



Redes de distribuição de energia mais resilientes: Avaliação de compostos de cobertura dos cabos

Tema: Redes de Distribuição

Autores: João Marcondes O. Neto (Polyexcel) joao.marcondes@polyexcel.com.br; William Alves de Souza (CEMIG D) wasouza@cemig.com.br; Fábio Lelis dos Santos (CEMIG D) fabio.santos@cemig.com.br; Marilda Munaro (Polyexcel) marilda.munaro@polyexcel.com.br

Co-Autores: Bruno Almeida (Polyexcel) bruno.almeida@polyexcel.com.br; Helen Domenicali (Polyexcel) helen.domenicali@polyexcel.com.br; Camila Wolski (Polyexcel) camila.wolski@polyexcel.com.br

Empresa: Polyexcel

Resumo

As mudanças climáticas têm provocado cada vez mais eventos catastróficos, que estão causando impactos negativos nas redes de distribuição de energia elétrica, deixando muitos consumidores sem energia. Além dos grandes impactos relacionados a qualidade do serviço de distribuição de energia à população, as concessionárias também acabam tendo custos adicionais com manutenção de redes e necessidade de equipes de campo para o atendimento dos chamados devido à interrupção de energia. Assim, essas redes precisam se tornar mais resilientes às condições climáticas adversas cada vez mais frequentes. A configuração de rede de distribuição primária com cabos cobertos tem se mostrado mais eficientes que as redes com cabos nus. No entanto, essa cobertura polimérica está sendo cada vez mais exigida levando a necessidade de compostos mais resistentes, principalmente, ao trilhamento elétrico. Nesse trabalho apresentamos a avaliação realizada nos compostos XLPE (*cross linked low density polyethylene*) e HDPE (*high density polyethylene*) usados na cobertura de cabos. Notou-se que um composto, a base de HDPE, apresentou comportamento superior na resistência ao trilhamento em relação aos demais compostos, aumentando de forma significativa a confiabilidade das redes de distribuição.

1. Introdução

Com as mudanças climáticas têm ocorrido cada vez mais eventos extremos, como: chuvas e ventos intensos; ondas de calor; tempestades com descargas elétricas e estiagens prolongadas gerando queimadas e aumento da poluição atmosférica. No final do ano de 2023, uma forte tempestade atingiu a capital de São Paulo e região metropolitana, com ventos de mais 100 km/h danificando 140 km de redes de distribuição, como resultado mais de 2 milhões de pessoas ficaram sem energia elétrica, e em outubro de 2024; outra tempestade também deixou mais de 2 milhões de consumidores sem energia. Outro exemplo foram as enchentes no Rio Grande do Sul que impactaram 500 mil imóveis com falta de energia (LEAL, N Castro, et al, Gesel -2024; G1, São Paulo – 12/10/24).

Essas condições climáticas adversas geram condições de multiestressamento mais agressivos que os comumente encontrados, podendo acelerar os processos de degradação dos materiais constituintes das redes de energia. Entre os principais impactos causados nas redes de energia estão: degradação dos

componentes por corrosão (postes, fios e cabos e estruturas metálicas); estresse mecânico causado por ventos; ciclo térmico devido a amplitude térmica; foto e termodegradação devido a radiação solar (compostos poliméricos); e trilhamento elétrico devido ao aumento da poluição ambiental e contato mais prolongado com arborização (compostos poliméricos em redes protegidas) (BRITO, Kalyne, et al Gesel -2020; ALBERTI, Sandra M , et al, CITENEL 2003).

Assim surge a necessidade do desenvolvimento de redes de distribuição e transmissão mais resilientes a essas novas condições, trazendo mais confiabilidade a esses sistemas.

A rede protegida ou compacta é um exemplo de rede mais resiliente, pois suporta toques eventuais de galhos de árvores sem que ocorra o desligamento de energia, evitando que em períodos de chuvas com vento a rede seja desligada como ocorre com a rede convencional com cabos nus. Porém, como na configuração original, ela é indicada apenas para média ou baixa condição de poluição ou agressividade ambiental, não sendo indicada para aplicação em orlas marítimas e perto de indústrias que emitam poluentes (SILVA, Guilherme , et al, CITENEL 2017).

