

# Avaliação e Redução das Degradações em Contatos Elétricos

M. J. Pereira, FURNAS e E. S. Costa, CEPEL

## RESUMO

Este documento apresenta o estudo e desenvolvimento de uma metodologia aplicada na avaliação e identificação das degradações de contatos elétricos de disjuntores, tipo PK, de fabricação Alstom aplicados nas tensões de 345 kV a 800 kV. Foram realizados ensaios elétricos e mecânicos os quais demonstraram serem amplamente aplicáveis, fornecendo resultados potencialmente utilizáveis para a redução das degradações, eliminação da importação e tempo de espera de reposição desses contatos.

## PALAVRAS-CHAVE

Contatos elétricos, disjuntores, ensaios.

## I. INTRODUÇÃO

A necessidade de substituição de contatos elétricos desgastados em disjuntores tem onerado as concessionárias em seus custos de manutenção. Muitos dos disjuntores já não são produzidos pelos fabricantes, o que dificulta a aquisição dos contatos de reposição. Paralelamente, a possibilidade de extensão de vida útil dos contatos corresponde diretamente ao prolongamento da vida útil dos disjuntores, podendo-se estender os períodos de revisão geral e sua substituição.

O objetivo desse relatório é apresentar os resultados e conclusões obtidos através dos ensaios laboratoriais em protótipos de contatos elétricos de disjuntores a ar comprimido, tipo PK, de fabricação Delle Alstom, aplicados nas tensões de 345kV a 800kV.

Estes ensaios foram realizados dentro do escopo do projeto de pesquisa 1110 – Avaliação e Redução das Degradações em Contatos Elétricos de Disjuntores, onde foram pesquisados o tempo de vida útil e os mecanismos de degradação de contatos elétricos, aplicados a disjuntores de alta tensão. Como resultado, foi levantado um conjunto de critérios para fabricação / recuperação dos contatos que buscam não só melhorar a qualidade e o desempenho em serviço destes componentes, mas também a extensão de sua vida útil.

M.J. Pereira trabalha em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A (e-mail: marciajp@furnas.com.br)

E.S. Costa trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (e-mail: eleilson@cepel.br)

## II. HISTÓRICO

Este projeto de pesquisa, foi dividido em duas fases, na primeira fase foram ensaiados dois contatos móveis e dois conjuntos de molas corrugadas, fabricados pela OMG, dentro da especificação solicitada.

Em função dos resultados desta primeira fase foi descartada a fabricação das molas corrugadas e decidiu-se pela possibilidade de recuperação dos contatos fixos e móveis.

Houve a redefinição do projeto e o seu enquadramento no âmbito de projetos P & D, quando foram estabelecidos os seguintes marcos previstos para serem cumpridos em duas etapas:

### A. 1ª etapa

- Elaboração de procedimentos operacional e de segurança para o projeto;
- Projeto e construção de dispositivo para os ensaios de operações mecânicas;
- Recuperação de 8 contatos com diferentes características construtivas, executada pela OMG;
- Ensaios de operações mecânicas em vazio dos protótipos, à temperatura ambiente, com medições periódicas de resistência elétrica de contato; Ensaios de elevação de temperatura;
- Seleção dos contatos a serem submetidos aos ensaios de interrupção; Ensaios de interrupção de corrente de curto circuito com medições de resistência elétrica de contato;
- Ensaios de operações mecânicas em vazio, à temperatura ambiente, com medições periódicas de resistência elétrica de contato; Ensaios de elevação de temperatura;
- Ensaios de condutividade;
- Análise metalográfica; Análise por dispersão de energia de raio-x; Ensaio de dureza e Medição da camada de prata (revestimento).

### B. 2ª etapa

- Análise e seleção dos contatos com melhor desempenho para confecção de protótipos com características construtivas padrão do processo de recuperação e de fabricação;
- Comprovação do desempenho dos novos contatos recuperados e fabricados (protótipos padrão) através da repetição da mesma seqüência de ensaios, medições e análises da primeira etapa.

### III. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

#### A. Ensaio de operações mecânicas em vazio, à temperatura ambiente

Estes ensaios foram definidos com a finalidade de verificar a degradação dos contatos recuperados / fabricados frente a um grande número de operações sucessivas e baseado no fato de que se espera, para contatos de disjuntores a ar comprimido, uma vida útil média de, pelo menos, 2000 operações.

