



Guia de ensaios

Avaliação da substituição do fio retangular de cobre isolado a 3 para 2 camadas de fita de mica

Elaborado por: Diamantino Rito

Este documento visa estabelecer uma sequência de ensaios a realizar para avaliação da substituição do fio retangular de cobre isolado a três camadas de fita de mica para o equivalente a duas camadas. Estes ensaios são baseados em normas IEC e em normas internas da WEG

Índice

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

2 SEQUENCIA DOS ENSAIOS

3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

3.1	PROVETE.....	5
3.2	EQUIPAMENTO.....	5
3.3	PROCEDIMENTO.....	5
3.4	ANÁLISE DE RESULTADOS E TOLERÂNCIAS.....	5

4 ENSAIO DE DIMENSÕES

4.1	PROVETE.....	6
4.2	EQUIPAMENTO.....	6
4.3	PROCEDIMENTO.....	6
4.4	ANÁLISE DE RESULTADOS E TOLERÂNCIAS.....	7

5 ENSAIO DE FLEXIBILIDADE E ADERÊNCIA

5.1	PROVETE.....	9
5.2	EQUIPAMENTO.....	9
5.3	PROCEDIMENTO.....	9
5.3.1	<i>Ensaio à temperatura ambiente [IEC 60317-0-2].....</i>	<i>9</i>
5.3.2	<i>Ensaio a alta temperatura [IEC 60317-0-2 e WPS 2828 PT].....</i>	<i>10</i>
5.4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	10

6 ENSAIO DE RIGIDEZ DIELETRICA, TENSÃO DE RUTURA

6.1	PROVETES.....	11
6.2	EQUIPAMENTO.....	11
6.3	PROCEDIMENTO.....	11
6.3.1	<i>Ensaio à temperatura ambiente.....</i>	<i>11</i>
6.3.2	<i>Ensaio a alta temperatura.....</i>	<i>12</i>
6.4	RESULTADOS.....	13

7 REFERÊNCIAS A NORMAS

1 Contextualização

Em análise estão três fabricantes de Fio Retangular de Cobre (FRC), A, B e C, cada um com as seguintes dimensões de cobre em mm: 4,50 x 2,24; 4,50 x 2,50 e 4,50 x 3,15.

Como os ensaios têm o objetivo de comparar os resultados do FRC isolado a 2 camadas com o de 3 camadas, ter-se-á o mesmo número de provetes por fornecedor, por dimensão de fio do cobre e por número de camadas de fita de mica.

Na Tabela 1 está detalhada a quantidade e comprimento de provetes por tipo de ensaio, e quantidade total de cobre usado. É também simulada uma previsão de tempo necessário para efetuar os diversos ensaios.

Tabela 1- Contabilização de tempo necessário para ensaios

Fio retangular de cobre			Ensaios					soma																							
Fabricante	Dimensão do cobre	Nº de camadas de isolamento	E1	E2	E3	E4	E5																								
A	4,50 x 2,24	2	Resistência elétrica	Dimensões	Flexibilidade e aderência	Rigidez Dielétrica (Temp. Ambiente)	Rigidez Dielétrica (Temp. 180 °C)	22																							
		3																													
	4,50 x 2,50	2							Comprimento de um provete [m]	3,04	0,5	0,2	0,4	4,54																	
		3																													
	4,50 x 3,15	2													Comprimento do conjunto de provetes [m]	3,04	0,5	2	2	2	9,54										
		3																													
	Tempos necessários / provete	Medição [min]																				10	15	1	1	1	28				
		Curvatura [min]																						3	3	3	9				
Ensaio dielétrico [min]					5	10	15																								
Análise de resultados [min]		5	5	2	3	3	18																								
Soma [horas]		15	20	6	12	17	70																								
Forno * [min]				30		30																									
B	4,50 x 2,24	2	Nº total de provetes por ensaio	18	18	180	90	90	396																						
		3																													
	4,50 x 2,50	2								Tempo global necessário do ensaio [horas]	4,5	6	18,5	18	30	77															
		3																													
	4,50 x 3,15	2															* São colocados em forno grupos de provetes														
		3																													
	C	4,50 x 2,24																						2							
																								3							
4,50 x 2,50		2																													
		3																													
4,50 x 3,15		2																													
		3																													
Tipos de fios diferentes		18																													

* São colocados em forno grupos de provetes

2 Sequência dos ensaios

Os ensaios serão realizados segundo uma sequência pois em alguns casos é necessário ter-se os resultados dos ensaios anteriores. Se os provetes não estiverem danificados, eles poderão em alguns casos servir em ensaios seguintes. Na Figura 1 e Figura 2 estão esquematizadas a sequência de ensaios e a interligação dos provetes. A quantidade e comprimento indicado refere-se por fornecedor e por tipo de fio de cobre.

