

<b>0A</b>	<b>14/11/18</b>	<b>Emissão Inicial</b>		VRA	KCAR LNAG
Nº	Data	Natureza da Revisão		Elaborado	Verificado Aprovado
			<b>Sterlite São Francisco Energia S.A.</b>		
<b>Sterlite São Francisco Transmissão de Energia S.A.</b>					
<b>PROJETO BÁSICO – LOTE 7 – LEILÃO Nº02/2018 - ANEEL</b>					
ELAB.	VERIF.	APROV.	RESP. TÉCNICO	CREA	DATA
VRA	KCAR	LNAG	CSF	2000119859	14/11/2018
TÍTULO					
<b>SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA VIBRAÇÕES EÓLICAS</b>					
Nº DOCUMENTO				FOLHA	REVISÃO
<b>SF01818-LT-GNLT-G-RE-0015</b>				<b>1</b>	<b>0A</b>

---

## SUMÁRIO

1.	OBJETIVO .....	3
2.	TIPOS DE FENÔMENOS VIBRATÓRIOS .....	3
3.	VIBRAÇÃO EÓLICA.....	4
3.1	ANÁLISE DO FENÔMENO .....	4
3.2	AMPLITUDE DE FLEXÃO TOLERÁVEL.....	5
3.3	CRITÉRIO DE PROTEÇÃO .....	6
4.	OSCILAÇÃO INDUZIDA NO FEIXE.....	9
4.1	ANÁLISE DO FENÔMENO .....	9
5.	ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO .....	10
5.1	PROJETO.....	10
5.2	GARANTIA DE DESEMPENHO .....	10
6.	REFERÊNCIAS .....	11
7.	FIGURAS .....	12

## 1. OBJETIVO

Definir o sistema de proteção a ser utilizado nas LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina, 180 km, e Olindina – Sapeaçu, 187 km, integrantes do lote 7 do Edital de Leilão nº02/2018 ANEEL, visando proteger os condutores e cabos para-raios contra os efeitos nocivos da vibração produzida por ventos uniformes de baixa intensidade.

## 2. TIPOS DE FENÔMENOS VIBRATÓRIOS

A ação de ventos com velocidade uniforme sobre condutores e para-raios pode dar origem a três fenômenos vibratórios distintos, todos capazes de produzir movimentos cíclicos dos cabos.

As tensões de flexão decorrentes desses movimentos podem conduzir a falhas mecânicas nos cabos e nas ferragens que os suportam.

Os três fenômenos vibratórios são normalmente identificados como:

- a) Vibração eólica;
- b) Oscilação induzida em cabos dispostos em feixe;
- c) Galope.

Galope é um fenômeno produzido por ventos uniformes atuando sobre cabos revestidos por formações assimétricas de gelo. Por ser típico de países de clima frio o galope de cabos é praticamente desconhecido no Brasil, não sendo, portanto, tratado neste relatório.

Os dois outros fenômenos vibratórios, ambos capazes de afetar as LTs em estudo, apresentam as seguintes características:

Característica	Vibração Eólica	Oscilação Induzida no Feixe
LTs afetadas	Todas	Utilizando condutores em feixe
Faixa de frequência	3 a 150 Hz	0,15 a 10 Hz
Amplitude da vibração (pico a pico)	0,01D a (D – diâmetro do cabo)	D 0,5D a 20D (no sub-vão) (D – diâmetro do cabo)
Velocidade do vento	1 a 7 m/s	4 a 18 m/s
Componentes afetados	mais fios dos cabos	espaçadores-amortecedores, ferragens de suspensão, fios dos cabos
Causa das falhas mecânicas	fadiga do material dos fios devido à flexão cíclica	contato entre subcondutores do feixe, envelhecimento acelerado das ferragens de suspensão e dos espaçadores-amortecedores

Nos itens seguintes são examinados os dois fenômenos vibratórios que podem afetar as LTs em estudo e os sistemas de amortecimento previstos visando garantir a integridade mecânica dos cabos e ferragens durante a vida útil das instalações.

