



**Gamesa Energia Portugal**

**Formulário para Elaboração de**

**Projectos de Parques Eólicos**

**(Cálculo Eléctrico e de Fundações)**

Elaborado por: António Pina  
e-mail: [apina@gamesaenergy.com](mailto:apina@gamesaenergy.com)

---

1. Dimensionamento rede MT .....	3
1.1. Intensidade de corrente de serviço.....	3
1.2. Intensidade de corrente de curto-circuito .....	3
1.3. Quedas de tensão .....	3
1.3.1. Queda de tensão em rede subterrânea MT .....	4
1.3.2. Queda de tensão em transformadores .....	5
1.4. Perdas de Potência .....	5
1.4.1. Perdas de potência na rede subterrânea MT .....	6
1.4.2. Perdas de potência em transformadores .....	6
1.5. Cálculo de terras .....	6
2. Subestação .....	8
2.1. Cálculo de intensidade de corrente de curto-circuito .....	8
2.1.1. Cálculo de impedâncias equivalentes .....	8
2.1.2. Cálculo de intensidade de corrente de curto-circuito .....	9
2.2. Critério de selecção da secção dos condutores .....	10
2.2.1. Intensidade de corrente térmica esperada.....	10
2.2.2. Intensidade de corrente térmica de curto-circuito de projecto .....	12
2.2.3. Verificação da escolha de condutores .....	13
2.3. Selecção de Pára-Raios.....	14
2.3.1. Critério de selecção .....	14
2.4. Cálculo da malha de terra .....	14
2.4.1. Cálculo da resistência da malha de terra da subestação .....	14
2.4.2. Cálculo da resistência da malha de terra do parque eólico.....	15
2.4.3. Intensidade de corrente de defeito .....	15
2.4.4. Tensão de contacto e tensão de passo admissível .....	15
2.4.5. Elevação do potencial da malha terra .....	16
2.4.6. Comprovação térmica do condutor de terra .....	16
2.5. Barramentos.....	17
2.5.1. Acções nos tubos .....	17
2.5.2. Tensões nos tubos (cálculo estático) .....	18
2.5.3. Cálculo da flecha .....	19
2.5.4. Tensões nos tubos (cálculo dinâmico).....	19
2.6. Baterias de Condensadores.....	23
2.6.1. Reactiva necessária pelo parque.....	23
2.6.2. Dimensionamento de baterias de condensadores .....	26
2.7. Cálculo de estruturas e fundações .....	27
2.7.1. Critérios de projecto .....	27
2.7.2. Acção sísmica .....	27
2.7.3. Cálculo de Forças .....	28
2.7.3.1. Esforços horizontais .....	28
2.7.3.2. Esforços verticais.....	30
2.7.4. Cálculo de estruturas .....	31
2.7.4.1. Momentos .....	31
2.7.4.2. Tensões .....	33
2.7.5. Cálculo de fundações.....	35
2.7.5.1. Fixação .....	35
2.7.5.2. Submersão .....	35
2.7.5.3. Deslizamento .....	37

## 1. Dimensionamento rede MT

### 1.1. Intensidade de corrente de serviço

Verificação do valor da corrente em conformidade com o cabo utilizado

$$I_{\max} \times f_c \geq I_{\text{exploração}}$$

$I_{\text{exploração}}$  - corrente serviço nominal

$I_{\max}$  - corrente máxima admissível do cabo

$f_c$  - factor de correcção

nº circuitos	$f_c$
1	1
2	0,8
3	0,75
4	0,7

Tabela 1. Factor de correcção RSIUEE

### 1.2. Intensidade de corrente de curto-circuito

$$S_{\min} = \frac{I_{th} \sqrt{t}}{k}$$

$S_{\min}$  - Secção mínima do cabo (mm<sup>2</sup>)

$I_{th}$  - Intensidade de corrente térmica de curto-circuito (A)

$t$  - tempo de duração do curto-circuito (s)

$k$  - factor dependente do material do condutor

### 1.3. Quedas de tensão

A queda de tensão é calculada o parque eólico à potência nominal e obtidas considerando para cada circuito a expressão:

$$\Delta V_{\text{total}} = \Delta V_{\text{transf} / AG} + \Delta V_{MT} + \Delta V_{\text{transf} / subest}$$

Cada circuito de AG's tem de obedecer à seguinte condição:

$$\Delta V \leq 7\%$$

### 1.3.1. Queda de tensão em rede subterrânea MT

#### a) Fórmulas de cálculo

$$\Delta V_{\text{ramo}}^n = \sqrt{3} I l (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$\Delta V_{\text{ramo}}^n$  - Queda de tensão produzida no ramo n [V]

I – intensidade de corrente a circular no ramo [A]

l – comprimento do ramo [m]

R – resistência do condutor [ $\Omega/\text{km}$ ]

X – reactância do condutor [ $\Omega/\text{km}$ ]

$\cos \varphi$  – factor de potência

NOTA: AG's funcionam a factores de potência próximos da unidade.

As quedas de tensão acumuladas ao longo do sistema são dadas por:

$$\Delta V_{\text{acumulada}} = \sum_1^n \Delta V_{\text{ramo}}^n$$

Em percentagem, a queda de tensão é dada por:

$$\Delta V_{\text{ramo}}^n (\%) = \frac{\Delta V_{\text{ramo}}^n}{U} \cdot 100$$

U – valor de tensão no ponto inicial [V]

A queda de tensão acumulada percentual total em todo o circuito é a soma de todas as quedas de tensão de todos os ramos.

$$\Delta V_{\text{acumulada}} (\%) = \sum_1^n \Delta V_{\text{ramo}}^n (\%)$$

#### b) Determinação dos comprimentos

O comprimento total de um cabo L é dado por:

$$L = L_{\text{vala}} + L_2 + L_{E/S}$$

$L_{\text{vala}}$  – comprimento da vala entre aerogeradores [m]

$L_2$  – Incremento ao comprimento do cabo devido a ondulações do terreno e imperfeições de medida (5%) [m]

$L_{E/S}$  – comprimento do cabo dentro do aerogerador, desde a base até as celas de 30kV [m]

### 1.3.2. Queda de tensão em transformadores

$$\Delta V_{transf} (\%) = C \left[ (u_R \cos \varphi + u_X \sin \varphi) + \frac{(u_X \cos \varphi - u_R \sin \varphi)^2}{200} \right]$$

Simplificando fica,

$$\Delta V_{transf} (\%) = C (u_R \cos \varphi + u_X \sin \varphi)$$

onde,

$$C (\text{índice de carga}) = \frac{I_{\text{carga}}}{I_{\text{nominal}}}$$

$$u_R (\%) = \frac{P_{Cu}}{P_{\text{nominal}}} \times 100$$

$$u_X = \sqrt{u_{cc}^2 - u_R^2}$$

$P_{Cu}$  – Perdas no cobre ou perdas em curto-circuito [W]

$u_{cc}$  – tensão de curto-circuito [V]

Nota: À plena carga,  $C=1$  e  $\cos \varphi=1$

### 1.4. Perdas de Potência

A potência de perdas total de um parque eólico é dada por:

$$\Delta P_{TOTAL} = m \cdot \Delta P_{transf / AG} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{circuito}^i + k \cdot \Delta P_{transf / subest}$$

