



GSE/006

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

**GRUPO VIII**  
**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

**RECUPERAÇÃO DA ARGILA PARA REUTILIZAÇÃO NA REGENERAÇÃO DE ÓLEO MINERAL ISOLANTE**

Francisco de Assis Filho (\*)  
CEPEL

Jorge R. Fleming  
CEPEL

Eduardo Torres Serra  
CEPEL

**RESUMO**

Durante o período de operação de um transformador, o óleo é submetido a ação de temperatura, umidade, oxigênio e estresse elétrico. Esta ação dá origem a diversas reações químicas de degradação térmica e oxidação do óleo mineral isolante, com formação de compostos polares indesejáveis ao bom funcionamento do transformador.

Para retirada desses compostos do óleo utiliza-se o processo de regeneração com o uso de adsorventes tais como argila, bauxita ou terra Fuller.

Este trabalho visa apresentar um processo de retirada dos compostos polares adsorvidos na argila e sua reativação, utilizando-se para isso solventes adequados, para que o adsorvente possa vir a ser reutilizado ou descartado sem riscos para o meio ambiente, trazendo com isto ganhos econômicos significativos às empresas.

**PALAVRAS CHAVE:** Argila, Óleo Mineral Isolante, Regeneração do Óleo, Recuperação da Argila

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Durante o período de operação, um transformador é submetido à ação de temperatura, umidade e oxigênio. Esta ação dá origem a reações químicas de degradação térmica e oxidação do óleo mineral isolante. A reação química se processa via radicais livres, produzindo diversos compostos de elevada polaridade, que são indesejáveis ao bom funcionamento do transformador.

Para a retirada desses compostos utiliza-se o processo de regeneração, que consiste em se tratar o óleo mineral isolante com um adsorvente, tipicamente argila, bauxita ou terra Fuller, que adsorvem muito bem compostos polares. São usados os métodos de percolação ou contato. Após o processo de regeneração, o óleo mineral isolante usado apresenta características de óleo novo e pode ser reutilizado no transformador, preferencialmente após aditivação com DBPC.

A argila, bauxita ou terra Fuller, que de agora em diante chamaremos genericamente de argila, após utilizada no processo de regeneração, vem sendo um problema para as empresas do setor elétrico brasileiro, pois é utilizada em grande quantidade durante o processo e não pode, segundo a legislação vigente, ser descartada diretamente no meio ambiente. Ela deve ser armazenada, o que acarreta grandes estoques do produto utilizado, ou descartada como produto químico, trazendo um alto custo às empresas.

Tendo em vista o envolvimento econômico que acarreta este armazenamento e o crescimento do volume, devido a não reutilização da argila, desenvolveu-se um processo de retirada dos compostos polares adsorvidos durante o processo de regeneração, utilizando para isso solventes adequados. A argila regenerada pode assim ser reutilizada no processo, trazendo com isso ganhos econômicos para as empresas do setor.

---

(\*) Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
Caixa Postal 68007 – Rio de Janeiro – RJ – CEP 21944-970  
Tel.: +21 598-6229; Fax: +21 598-6136; E-mail: franc@cepel.br

## 2.0 - LEVANTAMENTO SOBRE O RE-APROVEITAMENTO DA ARGILA

Foi realizado um levantamento, com as principais concessionárias do setor elétrico brasileiro, fabricantes de óleos/distribuidores e algumas empresas do setor privado, que atuam diretamente no tratamento de óleos minerais isolantes, através da regeneração dos mesmos para concessionárias de energia elétrica, com o objetivo de se conhecer com mais profundidade o que essas empresas têm feito com a argila utilizada no processo de regeneração do óleo.

Algumas concessionárias informaram que utilizam o serviço de empresas privadas na regeneração de seus óleos e, por isso, não têm resíduo de argila em seu poder. Outras utilizam o método de regeneração por contato e guardam o resíduo sólido de argila, contaminado com óleo.

Algumas empresas utilizam o método de percolação. Este método utiliza um tipo de argila distinto do utilizado no método de contato. Esta argila é de difícil tratamento e reativação, pois, como apresenta uma alta granulometria (60 – 80 mesh), quando comparada à do método de contato (200 – 400 mesh), e baixa resistência mecânica, tornando-se quebradiça com o tratamento e tem sua granulometria alterada. Neste caso não cabe o tratamento de recuperação, e sim o de descontaminação.

