

Impl. 15.10.92

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

*Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por José A. D. Rossi e aprovada pela Comissão Julgadora em dezembro de 1987.*

*04/07/88  
Yoshiaki Doi*

ANÁLISE DO MÉTODO DE ACRÉSCIMO E DECRÉSCIMO  
PARA ENSAIOS DE IMPULSO : SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E SUA COMPARAÇÃO COM ENSAIOS EM "GAPS" DO TIPO HASTE-HASTE.

POR

JOSÉ ANTONIO DONIZETE ROSSI

ORIENTADOR : DR. IOSHIAKI DOI

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Dez. 1987

BIBLIOTECA CENTRAL

Campinas, Sp, Brasil

À ANICLEIDE, aos meus pais  
LINA e MÁRIO, a minha irmã  
LEDA.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos às pessoas que direta ou indiretamente me auxiliaram neste trabalho, em especial ao Dr. IOSHIAKI DOI pelo incentivo e dedicada orientação, ao Pissolato pelo incentivo e discussões, Flávio, Roberto Shimoda, Roberto Bresil e Narci pelo apoio na parte experimental, Ana, Warley, Eliana e Brito pelo trabalho datilográfico, Marcos e Agnaldo pelos desenhos, e aos colegas da FEE e TELEBRÁS.

Agradeço também à chefia da Gerência de Rêdes do CPqD - Telebrás nas pessoas de J. Henrique, Marison, Frederico e Célio pelo apoio prestado.

Lembro ainda que esta pesquisa foi em parte financiada pelo CNPq.

## RESUMO

É realizada uma análise do método do acréscimo e decréscimo utilizado em ensaios de impulso na determinação da tensão disruptiva crítica V50% de elementos isolantes auto recuperáveis.

A análise é feita pela comparação dos resultados de V50% e do desvio padrão  $\sigma$  obtidos por simulação computacional do método de acréscimo e decréscimo conforme a NBR 5389/81 e de resultados de ensaios em sistemas de eletrodos do tipo haste-haste e haste-placa efetuados conforme a NBR 5389/81, tendo como parâmetros o número de aplicações de tensão (N), o degrau de tensão (d) e a tensão inicial (Vi) utilizados nos cálculos e ensaios.

Os resultados mostram que os parâmetros N, d e Vi apresentam uma grande influência nos valores de V50% e  $\sigma$  e que estes parâmetros estão fortemente inter-relacionados um com o outro. Ou seja, por exemplo, que para um dado N, existem valores bem definidos de d e Vi que levam a resultados satisfatórios de V50% e vice-versa.

Por outro lado, os resultados obtidos tanto em simulações quanto em ensaios mostraram valores de dispersão do desvio padrão  $\sigma$ , relativamente elevados, o que vem a concordar com inúmeros trabalhos existentes sobre o assunto, de que o método de acréscimo e decréscimo permite uma determinação satisfatória da tensão de V50% porém não é adequado para o cálculo do desvio padrão  $\sigma$ .

## ABSTRACT

It is realized an analysis of the up-and-down method used in impulse tests to determine the critical flashover voltage  $V_{50\%}$  in self-restoring insulations .

The analysis is made by comparing the results of  $V_{50\%}$  and the standard deviation  $\sigma$  , obtained by computational simulation of the up-and-down method according to the NBR-5389/81 standard and tests results in rod-rod and rod-plane electrodes systems. These tests have also been performed according to the NBR-5389/81 standard , having by the parameters the number of impulse applications (N) , the voltage step (d) and the initial voltage ( $V_i$ ).

The results indicate that the parameters N,d, $V_i$  have a great influence in the  $V_{50\%}$  and  $\sigma$  values and that also have a great inter-relation within them. That means for instance , to a given N, exist well definite values of d and  $V_i$  that should carry to a satisfactory results of  $V_{50\%}$  and vice-versa.

On the other hand the results obtained in simulations and tests show high values of dispersion of standard deviation wich agrees with many existents works on the subject as well the up-and-down method allow a satisfactory determination of the  $V_{50\%}$  voltage , but is not appropriate for the standard deviation calculation.

## INDICE

	Pág.
CAPÍTULO 1	- INTRODUÇÃO ..... 01
CAPÍTULO 2	- ASPECTOS TEÓRICOS ..... 05
2.1	- Coordenação de Isolamento ..... 05
2.2	- Avaliação Estatística na Aplicação de Tensões Impulsivas ..... 09
2.3	- Distribuição Gaussiana ou Normal ..... 10
2.4	- Métodos de Ensaio ..... 15
2.4.1	- Método de Acréscimo e Decréscimo ..... 16
2.4.2	- Método de Acréscimo e Decréscimo segundo a NBR-5389/81 ..... 16
2.4.3	- Método de Acréscimo e Decréscimo de DIXON ..... 17
2.4.4	- Método de Acréscimo e Decréscimo Modificados ..... 21
CAPÍTULO 3	- SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ..... 23
3.1	- Introdução ..... 23
3.2	- Princípio Básico ..... 23
3.3	- Simulação do Método do Acréscimo e De-

	Pág.
créscimo .....	26
3.4 - Programa Principal e Subrotinas.....	28
CAPÍTULO 4 - PARTE EXPERIMENTAL .....	30
4.1 - Introdução .....	30
4.2 - Arranjo Experimental .....	31
4.3 - Método de Ensaio .....	31
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DE RESULTADOS .....	33
5.1 - Simulação Computacional .....	33
5.1.1 - Tensão Disruptiva Crítica (V50c) .....	34
5.1.1.1 - Influência do Número de Aplicações (N) ..	34
5.1.1.2 - Influência do Degrau de Tensão (d) .....	38
5.1.1.3 - Influência da Tensão Inicial (VI) .....	44
5.1.2 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) .....	48
5.1.2.1 - Influência do Número de Aplicações de Tensão (N) .....	48
5.1.2.2 - Influência do Degrau de Tensão (d) .....	50
5.2 - Resultados Experimentais .....	56
5.2.1 - Tensão Disruptiva Crítica (V50e) .....	57
5.2.1.1 - Influência do Número de Aplicações de	

	Tensão (N) .....	57
5.2.1.2	- Influência do Degrau de Tensão (d) .....	63
5.2.2	- Desvio Padrão ( $\sigma$ ) .....	71
5.2.2.1	- Influência do Número de Aplicações (N) ..	71
5.2.2.2	- Influência do Degrau de Tensão (d) .....	75
CAPÍTULO 6	- CONCLUSÕES .....	81
6.1	- Avaliação do Método de Acréscimo e Decréscimo no Cálculo de V50% .....	81
6.2	- Desvio Padrão da Probabilidade de Descarga pelo Método do Acréscimo e Decréscimo .....	87
6.3	- Número Necessário de Aplicações .....	92
	- BIBLIOGRAFIA .....	96

## 1. INTRODUÇÃO

O moderno conceito de coordenação de isolamento, realizado em moldes probabilísticos, exige um tratamento estatístico das sobretensões esperadas assim como uma análise probabilística da suportabilidade elétrica dos equipamentos e elementos isolantes utilizados em sistemas de energia elétrica [3].

Torna-se dessa forma, a avaliação correta dos níveis de isolamento desses equipamentos, um dos parâmetros de grande importância em coordenação de isolamento, principalmente levando em consideração a constante elevação dos níveis de tensão de transmissão.

A suportabilidade dos equipamentos elétricos é normalmente verificada com a execução de ensaios elétricos previstos em normas. Os resultados desses ensaios servem para verificar se os níveis de isolamento dos equipamentos estão de acordo com os projetos de isolamentos, os quais foram efetuados conforme as sobretensões esperadas quando colocados em uso normal.

Assim, para realização de coordenação de isolamento de forma adequada, esta depende muito de uma correta avaliação dos níveis de suportabilidade, cuja avaliação é normalmente realizada em laboratórios de ensaios.

No que diz respeito a ensaios de impulso em elementos isolantes auto-recuperantes, um dos métodos de ensaio de uso muito frequente é o método denominado de método de acréscimo e decréscimo, o qual, visa obter a tensão disruptiva crítica  $V_{50\%}$  (ou tensão de 50% de probabilidade de descarga) e a partir de seu resultado, determinar a tensão suportável do equipamento.

As vantagens deste método estão na facilidade de sua aplicação em ensaios deste tipo, onde com poucas aplicações de tensão obtém-se o valor da tensão de 50% com uma boa margem de precisão.

Do ponto de vista prático, não são raras no entanto, que no decorrer dos ensaios surjam dúvidas quanto a sua execução e o método. Os mais frequentes estão relacionados a precisão e a confiabilidade do método. Em primeira instância, estes dois problemas estão relacionados com o número de aplicações de tensão de impulso, com o degrau de tensão e tensão inicial adotadas ou escolhidas para a execução dos ensaios.

Inumeras publicações são encontradas a respeito do método de acréscimo e decréscimo, sendo que na sua grande maioria são sobre abordagens teóricas a respeito do método em si, com poucas informações úteis aos inspetores que convivem o seu dia a dia com os ensaios num Laboratório de Alta Tensão.

A proposição deste trabalho é portanto, fornecer subsídios a esses elementos em relação ao método de acréscimo e decréscimo utilizado em ensaios de impulso, por exemplo, de quanto deve ser o número de aplicações de tensão  $N$  necessários num ensaio e sua influência sobre o resultado final.

Nesse sentido é feito nesse trabalho, uma análise do método do acréscimo e decréscimo através de uma simulação computacional e da realização de experimentos práticos com a aplicação de tensões de impulso atmosférico em eletrodos haste-haste e haste-placa. Para isso, são analisadas a influência do número de aplicações de tensão  $N$ , do degrau de tensão  $d$ , e da sua tensão inicial  $V_i$ , sobre o resultado final do ensaio, ou seja, no cálculo da tensão disruptiva crítica  $V_{50\%}$ .

O método de acréscimo e decréscimo é ainda analisado quanto a sua aplicação no cálculo ou determinação do desvio padrão  $\sigma$ , em função da influência também dos parâmetros  $N, d, V_i$  e da sua confiabilidade esperada nesse cálculo.

Para a simulação computacional do método, a fim de efetuar uma comparação com os resultados experimentais, foi admitida que as descargas obedecem uma distribuição gaussiana, em concordância com a premissa embutida no método de acréscimo e decréscimo.

De uma maneira geral , tanto da simulação computacional quanto da parte experimental conclui-se que o método de acréscimo e decréscimo apresenta resultados mais confiáveis no cálculo de V50% do que para o desvio padrão  $\sigma$  .

A influência dos parâmetros  $N, d, V_i$  sobre os resultados de V50% é bastante grande apresentando um relacionamento direto entre eles. Os valores ótimos de 50% são obtidos nas seguintes condições:

- a)  $30 \leq N \leq 70$
- b)  $\sigma R \leq d \leq 1.5\sigma R$  onde  $\sigma R = 3\%$
- c)  $V_i$  , mais próximo possível de V50R

O trabalho está dividido em 6 capítulos , sendo que ao capítulo 2 dedicamos a desenvolver e analisar alguns aspectos teóricos envolvidos no método de acréscimo e decréscimo, tais como conceitos de coordenação de isolamento , análise estatística , distribuição gaussiana e as variações do método propriamente dito de acréscimo e decréscimo.

No capítulo 3 abordamos a simulação computacional do método onde mostramos os princípios adotados na simulação e no cálculo da tensão V50% e desvio padrão  $\sigma$  assim como do fluxograma do programa principal e das subrotinas.

No capítulo 4 apresentamos as formas como foram realizadas o trabalho experimental com o arranjo experimental e a metodologia do ensaio utilizado.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos em simulação computacional e aqueles obtidos experimentalmente , onde é feita também uma primeira avaliação dos resultados obtidos.

No capítulo 6 , efetuamos uma comparação dos resultados obtidos em simulação e experimentalmente assim como os resultados obtidos pelo método original de Dixon e por final, a partir dos resultados dessas comparações , as conclusões finais do trabalho.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

### 2.1. Coordenação de Isolamento

A escolha dos níveis de isolamento de equipamentos utilizados em sistemas elétricos de potência depende das condições de estado permanente assim como dos níveis de sobretensão esperados no sistema.

Esse nível de isolamento é fornecido em termos de tensão suportável do equipamento, a qual, poderia ser definida como sendo uma tensão em que se não for excedida garante a não ocorrência de descarga disruptiva. Em termos probabilísticos, isto não pode ser afirmado de forma categórica, sendo portanto, em um nível de tensão com baixa probabilidade de descarga.

Com as informações referentes aos níveis máximos de tensão esperados no sistema e da escolha do níveis de isolamento desejados, procura-se alcançar uma operação conforme planejado do sistema elétrico de potência.

Para realização do projeto de isolamento deve-se procurar ainda o meio termo ideal entre os fatores técnicos e econômico, num processo conhecido como "coordenação de isolamento" que em resumo representa a relação entre os níveis de sobretensão esperados, características dos dispositivos de proteção e capacidade nominal de isolamento do equipamento.

Segundo a NBR-6939/81 a coordenação de isolamento é definida como sendo:

"Seleção da suportabilidade elétrica de um equipamento e sua aplicação em relação às tensões que podem aparecer no sistema para o qual o equipamento é previsto, e levando-se em conta os equipamentos de proteção disponíveis, como reduzir à um nível econômica e operacionalmente aceitável a probabilidade que um surto de tensão no equipamento irá causar danos na sua isolação ou afetar a continuidade do serviço".

A coordenação de isolamento no seu procedimento determinístico (convencional) pressupõe conhecidas as sobretensões máximas esperadas, escolhendo então os equipamentos de proteção (dissipadores de surto, para-raios) para limitar estas sobretensões a um nível desejado à partir do que se escolhe então o valor da suportabilidade dos equipamentos.

Os valores de máxima sobretensão esperada assim como a tensão suportável do equipamento obtidos conforme a definição acima, geralmente são imprecisos, e de pouca confiabilidade, sendo necessário então que se adote um dado "fator de segurança".

Segundo este procedimento, temos a probabilidade de se incorrer num sub ou super dimensionamento dos níveis de isolamento desejáveis dos equipamentos.

Já nos métodos estatísticos de coordenação de isolamento, estes consideram as sobretensões esperadas e a suportabilidade elétrica dos equipamentos como quantidades estatísticas, permitindo assim uma melhor avaliação desses fatores no estudo da coordenação de isolamento.

No que diz respeito às sobretensões esperadas no sistema, elas poderão ser causadas por descargas atmosféricas ou geradas pelo próprio sistema quando da ocorrência de falhas ou interrupção, conexão ou desconexão de elementos do circuito. Essas últimas, chamadas de "Surtos de Manobra", são previsíveis e dependem da tensão de operação do sistema

Em relação às descargas atmosféricas, muitos estudos tem sido realizados para se estabelecer as características do surto bem como a sua probabilidade de ocorrência. Geralmente, a ocorrência de descargas atmosféricas está associado ao nível cerâmico da região.

A tensão de descarga disruptiva crítica e a tensão suportável de um equipamento também vão ser entendidas como variá-

veis estatísticas e o conhecimento dessa sua suportabilidade à descarga exige métodos estatísticos de avaliação.

Esses métodos estatísticos de avaliação da suportabilidade à descarga de um dado equipamento, permitem um conhecimento da probabilidade de descarga em um dado nível de tensão num dado tipo de sobretensão (atmosférica ou de manobra) ou ainda da sua curva de probabilidade de descarga em relação a sua tensão aplicada.

Esses métodos são geralmente aplicáveis em isolações auto-restauráveis, ou seja, isolações que recuperam suas características de rigidez dielétrica após a ocorrência ou não de uma descarga disruptiva. Assim quando se quer projetar um equipamento para suportar um dado nível de tensão, esse nível de tensão suportável é definido em termos estatísticos como um valor de tensão com baixa probabilidade de descarga (e não como um valor em que teoricamente nunca ocorreriam descargas como no método convencional).

O método estatístico permite então um tratamento probabilístico da coordenação de isolamento o qual, associado a curva de probabilidade de descarga e a da distribuição estatística das sobretensões, permite conhecer o risco de falha do sistema.

Esse risco de falha é baseado em fatores econômicos e técnicos, assim como não podem ser negligenciados bom senso e experiência.

O fator de segurança estatístico é definido como sendo a relação entre tensão suportável do isolamento e sobretensão para um dado risco de falha do isolamento.

A equação 2.1 expressa numericamente o Risco de Falha, [2] com a associação da distribuição de frequência das sobretensões e a curva de probabilidade de descarga (capacidade de isolamento).

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} P_S(V) P_I(V) dV \quad [2.1]$$

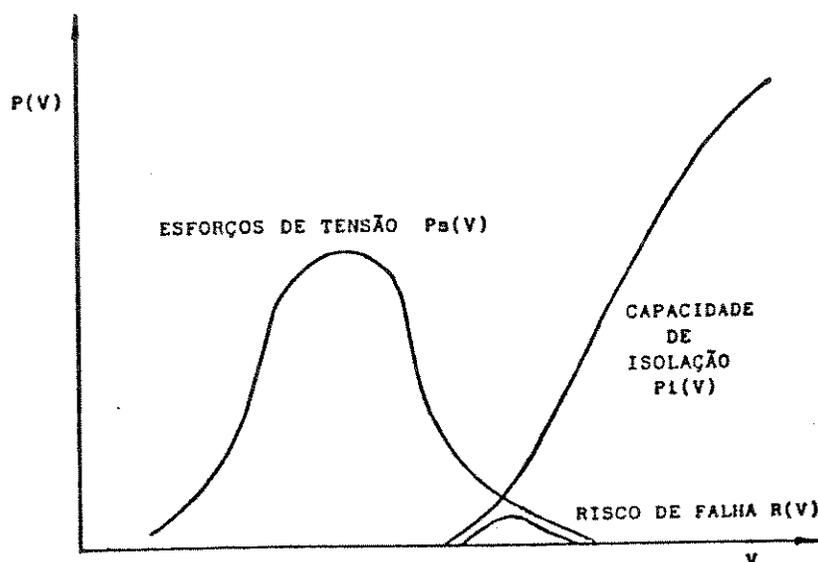


Fig. 2.1 - Distribuição de frequência das sobretensões, de capacidade de isolamento e risco de falha.

Como pode ser visto na figura 2.1 fatores importantes na avaliação são a média e o desvio padrão da distribuição, correspondentes no estudo da suportabilidade à descargas V50% e  $\sigma$ .

De acordo com o nível de sobretensões esperadas e em função do risco de falha previsto na coordenação de isolamento, um equipamento elétrico é projetado para funcionar numa determinada classe de tensão, com uma correspondente tensão suportável de impulso.

Essas classes de tensão com as suas correspondentes tensões suportáveis de impulso são especificadas e uma vez escolhidas, a avaliação do equipamento em relação a essa suportabilidade, é verificada através da realização de ensaios em Laboratórios de Alta Tensão. Estes ensaios são efetuados em conformidade com as normas pertinentes a cada equipamento onde encontram-se estabelecidas para cada caso, os métodos de ensaio, níveis de tensão a serem aplicados, as suas características assim como as condições e formas de sua execução.

## 2.2 Avaliação Estatística na Aplicação de Tensões Impulsivas

Os procedimentos, normalmente adotados na determinação da suportabilidade de equipamentos elétricos quando submetidos à tensão impulsivas devem ser analisados em bases estatísticas devido à natureza aleatória desse fenômeno.

A suportabilidade à tensões de impulso deve ser avaliada a partir de resultados obtidos em séries de aplicações de tensões em um mesmo objeto (caso de isolamento auto recuperável), sendo parâmetros importantes a serem considerados para se obter uma boa estimativa do valor dessa suportabilidade, o método de ensaio utilizado e o número de aplicações realizados.

Levando-se em conta que trabalhamos com isolações auto-recuperáveis, assumimos a priori, que as sucessivas aplicações de tensão não alteram significativamente as características dielétricas do objeto em teste.

Os aspectos usuais importantes a serem observados na avaliação dos resultados dessas aplicações de tensões impulsivas em um objeto sob teste são:

- a) o resultado da aplicação de uma determinada tensão de impulso em um objeto de teste apresenta 2 possibilidades: sucesso (descarga disruptiva) e falha (suportabilidade).
- b) A probabilidade de falha ou sucesso depende da magnitude e duração da tensão de impulso e da natureza do objeto em teste.

Ou seja, para um dado nível de tensão  $V$  aplicado a um objeto em teste sempre existe uma probabilidade  $P_1$  de descarga e  $P_2$  de não descarga numa dada aplicação de tensão, cujas probabilidades  $P_1$  e  $P_2$  estão associados a amplitude e duração da tensão e da natureza do objeto em teste.

Existem métodos para determinação dessa função de distribuição de probabilidade de descarga onde relacionamos a probabilidade de descarga com a tensão aplicada  $V$ .

A função distribuição de probabilidade de descarga é expressa em termos do valor médio da tensão  $V$ , (usualmente  $V_{50\%}$  - valor da tensão disruptiva com 50% de probabilidade de descarga) e do seu desvio padrão  $\sigma$ , que se constituem em parâmetros mais importantes na avaliação dos resultados.

### 2.3 Distribuição Gaussiana ou Normal

Usualmente, com certas restrições, aceita-se que a função de distribuição de probabilidade de descarga em isolações auto-restauráveis pode ser representado por uma distribuição gaussiana, dentro de um intervalo aproximado de  $\pm 3\sigma$ .