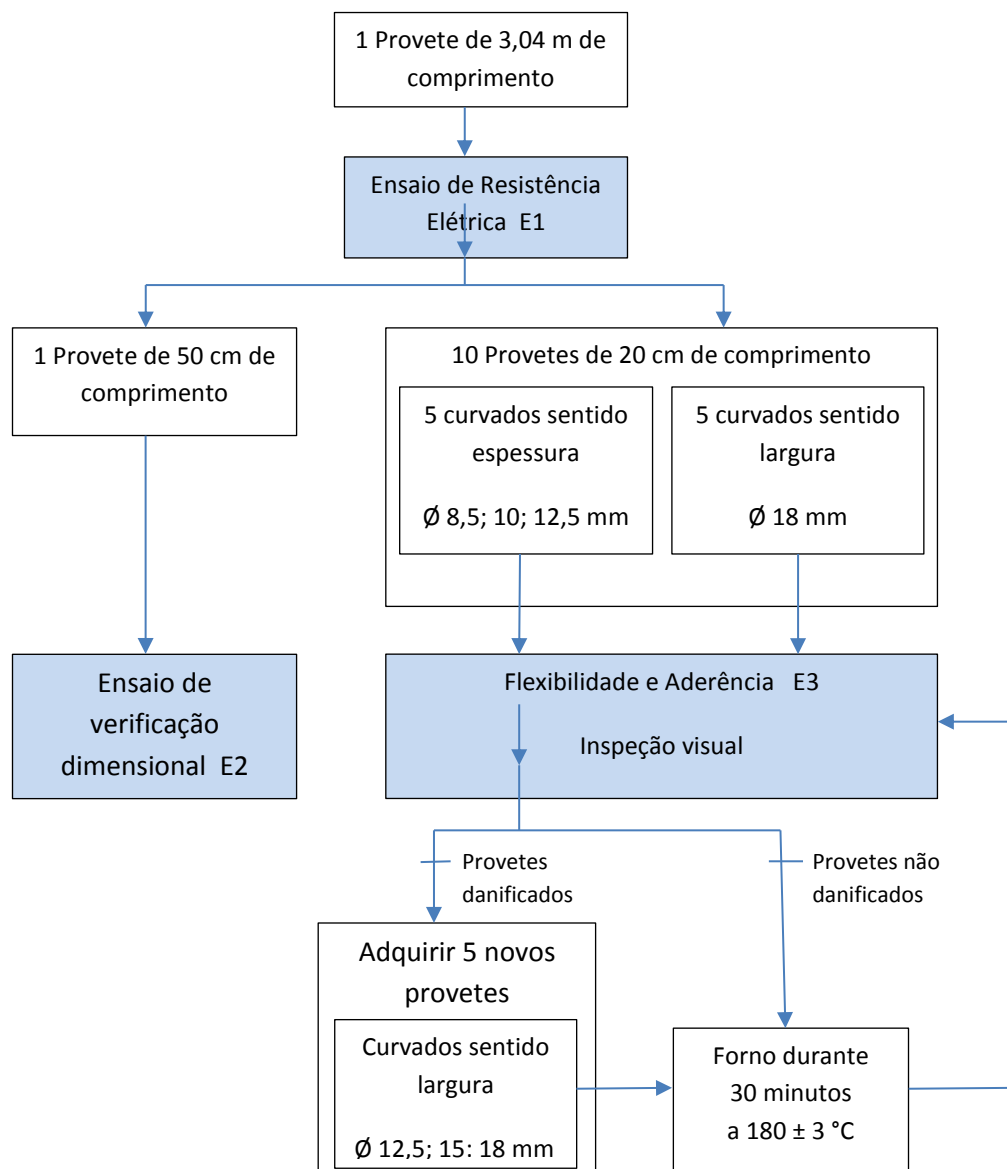


Figura 1- Esquema de sequência E1, E2 e E3

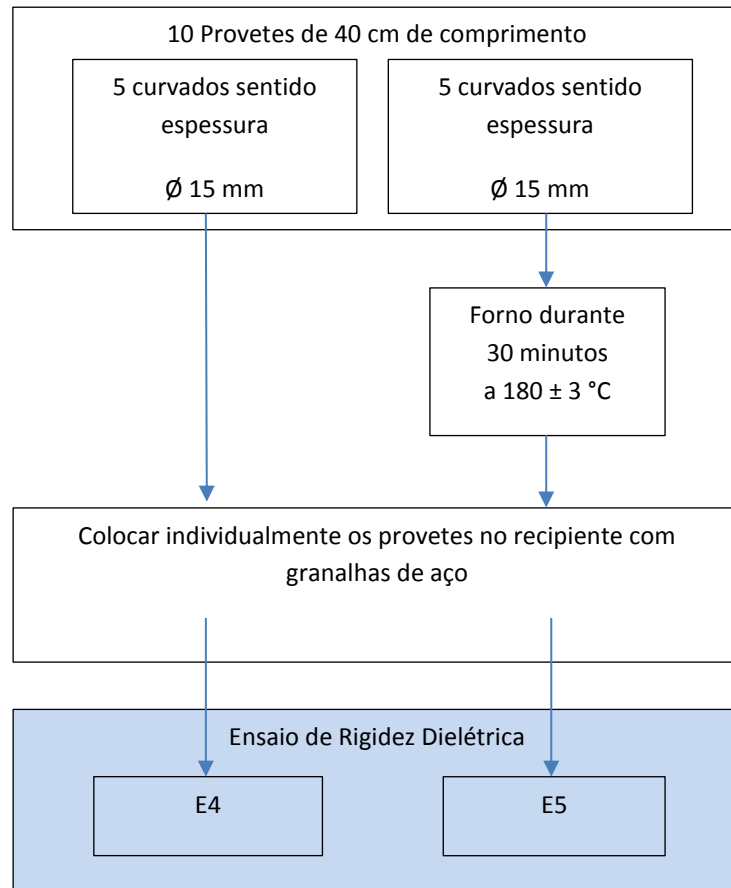


Figura 2- Esquema de sequência de E4 e E5

3 Ensaio de Resistência elétrica

A resistência do fio condutor é expressa como a resistência DC a 20 °C. O método de ensaio deve devolver resultados com uma precisão de 0,5 %. [IEC 60317-0-2]. Este ensaio tem o objetivo de comparar o cobre dos diferentes fornecedores tendo em conta a composição química do mesmo. Será tida em conta a dimensão real do fio de cobre ao qual está a ser medida a resistência.

3.1 Provete

Deve-se cortar um provete de cada tipo de fio em análise de exatamente 3,04 m. O provete deve ser identificado adequadamente com o nome do fornecedor, dimensões nominais do fio e número de camadas de fita de mica.

3.2 Equipamento

- Microhmímetro ou multímetro de precisão

3.3 Procedimento

Retirar o isolamento em cada extremidade em 20 mm, sem danificar o fio de cobre. É importante manter o isolamento ao longo do provete e na sua configuração de origem, pois este provete dará de seguida origem a novos provetes utilizados no ensaio de verificação dimensional e ensaio de flexibilidade e aderência (descrito na Capítulo 4 e 5 deste Guia).

Este ensaio consiste em medir a resistência elétrica com um ohmímetro a uma temperatura ambiente entre 15 a 25 °C.

Deve ser registada a temperatura ambiente e calculada a respetiva resistência elétrica por metro para a temperatura de 20 °C, usando a equação 1 [IEC 60851-5].

$$R_{20} = \frac{R_T}{3(1 + \alpha_{20}(T - 20))} \quad 1)$$

em que o coeficiente térmico do cobre é: $\alpha_{20} = 3.96 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

3.4 Análise de resultados e tolerâncias

Deve-se anotar a informação identificativa do provete juntamente ao resultado da medição para de seguida ao efetuar o ensaio de verificação de dimensões (descrito na Capítulo 4 deste Guia) serem associados às dimensões reais do fio condutor.