Pelos diversos contatos mantidos com empresas (concessionárias de energia elétrica, ou não) que usam óleo mineral isolante regenerado, nosso sentimento é que a médio prazo, a tendência seja que algumas empresas que utilizam o método de percolação migrem para os métodos desenvolvidos pela FLUIDEX, empresa sediada na África do Sul, de capital americano, ou pela FILTER VAC, canadense. Nesses métodos, conforme dados dos fabricantes, não há “resíduo de argila” e o processo admite diversas regenerações sem a troca da argila, mas este número é variável, pois, depende do volume de óleo do equipamento e principalmente da condição de envelhecimento do óleo no início de tratamento. Até o momento, o que tem inviabilizado a utilização desses métodos no Brasil, pelas empresas que utilizam o método de percolação, é o alto custo do equipamento.

Internacionalmente, conforme informações fornecidas pelo representante brasileiro da NYNAS (Suécia), houve tentativas de recuperação da argila usando solventes, tais como xileno e tolueno, mas o rendimento do processo não passou de 20 %.

Em âmbito internacional, as empresas regeneradoras de óleo utilizam aterros para descarte da argila, pois não existe legislação contrária a esta prática.

Encontram-se diversas referências na literatura sobre regeneração de óleos minerais isolantes, porém quanto a recuperação ou destinação final da argila,

tanto a literatura nacional quanto a internacional, são carentes de informações.

## 3.0 - REGENERAÇÃO DO ÓLEO MINERAL ISOLANTE

Os óleos minerais isolantes usados em equipamentos elétricos são obtidos por processos de refino e extração adequados, a partir de determinadas frações de petróleo cru. Independentemente de sua origem, naftênica ou parafínica, os óleos minerais isolantes são misturas de moléculas de hidrocarbonetos naftênicos, parafínicos e aromáticos. Sua utilização em transformadores visa propiciar rigidez dielétrica adequada ao sistema de isolamento, resfriar os enrolamentos através da transferência do calor neles gerado para o exterior e proteger os enrolamentos e o núcleo das intempéries.

Em contato principalmente com umidade, oxigênio e cobre, e na presença de calor, o óleo mineral isolante se oxida formando, através de reações entre hidrocarbonetos instáveis e oxigênio, hidroperóxidos e peróxidos, os quais se acumulam e dão origem a outros produtos como álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, ácidos, sabões metálicos e água.

Estes contaminantes, inicialmente dissolvidos no óleo, após atingirem uma determinada concentração, precipitam-se na forma de borra, a qual se deposita nos enrolamentos, no núcleo, nas paredes do tanque e em partes mais frias como canais de ventilação do núcleo e bobinas, e aletas, impedindo a passagem do óleo, aumentando a temperatura de operação do transformador e com isso acelerando o processo de envelhecimento com formação de mais borra.

Antes mesmo que ocorra a precipitação da borra, os produtos da oxidação do óleo já estarão atacando a isolamento sólida, composta principalmente de papel kraft, na grande maioria dos transformadores, causando sua degradação mecânica e dielétrica, e produzindo mais água e ácidos. Consequentemente, a vida útil do transformador vai sendo reduzida.

A fim de minimizar os efeitos nocivos destes produtos, deve-se retirá-los antes que se precipitem, recuperando-se assim, as propriedades dielétricas e de transferência de calor do óleo. No entanto, nos casos em que a precipitação já tenha ocorrido, a borra deve ser eliminada o mais rápido possível.

Como ressaltado, o óleo após um certo tempo em serviço adquire condições que o tornam impróprio para continuar em uso. Entretanto, o óleo envelhecido é recuperável e pode ser reutilizado, se os contaminantes forem retirados. Para tanto, deve ser submetido a um processo de recuperação de suas propriedades denominado regeneração.

### 3.1 Processos de Regeneração do Óleo Mineral Isolante

A regeneração de óleo mineral isolante consiste na remoção de contaminantes ácidos, coloidais e produtos

de oxidação, por meios físico-químicos e/ou químicos. Os meios químicos compreendem, entre outros, tratamentos com fosfato trisódico, meta-silicato de sódio ou ácido sulfúrico, seguido por tratamento com adsorventes, dos quais a argila é o mais comumente usado. Os meios físico-químicos incluem adsorção por percolação ou por contato. O óleo deteriorado é posto em contato com um material adsorvente, com elevado poder de reter em sua superfície os contaminantes e os produtos polares da oxidação do óleo.

