

LISTA DE EXERCÍCIOS INTEGRADA

Revisão Matemática, Equilíbrio, Propriedades Mecânicas e Torção

Disciplina: Resistência dos Materiais | Aulas 1 a 4

Objetivo da lista

Esta lista foi formulada para exigir interpretação mecânica, escolha adequada de hipóteses, organização da memória de cálculo e validação física do resultado. O aluno não deve apenas substituir dados em fórmulas: deve justificar o modelo adotado, organizar unidades, construir o diagrama de corpo livre quando necessário e interpretar o significado mecânico do resultado obtido.

Instruções ao aluno

- Apresente obrigatoriamente o roteiro técnico antes dos cálculos de cada questão.
- A memória de cálculo deve conter: dados, conversões, desenho ou DCL quando pertinente, equações, substituições numéricas, unidades e interpretação final.
- Use a diretriz N–mm–MPa em problemas de tensão normal, tensão cisalhante e deformação axial, salvo quando o enunciado exigir SI completo.
- Em problemas de torção, mantenha coerência dimensional: torque em N·m, comprimentos em m, J em m⁴, G em Pa e ângulo em radianos.
- Respostas numéricas sem roteiro, sem unidade ou sem interpretação mecânica devem ser consideradas incompletas.

Aula	Conteúdos mobilizados	Competência exigida	Exercícios
Aula 1	Unidades, áreas, trigonometria, sistemas lineares, tensão média.	Converter, modelar e validar dimensões.	1, 2, 3
Aula 2	Decomposição de forças, equilíbrio translacional, esforço normal, cisalhamento, Hooke.	Construir DCL, resolver equilíbrio e calcular tensões/deformações.	2, 3, 4, 5
Aula 3	Curva tensão–deformação, elasticidade, plasticidade, Poisson, fadiga, fluência, ensaios.	Interpretar comportamento mecânico e modo de falha.	4, 6, 7
Aula 4	Momento vetorial 3D, torque, DMT, J, tensão em torção, ângulo de torção.	Classificar esforços, montar DMT e dimensionar eixos.	8, 9, 10

Questão 1 — Inspeção dimensional, área resistente e verificação de tensão admissível

Enunciado: Um tirante tubular de aço possui diâmetro externo de 32 mm e diâmetro interno de 20 mm. Ele trabalha sob força axial de tração $P = 72$ kN. O aço possui limite de escoamento $f_y = 250$ MPa, e o projeto adota fator de segurança $FS = 1,50$ em relação ao escoamento. Determine: (a) a área resistente da seção; (b) a tensão normal média; (c) a tensão admissível; (d) se o tirante atende ao critério de segurança; (e) qual seria o erro percentual na tensão se o aluno tratasse a seção como maciça de 32 mm.

Roteiro técnico obrigatório

- Identificar que a seção é anular, não maciça.
- Converter P de kN para N e manter as dimensões em mm para obter tensão em MPa.
- Calcular a área resistente pela diferença entre a área externa e a área vazada.
- Calcular $\sigma = P/A$ e comparar com $\sigma_{adm} = f_y/FS$.
- Recalcular a tensão de forma incorreta, como seção maciça, apenas para diagnosticar o erro conceitual.
- Concluir tecnicamente: atende ou não atende, e por quê.

Memória de cálculo esperada: dados; fórmula da área anular; conversão de força; cálculo de σ ; cálculo de σ_{adm} ; comparação; diagnóstico do erro de modelagem.

Questão 2 — Nó sustentado por dois tirantes: decomposição de forças e sistema linear

Enunciado: Um ponto de ligação sustenta uma carga vertical de 12 kN. Dois tirantes prendem esse ponto ao teto. O tirante A sobe para a esquerda formando 30° com a horizontal; o tirante B sobe para a direita formando 55° com a horizontal. Admita cabos ideais, sem peso próprio e trabalhando apenas à tração. Determine: (a) as forças de tração T_A e T_B ; (b) as componentes horizontais e verticais de cada tirante; (c) a tensão normal média em cada tirante, considerando ambos com diâmetro de 10 mm; (d) qual tirante é mais crítico e por quê.