### 3. VIBRAÇÃO EÓLICA

#### 3.1 ANÁLISE DO FENÔMENO

Cabos trançados, como os utilizados normalmente em uma linha de transmissão, podem ser comparados a um cilindro submetido a ventos horizontais. Esses ventos, se atuarem com grandeza e direção uniformes, irão submeter os cabos a forças verticais alternadas com a seguinte frequência [1] [2]:

$$f = S \frac{V}{D} \quad (1)$$

Onde:

- f frequência da oscilação, em Hz
- V componente da velocidade do vento perpendicular ao cabo, em m/s
- D diâmetro do cabo, em m
- S número de Strouhal, adimensional (para cabos trançados,  $S = 0,185$ )

A frequência de ressonância de um cabo instalado em um vão de uma LT é dada pela equação:

$$f_r = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{H}{m}} \quad (2)$$

Onde:

- $f_r$  frequência de ressonância do cabo, em Hz
- H tração no cabo, em N
- L comprimento do vão, em m
- m massa unitária do cabo, em kg/m
- n número inteiro (1, 2, 3....) indicativo da ordem do harmônico

O comprimento da onda ( $\lambda$ ), em metros, é dado pela expressão:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (3)$$

Combinando (2) e (3), obtém-se:

$$\lambda \cdot f_r = \sqrt{\frac{H}{m}} \quad (4)$$

Se, em um determinado vão, a frequência da força oscilatória produzida pelo vento (equação "1") for aproximadamente igual a uma das frequências de ressonância do cabo (equação "2"), este começará a vibrar em um plano vertical.

Quando o cabo começar a vibrar a amplitude da vibração tenderá a crescer até que a potência introduzida pelo vento seja equilibrada pela potência dissipada pelo próprio cabo (auto-amortecimento) e pelas extremidades do vão.

Ao atingir esse ponto a energia contida no vão entra em equilíbrio e o cabo passa a estar submetido a uma vibração estacionária com a amplitude que lhe corresponder.

A vibração devida ao vento provoca um movimento alternado de flexão do cabo que é transmitido aos fios trançados que o compõem e agravado pelo atrito entre esses fios.

Essa flexão cíclica introduz tensões dinâmicas e deformações nos fios resultando em um desgaste progressivo dos mesmos.

Esse desgaste, dependendo das restrições impostas aos movimentos do cabo, da amplitude da vibração e do tipo do material utilizado, pode levar à ruptura de alguns desses fios e comprometer seriamente a resistência mecânica do cabo.

As maiores deformações específicas (deformação linear por unidade de comprimento) e, por via de consequência, as rupturas de fios, ocorrem nos pontos de fixação dos cabos, junto aos grampos.

Em cabos CAA as rupturas ocorrem, em geral, nos fios de alumínio, por terem resistência a fadiga inferior aos fios de aço. Em cabos com duas ou mais camadas de fios de alumínio os fios das camadas internas costumam ser os primeiros a serem afetados.

### 3.2 AMPLITUDE DE FLEXÃO TOLERÁVEL

A inclinação inicial “ $\lambda$ ”, expressa em radianos, de um ciclo de vibração senoidal com comprimento de onda “ $\lambda$ ” e amplitude “ $Y$ ”, pico a pico, é dada pela expressão:

$$\theta = \frac{\pi Y}{\lambda} \quad (5)$$

A deformação específica dinâmica [3] associada à amplitude “ $Y$ ”, pico a pico, no ponto em que o cabo sai de seu grampo de fixação, é dada, de forma aproximada, pela expressão:

$$\varepsilon = \theta d \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (6)$$

Onde:

$\varepsilon$  deformação específica dinâmica máxima, pico a pico

$\theta$  inclinação inicial do ciclo de vibração, em radianos

$d$  diâmetro do fio da coroa externa do cabo, em mm

$H$  tração no cabo, em N

$EI$  rigidez do cabo, em N.mm<sup>2</sup>

Combinando as fórmulas (4), (5) e (6) obtém-se as seguintes expressões relacionando a amplitude de vibração, pico a pico, à deformação específica dinâmica, pico a pico:

$$\varepsilon = \frac{\pi Y d}{\lambda} \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \pi Y f d \sqrt{\frac{m}{EI}} \quad (8)$$

A fórmula (8) pode ser apresentada no formato:

$$Y f = \frac{\varepsilon}{\pi d} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (9)$$

O método mais utilizado para medir ( $Y$ ) é aquele padronizado pelo IEEE [3], consistindo em efetuar a medição a 89 mm do ponto em que o cabo sai de seu elemento de fixação.