A resistência do fio não deve ser maior que o valor calculado para a área de secção mínima permitida do condutor, ou seja, usando como dimensões o limite inferior para a largura e espessura, o maior raio permitido do boleado e uma resistividade do cobre de $1/58 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. [IEC 60317-0-2]

4 Ensaio de Dimensões

4.1 Provete

Cortar um provete daquele utilizado no ensaio de resistência elétrica (descrito no Capítulo 3 deste Guia) em aproximadamente 0,5 m de comprimento.

4.2 Equipamento

- Micrómetro com resolução mínima de 2 μm para fio com dimensões superiores a 0,2 mm ou resolução mínima de 1 μm para fio com dimensões até 0,2 mm. O diâmetro do “anvil” deve ser entre 5 e 8 mm e a força de aperto entre 1 e 2 N/mm^2 [IEC 60851-2].
- Máquina fotográfica com boa resolução macro.
- Software de desenho técnico.

4.3 Procedimento

- 1) Medir em 3 pontos diferentes (distanciados no mínimo de 100 mm entre si) a largura e espessura com o micrómetro (ver Figura 3). A média dos três valores corresponderá à medida de largura e espessura do fio com isolamento.

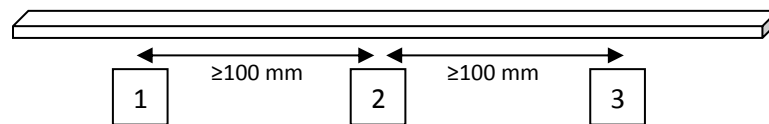


Figura 3- Pontos de medição do ensaio de dimensões

- 2) Retirar as várias camadas de isolamento ao fio condutor e relatar o comportamento da sobreposição e desfasamento das várias camadas de fita.
- 3) Medir a largura e espessura (do fio nu) aproximadamente nos mesmos pontos em que foi feita a medição do fio isolado. A média dos três valores corresponderá à medida de largura e espessura do fio condutor (fio nu).
- 4) Calcular as dimensões do acréscimo do isolamento no sentido de largura (A_l) e no sentido da espessura (A_e), subtraindo à média do fio condutor com isolamento a média do fio sem isolamento (fio nu), conforme equações 2 e 3.

$$A_l = \bar{L}_I - \bar{L}_N \quad 2)$$

$$A_e = \bar{E}_I - \bar{E}_N \quad 3)$$

Onde:

$\bar{L}_I$	Média aritmética das medidas de largura do fio isolado [mm]
$\bar{L}_N$	Média aritmética das medidas de largura do fio nu [mm]
$\bar{E}_I$	Média aritmética das medidas de espessura do fio isolado [mm]
$\bar{E}_N$	Média aritmética das medidas de espessura do fio nu [mm]

[IEC 60851-2]

- 5) Determinar o raio do boleado

Proceder ao corte do condutor em ângulo reto e capturar uma imagem utilizando uma máquina fotográfica com boa resolução macro (capaz de registrar em curtas distâncias o máximo de pormenor e detalho da superfície de corte).

Utilizar um Software de desenho técnico (como p.ex. AutoCad ou DraftSight). Inserir a imagem anteriormente obtida e redimensioná-la de modo que as dimensões externas do condutor coincidam com as medidas obtidas anteriormente.

Traçar linhas verticais e horizontais de forma a limitar as zonas de início do boleado. Criar arcos coincidentes com os limites do fio de cobre, conforme Figura 4. De seguida, utilizando a ferramenta de medição do Software, obter os valores dos respetivos boleados