Roteiro técnico obrigatório

- Desenhar o nó isolado e representar as três forças: T_A , T_B e a carga vertical.
- Adotar convenção de sinais: direita e cima positivos.
- Decompor T_A e T_B em componentes x e y , respeitando os sentidos.
- Montar $\sum F_x = 0$ e $\sum F_y = 0$.
- Resolver o sistema linear para T_A e T_B .
- Calcular a área circular dos tirantes e as tensões médias.
- Interpretar qual elemento é mais solicitado, usando força e tensão como argumentos.

Memória de cálculo esperada: DCL; equações de equilíbrio; sistema linear; solução das incógnitas; decomposição numérica; área circular; tensão; conclusão crítica.

Questão 3 — Bloco em plano inclinado com força horizontal e verificação de contato

Enunciado: Um bloco de massa 50 kg permanece em repouso sobre um plano inclinado sem atrito, com inclinação de 25° em relação à horizontal. Uma força horizontal P é aplicada sobre o bloco para impedir que ele deslize. A área de contato idealizada entre o bloco e o plano é de 4.000 mm^2 . Considere $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Determine: (a) o valor de P ; (b) a reação normal N do plano; (c) a tensão média de compressão de contato; (d) explique por que a força horizontal também altera a reação normal.

Roteiro técnico obrigatório

- Construir o DCL do bloco, com peso, força horizontal e reação normal.
- Escolher eixos paralelos e perpendiculares ao plano inclinado.
- Decompor o peso e a força horizontal nesses eixos.
- Aplicar equilíbrio ao longo do plano para calcular P .
- Aplicar equilíbrio perpendicular ao plano para calcular N .
- Calcular a tensão média de contato por $\sigma = N/A$.
- Interpretar fisicamente o efeito de P sobre a normal.

Memória de cálculo esperada: DCL; escolha de eixos; decomposição trigonométrica; equilíbrio; tensão média; unidade MPa; interpretação.

Questão 4 — Barra tracionada: regime elástico, alongamento e contração lateral

Enunciado: Uma barra cilíndrica de aço possui comprimento inicial $L_0 = 1,20 \text{ m}$ e diâmetro inicial $d_0 = 20 \text{ mm}$. Ela recebe força axial de tração $P = 45 \text{ kN}$. Considere $E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0,30$ e $f_y = 250 \text{ MPa}$. Determine: (a) a tensão normal média; (b) se o regime elástico é admissível; (c) a deformação longitudinal; (d) o alongamento total; (e) a deformação lateral; (f) a variação aproximada do diâmetro. Em seguida, responda conceitualmente: se P fosse duplicada para 90 kN , ainda seria aceitável usar a Lei de Hooke para estimar o alongamento total?

Roteiro técnico obrigatório

- Converter L_0 para mm, P para N e E para MPa.
- Calcular a área circular inicial da barra.
- Calcular $\sigma = P/A$ e comparar com f_y .
- Somente se $\sigma < f_y$, aplicar $\epsilon = \sigma/E$.
- Calcular $\Delta L = \epsilon L_0$.
- Usar $\epsilon_{lat} = -\nu \epsilon_{long}$ para obter a contração lateral.
- Calcular $\Delta d = \epsilon_{lat} d_0$.
- Avaliar o caso $P = 90 \text{ kN}$ pela comparação com f_y , antes de aplicar qualquer fórmula elástica.

Memória de cálculo esperada: dados; conversões; área; tensão; comparação com escoamento; deformações longitudinal e lateral; alongamento; conclusão sobre validade do modelo.