Este valor tem de respeitar a seguinte condição:

$$\Delta P \leq 3\%$$

$m$  – nº de aerogeradores do parque

$n$  – nº de circuito do parque

$k$  – nº de transformadores de potência

#### 1.4.1. Perdas de potência na rede subterrânea MT

$$\frac{P_{\text{var}}}{P_{\text{máx}}} = \frac{\sum_i^n I_i^2 \cdot h_i}{\sum_i^n I_i \cdot h_i} \cdot \frac{1}{I_{\text{máx}}}$$

$P_{\text{var}}$  – Potência de perdas considerando um regime de vento variável [W]

$P_{\text{máx}}$  – Potência de perdas quando o parque eólico funciona à potência máxima [W]

$$P_{\text{máx}} = \frac{\sum \text{Perdas circuitos}}{\text{Potência do parque}} \cdot 100$$

#### 1.4.2. Perdas de potência em transformadores

$$P_p(\%) = \frac{P_{\text{carga}}}{P_{\text{transf}}} \cdot 100 = \frac{P_{Fe} \cdot H_T}{\sum P_i \cdot h_i} \cdot 100 + \frac{P_{Cu} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{I_i}{I_n} \right)^2 \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot h_i} \cdot 100$$

$P_{Fe}$  – Potência de perdas no ferro ou perdas em vazio do transformador [W]

$P_{Cu}$  – Potência de perdas no cobre ou em curto-circuito do transformador [W]

### 1.5. Cálculo de terras

$$R_g^{nAG} = \frac{R_g^{AG}}{n}$$

$R_g^{AG}$  - Resistência da malha de terra de um aerogerador [ $\Omega$ ]

$R_g^{nAG}$  - Resistência da malha de terra de n aerogeradores [ $\Omega$ ]

#### Rede de ligação entre vários aerogeradores

$$R_g^{vala} = \frac{\rho}{\pi L} \ln \left( \frac{2L}{d} \right)$$

L – Comprimento do condutor horizontal [m]

$\rho$  – resistividade do terreno [ $\Omega \cdot m$ ]

d – diâmetro do condutor [m]

**A resistência total da rede de Média Tensão:**

$$R_g^{MT} = \frac{R_g^{vala} + R_g^{nAG}}{R_g^{vala} \times R_g^{nAG}}$$

**Comprovação térmica do condutor terra**

A secção mínima do condutor de terra obtém-se da seguinte forma:

$$S_p = \frac{I}{\alpha} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$$

$S_p$  – Secção do condutor [mm<sup>2</sup>]

$I$  – corrente de defeito à terra [A]

$\alpha$  – constante [A.mm<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>]

$t$  – tempo de duração de defeito [s]

$\Delta\theta$  – variação de temperatura [200°C]

## 2. Subestação

### 2.1. Cálculo de intensidade de corrente de curto-circuito

#### 2.1.1. Cálculo de impedâncias equivalentes

##### a) Noções básicas

Impedância de base:

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}$$

Mudança de variável:

$$Z_{b,new} = Z_{b,old} \frac{S_{b,new}}{S_{b,old}} \left( \frac{U_{b,old}}{U_{b,new}} \right)^2$$

##### b) Modelização de uma rede

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom}} \quad Z_{rede} = j \frac{S_b}{S_{cc}}$$

$Z_{rede}$	Impedância da rede [p.u.]
$S_{cc}$	Potência de curto-circuito da rede [MVA]
$S_b$	Potência de base escolhida [MVA]
$I_{cc}$	Intensidade de corrente de curto-circuito da rede [kA]
$U_{nom}$	Tensão nominal [KV]

##### c) Modelização de uma linha

$$Z_{linha,p.u.} = l \times (Z_{linha,\Omega/Km}) \times \frac{1}{Z_b}$$

$Z_{linha,p.u.}$	Impedância da linha [p.u.]
$Z_{linha,\Omega/km}$	Impedância da linha [ $\Omega/km$ ]
$Z_b$	Impedância de base [ $\Omega$ ]
$l$	Comprimento da linha [km]

##### d) Modelização de um transformador

$$Z_{transf} = jX_{cc} \frac{S_b}{S_{transf}}$$

$X_{cc}$	Reactância de fugas do transformador [p.u.]
$Z_{transf}$	Impedância do transformador [p.u.]
$S_{transf}$	Potência nominal do transformador [MVA]
$S_b$	Potência de base [MVA]



e) *Modelização de um aerogerador*

$$X_{d,p.u.}'' = X_{d,\Omega}'' \times \frac{S_{AG}}{U^2} \quad X_{d,p.u.} = X_{d,\Omega} \times \frac{S_{AG}}{U^2}$$

$X_d''$  Reactância subtransitória

$X_d$  Reactância Síncrona

$S_{AG}$  Potência do aerogerador [MVA]

Mudança de variável (se  $S_{AG} \neq S_b$ ):

$$X_{d,p.u.}'' = X_{d,p.u.}'' \frac{S_b}{S_{AG}} \quad X_{d,p.u.} = X_{d,p.u.} \frac{S_b}{S_{AG}}$$

f) *Modelização do conjunto transformador/aerogerador*

$$Z_G'' = Z_{transf} + Z_d'' \quad Z_G = Z_{transf} + Z_d$$

2.1.2. *Cálculo de intensidade de corrente de curto-circuito*

Impedância subtransitória de n conjuntos de transformadores/aerogeradores (para  $I_k''$ , inicial)

$$Z_{nG}'' = \frac{Z_G''}{n}$$

Impedância síncrona de n conjuntos de transformadores/aerogeradores (para  $I_k$ , permanente)

$$Z_{nG} = \frac{Z_G}{n}$$

Proceder a esquematização do circuito e obter o valor da impedância equivalente.

$Z_{eq}''$  – impedância equivalente subtransitória [p.u.]

$Z_{eq}$  – impedância equivalente síncrona [p.u.]

Para determinada zona, o cálculo efectua-se da seguinte forma:

Corrente inicial simétrica:

$$S'' = \frac{S_b}{Z_{eq}} \quad I'' = \frac{S''}{\sqrt{3} \times U_{nom}}$$

Corrente estacionária simétrica

$$S = \frac{S_b}{Z_{eq}} \quad I = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_{nom}}$$

## 2.2. Critério de selecção da secção dos condutores

$$S_{esperado} < S_{projectado} < S_{escolhido}$$

$S_{esperado}$  – refere-se ao valor de secção mínima calculado em c).

$S_{projectado}$  – refere-se ao valor de secção mínima calculado neste ponto.

A escolha agora terá de satisfazer a condição e demais imposições regulamentares.

### 2.2.1. Intensidade de corrente térmica esperada

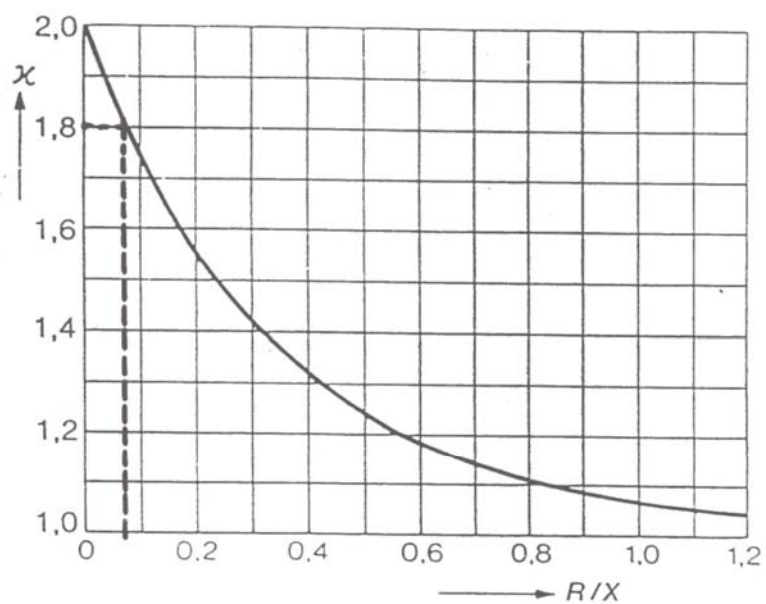
$$i_p = \sqrt{2} \times \chi \times I_k \quad \chi = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}}$$

$\chi$  – factor adimensional que depende da impedância do ponto da rede onde está ligado o parque eólico.

