita determinação do módulo de elasticidade. Assumindo que é a uma temperatura ambiente de 20°C teríamos equivalência entre o valor das propriedades no CES e o valor que o nylon teria em serviço, que tb é a 20°C).

Idealmente apresentaria também gráficos módulo de elasticidade, tempo e temperatura, mas nenhum dos fornecedores de PA 66 do CES Edupack fornece tal gráfico.

Assim, devido ao fenómeno de relaxação dos polímeros, numa primeira análise não recomendaria nenhum polímero como material da mola propriamente dita. No entanto o corpo da mola poderá, caso se venha a verificar compatível com o material escolhido para a mola, ser feito em polímero visto aí o problema da relaxação não se aplicar.

Tabela 1 -  Excelente, + Bom,  Razoável, - Pobre,  Mau.  Escolha Acertada.

	 Aços inox martensíticos	Aços mola	Aços ferramenta	Ligas Ti	Nylon	Média
Resistência ao spray de água salgada		+	+		 ⁴	
Resistência à abrasão (HV)	 (640)	 (530)	+	 ⁵ (330)	 (17)	
Comportamento com umidade		+	+			
Radiação UV					-	+
Preço (€/kg)	+	+			+	+
	(1.04)	(0.45) ⁶	(7.5) ⁷	(18.2)	(3.8)	
Comportamento a 20°C					 / -	+
Média		+	+	+		

Cálculo do nº de ciclos a que a mola irá estar sujeita nos seus dois meses de trabalho.

$$\frac{2\text{meses} \cdot 30 \text{ dias/mês} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{10 \text{ s (período)}} = 0.05184 \cdot 10^7 \text{ ciclos}$$

Lembrar que os nossos cálculos da fadiga foram feitos para $1 \cdot 10^7$ ciclos, portanto esta mola na verdade teria capacidade para durar 20x mais tempo (ou seja 20*2 meses = 3 anos e 4 meses).

Contudo, antes de escolher já fazer a mola em aço inox martensítico é preciso verificar se é possível facilmente produzir 10 000 unidades.

Discussão de sugestões para processo de fabrico da mola

Relativamente ao processo de fabrico há basicamente duas aproximações (falando da parte A): ou nós construímos o conjunto numa peça só 1), ou construímos o corpo e depois as lâminas 2).

1) A maneira mais simples é pegar numa chapa de aço inox martensítico, dobrá-la e ficamos com o “V” da mola. E agora temos de arranjar maneira de ligar a lâmina ao corpo: por aparafusamento, por soldadura,... De qualquer maneira a ligação não é muito crítica porque o próprio funcionamento da mola comprime a lâmina contra o corpo.

Se decidirmos fazer a mola em aço ou Ti, se calhar tb é melhor fazer o corpo num polímero, qe assim tb fica mais barato do qe ser tudo em aço ou Ti.

⁴ No entanto encontrei aquilo que penso ser uma contradição. O Nylon PA66 apresenta nível de “excelente” no CES Edupack. No entanto vendo no catálogo da DuPont^[5] observo uma diminuição significativa de várias das suas propriedades mecânicas com o aumento da umidade.

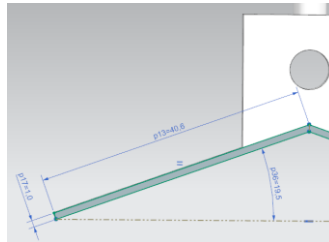
⁵ Não entrou no cálculo a única liga com dureza na ordem dos 40HV.

⁶ Este valor não inclui o preço da galvanização / pintura, pelo que o preço real será superior.

⁷ Existe uma grande variância dos valores ($\sigma_{\text{preço}}^2 = 9.36\text{€/kg}$). O valor máximo foi 13€/kg e o mínimo 3.5 €/kg.

Posto tudo isto, a minha sugestão final será:

- 1) fazer a mola propriamente dita em aço inox martensítico
 - a. exemplo: AISI 440C, temperado a 316°C. Escolhi este porque dos 6 inox martensíticos este tem um baixo custo, maior dureza e as restantes propriedades estão em linha com os outros 5 inox.
 - b. Custo entre 0.981—1.09€/kg
 - c. $E_{médio} = 200 \text{ GPa}$ o qe substituindo na eq. (1) resulta em $h_{min} = 0.93\text{mm}$ o qe podemos arredondar para 1mm para ser mais fácil obter chapas dessa espessura.
 - d. Puncionar chapas de 1mm espessura em retângulos de $\left(\frac{10}{\cos(19.47^\circ)} + 30\right) \times 20$ mm
 - e. Quinar cada retângulo a meio para um ângulo de 19.47°



- 2) Fazer o corpo num polímero barato mas com qualidade suficiente que cumpra as especificações que se lhe aplicam, se bem qe com um grau de exigência menor — resistência à água salgada, abrasão, humidade, UV, 20°C, fadiga à compressão, encurvadura. Visto que o objetivo principal era selecionar o corpo da mola, analisando apenas os polímeros, decido escolher o PP ou PVC. O se for feito em PP poderá facilmente ser por injeção, se for por PVC, este é mais apropriado para extrusão. No entanto o corpo da mola não é tão simples de extrudir como é de injetar. A ser extrudido talvez tivesse que o ser em duas fases. Numa primeira fase extrudia-se a coluna e na segunda aquela espécie de cubo com o furo. Depois estes teriam que ser ligados de alguma forma, por exemplo com um adesivo.