Numa distribuição gaussiana a probabilidade de descarga  $P$  em qualquer nível de tensão  $V$  pode ser obtido a partir da equação 2.2.

$$P = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz \quad [2.2]$$

onde:

$$z = \frac{V - V_{50\%}}{\sigma}$$

Relacionando as probabilidades de descargas com as respectivas tensões aplicadas podemos obter as curvas de distribuição de frequência e de probabilidades similares as mostradas nas figuras 2.2a; 2.2b e 2.2c.

Se a distribuição das probabilidades for realmente gaussiana, a curva de distribuição de frequências de ocorrência correspondente, se plotados num papel gaussiano deverá ser uma reta como mostrada na figura 2.2c.

A partir da curva de probabilidades de descarga podemos obter os valores da tensão de descarga V50 ( $p=0,5$  ou  $p=50\%$ ) o qual denominamos de tensão crítica de descarga e também o seu desvio padrão.

Uma vez conhecidos V50% e  $\sigma$ , podemos obter a probabilidade de descarga para qualquer tensão através de:

$$V_{p\%} = V50\% (1 - Z\sigma)$$

onde Z pode ser obtido de tabelas, como:

Z	-2.0	-1.28	-1.00	0.0	+1.00	+1.24	+2.0
P%	0.02	0.10	0.16	0.50	0.84	0.90	0.98

Por exemplo, se tivermos os valores de V50% e  $\sigma$  podemos calcular a tensão referente à uma probabilidade de descarga de 10% por:

$$V10\% = V50\% (1 - 1.28\sigma)$$

Quando não se dispõe de maiores informações, pode-se usar valores padronizados de  $\sigma$  para diferentes formas de onda de tensão. Os valores mais usuais são [2]:

3% - Para impulsos atmosféricos e tensão alternada seco, em isolações auto-restauráveis (gases)

6% - para impulsos de manobra e tensão alternada sob chuva, isolações auto-restauráveis (gases).

Numa avaliação para coordenação de isolamento, os valores de V50% (valor médio) e  $\sigma$  (desvio padrão) da distribuição de sobretensões e distribuição de probabilidade de descarga são parâmetros importantes, a medida que deles vai depender a avaliação correta do risco de falhas.

As figuras 2.3(a), 2.3(b) e 2.3(c) mostram duas distribuições com igual desvio padrão  $\sigma$  e diferentes valores médios V50% enquanto que em 2.4(a), (b) e (c) temos duas distribuições com igual valor médio e diferentes  $\sigma$ .

Como a avaliação do risco de falhas é realizado pela superposição de duas distribuições, a correta avaliação desses fatores leva a obtenção de uma boa confiabilidade na coordenação de isolamento.

Uma das limitações ao uso da distribuição gaussiana como função representativa da probabilidade de descarga, está no fato de que se a curva de probabilidade de descarga tem a forma mostrada na figura 2.2, estamos assumindo que a mesma seja uma função gaussiana de probabilidade cumulativa. Isso não ocorre [5] sendo na verdade não cumulativa. Neste caso ela deveria possuir também uma distribuição de frequência correspondente, como na fig. 2.5 de acordo com a equação 2.5.

$$P_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{1}{2} z^2 \right) \quad [2.5]$$

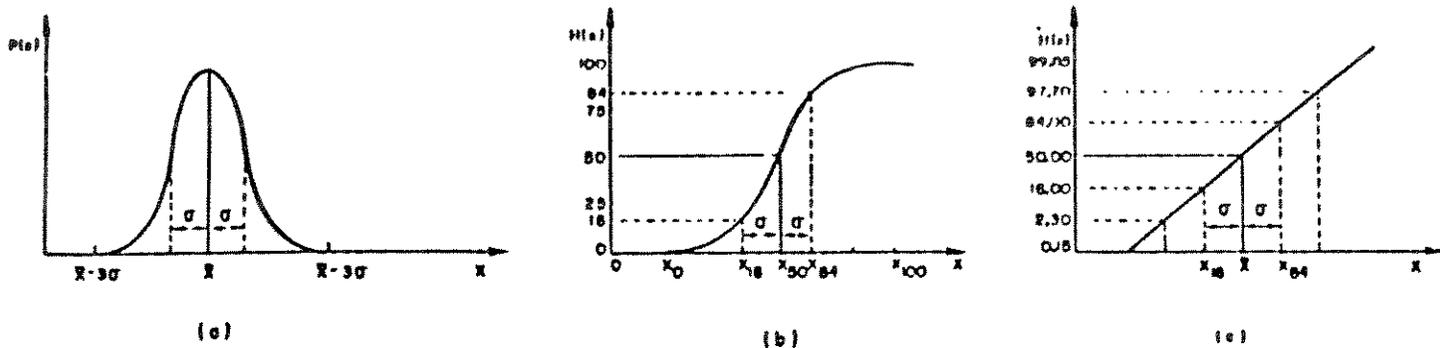


Fig. 2.2 - Curvas de distribuição de probabilidade (b) e (c) e distribuição de frequências correspondente (a)

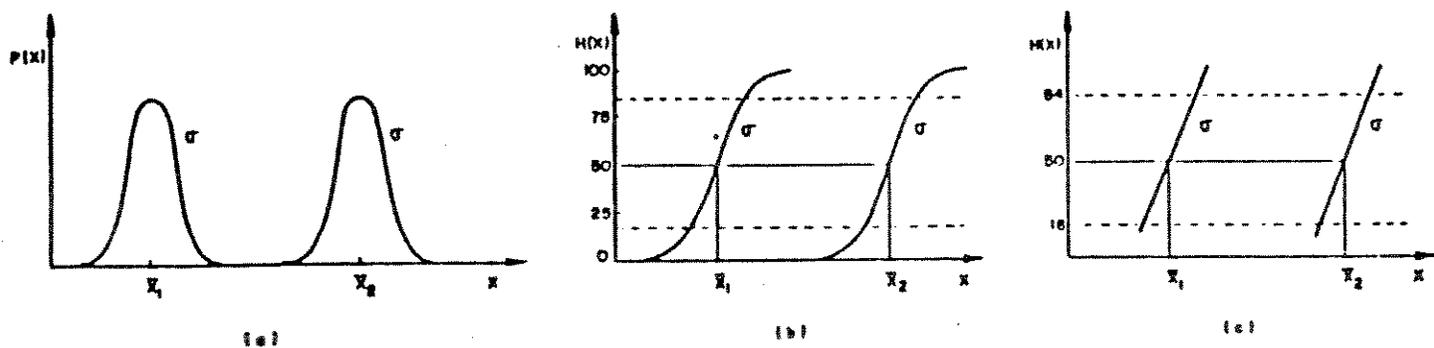


Fig. 2.3 - Distribuições gaussianas com igual desvio padrão e diferentes valores médios.

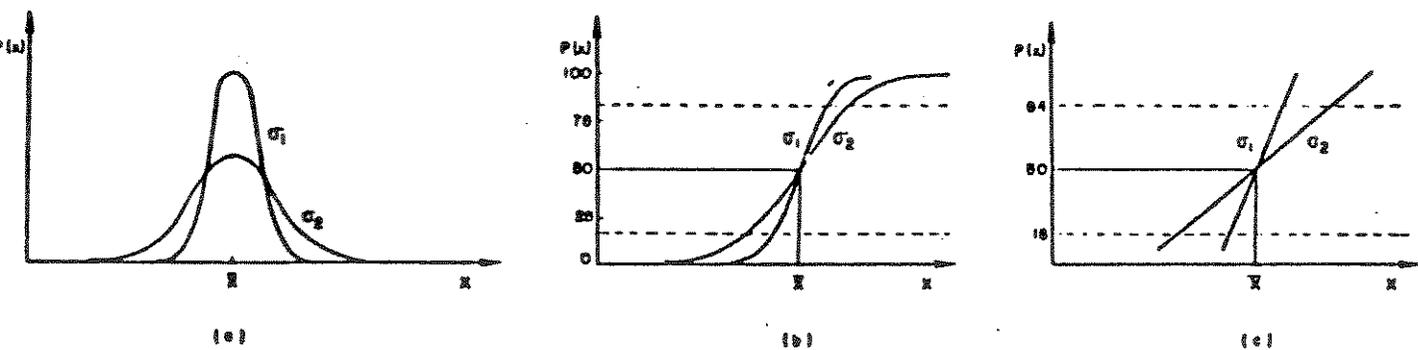


Fig. 2.4 - Distribuições gaussianas com igual valor médio e diferentes desvios padrões.

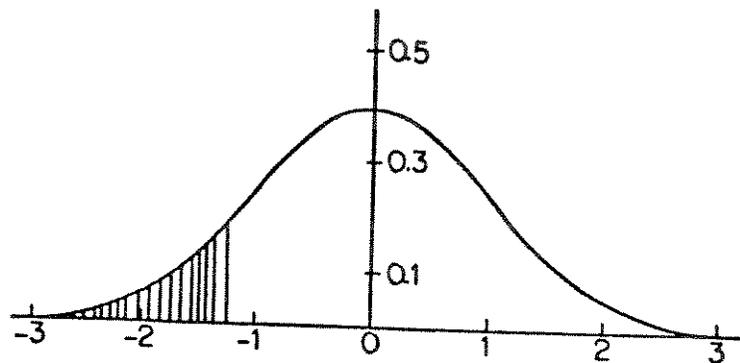


Fig. 2.5 - Curva de distribuição de frequência.

Ou seja, se integrarmos essa função desde  $-\infty$  até  $Z_1$ , obtemos a probabilidade de ocorrência de todos os valores (área hachureada).

Na realidade não temos uma distribuição cumulativa de frequência relacionada com a curva de probabilidade de descarga. Faz-se então, uma adaptação da curva gaussiana para a relação entre  $V$  e  $p$ , (fig. 2.2) adaptando-se dessa forma a função matemática aos resultados, experimentais. Da mesma maneira também o desvio padrão não tem uma relação direta com o termo desvio padrão no sentido geralmente empregado em estatística.

O termo desvio padrão no sentido normalmente usado em estatística tem relação direta com a curva cumulativa de probabilidade, o qual, como já foi dito, não tem correspondência com a curva de probabilidade de descarga.

Nesse caso, o que é realizado (fig. 2.2) é uma adaptação para o termo  $\sigma$ , definido como:

$$\sigma = V50\% - V16\% = V84\% - V50\% \quad [2.6]$$

Outra limitação do uso da função gaussiana, é que

essa função não é truncada, embora sua validade para uso em descargas elétricas, seja limitada à apenas uma faixa de tensões e probabilidade.

Apesar das limitações impostas optamos por considerar a probabilidade de descarga como seguindo uma distribuição gaussiana, em vista da sua simplicidade e pelo fato do método de ensaio a ser analisado ter por base esta distribuição.

## 2.4 Métodos de Ensaio

Segundo as normas da IEC [6] ou ABNT, [7] os ensaios de descarga disruptiva são divididas em várias categorias para fins de avaliação estatística.

A uma das categorias pertencem os ensaios em que são realizados com uma série de aplicações de tensão, de forma constante e onde para cada nível de tensão são registrados o número de descargas ocorridas.

Outra categoria envolve os ensaios em que é aplicada uma tensão continuamente crescente ao objeto sob ensaio até a ocorrência da descarga disruptiva. Nesta categoria de ensaio, todas as aplicações causam descarga disruptiva.

Uma 3a. categoria compreende os ensaios executados por aplicações de tensão em que o nível de cada tensão é determinado pelo resultado da aplicação precedente.

Neste trabalho, utilizamos o método de acréscimo e decréscimo que pertence a 3a. categoria acima mencionada.

#### 2.4.1. Método de Acréscimo e Decréscimo

O método do acréscimo e decréscimo foi originalmente proposto por Dixon e Mood [8], e posteriormente adaptado para uso em ensaios de Alta Tensão em materiais isolantes.

A idéia básica do teste consiste em determinar a tensão disruptiva crítica V50% através de uma série de aplicações de tensão onde cada nível de aplicação depende da aplicação anterior.

No decorrer dos anos diversos autores [5], [10], [11], [12], [13], [14], propuseram modificações no método, que sobretudo não alteram substancialmente sua idéia original. A seguir são apresentados tanto o método tal como ele é hoje adotado e proposto pelas principais normas de ensaios de Alta Tensão como IEC [6] e ABNT [7], assim como o método original adaptado, e outras propostas de modificações.

Tanto nas simulações como na parte experimental utilizamos o método adotado pela ABNT por ser o mais utilizado entre nós, e numa tentativa de avaliação do método tal como é normalmente realizado em ensaios de aceitação e do tipo.

#### 2.4.2 Métodos de Acréscimo e Decréscimo (segundo a NBR-5389/81)

Tres parâmetros são importantes no método de acréscimo e decréscimo: a tensão inicial  $V_i$ , o número de aplicações  $N$  e o degrau de tensão  $d$ .

A tensão inicial  $V_i$  é escolhido de maneira à ser a mais próxima possível do nível da tensão crítica de descarga disruptiva V50%. Como, o objetivo do ensaio é o cálculo da própria tensão V50%, esse valor inicial deve ser o mais próximo possível da tensão esperada de V50%.

Após definida a tensão inicial  $V_i$  escolhe-se o degrau de tensão  $d$  a ser adotado para todo o ensaio. As normas em geral recomendam a utilização do degrau igual a 3% de  $V_i$ . Isso porque estudos a respeito tem demonstrado que o valor do degrau de tensão escolhido deveria ser o mais próximo possível do valor de  $\sigma$  (para impulsos atmosféricos, o  $\sigma$  é adotado como sendo igual à 3%).

Escolhidos  $V_i$  e  $d$ , um impulso é aplicado no nível  $V_i$ . Se ele não causar uma descarga disruptiva o próximo nível deverá ser  $V_i + d$ . Se a aplicação causar uma descarga disruptiva o próximo nível deve ser  $V_i - d$ .

Continua-se o procedimento, até que sejam efetuados um numero suficiente de aplicações definido para ensaio, sendo o nível de cada impulso determinado pelo resultado anterior.

O número de impulsos  $N_v$  aplicados à cada nível  $V_v$  é então contado e a tensão de descarga disruptiva à V50% determinado por:

$$V_{50\%} = \frac{\sum N_v V_v}{\sum N_v} \quad [2.7]$$

Nesta equação  $N_v$  deve ser maior ou igual a 20, com a precisão do método aumentando com o número de aplicações. As normas indicam que normalmente não há necessidade de se fazer mais de 40 aplicações. O primeiro nível de tensão à ser considerado é aquele em que 2 ou mais impulsos foram aplicados.

#### 2.4.3. Método de Acréscimo e Decréscimo (Dixon)

O método de acréscimo e decréscimo foi originalmente proposto por Dixon na análise de experimentos de sensibilidade, por exemplo, como na determinação de uma quantidade de explosivo necessário para explodir um determinado objeto, etc. Ou seja, em experimentos em que não era possível se fazer mais que uma observação em um determinado espécime, uma vez que se o teste fos-

se realizado o espécime seria alterado (o objeto explodia) sendo necessário um outro espécime idêntico para continuação do experimento.

Difere portanto, um pouco em relação ao método descrito no ítem anterior e normalmente utilizados em ensaios elétricos de alta tensão, onde neste caso, os ensaios dificilmente levam a destruição do objeto sob teste após cada aplicação de tensão.

Nessa original versão do acréscimo e decréscimo, inicialmente fazemos uma estimativa grosseira de  $V_{50\%}$  e  $\sigma$ , que vamos chamar de  $V'_{50\%}$  e  $\sigma'$ .

O valor de  $V'_{50\%}$  será o valor da tensão inicial do ensaio, qual deve ser o mais próximo possível do valor de  $V_{50\%}$ .

O valor de  $\sigma'$  será usado na escolha do degrau de tensão  $d$  onde:

$$d = 0,5 \sigma' \sim 2 \sigma'$$

Ou seja, o degrau de tensão deve estar dentro da faixa de "meio" desvio padrão a dois desvios padrões. Adverte no entanto que o valor "ideal" de degrau seria  $d = \sigma$ .

Com o valor de tensão inicial e o degrau definidos, escolhemos então os níveis de tensão  $V_i - 3d$ ,  $V_i - 2d$ ,  $V_i - d$ ,  $V_i$ ,  $V_i + d$ ,  $V_i + 2d$ ,  $V_i + 3d$ , separados por um intervalo constante  $d$ .

Conforme explicamos anteriormente, aplicamos inicialmente uma tensão  $V$ . Caso ocorra descarga disruptiva diminuímos a tensão de um degrau  $d$ , e em caso contrário o nível de tensão é elevado.

$$V_j - d = V_{j-1} \quad \text{ou} \quad V_j + d = V_{j+1} \quad [2.8]$$

A diferença em relação ao método anterior é que para o cálculo de  $V_{50\%}$  e  $\sigma$  somente são utilizados os níveis de tensão em que ocorreram ou não descargas disruptivas escolhendo-se o de

menor número de incidências.

Se  $n$  for o total de ocorrências do evento menos frequente e  $n_0, \dots, n_k$  as frequências para esse evento menos frequente, vamos ter que  $\sum n_j = n$ .

A estimativa da média V50% e desvio padrão  $\sigma$  são baseados na média e variância  $\bar{V}$  e  $s_y^2$  dos valores com frequência  $n_j$ . Logo:

$$V50\% = \bar{V} \pm \frac{1}{2} d \quad [2.9]$$

onde:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{j=1}^k n_j V_j}{n}$$

O sinal (+) é usado quando o cálculo é baseado nas falhas (não rupturas) e o sinal (-) quando é baseado nas descargas disruptivas.

A estimativa de  $\sigma$ , é dado por

$$\sigma = 1.620 d \left( \frac{s_y^2}{d^2} + 0.029 \right) \quad [2.10]$$

onde

$$s_y^2 = \frac{\sum V_j^2 - (\sum V_j)^2/n}{n-1}$$

O intervalo de confiança da média  $\bar{X}$  de uma amostra é fornecida por [8], [15].

$$\bar{X} \pm z_\alpha \sigma_{\bar{X}}$$

onde  $\sigma_{\bar{X}}$  é o erro padrão da média amostral  $\bar{X}$ .

No caso do método do acréscimo e decréscimo o erro padrão de  $\bar{X}$  é:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{G \sigma}{\sqrt{n}}$$

O parâmetro  $G$  depende da relação  $d/\sigma$  e da posição de média, relativa aos níveis de teste conforme mostrada na figura 2.6.

Um intervalo de confiança de 95% é obtido por:

$$\bar{x} \pm 1.96 \sigma$$

Intervalo de confiança de 95% significa que 95% dos valores da média encontrados estão nesse intervalo.

Da mesma maneira, o erro padrão do desvio padrão da amostra  $\sigma_{\sigma}$  é dado por:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{H\sigma}{\sqrt{n}}$$

O fator H representado na figura 2.6 pela curva tracejada é válido quando a média está entre dois níveis aplicados e a sólida quando a média cai em um dos níveis (o mesmo é válido também para G).

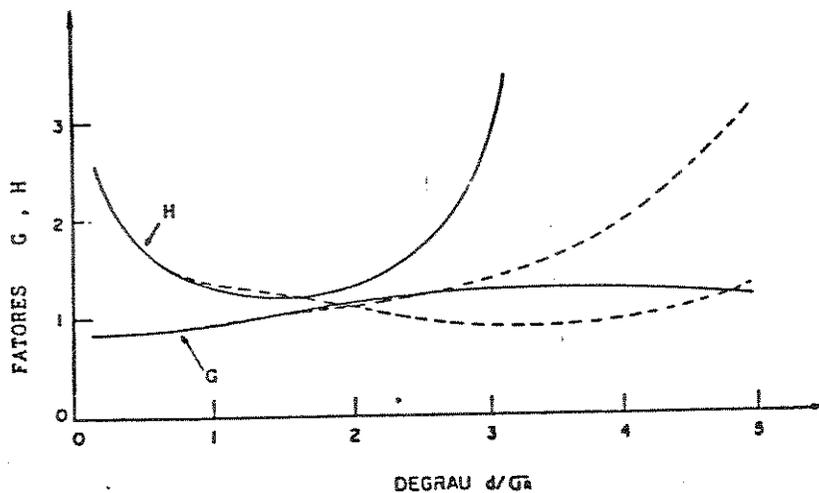


Fig. 2.6 - Fatores G e H.

#### 2.4.4 Métodos de acréscimo e decréscimo modificados

Vários autores tem procurado alternativas ao método clássico de acréscimo e decréscimo introduzido por Dixon e Mood [8], visando melhorar a determinação da tensão de V50% ou a estimativa do desvio padrão  $\sigma$ .

Neste sentido um dos trabalhos pioneiros e de grande interesse é o de Kono e Oikawa [10], onde se faz um estudo bastante extenso do método através da simulação computacional do cálculo de V50% e  $\sigma$ , adaptando-se o método clássico de Dixon e Mood.

Carrara e Delleria [11], visando a necessidade de conhecimento das tensões em regiões de baixas e altas probabilidades, propõe o método de acréscimo e decréscimo extendido. Este método, permite estimar tensões correspondentes à probabilidades diferentes de 50%. Uma das grandes vantagens do método é se poder calcular diretamente tensões com baixas probabilidades de descarga, ao mesmo tempo em que limita o número de descargas e o nível de tensão a ser aplicado. Uma limitação prática é o número de aplicações exigido, ou seja o tempo de ensaio se torna demasiado longo.

Anis e Saad [13], propõe um método para se conseguir uma redução no tempo de ensaio. Esta redução é conseguida por meio de uma estimativa menos precisa de V50% e  $\sigma$ , e sequencialmente, após cada aplicação calcula-se V50% baseado nos dados acumulados.

Analisa ainda o fato de isolações multi-paralelas não seguirem uma distribuição gaussiana, resultando em erros na aplicação do método de acréscimo e decréscimo nessas configurações.

