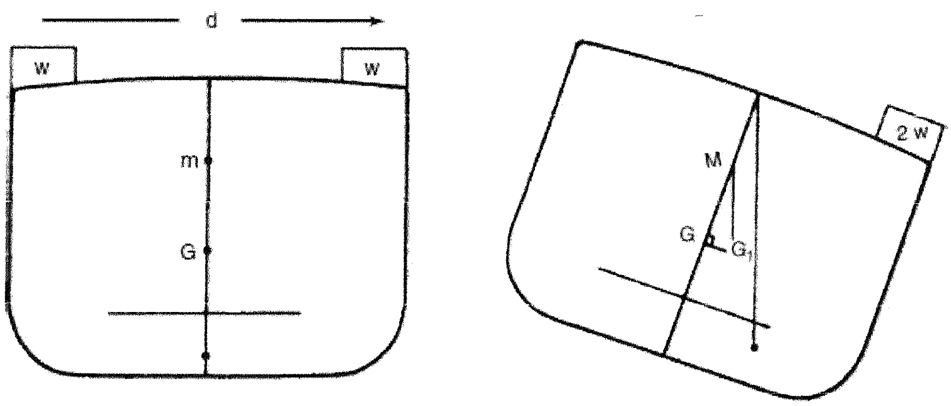
MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA DO BRASIL

GABARITO DESENVOLVIDO

CP-CEM/ 2020 - ENGENHARIA NAVAL

1ª QUESTÃO (8 pontos)

O teste de inclinação baseia-se na movimentação de peso *w* conhecido perpendicularmente à linha de centro da embarcação uma distância *d* que deverá ser registrada. A movimentação do peso provocará uma banda θ que é medida tipicamente com um tubo U ou o pêndulo suspenso na linha de centro e uma escala horizontal como ilustrado na figura abaixo.




Para garantir que os resultados do teste sejam confiáveis os seguintes pontos devem ser verificados:

- Deve haver pouco ou nenhum vento;
- Efeitos de superfície livre minimizados;
- Se for possível utilizar dois pêndulos;
- Registro de todos os pesos a bordo e seus respectivos centros VCG e LCG; e
- Registro da densidade da água e dos calados na proa, popa e meia nau. Um valor médio deve ser utilizado nos cálculos.

A igualdade dos momentos de emborcamento e de endireitamento determina o valor do GM como segue

$$GM = w \times d \,/\, (\Delta \tan \theta)$$

Finalmente o KG é obtido por

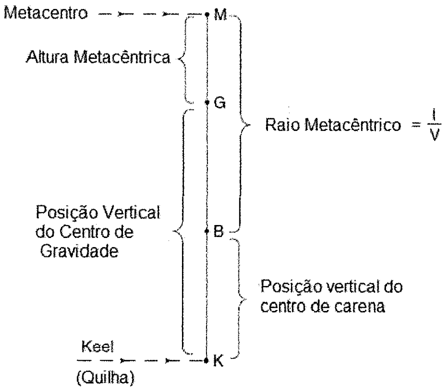
$$KG = KB + BM - GM$$

As curvas hidrostáticas permitem determinar o valor do deslocamento Δ, KB e BM no calado medido.

2ª QUESTÃO (8 pontos)

a) (4 pontos)

As relações fundamentais entre centro vertical de gravidade, altura metacêntrica, raio metacêntrico e centro vertical de carena vêm dadas por:




$$KM = KG + GM$$

$$KM = KB + BM$$

Para um navio tipo caixa (fundo e costados planos), temos as seguintes relações:

$$\text{KB} = \frac{T}{2}$$

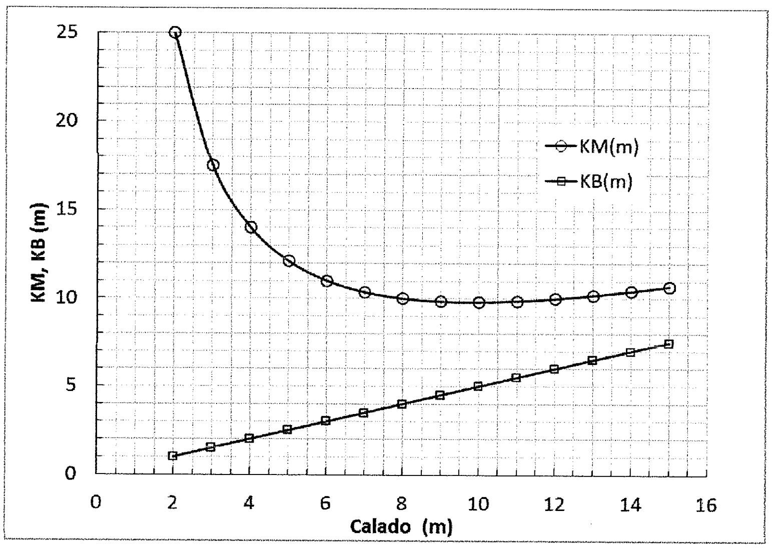
$$BM = \frac{I}{V} \rightarrow BM = \frac{\frac{1}{12}LB^3}{L \times B \times T \times C_b} \rightarrow BM = \frac{B^2}{12 \times T \times 1} \rightarrow BM = \frac{B^2}{12T}$$

Portanto; o $KM$ vem dado por:

$$KM = KB + BM$$

$$KM = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{12T}$$

Observa-se como existe dependência parabólica do KM em função do calado e uma função linear do KB.



b) (4 pontos)

Usando o diagrama metacêntrico, determina-se o GM para cada condição de carregamento:

$$GM = KM - KG$$

I. $GM(T = 5.5) = 11.5 - 8.5 \rightarrow GM(T = 5.5) = 3$m, condição estável, GM>0.
II. $GM(T = 9.5) = 9.8 - 9.8 \rightarrow GM(T = 5.5) = 0$m, condição neutra, GM=0.
III. $GM(T = 10.5) = 9.82 - 11.8 \rightarrow GM(T = 5.5) = -2$m, condição instável, GM<0.

3ª QUESTÃO (8 pontos)

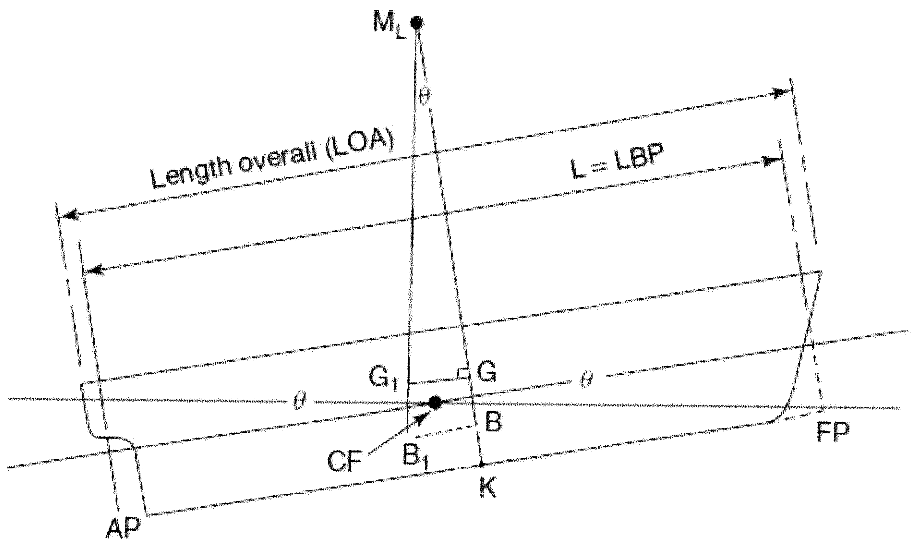
Seja $W$ o peso a ser removido da bodega em questão e $X$ a posição em relação à meia-nau. O momento desse peso, em relação ao centro do plano de flutuação, será:

$$M = W \times (X + LCF)$$

$$M = W \times (14 + 2)$$

$$M = 16W$$

A figura ilustra o navio na configuração final, após a remoção do peso, gerando trim adicional pela popa.




Calcula-se o momento para trimar 1 cm:

$$MT_{cm} = \frac{W \times GM_L}{100L}$$

$$MT_{cm} = \frac{7000 \times 100}{100 \times 120}$$

$$MT_{cm} = 58{,}33 \text{ tons}$$

Nota-se que a embarcação já possui um trim de 30 cm, portanto o trim final tem que ser de 40 cm. Finalmente, igualam-se o momento requerido e o momento aplicado:

$$Momento_{Aplicado} = Momento_{Requerido}$$

$$16W = 58{,}33 \times 40$$

$$W = 145{,}8 \text{ tons}$$

4ª QUESTÃO (8 pontos)