Foi realizado um total de 2000 operações mecânicas (ciclos fecha-abre) com intervalo de 1 min entre cada ciclo, sendo 1000 antes e 1000 após os ensaios de interrupção de corrente, em cada um dos contatos selecionados. Estas operações em vazio foram realizadas com um dispositivo construído especialmente para este ensaio.

Todos os contatos submetidos a estes ensaios tiveram suas quatro faces identificadas e fotografadas a cada 200 operações.

Através de análise visual, efetuada a cada 100 operações, foram verificados os seguintes aspectos: a partir de que número de operações começa a haver degradação mais severa do contato, como se comporta quanto à aderência da camada de prata e qual é estado geral do contato. Estas observações, sempre que pertinentes, foram registradas em tabelas de acompanhamento do processo.

#### B. Ensaio de resistência elétrica de contato

Durante os ensaios de operações mecânicas em vazio, a cada 100 ciclos, foram realizadas as medições de resistência elétrica em 4 faces de cada contato.

Durante os ensaios de interrupção de corrente de curto circuito, também foram efetuadas medições de resistência elétrica, de acordo com a figura 1, a cada 2 interrupções.

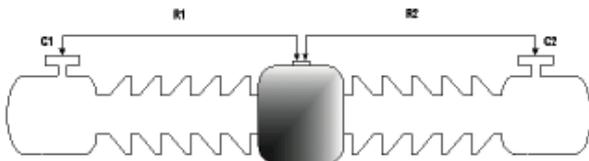


FIGURA 1. Medição de resistência elétrica vista dos terminais do disjuntor

#### C. Ensaio de elevação de temperatura

Os ensaios de elevação de temperatura foram baseados nas prescrições das normas IEC 56-87 (1) e IEC 694-90 (2), tendo sido realizados antes e após os 1000 e 2000 ciclos de operações mecânicas de fechamento e abertura a vazio.

O ensaio consistiu na circulação da corrente nominal do disjuntor (2000A) durante o tempo necessário para ser atingida a temperatura de estabilização em todos os pontos do conjunto de medição. Por limitações operacionais o ensaio foi realizado com os conjuntos de contatos fora da câmara.

A figura 2, mostra os pontos de medição adotados.

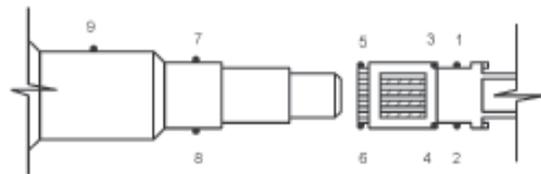


FIGURA 2. Detalhe dos pontos de medição de temperatura antes do encaixe dos contatos

#### D. Ensaio de interrupção com corrente de curto-circuito de 24 kA em 12 kV

Os ensaios de interrupção de corrente foram realizados com a finalidade de verificar o desgaste dos contatos frente às solicitações térmicas e dinâmicas presentes na abertura de uma corrente de curto-circuito. Deve ser ressaltado que o ensaio realizado não se configura como um ensaio de interrupção nos valores nominais da câmara do disjuntor (105 kV – 24 kA). No entanto, como o tempo de arco do disjuntor sob investigação se situa entre 4 e 10ms, para condições de abertura simétrica, e entre 10 e 14ms, em condições de abertura assimétrica, as aplicações foram representativas das solicitações térmicas e dinâmicas reais impostas à câmara na abertura de uma falta na rede.

O circuito de ensaio utilizado é típico para ensaios sintéticos, compreendendo somente a fonte de potência. A tensão de 12 kV utilizada no ensaio, deveu-se ao fato da limitação da potência de curto-circuito que o laboratório de Alta e Média Potência do CEPTEL pode solicitar do sistema para ensaios monofásicos. Essa limitação de potência, frente a um dispositivo de capacidade de interrupção elevada, caso da câmara sob ensaio, faz com que a corrente interrompida sofra deformação, levando a uma redução da amplitude da corrente e uma correspondente redução da energia de arco. Nos ensaios realizados essa redução ficou em torno de 5% e foi considerada aceitável.

Durante os ensaios foram registrados os sinais de corrente e tensão nos terminais do disjuntor e, a partir desses, foi calculada a energia desenvolvida durante a interrupção. O tempo de arco é medido a partir do instante de início da “rampa de energia”. A energia calculada, que compreende à integral do produto da tensão e corrente durante o período de arco, foi utilizada como parâmetro auxiliar na avaliação da degradação dos contatos durante as interrupções.