$T_k$  – tempo de actuação das protecções.

Através do gráfico 1 (VDE 0102) é possível retirar o valor de  $\chi$  sabendo R/X.

O valor usual para redes de AT é  $R/X = 0,07$  (mais desfavorável), para o qual se obtém  $\chi = 1,8$ .



Factor  $\chi$

Gráfico 1. Factor  $\chi$  (VDE 0102)

### Cálculo de m:

Com o valor de  $\chi$  e  $T_k$ , pelo gráfico 2 retira-se o valor de m.

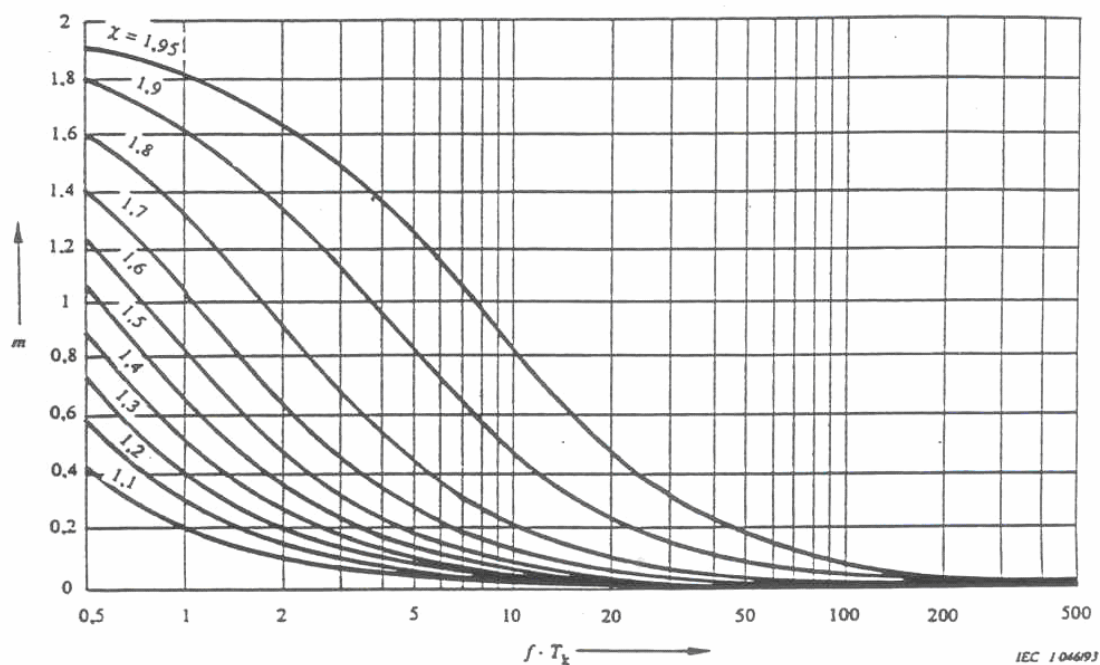


Gráfico 2.m factor numérico de corrente contínua (IEC 865)

### Cálculo de n:

Com a relação  $\frac{I_k''}{I_k}$  e o valor de  $T_k$ , através do gráfico 3 obtém-se n.

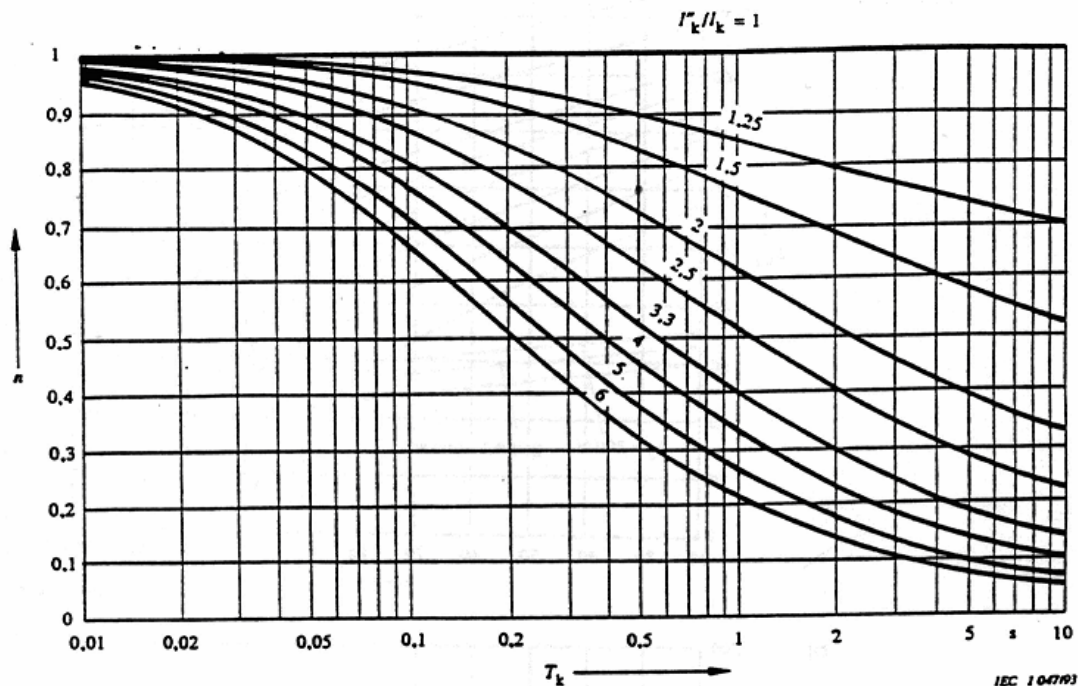


Gráfico 3. n factor numérico de corrente alternada (IEC 865)

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n}$$

- $I_{th}$  Intensidade de corrente térmica de curto-circuito
- $I_k''$  Intensidade de corrente inicial simétrica de curto-circuito
- $I_k$  Intensidade de corrente estacionária simétrica de curto-circuito
- $m$  factor numérica tendo em conta a componente contínua
- $n$  factor numérico tendo em conta a componente alternada

### 2.2.2. Intensidade de corrente térmica de curto-circuito de projecto

Serve a seguinte fórmula para comprovar que a secção mínima calculada em cima encontra-se correctamente dimensionada dentro dos parâmetros máximos de corrente admissível da aparelhagem projectada.

$$\frac{I_{th}}{S_{min}} = \frac{k \sqrt{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}}{\sqrt{t_{kr}}}$$

$I_{th}$  – Intensidade de corrente térmica de curto-circuito [A] <sup>(1)</sup>

$S_{min}$  – secção do condutor [mm<sup>2</sup>]

$t_{kr}$  – tempo de duração do curto-circuito [s]