Vibholm e Thyregod [17] fazem uma comparação do método de acréscimo e decréscimo (considerado uma aproximação da estimativa pela máxima verossimilhança) com a estimativa exata pela máxima verossimilhança.

Chagas e Cavallius [5] , fazem um estudo da precisão de ensaios estatísticos , incluindo nessa análise o método tradicional de acréscimo e decréscimo, o método extendido e o, da máxima verossimilhança.

P.Mourente e Santiago [12] propõe uma modificação no método de acréscimo e decréscimo para se conseguir uma melhor estimativa do desvio padrão  $\sigma$  do que aquela conseguida pelo método tradicional( os erros desta estimativa são inerentes ao método de acréscimo e decréscimo).

### 3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

#### 3.1 Introdução

Para avaliar os métodos normalmente utilizados no cálculo de tensão disruptiva crítica  $V_{50\%}$  de um objeto sob teste, a simulação computacional é uma ferramenta importante, porque permite a realização de um grande número de experimentos num curto espaço de tempo.

Neste trabalho foi realizada a simulação do método de acréscimo e decréscimo, utilizando-se para tal de um artifício matemático [14] para determinação da ocorrência ou não de descarga disruptiva em uma determinada "aplicação" simulada de tensão.

#### 3.2 Princípio básico

Embora as condições atmosféricas tais como, pressão, umidade e temperatura, influenciem na probabilidade de descarga de um objeto em teste num determinado nível de tensão, podemos assumir que a curva de probabilidade de descarga se aproxima de uma certa curva "ideal" sob condições constantes de ensaio e com um número infinito de aplicações.

Essa curva "ideal" [14] de probabilidade de descarga, obtida a partir de um número infinito de aplicações em diferentes níveis de tensão, sob condições constantes de ensaio, chamamos de curva "real" de probabilidade de descarga. Esta curva será utilizada na simulação como sendo a curva de "referência" e como no nosso caso estamos tratando de tensões impulsivas em isolações auto-restauráveis, podemos assumir para esta curva "real", uma distribuição gaussiana de probabilidade de descarga.

A idéia básica usada na simulação, além da existência dessa curva "real" de probabilidade de descarga, utiliza-se ainda o artifício de geração de números aleatórios [14] para determinar a ocorrência ou não de descarga disruptiva em uma dada aplicação "simulada" de tensão. Ou seja, se escolhermos uma dada tensão a ser aplicada, existirá, em função dos valores de  $V_{50R}$  (tensão de 50% real) e  $\sigma_R$  (desvio padrão associado à curva real) um dado valor normalizado (em  $z$ ) para esta tensão, que pela curva real, corresponderá a uma probabilidade de descarga associada.

Para determinar a ocorrência ou não de descarga numa dada aplicação com uma dada tensão, comparamos o valor de sua probabilidade de descarga obtida da curva real, com um número aleatório entre 0 e 1 obtido à partir de uma distribuição uniforme.

Se o número aleatório gerado for maior que o valor da probabilidade de descarga (também com valores entre 0 e 1, ou seja 0% e 100%) considera-se que não houve ocorrência de descarga e caso seja menor ou igual que houve ocorrência de descarga.

Por exemplo, se escolhermos uma tensão correspondendo à uma probabilidade "real" de 10% (0,1), então se na "aplicação" correspondente à  $V_j$  o número gerado for maior que 0,1 não haverá ocorrência de descarga, o contrário ocorrendo se ele for menor ou igual à 0,1.

Como os números aleatórios tem uma distribuição uniforme entre 0 e 1, temos uma probabilidade de 10% do número escolhido ser menor que 0,1 (ou seja de ocorrer descarga) confirmando o valor de 10% da curva "real".

A curva "real" é apresentada na fig. 3.1. Para simplificação da simulação computacional o desvio padrão  $\sigma$  e a tensão referente ao valor de 50% de probabilidade de descarga  $V_{50\%}$  são normalizados respectivamente como 0 e 1.

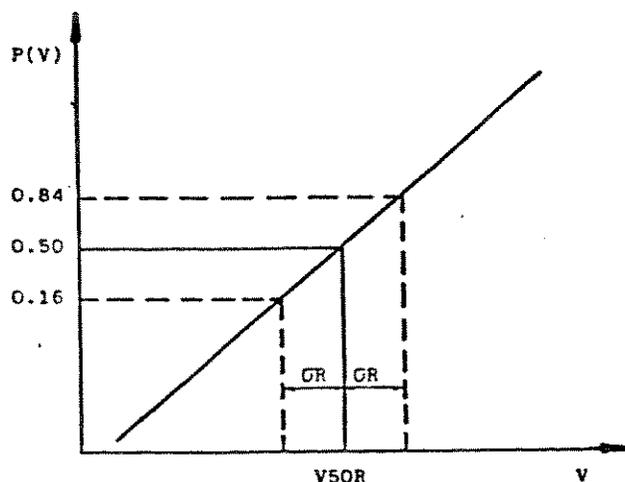


Figura 3.1 - Curva "real" de probabilidade de descarga.

Temos assim a tensão  $V_j$  normalizada em  $Z$  por:

$$Z_j = \frac{V_j - V_{50R}}{\sigma_R} \quad [3.1]$$

O valor de  $\sigma_R$  é definido por:

$$\sigma_R = V_{84\%} - V_{50\%} = V_{50\%} - V_{16\%}$$

Na Fig. 3.2 apresentamos o diagrama de blocos simplificado do processo de determinação da ocorrência ou não de descarga em uma determinada aplicação.

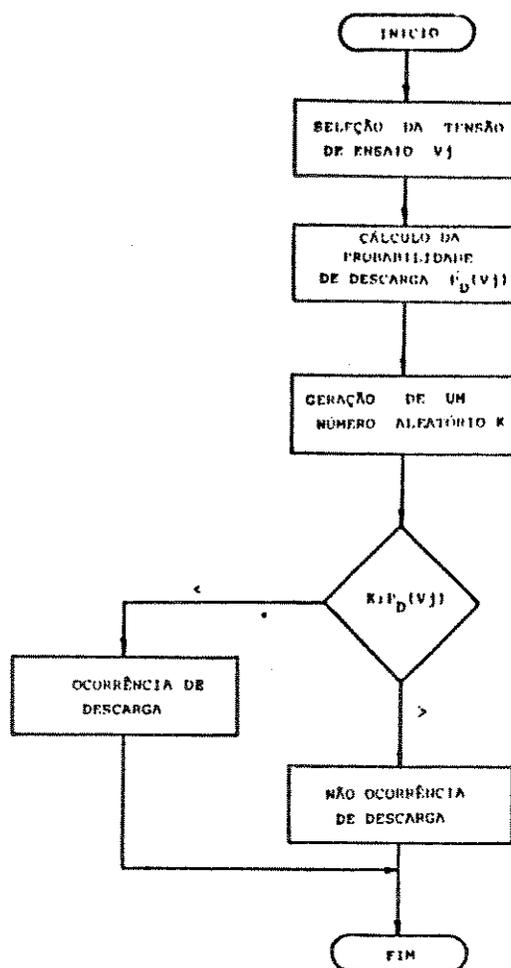


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do processo de determinação de ocorrência ou não de descarga disruptiva.

### 3.3 Simulação do Método de Acréscimo e Decréscimo

A simulação do método do acréscimo e decréscimo é efetuada aplicando-se os conceitos anteriormente citados de avaliação da ocorrência ou não de descarga disruptiva.

Um fluxograma simplificado para o cálculo de  $V_{50\%}$  pelo método de acréscimo e decréscimo usualmente empregado na realização de ensaios é mostrado na Fig. 3.3.

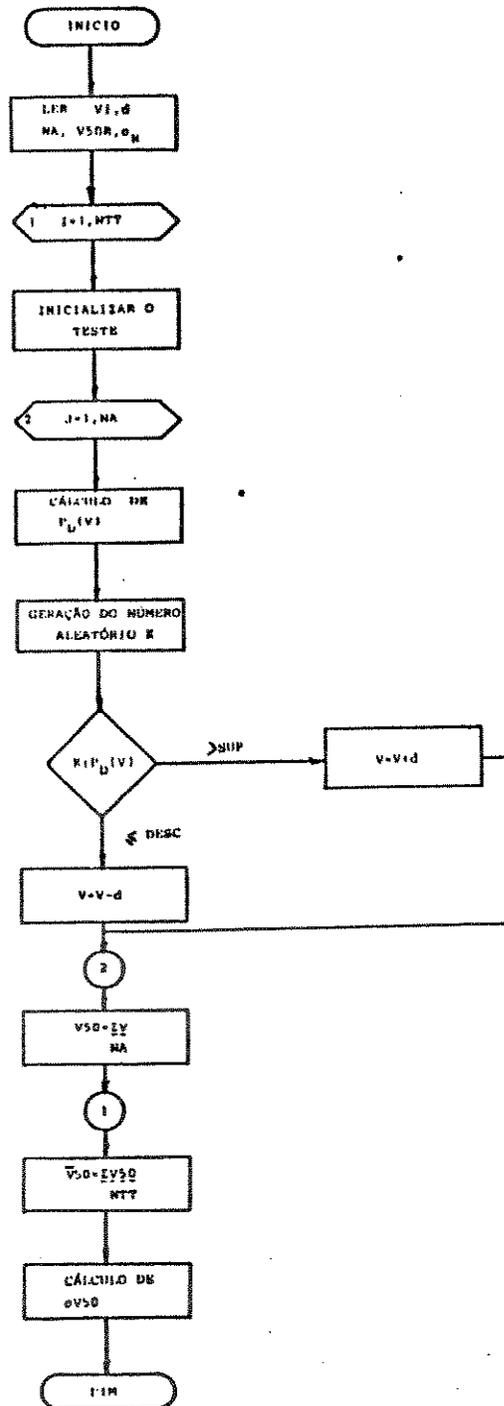


Figura 3.3 - Fluxograma de cálculo de  $V_{50\%}$  pelo Método de acréscimo e decréscimo.

### 3.4 Programa Principal e Sub-Rotinas

O programa principal e sub-rotinas utilizadas na simulação do método de acréscimo e decréscimo são:

INIC2.ROS = Programa principal (escolhe-se N, Vi e d e o número total de simulações)

UAD1 = Subrotina de simulação do método do acréscimo e decréscimo e cálculo de V50.

Dixon.F4 = Subrotina de cálculo de  $\sigma$ .

SIMPS = Subrotina para cálculo da probabilidade de descarga através da resolução da integral de Gauss.

RAND.MAC = Subrotina geradora de números aleatórios.

O fluxograma geral do programa é apresentado na fig.

3.4.

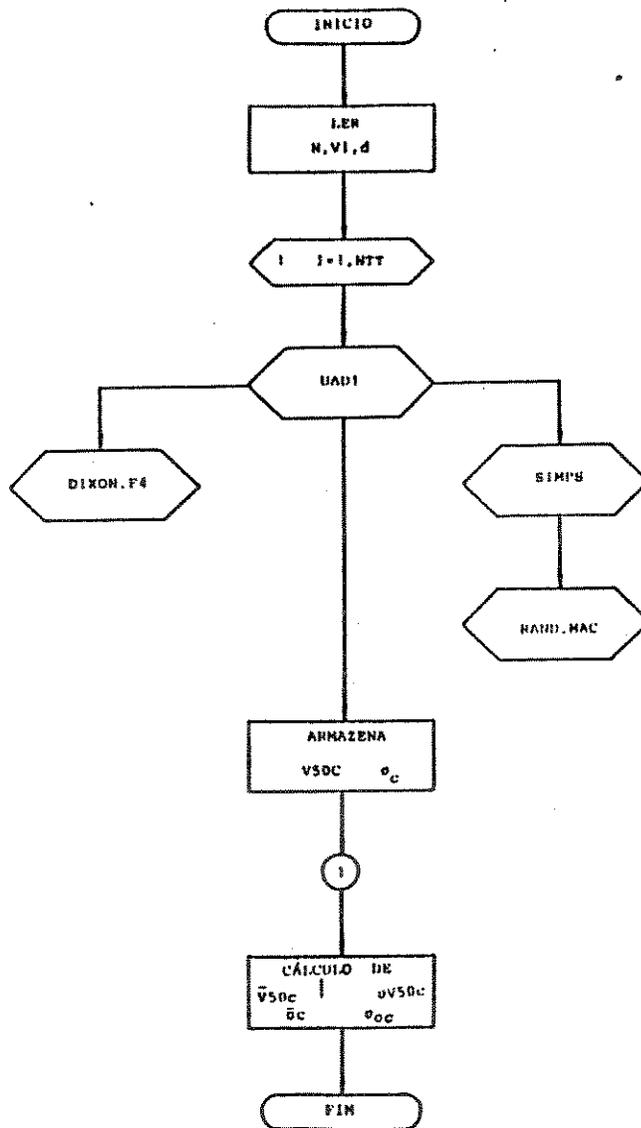


Figura 3.4 - Fluxograma geral do programa computacional de simulação do método de acréscimo e decréscimo

## 4. PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1 Introdução

Para a realização da parte experimental deste trabalho escolhemos duas configurações de eletrodos, as do tipo haste-haste e haste-plano, por serem configurações representativas encontradas em sistemas de energia elétrica. Representam inúmeras configurações de isolamentos encontrados em linhas aéreas e subestações, tais como: cadeia de isoladores, isoladores tipo pedestal e de pino, buchas, "gaps" de proteção, etc.

Se analisarmos os espaçamentos em torres de transmissão notaremos também que as suas configurações se aproximam de sistemas do tipo haste-haste ou haste-plano. Os condutores, pelo ângulo que formam com a torre, atuam como eletrodo haste, enquanto que a torre aterrada funcionada como plano, embora, um plano de área restrita.

Essas duas configurações de eletrodos, por serem clássicas, tem sido bastante estudadas e encontramos inúmeras publicações a respeito, principalmente do seu comportamento em termos da tensão disruptiva crítica de impulso e impulsos de manobra.

As vantagens de se usar sistemas de eletrodos como estes e não, por exemplo, isoladores ou cadeia de isoladores, é que para este tipo de estudos requer a realização de uma quantidade muito grande de ensaios assim como, de grande número de aplicações de impulsos por ensaio. Normalmente as peças se deteriorariam após alguns testes, alterando as suas características dielétricas, inviabilizando assim a sequência de testes necessários para a sua comparação.

## 4.2 Arranjo Experimental

Os sistemas de eletrodos haste-haste e haste-plano foram montados numa configuração horizontal, isoladas da base por uma estrutura isolante, com a distância entre os eletrodos ajustável, conforme mostrado na Fig. 4.1. Ambos os eletrodos são intercambiáveis sendo que o eletrodo plano sempre foi utilizado na configuração haste-plano aterrado.

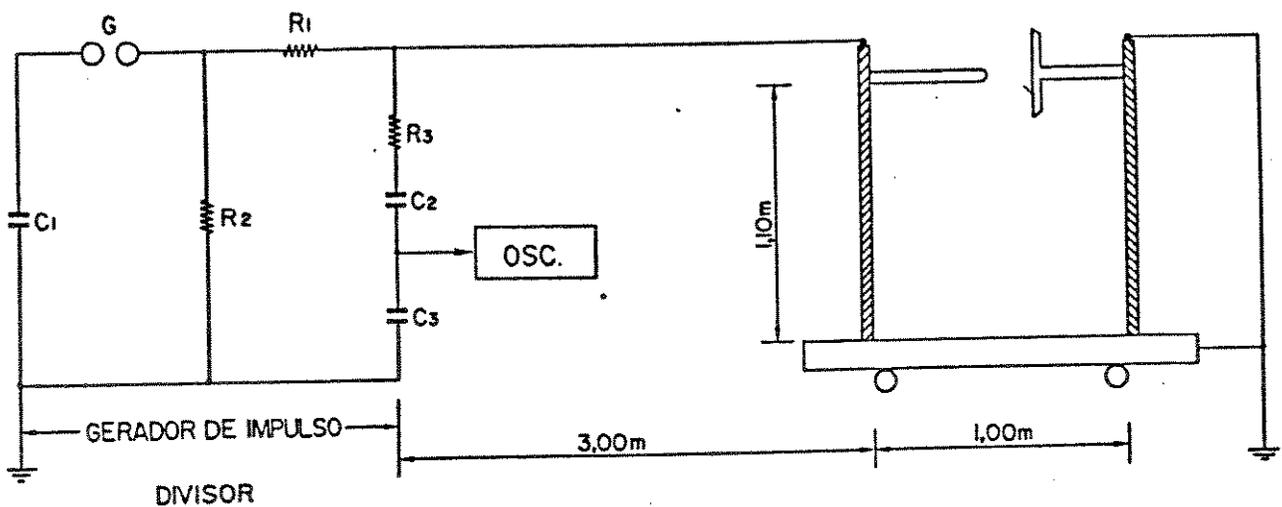


Figura 4.1 - Arranjo Experimental.

## 4.3 Método de Ensaio

As experiências foram realizadas no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, utilizando-se para tal do Gerador de Impulsos, marca Haefely, 100kV e 3kJ por estágio, divisor de tensão marca Haefely tipo CR1000 e voltímetro de pico para impulso, também de fabricação Haefely com indicador digital, modelo 64M.

O estudo foi efetuado somente para tensões do tipo impulso atmosférico de forma de onda 1.2/50 $\mu$ s (Fig. 4.2) nas polaridades positiva e negativa, com o distanciamento entre os eletrodos, fixo, igual a 20cm.

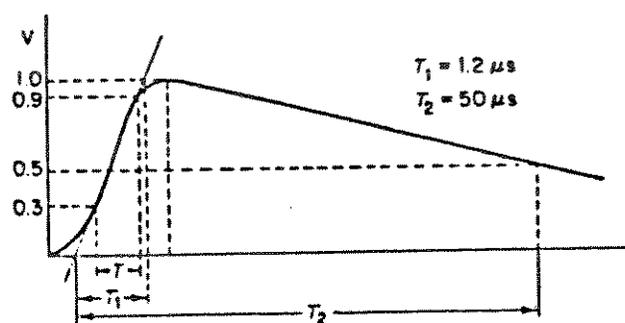


Figura 4.2 - Forma de Onda da Tensão de Impulso.

Todos os ensaios foram realizados pelo método de acréscimo e decréscimo conforme descritos na norma NBR-5389/81 [7] variando-se número de aplicações de tensão ( $N$ ) e o degrau de tensão ( $d$ ). O número de aplicações foi variado desde  $N=10.20\dots100$  aplicações de tensão e o degrau de tensão 1.5%; 3%; 4% e 6%, correspondentes a  $0.5\sigma R$ ;  $\sigma R$ ;  $1.5\sigma R$  e  $2\sigma R$ , se assumirmos  $\sigma R = 3\%$  (impulso atmosférico).

O número de ensaios realizados em cada uma das configurações foi:

	$d=1.5\%$	$d=3\%$	$d=4.5\%$	$d=6\%$	Total
haste-haste (+)	20	20	20	20	80
haste-haste (-)	20	20	20	20	80
haste-placa (+)	10	10	10	10	40
haste-placa (-)	10	10	10	10	40

A cada série de testes numa mesma configuração e polaridade, com  $N$  e  $d$  fixos foram determinados os valores médios  $\bar{V}_{50e}$ ,  $\bar{\sigma}$  e, sua dispersão  $\sigma V_{50e}$  e  $\sigma\sigma e$ .

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 Simulação Computacional

Cada resultado é fornecido em função do seu valor médio e da sua dispersão, apresentados, por questões de análise divididos naqueles obtidos para a tensão disruptiva crítica V50% e para o desvio padrão da distribuição de probabilidade de descarga. Estes resultados foram denotados por:

$\bar{V}_{50c}$  = tensão disruptiva crítica média

$\sigma_{V50c}$  = dispersão dos resultados obtidos no cálculo da tensão disruptiva crítica.

$\bar{\sigma}_c$  = desvio padrão médio da distribuição de probabilidade de descarga.

$\sigma_{\sigma c}$  = dispersão dos resultados obtidos no cálculo do desvio padrão .

Todos os resultados são analisados em relação aos seguintes parâmetros:

N = Número de aplicações de tensão por ensaio.

$V_i$  = tensão inicial.

d = degrau de tensão.

Os resultados foram normalizados em função da tensão disruptiva crítica "real"  $V_{50R}$  e do desvio padrão "real"  $\sigma_R$ , a fim de que, os valores obtidos pudessem ser comparados com os valores normalizados da distribuição gaussiana (valor médio ( $V_{50R}$ ) igual à zero e desvio padrão ( $\sigma_R$ ) igual à 1).

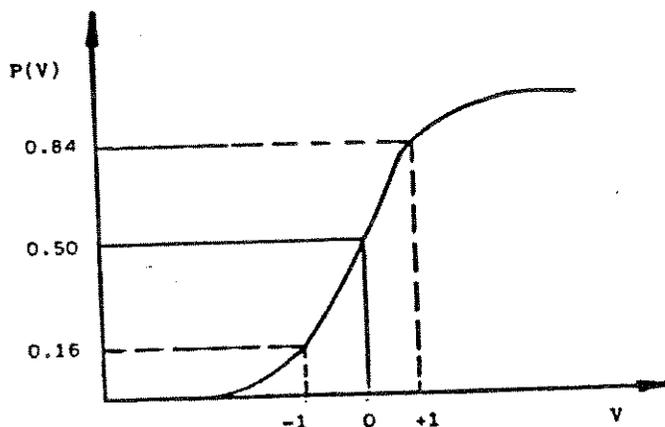


Figura 5.1 - Distribuição Gaussiana normalizada.