Questão 5 — Ligação por pino em duplo cisalhamento e barra tracionada

Enunciado: Uma barra chata de aço, de largura 30 mm e espessura 8 mm, é tracionada por $P = 18$ kN. A carga é transmitida a uma ligação por um pino circular de diâmetro 12 mm em duplo cisalhamento. Considere tensão normal admissível da barra $\sigma_{adm} = 120$ MPa e tensão cisalhante admissível do pino $\tau_{adm} = 70$ MPa. Determine: (a) a tensão normal média na barra; (b) a tensão cisalhante média no pino; (c) se cada elemento atende ao critério admissível; (d) o diâmetro mínimo do pino para atender τ_{adm} , mantendo duplo cisalhamento.

Roteiro técnico obrigatório

- Separar os mecanismos resistentes: barra em tração normal e pino em cisalhamento.
- Calcular a área retangular da barra.
- Calcular a área de cisalhamento do pino lembrando que há dois planos de corte.
- Calcular $\sigma = P/A_{barra}$ e $\tau = P/A_{cis, total}$.
- Comparar cada tensão com seu limite admissível correspondente.
- Para redimensionar o pino, isolar d na expressão de duplo cisalhamento.
- Concluir qual componente governa a segurança da ligação.

Memória de cálculo esperada: modelo resistente; áreas; tensões; comparação com admissíveis; dimensionamento mínimo; conclusão sobre elemento crítico.

Questão 6 — Leitura crítica de uma curva tensão–deformação idealizada

Enunciado: Um material metálico foi ensaiado em tração. A tabela abaixo apresenta valores de tensão de engenharia e deformação de engenharia. Com base nos dados, determine: (a) o módulo de elasticidade aproximado no trecho linear; (b) o limite proporcional aproximado; (c) o limite de escoamento adotável; (d) a resistência última; (e) se o material é dúctil ou frágil; (f) a energia de resiliência aproximada, usando $ur = f_y^2/(2E)$; (g) explique por que resistência e rigidez não são a mesma propriedade.

Roteiro técnico obrigatório

- Construir mentalmente ou em esboço a curva $\sigma \times \epsilon$.
- Identificar o trecho aproximadamente linear inicial.
- Calcular E pela inclinação $\Delta\sigma/\Delta\epsilon$ no trecho elástico.
- Localizar o ponto em que a curva deixa de ser linear.
- Identificar escoamento, pico de tensão e tendência à ruptura.
- Usar f_y e E para estimar a resiliência.
- Concluir sobre ductilidade pela deformação plástica antes da ruptura.
- Diferenciar rigidez, associada a E, de resistência, associada a f_y e f_u .

Memória de cálculo esperada: tabela; esboço da curva; cálculo da inclinação; identificação dos pontos característicos; resiliência; interpretação de ductilidade e rigidez.

Deformação ϵ (mm/mm)	Tensão σ (MPa)
0,0000	0
0,0005	100
0,0010	200
0,00125	250
0,0040	255
0,0100	300
0,0800	430
0,1500	380

Questão 7 — Escolha do ensaio mecânico e identificação do modo de falha

Enunciado: Para cada situação abaixo, indique o ensaio mecânico mais adequado, a propriedade principal obtida e o modo de falha que se pretende prevenir: (a) verificar f_y de um aço para barras tracionadas; (b) avaliar se um eixo rotativo suporta 10^7 ciclos; (c) verificar a resistência superficial de uma engrenagem cementada; (d) avaliar deformação lenta de componente metálico a alta temperatura; (e) comparar dois materiais submetidos a ruptura súbita por impacto; (f) verificar se um material rompe com pequena deformação plástica.

Roteiro técnico obrigatório

- Ler cada situação como um problema de decisão de engenharia, não como cálculo numérico.
- Identificar a sollicitação dominante: estática, cíclica, superficial, tempo-temperatura, impacto ou

ruptura frágil.

- Associar a sollicitação ao ensaio correspondente.
- Registrar a propriedade obtida pelo ensaio.
- Explicar o modo de falha que a escolha do ensaio busca evitar.
- Concluir com justificativa técnica curta para cada item.