Alguns estudos foram realizados para entender as limitações desse tipo de rede e avaliar alterações que permitissem a aplicação em ambientes com maior agressividade ambiental. As alterações indicadas nestes estudos foram: mudanças da geometria e projeto de espaçadores e isoladores; melhoria da resistência ao trilhamento dos compostos poliméricos utilizados na cobertura de cabos, isoladores e espaçadores; e aumento da compatibilidade entre os componentes da rede em condições de multietressamento (SANTOS, Signie, et al. IEEE Latin America Transactions 2018; MUNARO, M et al CIGRE 2017; SILVA, Guilherme , et al IEE/PE 2016).

O trilhamento elétrico é um fenômeno de superfície, que ocorre devido às condições de multietressamento que associa o campo elétrico, contaminantes condutivos depositados na superfície dos cabos e acessórios, e umidade. Também a degradação dos polímeros contribui para a redução da resistência ao trilhamento. Ainda, com o aumento das queimadas ocorrem maior formação de composto particulados que se depositam na superfície dos cabos e demais acessórios que com a umidade se tornam condutivos. Assim, com as mudanças climáticas, regiões com baixa agressividade de poluição passam a apresentar altas concentrações de poluentes exigindo características aprimoradas para os componentes das redes.

Nesse trabalho será apresentado um comparativo entre diversos tipos de compostos poliméricos utilizados na cobertura de cabos aplicados nas redes de distribuição de energia elétrica, buscando identificar os compostos com melhor desempenho.

2. Desenvolvimento

Materiais e métodos

Foram testados 3 compostos de XLPE e 2 compostos de HDPE, denominados conforme abaixo:

- XLPE-1 – Compostos de XLPE para cobertura de fios e cabos;
- XLPE-2 – Compostos de XLPE para cobertura de fios e cabos;
- XLPE-3 – Compostos de XLPE para cobertura de fios e cabos anti-tracking;
- HDPE-1 – Compostos antitracking para cobertura de fios e cabos com base polimérica de HDPE;
- HDPE-2 – Compostos antitracking de alta performance para cobertura de fios e cabos com base polimérica de HDPE.

Para preparação dos corpos de prova foram extrudadas fitas dos compostos por meio de extrusora marca UEFA, modelo SJ 30 CO, N° série WIL08433, nas condições de processamento apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Condições de processamento das amostras.

Composto	Temperatura nas zonas da extrusora e velocidade de processamento				
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	ZONA 4	Velocidade
XLPE	165°C	180°C	190°C	215°C	40 RPM
HDPE	180°C	190°C	200°C	210°C	40 RPM

Os corpos de prova de tração e alongamento a quente no formato de borboletas foram estampados conforme norma ABNT NBR 17173-1.

Os corpos de prova de trilhamento elétrico foram confeccionados por termoprensagem na temperatura de 180°C, na pressão de 2000 MPa por tempo de 5 min para HDPE e 3 min para XLPE, no formato de placas conforme norma ABNT NBR 19296 e ABNT NBR 11873.

Ensaio realizado:

Tração e alongamento na ruptura antes e após envelhecimento térmico:

O ensaio foi realizado em equipamento marca KRATOS modelo KE 2005 MP, com célula de carga de 50 Kg, na velocidade de deslocamento das garras de 200 mm/min para o XLPE e 50 mm/min para o HDPE, baseado na norma ABNT NBR 17173-1.

Envelhecimento térmico:

O envelhecimento térmico foi realizado em estufa Marca FANEM, modelo 320/3, por 168h na temperatura de 110°C para o HDPE e 135°C para o XLPE, conforme normas ABNT NBR 11873 e ABNT NBR 17173-2.

Alongamento a quente:

O ensaio foi realizado em estufa Marca FANEM, modelo 320/3, na temperatura de 200°C por 15 min com a tensão de 0,2 MPa. Sendo medido o alongamento obtido, conforme norma ABNT NBR 17173-5.

Trilhamento elétrico:

O ensaio foi realizado em mesa de trilhamento construída conforme a norma NBR 10269. Os ensaios foram realizados seguindo 4 condições:

Condição 1 – realizado nas condições da norma ABNT NBR 11873, com fluxo de contaminante 0,15 ml/min, resistor de 10kΩ passando 1 h na tensão de 2,5 kV e 1h a 2,75kV.

Condição 2 – realizado nas condições da norma EN 50397-1, com fluxo de contaminante 0,30 ml/min, resistor de 22kΩ permanecendo na tensão de 3,5 kV por 6h.

Condição 3 – realizado nas condições da especificação técnica 02.118-CEMIG-379p, com fluxo de contaminante 0,60 ml/min, resistor de 33kΩ passando 1 h na tensão de 4,5 kV e 1h a 4,75kV.

