

# TE140 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

## CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LTs

PhD Eng. Clodomiro Unsihuay Vila  
Federal University of Paraná, Curitiba-Brazil

# AGENDA

- Introdução
- Cabos condutores
- Cabos para-raios
- Isoladores e ferragens
- Estruturas das LTs

# Introdução

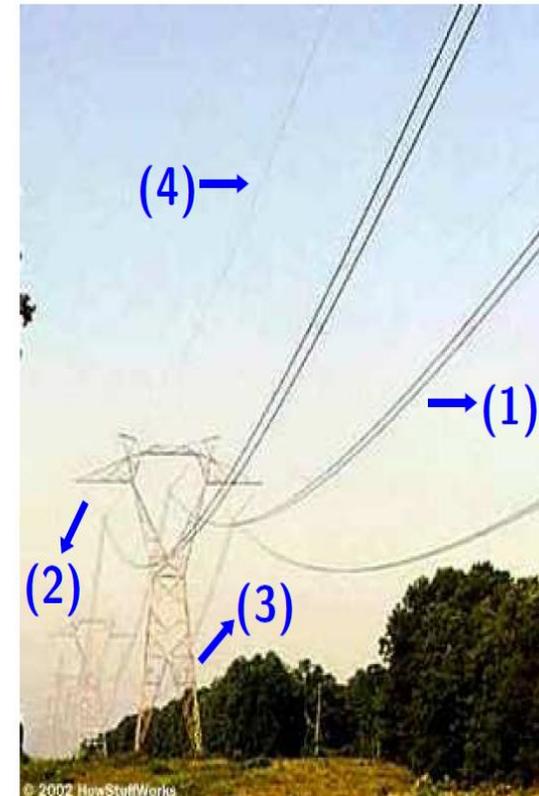
- Tensões usuais de transmissão
  - Em CC → Valor entre o pólo (+) e pólo (-)
  - Em CA → Valor Eficaz => (entre fase-fase)
  - Transmissão de grandes blocos de energia e distantes dos centro de carga → Aumento do nível de tensão
  - Padronização Brasileira
    - Distribuição (média tensão): 13,8 kV e 34,5 kV
    - Sub-Transmissão e Transmissão (AT): 69 kV, 138 kV e 230 kV
    - Transmissão (EAT): 345 kV, 500 kV e 765 kV
    - Ultra Alta Tensão: 1000 kV e 1200 kV (em estudos)

# INTRODUÇÃO

- O rendimento de uma LT depende quase exclusivamente da sua geometria, ou seja de suas características físicas.
- Por isso a grande importância de suas características físicas e elementos que compõem uma LT.

► Componentes de uma linha de transmissão:

- (1) condutores
- (2) isoladores (cadeia de isoladores de porcelana ou vidro)
- (3) estruturas de suporte (torres, postes)
- (4) cabos pára-raios (cabos de aço colocados no topo da estrutura para proteção contra raios)



# Fatores Envolvidos no Dimensionamento de uma LT

- **Fatores Elétricos**

- Determinam o tipo de condutor, a área e o número de condutores por fase
- Capacidade térmica: condutor não deve exceder limite de temperatura, mesmo sob condições de emergência quando pode estar temporariamente sobrecarregado
- Número de isoladores: manter distâncias fase-estrutura, fase-fase etc.
- Deve operar sob condições anormais (raios, chaveamentos, etc.) e em diferentes ambientes (umidade, sal, gelo, etc.)
- Esses fatores determinam os parâmetros da linha relacionados com o modelo da linha

# Fatores Envolvidos no Dimensionamento de uma LT

- **Fatores Elétricos**

- Determinam o tipo de condutor, a área e o número de condutores por fase
- Capacidade térmica: condutor não deve exceder limite de temperatura, mesmo sob condições de emergência quando pode estar temporariamente sobrecarregado
- Número de isoladores: manter distâncias fase-estrutura, fase-fase etc.
- Deve operar sob condições anormais (raios, chaveamentos, etc.) e em diferentes ambientes (umidade, sal, gelo, etc.)
- Esses fatores determinam os parâmetros da linha relacionados com o modelo da linha

# Factores que intervienen en el diseño de una LT

- **Fatores mecânicos**
  - Condutores e estruturas sujeitos a forças mecânicas (vento, neve, gelo, etc.)
- **Fatores ambientais**
  - Uso da terra (valor, população existente, etc.)
  - Impacto visual (estético)
- **Fatores econômicos**
  - Deve atender todos os requisitos a um mínimo custo