A tensão de cisalhamento é dada por:

$$\tau = \frac{Q_y \times M_s}{t \times I_{LN}}$$

onde

$$I_{LN} = \pi \times R_m^3 \times t$$

e

$$M_s = \int_0^\theta y \times dA = \int_0^\theta R_m \cos\theta \times tR_m d\theta = R_m^2 \times t \times \sin\theta$$

Portanto:

$$\tau = \frac{Q_y \times \sin\theta}{\pi \times R_m \times t}$$

O valor de máximo da tensão de cisalhamento corresponde ao valor de $\theta = \pi/2$:

$$\tau_{\max} = \frac{Q_y}{\pi \times R_m \times t}$$

5ª QUESTÃO (8 pontos)

a) A vazão $Q$ e, consequentemente, a velocidade $v_2$ podem ser calculadas pela equação da continuidade ou equação de Bernoulli,como:

$$Q = v_1 S_1 = v_1 \frac{\pi D_1^2}{4} = 3\frac{\pi 2^2}{4} = 9,425\ \mathrm{m^3 s^{-1}}$$

e

$$v_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{Q}{\pi D_2^2/4} = \frac{9,425}{\pi 3^2/4} = 1,333\ \mathrm{ms^{-1}}$$

b) Para determinar o tipo de escoamento, o número de Reynolds, $Re = vD/\mu$, será usado considerando: $i)$ escoamento laminar: $Re < 2000$ e $ii)$ escoamento turbulento: $Re > 2400$. Para o problema sob análise:

$$Re_1 = \frac{v_1 D_1}{\mu} = \frac{3 \cdot 2}{1,24 \cdot 10^{-6}} \approx 4,84 \cdot 10^6 > 2300$$

e

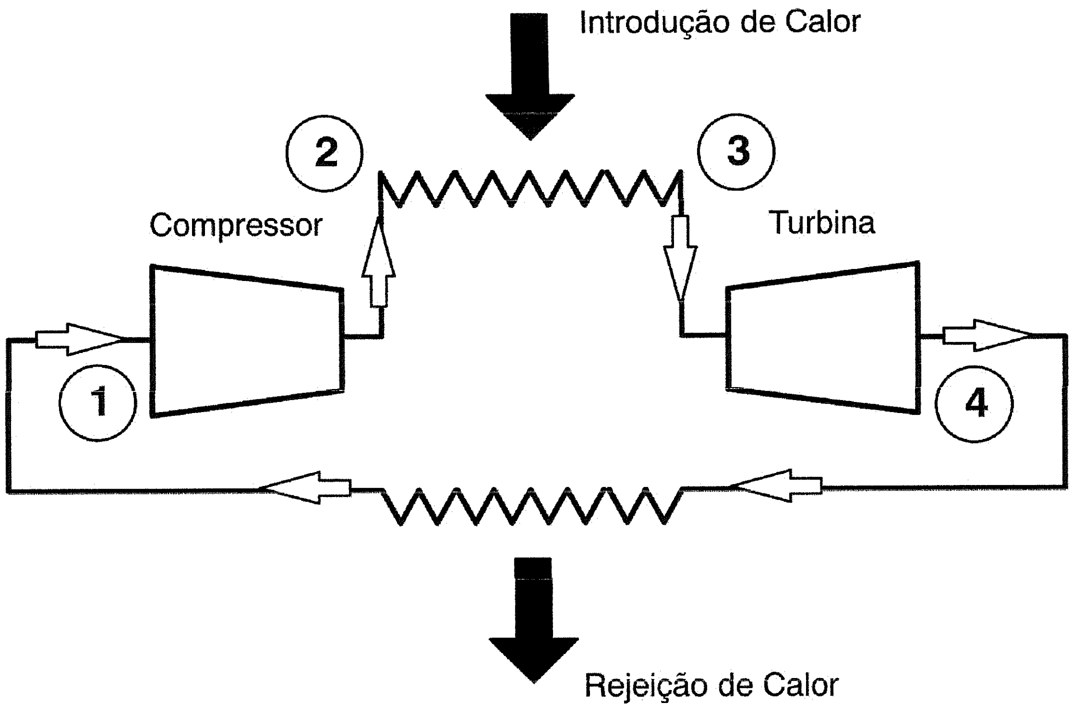
$$Re_2 = \frac{v_2 D_2}{\mu} = \frac{1,3333}{1,24 \cdot 10^{-6}} \approx 3,22 \cdot 10^6 > 2300$$

Portanto, o escoamento é turbulento tanto na entrada como na saída do trecho da tubulação.

