

**CABOS DE MÉDIA TENSÃO – PROCESSOS DE ISOLAÇÃO**

João J. A. de Paula

Introdução

Quando se trata de cabos isolados, para instalação em dutos, diretamente enterrados, em canaletas e até em redes aéreas, costuma-se classificar estes produtos, quanto a seu nível de tensão elétrica, em cabos de baixa, média e alta tensão, ouvindo-se, às vezes, o termo "altíssima tensão", não havendo, entretanto, uma definição clara de qual valor de tensão é o limite entre essas classificações.

Em sistemas trifásicos, considerando a tensão nominal entre fases, podemos em geral assumir que até 1 kV temos a baixa tensão, entre 1 kV e 35 kV temos a média tensão, sendo considerados os casos acima de 35 kV como alta tensão, havendo sempre uma variação em torno desses valores limites.

Os cabos de média e alta tensão podem ter o ar como isolação, quando se utiliza condutores de alumínio sem qualquer recobrimento em linhas de transmissão ou sistemas de postamento, sobre isoladores. Estes produtos não têm grandes exigências técnicas e são de constituição muito simples.

Quando se trata, entretanto, de cabos isolados para média e alta tensão, uma maior tecnologia é envolvida. Inicialmente isolados com papel e óleo, já há muitas décadas estes produtos passaram a ter como material de isolação os compostos chamados de "poliméricos", tendo sido usados ou estando em uso o PVC (cloreto de polivinila), o polietileno, o polietileno reticulado (XLPE) e a borracha de etileno-propileno (EPR) ou o monômero de etileno-propileno-dieno (EPDM), sendo estes dois últimos chamados, em geral, de EPR ou HEPR.

Já no início da utilização dos compostos poliméricos foi notado o aparecimento do fenômeno da arborescência, que será explicado adiante e que provoca o colapso da isolação. Para eliminá-la, materiais e processos foram desenvolvidos ao longo dos anos e o estado da arte atual é a utilização de compostos do tipo EPR ou XLPE, extrudados simultaneamente com os compostos semicondutores do condutor e da isolação e reticulados em processo "dry-curing", ou cura a seco. Este processo, executado em linhas comumente chamadas de "catenárias" ou "CV (Continuous Vulcanization)" demanda equipamentos e tecnologias bastante sofisticadas e será detalhado em item próprio.

Um outro processo de fabricação, bastante utilizado em cabos de baixa tensão, foi desenvolvido há décadas, sendo conhecido, entre outros nomes, por "processo de cura por silano". Sendo um processo muito menos sofisticado, existe um grande interesse por parte dos fabricantes em utilizá-lo nos cabos de tensões mais elevadas, mas as pesquisas mostram que isto ainda não é recomendável tecnicamente e, embora as próprias normas brasileiras tenham restrições a este processo, existe uma pressão crescente no mercado pela sua utilização.

O objetivo da Nexans neste trabalho é o esclarecimento do usuário quanto aos riscos inerentes de utilização de materiais de baixa confiabilidade em sistemas com tensões mais elevadas.



Arborescência e ruptura elétrica do dielétrico

O fenômeno da arborescência ou "treeing" se dá quando, por ruptura elétrica parcial do dielétrico, inicia-se um processo de deterioração da rigidez dielétrica, com direções tais que a porção ou porções do dielétrico afetadas apresentam caminhos que se assemelham a árvores.

O processo é geralmente cumulativo, de forma que, uma vez iniciado o fenômeno, este se propaga com o passar do tempo, causando muitas vezes o colapso final da isolação. Isto, entretanto, não costuma ser um processo rápido, decorrendo muitas vezes anos até que se rompa a rigidez dielétrica de toda a isolação.