#### 5.1.1. Tensão Disruptiva Crítica (V50%)

##### 5.1.1.1. Influência do número de aplicações (N)

O número de aplicações de tensão foi variado de  $N = 10$  a 100, nesse caso, com degrau de tensão fixo,  $d = 0,1 R$ .

Os resultados estão mostrados nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, em função da tensão  $V_i$  normalizada.

Esses gráficos mostram que o valor médio  $\bar{V}_{50c}$  se aproxima do valor real  $V_{50R}$ , ao mesmo tempo em que a sua dispersão diminui com o aumento do número  $N$  de aplicações.

A figura 5.5 mostra com maior clareza a influência do número de aplicações no cálculo do valor da tensão disruptiva crítica, notando-se que o seu valor médio  $\bar{V}_{50c}$  tende para valores próximos do real, principalmente para  $V_i = -1,0$ ,  $0,0$  e  $+1,0$ ; com o aumento do número de aplicações  $N$ . Essa tendência se estabiliza à partir de  $N = 70$  aplicações.

Em termos de valor médio  $\bar{V}_{50c}$ , o erro obtido ao se calcular  $V_{50\%}$  com 20 aplicações, será de no máximo  $\pm 0,067 \sigma R$ . Isto se considerarmos que a tensão inicial estará entre  $-1.0$  e  $+1.0$ .

Em termos de dispersão dos resultados  $\sigma V_{50c}$ , a figura 5.6 ilustra igual tendência do parâmetro  $\sigma V_{50c}$  de variação com o número de aplicações  $N$ .

Para  $N = 20$  a dispersão esperada é da ordem de  $\pm 0,30 \sigma R$ , também no caso de tensão inicial na faixa de  $\pm 1.0 \sigma R$ .

Como pode ser visto na tabela 5.1, para  $N = 20$  aplicações,  $d = \sigma R$  e com tensão inicial na faixa de  $V_{50R} \pm \sigma R$ , somando-se o erro devido ao cálculo do valor médio ao da dispersão esperada vamos ter no cálculo de  $V_{50\%}$  um erro aproximado  $V_{50\%}$  de  $\pm 0,37 \sigma R$  em relação ao valor real  $V_{50R}$ .

TABELA 5.1 - Intervalo de confiança no cálculo de  $V_{50c}$  para  $N = 20$  aplicações.

$V_i$	$\bar{V}_{50c} - \sigma V_{50c}$	$\bar{V}_{50c} + \sigma V_{50c}$
$V_{50R} - \sigma R$	- 0,37	+ 0,23
$V_{50R}$	- 0,23	+ 0,30
$V_{50R} + \sigma R$	- 0,23	+ 0,37

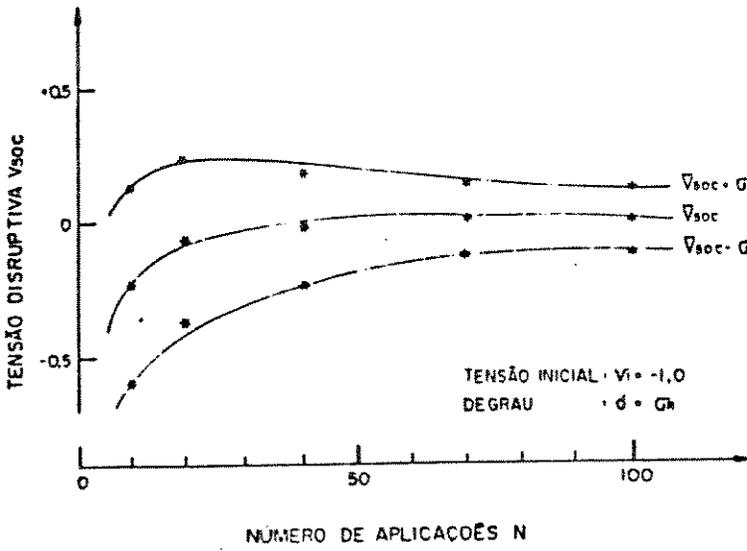


Fig.5.2- Gráfico V50C X N  
para:  $V_i = -1.0$   
 $d = \sigma R$

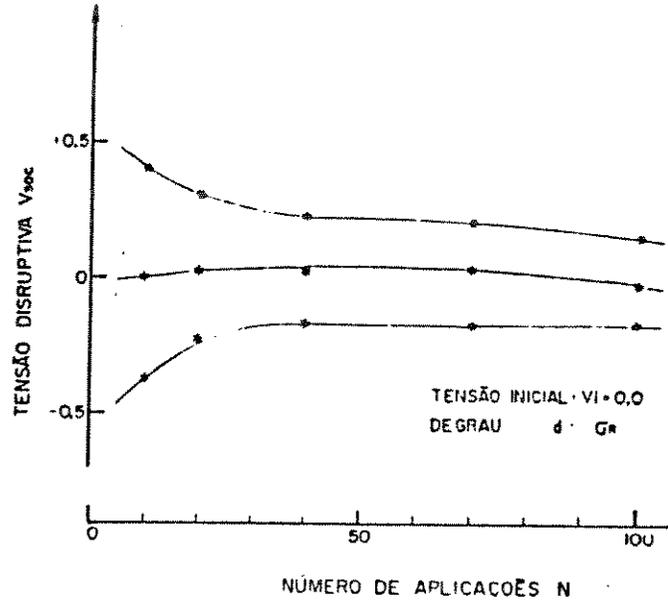


Fig.5.3- Gráfico V50C X N  
para:  $V_i = 0.0$   
 $d = \sigma R$

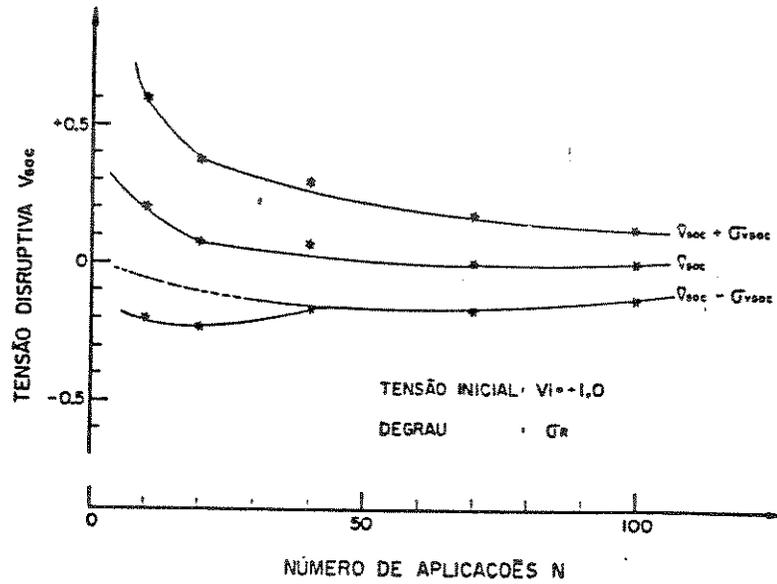


Fig.5.4- Gráfico V50C X N  
para  $V_i = +1.0$   
 $d = \sigma R$

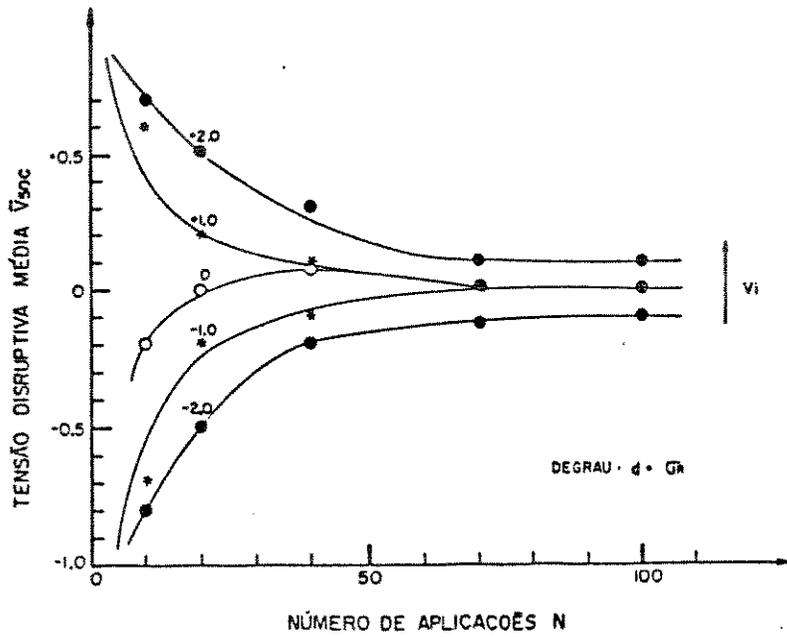


Fig.5.5- Gráfico  $V_{50C} \times N$   
para:  $d = \sigma R$   
com  $V_i$  variável

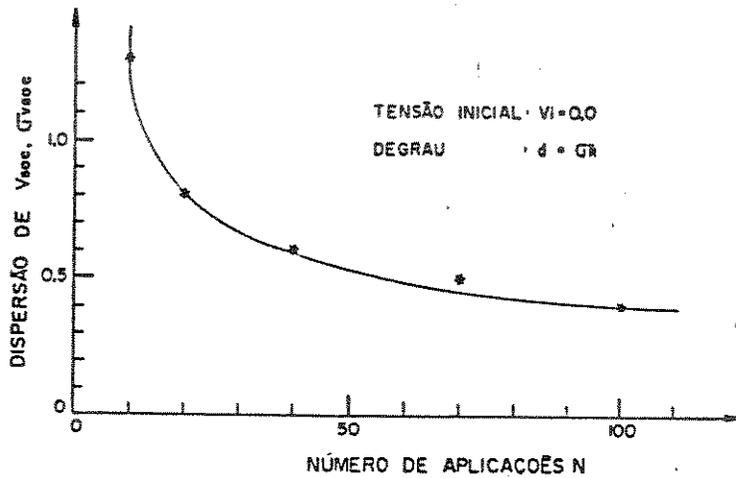


Fig.5.6- Gráfico  $V_{50C} \times N$   
para:  $V_i = 0.0$   
 $d = \sigma R$

A tabela 5.2 mostra um quadro resumo dos intervalos para outros valores de N.

Tabela 5.2 - Intervalo de confiança no cálculo de V50

N	Faixa	
20	$V50R - 0,37 \sigma R$	$V50R + 0,37 \sigma R$
40	$V50R - 0,23 \sigma R$	$V50R + 0,30 \sigma R$
70	$V50R - 0,13 \sigma R$	$V50R + 0,17 \sigma R$
100	$V50R - 0,13 \sigma R$	$V50R + 0,13 \sigma R$

#### 5.1.1.2. Influência do degrau de tensão (d)

As figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram, respectivamente para degraus de tensão  $0,5 \sigma R$ ,  $1,5 \sigma R$  e  $2 \sigma R$ , mostram a variação da tensão disruptiva crítica com o degrau de tensão d, em função de N e  $V_i$ .

Todos os gráficos mostram igual tendência de diminuição da dispersão com o aumento do número de aplicações N, tendência essa já observada para degrau  $d = \sigma R$ , mostrado no item anterior.

Quanto maior o degrau de tensão, maior é a dispersão dos resultados obtidos de V50C, enquanto que efeito contrário tem o aumento do degrau no tocante ao valor médio  $\bar{V}50C$ .

Esses fatos podem ser melhor observados nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12, respectivamente para tensões iniciais de  $(V50R - \sigma R)$ ,  $(V50R)$  e  $(V50R + \sigma R)$  com número de aplicações fixo  $N = 20$ .

TABELA 5.3

Intervalo de confiança do valor calculado de V50C para  
 $N = 20$ ,  $V_i = V_{50R}$ .

d	$\bar{V}_{50C} - \sigma V_{50C}$	$\bar{V}_{50C} + \sigma V_{50C}$
0,25	- 0,21	+ 0,24
0,50	- 0,27	+ 0,29
1,00	- 0,35	+ 0,35
1,50	- 0,34	+ 0,34
2,00	- 0,30	+ 0,44
2,50	- 0,44	+ 0,37

TABELA 5.4

Intervalo de confiança do valor calculado de V50C para  
 $N = 40$ ,  $V_i = V_{50R}$

d	$\bar{V}_{50C} - \sigma V_{50C}$	$\bar{V}_{50C} + \sigma V_{50C}$
0,25	- 0,17	+ 0,15
0,50	- 0,18	+ 0,17
1,00	- 0,22	+ 0,20
1,50	- 0,23	+ 0,25
2,00	- 0,26	+ 0,24
2,50	- 0,26	+ 0,30

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram um quadro resumo da dispersão esperada dos valores de V50% ( $\bar{V}_{50C} \pm \sigma V_{50C}$ ) para  $N = 20$  e 40 aplicações, com degrau variável e  $V_i = V_{50R}$ .

Se considerarmos tensões iniciais na faixa de  $V50R + \sigma R$  a  $V50R - \sigma R$  e levando em conta o erro máximo esperado temos os resultados da tabela 5.5 para  $N = 20$  aplicações.

TABELA 5.5

Intervalo de confiança de  $V50$  para  $N = 20$ , quando a tensão inicial é  $V50R + \sigma R$ .

d	$\bar{V}50C - \sigma V50C$	$\bar{V}50C + \sigma V50C$
0,25	- 0,50	+ 0,45
0,50	- 0,41	+ 0,46
1,00	- 0,40	+ 0,35
1,50	- 0,34	+ 0,42
2,00	- 0,37	+ 0,46
2,50	- 0,44	+ 0,37

No caso de  $d = 2,5\sigma R$ , ou seja para  $d > \sigma R$ , a dispersão em torno de  $V50R$  pode alcançar valores da ordem de  $0,44\sigma R$ , com  $N = 20$  e  $V_i = V50R$ . O uso de degraus  $d < \sigma R$  fornecem bons resultados, desde que a tensão inicial seja próxima de  $V50R$ . Caso contrário, podem levar, por exemplo à um erro da ordem de  $0,50\sigma R$ , para  $d = 0,25\sigma R$  e  $V_i = -1,0\sigma R$ . (tabela 5.5 e figuras 5.11 e 5.12).

A figura 5.13 mostra claramente o aumento da dispersão absoluta com o aumento do degrau de tensão, para  $N = 20$  aplicações e  $V_i = V50R$ .

A tabela 5.6 mostra a mesma dispersão absoluta, para  $N = 20$  e  $N = 40$  aplicações, com  $V_i = V50R$  e sua variação com o degrau de tensão. Embora nos dois casos haja um aumento da dispersão com o aumento do degrau de tensão os valores são menores para  $N = 40$ .

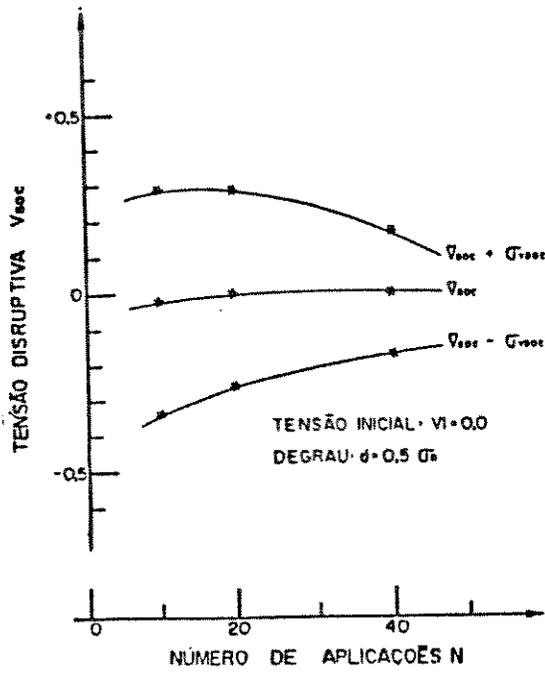


Fig.5.7- Gráfico  $V_{50C} \times N$   
para:  $V_i = 0.0$   
 $d = 0.5 \sigma R$

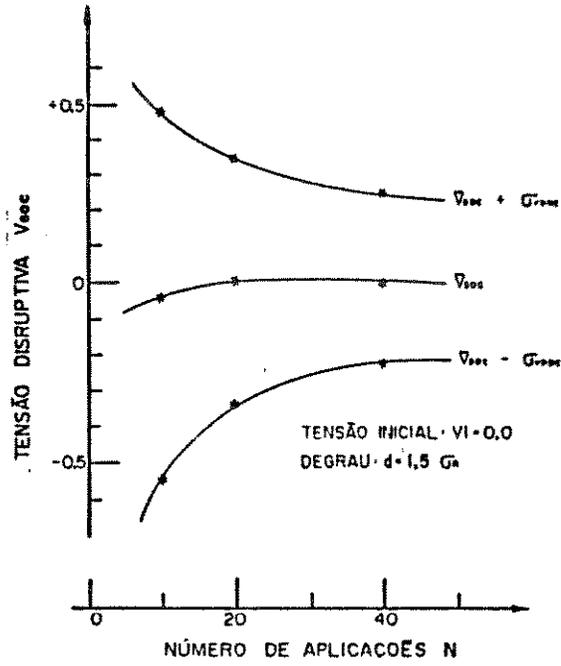


Fig.5.8- Gráfico  $V_{50C} \times N$   
para:  $V_i = 0.0$   
 $d = 1.5 \sigma R$

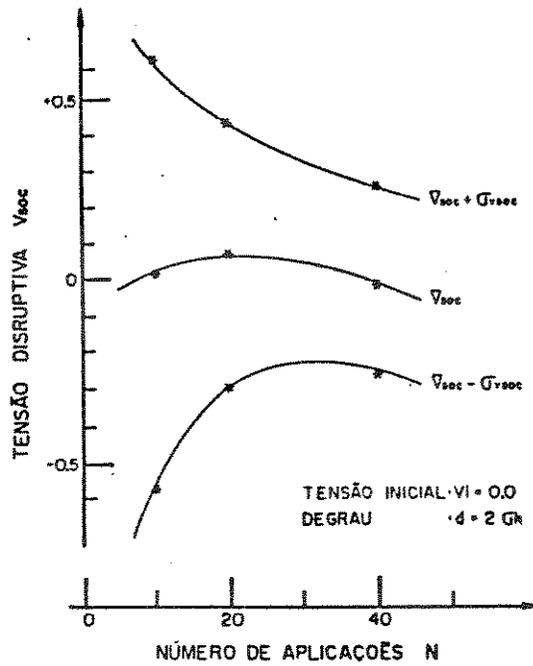


Fig.5.9- Gráfico  $V_{50C} \times N$   
para:  $V_i = 0.0$   
 $d = 2.0 \sigma R$