$\theta_i$  – temperatura inicial do condutor [80°C]

$\theta_f$  – temperatura final do condutor [200°C]

$\beta$  – Inverso do coeficiente de temperatura da resistência a 20°C do material [°C]

$k$  – constante do material [A mm<sup>-2</sup>s<sup>1/2</sup>]

<i>Constante de materiais (k)</i>		
Material	$\beta$ [°C]	$k$ [A mm <sup>-2</sup> s <sup>1/2</sup> ]
Cobre	234	226
Alumínio	228	148
Aço	202	78

<sup>(1)</sup> valor referente ao máximo de intensidade de corrente admissível pela aparelhagem seleccionada

### 2.2.3. Verificação da escolha de condutores

Intensidades de correntes nominais:  $I_{MAX}^E < I_N$

Intensidades de correntes de curto-circuito:  $I_{th}^E < I_{th}^D < I_{th}^{Cond.}$

$I_{MAX}^E$  - Intensidade máxima de exploração esperada [A]

$I_N$  - Intensidade nominal do condutor [A]

$I_{th}^E$  - Intensidade térmica equivalente de curto-circuito de exploração esperada [A]

$I_{th}^D$  - Intensidade térmica equivalente de curto-circuito projectada [A]

$I_{th}^{Cond.}$  - Intensidade térmica equivalente de curto-circuito do condutor escolhido [A]

## 2.3. Selecção de Pára-Raios

### 2.3.1. Critério de selecção

$$U_{pl} < BIL^{(1)}$$

$U_{pl}$  – Nível de protecção do pára-raios [kV]

BIL – “basic insulation level” [kV]

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

$U_m$  – valor máximo de tensão permanente da aparelhagem da subestação [kV]

$U_c$  – valor máximo de tensão que mantém continuidade de serviço [kV]

$$U_r \geq 1,45 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

$U_r$  – valor de tensão ao qual é iniciada a descarga [kV]

$$1,2U_a \leq BIL$$

$U_a$  – valor de tensão residual, diferente em magnitude e forma de onda [kV]

Habitualmente usa-se uma descarga característica de 10kA com uma frente de 1 $\mu$ s.

## 2.4. Cálculo da malha de terra

### 2.4.1. Cálculo da resistência da malha de terra da subestação

$$R_g^{Sub} = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \forall (0,25m < h < 2,5m)$$

$R_g^{Sub}$  - Resistência da malha de terra da subestação [ $\Omega$ ]

$\rho$  – resistividade do terreno [ $\Omega$ .m]

L – comprimento do conductor enterrado [m]

h – profundidade do conductor enterrado [m]

A – área coberta pela malha [m<sup>2</sup>]

NOTA:  $R_g^{Sub} \leq 20\Omega$  (art.º 58 RSSPTS)

#### **2.4.2. Cálculo da resistência da malha de terra do parque eólico**

$$R_{PE} = \frac{R_g^{Sub} \times R_g^{MT}}{R_g^{Sub} + R_g^{MT}}$$

#### **2.4.3. Intensidade de corrente de defeito**

A intensidade de corrente de defeito monofásica é dada por:

$$I_F = 3I_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{3Z_f + Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$Z_f$  – impedância de defeito ( $Z_f = Z_c + Z_N + R_g$ ) [ $\Omega$ ]

$Z_c$  – resistência de contacto [ $\Omega$ ]

$Z_N$  – impedância de neutro [ $\Omega$ ]

$R_g$  – impedâncias de retorno [ $\Omega$ ]

$Z_1$  – impedância directa [ $\Omega$ ]

$Z_2$  – impedância inversa [ $\Omega$ ]

$Z_0$  – impedância homopolar [ $\Omega$ ]

#### **2.4.4. Tensão de contacto e tensão de passo admissível**

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09}$$

$$E_{touch50} = (1 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad E_{step50} = (1 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$t_s$  – tempo máximo de actuação das protecções [s]

$\rho$  – Resistividade do terreno [ $\Omega \cdot m$ ]

$\rho_s$  – resistividade da camada superficial de cascalho [ $\Omega \cdot m$ ]

$h_s$  – espessura da camada superficial

Nota: o sub-índice 50, significa que são valores para uma pessoa com menos de 50kg.

#### **2.4.5. Elevação do potencial da malha terra**

A elevação é de:

Intensidade de corrente esperada:

$$I_F \times R_{PE} < U_{step50}$$

Intensidade de corrente projectada:

$$I_{th} \times R_{PE} < U_{step50}$$

#### **2.4.6. Comprovação térmica do condutor de terra**

Aplicar as duas correntes (esperada e projectada) e retirar valor da secção e confirmar com a secção do cabo utilizado.

$$\frac{I_{th}}{S} = \frac{k \sqrt{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}}{\sqrt{t_{kr}}}$$

$I_{th}$  – Intensidade de corrente térmica de curto-circuito [A]

$S$  – secção do condutor [ $mm^2$ ]

$t_{kr}$  – tempo de duração do curto-circuito [s]

$\theta_i$  – temperatura inicial do condutor [ $20^\circ C$ ]

$\theta_f$  – temperatura final do condutor [ $200^\circ C$ ]



$\beta$  – Inverso do coeficiente de temperatura da resistência a 0°C do material [°C]

k – constante do material

## 2.5. Barramentos

### 2.5.1. Acções nos tubos

#### a) Acções do próprio peso

$$p_h = 900 \text{ kg/m}^3 \cdot \pi \left( (R + 0,01)^2 - R^2 \right) \text{m}^2$$

R- raio do tubo [m]

Força unitária por peso próprio

$$f_{PP} = p_{PT} + p_{ca} + p_h$$

$p_{PT}$  – Peso próprio unitário (tubos) [kg/m]

$p_{ca}$  – Peso do cabo interior [kg/m]

#### b) Acções do vento

A força do vento é dada por:

$$f_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot s \quad [\text{N/m}]$$

$\alpha$  – coeficiente de redução

c – coeficiente de forma

q – pressão dinâmica do vento [Pa]

s – área da superfície atingida pelo vento [m<sup>2</sup>]

#### c) Acções por curto-circuito

Valor de pico da força que actua sobre o condutor em caso de um curto-circuito trifásico:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times i_{p3}^2 \times \frac{L}{a_m}$$

$F_{m3}$  – força devida a  $i_{p3}$  [N]

$i_{p3}$  – valor de pico da corrente de curto-circuito trifásico [A]

$L$  – comprimento dos tubos [m]

$a_m$  – distância entre fases [m]

$$f_{m3} = \frac{F_{m3}}{L}$$

$f_{m3}$  – valor devido à força, por unidade de comprimento [N/m]

### 2.5.2. Tensões nos tubos (cálculo estático)

Valor da força total:

$$f_T = \sqrt{(f_{m3} + f_v)^2 + f_{pp}^2}$$

Momento flector máximo:

$$M_{máx} = \frac{f_T \times L^2}{8}$$

Tensão máxima:

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{máx}}{W}$$

$W$  – momento resistente (dados do barramento)

Coefficientes de segurança:

#### 1. Limite de flexão do material

$$CS_1 = \frac{R_{p02}}{\sigma_{máx}}$$

$R_{p02}$  – limite flexão mínimo do material (dados do barramento)

#### 2. Carga de rotura do material

$$CS_2 = \frac{\alpha_R}{\sigma_{máx}}$$

$\alpha_R$  – carga de rotura do material

### 2.5.3. Cálculo da flecha

O valor da flecha máxima é dada por:

$$f = \frac{f_{PP} \times L^4}{185 \times E \times J}$$

$f_{PP}$  - força unitária por peso próprio [N/m]

$L$  – comprimento dos tubos [m]

$E$  – módulo de Young [N/mm<sup>2</sup>]

$J$  – momento de inercia [cm<sup>4</sup>]

Nota: A flecha não pode ser superior a  $L/300$ , ou seja,  $f < \frac{L}{300}$ .