A arborescência tem sido bastante estudada e discutida, principalmente nos últimos 30 anos e muito se tem aprendido sobre ela. Entretanto, não existe ainda um domínio do assunto em relação a suas causas específicas, nem tampouco sobre sua formulação matemática. Os progressos obtidos deram-se quanto ao aspecto da minimização de seus efeitos, com o desenvolvimento de novos compostos, mas até o momento não há sequer uma metodologia de ensaio consagrada para sua previsão.

É importante notar entretanto que o "treeing" não é a maior causa de falhas em cabos subterrâneos (tipo de instalação em que cabos isolados são mais utilizados). Cerca de 90% dos defeitos se dão por causas mecânicas, sendo que dentro dos 10% restantes muitos defeitos estão localizados nas emendas e terminações e a maioria deles tem causas desconhecidas, ou não perfeitamente determinadas, entre os quais se inclui o "treeing".

A grande variedade da aparência visual das arborescências, combinada com as circunstâncias de seu aparecimento e crescimento, deram origem às suas várias designações, tais como dentritos, "fans", plumas, delta, "bush", "bow tie", etc.

Muitos autores dividem o "treeing" em três categorias: elétrica, "water trees" e eletroquímica.

As "electrical trees" são formadas por canais vazios dentro do dielétrico, resultado da decomposição do material. São perfeitamente visíveis e parecem-se bastante com árvores, o que deu o nome ao fenômeno, enquanto as "water trees" se apresentam com forma difusa e temporária.

As "water trees", ao contrário das elétricas, não são formadas por canais vazios resultado da destruição do material. Parecem ser formadas por caminhos muito estreitos ao longo dos quais a umidade penetrou pela ação de um gradiente elétrico. Uma energia considerável é necessária para forçar essa penetração, que se inicia na superfície de uma imperfeição ou concentração de gradiente e pode causar a ruptura do dielétrico sem decompor sua estrutura enquanto progride.

Quando a energia que alimenta a evolução de uma "water tree" é retirada ou a fonte de umidade é eliminada, a maioria da água injetada difunde-se e evapora, e a arborescência desaparece.

Esse desaparecimento indica que os caminhos da arborescência são fechados com a retirada da umidade pois, caso contrário, ficariam ainda mais visíveis quando a água fosse substituída por ar, que tem uma diferença de índice de refração maior relativamente ao polietileno, um dos materiais em que as



"water trees" são mais visíveis. Já com o EPR a observação do fenômeno fica mais difícil, pois esse material não permite visualização das arborescências mesmo quando se supõe que estejam em franca expansão. Existe entretanto uma vertente técnica que advoga ser o EPR muito mais resistente à arborescência do que o XLPE, mesmo tendo este último sido aperfeiçoado tremendamente nos últimos 20 anos, enquanto o EPR permanece praticamente o mesmo, sendo esta opinião a predominante no mercado brasileiro, que é quase o único no mundo a ainda guardá-la.

O caso não é o de que tenha se comprovado ser o EPR igual ao XLPE, mas o fato de existirem, no mundo, somente um fabricante primeira linha do EPR e dois do XLPE. Note-se que todas as referências a EPR ou XLPE que estão sendo feitas o são quanto aos materiais reticuláveis em processo contínuo (catenária ou "CV").

As arborescências elétricas e devido à umidade podem começar na interface interna da isolação ou a partir de micro-vazios ou partículas contaminantes internos à isolação. Neste último caso, seu crescimento é radial, dirigindo-se para as superfícies interna e externa da isolação, caso em que são chamadas de "bow-tie trees".