Memória de cálculo esperada: quadro situação–ensaio–propriedade–modo de falha; justificativa técnica para cada escolha.

Questão 8 — Momento vetorial em 3D e classificação entre torção e flexão

Enunciado: Uma barra cilíndrica está engastada na origem e seu eixo longitudinal principal coincide com o eixo z . Uma força $F = (-150\mathbf{i} + 80\mathbf{j} + 200\mathbf{k})\text{ N}$ é aplicada em um ponto cuja posição em relação ao engaste é $r = (0,20\mathbf{i} + 0,40\mathbf{j} + 1,20\mathbf{k})\text{ m}$. Determine: (a) o vetor momento $M_0 = r \times F$; (b) a componente que representa momento torçor na barra; (c) as componentes de momento fletor; (d) o módulo do momento fletor resultante; (e) interprete o sinal da componente torçora.

Roteiro técnico obrigatório

- Identificar vetor posição e vetor força em coordenadas cartesianas.
- Montar o determinante do produto vetorial $r \times F$.
- Calcular M_x , M_y e M_z com atenção aos sinais.
- Usar o eixo longitudinal z para classificar a componente paralela como torção.
- Classificar as componentes perpendiculares ao eixo z como flexão.
- Calcular o módulo resultante dos momentos fletores.
- Interpretar o sinal da torção pela regra da mão direita.

Memória de cálculo esperada: determinante; componentes escalares; classificação mecânica; módulo fletor resultante; interpretação de sinal.

Questão 9 — Torque oblíquo, diagrama de momentos torçores e ângulo de torção

Enunciado: Um eixo maciço de aço de comprimento total 1,50 m e diâmetro 40 mm recebe, em A ($x = 0$), torque gerado por uma força de 200 N aplicada em uma alavanca de 0,30 m, formando 70° com a linha da alavanca. Em B ($x = 0,60\text{ m}$), uma polia retira 20 N·m no sentido oposto. Em C ($x = 1,50\text{ m}$), atua o torque resistente necessário ao equilíbrio do eixo. Considere $G = 77\text{ GPa}$. Determine: (a) o torque aplicado em A; (b) o torque resistente em C; (c) o DMT nos trechos AB e BC; (d) a tensão cisalhante máxima no trecho crítico; (e) o ângulo total de torção entre A e C, em radianos e graus.

Roteiro técnico obrigatório

- Calcular o torque efetivo por $T = F d \sin\theta$.

- Impor equilíbrio global para encontrar o torque resistente em C.
- Fazer cortes nos trechos AB e BC e calcular o torque interno em cada trecho.
- Construir o DMT, indicando valores constantes por trecho e saltos nos pontos de aplicação.
- Calcular $J = \pi d^4/32$ para eixo maciço em SI.
- Usar $\tau_{\max} = Tc/J$ no trecho de maior $|T|$.
- Calcular $\varphi = \Sigma(TiLi/GJ)$, mantendo coerência de sinais; apresentar também o módulo do ângulo.

Memória de cálculo esperada: torque externo; equilíbrio global; cortes; DMT; J; τ_{\max} ; φ ; conversão radianos–graus; interpretação do trecho crítico.

Questão 10 — Dimensionamento de eixo por resistência e rigidez

Enunciado: Um eixo maciço de aço estrutural transmite potência $P = 15$ kW a uma rotação $n = 1.200$ rpm. O comprimento entre apoios é $L = 0,80$ m. Considere $G = 77$ GPa, tensão cisalhante admissível $\tau_{adm} = 60$ MPa e ângulo de torção admissível $\varphi_{adm} = 2^\circ$. Determine: (a) o torque transmitido; (b) o diâmetro mínimo pelo critério de resistência; (c) o diâmetro mínimo pelo critério de rigidez; (d) o diâmetro mínimo de projeto; (e) verifique τ_{\max} e φ para diâmetro comercial de 25 mm; (f) se o diâmetro externo não pudesse ser aumentado, quais variáveis físicas poderiam ser alteradas para reduzir tensão ou ângulo de torção?