O valor dessa amplitude que um cabo é capaz de suportar com segurança ao longo de sua vida útil é usualmente identificado como “Amplitude de Flexão Tolerável” ( $Y_0$ ) e depende apenas das características físicas e geométricas do cabo e da tração a que o mesmo está submetido.

### 3.3 CRITÉRIO DE PROTEÇÃO

A partir da formulação apresentada nos itens anteriores a proteção de uma LT contra os efeitos nocivos da vibração eólica consistiria em:

- Determinar os valores das amplitudes de vibração ( $Y$ ) para o cabo em estudo, quando submetido aos ventos que poderão ocorrer na região atravessada pela LT;
- Comparar as amplitudes calculadas com o valor  $Y_0$ ;
- Sempre que  $Y > Y_0$  prever a instalação de dispositivos apropriados sobre o cabo visando dissipar parte da energia introduzida pelo vento e reduzir a amplitude de vibração a valores tais que  $Y \leq Y_0$ .

A formulação teórica desenvolvida nos itens anteriores e resumida no critério delineado acima pode ser aceita como uma representação do fenômeno da vibração produzida pelo vento. Seu uso é perfeitamente possível em ensaios de projeto para verificação da eficiência de diferentes dispositivos de amortecimento, na análise de medições das vibrações em cabos instalados no campo ou em outros ensaios de laboratório relacionados ao fenômeno da vibração eólica.

Contudo, sua aplicação no projeto básico de uma linha de transmissão específica não é factível tendo em vista o grande número de variáveis envolvidas e as poucas informações disponíveis sobre algumas delas, como, por exemplo, as características de auto-amortecimento dos cabos ou as distribuições estatísticas de ventos de baixa intensidade.

O procedimento usual de projeto consiste, portanto, em apoiar-se em resultados publicados sobre o desempenho de linhas existentes e aplicar as recomendações extraídas do comportamento dessa LT ao projeto em estudo.

No caso presente estão sendo adotadas as recomendações do Grupo de Trabalho CIGRE 22.11 publicadas na revista ELECTRA [4].

Como critério de avaliação da necessidade de proteção contra vibração eólica a referência citada utiliza parâmetros que levam em conta a tração atuando no cabo, sua massa unitária, a extensão do vão e o efeito da rugosidade do terreno atravessado sobre a turbulência do vento.

São indicados a seguir os dois parâmetros utilizados referentes ao cabo e à extensão do vão:

$$\frac{LD}{m} \quad (\text{em m}^3/\text{kg}) \quad e \quad \frac{H}{p} \quad (\text{em m})$$

Onde:

- L      comprimento do vão, em m  
D      diâmetro do cabo, em m  
m      massa unitária do cabo, em kg/m  
H      tração horizontal no cabo, inicial, temperatura mínima média, em kgf  
p      peso unitário do cabo, em kgf/m

Os dois parâmetros acima são associados a quatro tipos de terreno com as seguintes características:

<b>Tipo</b>	<b>Características do Terreno</b>
1	aberto, plano, sem obstruções, tal como desertos planos e grandes superfícies de água;
2	aberto, plano, sem obstruções, tal como áreas agriculturáveis ou pastos sem obstruções;
3	aberto, plano ou ondulado, com poucas obstruções, tal como áreas agriculturáveis ou pastos com poucas árvores ou outros obstáculos esparsos;
4	presença de construções e árvores, tal como subúrbios residenciais, pequenas cidades, áreas com matas.

