

# Disrupção de dieléctricos líquidos

HERMÍNIO DUARTE-RAMOS

Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.)  
Diplom-Ingenieur (TU Hannover)  
Assistente da U.L. (Angola)

## 1 — INTRODUÇÃO

De entre os materiais isolantes (sólidos, líquidos e gasosos) os dieléctricos líquidos são os que nos dias correntes apresentam maiores dificuldades de interpretação do ponto de vista de isolamento eléctrico. A sua aplicação nos equipamentos de alta tensão, em especial nos transformadores, condensadores, disjuntores e cabos subterrâneos, oferece inúmeras vantagens tecnológicas, reveladas importantes através da experimentação, pois além das suas funções isolantes permitem o benefício de outras propriedades, tais como arrefecimento, impregnação, etc.

O processo de disrupção de dieléctricos líquidos encontra-se ainda deficientemente esclarecido mas conhece-se a influência de vários factores, principalmente da humidade, gases dissolvidos e filamentos, que ajudam a interpretar o fenómeno de disrupção.

Das teorias explicativas da disrupção e das relações genéricas entre as grandezas que a caracterizam efectua-se uma breve síntese, nos termos em que se expôs na cadeira «Tecnologia dos Materiais Eléctricos I» no ano lectivo 1971/72 ao curso de engenharia electrotécnica da Universidade de Luanda.

## 2 — CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DOS ISOLANTES LÍQUIDOS

Nas instalações de alta tensão usam-se dieléctricos líquidos, com vista a preencherem-se as funções fundamentais seguintes: isolamento eléctrico entre órgãos metálicos (nos transformadores entre os condutores dos enrolamentos e o respectivo núcleo magnético); impregnação de outros materiais isolantes (papel em cabos, condensadores e transformadores); arrefecimento por evacuação forçada do calor de Joule libertado nos condutores (circulação de óleo em cabos de potência) ou por convecção (em cuvas de transformadores de potência); apagamento de arcos eléctricos (nos disjuntores de grande e pequeno volume de óleo); dieléctrico com elevada permitividade para elevar a capacidade (em condensadores); meio ambiente de imersão de provetes de ensaio com vista a eliminar descargas superficiais perturbadoras (como acontece no estudo de descargas parciais em cavidades de dieléctricos sólidos).

Os isolantes líquidos de maior interesse tecnológico são os óleos minerais, constituídos pela mistura de hidrocarbonetos saturados e insaturados derivados da destilação fraccionada do petróleo bruto, e os óleos sintéticos.

Os *óleos minerais* hoje utilizados na electrotecnia são formados por 50 % a 60 % de compostos parafínicos, 20 % a 30 % naftínicos, 5 % a 20 % aromáticos e 1 % olefínicos. Antigamente os óleos minerais tinham uma percentagem de compostos naftínicos muito menor (por isso se diziam óleos de base parafínica). Os óleos minerais moder-

namente usados, de base naftínica, apresentam contudo a vantagem de não cristalizarem à temperatura de serviço. Os componentes aromáticos funcionam como inibidores, evitando o envelhecimento dos óleos por oxidação ou radiação, e elevam a rigidez dieléctrica dos gases dissolvidos.

Os *óleos sintéticos* (askarel, clofeno, pyranol) são compostos orgânicos de cloro ou misturas desses compostos, tendo sido desenvolvidos em virtude dos principais inconvenientes dos óleos minerais: envelhecimento, inflamabilidade, reduzida permitividade. Sendo os átomos de cloro fortemente polarizáveis, o máximo das perdas de polarização dos óleos sintéticos é superior ao correspondente valor dos óleos minerais, constatando-se além disso esse máximo para temperaturas mais altas (de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $-30^{\circ}\text{C}$ , enquanto nos óleos minerais se encontra abaixo de  $-40^{\circ}\text{C}$ ).