### 2.5.4. Tensões nos tubos (cálculo dinâmico)

A tensão máxima é dada por:

$$\sigma_{máx} = V_{\sigma} \times V_r \times \beta \frac{F_{m3} \times L}{8 \times W} \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$V_{\sigma}$  – razão entre tensões dinâmicas e estáticas

$V_r$  – razão entre tensões com reengate e sem reengate

$\beta$  – factor que depende do tipo de suporte

Cálculo da frequência natural do condutor

$$f_c = \frac{\gamma}{L^2} \sqrt{\frac{E \times J}{m'}}$$

$\gamma$  – coeficiente que depende do tipo de suporte

$m'$  – massa do condutor por unidade de comprimento (p<sub>PT</sub>)

para  $f_0=50\text{Hz}$ :

### Cálculo de $V_\sigma$ :

Com a relação  $\frac{f_c}{f_0}$  e sabendo  $\chi$ , através do gráfico 4, tira-se o valor de  $V_\sigma$ .

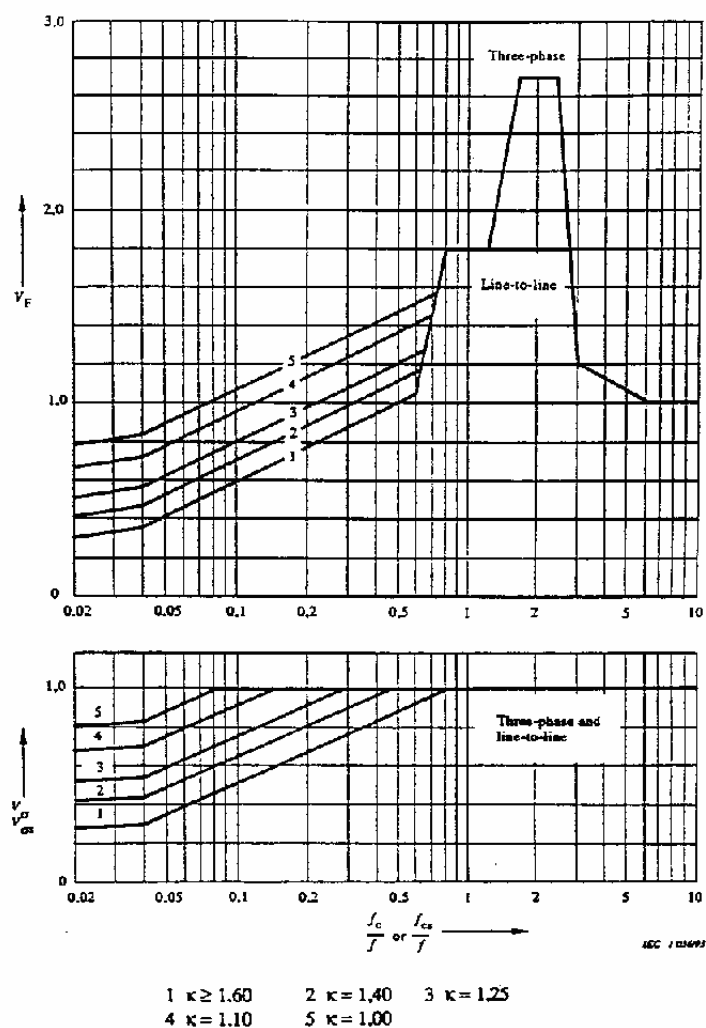


Figure 4 – Factors  $V_F$ ,  $V_\sigma$  and  $V_{\sigma^*}$  to be used with the three-phase and line-to-line short circuits

Gráfico 4.Cálculo de  $V_\sigma$

## Cálculo de $V_r$ :

Sabendo a relação  $\frac{f_c}{f_0}$ , através do gráfico 5, encontra-se  $V_r$ .

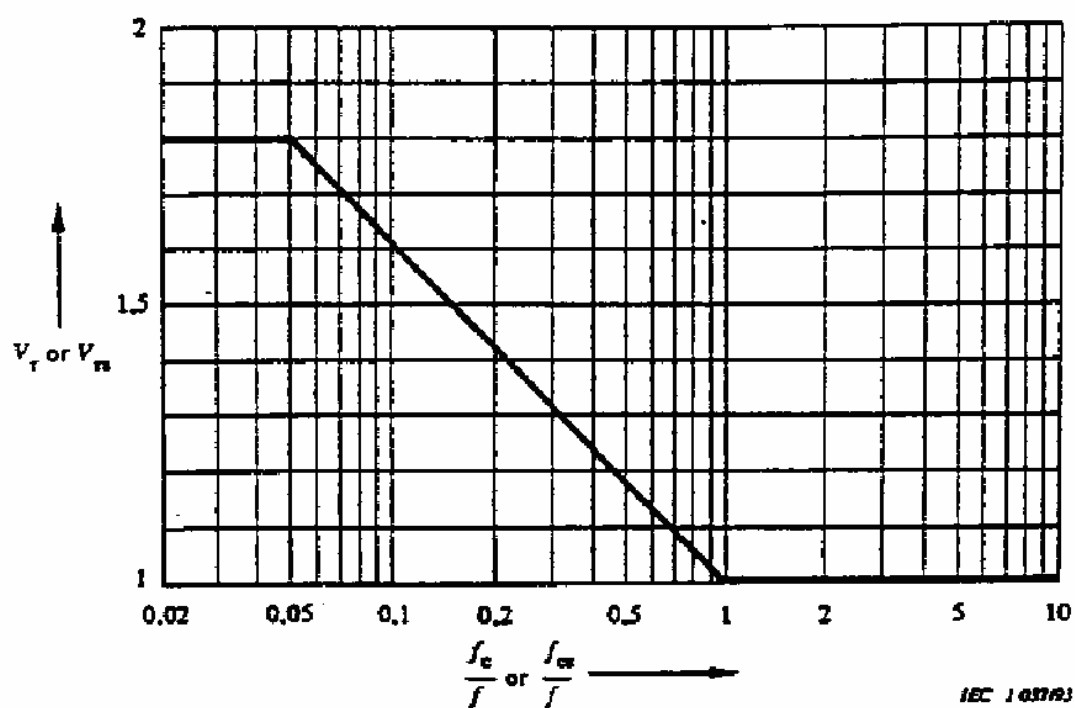


Gráfico 5. Cálculo de  $V_r$

## Cálculo de $\beta$ :

Através do gráfico abaixo determina-se  $\beta$

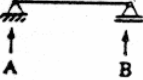
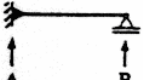
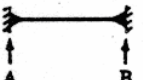
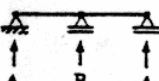
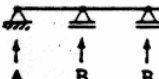
Type of beam and support		Factor $\alpha$	Factor $\beta^*$	Factor $\gamma$
Single span beam	A and B: simple supports 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: fixed support B: simple support 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A and B: fixed supports 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Continuous beam with equidistant simple supports	Two spans 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	Three or more spans 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56
* Plasticity effects included				