A análise das considerações teóricas sobre o fenômeno vibratório combinada com a experiência de campo acumulada ao longo das últimas décadas levaram o referido grupo de trabalho [4] a propor o gráfico apresentado na Figura 1, composto basicamente, por três áreas:

- Área situada à esquerda das retas verticais aplicáveis a cada tipo de terreno, para a qual não é necessário o uso de amortecedores;
- Área interna, à direita das retas verticais, abaixo da linha horizontal e à esquerda das curvas aplicáveis a cada tipo de terreno na qual os cabos podem ser seguramente protegidos pelo simples uso de amortecedores nas extremidades dos vãos;
- Área situada acima do limite horizontal do gráfico e à direita das curvas aplicáveis a cada tipo de terreno, na qual os cabos necessitam de proteções reforçadas, ou seja, maior número de amortecedores nas extremidades dos vãos e uso de armaduras pré-formadas ou grampos de suspensão tipo AGS (armor grip suspension).

Os efeitos da vibração eólica são examinados a seguir para todos os cabos a serem utilizados nas LTs [5]. São indicadas abaixo as características físicas desses cabos:

	<b>CAL (1120) 1010</b> kcmil	<b>CAA</b> DOTTEREL	<b>3/8"EAR</b>	<b>OPGW1</b>	<b>OPGW2</b>
D (m)	0,02934	0,01542	0,00914	0,0144	0,0134
m (kg/m)	1,403	0,657	0,407	0,700	0,682
p (kgf/m)	1,403	0,657	0,407	0,700	0,682

A seguir, os valores dos parâmetros (LD/m) e (H/p) para vãos de 300 a 900m para as LTs 500 kV Porto Sergipe – Olindina – Sapeaçu:

<b>CAL-1120 1010 KCMIL</b>	300	400	500	600	700	800	900
H (kgf)	2554	2426	2362	2327	2305	2290	2281
LD/m (m <sup>3</sup> /kg)	6.32	8.43	10.53	12.64	14.75	16.86	18.96
H/p (m)	1845	1753	1707	1681	1665	1655	1648
<b>OPGW1</b>	300	400	500	600	700	800	900
H (kgf)	1474	1382	1334	1307	1290	1279	1272
LD/m (m <sup>3</sup> /kg)	6.17	8.23	10.29	12.34	14.40	16.46	18.51
H/p (m)	2106	1974	1905	1866	1843	1827	1816
<b>CAA Dotterel</b>	300	400	500	600	700	800	900
H (kgf)	1327	1264	1231	1212	1200	1192	1187
LD/m (m <sup>3</sup> /kg)	7.04	9.39	11.74	14.08	16.43	18.78	21.12
H/p (m)	2020	1924	1874	1845	1826	1814	1807
<b>OPGW2</b>	300	400	500	600	700	800	900
H (kgf)	1293	1263	1246	1236	1230	1226	1223
LD/m (m <sup>3</sup> /kg)	5.89	7.86	9.82	11.79	13.75	15.72	17.68
H/p (m)	1896	1852	1827	1812	1804	1798	1793
<b>3/8" EAR</b>	300	400	500	600	700	800	900
H (kgf)	777	756	745	739	735	732	730
LD/m (m <sup>3</sup> /kg)	6.74	8.99	11.23	13.48	15.73	17.97	20.22
H/p (m)	1909	1857	1830	1816	1806	1799	1794

(1) A Figura 1 se aplica a cabos de alumínio (todos os tipos) ou alumínio-aço. Os valores obtidos para cabos de aço devem ser considerados como conservativos.

Plotando os valores acima utilizando os mesmos eixos da Figura 1 obtém-se as curvas mostradas na Figura, a qual inclui também a curva limite correspondente ao terreno tipo 3 (aberto, plano, com poucas obstruções). A análise da figura 2 permite concluir:

- Cabo condutor CAL 1120 - 1010 kcmil – Vãos de até 700m caem na área em que o uso de amortecedores nas extremidades dos vãos é proteção suficiente para as LTs.
- Cabos para-raios CAA DOTTEREL e 3/8" EAR – Vãos até 600 m caem na área em que o uso de amortecedores nas extremidades dos vãos é proteção suficiente para as LTs.
- Cabos OPGW1 e OPGW2 – Vãos até 700 m caem na área em que o uso de amortecedores nas extremidades dos vãos é proteção suficiente para as LTs.