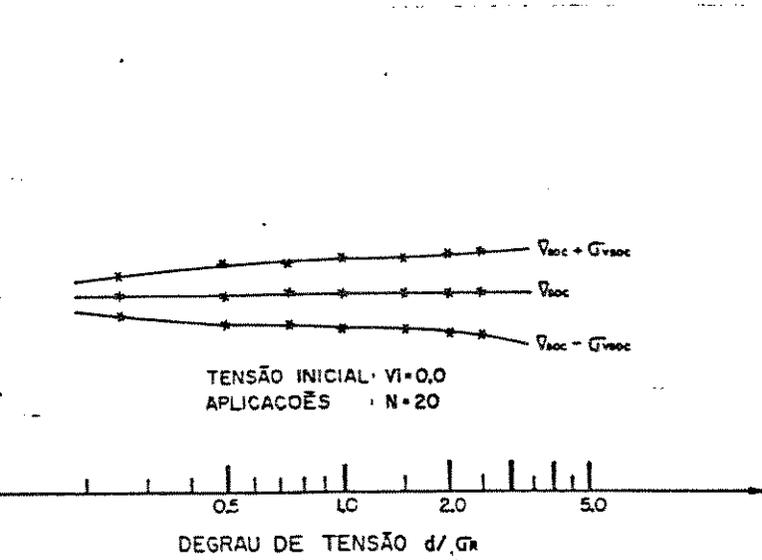


Fig.5.10- Gráfico V50C X  $d/\sigma R$   
para:  $V_i = 0.0$   
 $N = 20$

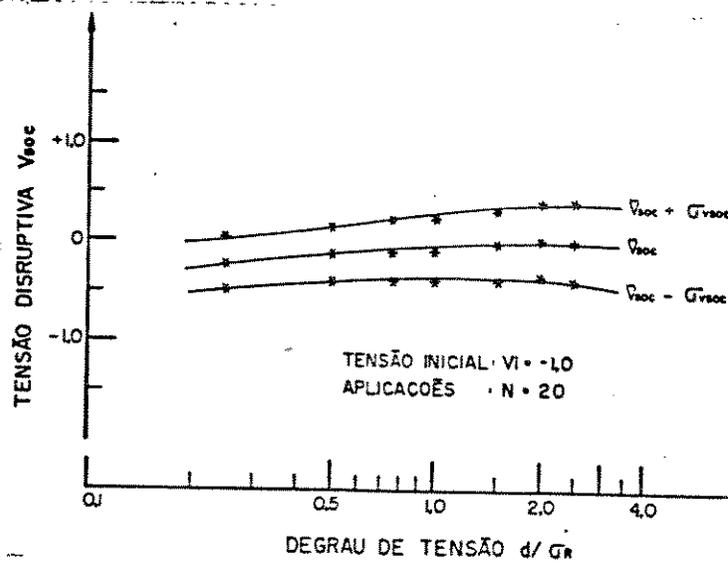


Fig.5.11- Gráfico V50C X  $d/\sigma R$   
para:  $V_i = -1.0$   
 $N = 20$

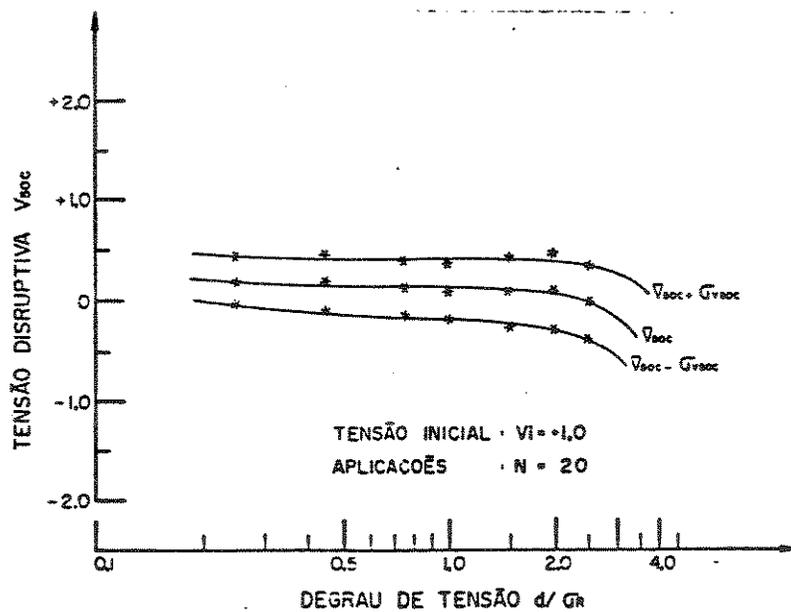


Fig.5.12- Gráfico V50C X  $d/\sigma R$   
para:  $V_i = +1.0$   
 $N = 20$

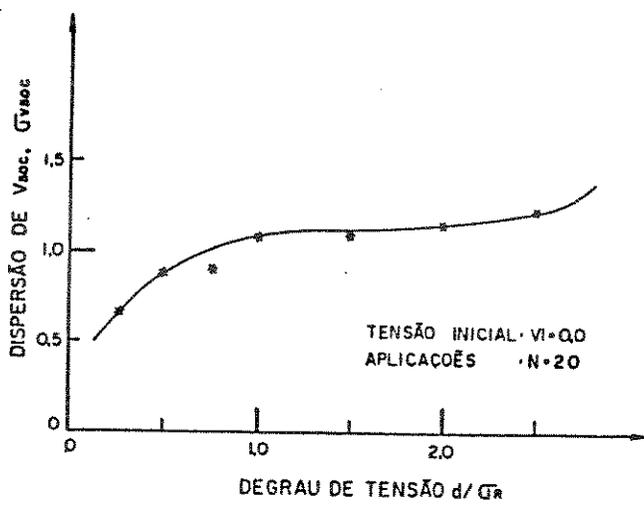


Fig.5.13- Gráfico  $\sigma_{V_{50C}} \times d/\sigma_R$   
para  $V_I = 0.0$   
 $N = 20$

TABELA 5.6

Dispersão absoluta para  $N = 20$  e  $N = 40$  aplicações,  $V_i = V_{50R}$  e  $d$  variável.

d N	20	40
0,25	0,22	0,18
0,50	0,28	0,17
1,00	0,35	0,21
1,50	0,34	0,24
2,00	0,37	0,25
2,50	0,40	0,28

### 5.1.1.3. Influência da tensão inicial ( $V_i$ )

Os resultados dos gráficos anteriores mostram em geral, que a influência da tensão inicial se dá principalmente em função do número de aplicações  $N$ . A principal influência de  $V_i$  ocorre para o valor médio  $\bar{V}_{50C}$  conforme pode ser visto na figura 5.14 para degrau  $d = \sigma R$ , enquanto que em relação a dispersão dos valores  $\sigma V_{50C}$  praticamente não se nota a sua influência, (figura 5.15) para um dado  $N$ .

A tabela 5.7 mostra a faixa esperada de  $V_{50}$ , para  $N = 20$ ,  $d = \sigma R$  e tensões iniciais de  $V_{50R} - 2\sigma R$ , a  $V_{50R} + 2\sigma R$ .

TABELA 5.7

Intervalo de confiança  $\bar{V}_{50C} \pm \sigma V_{50C}$  para  $N = 20$  e  
 $d = \sigma R$ .

$V_i$	$\bar{V}_{50C} - \sigma V_{50C}$	$\bar{V}_{50C} + \sigma V_{50C}$
$V_{50R} - 2.0 \sigma R$	- 0,50	+ 0,17
$V_{50R} - 1.0 \sigma R$	- 0,37	+ 0,23
$V_{50R}$	- 0,23	+ 0,30
$V_{50R} + 1.0 \sigma R$	- 0,23	+ 0,37
$V_{50R} + 2.0 \sigma R$	- 0,17	+ 0,50

A dispersão de  $V_{50C}$  com  $V_i$  para outros degraus de tensão, quando o número de aplicações é  $N = 20$ , pode ser vista na tabela 5.8. Pode-se observar que não existe uma relação constante de variação de  $\sigma V_{50C}$  com  $V_i$ .

TABELA 5.8

Dispersão absoluta  $\sigma_{V50}$  em função de  $V_i$  e  $d$  com  $N = 20$  aplicações.

$V_i \quad d \quad \sigma_R$	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
$V_{50R} - \sigma_R$	0,27	0,28	0,32	0,33	0,39	0,39
$V_{50R}$	0,22	0,28	0,35	0,34	0,37	0,40
$V_{50R} + \sigma_R$	0,24	0,30	0,29	0,34	0,37	0,36

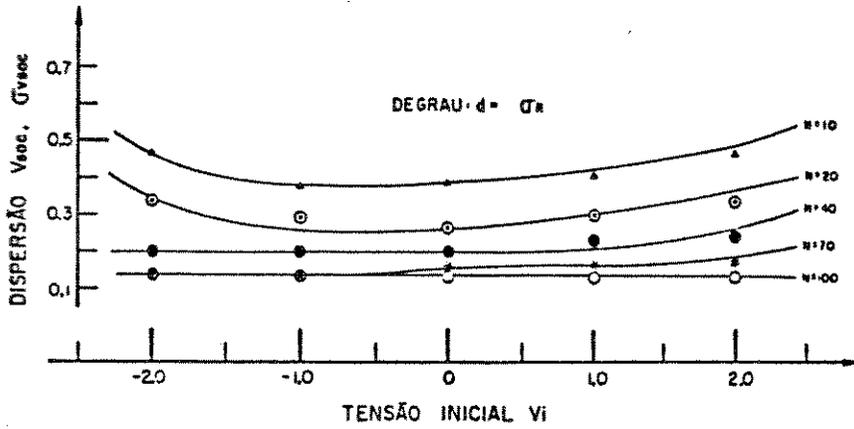


Fig.5.14- Gráfico  $\sigma V50C \times V_i$   
para:  $d = \sigma R$   
com N variável

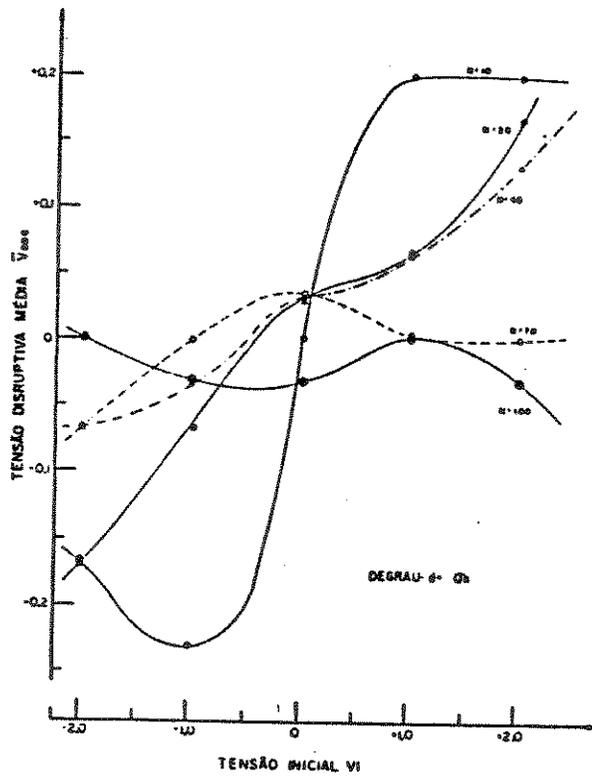


Fig.5.15- Gráfico  $\bar{V}50C \times V_i$   
para  $d = \sigma R$   
com N variável

### 5.1.2. Desvio Padrão ( $\sigma$ )

No caso do método de acréscimo e decréscimo o valor do desvio padrão  $\sigma$  da curva de probabilidade de descarga pode ser calculado, segundo Dixon por:

$$\sigma = 1.620 d \left( \frac{s_y^2}{d^2} + 0.029 \right)$$

onde:

$$s_y^2 = \frac{\sum v_j^2 - (\sum v_j)^2/n}{n-1}$$

#### 5.1.2.1. Influência do número de aplicações de tensão (N)

Os resultados do valor médio  $\bar{\sigma}_C$  e da dispersão  $\sigma_{\sigma C}$  são mostrados respectivamente nas figuras 5.16 e 5.17 para degrau de tensão fixo  $d = \sigma_R$ .

O valor médio  $\bar{\sigma}_C$  tende para o valor real com o aumento de N (figura 5.16) sendo que para  $N > 30$  aplicações ocorre uma estabilização em termos do seu valor real  $\sigma_R$ , especialmente para  $V_i = V_{50R}$ .

A figura 5.17 mostra que a dispersão dos resultados diminui com o aumento do número de aplicações.

A tabela 5.9 mostra para  $N = 20, 40$  e  $100$  os valores de  $\sigma_{\sigma C}$  para três tensões iniciais  $V_{50R} - \sigma_R$ ,  $V_{50R}$  e  $V_{50R} + \sigma_R$ .

TABELA 5.9 - Dispersão dos resultados  $\sigma_{\sigma C}$ .

N	$V_i$	$V_{50R} - \sigma_R$	$V_{50R}$	$V_{50R} + \sigma_R$
20		0.45	0.40	0.48
40		0.30	0.33	0.25
100		0.22	0.18	0.19

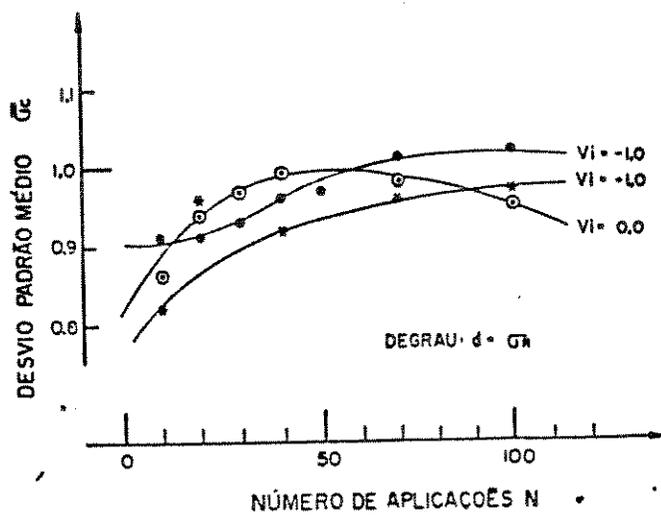


Fig.5.16- Gráfico  $\bar{\sigma}_c \times N$   
para:  $d = \sigma R$   
com  $V_i$  variável

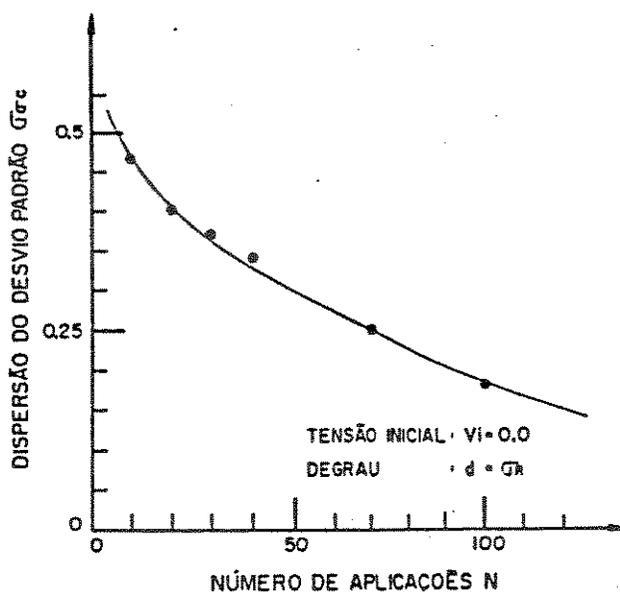


Fig.5.17- Gráfico  $\sigma_{\sigma_c} \times N$   
para:  $V_i = 0,0$   
 $d = \sigma R$

Se incluirmos o efeito do valor médio ao da dispersão temos a faixa de  $\bar{\sigma} C \pm \sigma \sigma C$  conforme a tabela 5.9, para de- grau de tensão fixo  $d = \sigma R$  e  $V_i = V_{50R}$ .

TABELA 5.10 - Faixa de valores de desvio padrão calculados  $\bar{\sigma} C \pm \sigma \sigma C$  para  $V_i = V_{50R}$  e  $d = \sigma R$ .

N	$\bar{\sigma} C - \sigma \sigma C$	$\bar{\sigma} C + \sigma \sigma C$
20	0,54	1,34
40	0,65	1,33
100	0,77	1,13

Para  $N = 20$ , num intervalo de confiança de 65%, os erros obtidos no cálculo de  $\sigma C$  pelo método do acréscimo e decréscimo podem chegar a valores altos, no caso de até a 46% abaixo e 34% acima do valor real. Mesmo para  $N = 100$  aplicações os erros esperados são da ordem de 23% abaixo e 13% acima do valor real.

Se considerarmos o intervalo de confiança de 95% ( $\bar{\sigma} \pm 1.96 \sigma \sigma$ ) o erro possível para  $N = 20$  pode alcançar valores como 92% abaixo e 68% acima do valor real. Portanto erros desta ordem praticamente inviabilizam o cálculo de  $\sigma$  pelo método de acréscimo e decréscimo.

#### 5.1.2.2. Influência do Degrau de Tensão (d)

Os resultados são mostrados nas figuras 5.18, 5.19 e 5.20, quanto a dispersão dos resultados  $\sigma \sigma C$ , e nas 5.21, 5.22 e 5.23, quanto ao valor médio  $\bar{\sigma} C$  e nas figuras 5.24, 5.25 e 5.26, a faixa esperada de  $\bar{\sigma} C \pm \sigma \sigma C$ , obtidas para tensões iniciais  $V_{50R} - \sigma R$ ,  $V_{50R}$  e  $V_{50R} + \sigma R$ .

Os resultados obtidos concordam de uma maneira geral com os já mencionados para degrau de tensão fixo  $d = \sigma R$  ou seja, qualquer que seja o degrau de tensão utilizado a dispersão dos resultados  $\sigma_C$  diminui com o aumento de  $N$ .

As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20, mostram ainda existência de uma certa aleatoriedade nos resultados da dispersão  $\sigma_C$  com o degrau de tensão.

No caso de  $V_i = V_{50R}$  o aumento do degrau de tensão reduz a dispersão. O mesmo não se observa para  $V_i = V_{50R} - \sigma R$ , onde mostra uma tendência de diminuição de  $\sigma_C$  até  $d = 2\sigma R$ , ocorrendo um novo acréscimo da dispersão, após este valor.

Os resultados para  $V_i = V_{50R} - \sigma R$  são mais complexos que as anteriores. De uma forma geral nota-se tendências de redução da dispersão  $\sigma_C$  com o aumento de  $N$  e do degrau de tensão.

Com  $N = 10$  por exemplo, portanto para ensaios com poucas aplicações de tensão, observa-se uma variação bastante grande da dispersão com o degrau de tensão, tendendo a se estabilizar em torno de  $0.75 \sigma R$  a  $1.5 \sigma R$ . Após  $1.5 \sigma R$  há novamente aumento da dispersão com tendências a estabilização para valores superiores a  $2.5 \sigma R$ .

Pode-se concluir das figuras 5.18, 5.19 e 5.20, que nas faixas de  $d = \sigma R$  e  $d = 1.5 \sigma R$  os resultados obtidos apresentam valores baixos de dispersão relativamente aos demais degraus de tensão.

Em relação ao valor médio  $\bar{\sigma}_C$  a tendência observada é de se aproximar do valor real  $\sigma R$  até  $d = 2 \sigma R$ . A partir desse ponto o comportamento das curvas de  $\bar{\sigma}_C$  dependem da tensão inicial  $V_i$ .

Se  $V_i = V_{50R}$ , em degraus de tensão maiores que  $d = 2\sigma_R$ , o valor médio de  $\sigma_C$  são maiores que o real  $\sigma_R$ , independente do número de aplicações (figura 5.21). Se  $V_i = V_{50R} \pm \sigma_R$ , o valor médio  $\bar{\sigma}_C$  mostra ser sempre menor que o valor real  $\sigma_R$ . Ocorrem picos de máximo desvio  $\bar{\sigma}_C$  em torno de  $d = 1,5 \sigma_R$  para  $V_i = V_{50R} + \sigma_R$  e em  $d = \sigma_R$  para  $V_i = V_{50R} - \sigma_R$ .

Estas observações podem ser verificadas de forma mais clara a partir das figuras 5.24, 5.25 e 5.26, onde mostramos para  $N$  fixo igual a 20 aplicações, a faixa de valores de  $\sigma$  calculado e sua variação com o degrau de tensão  $d$  em função de  $V_i$ . A faixa mais estreita, portanto a mais próxima do real, dos valores de  $\sigma_C$ , correspondem aquelas calculadas para degrau de tensão entre  $d = \sigma_R$  a  $2\sigma_R$ .

Os resultados para  $N = 20$  com  $V_i = V_{50R}$  estão resumidos na tabela 5.11.

TABELA 5.11 - Variação de  $\sigma_C$  com degrau de tensão  $d$ .  
 $N = 20$   $V_i = V_{50R}$

$d/\sigma_R$	$\bar{\sigma}_C - \sigma_{\sigma_C}$	$\bar{\sigma}_C + \sigma_{\sigma_C}$
0,25	0,26	0,85
0,50	0,33	1,30
0,75	0,49	1,31
1,00	0,48	1,41
1,50	0,56	1,30
2,00	0,74	1,23
2,50	0,96	1,36
3,00	1,19	1,54

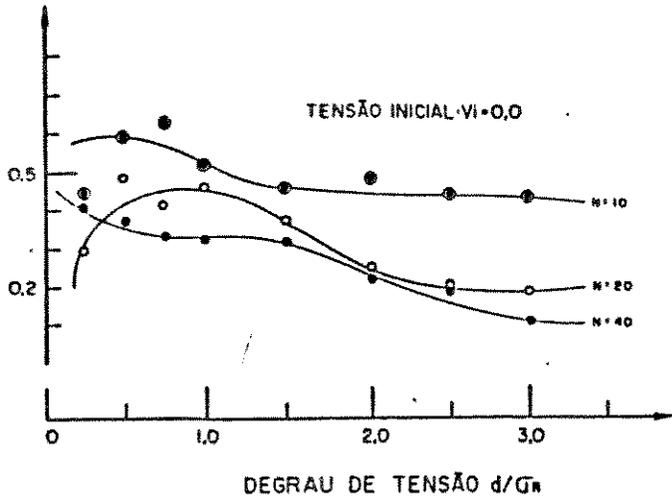


Fig.5.18- Gráfico  $\sigma\sigma_C$  X  $d/\sigma_R$  para:  $V_i=0,0$  com N variável

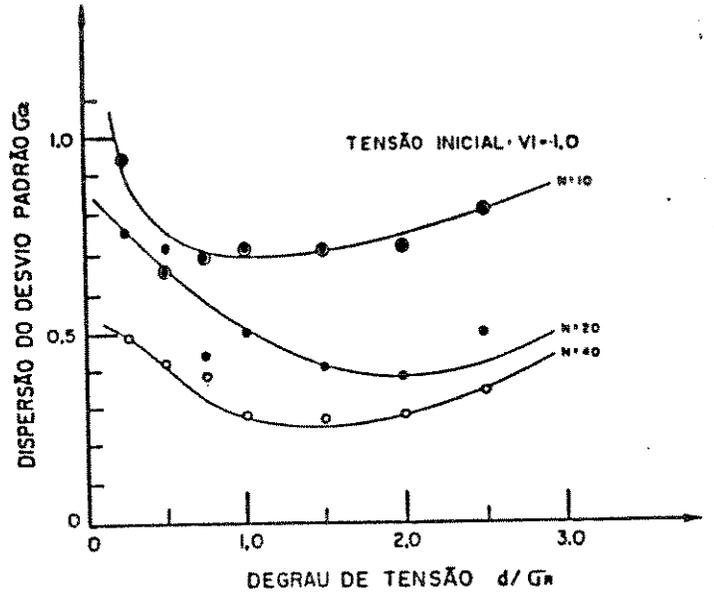


Fig.5.19- Gráfico  $\sigma\sigma_C$  X  $d/\sigma_R$  para:  $V_i=-1,0$  com N variável