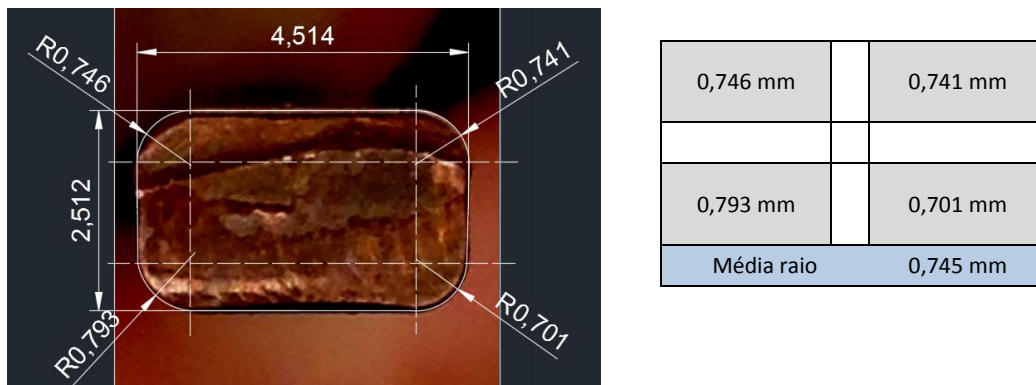


Figura 4- Exemplo de um corte e medição do raio do boleado usando AutoCad

O resultado, média dos valores obtidos, será muito aproximadamente o raio real do boleado, neste caso de exemplo 0,745 mm.

4.4 Análise de resultados e tolerâncias

Deve ser anotado o número da ferramenta de medição, as suas características e a data de calibração.

Deve ser também anotada a informação identificativa do provete (fabricante, dimensão nominal do fio, e número de camadas de fita de mica) juntamente com o resultado da medição para serem interligados as dimensões reais do fio condutor com o resultado da resistência elétrica obtida no Capítulo 3 deste Guia.

Apesar das tolerâncias de dimensões das normas WEG serem mais restritas, optou-se pelas tolerâncias indicadas pelas normas IEC. É por essas normas que os fabricantes de fio de cobre se regem e são as que se podem mencionar como argumento caso seja necessário fazer uma reclamação de não conformidade. As tolerâncias do fio condutor e do acréscimo de isolamento estão mencionadas na Tabela 2 e na Tabela 3 respetivamente.

Quanto à dimensão global do fio isolado, isto é, do fio condutor mais acréscimo de isolamento, esta tem de ser inferior à soma do valor máximo permitido para o fio condutor mais o valor máximo do acréscimo de isolamento.

As tolerâncias do raio do boleado estão mencionadas na Tabela 4, em que um raio maior significa que o FRC terá as arestas mais arredondadas mas por outro lado o FRC terá uma secção condutora menor.

Tabela 2- Tolerância do fio condutor [IEC 60317-0-2]

Largura e espessura nominal do condutor nu [mm]		Tolerância [mm]
Superior	Inferior ou igual	
--	3,15	± 0,03
3,15	6,3	± 0,05
6,3	12,5	± 0,07
12,5	16	± 0,10

Tabela 3- Tolerância do acréscimo do isolamento [IEC 60317-27]

Medida do acréscimo do isolamento [mm]		Tolerância %
Superior	Inferior ou igual	
--	0,5	- 10 / + 0
0,5	1,25	- 7,5 / + 0
1,25	--	- 5 / + 0

O valor máximo de tolerância do acréscimo do isolamento pode ser ultrapassado desde que a medida do fio isolado não exceda o somatório do valor máximo permitido para o fio nu mais o valor máximo do acréscimo do isolamento.

Tabela 4- Tolerância do raio do boleado [IEC 60317-0-2]

Espessura nominal do fio condutor [mm]		Raio do boleado
Superior	Inferior ou igual	
--	1,00	0,5 x espessura nominal
1,00	1,60	0,50 *
1,60	2,24	0,65**
2,24	3,55	0,80
3,55	5,60	1,00

Quando a largura nominal for superior a 4,8 mm e se acordado entre fornecedor e cliente o raio do boleado poderá ser:

* 0,5 x espessura nominal

** 0,8 mm

5 Ensaio de flexibilidade e aderência

Ir-se-á adotar a designação dos sentidos de curvatura das normas IEC, conforme Figura 5a e Figura 5b, (contradiz as normas WPS-2828 PT e a WPS-4626 PT)

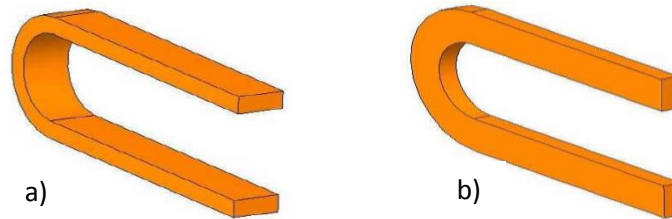


Figura 5-Curvatura a) Sentido espessura b) Sentido largura

5.1 Provete

Cortar 10 provetes daquele utilizado no ensaio de resistência elétrica (descrito no Capítulo 3 deste Guia) em aproximadamente 20 cm de comprimento cada. 5 provetes serão utilizados para o ensaio com curvatura no sentido da espessura e 5 no sentido da largura.