Foram realizadas 10 operações de abertura sob condições de corrente simétrica (componente contínua da corrente de curto-circuito menor que 20%) e 10 operações de abertura sob condições de corrente assimétrica (componente contínua da corrente de curto-circuito igual a 50%). As condições de corrente simétrica ou assimétrica foram obtidas por meio da atuação de chave de fechamento síncrono. A figura 3, mostra o circuito de ensaio utilizado.

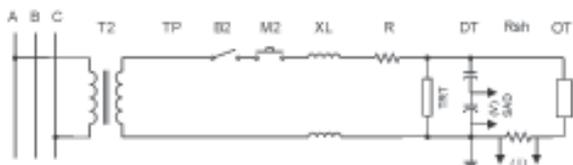


FIGURA 3. Circuito de ensaio utilizado durante os ensaios de interrupção

**LEGENDA:**

- ABC barramento de 138 kV;
- T2 transformador de curto-circuito;
- B2 disjuntor mestre;
- M2 chave de fechamento síncrona;
- XL reatores limitadores de corrente;
- R resistor para controle de fator de potência;
- TRT parâmetros para controle da tensão de restabelecimento transitória;
- DT divisor de tensão no patrimonial 06-1764 com certificado de calibração no UNIAT 1272/97-R, válido até setembro 03;
- Rsh derivador de corrente no patrimonial 06-1778 com certificado de calibração no UNIAT 1280/97-R, válido até setembro 03;
- SAD sistema de aquisição de dados no patrimonial 06-6071 com certificado de calibração no UNIAT 1-197/00, válido até setembro 03 e acoplado ao sistema de fibras ópticas (módulos 17A, 25A e 25B) com certificado de calibração no UNIAT 1-070/01, válido até abril 03;
- OT objeto sob teste (câmara de interrupção do disjuntor PK).

**E. Ensaios de condutividade elétrica**

Foi efetuada a medição da condutividade IACS no cobre dos contatos, sem a camada de prata. A condutividade elétrica do contato é função da condutibilidade elétrica do material. A condutibilidade é uma propriedade inerente do material, servindo, portanto, para revalidar os resultados da análise química.

**F. Análise metalográfica**

Os contatos sob análise foram cortados transversalmente e embutidos com resina epox isolando para análise a superfície do cobre, do revestimento de prata e da interface entre ambos. As amostras foram desbastadas por meio de lixas com granulação de 200mm, 400mm e 600mm e polidas com pastas de diamante com granulometria de 6-12mm e 0-2mm, até a eliminação dos riscos superficiais. Em seguida, as amostras foram atacadas com 7,5ml de solução de dicromato de potássio (4g de  $K_2Cr_2O_7$  + 16ml de  $H_2SO_4$  + 4ml de NaCl saturada + 200ml de  $H_2O$ ), de forma a revelar a estrutura metalográfica (microestrutura) do material base da amostra (cobre), bem como a qualidade da interface material base/revestimento.

Esta análise possibilitou uma visualização geral da estrutura metalográfica dos contatos elétricos confirmando-se, dentre outros, as diferentes durezas medidas dos materiais. A figura 4 mostra dois exemplos de microestrutura dos contatos ensaiados.

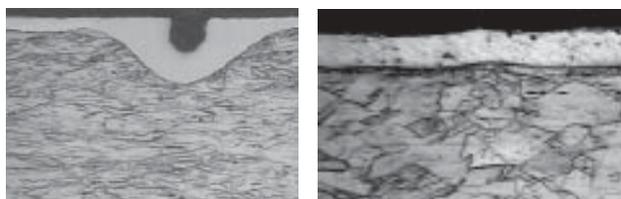


FIGURA 4. Estrutura metalográfica das amostras 1B e 15

**G. Análise por dispersão de energia de raio-x**

Os contatos foram observados em um equipamento analisador por dispersão de energia (EDAX) que, acoplado a um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), permitiu a identificação, de maneira semi-quantitativa, dos elementos químicos presentes nos materiais utilizados em sua confecção, assim como os seus percentuais.

**H. Ensaio de dureza**

Em cada um dos contatos elétricos foram executadas cinco medições de dureza Vickers, conforme a norma ASTM E-384-84.

**I. Medição da camada de prata (revestimento)**

Em cada um dos contatos, foram realizadas dez leituras de espessura da camada de prata, na primeira etapa. Já na segunda etapa, foram realizadas vinte leituras de espessura da camada de prata (dez nos picos e dez nos vales).