Embora interessantes, normalmente não crescem o suficiente para causar o colapso da isolação. Para isto seria necessário que a isolação tivesse uma

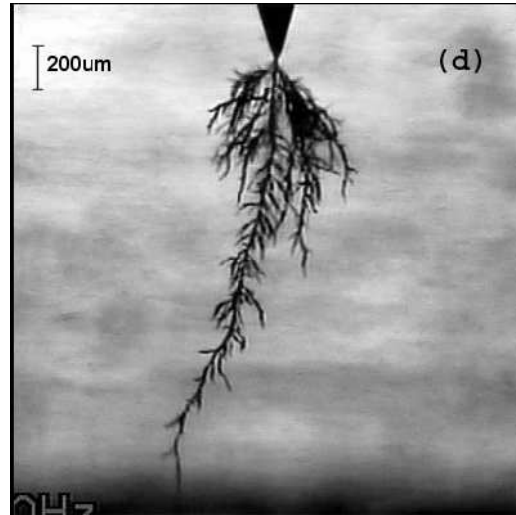
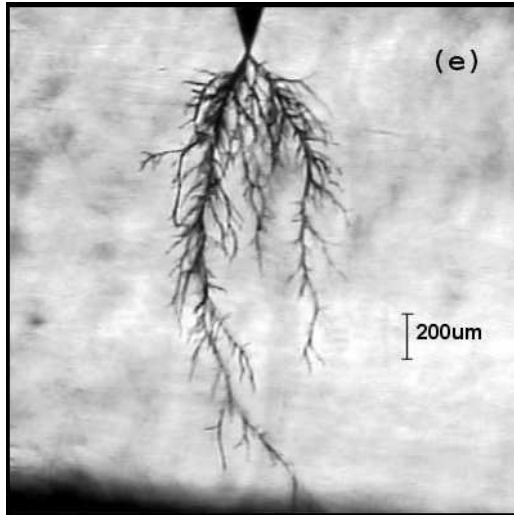
concentração anormalmente alta de micro-vazios e contaminantes.

A última classificação de arborescências, a eletroquímica, é causada pela contaminação química, devido principalmente à migração dos produtos da corrosão do condutor.

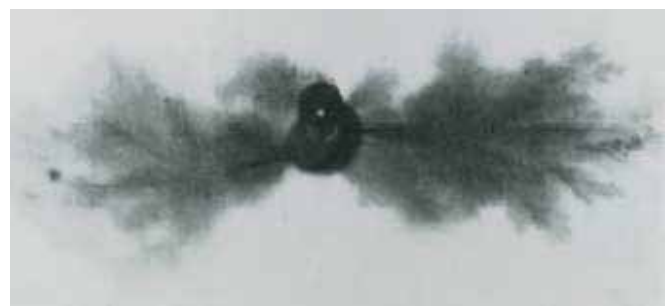
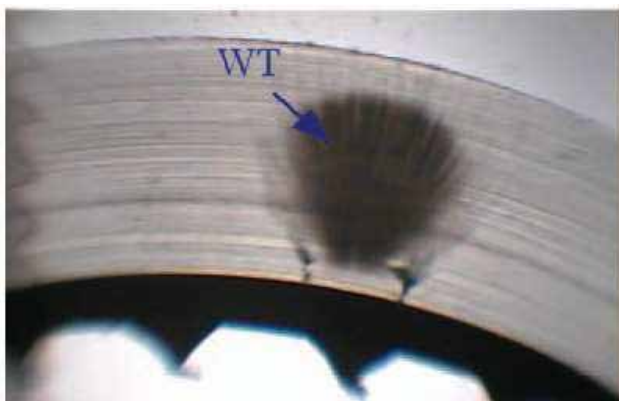
Muitas vezes essa contaminação se dá também por migração de umidade, tendo a água íons solúveis e ainda não se sabe se seria necessária a existência de caminhos prévios por onde esses íons se movimentariam ou se poderiam movimentar-se pela estrutura do composto da isolação.

A arborescência eletroquímica se dá principalmente em cabos cuja camada semicondutora do condutor é constituída por fita semicondutora, sendo este um dos motivos pelo qual a blindagem semicondutora do condutor nos cabos atuais é constituída por camada semicondutora extrudada, que melhora a resistência do cabo a este fenômeno, embora alguns estudos mostrem o decréscimo sensível da resistividade da camada extrudada em presença de umidade.