5.2 Equipamento

Para os diferentes fios em estudo os raios de curvatura dos pinos a utilizar neste ensaio estão especificados na Tabela 5. A coluna 4X resulta do critério de 4 vezes a largura e espessura para o ensaio a temperatura ambiente. A coluna 6X resulta do critério de 6 vezes a espessura para ensaio com alta temperatura. Este ensaio só considera provetes curvados no sentido de espessura. [IEC 60317-0-2]

Tabela 5- Determinação dos pinos a utilizar, ensaio de flexibilidade e aderência

Sentido	Pino 4X		Pino 6X	
	Critério de cálculo	Ø do pino a utilizar		Ø do pino a utilizar
Largura	$4 \times 4,50 = 18$	18 mm		
Espessura	$4 \times 2,24 = 8,96$	8,50 mm	$6 \times 2,24 = 13,44$	12,5 mm
	$4 \times 2,50 = 10$	10 mm	$6 \times 2,50 = 15$	15 mm
	$4 \times 3,15 = 12,6$	12,5 mm	$6 \times 3,15 = 18,9$	18 mm

5.3 Procedimento

5.3.1 Ensaio à temperatura ambiente [IEC 60317-0-2]

Nota: Esta norma tem critério mais exigente quanto à curvatura (pinos com diâmetros menores) no sentido da espessura do que a WPS-4626 PT.

Dobrar 10 provetes de cerca de 200 mm de comprimento (de cada tipo de fio em análise) em 180 graus formando um “U”, 5 dos quais no sentido da largura e 5 no sentido da espessura. Os diâmetros dos pinos a utilizar estão mencionados na Tabela 6.

Tabela 6- Pinos a utilizar por tipo de fio no ensaio de flexibilidade e aderência

Sentido da curvatura	Dimensões do fio	Ø do pino a utilizar
Largura	4,50 x 2,24	18 mm
	4,50 x 2,50	
	4,50 x 3,15	
Espessura	4,50 x 2,24	8,50 mm
	4,50 x 2,50	10 mm
	4,50 x 3,15	12,50 mm

Identificar adequadamente os provetes com um número sequencial (identificativo do provete), a dimensão nominal do fio, nome do fornecedor e nº de camadas de fita.

5.3.2 Ensaio a alta temperatura [IEC 60317-0-2 e WPS 2828 PT]

A norma IEC 60317-0-2 refere este ensaio. No entanto, a WPS-2828 PT indica um diâmetro menor de curvatura, ou seja, é mais exigente a nível de ensaio.

Do ensaio anterior (à temperatura ambiente) serão utilizados os 5 provetes curvados no sentido da espessura (pinos de diâmetro de 4 vezes a espessura), se o isolamento não estiver danificado. [WPS-2828 PT]

Caso contrário: Será necessário dobrar novos 5 provetes por tipo de fio no sentido da espessura segundo um critério de 6 vezes a espessura [IEC 60317-0-2]. Os pinos a utilizar estão mencionados na Tabela 7.

Tabela 7- Pinos alternativos a utilizar no ensaio de flexibilidade e aderência a alta temperatura

Sentido da curvatura	Dimensões do fio	Ø do pino a utilizar
Espessura	4,50 x 2,24	12,5 mm
	4,50 x 2,50	15 mm
	4,50 x 3,15	18 mm

O ensaio consiste em colocar os provetes num forno com circulação forçada a 180 ± 3 °C durante 30 min. Após esse tempo, os provetes serão retirados do forno até atingirem a temperatura ambiente.

5.4 Análise de resultados

Este ensaio tem como objetivo verificar através de inspeção visual o comportamento das várias camadas de fita de mica. A tendência vai ser o abrir da sobreposição e/ou desfasamento das várias camadas de isolamento. Situação extrema de não conformidade será a exposição do fio condutor de modo a ficar visível o cobre.