A figura 5 mostra a título de exemplo fotos da camada de prata em dois dos contatos ensaiados na primeira e segunda etapas, respectivamente.

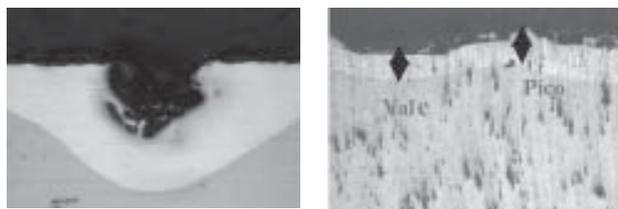


FIGURA 5. Camada de prata das amostras 1B e 15

**IV. RESULTADOS OBTIDOS**

**A. 1ª etapa**

Na etapa 1 foram realizados os ensaios acima descritos num lote de 10 contato, sendo 9 deles recapitados com diferentes características construtivas e 1 contato original.

Foram identificados os contatos que apresentaram melhor desempenho durante as primeiras 1000 operações mecânicas em vazio para serem submetidos às 20 interrupções em curto circuito e mais 1000 operações mecânicas.

Em função dos resultados das medições de resistência de contato, elevação de temperatura e do acompanhamento visual dos contatos foram determinados os de melhor desempenho ao final de todos os ensaios.

A partir das características construtivas destes contatos selecionados, levantadas pelos ensaios metalográficos, foram confeccionados novos contatos para serem ensaiados na etapa 2, seguinte.

Observou-se que os resultados mais elevados tanto de resistência de contato quanto de elevação de temperatura, estiveram relacionados com a existência e com o tipo de recartilhado, bem como, com a camada de prata no que tange a espessura e uniformidade. Os contatos com recartilhado mais acentuado apresentaram melhor desempenho.

Nas figuras 6 e 7 são mostradas as curvas características de resistência de contato e elevação de temperatura dos contatos ensaiados nesta etapa.

**B. 2ª etapa**

A partir dos resultados da 1ª etapa foram recapitados, pela OMG, mais 160 dedos de corrente do contato fixo, 8 tubos de contatos móveis e confeccionados 2 tubos de contatos móveis novos. Foram realizados nestes 10 conjuntos de contatos os mesmos ensaios, na seqüência apresentada na etapa anterior.

Foram selecionados, para os ensaios elétricos, os contatos mais desgastados, como forma de se obter uma garantia de que as características definidas na etapa 1 correspondiam ao desempenho desejado dos contatos.

Em função dos resultados das medições de resistência de contato, elevação de temperatura e do acompanhamento visual dos contatos pode-se confirmar os bom desempenho dos mesmos, inclusive apresentando resultados ligeiramente superiores aos dos originais, o que indica para uma extensão da sua vida útil.

A análise metalográfica confirmou a faixa de valores aceitáveis para as características construtivas que garantem um bom desempenho dos contatos.

Nas figuras 8 e 9 são apresentadas as curvas características de elevação de temperatura e de resistência de contato correspondentes a todos os contatos ensaiados, nesta etapa, antes / após os ensaios de interrupção e 2000 operações mecânicas. Note-se que o contato 1B corresponde ao contato original.

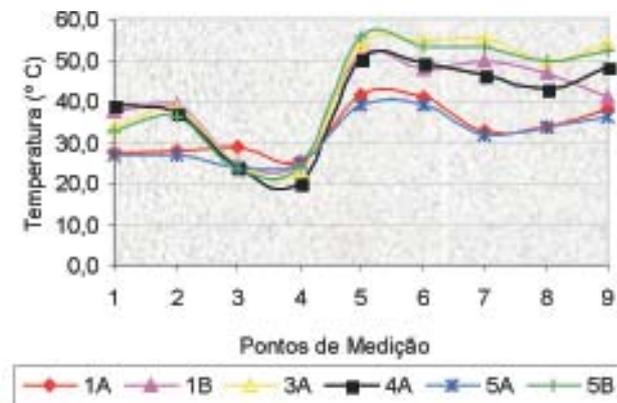


FIGURA 6. Elevação de temperatura contatos da 1ª etapa após 20 interrupções 12 kV/ 25kA e 2000 operações mecânicas