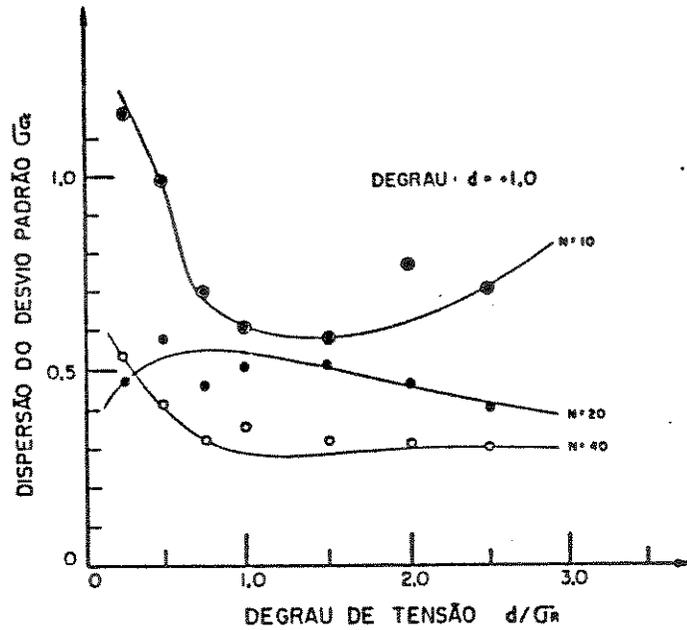


Fig.5.20- Gráfico  $\sigma\sigma_C$  X  $d/\sigma_R$  para:  $d=+1,0$  com N variável

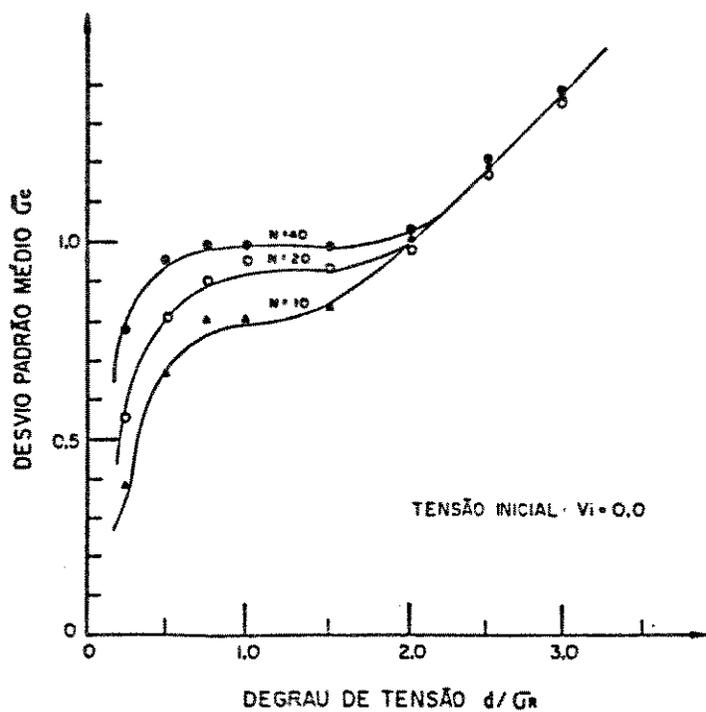


Fig.5.21- Gráfico  $\bar{\sigma}_c \times d/\sigma_R$   
para  $V_i=0.0$   
com  $N$  variável

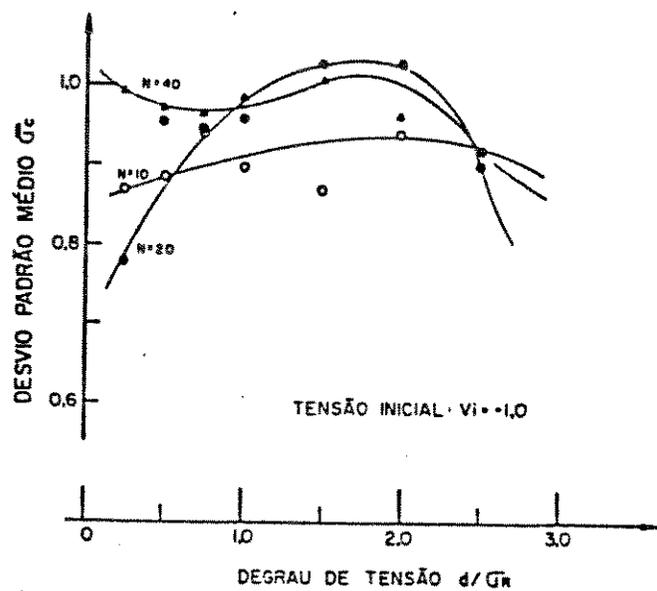


Fig.5.22- Gráfico  $\bar{\sigma}_c \times d/\sigma_R$   
para  $V_i=+1.0$   
com  $N$  variável

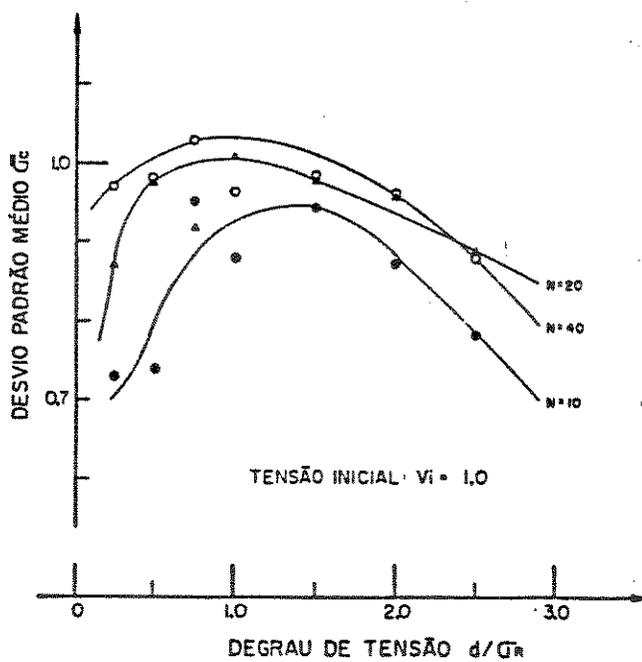


Fig.5.23- Gráfico  $\bar{\sigma}_c \times d/\sigma_R$   
para  $V_i=-1.0$   
com  $N$  variável

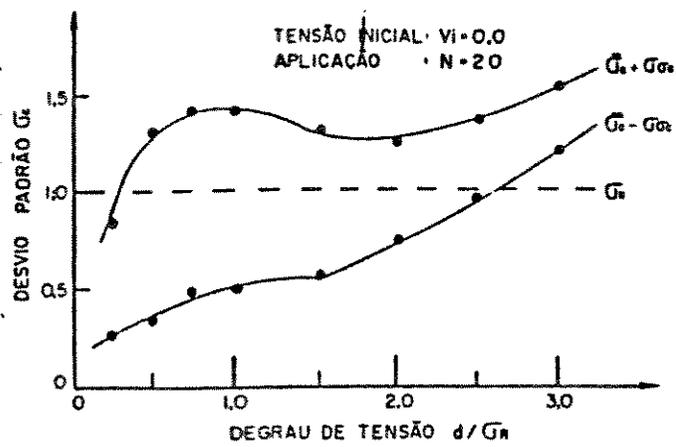


Fig.5.24- Gráfico  $\sigma_c \times d/\sigma_R$   
 para  $V_i = 0.0$   
 $N = 20$

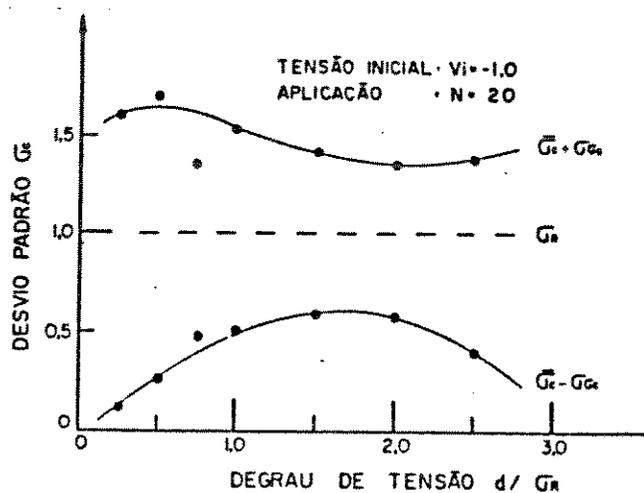


Fig.5.25- Gráfico  $\sigma_c \times d/\sigma_R$   
 para  $V_i = -1.0$   
 $N = 20$

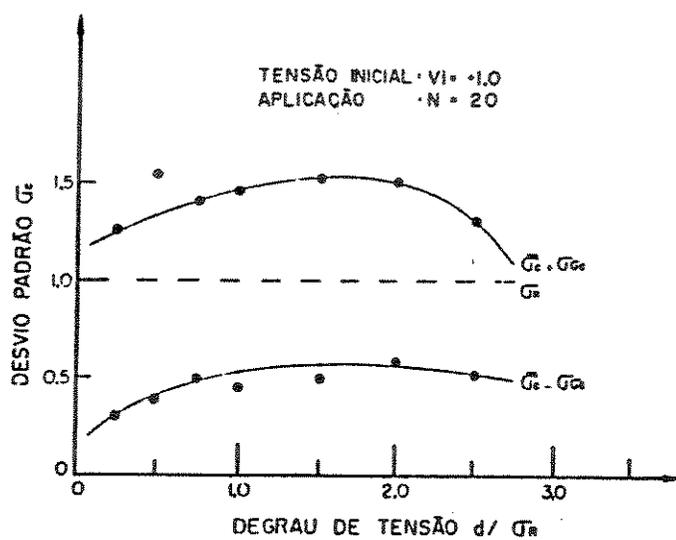


Fig.5.26- Gráfico  $\sigma_c \times d/\sigma_R$   
 para  $V_i = +1.0$   
 $N = 20$

## 5.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados em configurações de eletrodos haste-haste e haste-placa com tensões do tipo impulso atmosférico ( $1,2/50 \mu s$ ) nas polaridade positiva e negativa, pelo método de acréscimo e decréscimo.

Os degraus de tensão utilizados foram de 1,5%, 3%, 4,5% e 6%, valores esses referidos à  $V_{50R}$ , ou seja, 1,5% de  $V_{50R}$ , e assim sucessivamente. Admitindo  $\sigma_R = 3\%$  (caso de impulso atmosférico), os valores de degrau correspondem respectivamente a  $d = 0,5 \sigma_R$ ,  $d = \sigma_R$ ,  $d = 1,5 \sigma_R$  e  $2 \sigma_R$ .

Os números de aplicações de tensão também foi variada desde  $N = 10$  a 100 e repetidas em vários ensaios.

Analogamente aos resultados da simulação computacional, os resultados obtidos experimentalmente também estão apresentados separadamente para tensão disruptiva crítica ( $V_{50\%}$ ) e desvio padrão  $\sigma$  da distribuição de probabilidade de descarga.

A fim de podermos comparar os resultados experimentais com os obtidos através da simulação computacional, os resultados experimentais foram normalizados pelo fator  $\Delta V_e$  definido por:

$$\Delta V_e = 0.03 \times V_{50RE}$$

Definimos a tensão  $V_{50RE}$  como sendo a tensão disruptiva crítica média de uma dada configuração de eletrodos numa dada polaridade. Este valor corresponde ao valor real  $V_{50R}$  adotada na simulação computacional e considerada, neste trabalho como valor de tensão disruptiva crítica obtida a partir de um número suficiente de aplicações de tensões, admitida aqui  $N = 100$  aplicações.

Assim, os resultados são apresentados em função do seu valor médio e da sua dispersão, e, se encontram denotados por:

$\bar{V}_{50e}$  = tensão disruptiva crítica média.

$\sigma_{V50e}$  = dispersão dos valores de tensão disruptiva.

$\bar{\sigma}_e$  = desvio padrão médio.

$\sigma_{\sigma_e}$  = dispersão dos valores do desvio padrão calculados.

### 5.2.1. Tensão Disruptiva Crítica ( $V_{50e}$ )

#### 5.2.1.1. Influência do número de aplicações de tensão (N)

Nas figuras 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30, mostramos os resultados obtidos respectivamente para eletrodos haste-placa e haste-haste nas suas polaridades positiva e negativa. E na figura 5.31 os valores de dispersão  $\sigma_{V50e}$  para estas configurações e uma comparação com os resultados obtidos na simulação computacional.

Os resultados dessas figuras mostram em termos do valor médio da tensão disruptiva crítica, uma tendência a se tornar constante após aproximadamente  $N = 40 - 50$  aplicações de tensão.

Entretanto, como pode se observar da figura 5.31, o problema mais crítico reside na dispersão dos seus resultados. No caso de eletrodo haste-placa temos os dois extremos de dispersão, com os valores máximos ocorrendo para a polaridade positiva e o mínimo para a polaridade negativa. Para configuração haste-haste o comportamento observado é mais suave, invertendo-se aos resultados da haste-placa. Nesta configuração temos valores maiores para a polaridade negativa e menores para polaridade positiva.

Apesar desse comportamento no entanto, tanto em haste-haste quanto em haste-placa, a dispersão diminui com o aumento do número de aplicações, sendo essa tendência menos acentuada (figura 5.31) a partir de  $N > 50$  para Haste-Haste, e  $N > 40$  para Haste-Placa negativa. No caso da haste-placa positiva, observou-se um acréscimo gradativo da dispersão com  $N$  até 80 aplicações tendendo a uma redução rápida após esse ponto. O haste-placa negativa é o que mais se aproxima dos resultados de simulação.

As tabelas 5.12 e 5.13, mostram os valores obtidos de  $\bar{V}_{50e} \pm \sigma V_{50e}$  para  $N = 20$  e  $d = 3\%$ , em termos de valores normalizados (5.12) e em termos percentuais (5.13).

TABELA 5.12 - Faixa de valores de  $\bar{V}_{50e} \pm \sigma V_{50e}$  para  $N = 20$   $d = 3\%$  (valores normalizados).

Elétrodos	$V_{50e} - \sigma V_{50e}$	$V_{50e} + \sigma V_{50e}$
Haste-Haste (+)	- 0,56	+ 0,64
Haste-Haste (-)	- 0,72	+ 0,82
Haste-Placa (+)	- 0,82	+ 0,88
Haste-Placa (-)	- 0,23	+ 0,33

TABELA 5.13 - Faixa de valores de  $\bar{V}50e \pm \sigma V50e$  para  $N = 20$ ;  $d = 3\%$  (valores percentuais).

Eléttodos	$\bar{V}50e - \sigma V50e$	$\bar{V}50e + \sigma V50e$
Haste-Haste (+)	- 1.7%	+ 1.9%
Haste-Haste (-)	- 2.2%	+ 2.5%
Haste-Placa (+)	- 2.5%	+ 2.6%
Haste-Placa (-)	- 0.7%	+ 1.0%

No caso de haste-placa (+), num intervalo de confiança de 95% ( $V'50e + 2 \sigma V50e$ ) temos uma faixa de valores calculados de  $V50Re - 4.8\%$  a  $V50Re + 5.6\%$ , que corresponde a uma dispersão de aproximadamente  $\pm 5\%$ . No melhor caso, que se verifica para haste-placa (-) a dispersão esperada é da ordem de 1%, o que significa no intervalo de confiança de 95% uma dispersão de aproximadamente  $\pm 2\%$ .

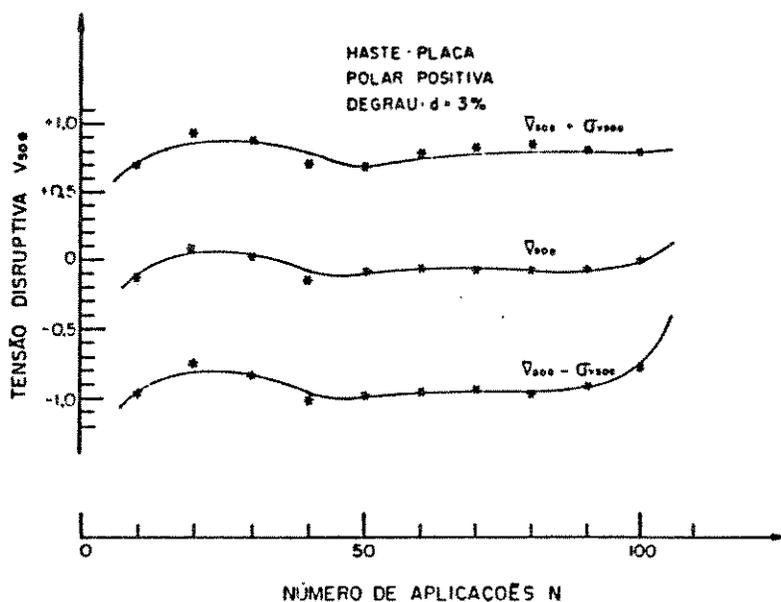


Fig.5.27- Gráfico  $V_{50e}$  X N  
para  $d = 3\%$   
Haste-Placa (+)

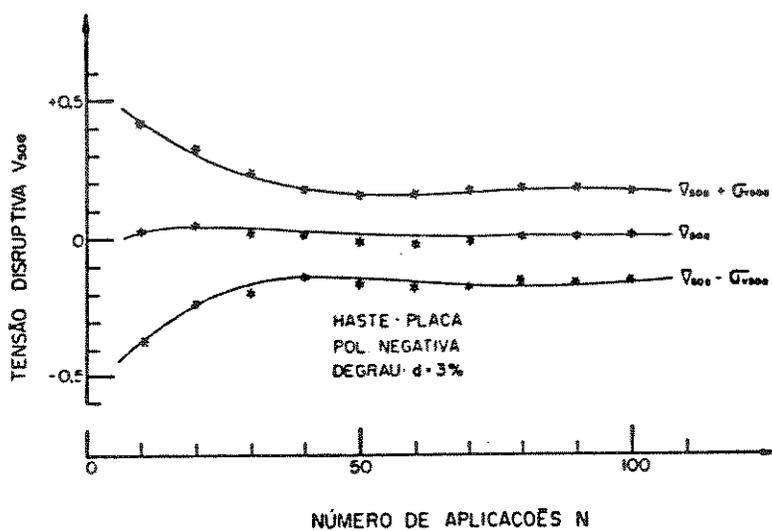


Fig.5.28- Gráfico  $V_{50e}$  X N  
para  $d = 3\%$   
Haste-Placa (-)

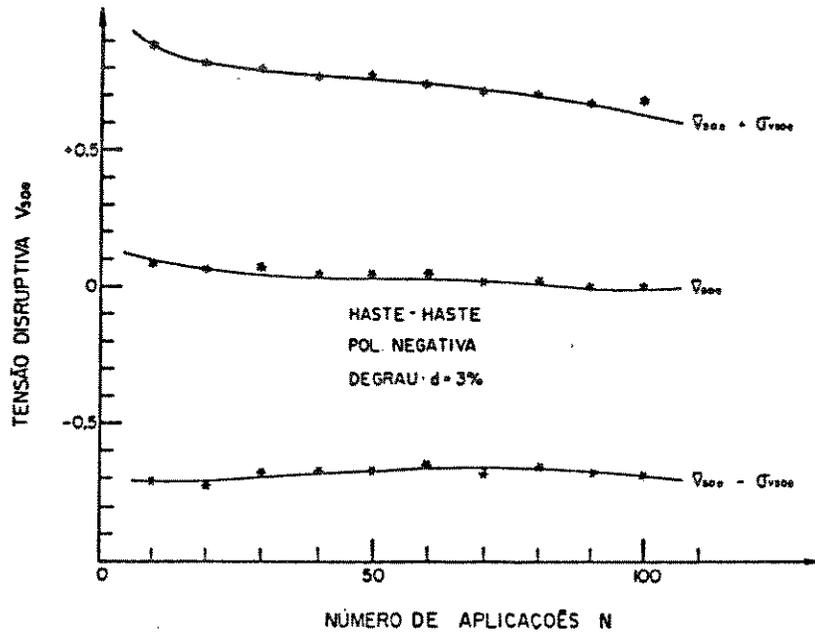


Fig.5.29- Gráfico  $V_{50e}$  X N  
 $d = 3\%$   
Haste-Haste (-)

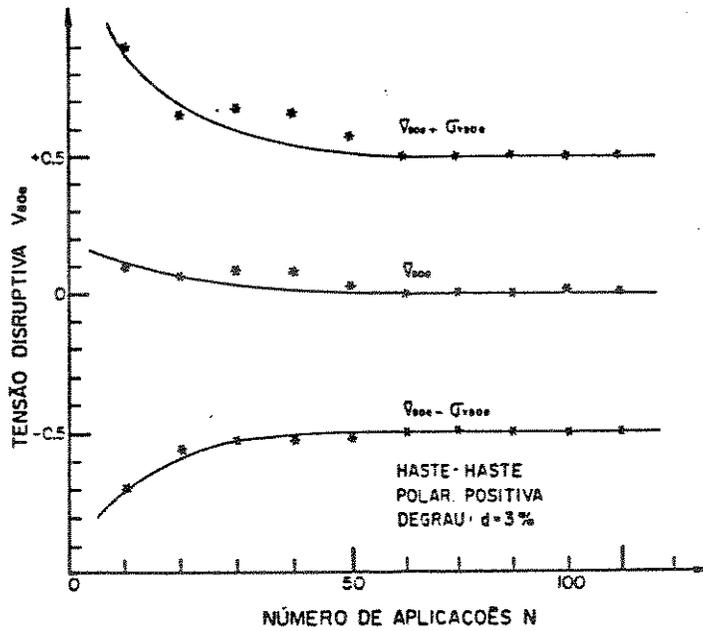


Fig.5.30- Gráfico  $V_{50e}$  X N  
para  $d = 3\%$   
Haste-Haste (+)

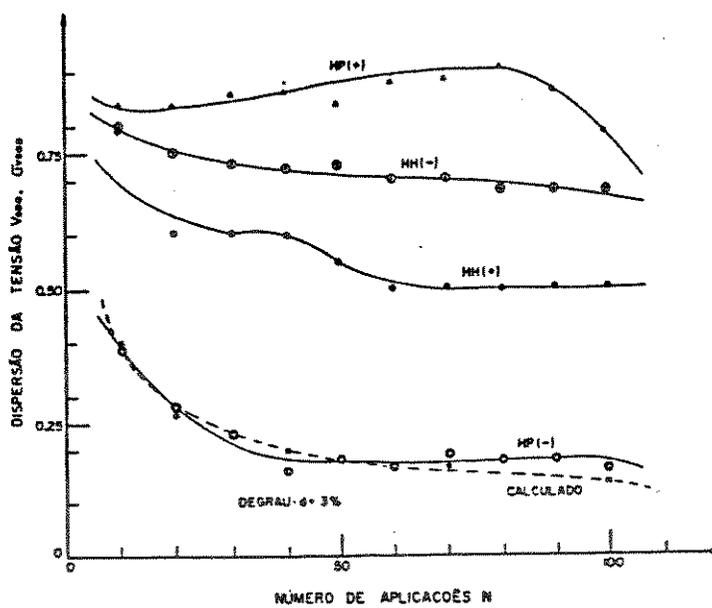


Fig.5.31- Gráfico  $\sigma_{V50e} \times N$   
para  $d=3\%$

A tabela 5.14 mostra, em termos percentuais, os resultados das dispersões obtidas para  $N = 20, 40$  e  $100$  aplicações.