Existe portanto um relacionamento estreito entre as três categorias de arborescência, mas se tem como certo nos dias de hoje que a presença de umidade colabora para o aparecimento do fenômeno em qualquer de suas formas, além do que a existência de micro vazios ou impurezas no interior da isolação é uma condição excelente para o aparecimento das arborescências.



Fotos do crescimento de uma "electrical tree" em amostras de cabos isolados com XLPE antes da ruptura da rigidez dielétrica



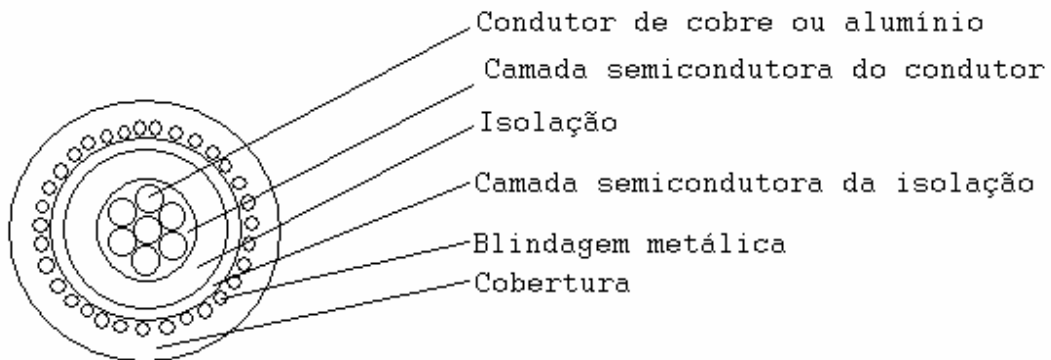
"Water trees"



Projeto de um cabo de média ou alta tensão

Um cabo elétrico isolado seco de média e alta tensão é normalmente constituído por:

- Conductor de cobre ou alumínio, formado por vários fios encordoados, normalmente compactados;
- Blindagem semicondutora do condutor;
- Isolação de EPR ou XLPE;
- Blindagem semicondutora da isolação;
- Blindagem de fios ou fitas de cobre;
- Cobertura protetora de PVC ou polietileno.



Corte transversal de um cabo típico

E = gradiente elétrico (kV/mm)

V_o = tensão elétrica aplicada entre condutor e terra (kV)

O dimensionamento do condutor é feito com base nos critérios de capacidade de corrente e queda de tensão.

A espessura da isolação é definida pelos gradientes de tensão a que o cabo estará sujeito, sendo o gradiente elétrico dado por:

$$E = \frac{V_o}{x \cdot \ln \frac{D}{d}}$$

onde:

D = diâmetro sobre a isolação (mm)

d = diâmetro sob a isolação (mm)

x = distância entre o ponto considerado e o centro do condutor (mm)

Em função do material utilizado, estabelece-se um gradiente elétrico interno (sob a isolação) e um externo (sobre a isolação) máximos e a partir desses valores a espessura da isolação



é definida. Evidentemente, o cálculo pressupõe material homogêneo.

A blindagem semicondutora interna tem a função de uniformizar o campo elétrico

no condutor, região do maior gradiente, eliminando o efeito de ponta dos fios encordoados. A externa serve basicamente como acolchoamento para a blindagem metálica.

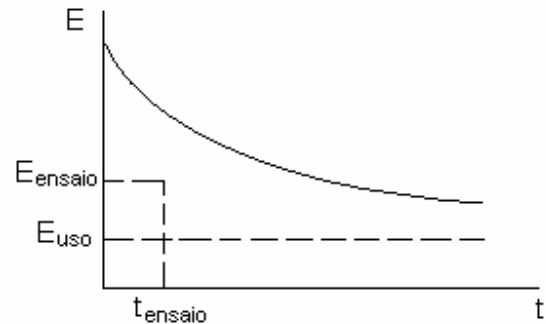
A blindagem metálica confina o campo elétrico e, quando convenientemente aterrada, fornece segurança durante a operação do cabo. Serve também, na maioria dos casos, como caminho para correntes de curto-circuito.