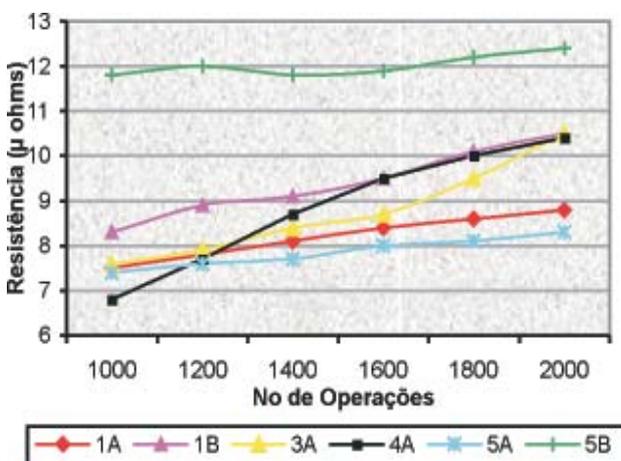


FIGURA 7. Resistência elétrica dos contatos a 1ª etapa após 20 interrupções 12kV/25kA e 2000 operações mecânicas

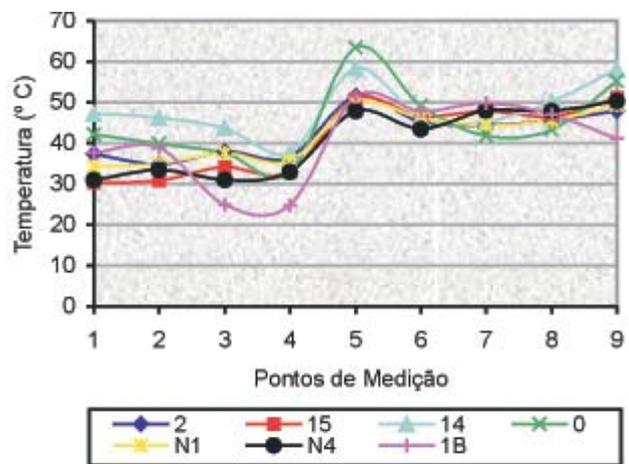


FIGURA 8. Elevação de temperatura contatos da 2ª etapa após 20 interrupções 12 kV/ 25kA e 2000 operações mecânicas

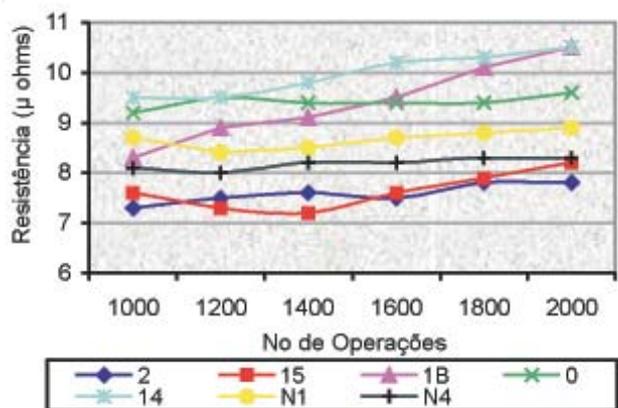


FIGURA 9. Resistência elétrica dos contatos da 2ª etapa após 20 interrupções 12 kV/ 25kA e 2000 operações mecânicas.

**V. CONCLUSÕES**

Ficou comprovado que o desempenho, entre os conjuntos de contatos se deve principalmente à diferença entre as características dos seus projetos, tais como: maior dureza e espessura da camada de prata, tipo de recartilhado e acabamento da superfície de contato próxima à pastilha de extinção de arco (ponta de tungstênio) e que é possível a extensão da vida útil dos disjuntores descontinuados de sua linha de fabricação com a recapitação dos contatos.

O tipo do recartilhado se mostrou como de fundamental importância pois o mesmo promove uma melhor qualidade de contato, tanto quebrando a camada superficial de oxidação quanto aumentando a área efetiva de contato.

Através dos ensaios de interrupção foi verificado, logo na primeira etapa, a deficiência de fabricação dos dedos, o que resultou em uma montagem inadequada e, conseqüentemente, pior desempenho durante estes ensaios, levando a desgastes muito acentuados, além da queima indevida dos contatos de corrente. Esta montagem foi corrigida na segunda etapa, que apresentou resultados compatíveis com os dos contatos importados.

A dureza da prata utilizada no revestimento da área de contato deve manter uma relação de dura e normal entre os contatos, ou seja, a peça mais dispendiosa e comple-

xa deve ser revestida com prata dura ficando o outro contato revestido com prata normal.

Os contatos com melhores desempenhos apresentaram espessura da camada de prata acima de  $60 \pm 10$  micrômetros, uniformemente distribuída.