Para além disso, no ensaio a alta temperatura deve ser analisado e comentado o impacto que a temperatura teve no isolamento. Registar com imagens fotográficas o estado da fita antes de curvar, após curvar e ainda após ensaio a alta temperatura.

6 Ensaio de rigidez dielétrica, tensão de rutura

6.1 Provetes

Cortar 10 provetes de cada tipo de fio em estudo de 400 mm de comprimento cada.

6.2 Equipamento

- Transformador AC de potência mínima nominal de 500 VA de onda sinusoidal não distorcida;
- Circuito de detecção de falha que opera a uma corrente mínima de 5 mA;
- Sistema que proporciona um aumento uniforme da tensão de ensaio conforme os níveis de tensão representados na Tabela 8;

Tabela 8-Escala e taxa de aumento da tensão de rutura [IEC 60851-5]

Tensão de rutura [V]		Taxa de aumento [V/s]
Superior a	Inferior ou igual a	
--	500	20
500	2500	100
2500	--	500

- Forno com circulação forçada;
- Granalhas de aço inoxidável ou aço niquelado de diâmetro inferior a 2 mm, quantidade aproximada de 3 dm³ (quantidade calculada para as dimensões do recipiente abaixo mencionado);
- Recipiente isolado com as dimensões (L x l x h) 150 x 100 x 150 mm;
- Pinos de curvatura com os diâmetros de 15, 25 e 50 mm.

[IEC 60851-5]

6.3 Procedimento

6.3.1 Ensaio à temperatura ambiente

- Dobrar no sentido da espessura:

Serão testados 5 provetes de 400 mm de comprimento curvados em pino de diâmetro de 15 mm. Isto deve-se à importância de aproximar o ensaio a condições de produção, uma vez que este corresponde ao menor diâmetro de pinos utilizados em projeto.

Nota: A norma [IEC 60851-5] indica a curvatura de 5 provetes de 400 mm de comprimento em pino de 25 e 50 mm de diâmetro conforme as dimensões do fio especificado na Tabela 9.

Tabela 9- Pinos a utilizar para ensaio de rigidez [IEC 60851-5]

Espessura do fio	Ø do pino utilizado
≤ 2,5 mm	25 mm
> 2,5 mm	50 mm

- Em cada provete retirar o isolamento numa das extremidades em cerca de 20 mm.
- Imergir a curvatura de um provete numa quantidade de granalhas de aço, contida num recipiente isolado conforme Figura 6. É importante centrar o provete no recipiente garantindo assim as distâncias mínimas

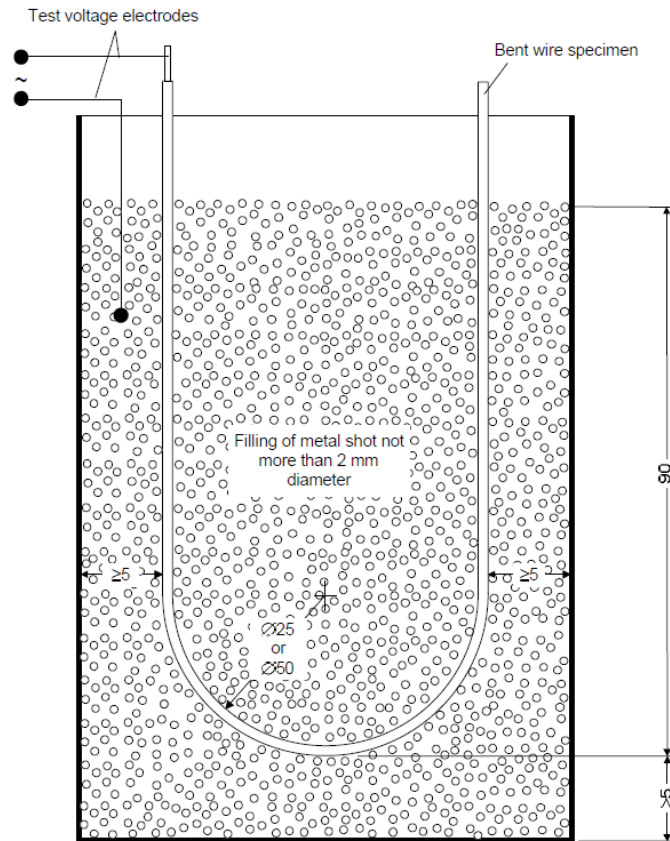


Figura 6- Representação e distâncias mínimas do ensaio de rigidez dielétrica [IEC 60851-5]

- Ligar o provete através da extremidade a que anteriormente foi retirado o isolamento ao polo positivo do aparelho de ensaio.
- Ligar ao outro polo (neutro) do aparelho de ensaio, um fio condutor e imergi-lo diretamente nas granalhas de aço onde foi imerso o provete.
- Colocar o aparelho de ensaio em modo automático e aumentar a tensão segundo a Tabela 8, até ocorrer a rutura.