Ambos os tipos de óleo permitem ajustar a viscosidade a um valor conveniente: os óleos de baixa viscosidade são favoráveis como líquido de arrefecimento e meio de impregnação em condensadores; com elevada viscosidade usam-se na impregnação do papel isolante em cabos eléctricos, constituindo uma massa que permite a montagem dos cabos em planos muito inclinados dada a atenuação do perigo de escoamento do óleo.

Comparando as propriedades dos dois tipos de óleos no que respeita a inflamabilidade, os óleos minerais são inflamáveis, exigindo precauções especiais nas aplicações onde haja o perigo de propagação de incêndios a outros equipamentos (daí as fossas de escoamento de óleo dos transformadores de potência e as divisórias das respectivas células), e os óleos sintéticos são inflamáveis pelo que se preferem em instalações onde a ocorrência de incêndios constitua grave perigo (teatros, minas, refinarias de petróleo, etc.).

As vantagens dos óleos sintéticos sobre os minerais têm a contrapartida do preço, pois para um mesmo volume o custo é da ordem de seis vezes superior.

### 3 — TEORIAS DE DISRUPÇÃO

Tem-se procurado encontrar uma explicação para o fenómeno de disrupção de dieléctricos líquidos mas não existe qualquer teoria inteiramente satisfatória. Uma concepção em geral aceite considera o aquecimento local do meio líquido pela formação de pontes de impurezas [1], mas ainda se admite a causa nos gases dissolvidos [2] ou, finalmente, nos micro-espacos da estrutura da matéria líquida.

#### 3.1 — TEORIA DAS PONTES DE FILAMENTOS (TEORIA TÉRMICA LOCAL)

Os isolantes líquidos «técnicamente puros» contêm sempre impurezas constituídas por diminutos filamentos, com uma permitividade da ordem de 2 a 6, e por gotinhas de água cuja permitividade é de 80. Acontece que esses filamentos absorvem a água pelo que a sua permitividade se torna muito mais elevada.

Aplicando um campo eléctrico ao isolante os filamentos manifestam-se como dipolos, sujeitos a forças muito elevadas. Se o campo eléctrico é uniforme dá-se simplesmente uma orientação desses dipolos. Mas se o campo aplicado é inuniforme as partículas das impurezas são removidas para a região onde o campo é mais intenso, segundo a distribuição das linhas de força, ficando umas ao lado das outras de acordo com as polaridades das respectivas extremidades. Formam-se assim filamentos mais longos que constituem as chamadas pontes de filamentos entre os eléctrodos.

Como consequência, no seio do líquido estabelecem-se canais condutores cujo calor de Joule aquece o líquido localmente (por isso também se designa esta teoria por disrupção térmica local); a humidade presente vaporiza-se dando origem a bolhas nas quais se desencadeiam descargas eléctricas como acontece nos ambientes gasosos seguindo-se a decomposição local do líquido em gases que limitam a rigidez dieléctrica do meio.

Baseado neste pensamento procurou-se melhorar a rigidez dieléctrica dos isolantes líquidos impedindo a formação destas pontes de filamentos. Daí o aparecimento de dieléctricos com papel impregnado em óleo (em cabos, condensadores, transformadores) e o uso de cartão (sobretudo em transformadores de potência) como barreiras à deslocação das impurezas para as regiões de concentração das linhas de força da distribuição do campo eléctrico. De facto a teoria descrita permite facilmente conceber uma uniformização do campo no dieléctrico líquido através dessas barreiras.

#### 3.2 — TEORIA DOS GASES ENCOBERTOS (TEORIA PURAMENTE ELÉCTRICA)

Na base da teoria puramente eléctrica de disrupção supõe-se que existem sempre partículas electrizadas (iões, electrões) disseminadas no seio dos líquidos. Aplicando um campo eléctrico as  $N$  partículas por unidade de volume, de carga eléctrica  $q$  e velocidade de deriva  $v$ , constituem uma densidade de corrente  $J=Nqv$ ; sendo a mobilidade das partículas  $b$  sob a acção do campo eléctrico de intensidade,  $E$  a velocidade de deriva resulta  $v=bE$  pelo que  $J=NqbE$ .