Gráfico 6.Cálculo de  $\beta$

É necessário verificar a condição

$$\sigma_{m\acute{a}x} \leq q \times R_{p02}$$

$R_{p02}$  – Valor limite de flexão mínimo do material (Dados do barramento)

$q$  – factor do IEC 865

$$q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$$

$S$  – espessura das paredes do tubo [mm]

$D$  – diâmetro exterior [mm]

## 2.6. Baterias de Condensadores

### 2.6.1. Reactiva necessária pelo parque

#### Potência reactiva consumida pelos transformadores dos AG's

##### Ensaio em vazio:

$P_{fe}$  e  $I_0$  são valores fornecidos pelo fabricante referentes ao ensaio em vazio.

$$G = \frac{P_{fe}}{U_{bt}^2} \quad Y = \frac{I_0}{U_{bt} / \sqrt{3}}$$

G – Conductância [ $\Omega^{-1}$ ]

Y – Admitância [ $\Omega^{-1}$ ]

$P_{fe}$  – Perdas no ferro [W]

$U_{bt}$  – Tensão [V]

$$B = \sqrt{Y^2 - G^2}$$

B – Susceptância [S]

$$Q_0 = B \cdot U_{bt}^2$$

$$Q_{0,tot} = n \times Q_0$$

n – número de aerogeradores

$Q_0$  – Potência reactiva de um transformador [KVar]

$Q_{0,tot}$  – Potência reactiva de todos os transformadores dos AG's [KVar]

##### Ensaio em curto-circuito:

$P_{cu}$  e  $\epsilon_{cc}$  são valores fornecidos pelo fabricante referentes ao ensaio em curto-circuito.

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad R = \frac{P_{cu}}{3 \times I_N^2}$$

$S_N$  – Potência nominal [VA]

$I_N$  – Intensidade de corrente nominal [A]

$U_N$  – Tensão nominal [V]

$R$  – Resistência [ $\Omega$ ]

$P_{cu}$  – Perdas no cobre [W]

$$U_{cc} = \frac{\varepsilon_{cc}(\%) }{100} U_N$$

$U_{cc}$  – Tensão de curto-circuito [V]

$\varepsilon_{cc}$  – Tensão de curto-circuito [%]

$$Z = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} \cdot I_N} \qquad X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$Z$  – impedância [ $\Omega$ ]

$X$  – reactância [ $\Omega$ ]

Em regime variável, a potência reactiva dos transformadores é dada por:

$$Q_{transf / AG} = n \cdot (Q_0 + 3 \cdot X \cdot I^2)$$

,em que a intensidade de corrente é dada por:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

$I$  – intensidade de corrente de um AG [A]

### ***Potência reactiva do transformador de potência***

Os cálculos necessários são iguais aos efectuados para os transformadores dos aerogeradores. Designando-se por :  $Q_{transf / subest}$



**Potência reactiva consumida pela rede MT**

$$X_L = \omega L$$

$$Q_3 = 3 \cdot X_L \cdot I^2$$

L – inductância do cabo [H]

$X_L$  – reactância do cabo [ $\Omega$ ]

$Q_3$  – Potência reactiva do troço [VAr]

$$Q_{ind} = \sum Q_3$$

$Q_{ind}$  – Potência reactiva indutiva total da rede MT [VAr]

**Potência reactiva fornecida pela rede MT**

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$Q_{cap} = \frac{V^2}{X_C}$$

C – Capacitância dos cabos utilizados na rede [F]

$X_C$  – Reactância capacitiva [ $\Omega$ ]

V – tensão da rede de MT [V]

$Q_{cap}$  – potência reactiva fornecida pela rede [VAr]

**Reactiva dos aerogeradores**

O factor de potência dos aerogeradores fica entre os seguintes limites:

$$\cos \varphi = 0,98(cap) \rightarrow Q_{AG}^f = -P_{AG} \times \tan \varphi \text{ (fornece energia reactiva)}$$

$$\cos \varphi = 0,95(ind) \rightarrow Q_{AG}^a = P_{AG} \times \tan \varphi \text{ (absorve energia reactiva)}$$

### ***Balanço energético do parque eólico***

Potência reactiva fornecida

$$Q_{PE}^f = Q_{transf / AG} + Q_{transf / subest} + Q_{ind} + Q_{cap} + Q_{AG}^f$$

Potência reactiva absorvida

$$Q_{PE}^a = Q_{transf / AG} + Q_{transf / subest} + Q_{ind} + Q_{cap} + Q_{AG}^a$$

#### ***2.6.2. Dimensionamento de baterias de condensadores***

Um parque eólico tem que fornecer à rede uma potência reactiva de acordo com a condição:

$$Q \geq 40\% P_{máx}$$

$P_{máx}$  – Potência máxima produzida pelo parque [W]

$Q$  – Potência reactiva produzida pelo parque [VAr]

Considerando  $\cos \varphi = 0,98(cap)$ :

$$Q_{bat} = Q + Q_{PE}^f$$

$Q_{bat}$  – Potência reactiva da bateria de condensadores [VAr]

$Q$  – Potência reactiva produzida pelo parque [VAr]

$Q_{PE}^f$  - Potência reactiva fornecida [VAr]

Nota: o sinal da expressão é positivo uma vez que o valor de  $Q_{PE}^f$  é negativo (injecta na rede, logo fornece).

## 2.7. Cálculo de estruturas e fundações

### 2.7.1. Critérios de projecto

As diferentes acções mecânicas serão calculadas separadamente para cada elemento da aparelhagem e depois serão combinadas.

Os casos de combinação são chamados LC.

LC – Load Combination

a) Combinações fundamentais

- LC1 – acções de base: sobrecargas (peso combinado com vento, sobrecargas de origem estática e força de manobra temporal)
- LC2 - acções de base: vento (peso combinado com vento e sobrecargas)
- LC3 – acções de base: sismo (peso combinado com sismo e sobrecargas)

b) Combinações acidentais

- LC4 – peso combinado com as forças acidentais e sobrecargas

### 2.7.2. Acção sísmica

Os efeitos de acção sísmica podem ser calculados das seguintes formas:

- a) Método de análise dinâmico
- b) Processos simplificados de análise estático

Força no plano horizontal:

$$F_{sis}^{x,y} = 0,22 \cdot \alpha \cdot P_p$$

Força no plano horizontal:

$$F_{sis}^z = \frac{1}{3} \cdot 0,22 \cdot \alpha \cdot P_p$$

$\alpha$  – Coeficiente de sismicidade

$P_p$  – Peso permanente total (cabo + aparelhagem + suporte)

### 2.7.3. Cálculo de Forças

#### 2.7.3.1. Esforços horizontais

##### a) Esforços longitudinais (x-x)

- Força do vento sobre o aparelho aplicado no seu ponto médio:

$$F_{va}^x = 1 \times 1 \times 750 N / m^2 \times L \times D \times (1 kg / 9,81 N) \text{ [kg]}$$

- Força do vento sobre o suporte aplicado no seu ponto médio:

$$F_{vs}^x = 1 \times 1,85 \times 750 N / m^2 \times h \times H \times (1 kg / 9,81 N) \text{ [kg]}$$

- Força devido a esforços sísmicos aplicado ao centro de gravidade do conjuntos aparelhagem + suporte:

$$F_{sis}^x = 0,22 \cdot P_p \text{ [kg]}$$

$P_p$  – Peso permanente (soma dos pesos do condutor, equipamento e suporte)