6.3.2 Ensaio a alta temperatura

- Dobrar no sentido da espessura:

Serão testados 5 provetes de 400 mm de comprimento em pino de diâmetro de 15 mm. Isto deve-se à importância de aproximar o ensaio a condições de produção, uma vez que este corresponde ao menor diâmetro de pinos utilizados em projeto.

Nota: As normas IEC 60851-5 e WPS-4626 PT indicam a curvatura de 5 provetes de 400 mm de comprimento em pino de 25 e 50 mm de diâmetro conforme as dimensões do fio especificado na Tabela 9.

- Em cada provete retirar o isolamento numa das extremidades em cerca de 20 mm.

- Colocar os provetes durante 30 min num forno com circulação forçada, previamente aquecido a 180 ± 3 °C.
- Retirar os provetes da estufa e deixá-los arrefecer até atingirem a temperatura ambiente. [WPS-4626 PT]

Nota: Segundo a norma IEC 60851-5 o ensaio de rigidez é efetuado dentro da estufa, da seguinte forma: O provete, o recipiente e as granalhas de aço são pré-aquecidas no forno antes de ser introduzido o provete no recipiente e o vazamento das granalhas de aço. Depois disso volta a ser aquecido durante 15 min no forno e efetuado o ensaio de rigidez antes de completar os 30 min. Este processo torna-se complicado uma vez que o aparelho de ensaio tem de estar eletricamente ligado ao provete dentro do forno.

- Imergir a curvatura do provete numa quantidade de granalhas de aço, contida num recipiente isolado conforme Figura 6, centrando o provete no recipiente e respeitando as distâncias mínimas.
- Ligar o provete através da extremidade a que anteriormente foi retirado o isolamento, ao polo positivo do aparelho de ensaio.
- Ligar ao outro polo (neutro) do aparelho de ensaio, um fio condutor e imergi-lo diretamente nas granalhas de aço onde foi imerso o provete.
- Colocar o aparelho de ensaio em modo automático e aumentar a tensão segundo a Tabela 8, até ocorrer a rutura.

6.4 Resultados

Deve ser registada a tensão de rutura e a que instante essa mesma rutura ocorreu.

Para o ensaio de rigidez dielétrica à temperatura ambiente, a norma WPS-2828 PT indica que pelo menos 4 dos 5 provetes não devem romper com tensões inferiores a 4 kV para FRC isolado a 2 camadas de mica e 6 kV para FRC isolado a 3 camadas de mica. O quinto provete não deve romper com tensões inferiores a 50 % das tensões anteriormente especificadas.

7 Referências a normas

<u>IEC 60851-2</u>	Winding wires - test methods - part 2: determination of dimensions
<u>IEC 60317-0-2</u>	Specifications for particular types of winding wires - part 0: general requirements - section 2: enameled rectangular copper wire
<u>IEC 60317-27</u>	Specifications for particular types of winding wires - part 27: paper tape covered rectangular copper wire
<u>IEC 60851-5</u>	Winding wires - test methods - part 5: electrical properties
<u>IEC 60317-0-4</u>	Specifications for particular types of winding wires - part 0-4: general requirements - glass-fiber wound, resin or varnish impregnated, bare or enameled rectangular copper wire
<u>WPS-2828 PT</u>	Fio de cobre de seção retangular esmaltado ou não isolado com fita de mica e poliéster ou kapton
<u>WPS-4626 PT</u>	Ensaio em fio de cobre retangular esmaltados ou não recobertos com mica
<u>WPS-5065 PT</u>	Fio de cobre nu de secção retangular
<u>WPS-22500 PT</u>	Sistema samicabond isolamentos
<u>WPS-22513 PT</u>	Fabrico de bobinas em fio de cobre retangular