No processo por contato, bateladas de óleo quente são misturadas com material adsorvente na granulometria de 200 a 400 mesh e agitadas durante certo tempo. Após a decantação, o óleo é filtrado para separá-lo do adsorvente, e o procedimento é repetido, com novo adsorvente, até se atingir o grau desejado de regeneração. A análise do óleo determina seu grau de recuperação, que depende da quantidade de argila utilizada. A quantidade de argila necessária é determinada em laboratório, e por ser um processo em batelada todo óleo é tratado por igual.

No processo de percolação, o óleo passa através de um leito de material adsorvente pela ação da gravidade ou por pressão. Como o processo por gravidade é muito lento, o por pressão é mais largamente empregado. Neste método, coloca-se argila ativada, com granulometria entre 60 e 80 mesh, em tanques cilíndricos, chamados percoladores, e força-se a passagem do óleo por meio de uma bomba, processando-se grandes volumes em tempo relativamente curto. Para que tenha maior poder de adsorção, a argila deve estar seca.

No início o óleo entra em contato com argila ativada nova, em um circuito fechado, e esta vai saturando.

### 3.2 Recuperação do Óleo Mineral Isolante em Transformadores Energizados

Graças as características do processo de percolação por pressão, as máquinas são compactas, podendo-se empregá-las para regenerar óleo mineral isolante, em circuito fechado, conectadas diretamente aos transformadores. Como vantagens adicionais, o método possibilita a limpeza das partes ativas contendo borra depositada e a realização do serviço em campo, e sem interrupção do fornecimento de energia.

Em regime energizado, é necessário promover, simultaneamente, a regeneração do óleo e o seu acondicionamento, que é um processo físico que visa a remoção de água, gases dissolvidos e materiais sólidos em suspensão. Este processo inclui filtração, centrifugação e desidratação a vácuo. Realiza-se, enfim, o tratamento do óleo, propriamente dito, que compreende justamente os processos de regeneração e acondicionamento.

## 4.0 - PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1 Parte 1

Neste trabalho, foi utilizado o processo de regeneração do óleo mineral isolante por contato com argila. A argila utilizada foi cedida pela Companhia de Eletricidade de São Paulo, como cortesia, e apresentava a seguinte composição química nominal, conforme certificado n.º. 433265, fornecido pela Extrativa de Argila Taubaté Ltda:

• Anidrido Silícico (SiO <sub>2</sub> )	52,6%
• Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20,5%
• Óxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10,4%
• Óxido de Titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,86%
• Óxido de Cálcio (CaO)	1,52%
• Óxido de Magnésio (MgO)	0,26%
• Óxido de Sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,25%
• Óxido de Potássio (K <sub>2</sub> O)	4,20%
• Perda ao fogo	7,96%

O óleo mineral isolante envelhecido utilizado foi retirado de um transformador em operação, e apresentava tensão interfacial de 17 mN/m e densidade de 0,8644 a 25°C.

Foi utilizada nas regenerações a proporção de 1% do peso de óleo em argila, pelo método de contato.

O ensaio de tensão interfacial do óleo, conforme norma "NBR 6234 – Método de Ensaio para a Determinação de Tensão Interfacial de Óleo- Água", foi o parâmetro adotado como controle da eficiência da regeneração de óleos usados, e de acompanhamento do desempenho do adsorvente.

A determinação do teor de carbono foi adotado como o parâmetro mais adequado para avaliação do nível de contaminação da argila, bem como do seu nível de descontaminação, já que os contaminantes são compostos de carbono provenientes do envelhecimento do óleo mineral isolante. Este ensaio foi realizado utilizando-se procedimento específico desenvolvido pelo CEPEL.

A mistura de solventes escolhida, dentre as possíveis, para realização deste trabalho, foi a composta pela mistura de 60% de clorofórmio, 30% de metanol e 10% de água em volume.

Dada a incerteza sobre a possibilidade de sucesso no processo de descontaminação e recuperação da argila, foram realizadas limpezas prévias da argila com pentano, para a remoção do óleo residual presente, resultante da regeneração do óleo mineral isolante. A remoção do óleo residual da argila constitui uma etapa anterior à remoção dos compostos polares adsorvidos e viabiliza a determinação do teor de carbono proveniente apenas dos produtos polares na mesma.