# Cabos Condutores

- Constituem os elementos ativos propriamente ditos das LTs
- Sua escolha adequada representa um problema de fundamental importância no dimensionamento das linhas
- Condutores ideais – características
  - Alta condutibilidade elétrica
  - Baixo custo
  - Boa resistência mecânica
  - Baixo peso específico
  - Alta resistência à oxidação
  - Alta resistência à corrosão por agentes químicos poluentes



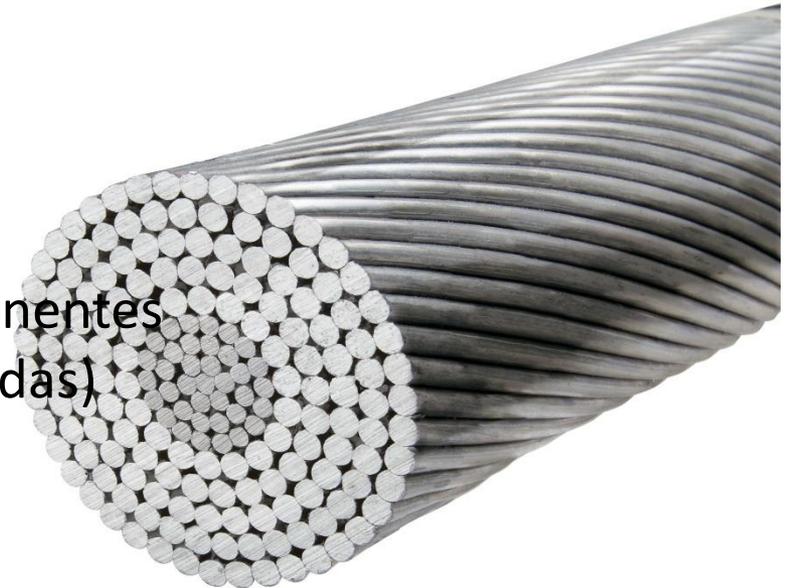
# Cabos condutores

- Definições

- Condutor: fio, ou conjunto de fios não isolados entre si, destinado a conduzir corrente elétrica
- Cabo: condutor formado por um grupo de fios dispostos concentricamente em relação a um fio central, formando coroas compostas de fios torcidos helicoidalmente
- Encordoamento normal

$$N = 3x^2 + 3x + 1$$

- N é o número total de fios componentes
- X é o número de coroas (ou camadas)



# Cabos Condutores

- Inicialmente → Condutores de Cobre
  - Atualmente → Condutor de Alumínio
  - Motivo: preço más bajo
- Problemas de alumínio: menor resistência mecânica
- -Solução: Fio de aço de alta resistência mecânica colocado no centro do condutor (Coaxial); ACSR: Aluminium Conductor Steel Reinforced



Nota:  $1\text{CM} = 0,5067 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$  (CM → circular mil)

CM: *Equivale a la área de un círculo de un milésimo de pulgada de diámetro*

# Cabos condutores

- Materiais

Características	Alumínio Têmpera Dura	Cobre Têmpera Dura
Condutividade a 20°C	61% IACS	97% IACS
Resistividade em $\mu\Omega/\text{cm}$ a 20°C	2,828	1,7774
Coeficiente térmico de resistividade, em $\mu\Omega/\text{cm}$ por °C	0,0115	0,00681
Coeficiente térmico de expansão linear por °C	0,000023	0,000017
Densidade a 20°C em $\text{g}/\text{cm}^3$	2,703	8,89
Carga de ruptura em $\text{kg}/\text{mm}^2$	16-21	35-47
Módulo de elasticidade final $\text{kg}/\text{mm}^2$	7000	12000

$S_{\text{Al}} = 1,6 \times S_{\text{Cu}}$

$P_{\text{Al}} = 0,3 \times P_{\text{Cu}}$

IACS: International Annealed Copper Standard-100% corresponde a condutividade-Padrão Internacional, medida a 20°C, em cobre quimicamente puro.