6ª QUESTÃO (8 pontos)

A turbina a vapor é um dispositivo para obtenção de trabalho mecânico da energia armazenada no vapor. O vapor em alta pressão na caldeira é expandido para criar um jato de alta velocidade de vapor. O expansor atua convertendo a energia térmica do vapor em energia cinética. Esse jato de vapor é direcionado para as pás montadas na periferia do eixo. O vapor não faz girar o eixo. O formato das pás provoca uma mudança na direção e, portanto, na velocidade do jato de vapor. Agora, uma mudança na velocidade para um determinado fluxo de massa de vapor irá produzir uma força que atua para girar a turbina, ou seja, fluxo de massa de vapor (kg / s) x mudança na velocidade (m / s) = força (kg m / s2 ).

Uma turbina a gás é representada por um ciclo Brayton padrão, ideal, fechado e reversível, ilustrado na figura abaixo. O ciclo consiste dos seguintes processos: a) compressão adiabática 1→2; b) introdução ou adição de calor sob pressão constante 2→3; c) expansão adiabática 3→4 e d) rejeição de calor sob pressão constante.




As principais vantagens da turbina a gás são:

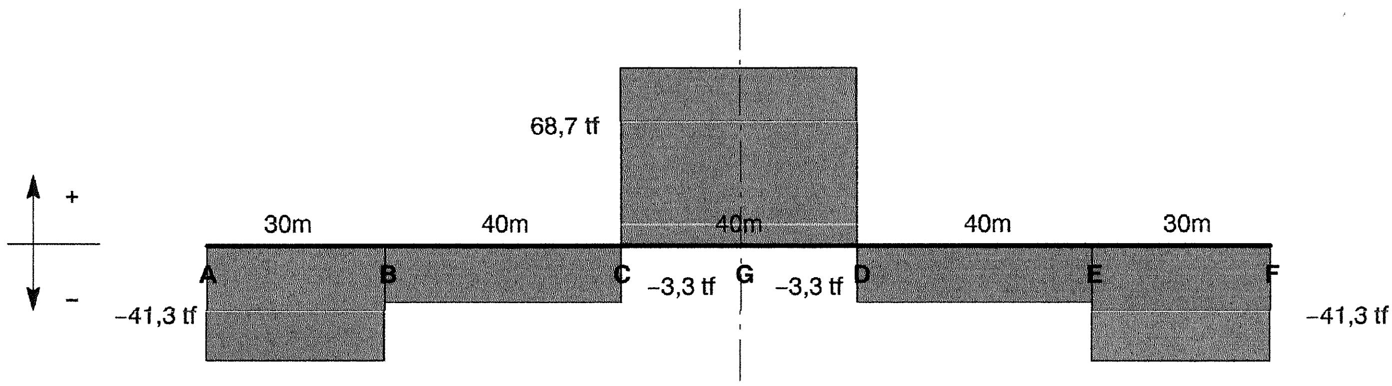
- menor relação peso / potência. Para uma dada potência, o peso da instalação é menor;
- maior eficiência mecânica;
- maior emissão de gases de exaustão;
- maiores rotações operacionais;
- baixa vibração; e
- baixo custo de manutenção.

7ª QUESTÃO (8 pontos)

a) (2 pontos)
Para um calado de 3 m, o equilíbrio hidrostático resulta:

- Deslocamento total = 10.800 tf;
- Deslocamento do lastro = 4560 tf;
- Considerando o fator de aproveitamento de 95% dos tanques e a densidade da água de 1 tf/m$^3$, o volume necessário de lastro será de 4.800 m$^3$; e
- Distribuindo-se igualmente o volume de lastro para os tanques T2, T3 e T4, a altura de lastro nos tanques deverá ser h = 2 m.