Quando utilizados em vãos superiores ao limite indicado, os cabos devem receber proteção reforçada, a qual pode ser obtida pelo uso de uma quantidade maior de amortecedores em ambas as extremidades dos vãos.

Adicionalmente os cabos para-raios CAA DOTTEREL e 3/8" EAR deverão ser protegidos por armaduras pré-formadas.

Travessias de grandes rios e outros vãos longos que, pelas características do terreno atravessado, possam favorecer a ação de ventos uniformes com baixo nível de turbulência, devem receber sistema de amortecimento reforçado, conforme orientação do projetista das LTs.

No decorrer do projeto executivo, após serem determinadas por ensaios de tipo [6] as características de amortecimento dos materiais efetivamente comprados, a quantidade de amortecedores por vão deverá ser reavaliada e aumentada, caso necessário, visando reduzir as amplitudes de vibração a níveis suficientemente baixos para garantir a integridade dos cabos ao longo de toda a vida útil das LTs.

Para os cabos OPGW, o critério para uso de amortecedores será definido utilizando a mesma metodologia indicada nos itens anteriores, levando em conta as características específicas dos cabos que vierem a ser efetivamente comprados.

#### **4. OSCILAÇÃO INDUZIDA NO FEIXE**

##### **4.1 ANÁLISE DO FENÔMENO**

Do ponto de vista teórico aplicam-se aos cabos dispostos em feixe às mesmas considerações constantes do item 3 anteriores.

Por outro lado, dois novos fatores influenciam o comportamento do feixe:

- a) Os cabos a sotavento são recobertos pelos cabos a barlavento;
- b) Os cabos a sotavento ficam situados na zona de turbulência provocada pela passagem do vento sobre os cabos a barlavento.

Esse posicionamento relativo dos cabos no feixe provoca um movimento oscilatório cujas características dependem dos seguintes fatores:

- a) Número e configuração dos cabos no feixe;
- b) Separação entre os cabos situados a barlavento e a sotavento;
- c) Ângulo de ataque do vento em relação ao feixe;
- d) Tipo e posicionamento dos dispositivos usados para manter os cabos em suas posições relativas.

A separação entre os cabos é normalmente referida à seguinte relação:

$$K = \frac{A}{D} \quad \text{onde:}$$

A        espaçamento entre cabos, em mm

D        diâmetro do cabo, em mm

À medida que K aumenta os cabos tendem a se tornar imunes às oscilações induzidas no feixe. Observações de campo indicam que o conjunto torna-se estável a partir dos seguintes valores:

Feixes de 2 e 3 cabos         $K > 18$

Feixe de 4 cabos         $K > 20$

Estando K situado abaixo dos limites indicados torna-se necessário proteger o feixe contra esse tipo de vibração.

As fases **das LTs** em estudo têm a seguinte configuração geométrica [7] feixe quádruplo expandido:

$A \approx 1050 \text{ mm}$ ;  $d = 29,34 \text{ mm}$ ;  $K \approx 36$

A configuração geométrica selecionada indica que os condutores das LTs 500 kV Porto Seguro – Olindina – Sapeaçu apresenta proteção mais que suficiente contra oscilações induzidas no feixe, assim como efeitos nocivos de vibração eólica. Visando, portanto, garantir o correto posicionamento dos subcondutores dos feixes ao longo dos vãos, está sendo prevista a utilização de espaçadores flexíveis instalados nos feixes de condutores ao longo de todos os vãos, espaçados em intervalos variáveis.

Ressalva-se que os intervalos entre os espaçadores amortecedores ao longo das LTs deverão ser definidos pelo fabricante que vier a ser selecionado em função das características de amortecimento do produto ofertado.

## **5. ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO**

### **5.1 PROJETO**

Tanto os amortecedores instalados nos cabos para-raios, como os espaçadores flexíveis utilizados nos condutores constituem-se em componentes extremamente importantes, tendo em vista que a integridade dos cabos e, por sua via de consequência das próprias LTs, dependem do desempenho desses dispositivos.