Roteiro técnico obrigatório

- Converter rotação para velocidade angular: $\omega = 2\pi n/60$.
- Calcular torque transmitido por $T = \text{Potência}/\omega$.
- Aplicar $\tau_{\max} = 16T/(\pi d^3)$ para eixo circular maciço e isolar d pelo critério de resistência.
- Aplicar $\varphi = 32TL/(\pi Gd^4)$ e isolar d pelo critério de rigidez.
- Comparar os dois diâmetros e escolher o maior.
- Verificar o diâmetro comercial adotado, calculando τ_{\max} e φ .
- Discutir alternativas quando d externo é restrito: reduzir T , reduzir L , aumentar G , mudar arranjo de transmissão ou alterar material; reconhecer que material de maior f_y não reduz φ se G for igual.

Memória de cálculo esperada: conversão rpm–rad/s; torque; dois critérios; escolha do governante; verificação comercial; análise conceitual de variáveis de projeto.

GABARITO — resultados e memória de cálculo essencial

Questão 1 — Inspeção dimensional

$$A = \pi/4(32^2 - 20^2) = 490,09 \text{ mm}^2.$$

$$P = 72 \text{ kN} = 72.000 \text{ N}; \sigma = P/A = 72.000/490,09 = 146,91 \text{ MPa}.$$

$$\sigma_{adm} = f_y/FS = 250/1,50 = 166,67 \text{ MPa}. \text{ Como } 146,91 < 166,67 \text{ MPa}, \text{ atende ao critério de segurança.}$$

$$\text{Erro se seção fosse tratada como maciça: } A_{maciça} = \pi/4(32^2) = 804,25 \text{ mm}^2; \sigma_{errada} = 89,52 \text{ MPa}.$$

Erro relativo na tensão = $(89,52 - 146,91)/146,91 = -39,06\%$. O erro subestima a tensão, logo é perigoso.

Questão 2 — Dois tirantes

Equilíbrio em x: $-T_A \cos 30^\circ + T_B \cos 55^\circ = 0$.

Equilíbrio em y: $T_A \sin 30^\circ + T_B \sin 55^\circ - 12 = 0$, com forças em kN.

$T_B = T_A \cos 30^\circ / \cos 55^\circ = 1,509 T_A$. Substituindo: $T_A(0,5) + 1,509 T_A(0,8192) = 12$.

$T_A = 6,91$ kN; $T_B = 10,43$ kN.

Componentes: $T_{Ax} = -5,99$ kN; $T_{Ay} = 3,46$ kN; $T_{Bx} = 5,99$ kN; $T_{By} = 8,54$ kN.

Área de cada tirante: $A = \pi(10^2)/4 = 78,54$ mm².

$\sigma_A = 6.912/78,54 = 88,0$ MPa; $\sigma_B = 10.430/78,54 = 132,8$ MPa. O tirante B é mais crítico por apresentar maior tração e maior tensão.

Questão 3 — Plano inclinado

Peso: $W = mg = 50 \times 9,81 = 490,5$ N.

Equilíbrio paralelo ao plano: $P \cos 25^\circ - W \sin 25^\circ = 0$; $P = W \tan 25^\circ = 228,7$ N.

Equilíbrio perpendicular: $N - W \cos 25^\circ - P \sin 25^\circ = 0$.

$N = 490,5 \cos 25^\circ + 228,7 \sin 25^\circ = 541,2$ N.

$\sigma_{\text{contato}} = N/A = 541,2/4.000 = 0,135$ N/mm² = 0,135 MPa.

A força horizontal possui componente perpendicular ao plano; por isso, além de equilibrar o deslizamento, aumenta a reação normal.

Questão 4 — Barra tracionada

$A = \pi(20^2)/4 = 314,16$ mm²; $P = 45.000$ N; $E = 200.000$ MPa; $L_0 = 1.200$ mm.