Portanto, a distribuição resultante de carga e empuxo ao longo da embarcação será a seguinte:




b) (2 pontos)
Integrando a curva de carga acima, os esforços cortantes $Q = Q(x)$ resultam:

- $Q_A$ = 0 tf
- $Q_B$ = -1.239 tf
- $Q_C$ = -1.371 tf (**valor máximo**)
- $Q_G$ = 0 tf

c) (2 pontos)
Integrando duas vezes a curva de carga acima, os momentos fletores $M = M(x)$ resultam:

- $M_A$ = 0 tf×m
- $M_B$ = -18.585 tf×m (tosamento)
- $M_C$ = -70.785 tf×m (tosamento)
- $M_G$ = -84.465 tf×m tosamento)(**valor máximo**)

d) (2 pontos)
Para calcular a tensão normal primária agente no flange da sicorda do convés, deve-se calcular as propriedades geométricas da seção:

- Posição da linha neutra em relação ao fundo:

$$y_{LN} = 2 \text{ m}$$

- Momento de inércia da seção em relação à linha neutra:

$$I_{LN} = 7{,}4 \text{ m}^4$$

- Tensão no flange da sicorda:

$$\sigma_1^{Flange} = \frac{-M \times y_{Flange}}{I_{LN}} = \frac{-84.465 \times (2-0{,}6)}{7{,}4} \times 0{,}0098 = \text{-158 MPa}$$

8ª QUESTÃO (8 pontos)

a) (4 pontos)

Pelas relações de onda para água profunda $k = \frac{2\pi}{L_W} = \frac{\omega^2}{g}$, onde k é o número de onda e $L_W$ é o comprimento da onda

$$L_w = \frac{2\pi g}{\omega^2}$$

Sendo o período da onda

$$T_w = \frac{2\pi}{\omega}$$

A velocidade da onda será

$$V_w = \frac{L_w}{T_w} = \frac{2\pi g \omega}{2\pi \omega^2} = \frac{g}{\omega}$$

Como o navio encontra o trem de ondas diretamente pela proa, a velocidade aparente das ondas para o navio será a soma das velocidades do navio e das ondas

$$V_e = V + V_w = V + \frac{g}{\omega} = \frac{\omega V + g}{\omega}$$

Finalmente o período de encontro é dado pela relação entre o comprimento da onda e sua velocidade relativa ao navio

$$T_e = \frac{L_w}{V_e} = \frac{2\pi g}{\omega^2} \frac{\omega}{\omega V + g} = \frac{2\pi g}{\omega(\omega V + g)}$$

b) (4 pontos)

Cálculo do período de encontro:

$$T_e = \frac{2\pi g}{\omega(\omega V + g)}$$

$T_e = \frac{2*3{,}14*9{,}8}{0{,}698*0{,}698*6{,}5*0{,}5144+0{,}698*9{,}8} \approx 7{,}3$ s

Se não há fase entre heave e pitch, a máxima amplitude de ambos movimentos ocorrerá simultaneamente. Assim, o ponto do casco que mais se aproximar do fundo terá se movimentado para baixo, em relação à condição sem ondas, por uma distância igual à soma da amplitude de heave e pitch na direção vertical.

Pelo gráfico, $RAO_{heave}^{7,3s} = 0{,}73$, portanto

$A_{heave} = 1,3 * 0,73 = 0,95$ m

Pelo gráfico, $RAO_{pitch}^{7,3s} = 0,42$, portanto

$$\theta_{pitch} = 1,3 * 0,42 = 0,55°$$

Assumindo que a rotação de pitch do navio se dê em torno da meia nau, a amplitude vertical do movimento de pitch nos pontos que mais se movimentam, que são as extremidades de popa e proa, para pequenos ângulos, será

$$A_{pitch} = \frac{L}{2}\theta_{pitch}$$

$$A_{pitch} = 0,55\frac{\pi}{180}\frac{L}{2} = 0,0048L$$

A amplitude do movimento vertical total será

$$A = A_{heave} + A_{pitch}$$

$$A = 0,95 + 0,0048L$$

Como a distância do fundo do navio ao fundo do canal é de 20% do calado, na condição sem ondas, e 10% do calado, na condição de ondas descrita, a amplitude do movimento vertical deve ser igual a 10% do calado. Logo

$$0,1T = A$$

$$T = 10(0,95 + 0,0048L) = 9,5 + 0,048L$$

9ª QUESTÃO (8 pontos)

a) (2 pontos)

Fator de escala:

$$\lambda = \frac{L_{OA}^{navio}}{L_{OA}^{modelo}}$$

$$\lambda = \frac{150}{5} = 30$$

A velocidade a que deve ser rebocado o modelo é obtida pela igualdade do número de Froude entre navio e modelo:

$$F_n^{modelo} = F_n^{navio}$$

$$\frac{V^{modelo}}{\sqrt{gL_{PP}^{modelo}}} = \frac{V^{navio}}{\sqrt{gL_{PP}^{navio}}}$$

$$V^{modelo} = V^{navio}\frac{\sqrt{gL_{PP}^{modelo}}}{\sqrt{gL_{PP}^{navio}}} = \frac{V^{navio}}{\sqrt{\lambda}}$$