Condição 4 – Fluxo de contaminante 0,90 ml/min, resistor de 33kΩ passando 1 h na tensão de 5,75 kV e mais 1h a 6kV procedimento interno Polyexcel, baseado na norma ABNT NBR 10296.

Para todas as condições de ensaios, a fim de diferenciar o desempenho dos compostos testados, os corpos de prova foram mantidos no último patamar de tensão de ensaio até a ocorrência de falha ou até que se completasse 8 horas.

Resultados

Buscando entender as diferenças entre os compostos usados nas coberturas dos cabos atualmente aplicadas nas redes de distribuição de energia, foram testados 3 *grades* de XLPE e dois *grades* de HDPE.

Inicialmente, foram analisados os resultados de propriedades mecânicas antes e após o envelhecimento dos compostos e alongamento a quente para os XLPEs. Os resultados obtidos estão apresentados na

Tabela 2, onde se verifica que todos *grades* testados atendem as especificações apresentadas nas normas ABNT NBR 11873 e ABNT NBR 6251.

Tabela 2 – Resultados obtidos de propriedades mecânica antes e após envelhecimento e alongamento a quente para os compostos.

Ensaio	Especificado	Composto				
		XLPE-1	XLPE-2	XLPE-3	HDPE-1	HDPE-2
Resistência a tração, mínima (Mpa)	XLPE: 12,5 HDPE: 19,3	18,9	25,5	27,9	39,9	35,5
Alongamento a ruptura, mínimo (%)	XLPE: 200 HDPE: 300	736	710	705	1811	947
Variação da tração após envelhecimento (%)	± 25	5,3	2,3	13,2	4,4	-1,9
Variação do <u>along.</u> após envelhecimento (%)	± 25	-9,8	-9,6	-11,7	17	18,1
Alongamento a quente, máximo (%)	175	67	66	96	-	-

Conforme apresentado na Tabela 3 e Figura 1, com exceção do composto XLPE-1 que falhou no patamar de 2,5 kV, todos os demais compostos atenderam os valores de trilhamento previsto na Condição 1 que é o requisito mais brando (NBR 11873 – 2,75 kV). Os compostos de HDPE mostraram um melhor desempenho em relação aos de XLPE, e somente o HDPE-2 atendeu as condições de ensaio 2, 3 e 4, que definem requisitos mais severos de trilhamento já previstos em normas e especificações de algumas concessionárias.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de trilhamento elétrico realizados nos compostos

Ensaio / Compostos	XLPE-1	XLPE-2	XLPE-3	HDPE-1	HDPE-2
Condição 1 2,75 kV	Reprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
Condição 2 3,5 kV	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Condição 3 4,75 kV	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
Condição 4 6,0 kV	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado

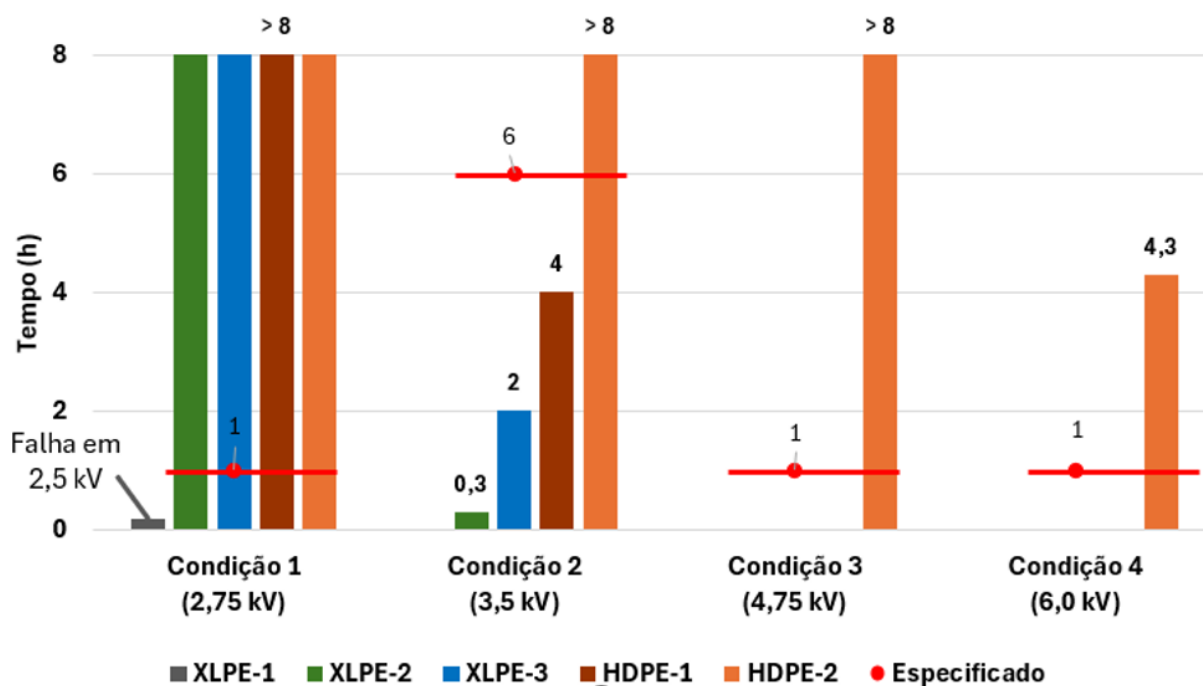


Figura 1 – Ensaio de trilhamento elétrico, desempenho dos compostos nas diferentes condições de ensaios

O cabo coberto dupla camada com composto HDPE-2 vem sendo utilizado por algumas concessionárias em redes protegidas, obtendo-se melhor desempenho quando comparado ao cabo simples camada em XLPE.

No SNPTTE de 2019 a CEMIG D apresentou um trabalho comparando a aplicação do cabo coberto simples camada (XLPE) e o cabo dupla camada (XLPE/HDPE), onde foi possível evidenciar, que o cabo dupla camada, apresentou resultados superiores quanto ao desempenho das redes compactas de distribuição, sendo identificadas as seguintes vantagens:

- Maior resistência do cabo quanto a abrasão, erosão e trilhamento elétrico;
- Redução da frequência de podas de árvores;
- Redução dos custos operacionais e de manutenção;
- Maior confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia elétrica;
- Aumento da segurança para população e empregados.

Na avaliação do cabo dupla camada, realizada pela CEMIG D, foi evidenciado que, no ensaio de trilhamento elétrico, o cabo suportou tensões muito superiores ao especificado na norma NBR 11873 (2,75 kV x 6,0 kV). Também pôde-se observar, no ensaio de verificação dos níveis de suportabilidade a impulsos, que o arranjo utilizando cabo dupla camada apresentou resultados que comprovaram um aumento médio de 63% dos valores de tensões de impulso em relação ao arranjo com cabo simples camada. O que contribui ainda mais para ter-se uma rede de distribuição primaria mais resiliente.

A CEMIG D analisou o comportamento da rede compacta com cabo coberto dupla camada construindo 2 redes pilotos, onde o primeiro circuito com 2000 m de extensão, 492 consumidores, localizado no município de Contagem; e o segundo circuito com 800 m de extensão, 250 consumidores, localizado no município de Nova Lima. Para essa avaliação de desempenho foram substituídos os cabos simples camada existentes por cabos dupla camada e consideradas somente as interrupções onde por causas devido arborização, ventos e causas indeterminadas. Com a utilização do cabo coberto dupla camada observou-se redução da duração equivalente de interrupção por consumidor (DEC) de 70 %, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo de desempenho da rede piloto com cabo coberto dupla camada

Tipo de cabo	DEC (h·ano)	Redução (%)
Cabo simples camada (jan/14 a set/15)	4,07	70
Cabo dupla camada (jan/19 a nov/24)	1,18	

* Fonte: CEMIG D – CONINT

Com isso, a especificação atual da CEMIG D (02.118 CEMIG 379p) prevê cabo dupla camada, com maior nível de resistência ao trilhamento, tendo como especificação resistência mínima de 4,75 kV para cabo sem envelhecimento artificial. Além disso, incluiu a obrigatoriedade da utilização de semicondutora interna para esses cabos em todas as classes de tensões. A semicondutora interna tem a função de equalizar o campo elétrico, preservando o sistema dielétrico do cabo, proporcionando melhor desempenho da rede de distribuição.