TABELA 5.14 - Dispersão dos resultados de  $V_{50e}$  com  $d = 3\%$  para  $N = 20, 40$  e  $100$ .

Eletrodos	20	40	100
Haste-Haste (+)	1.8%	1.8%	1.5%
Haste-Haste (-)	2.2%	2.1%	2.0%
Haste-Placa (+)	2.5%	2.5%	2.4%
Haste-Placa (-)	0.8%	0.5%	0.5%

#### 5.2.1.2 - Influência do Degrau de Tensão( $d$ )

Nas figuras 5.32 a 5.37 são apresentadas os resultados de tensão disruptiva crítica  $V_{50e}$  obtidas para a configuração haste-haste, nas polaridades positiva e negativa, com degraú de tensão iguais a  $0,5\sigma R$ ,  $1,5\sigma R$  e  $2\sigma R$ .

Destes resultados, independente de considerarmos se todos os ensaios foram efetuados com tensões iniciais aproximadamente iguais ou não, observamos que a tensão  $V_{50e}$ , além de depender de  $N$ , varia bastante com a escolha do degraú de tensão. Independente da polaridade observa-se também menores dispersões para  $d = 1,5\sigma R$  (4,5%).

Estes resultados são mais perceptíveis a partir das figuras 5.38 e 5.39 onde apresentamos os resultados de  $V_{50e}$  em função da variação do degrau de tensão respectivamente para as polaridades positiva e negativa com  $N$  fixo igual a 20 aplicações.

Verifica-se uma clara tendência da diminuição da dispersão com o degrau de tensão  $d$ . No entanto, isto ocorre até um dado degrau de tensão (no caso  $d = 1,5 \sigma R$ ) passando novamente a aumentar em  $d = 2 \sigma R$  (6%). Ou seja, existe um degrau de tensão ótimo em que devem ser realizado os ensaios, que no caso de  $N = 20$  aplicações é de  $d = 1,5 \sigma R$ .

Na tabela 5.15 apresentamos a dispersão de  $V_{50e}$  obtidas pra  $N = 20$  e 100 aplicações em função do degrau de tensão utilizado. Nota-se que a dispersão varia não somente com o degrau de tensão, mas também com o número de aplicações  $N$  e da polaridade da tensão utilizada para o ensaio. No caso de  $N = 20$  aplicações, temos para haste-haste polaridade positiva uma dispersão mínima de 1,2% para  $d = 1,5 \sigma R$  e de 2,7% para  $d = 2 \sigma R$ , enquanto que para polaridade negativa, temos o mínimo de 0,5% para  $d = 1,5 \sigma R$  e máximo de 3,1% para  $d = 0,5 \sigma R$ .

Com  $N = 100$  aplicações o mínimo se verifica em  $d = 1,5 \sigma R$  e o máximo em  $2 \sigma R$  tanto na polaridade positiva quanto na negativa.

Considerando que em ensaios usualmente utilizamos degrau de tensão igual a 3% de  $V_{50}$  a menos de casos específicos, admitindo para  $N = 20$ , a dispersão observada para este caso foi de 1,8% e 2,2% respectivamente para polaridades positiva e negativa. Neste caso, num intervalo de confiança de 95% ( $V_{50} \pm 1,96 \sigma$ ), teremos uma dispersão da ordem de  $\pm 4,4\%$  para impulsos de polaridade negativa.

Na figura 5.40 temos o comportamento da dispersão em função do número de aplicações  $N$  tendo como parâmetro o degrau de tensão  $d$  observados para eletrodos do tipo haste-haste. Nota-se em geral que, com o aumento de  $N$  a dispersão se reduz. Assim como  $V_{50e}$  os valores da dispersão também tendem a uma estabilização com o aumento de  $N$ .

TABELA 5.15 - Dispersão  $\sigma_{V_{50e}}$  em percentagem dos valores de  $V_{50e}$  para  $N = 20$  e  $N = 100$  aplicações.

		Haste-Haste (+)		Haste-Haste (-)	
$d \backslash N$	20	100	20	100	
1.5%	1.4	1.4	3.14	2.2	
3.0%	1.9	1.5	2.2	2.0	
4.5%	1.0	0.8	0.7	0.6	
6.0%	2.7	2.5	2.8	2.8	

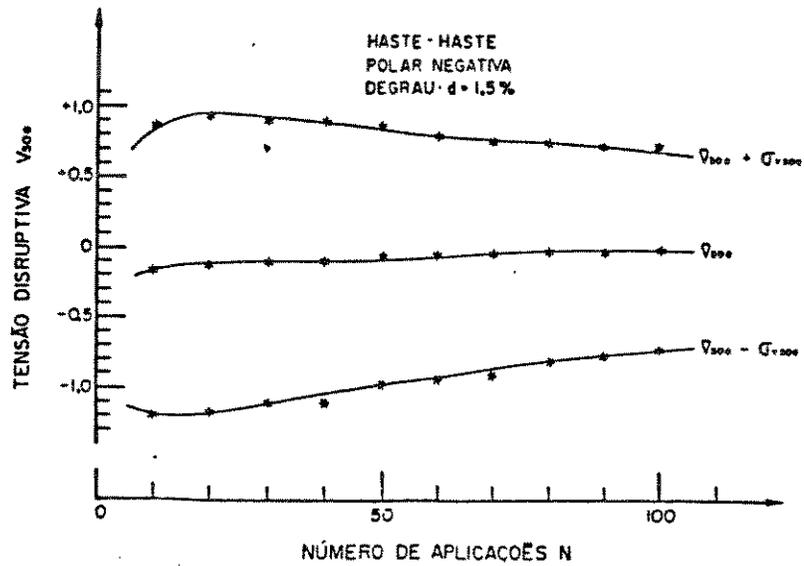


Fig.5.32- Gráfico  $V_{50e} \times N$   
d= 1.5%  
Haste-Haste (-)

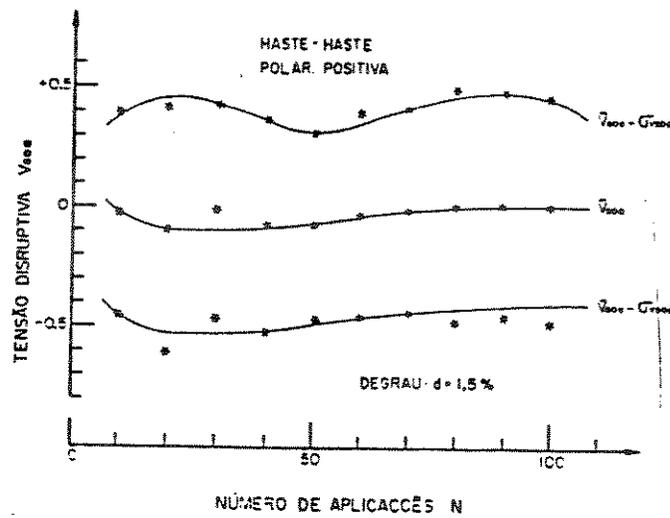


Fig.5.33- Gráfico  $V_{50e} \times N$   
para d= 1.5%  
Haste-Haste (+)

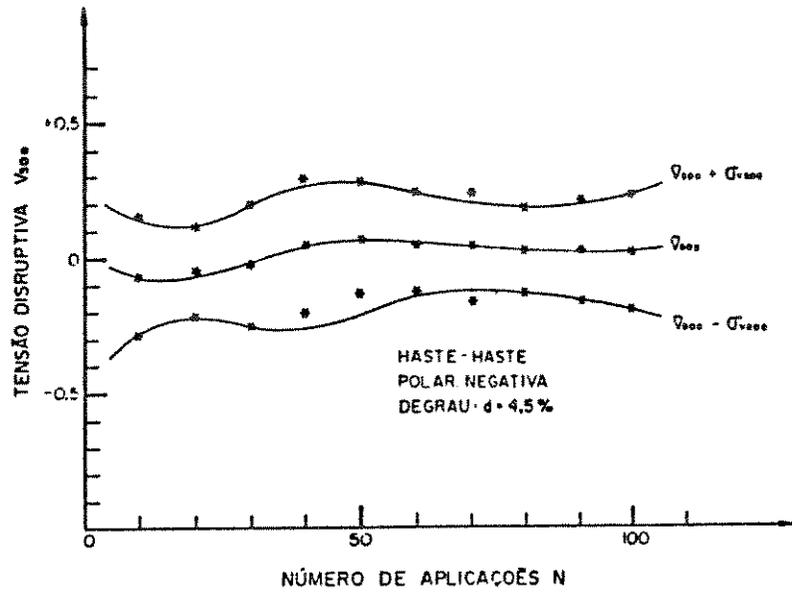


Fig.5.34- Gráfico  $V_{50e} \times N$   
para  $d = 4,5\%$   
Haste-Haste (-)

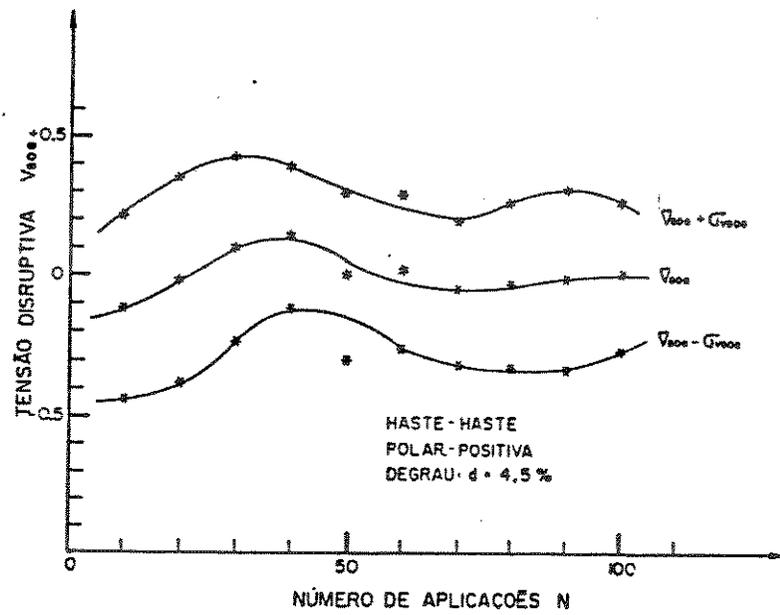


Fig.5.35- Gráfico  $V_{50e} \times N$   
para  $d = 4,5\%$   
Haste-Haste (+)

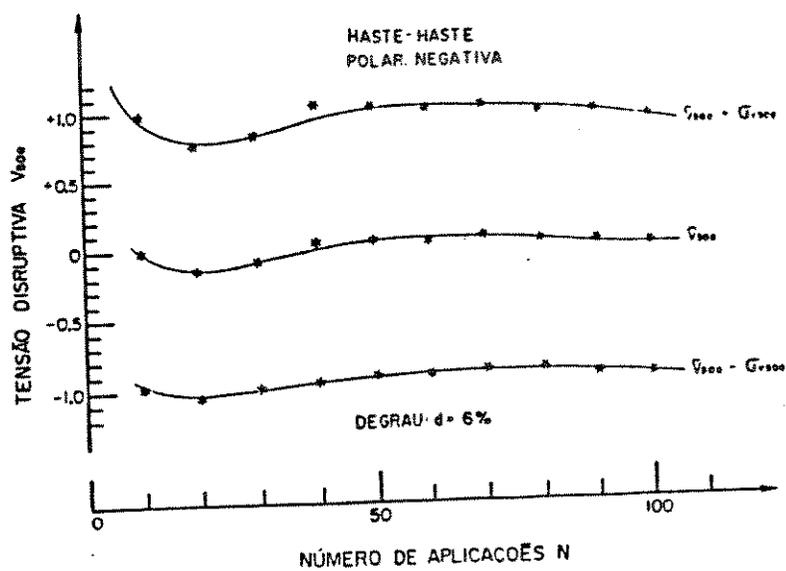


Fig.5.36- Gráfico  $V_{50e}$  X N  
para  $d = 6\%$   
Haste-Haste (-)

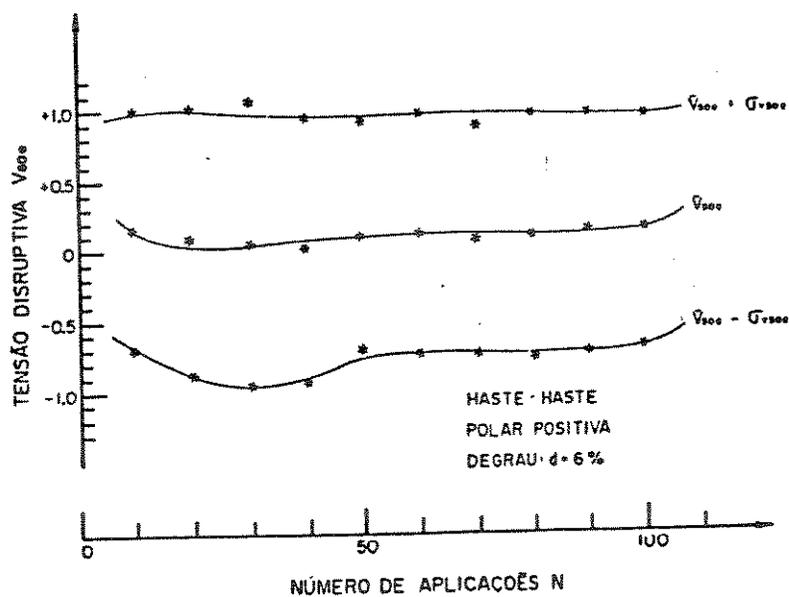


Fig.5.37- Gráfico  $V_{50e}$  X N  
para  $d = 6\%$   
Haste-Haste (+)

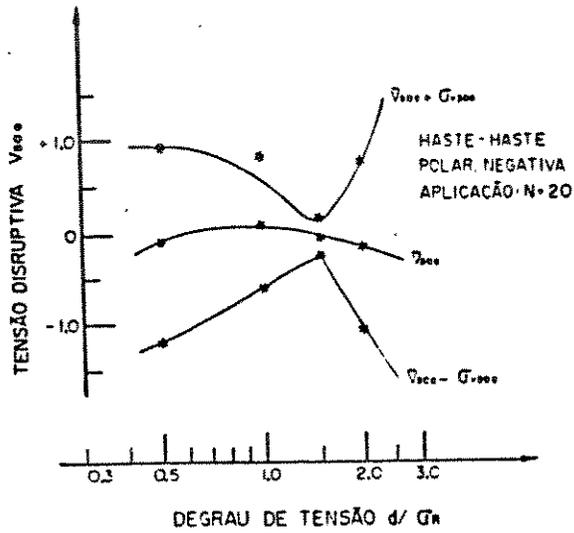


Fig.5.38- Gráfico  $V_{50e} \times d/\sigma_R$   
para  $N=20$   
Haste-Haste (-)

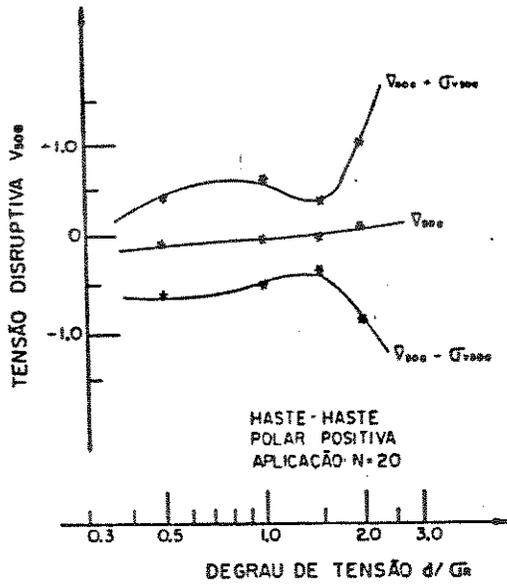


Fig.5.39- Gráfico  $V_{50e} \times d/\sigma_R$   
para  $N=20$   
Haste-Haste(+)

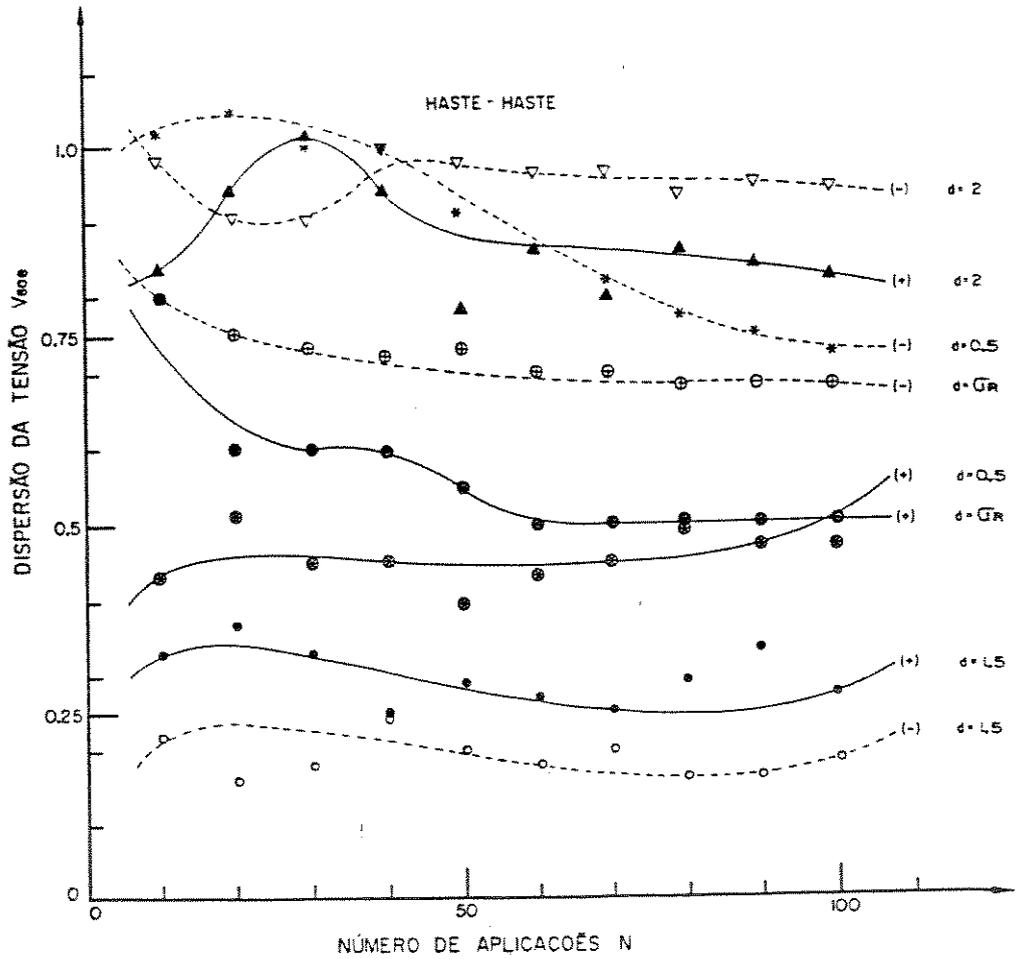


Fig.5.40- Gráfico  $\sigma V_{50e} \times N$   
para  $d=0.5$  OR a  $2\sigma R$   
Haste-Haste

## 5.2.2. Desvio Padrão ( $\sigma$ )

### 5.2.2.1. Influência do número de aplicações (N)

Nas figuras 5.41 a 5.44 mostramos a variação do desvio padrão  $\sigma$  em função de N para eletrodos do tipos haste-haste e haste-placa, obtidos para impulsos de polaridade positiva e negativa com deqrau fixo  $d = \sigma R$ .

Como todos os resultados estão nomalizados em  $\sigma R$ , admitindo que  $\sigma R$  seja igual a 3%, temos tanto para haste-haste quanto para haste-placa, um desvio padrão menor que 3%.