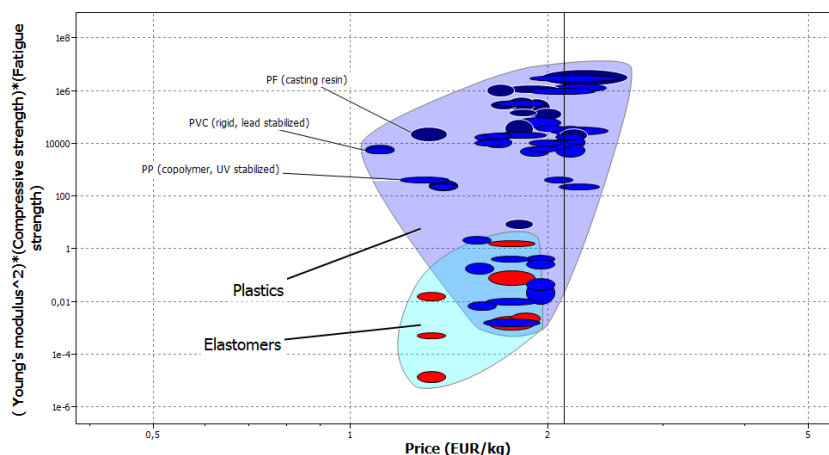


Figura 9: Seleção muito muito expedita do material para o corpo da mola.

- 3) Ligar o corpo e mola por exemplo por meio de um adesivo. A mola é muito fina para ligar por parafusos.

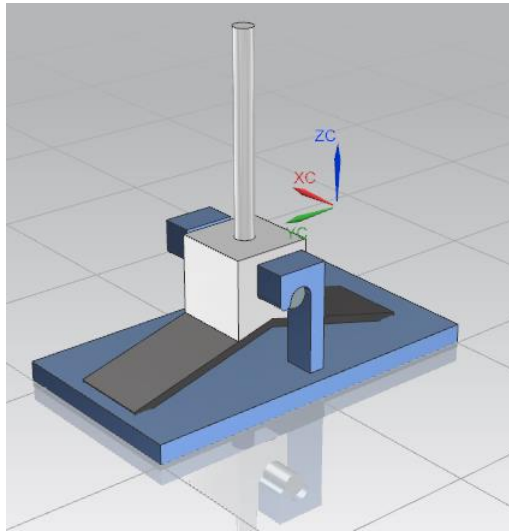


Figura 11: Modelo final do conjunto em Unigraphics, NX9.

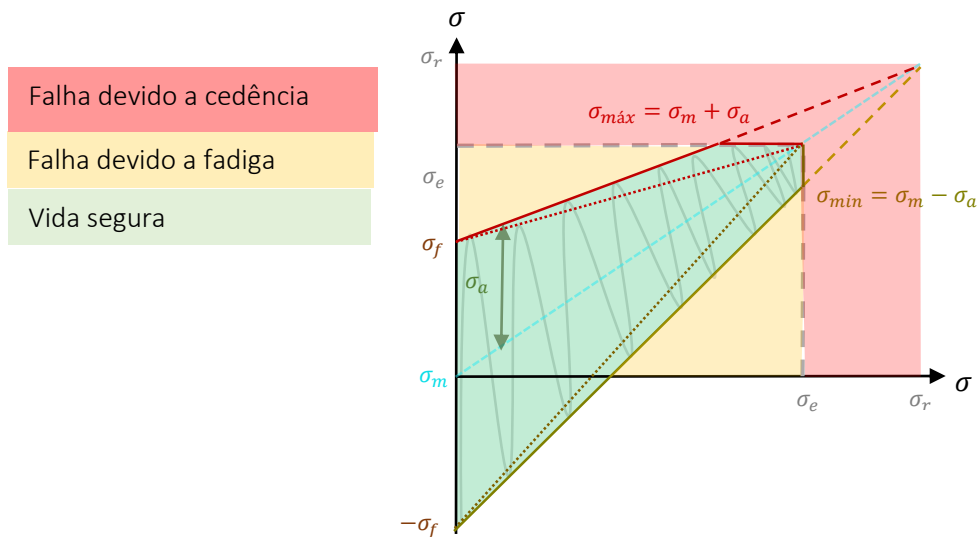


Figura 10: Diagrama de Goodman modificado. A tracejado a simplificação usada neste exercício, qe apesar disso nos coloca do lado da segurança por ser mais restritiva. Essa simplificação foi feita porque é muito mais fácil determinar a eq. da reta vermelha pontilhada do que a da reta inclinada a traço contínuo.

Referências:

- [1] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. (2011). "Shigley's Mechanical Engineering Design". 9th Ed. McGraw-Hill:New York . pp.266-368.
- [2] Paulo Tavares de Castro. (2013) "Dimensionamento à fadiga".
- [3] CES Edupack v.2014.
- [4] Sebastião V. Canevarolo. (2007). "Ciência dos polímeros". 2ªEd. pp.139-168.
- [5] DuPont™ Minlon® and Zytel®. "Design Information – Module II". Disponível online em <http://plastics.dupont.com/plastics/pdf/europe/zytel/ZYTDGe.pdf>. Acedido a 8/11/2014.