Esta dependência entre a densidade de corrente eléctrica e a intensidade do campo eléctrico é linear (lei d'Ohm) só até um certo valor de  $E$ ; acima deste limite, função do tipo de líquido e da sua pureza, a subida da densidade de corrente é exponencial.

Esse aumento da concentração de portadores de carga eléctrica só se pode conceber por uma ionização por colisões. Mas dada a reduzida velocidade das partículas ionizadas do próprio líquido não se compreende que uma ionização dos átomos do líquido por colisões possa originar a subida da densidade de corrente. Resta admitir que a ionização é do tipo de avalanchas desencadeadas nas bolhas de gases no seio do líquido.

Para provar esta teoria, também designada de disrupção gasosa encoberta, estudou-se a variação da rigidez dieléctrica de isolantes líquidos com ga-

ses dissolvidos, tendo-se concluído que a tensão de disrupção é independente da quantidade de gás dissolvido mas depende essencialmente do tipo de gás, sendo a tensão de disrupção tanto mais elevada quanto maior for a energia de ionização do gás. Reduzindo a dissolução de gás a tensão de disrupção decresce. A experiência mostra uma dependência praticamente linear da tensão de disrupção com a pressão (num óleo de transformador o valor de  $U_d$  a 380 Torr é cerca de metade do valor a 760 Torr).

Neste contexto porém não se explica a disrupção de líquidos desgaseificados, em que a tensão de disrupção é independente da pressão.

### 3.3 — TEORIA DAS MICROCAVIDADES

Perante a impossibilidade de explicar o mecanismo da disrupção de líquidos desgaseificados e dada a aparente analogia com a disrupção de gases revela-se hoje aceitável a existência de microcavidades entre moléculas da fase líquida, onde se desenvolvem descargas parciais semelhantes às que se manifestam nos corpos sólidos contendo poros preenchidos com gases. A hipótese exige ainda um vasto trabalho de investigação, que aliás se encontra na base da unificação das diferentes interpretações do fenómeno de disrupção em qualquer estado da matéria.

### 4 — ENSAIO DE DIELECTRICOS LÍQUIDOS

A tensão de disrupção dos isolantes líquidos, em particular dos óleos minerais, depende de vários factores: forma dos eléctrodos, distância entre eléctrodos, tipo de tensão, taxa de variação da tensão aplicada, temperatura, pressão, humidade, etc. Por isso se torna muito delicada a comparação das propriedades dieléctricas de diferentes materiais pois os resultados obtidos pela experimentação só terão significado relativo se os ensaios se realizam exactamente nas mesmas condições.

As normas alemãs (VDE 0370) prescrevem um tipo de ensaio com eléctrodos de cobre de forma bem caracterizada (fig. 1a) afastados 2,5 mm no eixo comum. O recipiente deve conter mais de 0,25 litro do óleo a ensaiar, à temperatura de 20°C e os eléctrodos devem estar afastados pelo menos de 15 mm das paredes do vaso e no mínimo 8 mm da superfície livre do líquido. A tensão de ensaio é alternada, sinusoidal, 50 Hz, elevando-se o seu valor à taxa de 0,2 kV/s desde zero até à disrupção do óleo. Com o mesmo provete efectua-se seis medições do valor eficaz da tensão a que se dá a disrupção em seis ensaios sucessivamente intervalados entre si de um tempo aproximado de 2 minutos. Entre dois ensaios consecutivos deve-se agitar o óleo a fim de facilitar a libertação de bolhas gasosas no seio do líquido. A primeira medida não se considera e toma-se como tensão de disrupção  $U_d$  do líquido a média aritmética das restantes cinco leituras, valor designado *tensão de disrupção VDE*.