Outras concessionárias de distribuição como NEOENERGIA, EDP, ENERGISA, passaram a prever em suas especificações o cabo coberto dupla camada (XLPE/HDPE) visando ter um sistema de distribuição mais robusto. Como exemplo, nota-se aumento significativo da participação dos cabos dupla camada em relação aos de simples camada, licitados pela CEMIG D nos últimos 3 anos (Figura 2):

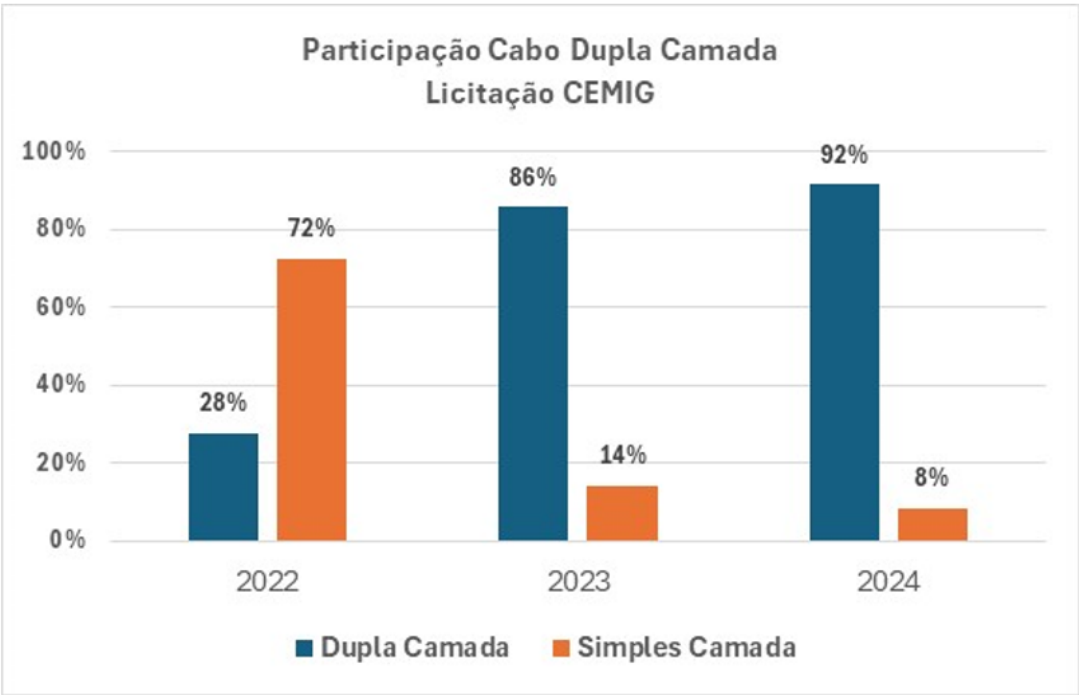


Figura 2 – Comparativo da participação entre os cabos dupla e simples camada licitados nos últimos anos pela CEMIG D*.

* Fonte: Licitações CEMIG 530-G16388, 530-G20237 e 530-G20521. Sites: <https://antigocompras.cemig.com.br/PortalPublico.aspx?ReturnUrl=%2f>; <https://app2-compras.cemig.com.br/painel-cidadao> - acessados em 05/11/2024

3. Conclusão

Os resultados obtidos mostram que os compostos usados em cobertura e isolamento de cabos de energia tem comportamentos diferentes perante a solicitação de trilhamento, onde nem todos os compostos de XLPE são resistentes ao trilhamento elétrico. A utilização de compostos de HDPE na camada externa dos cabos dupla camada proporcionam uma maior resistência ao trilhamento elétrico, chegando à níveis de tensão da ordem de 6 kV.

O uso dos cabos dupla camada XLPE/HDPE, com maior resistência ao trilhamento (HDPE-2), trará maior resiliência as redes protegidas aumentando a confiabilidade delas e possibilitado reduzir a frequência de podas de árvores e permitir a instalação dessas redes em locais de maior agressividade ambiental.