A metodologia dos ensaios desenvolvida neste projeto mostrou-se adequada e eficaz para os resultados obtidos.

A interação com a indústria nacional leva a uma melhoria da qualidade e da confiabilidade na recapitação de contatos elétricos e a conseqüente redução dos custos dos contatos de reposição. Pela padronização de suas especificações e dos métodos de fabricação / recuperação é possível alcançar uma melhor oferta de serviços gerando uma economia de até 50% dos custos de importação.

Para a garantia de desempenho dos contatos de reposição foi determinada uma metodologia de aferição da qualidade da recuperação através da compactação da camada de prata que serve para o aumento da dureza, bem como para a verificação da sua aderência e dos ensaios metalográficos para verificação da espessura e dureza da camada de prata depositada. A compactação do contato deve ser acompanhada pela inspeção, como forma de se verificar a qualidade do processo de recuperação.

A especificação para a recapitação dos contatos móveis utilizados nos disjuntores a ar comprimido, tipo PK, aplicado nas tensões de 345kV a 800kV deve incluir os seguintes itens:

- Retirada da camada de prata e depósito de nova camada de prata 99,9, com tolerância aceitável de 1,5%.
- A dureza da camada de prata deve-se situar entre 115 e 150 Vickers.
- Espessura mínima aceitável da camada de prata com 50 $\mu$ m, medidos tanto no pico quanto no vale do recartilhado. Assim a camada de prata deve-se situar em  $60 \pm 10\mu$ m de forma a garantir a uniformidade da mesma.
- Recartilhamento após a deposição da camada de prata com passe de 0,5, ângulo da hélice de 45o., profundidade de passe de  $0,25 \pm 0,05$  mm.
- Diâmetro externo do tubo de contato após a deposição de prata e a sua compactação de no mínimo 74,50mm e no máximo 75,20mm, devendo o tubo estar concêntrico.
- Após a finalização do processo de recapitação dos contatos móveis, conforme descrito acima, o contato não deve apresentar deformações, a prata não deve apresentar sinais de descolamento, e o recartilhado embora possa não ser sensível ao toque ainda deve se apresentar bem visível.

A especificação para a recapitação dos dedos de corrente dos contatos fixos, utilizados nos disjuntores a ar comprimido, tipo PK, aplicados nas tensões de 345kV a 800kV deve incluir os seguintes itens:

Dedo em cobre eletrolítico 99,9 (ASTM B187-83), com depósito de prata 99,9 com tolerância aceitável de 1,5%.

Camada de prata com espessura de  $50 \pm 5\mu$ m e dureza da prata situando-se entre 70 e 90 Vickers.

Os dedos devem ser montados na sua base de molas, por meio de 2 rebites garantindo-se o perfeito alinhamento longitudinal entre o dedo e o conjunto de molas.

Para se garantir a qualidade de fabricação dos contatos (tubos móveis e dedos de corrente) deve-se efetuar ensaios metalográficos (dureza, espessura da camada de prata e análise química) em amostra retirada de cada lote e realizar ensaios mecânicos num conjunto de contatos acompanhando-se a evolução da resistência elétrica que deve se situar abaixo dos  $11\mu\Omega$  dentro de um esquema de medição conforme mostrado na figura abaixo.



FIGURA 10. Detalhe da medição da resistência elétrica do contato.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### RELATÓRIOS TÉCNICOS:

- [1] H.C. Furtado, M.V. Gusmão, M. Barreto Relatório Técnico DPP/TEQ 525/97, 1997, Rio de Janeiro.
- [2] H.C. Furtado, J.S. Buarque, E.T. Serra Relatório de ensaio ACME 269/2002, 2002, Rio de Janeiro.
- [3] H.C. Furtado, J.S. Buarque, E.T. Serra Relatório de ensaio ACME 1219/2002, 2002, Rio de Janeiro.
- [4] E.S. Costa, M.J. Pereira, Relatório Técnico no DPP/TEQ 1207/02, 2002, Rio de Janeiro.

### NORMAS:

- [5] High Voltage Alternating-current Circuit-Breakers, International Standard IEC 56/1987.
- [6] Common Specifications for High-Voltage Switchgear and Controlgear Standards. International Standard IEC 694/1996
- [7] Micro Hardness of Materials, American Society for Testing and Materials ASTM E-384-84.
- [8] Standard Specifications for Copper Bus Bar, Rod and Shapes, American Society for Testing and Materials ASTM B-187-83