Dada a configuração dos eléctrodos escolhidos o coeficiente de Schwaiger, relativo à inuniformi-

dade do campo eléctrico entre os eléctrodos, assume o valor  $\eta=0,97$  e para uma distância disruptiva  $d=0,25$  cm a rigidez dieléctrica do isolante líquido  $E_d = U_d / d$ , resulta  $E_d = 4,12 U_d$ , expressa em kV cm<sup>-1</sup> se a tensão de disrupção se exprime em quilovolts. Aproximadamente a intensidade do campo de disrupção nas unidades indicadas é portanto quádruplo da tensão de disrupção.

Se se usar uma distância disruptiva diferente da normalizada deverá converter-se a tensão de disrupção ao valor para 2,5 mm. Entre 2 mm e 3 mm o campo eléctrico de disrupção pouco depende da distância disruptiva (fig. 1b)

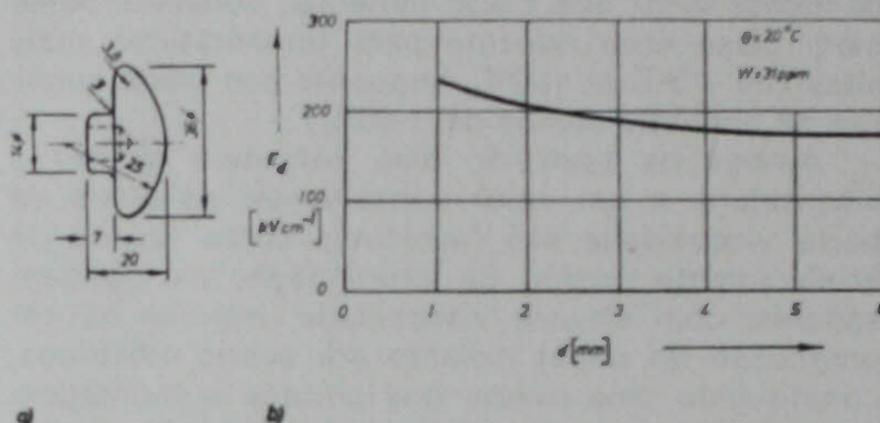


Fig. 1 — Ensaio da rigidez dieléctrica de isolantes líquidos  
a) Calote VDE  
b) Rigidez dieléctrica de um óleo de transformador em função da distância disruptiva

### 5 — EFEITO DE CLARK

Quando se efectua uma série de ensaios de disrupção com o mesmo isolante líquido as medidas definem uma dispersão considerável, tanto maior quanto mais impurezas o óleo contém. Todavia revela-se que as sucessivas tensões de disrupção são decrescentes até um certo tempo e depois crescem sem que atinjam os valores iniciais (fig. 2).

Este efeito, descrito pela primeira vez por Clark [3], interpreta-se pela dissolução de gases. Sob a acção do campo eléctrico aplicado dão-se fenómenos de ionização que originam a separação dos gases dissolvidos e a decomposição do óleo, existindo hidrogénio em elevada proporção juntamente com algumas moléculas de hidrocarbonetos. Estas minimoléculas de carbono têm uma energia de ionização apreciavelmente inferior à do hidrogénio ( $H_2$ : 15,6 eV;  $C_2H_2$ : 11,6 eV;  $C_2H_4$ : 12,2 eV;  $C_6H_6$ : 9,6 eV) baixando por conseguinte a tensão de disrupção do líquido. Como porém os hidrocarbonetos se dissolvem muito melhor nos óleos do que o hidrogénio as sucessivas disrupções ao longo do tempo provocam a introdução de hidrogénio nas microcavidades do isolante líquido, dando-se de novo a subida dos valores da tensão de disrupção porquanto o hidrogénio tem uma energia de ionização superior o que dificulta a disrupção.