As especificações técnicas de compra desses materiais [6], além dos aspectos genéricos aplicáveis a todos os tipos de ferragens (proteção contra corrosão, resistência mecânica, características da matéria prima etc.), devem conter requisitos voltados especificamente para garantir que os sistemas de amortecimento propostos pelos fornecedores permanecerão eficazes ao longo da vida útil das LTs e do consequente envelhecimento dos cabos, suportando elevadas variações de temperatura, condições atmosféricas adversas e os efeitos decorrentes dos próprios fenômenos vibratórios.

### **5.2 GARANTIA DE DESEMPENHO**

Adicionalmente, as especificações técnicas desses materiais devem incluir ensaios a serem realizados em protótipos dos amortecedores e dos espaçadores flexíveis que demonstrem sua capacidade de amortecimento e sua resistência à fadiga [6].

Os ensaios dos amortecedores deverão ser realizados de acordo com as recomendações da norma IEC 61897.

Os ensaios dos espaçadores deverão ser realizados de acordo com as recomendações da norma IEC 61854.

## **6. REFERÊNCIAS**

- 1 Transmission line reference book – wind-induced conductor motion (EPRI).
- 2 Vibration of conductors in overhead transmission lines – O. D. Zetterholm.
- 3 IEEE 31 TP 65-156 - Standardization of conductor vibration measurements.
- 4 ELECTRA N° 198, outubro, 2001 – Safe design tension with respect to aeolian vibrations. Part 2: damped single conductors.
- 5 Projeto Básico LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina e Olindina – Sapeaçu, ESTUDO MECÂNICO DO CONDUTOR E PARA-RAIOS.
- 6 Projeto Básico LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina e Olindina – Sapeaçu, ISOLADORES E FERRAGENS.
- 7 Projeto Básico LTs 500 kV, circuito simples, Porto Sergipe – Olindina e Olindina – Sapeaçu, CONDUTOR E PARA-RAIOS.