A cobertura externa tem a função de proteger mecânica e quimicamente o conjunto.

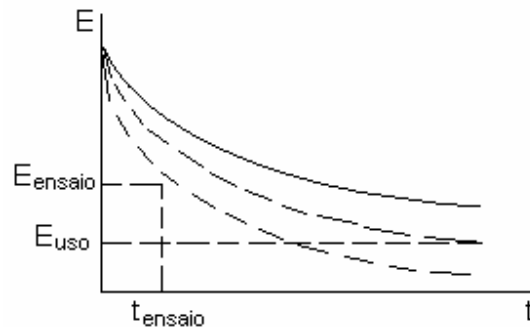
Os materiais termofixos têm um gradiente de perfuração – quando aplicado, ocorre ruptura elétrica instantânea do dielétrico – que pode chegar a 80 kV/mm no condutor e os cabos de média tensão são projetados de forma que o gradiente elétrico no condutor varie entre 1,3 e 4,0 kV/mm em uso permanente, sendo ensaiados com gradiente de 12 kV/mm durante 15 minutos. Cabos de alta tensão são projetados para um gradiente elétrico máximo no condutor de 6,0 a 16 kV/mm em regime permanente e 15 a 40 kV/mm durante 30 minutos de ensaio, como valores típicos, pois estes variam muito de um projeto para outro.

Os ensaios de tensão aplicada são destinados a detectar defeitos de

fabricação; esquematicamente, utilizando a "curva de vida" de um cabo:



Entretanto, os ensaios de tensão aplicada geralmente não detectam cabos cuja probabilidade de vida esteja muito reduzida:



e uma falha ocorrerá em algum momento do futuro.

Portanto, não há uma maneira confiável de ensaiar um cabo de média ou alta tensão, garantindo que este comportar-se-á de forma adequada durante o período de vida da instalação, de forma que somente um controle dos materiais e processos podem fornecer as melhores garantias.

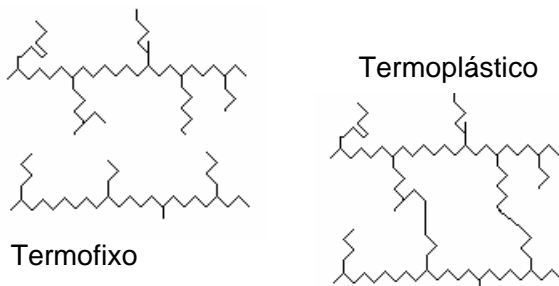


Processos de extrusão e cura da isolação de média e alta tensão

Dividimos os compostos isolantes poliméricos em dois tipos: os termoplásticos e os termofixos.

Os compostos termoplásticos, como o PVC e o polietileno, caracterizam-se por tornarem-se maleáveis quando aquecidos e retomarem suas características originais quando resfriados. Foram utilizados como isolantes para tensões acima de 1 kV durante algum tempo, mas abandonados e hoje não são permitidos pelas normas técnicas nacionais e pela maioria das internacionais.

Os compostos termofixos, como o EPR, HEPR, EPDM e XLPE após aquecidos e reticulados não retomam suas características originais e são os compostos especificados para cabos de média e alta tensão. A reticulação ou cura ou vulcanização do material (em inglês, "crosslinking" ou "X-linking") é a interligação das cadeias do polímero em uma única molécula:



A reticulação acontece pela adição de catalisadores e aplicação de alta temperatura.