O pensamento esboçado indica que as primeiras medidas numa série de disrupções são representativas da rigidez dieléctrica do isolante líquido, devendo no entanto esperar-se que se reestabeleça o equilíbrio da concentração gasosa nas microcavidades da fase líquida (no exemplo da fig. 2 deverá esperar-se pelo menos quatro minutos entre duas disrupções consecutivas).

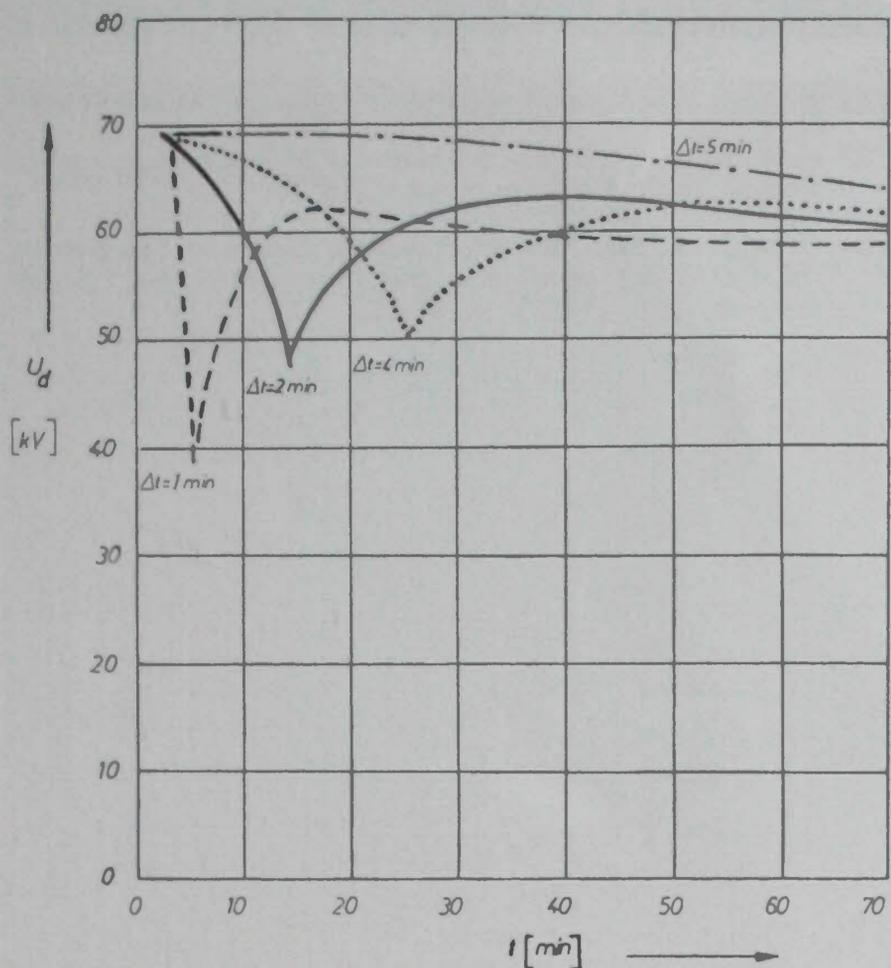


Fig. 2 — Tensão de ruptura de um óleo de transformador desgaseificado (à pressão de 0,1 Torr) em função do tempo (distância disruptiva 2 mm; eléctrodos VDE).

## 6 — INFLUÊNCIA DA HUMIDADE E DA TEMPERATURA NA DISRUPÇÃO DE LÍQUIDOS

A absorção de água pelos isolantes líquidos realiza-se por difusão. Entre dois meios contíguos de diferentes concentrações de humidade verifica-se sempre um transporte de humidade até que se dê o equilíbrio termodinâmico da concentração de água, isto é, quando a humidade relativa é igual nos dois meios (humidade relativa é a relação entre a água contida num líquido e a máxima quantidade de água dissolúvel nesse líquido). É costume exprimir a quantidade de água  $w$  contida num líquido em partes por milhão (e indica-se por ppm).