#### 4.1.1 Regeneração do óleo mineral isolante por contato

O procedimento adotado para regeneração do óleo envelhecido, foi similar ao utilizado em campo, sendo composto das seguintes etapas:

- Secagem da argila, em estufa por 24 horas, à temperatura de  $(100 \pm 2)$  °C;
- Tratamento do óleo usado, com baixa tensão interfacial, com argila seca na proporção de 1% em peso;
- Contato entre argila e óleo através de agitação mecânica durante 1 hora à temperatura ambiente;
- Filtração do óleo através de um filtro de vidro sinterizado com porosidade 40–60  $\mu\text{m}$ ;
- Retirada da argila retida no filtro;
- Repetição do procedimento até obter o valor de tensão interfacial desejado para o óleo.

#### 4.1.2 Extração do Óleo Mineral Isolante Impregnado na Argila

A extração do óleo residual na argila foi efetuada percolando-se pentano na argila, em uma coluna de vidro, até a sua completa retirada. A argila isenta de óleo foi seca à 100° C por 24 horas e o teor de carbono presente determinado.

#### 4.1.3 Extração dos Compostos Polares da Argila

A argila sem o óleo residual, porém ainda contendo compostos polares, foi recuperada através da extração destes compostos, em um funil de vidro sinterizado, utilizando-se a mistura de clorofórmio (60%), metanol (30%), e água (10%). A argila isenta de produtos polares foi reativada em estufa à 100°C por 24 horas e o teor de carbono presente determinado.

#### 4.1.4 Resultados e avaliação preliminar

A Tabela 1 apresenta os teores de carbono determinados na argila nova, na argila após extração de óleo com pentano, e na argila após extração de compostos polares com a mistura de solventes.

TABELA 1 – Resultados preliminares da possibilidade de descontaminação da argila

Identificação da Argila	Teor de Carbono (%)
Nova (A1)	0,32
Contaminada com produtos polares e com óleo residual (A2)	25
Contaminada com produtos polares e isenta de óleo	8
Isenta de produtos polares e de óleo (A3)	0,86

A argila após a reativação foi avaliada quanto a sua capacidade de regeneração de um óleo com baixa tensão interfacial. Duas alíquotas de uma mesma amostra de óleo com tensão interfacial de 17 mN/m foram submetidas a um tratamento de regeneração, respectivamente, com 2% em peso de argila nova e com 2% em peso de argila recuperada e reativada conforme descrito no item 4.1.3. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 2 – Tensão interfacial do óleo após um primeiro contato com as argilas nova e reativada.

Tipo de Argila	Teor de Argila no Óleo (% p/p)	Tensão Interfacial (mN/m)
Nova	2	21
Recuperada e reativada	2	23

Os resultados obtidos nas avaliações preliminares e apresentados nas Tabelas 1 e 2 indicam que o pentano é eficaz na remoção do excesso de óleo na argila e que a mistura de solventes (clorofórmio, metanol e água) é capaz de promover a recuperação através da remoção dos compostos polares.

## 4.2 – Parte 2

Nesta etapa passou-se a utilizar apenas a mistura de solventes para a recuperação e reativação da argila, inclusive na substituição do pentano para remoção do excesso de óleo impregnado na argila.

#### 4.2.1 Avaliação da Eficiência de Recuperação e Reativação da Argila

A argila na condição A3 (vide Tabela 1) foi reutilizada na regeneração de um óleo mineral envelhecido, comparativamente com uma argila nova (A1).

Utilizou-se um óleo mineral envelhecido com tensão interfacial de 17 mN/m e adotou-se o valor de tensão interfacial mínimo de 40 mN/m como indicativo de término do processo.

O procedimento de regeneração do óleo mineral isolante foi o descrito no item 4.1.1, em quatro etapas, sendo que na última utilizou-se 2% em peso de argila. A cada etapa utilizava-se novas porções de argilas A1 e A3.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados obtidos, com base na determinação da tensão interfacial do óleo, após cada etapa da regeneração.

TABELA 3 – Tensão interfacial do óleo após cada etapa da regeneração

Nº de contatos do óleo com a argila	Tensão Interfacial (mN/m)		Teor de argila no óleo (%)
	A1	A3	
1	25	24	1
2	31	29	1
3	36	34	1
4	44	42	2

#### 4.2.2 Avaliação da Capacidade de Reativação Continuada da Argila

Procurou-se verificar se a reativação continuada da argila não degeneraria a sua capacidade de regeneração do óleo mineral isolante. Para tanto, uma argila na condição A3 foi reativada diversas vezes durante o processo de regeneração de um óleo mineral envelhecido possuindo tensão interfacial de 17 mN/m. O processo foi interrompido ao se atingir uma tensão interfacial superior a 40 mN/m.