Reticulação Contínua (CV – Continuous Vulcanization)

Neste processo, reticula-se o polietileno ou o EPR/HEPR/EPDM utilizando-se um

peróxido. Logo após a extrusão, o cabo entra em um tubo pressurizado, onde a alta temperatura e alta pressão faz com que ocorra a reticulação. As características deste processo são:

- 1) o processo de reticulação gera subprodutos ("by-products"), tais como a acetofenona, álcool cumílico, metil-estireno e vapor d'água.
- 2) a alta pressão evita que estes subprodutos criem micro-vazios no composto ("voids"), dando origem às arborescências (aqui reside uma das principais, senão a principal vantagem sobre o processo seguinte, de cura por silano).
- 3) instalações modernas contam com separadores para estes subprodutos ("by-product separator"), que os eliminam.
- 4) a alta temperatura, conseguida inicialmente por vapor aquecido, atualmente é obtida pelo nitrogênio, no processo conhecido como "dry-curing", evitando assim uma quantidade maior de umidade em contato com o composto e reduzindo a possibilidade de aparecimento das arborescências.
- 5) a isolação deve ser extrudada simultaneamente com a camada semicondutora do condutor e a camada semicondutora da isolação, ficando entre elas e evitando qualquer espaço vazio nas interfaces. Este processo, conhecido como tríplice extrusão, não deve ser confundido com extrusão "em tandem" onde as três camadas são



aplicadas uma após a outra, no mesmo processo: as três camadas devem ser aplicadas no mesmo ponto, no mesmo cabeçote de extrusão, e suas espessuras e concentricidades medidas por raios-X.

- 6) os materiais devem ser acondicionados pelos seus fabricantes em embalagens seladas que evitem a absorção de umidade e qualquer contaminação. Sua manipulação durante a fabricação dos cabos deve ser feita com cuidado, de preferência em salas limpas com alimentação automática. O ambiente de extrusão deve ser limpo e independente do restante das instalações de fabricação.
- 7) a reticulação da isolação se dá ao mesmo tempo em que se reticulam as camadas semicondutoras, que devem ser também termofixas para garantir a temperatura máxima de operação do cabo.

Após a reticulação, como em qualquer outro processo, o cabo é resfriado em água, que neste estágio já não tem mais como contaminar o produto.

Reticulação por Silano

Este método foi desenvolvido pela Dow Corning na década de 1970, que lhe deu o nome de Sioplas. Enquanto a reticulação por peróxidos se dá com base em ligações carbônicas, no processo Sioplas, a ligação é feita através do silício.

A vantagem deste método é que se pode utilizar qualquer linha de extrusão de termoplásticos para a isolação, enquanto

a reticulação ocorre *a posteriori*. O material de isolação é misturado ao catalisador durante a extrusão e a

reticulação ocorre tanto ao ar livre como pode ser acelerada em estufas úmidas ou piscinas com água quente, uma vez que a reticulação é feita pela penetração de umidade na isolação, o que já constitui um risco de maiores arborescências, já que não se garante que toda a umidade seja utilizada na reação de reticulação. Além disto, por não haver pressurização, a formação de micro-vazios ("voids") é bastante facilitada.

Existe ainda um outro processo, semelhante ao Sioplas, desenvolvido pela Maillefer em conjunto com a BICC, denominado de Monosil que, para o usuário, em tudo se equivale ao Sioplas, sendo somente mais complexa sua aplicação.

Muitas empresas, tais como a Nexans, estão há anos pesquisando novos materiais à base de silano para uso em média tensão, mas não se tem ainda um resultado satisfatório. É provável que se chegue a um ponto em que se possa ter um material adequado para uso até um certo nível de tensão, aceitando-se uma performance um pouco pior que aquela obtida em níveis maiores de tensão.

Considerações

A Nexans vê com preocupação a tendência de parte do mercado de aceitar um produto duvidoso para aplicações tecnologicamente complexas. Há pouco tempo, quando se resolveu a participar do mercado de cabos até 35 kV, a Nexans, embora já possuísse um dos melhores equipamentos para a fabricação de cabos de média tensão com cura a silano, usado para outras finalidades, investiu maciçamente para

sua fabricação com cura contínua justamente por considerar que a



tecnologia silano ainda não está pronta para este mercado (note-se que existem centros de pesquisa da Nexans na Europa pesquisando estes materiais há anos).