$V^{modelo} = \frac{15\times0,5144}{\sqrt{20}} = 1,9$ m/s

b) (6 pontos)

Área da superfície molhada do modelo:

$$S^{modelo} = \frac{S^{navio}}{\lambda^2}$$

$S^{modelo} = \frac{3300}{30^2} = 3.67$ m$^2$

Coeficiente de resistência total do modelo:

$$C_T^{modelo} = \frac{R_T^{modelo}}{\frac{1}{2}\rho S^{modelo} {V^{modelo}}^2}$$

$$C_T^{modelo} = \frac{25}{0,5 \times 1000 \times 3,67 \times 1,9^2} = 3,87 \times 10^{-3}$$

Coeficiente de resistência friccional do modelo:

$R_e^{modelo} = \frac{V^{modelo} L_{PP}^{modelo}}{\nu}$ (número de Reynolds)

$$R_e^{modelo} = \frac{1,9 \times \frac{137.5}{30}}{1,139 \times 10^{-6}} = 7.5 \times 10^6$$

$$C_F^{modelo} = \frac{0,075}{(\log_{10} R_e^{modelo} - 2)^2}$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log_{10} R_e - 2)^2}$$

Pelo gráfico, $C_F^{modelo} \approx 3,2 \times 10^{-3}$

Coeficiente de resistência residual, igual para navio e modelo:

$$C_R = C_T^{modelo} - C_F^{modelo}$$

$$C_R = 3,87 \times 10^{-3} - 3,2 \times 10^{-3} = 6,7 \times 10^{-4}$$

Coeficiente de resistência friccional do navio:

$R_e^{navio} = \frac{V^{navio} L_{PP}^{navio}}{\nu}$ (número de Reynolds)

$$R_e^{navio} = \frac{20x0,5144x137.5}{1,188 \times 10^{-6}} = 1,189 \times 10^9$$

$$C_F^{navio} = \frac{0,075}{(\log_{10} R_e^{navio} - 2)^2}$$

Pelo gráfico, $C_F^{navio} \approx 1,5 \times 10^{-3}$

Resistência total do navio:

$$C_T^{navio} = C_F^{navio} + C_R$$

$$C_T^{navio} = 1{,}5 \times 10^{-3} + 6{,}7 \times 10^{-4} = 2{,}17 \times 10^{-3}$$

$$R_T^{navio} = \frac{1}{2} C_T^{navio} \rho S^{navio} V_{navio}{}^2$$

$R_T^{navio} = 0{,}5 \times 2{,}17\ 10^{-3} \times 1025 \times 3300 \times (20 \times 0{,}5144)^2 = 387.8$ kN

10ª QUESTÃO (8 pontos)

É necessário determinar as propriedades da seção. A seguinte tabela mostra o cálculo da área, centroide e momento de inércia.

| elemento | b | h | Área | braço | Momento Área | d | Areaxd^2 | I | Soma |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 120 | 20 | 2400 | 10 | 2.400E+04 | 200 | 9.600E+07 | 8.00E+04 | 9.608E+07 |
| 2 | 20 | 300 | 6000 | 170 | 1.020E+06 | 40 | 9.600E+06 | 4.50E+07 | 5.460E+07 |
| 3 | 300 | 20 | 6000 | 330 | 1.980E+06 | 120 | 8.640E+07 | 2.00E+05 | 8.660E+07 |
| | | | **14400** | | **3.024E+06** | | | I= | **2.373E+08** |

O centroide é igual a $Y_{LN}$=3.024x10^6/14400=210 mm. Determina-se o fluxo de corte na posição do cordão de solda.

$$q = \frac{VQ}{I}$$

$$q = \frac{5000 \times 10^3 (20 \times 150) 120}{2.373 \times 10^8}$$

$$q = 7.586\ N/mm$$

A resistência do cordão de solda por unidade de comprimento na seção crítica, plano θ=45°, vale:

$$q_{allowable} = \frac{60}{\frac{t}{\sqrt{2}}}$$

Igualando o fluxo de cisalhamento agindo no cordão ao máximo suportado pelo material de solda, obtemos o comprimento da perna:

$$7.586 = \frac{60}{\frac{t}{\sqrt{2}}}$$

$$t = 11.2\ mm$$