$\sigma = 45.000/314,16 = 143,24$ MPa. Como $\sigma < f_y = 250$ MPa, o regime elástico é admissível.

$\epsilon_{\text{long}} = \sigma/E = 143,24/200.000 = 0,000716$ mm/mm.

$\Delta L = \epsilon L_0 = 0,000716 \times 1.200 = 0,859$ mm.

$\epsilon_{\text{lat}} = -\nu \epsilon_{\text{long}} = -0,30 \times 0,000716 = -0,000215$.

$\Delta d = \epsilon_{\text{lat}} d_0 = -0,000215 \times 20 = -0,00430$ mm.

Se $P = 90$ kN, $\sigma = 286,48$ MPa $> f_y$. Logo, não é tecnicamente aceitável usar apenas a Lei de Hooke para estimar o alongamento total, pois o material teria ultrapassado o escoamento.

Questão 5 — Pino e barra

Área da barra: $A = 30 \times 8 = 240$ mm²; $\sigma = 18.000/240 = 75,0$ MPa. A barra atende, pois $75,0 < 120$ MPa.

Área total de cisalhamento do pino em duplo corte: $A_{\text{cis}} = 2[\pi(12^2)/4] = 226,19$ mm².

$\tau = 18.000/226,19 = 79,6$ MPa. O pino não atende, pois $79,6 > 70$ MPa.

Dimensionamento: $\tau_{adm} = P/[2(\pi d^2/4)] = 2P/(\pi d^2)$.

$d_{min} = \sqrt{2P/(\pi \tau_{adm})} = \sqrt{36.000/(\pi \times 70)} = 12,79$ mm. Adotar diâmetro comercial mínimo de 13 mm.

Questão 6 — Curva tensão–deformação

No trecho inicial: $E \approx \Delta\sigma/\Delta\epsilon = 200 \text{ MPa}/0,0010 = 200.000 \text{ MPa} = 200 \text{ GPa}$.

Limite proporcional aproximado: $\sigma \approx 250$ MPa em $\epsilon \approx 0,00125$, pois depois a curva deixa de crescer linearmente.

Limite de escoamento adotável: $f_y \approx 250$ a 255 MPa. Para cálculo conservador, usar $f_y = 250$ MPa.

Resistência última: $f_u = 430$ MPa, maior tensão registrada na tabela.

O material é dúctil, pois apresenta deformação plástica significativa antes da ruptura/queda de tensão.

Resiliência: $u_r = f_y^2/(2E) = 250^2/(2 \times 200.000) = 0,156 \text{ MPa} = 0,156 \text{ MJ/m}^3$.

Rigidez está associada à inclinação elástica E ; resistência está associada aos níveis de tensão suportados, como f_y e f_u . Um material pode ser rígido e não necessariamente ter maior resistência última.

Questão 7 — Ensaios e modos de falha

(a) Ensaio de tração; propriedade: f_y ; falha evitada: escoamento/plasticidade excessiva em serviço.

(b) Ensaio de fadiga ou curva S–N; propriedade: vida à fadiga/limite de fadiga; falha evitada: ruptura por ciclos repetidos.

(c) Ensaio de dureza, como Rockwell, Vickers ou Brinell; propriedade: resistência à penetração superficial; falha evitada: desgaste/indentação superficial.

(d) Ensaio de fluência; propriedade: taxa de fluência e tempo até ruptura; falha evitada: deformação lenta dependente do tempo em temperatura elevada.

(e) Ensaio de impacto, como Charpy; propriedade: energia absorvida no impacto; falha evitada: ruptura súbita/frágil.

(f) Ensaio de tração, complementado por análise de alongamento percentual e redução de área; propriedade: ductilidade/fragilidade; falha avaliada: ruptura com pequena deformação plástica.

Questão 8 — Momento vetorial 3D

$r = (0,20; 0,40; 1,20)$ m; $F = (-150; 80; 200)$ N.