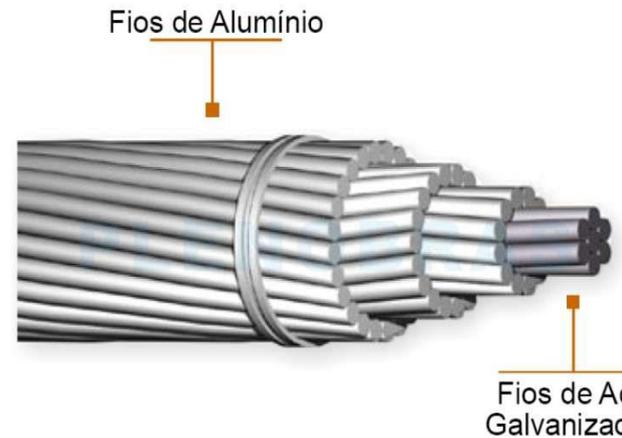
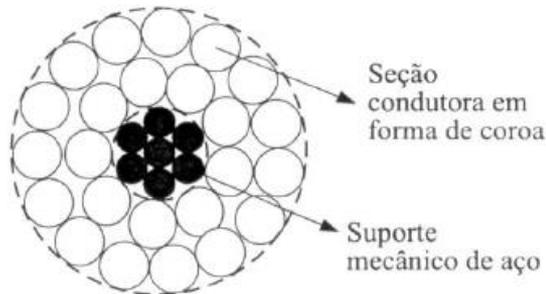
# Cabos Condutores

- As vantagens do alumínio sobre o cobre, como condutor para linhas de transmissão:
  - Para mesmas condições de perdas por efeito Joule, a **seção do condutor de alumínio** deverá ser **1,6 vezes** maior do que aquela do condutor de cobre equivalente
  - Seu diâmetro será **1,261 vezes maior**, enquanto o seu peso unitário será aproximadamente **igual à metade do peso condutor** de cobre equivalente
  - Considerando-se que há uma relação aproximada de preço entre cobre e alumínio da ordem de 2, o investimento com condutores de alumínio será aproximadamente igual a **25% do investimento necessário com condutores de cobre equivalentes**.
  - A sua resistência mecânica, **cerca de 25% inferior à do cobre**, é amplamente compensada com o eventual uso dos cabos de alumínio-aço, sem que esse quadro econômico seja substancialmente alterado em virtude **do menor custo do aço**.

# Tipos de condutores de LT

Sigla (Inglês/Português)	Significado (Inglês/Português)
AAC / CA	all aluminum conductor (alumínio puro)
AAAC / AAAC	all aluminum alloy conductor (liga de alumínio pura)
ACSR / CAA	aluminum conductor steel reinforced (alumínio com alma de aço)
ACAR / ACAR	aluminum conductor alloy reinforced (alumínio com alma de liga de alumínio)
outros	para aplicações especiais

- **ACSR (alumínio com alma de aço):** aço mais barato que alumínio, a alma de aço o faz ser mais resistente à tração (admite lances maiores) → é o mais utilizado