7. FIGURAS

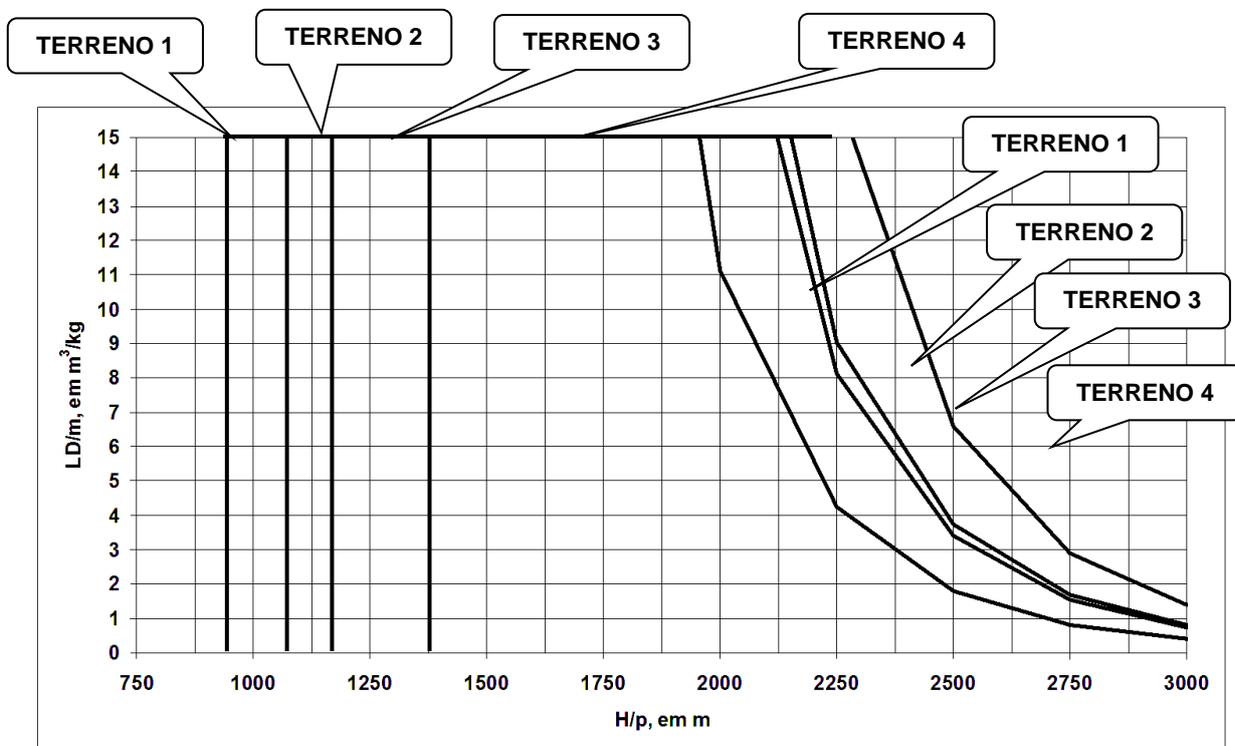


Figura 1 – Gráfico Geral para Avaliação da Necessidade de Amortecedores

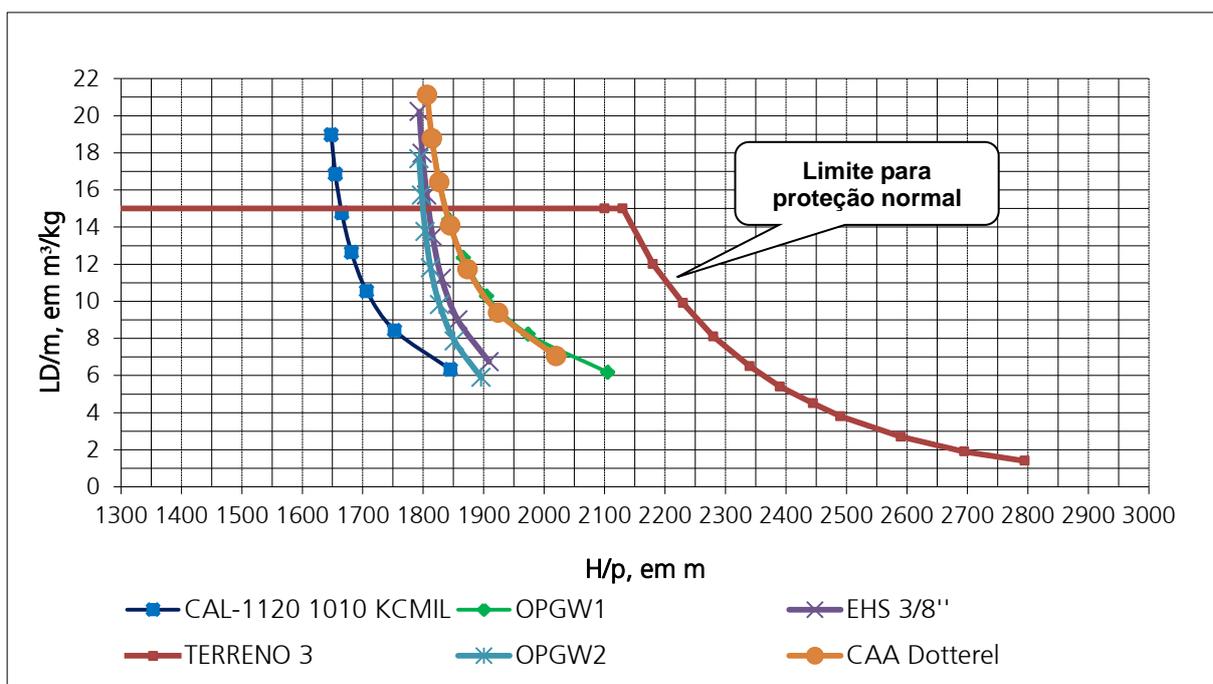


Figura 2 – Gráfico Específico para os Condutores e Cabos Para-raios