$M_x = yF_z - zF_y = 0,40(200) - 1,20(80) = -16 \text{ N}\cdot\text{m}$.

$M_y = zF_x - xF_z = 1,20(-150) - 0,20(200) = -220 \text{ N}\cdot\text{m}$.

$M_z = xF_y - yF_x = 0,20(80) - 0,40(-150) = 76 \text{ N}\cdot\text{m}$.

$M_0 = (-16 \text{ i} - 220 \text{ j} + 76 \text{ k}) \text{ N}\cdot\text{m}$.

Como a barra tem eixo longitudinal z , o momento torçor é $T = M_z = +76 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Momentos fletores: $M_x = -16 \text{ N}\cdot\text{m}$ e $M_y = -220 \text{ N}\cdot\text{m}$; $M_f, \text{resultante} = \sqrt{16^2 + 220^2} = 220,6 \text{ N}\cdot\text{m}$.

O sinal positivo de M_z indica torção no sentido associado ao eixo z positivo pela regra da mão direita.

Questão 9 — DMT e ângulo de torção

Torque em A: $T_A = Fd \sin 70^\circ = 200 \times 0,30 \times \sin 70^\circ = 56,38 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Equilíbrio global: $+56,38 - 20 - T_C = 0$; logo $T_C = 36,38 \text{ N}\cdot\text{m}$ no sentido resistente oposto ao torque de entrada.

Por cortes, usando o lado esquerdo: trecho AB, $T_{int} = -56,38 \text{ N}\cdot\text{m}$; trecho BC, $T_{int} = -36,38 \text{ N}\cdot\text{m}$.

$J = \pi d^4/32 = \pi(0,040^4)/32 = 2,513 \times 10^{-7} \text{ m}^4$; $c = 0,020 \text{ m}$.

Trecho crítico: $|T|_{\max} = 56,38 \text{ N}\cdot\text{m}$; $\tau_{\max} = T_c/J = 56,38 \times 0,020 / (2,513 \times 10^{-7}) = 4,49 \text{ MPa}$.

Ângulo total: $\varphi = [56,38(0,60) + 36,38(0,90)] / (77 \times 10^9 \times 2,513 \times 10^{-7}) = 0,00344 \text{ rad} = 0,197^\circ$ em módulo.

Com sinal conforme o DMT adotado, φ seria negativo; para verificação de rigidez usa-se normalmente o módulo.

Questão 10 — Dimensionamento do eixo

$\omega = 2\pi n/60 = 2\pi(1.200)/60 = 125,66 \text{ rad/s}$.

$T = P/\omega = 15.000/125,66 = 119,37 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Critério de resistência: $\tau_{\max} = 16T/(\pi d^3) \leq \tau_{adm}$. Assim, $d \geq [16T/(\pi \tau_{adm})]^{1/3} = 0,02164 \text{ m} = 21,64 \text{ mm}$.

Critério de rigidez: $\varphi = 32TL/(\pi Gd^4) \leq \varphi_{adm}$, com $\varphi_{adm} = 2^\circ = 0,03491 \text{ rad}$. Assim, $d \geq [32TL/(\pi G \varphi_{adm})]^{1/4} = 0,02453 \text{ m} = 24,53 \text{ mm}$.

O critério governante é o de rigidez. Diâmetro mínimo de projeto: $d \geq 24,53 \text{ mm}$; adotar 25 mm .

Para $d = 25 \text{ mm}$: $\tau_{\max} = 38,91 \text{ MPa} < 60 \text{ MPa}$; $\varphi = 0,03234 \text{ rad} = 1,853^\circ < 2^\circ$. O diâmetro comercial atende.

Se o diâmetro externo não puder aumentar, podem ser reduzidos T ou L , aumentado G por seleção de material mais rígido ao cisalhamento, alterado o arranjo de transmissão ou distribuído o torque. Aumentar apenas f_y melhora a resistência admissível, mas não reduz o ângulo de torção se G não aumentar.