- Força devido a esforços que possam ocorrer durante a montagem, carga estática aplicado ao ponto mais crítico da estrutura:

$$F_{mon}^x = 100 \text{ [kg]}$$

- Força devido a esforços durante a operação de manobra (apenas o suporte do interruptor):

$$F_{ope}^x = 200 \text{ [kg]}$$

A força exercida pelo vento é dada por:

$$F_v = \alpha \times c \times q \times s \text{ [N]}$$

$\alpha$  – coeficiente de redução ( 0,6 para condutores, 1 para apoios e aparelhagem)

$c$  – coeficiente de forma (1 para condutores, 1,85 para perfis transversais, 1,55 para perfis longitudinais)

q – pressão dinâmica do vento (750 Pa)

s – superfície da área batida pelo vento (m<sup>2</sup>)

*b) Esforços transversais (y-y)*

- Força devido a acções electrodinâmicas (apenas para suportes de aparelhos ligados com condutores rígidos):

$$F_{cc}^y = \sqrt{3} \times 10^{-1} \times \frac{(1,8 \times \sqrt{2} \times I_{cc})^2}{a} \times l \quad [\text{kg}]$$

- Força devido ao vento sobre os condutores que ligam ao aparelho aplicado na sua parte superior:

$$F_{vc}^y = 0,6 \times 1 \times 750 \text{ N} / \text{m}^2 \times l \times (d + 0,02) \times (1 \text{ kg} / 9,81 \text{ N}) \quad [\text{kg}]$$

- Força devido ao vento sobre o aparelho, aplicado no seu ponto médio:

$$F_{va}^y = 1 \times 1 \times 750 \text{ N} / \text{m}^2 \times L \times D \times (1 \text{ kg} / 9,81 \text{ N}) \quad [\text{kg}]$$

- Força devido ao vento sobre o suporte, aplicado no seu ponto médio:

$$F_{vs}^y = 1 \times 1,55 \times 750 \text{ N} / \text{m}^2 \times h \times H \times (1 \text{ kg} / 9,81 \text{ N}) \quad [\text{kg}]$$

- Força devido a esforços sísmicos aplicado ao centro de gravidade do conjuntos aparelhagem + suporte:

$$F_{sis}^y = 0,22 \cdot P_p \quad [\text{kg}]$$

- Força devido a esforços que possam ocorrer durante a montagem, carga estática aplicado ao ponto mais crítico da estrutura:

$$F_{mon}^y = 100 \quad [\text{kg}]$$

- Força devido a esforços durante a operação de manobra (apenas o suporte do interruptor):

$$F_{ope}^y = 200 \quad [\text{kg}]$$

l – longitude do vão [m]

a – distância entre fases [m]

d – diâmetro exterior do condutor [m]

D – diâmetro máximo do aparelho [m]

L – altura do aparelho [m]

H – altura do suporte [m]

h - altura do suporte exposto ao vento [m]

I<sub>cc</sub> – intensidade de corrente de curto-circuito trifásica [kA]

### c) Resultante

O esforço máximo horizontal é o maior dos esforços transversais e longitudinais, ou seja,

$$F_h = \max[\sum F_{tot}^x, \sum F_{tot}^y]$$

#### 1) Combinação de base: vento

$$F_h = \max \left[ \begin{array}{l} (1,5F_{va}^x + 1,5F_{vs}^x + 1,5 \cdot 0,7F_{mon}^x + 1,5 \cdot 0,7F_{ope}^x) \\ (1,5 \cdot 0,7F_{cc}^y + 1,5F_{vc}^y + 1,5F_{va}^y + 1,5F_{vs}^y + 1,5 \cdot 0,7F_{mon}^y + 1,5 \cdot 0,7F_{ope}^y) \end{array} \right]$$

#### 2) Combinação de base: sismo

$$F_h = \max \left[ \begin{array}{l} (1,5F_{sis}^x + 0,4F_{mon}^x + 0,4F_{ope}^x) \\ (0,4F_{cc}^y + 1,5F_{sis}^y + 0,4F_{mon}^y + 0,4F_{ope}^y) \end{array} \right]$$

### 2.7.3.2. Esforços verticais

#### a) Combinação de base: vento

Força vertical máxima:

$$F_{tot}^z = 1,5P_c + 1,5P_h + 1,5P_a + 1,5P_s + 1,5 \cdot 0,7F_{mon}^z + 1,5 \cdot 0,7F_{ope}^z$$

#### b) Combinação de base: sismo

Força vertical máxima:

$$F_{tot}^z = P_c + P_h + P_a + P_s + 1,5F_{sis}^z + 0,4F_{mon}^z + 0,4F_{ope}^z$$

$P_c$  – Peso do condutor do vão considerado [kg]

$P_h^{(1)}$  – Peso do gelo sobre o condutor [kg]

$P_a$  – Peso do aparelho [kg]

$P_s$  – Peso do suporte [kg]

$F_{sis}^z$  - Esforço vertical devido ao sismo [kg]

$F_{mon}^z$  - Esforço vertical devido à montagem [100kg]

$F_{ope}^z$  - Esforço vertical devido a manobras de operação [800kg]

$$^{(1)} P_h = 900 \times \frac{\pi}{4} \times \left[ (d + 2 \times 0,01)^2 - d^2 \right] \times l$$

## 2.7.4. Cálculo de estruturas

### 2.7.4.1. Momentos

#### i. momentos longitudinais

O momento total longitudinal é dado por:

Combinação de base: vento

$$M_{tot}^x = 1,5M_{viento}^x + 1,5 \cdot 0,7M_{mon}^x + 1,5 \cdot 0,7M_{ope}^x \quad [\text{kg.m}]$$

Combinação de base: sismo

$$M_{tot}^x = 1,5M_{sis}^x + 0,4M_{mon}^x + 0,4M_{ope}^x \quad [\text{kg.m}]$$

Com,

$$M_{viento}^x = F_{va}^x \times (L/2 + H) + F_{vs}^x \times (H/2) \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{sis}^x = F_{sis}^x \times H_{cdg} \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{mon}^x = F_{mon}^x \times (L + H) \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{ope}^x = F_{ope}^x \times (L/2 + H) \quad [\text{kg.m}]$$

Sendo,

$H_{cdg}$  – Altura do centro de gravidade [m]

$$H_{cdg} = \frac{(P_c + P_h) \times (L + H) + P_a \times (L/2 + H) + P_s \times (H/2)}{P_c + P_h + P_a + P_s}$$

ii. *momentos transversais*

O momento total transversal é dado por:

Combinação de base: vento

$$M_{tot}^y = 1,5 \cdot 0,7M_{cc}^y + 1,5M_{viento}^y + 1,5 \cdot 0,7M_{mon}^y + 1,5 \cdot 0,7M_{ope}^y \quad [\text{kg.m}]$$

Combinação de base: sismo

$$M_{tot}^y = 0,4M_{cc}^y + 1,5M_{sis}^y + 0,4M_{mon}^y + 0,4M_{ope}^y \quad [\text{kg.m}]$$

Com,

$$M_{cc}^y = F_{cc}^y \times (L + H) \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{vento}^y = F_{vc}^y \times (L + H) + F_{va}^y \times (L/2 + H) + F_{vs}^y \times (H/2) \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{sis}^y = F_{sis}^y \times H_{cdg} \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{mon}^y = F_{mon}^y \times (L + H) \quad [\text{kg.m}]$$

$$M_{ope}^y = F_{ope}^y \times H \quad [\text{kg.m}]$$

***Sentido longitudinal (x-x)***

$s_x$  – altura do perfil ou distância entre perfis (estruturas compostas) [m]