4. Referências bibliográficas

- LEAL, N Castro; MASSENO, Luiza; COSTA; Vinícius J. Impactos das mudanças climáticas no setor elétrico brasileiro .1 Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL). Agosto de 2024.
- BRITO, Kalyne; BALMAS, Matheus; CHANTRE, Caroline; ROSENTA, Rubens. Impactos das mudanças climáticas no setor elétrico: O papel da geração distribuída e do armazenamento de energia. Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL). julho de 2022.
- ALBERTI, Sandra M.; SOUZA, Gabriel P; MUNARO, Marilda; KENNY, Elaine D.; ESMANHOTO, Eliseu ; LINERO, Luiz E.; HARTTMAN, Luiz . C . Luz Avaliação dos Impactos da Poluição Atmosférica Correlacionada à Manutenção de Estruturas Utilizadas no Setor Elétrico. Anais do CITENEL 2003.
- <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2024/10/12/temporal-na-grande-sp-deixou-21-milhoes-de-clientes-da-enel-sem-energia-diz-empresa-16-milhao-ainda-estao-sem-luz.> | São Paulo | G1 acessado em 21/10/24.
- SANTOS, Signie L. F. ; RICHART, Fabio S. ; DA SILVA, Guilherme C. ;KOWALSKI, Edemir L.; RIBEIRO Jr, Sebastiao ; DADAM, Alessandro P. ; MUNARO, Marilda. Spacer Design for 15 kV Compact Overhead Distribution Networks for Regions with High Environmental Aggressiveness. IEEE Latin America Transactions, v. 16, p. 2634-2641, 2018.
- SANTOS, Signie. L. F. ; CARVALHO, Franciele. I. ; RICHART, Fábio S. ; DADAM, Alessandro P. ; OKA, M. H. ; RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião; KOWALSKI, Edemir L. ; SWINKA Filho, Vitoldo ; SILVA, Guilherme C. ; MUNARO, Marilda. Nova configuração de rede protegida para aplicação em regiões com elevada agressividade ambiental. In: IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL), 2017, João Pessoa.
- SILVA, Guilherme C.; SWINKA Filho, Vitoldo; RIBEIRO JÚNIOR, Sebastião ; SANTOS, Signie L. F. ; DADAM, Alessandro P. ; OKA, M. H ; MUNARO, Marilda. Desenvolvimento de espaçador polimérico, com novo material e novo design, para uso nas classes de 15 kV e 35 kV. In: XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2017, Curitiba.
- DA SILVA, Guilherme C. ; MUNARO, Marilda ; RIBEIRO JÚNIOR, Sebastiao R. ; ARAUJO, Diego B. ; DADAM, Alessandro P. ; D'AQUINO, Felipe M. ; OKA, Marcelo H. . Different configurations of spacer cable system under multiple stress tests. In: 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016, Dallas. 2016.
- DIAS, Edmilson J.; SOUZA, William, Alves; SANTOS, Fabio L. Desenvolvimento e Aplicação do Cabo Coberto Dupla Camada nas Redes Compactas da CEMIG D: Gestão eficiente do ativo - CAPEX/OPEX - XXV SNPTEE seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, Belo Horizonte (2019).

ABNT NBR 6251:2018 - Cabos de potência com isolação extrudada para tensões de 1 kV a 35 kV - Requisitos construtivos.

ABNT NBR 10296:2014 - Material isolante elétrico — Avaliação da resistência ao trilhamento e erosão sob condições ambientais severas.

ABNT NBR 11873:2021 Versão Corrigida:2024 - Cabos cobertos com material polimérico, classe de tensão de 15 kV, 25 kV e 35 kV, para redes de distribuição aérea de energia elétrica.

ABNT NBR 17173-1:2024 - Métodos de ensaios comuns para os materiais de isolação e de cobertura de cabos elétricos Parte 1: Métodos para aplicação geral — Medição de espessuras e dimensões externas — Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas.

ABNT NBR 17173-2:2024 - Métodos de ensaios comuns para os materiais de isolação e de cobertura de cabos elétricos Parte 2: Métodos para aplicação geral — Métodos de envelhecimento térmico.

ABNT NBR 17173-5:2024 - Métodos de ensaios comuns para os materiais de isolação e de cobertura de cabos elétricos Parte 5: Métodos específicos para materiais elastoméricos — Ensaio de resistência ao ozônio, de alongamento a quente e de imersão em óleo mineral.

EN 50397-1:2020 - Covered conductors for overhead lines and the related accessories for rated voltages above 1 kV AC and not exceeding 36 kV AC.

02.118 CEMIG 379p – Especificação técnica - Cabos de alumínio cobertos para média tensão.

ETU - 110.2, Versão 3.0, janeiro/2024 - Cabo de alumínio coberto de camada dupla para redes até 36,2 kV – Especificação Energisa.

INS 56.67.00; September 2023; ISSUE: 1; Medium Voltage Covered Conductors – Especificação Neoenergia.

ES.DT.PDN.00011; Versão 09; Cabos cobertos com material polimérico para redes aéreas compactas até 34,5 kV – Especificação EDP.