Mas a partir de determinada quantidade de água dissolvida num líquido, para uma dada temperatura não é possível dissolver mais água formando-se pequenas gotas (de diâmetro 1 a 10  $\mu\text{m}$ ) que permanecem emulsionadas no líquido, depositando-se no fundo do recipiente ou à superfície do líquido durante o tempo de repouso de acordo com a densidade do líquido.

Observa-se que o valor da máxima quantidade de água  $w_0$  que é possível dissolver num líquido é tanto maior quanto mais elevada for a temperatura numa relação exponencial do tipo  $w_0 = a \cdot \exp(-b/T)$ , onde  $a$  e  $b$  são constantes do líquido e  $T$  a temperatura absoluta (fig. 3).

A uma temperatura constante a tensão de ruptura decresce com a quantidade de água dissolvida mas uma vez atingida a saturação verifica-se que o valor da tensão de ruptura permanece constante (fig. 4).

Traçando várias curvas para diferentes temperaturas é possível obter funções  $U_d(\varnothing)$  com  $w = \text{const.}$ , obtendo-se a mesma informação de

$U_d(w)$  com  $\varnothing = \text{const.}$  mas em que se representa a influência da temperatura  $\varnothing$  sobre a tensão de ruptura: quanto maior esta for, para igual concentração de humidade, maior é a tensão de ruptura, tendendo no entanto as curvas para um limite aproximadamente comum a altas temperaturas.

## 7 — CONCLUSÕES

Destas considerações genéricas ressalta que o problema da ruptura de dieléctricos líquidos é de discussão actual, encontrando-se na realidade debruçado sobre ele enorme pléiade de investigadores com vista ao conhecimento do comportamento dos isolantes líquidos sob tensões contínua, sinusoidal e de choque para diferentes temperaturas e pressões e com distintos graus de humidade e de pureza.