$I_x$  – momento de inércia longitudinal [ $\text{cm}^4$ ]

$W_x$  – módulo resistente longitudinal [ $\text{cm}^3$ ]

$S$  – área total do perfil [ $\text{cm}^2$ ]



$i_x$  – raio longitudinal [cm]

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{S}}$$

**Sentido transversal (y-y)**

$S_y$  – altura do perfil ou distância entre perfis (estruturas compostas) [m]

$I_y$  – momento de inércia transversal [cm<sup>4</sup>]

$W_y$  – módulo resistente transversal [cm<sup>3</sup>]

$S$  – área total do perfil [cm<sup>2</sup>]

$I_y$  – raio transversal [cm]

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{S}}$$

#### 2.7.4.2. Tensões

As tensões suportadas serão as seguintes:

Tensão longitudinal:

$$\sigma_x = \frac{100 \times M_{tot}^x}{W_x} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

Tensão transversal:

$$\sigma_y = \frac{100 \times M_{tot}^y}{W_y} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

Tensão de flexão:

$$\sigma_p = \omega \frac{F_{tot}^z}{S} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

$\omega$  – coeficiente de flexão (obtido através da tabela2, sabendo o valor de  $\lambda$ )

$\lambda$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\lambda$
20	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	20
30	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	30
40	1.07	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10	1.11	1.12	1.12	40
50	1.13	1.14	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	50
60	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.29	1.30	1.31	1.33	60
70	1.34	1.36	1.37	1.39	1.40	1.42	1.44	1.46	1.47	1.49	70
80	1.51	1.53	1.55	1.57	1.60	1.62	1.64	1.66	1.69	1.71	80
90	1.74	1.76	1.79	1.81	1.84	1.86	1.89	1.92	1.95	1.98	90
100	2.01	2.03	2.06	2.09	2.13	2.16	2.19	2.22	2.25	2.29	100
110	2.32	2.35	2.39	2.42	2.46	2.49	2.53	2.56	2.60	2.64	110
120	2.67	2.71	2.75	2.79	2.82	2.86	2.90	2.94	2.98	3.02	120
130	3.06	3.11	3.15	3.19	3.23	3.27	3.32	3.36	3.40	3.45	130
140	3.49	3.54	3.58	3.63	3.67	3.72	3.77	3.81	3.86	3.91	140
150	3.96	4.00	4.05	4.10	4.15	4.20	4.25	4.30	4.35	4.40	150
160	4.45	4.51	4.56	4.61	4.66	4.72	4.77	4.82	4.88	4.93	160
170	4.99	5.04	5.10	5.15	5.21	5.26	5.32	5.38	5.44	5.49	170
180	5.55	5.61	5.67	5.73	5.79	5.85	5.91	5.97	6.03	6.09	180
190	6.15	6.21	6.27	6.34	6.40	6.46	6.53	6.59	6.65	6.72	190
200	6.78	6.85	6.91	6.98	7.05	7.11	7.18	7.25	7.31	7.38	200
210	7.45	7.52	7.59	7.66	7.72	7.79	7.86	7.93	8.01	8.08	210
220	8.15	8.22	8.29	8.36	8.44	8.51	8.58	8.66	8.73	8.80	220
230	8.88	8.95	9.03	9.11	9.18	9.26	9.33	9.41	9.49	9.57	230
240	9.64	9.72	9.80	9.88	9.96	10.04	10.12	10.20	10.28	10.36	240
250	10.44										

**Tabela 2. Coeficiente de flexão**

Com:

$$\lambda = \frac{100 \cdot H}{i_{\min}}$$

sendo,  $i_{\min}$ , o menor valor entre  $i_x$  e  $i_y$ .

O coeficiente de segurança tem de respeitar a seguinte restrição:

$$C.S. = \frac{2600}{\sigma_p + \max(\sigma_x, \sigma_y)} \geq 1,5$$

## 2.7.5. Cálculo de fundações

### 2.7.5.1. Fixação

Para assegurar que a sapata não cede devido às acções exercidas sobre a estrutura, a seguinte restrição deve ser verificada:

$$\frac{M_e}{M_f} > 1,5$$

$M_e$  – momento estabilizador originado pelo peso total sobre a fundação aplicado no extremo da mesma [kg.m]

$$M_e^x = P \frac{B_x}{2} \qquad M_e^y = P \frac{B_y}{2}$$

$M_f$  – momento flector máximo. Valor máximo dos momentos longitudinais e transversais que actuam na sapata [kg.m]

$$M_f^x = M_{tot}^x + F_{tot}^x \cdot B_z \qquad M_f^y = M_{tot}^y + F_{tot}^y \cdot B_z$$

$B_x, B_y, B_z$  – longitude, altura e profundidade da sapata [m]

$P$  – Peso total do condutor do vão considerado, aparelho, estrutura de suporte e a sapata [m]

$$P = P_c + P_a + P_s + P_z$$

$P_z$  – Peso da sapata [m]

### 2.7.5.2. Submersão

Para análise da submersão a que está submetida a sapata usa-se um factor  $e$ , chamada excentricidade que relaciona o momento flector com a força vertical exercida na sapata.

$$e = \frac{M_f}{F_{tot}^z + P_z}$$

Para *momentos longitudinais*  $M_f^x$ , podemos ter:

a)  $e_x \leq \frac{B_x}{6}$ , distribuição trapezoidal de tensões cujo valor máximo é:

$$\sigma_{máx}^x = \sigma_h^x = \frac{P}{B_x \cdot B_y} \left( 1 + 6 \frac{e_x}{B_x} \right)$$

b)  $e_x > \frac{B_x}{6}$ , distribuição triangular de tensões cujo valor máximo é:

$$\sigma_{máx}^x = \sigma_h^x = \frac{4 \cdot P}{3 \cdot B_y \cdot (B_x - 2e_x)}$$

Para a sapata não se afundar a seguinte condição deve ser verificada:

$$\sigma_h^x < \sigma_t$$

$\sigma_t$  – tensão máxima admissível do terreno [kg/cm<sup>2</sup>]

Para *momentos transversais*  $M_f^y$ , podemos ter:

a)  $e_y \leq \frac{B_y}{6}$ , distribuição trapezoidal de tensões cujo valor máximo é:

$$\sigma_{máx}^y = \sigma_h^y = \frac{P}{B_x \cdot B_y} \left( 1 + 6 \frac{e_y}{B_y} \right)$$

b)  $e_y > \frac{B_y}{6}$ , distribuição triangular de tensões cujo valor máximo é:

$$\sigma_{máx}^y = \sigma_h^y = \frac{4 \cdot P}{3 \cdot B_x \cdot (B_y - 2e_y)}$$

Para a sapata não se afundar a seguinte condição deve ser verificada:

$$\sigma_h^y < \sigma_t$$

$\sigma_t$  – tensão máxima admissível do terreno [kg/cm<sup>2</sup>]

### 2.7.5.3. Deslizamento

Para a sapata não deslizar deve cumprir-se a seguinte expressão:

$$\frac{\mu \cdot P}{F_h} > 1,5$$

$\mu$  – tangente do ângulo interno do terreno [°]

$F_h^{(1)}$  – Força horizontal máxima aplicada na sapata [kg]

(1) Maior valor entre  $F_{tot}^x$  e  $F_{tot}^y$ .