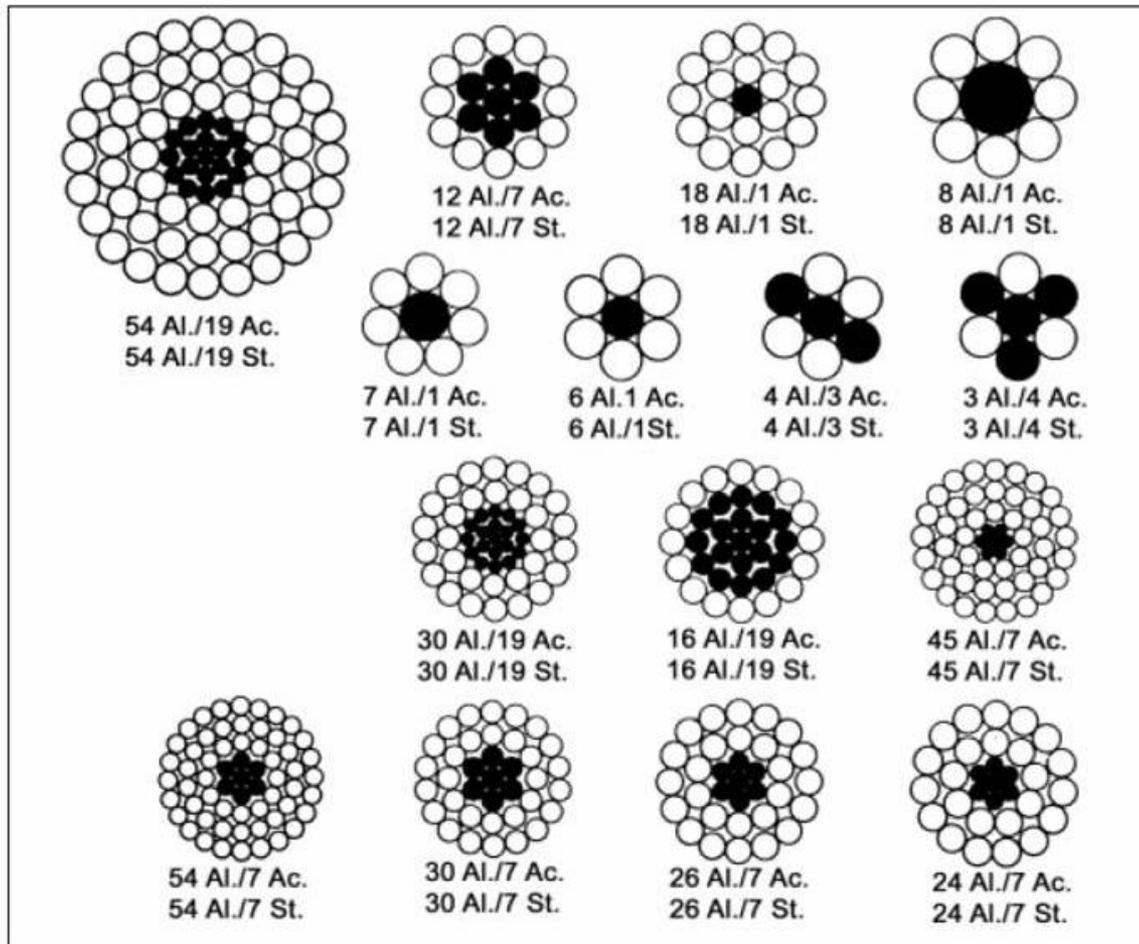


Ex: Formação 24/7 de um cabo CAA que representa 24 fios de alumínio e 7 de aço



# Cabos condutores

## Formação de Cabos de Alumínio CAA ou ACSR



- **liga de alumínio: alumínio + magnésio/silício, por exemplo**
- **os condutores são nus (não há camada isolante)**
- **condutores são torcidos para uniformizar a seção reta. Cada camada é torcida em sentido oposto à anterior (evita que desenrole, empacotamento é melhor)**

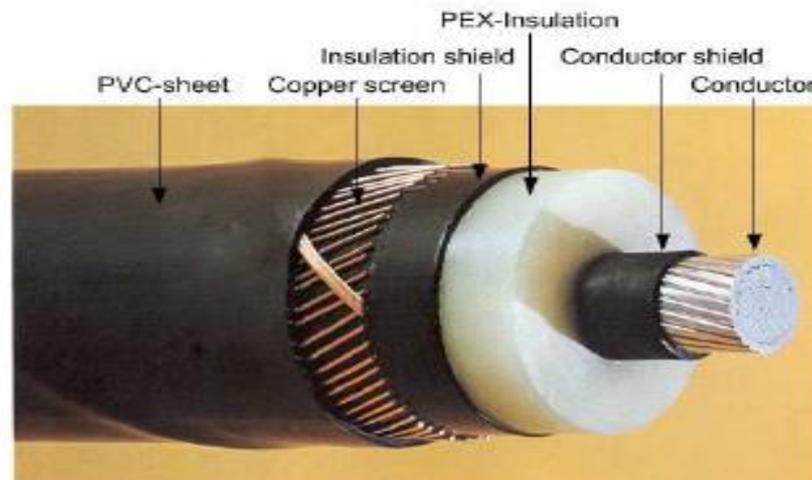
**ACSR (CAA)**



**AAC (CA)**

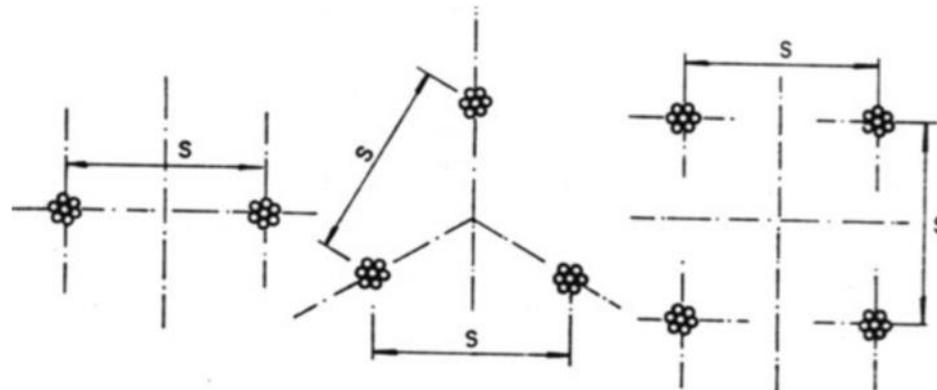


- **Cabos de cobre (linhas subterrâneas): sólidos ou encordoados. Condutores isolados com papel impregnado em óleo. Existem outros tipos de isolação**