Cabe enfatizar que a mesma argila era empregada na etapa seguinte da regeneração do mesmo óleo. Ao longo dos diversos processos de reativação observou-se uma tendência à aglomeração da argila, obrigando uma pequena ação mecânica de desagregação dos grãos.

A Tabela 4 apresenta os resultados da capacidade de reutilização da argila após várias reativações, com base nas determinações do teor de carbono na argila e da tensão interfacial do óleo regenerado em cada etapa.

TABELA 4 – Avaliação da capacidade de reativação da argila, utilizando-se sempre o óleo regenerado na etapa anterior

Nº de reativações da argila	% Carbono na argila	TI do óleo (mN/m)
1	0,96	24
2	0,78	30
3	0,66	35
4	0,62	37
5	0,54	41

Na Tabela 5 encontram-se os resultados de tensão interfacial de um óleo mineral envelhecido em laboratório, com tensão interfacial de 16 mN/m, após a regeneração com as argilas reativadas. Cabe ressaltar que nesta fase, para testar a eficiência da argila reativada, regenerou-se sempre uma nova porção do óleo com tensão interfacial de 16 mN/m. O percentual de carbono nas argilas corresponde ao valor presente nelas após cada reativação.

TABELA 5 - Avaliação da capacidade de reativação da argila, utilizando-se sempre o óleo envelhecido inicial com tensão interfacial de 16 mN/m

Nº de reativações da argila	% Carbono na argila	TI do óleo (mN/m)
1	0,83	32
2	0,60	34
3	0,57	34
4	0,48	35

## 5.0 - DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nas avaliações preliminares e apresentados nas Tabelas 1 e 2 indicam que o pentano é eficaz na remoção do excesso de óleo na argila, e que a mistura de solventes (clorofórmio, metanol e água) é capaz de promover a reativação através da remoção dos compostos polares. O parâmetro utilizado para esta verificação foi o teor final de carbono na argila, o qual foi reduzido para 0,86 % após a lavagem da argila com a mistura de solventes.

Na Tabela 3 pode-se observar que a argila na condição A3, submetida a etapa de extração dos compostos polares, comportou-se de forma semelhante à argila na condição A1 (nova).

A capacidade de serem efetuadas reativações continuadas da argila foi comprovada pelos resultados indicados na Tabela 4 e 5, ressaltada a observação referente a necessidade de pequena ação mecânica para desagregação dos grãos da argila, a partir da 4ª reativação.

## 6.0 - CONCLUSÕES

O processo desenvolvido em escala laboratorial mostrou que é possível a recuperação e reativação da argila utilizada na regeneração, pelo método de contato, do óleo mineral isolante envelhecido.

O processo utiliza um número reduzido de solventes, facilitando a sua aplicação em condições reais de operação.

## 7.0 - RECOMENDAÇÕES

Elaborar o lay-out de uma instalação piloto para verificação da viabilidade econômica do processo.

## 8.0 - REFERÊNCIAS CONSULTADAS

(1) SAMPAIO, G. E., FILHO, JORGE F. e ARAUJO, A. N.de, Regeneração experimental de óleo mineral isolante; Reunião sobre ensaios físico-químicos SCM/GCOI, outubro 1981.

(2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Guia para acompanhamento de óleo mineral isolante de equipamentos elétricos – Procedimento – NBR 10576 - Brasil

(3) COMISSÃO DE ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS. Avaliação de problemas de fator de perdas em óleos minerais isolantes. Ata da 5<sup>o</sup> Reunião da subcomissão. São Paulo, 22 de setembro de 1994.

(4) MILASCH, M. Manutenção de transformadores em líquido isolante; São Paulo: Edgard Blücher, 1984, 353p.

(5) COMISSÃO DE ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS. Avaliação de problemas de fator de perdas em óleo mineral isolante naftênico de transformadores de potência. Relatório Técnico CFQ/SCM 025, Novembro de 1996.

(6) MYERS, S.D., The transformer consultants. Fluidex. Disponível na INTERNET via [www.sdmyers.com/fluidex/fluidex.shtml](http://www.sdmyers.com/fluidex/fluidex.shtml). Arquivo consultado em 2000.

#### AGRADECIMENTO

O trabalho contou com a participação do Químico José Barros Fernandez, durante o período em que o mesmo era funcionário do CEPEL