O maior empecilho para um bom esclarecimento dos usuários é que não existe um ensaio rápido que possa ser feito, comprovando que um material é melhor ou pior do que outro e disto estão se aproveitando fabricantes que não querem ou não podem investir em tecnologia. A falha no produto se dará após alguns anos de uso e o mais perverso é que, após o curto-circuito, a análise do material carbonizado não permite a determinação da causa da falta. A melhor forma de um usuário se proteger é especificar o melhor processo que lhe convenha e verificar se o fabricante possui este processo.

Citam-se exemplos de utilização e referências como argumentação de existência de composto reticulável por silano para uso em média tensão mas essas referências são em geral vagas e impossíveis de se encontrar. Nas poucas referências que se encontra, nas quais o silano resulta comparável aos materiais feitos por reticulação contínua (CV), ficam suspeitas sobre a qualidade dos protótipos fabricados em CV utilizados: evidentemente, se forem comparados silano x CV com materiais CV mal feitos, os resultados ficam distorcidos.

As normas técnicas em geral sequer consideram compostos por reticulação a silano, usando termos que referem-se somente à reticulação contínua. Por exemplo, a norma inglesa BS 7870 (vide "referências") traz a seguinte nota em sua seção 4.2.1: *precautions should be taken to ensure that gaseous cross-*

linking by-products are adequately removed from the core prior to supply (devem ser tomadas precauções para

garantir que os sub-produtos gasosos da reticulação sejam adequadamente removidos do núcleo antes do fornecimento) e isto não é uma precaução aplicável à reticulação por silano. Nas últimas revisões de normas brasileiras vem sendo colocada observação de que "o processo de vulcanização dê-se em atmosfera inerte de nitrogênio", numa clara indicação de vulcanização contínua (processo "dry-curing" em oposição à cura por vapor)

Por fim, note-se que ninguém até hoje arriscou-se a defender o uso de reticulação por silano para cabos de alta tensão; se toda a argumentação usada para média tensão fosse verdadeira e a reticulação por silano fosse realmente melhor que a reticulação contínua, não haveria motivos para esta não só não existir em alta tensão como jamais ter sido sequer cogitada.



Referências

- [1] João J. A. de Paula, *Influência da Umidade no Tempo de Vida de Cabos Elétricos de Média Tensão com Isolação Polimérica*. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Biblioteca depositária: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [2] The Wire Association International, Inc., *Electrical Wire Handbook*, 1983, editado pela The Wire Association International, Inc.
- [3] British Standards Institution, *BS 7870-4.10:1999 – LV and MV polymeric insulated cables for use by distribution and generation utilities – Part 4: Specification for distribution cables with extruded insulation for rated voltages of 11 kV and 33 kV – Section 4.10: Single-core 11 kV and 33 kV cables (confirmed October 2005)*
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas, *ABNT NBR 7287:2009 – Cabos de potência com isolação extrudada de polietileno reticulado (XLPE) para tensões de 1 kV a 35 kV – Requisitos de desempenho*
- [5] International Electrotechnical Commission, *IEC 60840 – Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) – Test methods and requirements*, third edition, 2004; IEC – 3, rue de Varembé, P.O. Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland, www.iec.ch
- [6] International Electrotechnical Commission, *IEC 62067 – Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements*, edition 1.1, 2006; IEC – 3, rue de Varembé, P.O. Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland, www.iec.ch
- [7] Insulated Cables Engineers Association, Inc., *ANSI/ICEA S-108-720 – Standard for extruded insulation power cables rated above 46 through 345 kV*, publication date July 15, 2004, by Insulated Cable Engineers Association, Inc., Post Office Box 1568, Carrollton, Georgia 30112, USA; approved by American National Standards Institute in May 12, 2005.