# Cabos condutores

- Condutores copperweld e alumoweld
  - Seus filamentos são obtidos pela extrusão de uma capa de cobre ou alumínio sobre um fio de aço de alta resistência
  - Empregado como cabo para-raios e em linhas de telecomunicações
  - Na distribuição são usados para inibir furto
- Condutores múltiplos
  - Reduzir os gradientes de potencial nas superfícies dos condutores



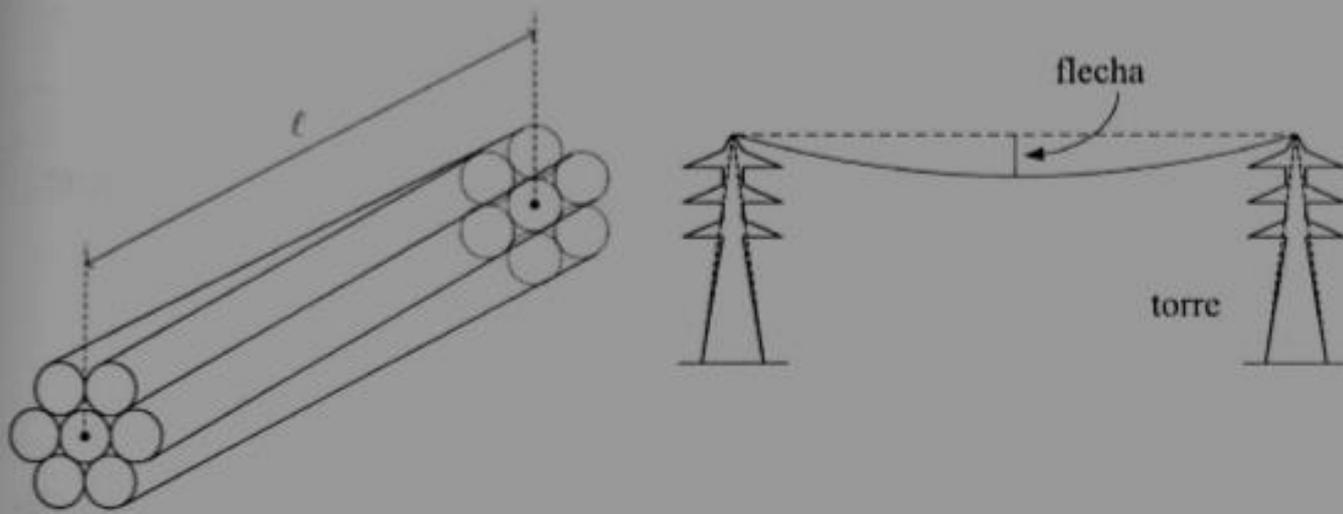


Figura 1.3: Efeitos de encordoamento e flecha.

$\ell$  : comprimento da linha,  
 $\ell_{real} \approx 1,02\ell$  .

# Cabos condutores

- Normas
  - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5118: Fios de alumínio 1350 nus, de seção circular, para fins elétricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
  - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6756: Fios de aço zincados para alma de cabos de alumínio e alumínio-liga - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
  - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7270 Versão Corrigida 2:2010: Cabos de alumínio nus com alma de aço zincado para linhas aéreas - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

# Efeito Corona

- Descargas que se formam na superfície do condutor quando a intensidade do campo elétrico ultrapassa o limite de isolamento do ar
- Principais consequências
  - Emissão de luz
  - Ruído audível
  - Ruído de radio (interferência em circuitos de comunicação)
  - Vibração do condutor
  - Liberação de ozônio
  - Aumento das perdas de potência (deve ser suprida pela fonte)

[https://www.youtube.com/watch?v=qMZNKUUX4WI&ab\\_channel=celinh\\_alorinha](https://www.youtube.com/watch?v=qMZNKUUX4WI&ab_channel=celinh_alorinha)

# Cabos para-raios

- Ocupam a parte superior das estruturas e se destinam a interceptar descargas atmosféricas e descarregá-las para o solo, evitando danos e interrupções no sistema

# Cabos para-raios

- Cabos para-raios OPGW
  - Um cabo para-raios com um núcleo de fibra óptica para instalação em LTs de alta tensão



# Cabos para-raios

- Normas
  - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14074: Cabos para-raios com fibras ópticas (OPGW) para linhas aéreas de transmissão - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.