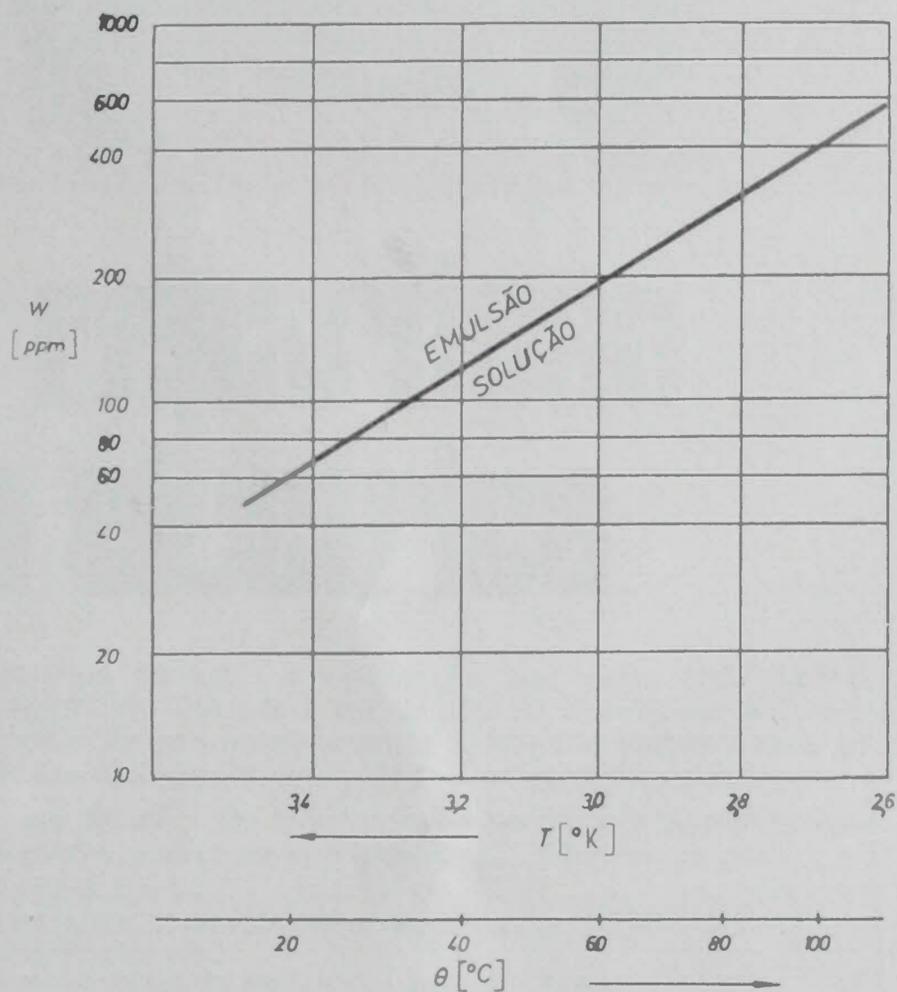


Fig. 3 — Variação da máxima quantidade de água dissolúvel num líquido  $w_0$  em função da temperatura

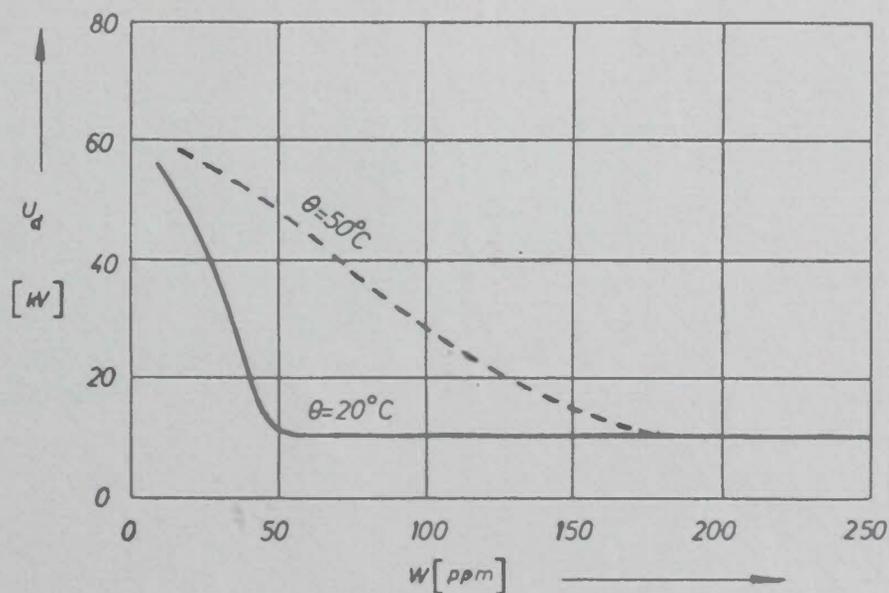


Fig. 4 — Variação da tensão de ruptura de um óleo de transformador com o conteúdo de humidade  $w$  e em função da temperatura  $\theta$  ( $d = 2 \text{ mm}$ ).

Os resultados experimentais apresentam em geral uma enorme faixa de dispersão, tornando por vezes difícil a determinação de leis gerais. No entanto certos fenómenos já se encontram detectados, como no caso do efeito de Clark ou ainda a formação de cera altamente prejudicial, e a influência da humidade nas propriedades dieléctricas já se entende com clareza.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Roth: *Hochspannungstechnik*; Springer, Wien (1965).
- [2] J. A. Kork: *Electrical Breakdown of Insulating Liquids*; Philips Tech. Lib., Eindhoven (1961).
- [3] F. M. Clark: *The Role of Dissolved Gases in Determining the Behaviour of Mineral Oils*; Journal of the Franklin Institute 215 (1933) p. 39-67.