# Isoladores e ferragens

- Cabos são suportados pelas estruturas através de isoladores que os mantêm isolados eletricamente das mesmas
- Devem resistir às solicitações
  - Mecânicas
    - Forças verticais – peso dos condutores
    - Forças horizontais axiais – tensão mecânica dos cabos
    - Forças horizontais transversais – vento
  - Elétricas
    - Tensão normal e sobretensões em frequência industrial
    - Surtos de manobra de curta duração – 3 a 5 vezes a tensão fase-terra normal
    - Sobretensões de origem atmosférica

# Isoladores e ferragens

- Requisitos
  - Não produzir radio-interferência – corona
  - Robustez
  - Duráveis
  - Resistir bem a choques térmicos
- Material
  - Porcelana vitrificada
  - Vidro temperado
  - Poliméricos



# Isoladores e ferragens

- Tipos de isoladores

- Pino

- Fixados à estrutura através de um pino de aço
    - Montagem rígida vertical (ou horizontal) em cruzeta ou diretamente no poste
    - Tensões nominais de 7,2 kV até 72,5 kV



- Pilar

- Vantagem adicional de sua impermeabilidade (corpo maciço)
    - Maior resistência mecânica à flexão para pinos curtos, tipo parafuso prisioneiro



# Isoladores e ferragens

- Tipos de isoladores

- De suspensão

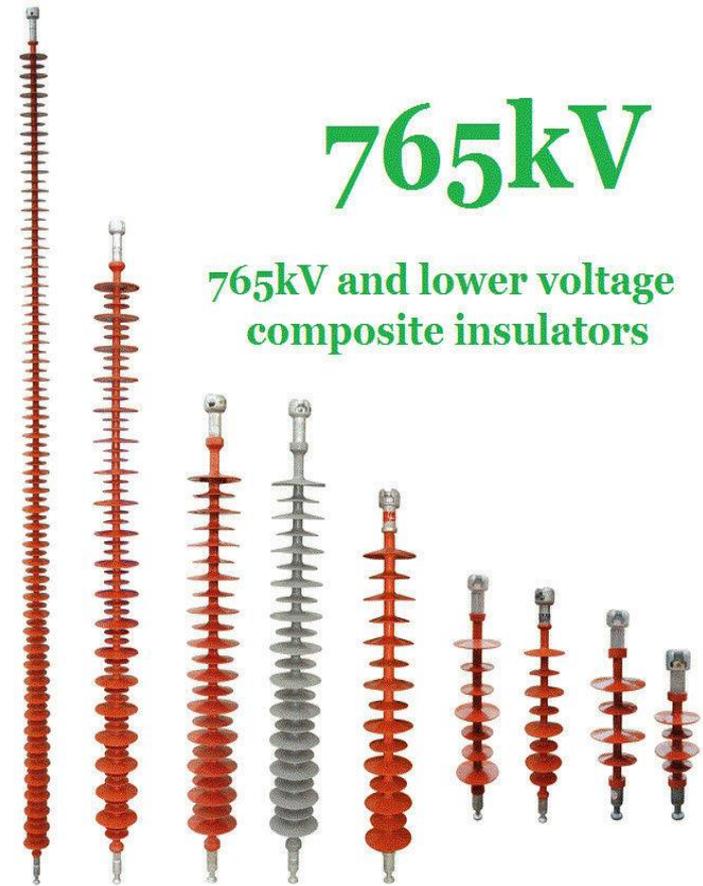
- Cadeia de isoladores: Um ou mais elementos conectados em cadeia, com a finalidade de suportar, de modo flexível, condutores de linhas aéreas e submetidos principalmente a esforços de tração



Comparação entre isoladores de Vidro, Porcelana e Polimérico:

Tabela 3.2 Cadeia de Isoladores

Tensão da Linha (kV)	Número de Isoladores Convencionais por Cadeia	Peso da cadeia (kgf)		Peso médio do isolador polimérico (kgf)
		Vidro	Porcelana	
69	5	18,5	33,5	3,0
138	9	33	60	4,7
230	16	61	107	9,8
500	24	91	160	17,5



# Isoladores e ferragens

- Ferragens e acessórios
  - Conjunto de peças que devem suportar os cabos e ligá-los às cadeias de isoladores e estas às estruturas
  - Seu desenho é de extrema importância – evitar corona e radiointerferência

# Isoladores e ferragens

- Ferragens e acessórios
  - Dispositivos antivibrantes
    - Armaduras antivibrantes
    - Amortecedores stockbridge
    - Grampos de suspensão armados



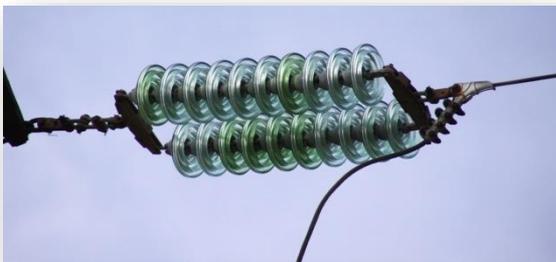
# Isoladores e ferragens

- Ferragens e acessórios
  - Cadeias de suspensão



# Isoladores e ferragens

- Ferragens e acessórios
  - Cadeias de ancoragem
    - Suportam, além dos esforços que devem suportar as cadeias de suspensão, também os esforços devidos ao tracionamento dos cabos



# Isoladores e ferragens

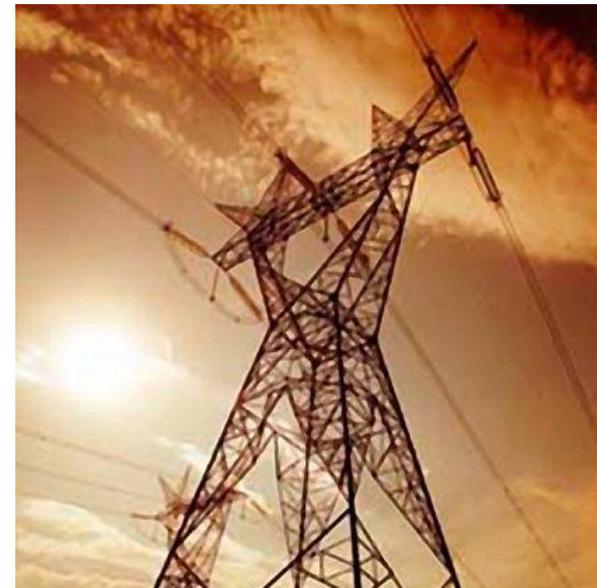
- Normas
  - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5032: Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1 000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

# Estruturas das LTs

- São os elementos de sustentação dos condutores das linhas de transmissão
- Dimensão e forma depende de
  - Disposição dos condutores
  - Distância entre condutores
  - Dimensões e formas de isolamento
  - Flechas dos condutores
  - Altura de segurança
  - Função mecânica
  - Materiais estruturais
  - Número de circuitos

# Estruturas das LTs

- Disposição dos condutores
  - Vertical
    - Circuitos duplos
  - Horizontal
    - Circuito simples
    - Estrutura larga
    - Menor altura
  - Triangular
    - Circuitos duplos



# Estruturas das LTs

- Dimensões das estruturas
  - Tensão
  - Sobretensões previstas
  - Flecha dos condutores
  - Forma de sustentação dos condutores
  - Diâmetro dos condutores
- Classificação das Estruturas
  - Funções das Estruturas nas LTs
    - Estruturas de suspensão
    - Estruturas de ancoragem
    - Estruturas para ângulos
    - Estruturas para derivação
    - Estruturas para transposição de fases

# Estruturas das LTs



# Estruturas das LTs

- Forma de resistir das estruturas
  - Autoportantes
    - Transmitem todos os esforços diretamente para as suas fundações
  - Estaiadas
    - Estruturas flexíveis ou semirrígidas que são enrijecidas através de tirantes e estais



# Estruturas das LTs

- Materiais para estruturas
  - Madeiras
  - Concreto armado
  - Estruturas metálicas



- [https://www.youtube.com/watch?v=5QqCtnBedfI&ab\\_channel=absingenieros](https://www.youtube.com/watch?v=5QqCtnBedfI&ab_channel=absingenieros)