Como a dispersão dos valores do desvio padrão são menores para polaridade negativa que na positiva (figuras 5.45 e 5.46), na polaridade negativa, temos até  $N = 100$  aplicações, um desvio padrão menor que 3%. No caso de haste-haste polaridade positiva,  $N = 20$ , este valor é de aproximadamente 6%.

Na tabela 5.16 mostramos a faixa  $\bar{\sigma} \pm \sigma\sigma$  e em termos percentuais obtidos para  $N = 20$  e  $d = \sigma R$ . Como pode ser visto, somente no caso de Haste-Haste polaridade positiva foram obtidos valores muito acima de 3%.

TABELA 5.16 - Valores da faixa de  $\bar{\sigma} \pm \sigma\sigma$  para  $N = 20$  e  $d = 3\%$ , para eletrodos haste-haste e haste-placa.

Eletrodo	$\bar{\sigma} - \sigma\sigma$	$\bar{\sigma} + \sigma\sigma$
Haste-Haste (+)	1.2%	6.0%
Haste-Haste (-)	1.0%	3.0%
Haste-Placa (+)	0.1%	3.3%
Haste-Placa (-)	0.8%	2.1%

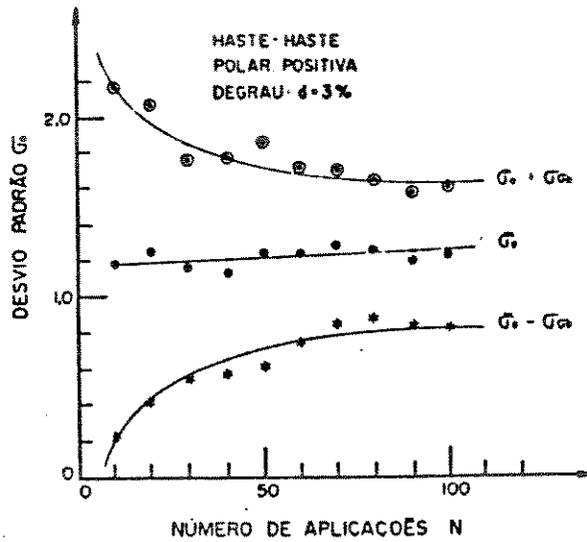


Fig.5.41- Gráfico  $\sigma$  e  $X$   $N$   
para  $d=3\%$   
Haste-Haste (+)

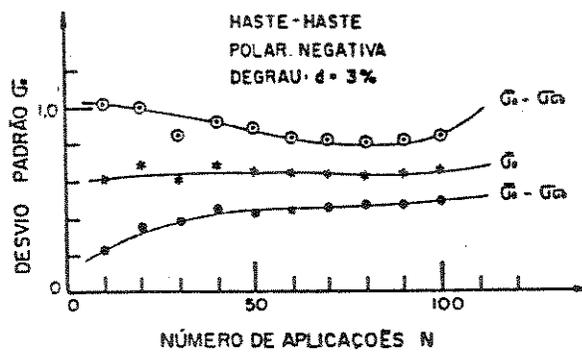


Fig.5.42- Gráfico  $\sigma$  e  $X$   $N$   
para  $d=3\%$   
Haste-Haste (-)

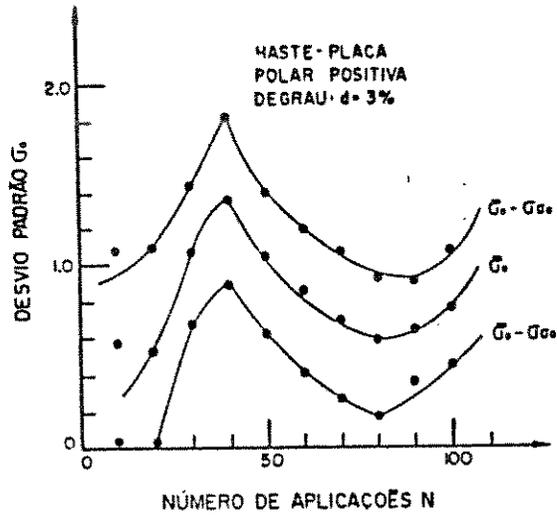


Fig.5.43- Gráfico  $\sigma$  e  $X N$   
para  $d=3\%$   
Haste-Placa (+)

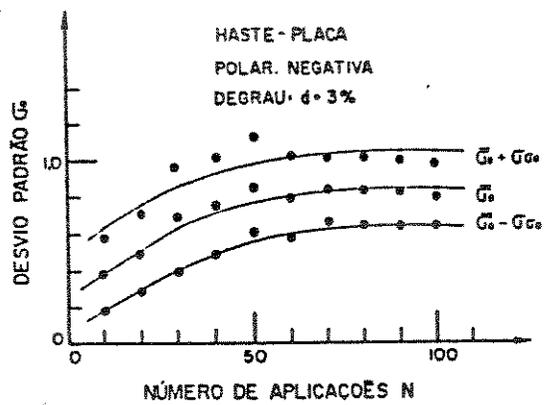


Fig.5.44- Gráfico  $\sigma$  e  $X N$   
para  $d=3\%$   
Haste-Placa (-)

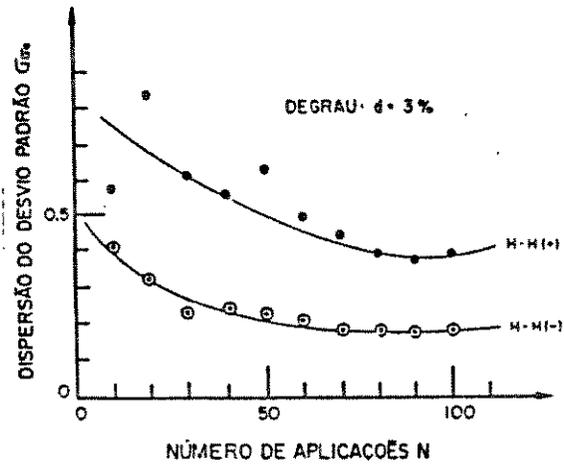


Fig.5.45- Gráfico  $\sigma$  e X N  
para  $d = 3\%$   
Haste-Haste

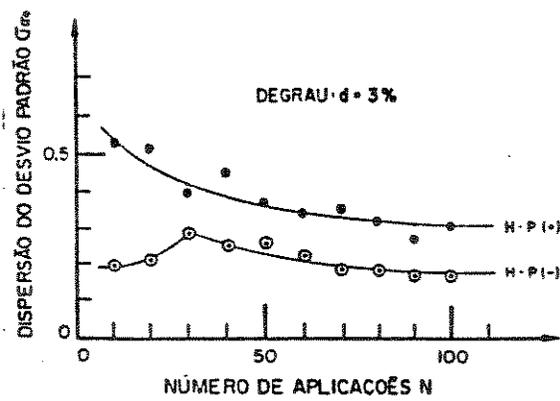


Fig.5.46- Gráfico  $\sigma$  e X N  
para  $d = 3\%$   
Haste-Placa

### 5.2.2.2. Influência do Degrau de Tensão (d)

Nas figuras 5.47 e 5.48 mostramos os resultados de desvio padrão médio  $\bar{\sigma}_e$  e nas figuras 5.49 e 5.50 a dispersão do desvio padrão  $\sigma_{\sigma_e}$ , em função do degraú de tensão (d) tendo como parâmetro o número de aplicações (N), obtidos para impulsos de polaridades positiva e negativa em configurações de eletrodos do tipo haste-haste.

As medidas foram efetuadas para degraus de tensão de 1,5% ( $0,5 \sigma_R$ ), 3% ( $\sigma_R$ ), 4,5% ( $1,5 \sigma_R$ ) e 6% ( $2 \sigma_R$ ), com N variando de 10 a 100 aplicações de tensão.

Destas figuras observa-se que o desvio padrão médio e assim como a sua dispersão são maiores numericamente na polaridade positiva que na negativa. No caso da polaridade positiva, nota-se 3 situações bem distintas de comportamento do desvio padrão  $\bar{\sigma}_e$ , que varia com o número de aplicações de tensão. Para  $N = 10$ , temos mínimo em degraú  $d = \sigma_R$  e máximo em  $1,5 \sigma_R$ . Em  $N = 100$ , o desvio padrão mostra tendências a um decréscimo com o degraú de tensão. Passa, no entanto, por um mínimo em  $d = 1,5 \sigma_R$  tendendo novamente a aumentar após este degraú.

De  $N = 20$  até 70 aplicações de tensão possuem um comportamento mais suave, aumentando gradativamente com máximo em torno de  $d = 1,0 \sim 1,2 \sigma_R$ , decrescendo a partir deste ponto com o aumento do degraú de tensão.

No caso de polaridade negativa o comportamento da curva de desvio padrão é mais suave independente do número de aplicações N. A influência do degraú de tensão neste caso parece ser bastante significativo com tendências a apresentar diversos pontos de máximos e mínimos. Um dos pontos máximos está em  $d = \sigma_R$ , onde todos os resultados obtidos de  $N = 10$  até 100 aplicações parecem se convergirem.

Quanto a dispersão do desvio padrão  $\sigma_{\sigma e}$ , esta varia com o degrau de tensão, número de aplicações e da polaridade da tensão de impulso utilizado para o ensaio. De uma forma geral, tanto em polaridade positiva quanto em polaridade negativa, as dispersões  $\sigma_{\sigma e}$  tendem a ser menores quanto maior for o número de aplicações de tensão N.

Nas figuras 5.51 e 5.52 mostramos para o caso particular de N = 20 aplicações a faixa de dispersão do desvio padrão  $\sigma_{\sigma e}$ . A partir desses resultados levantamos a tabela 5.17 onde temos a dispersão em função do respectivo degrau de tensão utilizado e na tabela 5.18 os valores em termos percentuais do  $\sigma_{\sigma e}$ .

TABELA 5.17 - Valores de  $\bar{\sigma}_e \pm \sigma_{\sigma e}$  em percentagem para N = 20.

d	Haste-Haste (-)		Haste-Haste (+)	
	$(\bar{\sigma}_e - \sigma_{\sigma e})$	$(\bar{\sigma}_e + \sigma_{\sigma e})$	$(\bar{\sigma}_e - \sigma_{\sigma e})$	$(\bar{\sigma}_e + \sigma_{\sigma e})$
1,5%	0,7	1,8	1,3	6,7
3,0%	1,1	3,0	1,2	6,2
4,5%	0,9	3,9	2,4	4,6
6,0%	1,7	4,2	1,3	4,6

TABELA 5.18 - Valores da Dispersão  $\sigma_e$  em termos percentuais de  $\sigma_R$ , para  $N = 20$ .

degrau	Haste-Haste (-)	Haste-Haste (+)
1,5%	0,17 $\sigma_R$	0,90 $\sigma_R$
3,0%	0,30 $\sigma_R$	0,82 $\sigma_R$
4,5%	0,37 $\sigma_R$	0,33 $\sigma_R$
6,0%	0,42 $\sigma_R$	0,51 $\sigma_R$

Observa-se que a dispersão do desvio padrão depende do degrau de tensão e possui comportamento diferente se a polaridade é positiva ou negativa. Na polaridade positiva a dispersão decresce percentualmente com o aumento do degrau de tensão, enquanto que na polaridade negativa, verifica-se a ocorrência inversa. A dispersão pode ser significativa alcançando facilmente a valores proporcionais a  $\sigma_R$  (3%) ou como no caso da polaridade positiva a valores de 90% de  $\sigma_R$  para  $d = 1,5\%$  em  $N = 20$  aplicações.

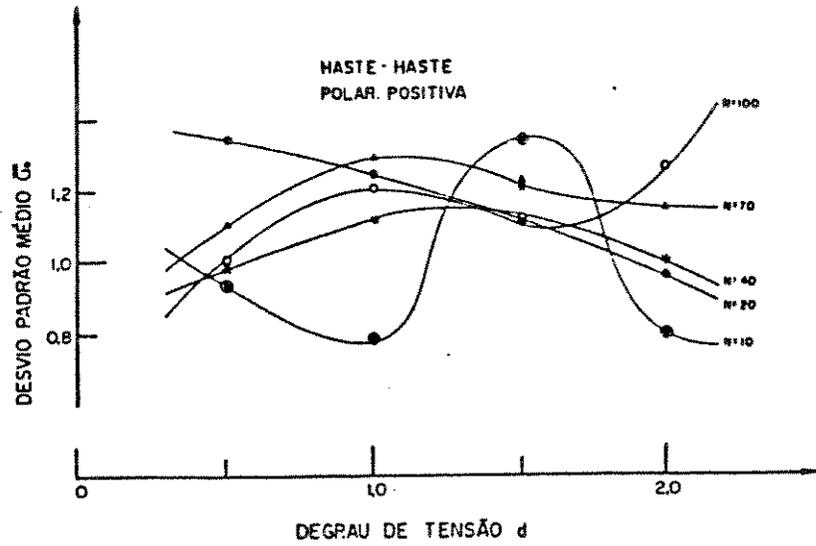


Fig.5.47- Gráfico  $\bar{\sigma}$  e  $X d/\sigma R$   
para  $N=10,20,40,70,100$   
Haste-Haste (+)

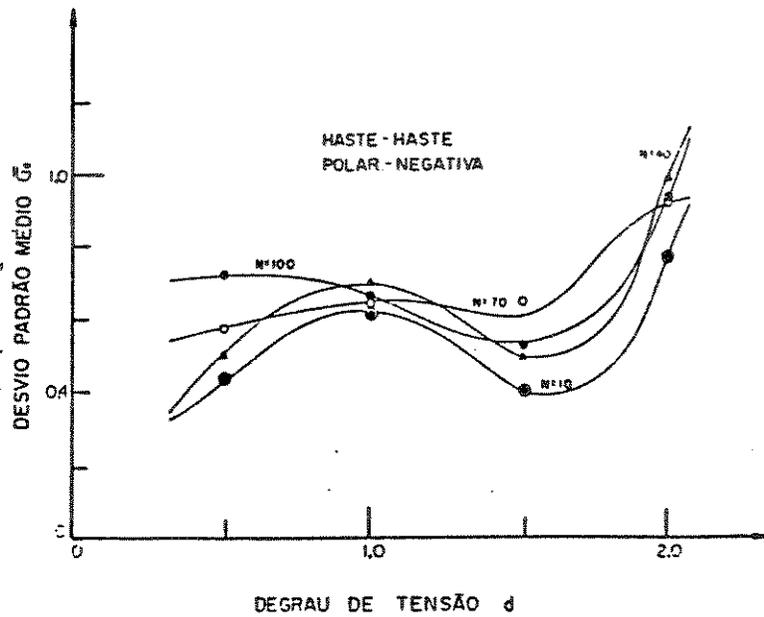


Fig.5.48- Gráfico  $\bar{\sigma}$  e  $X d/\sigma R$   
para  $N=10,20,40,70,100$   
Haste-Haste (-)

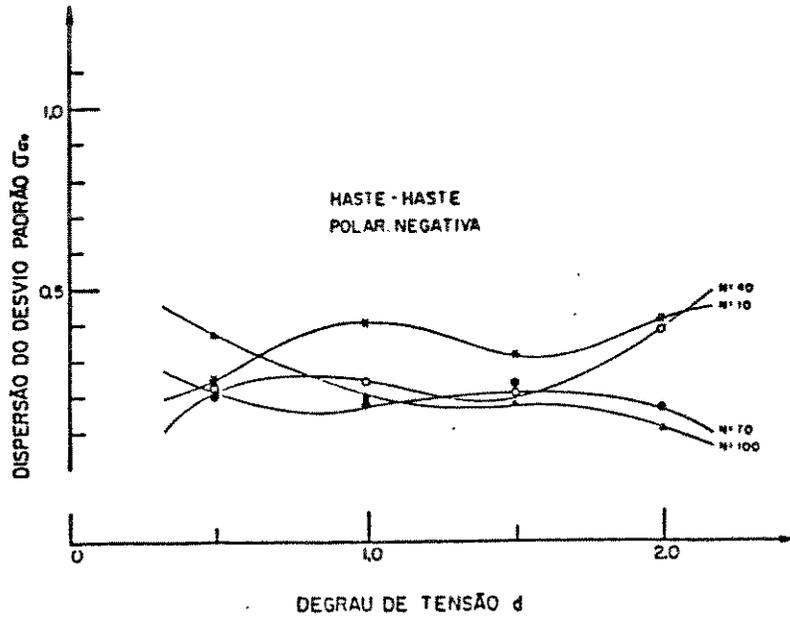


Fig.5.49- Gráfico  $\sigma_{\sigma}$  e  $X d/\sigma R$   
para  $N=10, 40, 70, 100$   
Haste-Haste (-)

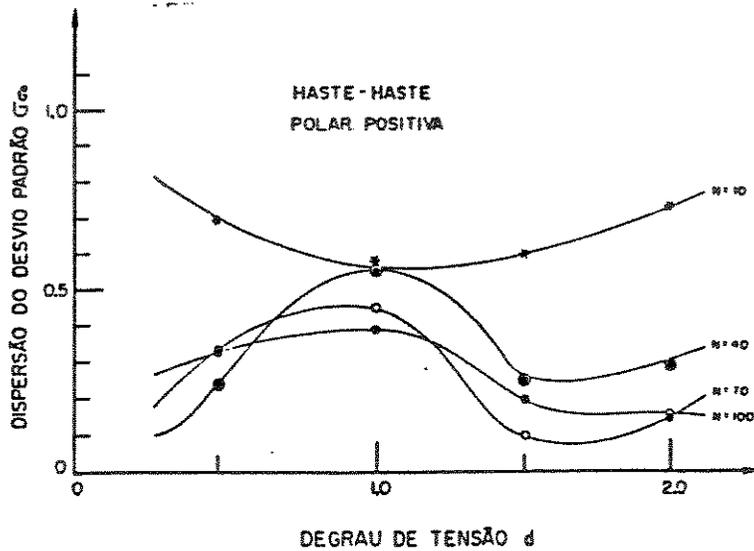


Fig.5.50- Gráfico  $\sigma_{\sigma}$  e  $X d/\sigma R$   
para  $N=10, 40, 70, 100$   
Haste-Haste (+)

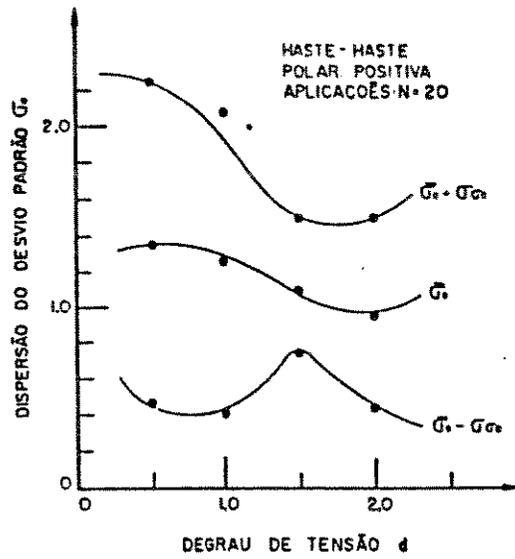


Fig.5.51- Gráfico  $\sigma$  e  $X d/\sigma R$   
para  $N=20$   
Haste-Haste (+)

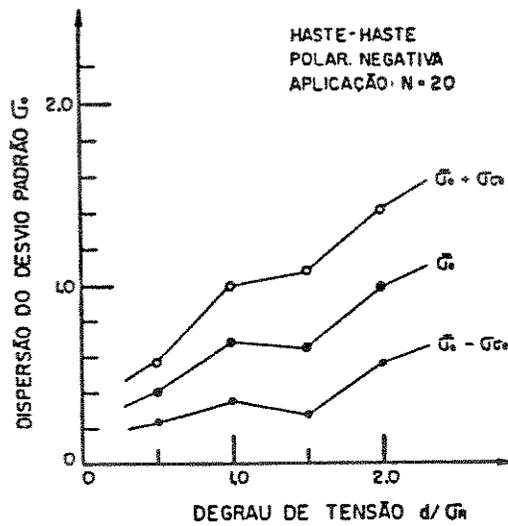


Fig.5.52- Gráfico  $\sigma$  e  $X d/\sigma R$   
para  $N=20$   
Haste-Haste (-)

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 Método de Acréscimo e Decréscimo no cálculo de V50%.

O método do acréscimo e decréscimo é largamente utilizado nos ensaios para a determinação da tensão disruptiva crítica V50% de isolamentos auto restauráveis. Para a realização destes ensaios, as normas em geral recomendam o uso de degrau de tensão  $d = 3\%$  (impulso atmosférico) e número de aplicações de tensão  $20 \leq N \leq 40$ , com a tensão inicial a mais próxima possível do valor presumido de V50%.

Este método de ensaio foi originalmente introduzido por Dixon e Mood. Os seus resultados de que valores de V50% mais próximos do real são obtidos para  $d = \sigma R$ ,  $V_i = V50R$  e maior número de aplicações  $N$ , foram confirmados a partir de resultados de simulação computacional de inúmeros ensaios, bem como dos resultados experimentais realizados com eletrodos do tipo haste-haste e haste-placa.

Com relação a  $N$ , embora um número grande de aplicações fosse desejável, torna-se necessário levar em consideração os aspectos técnico-econômicos para se encontrar um  $N$  ótimo.

Quanto ao degrau de tensão  $d$ , os resultados mostraram um aumento na dispersão dos resultados  $\sigma_{V50C}$ , com o aumento do degrau de tensão  $d$ , conforme previsto por Dixon, onde a dispersão da média  $\sigma_{\bar{X}}$  (figura 6.1), é calculada por:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{G \sigma}{\sqrt{n}}$$

onde  $G$  é função de  $d/\sigma R$

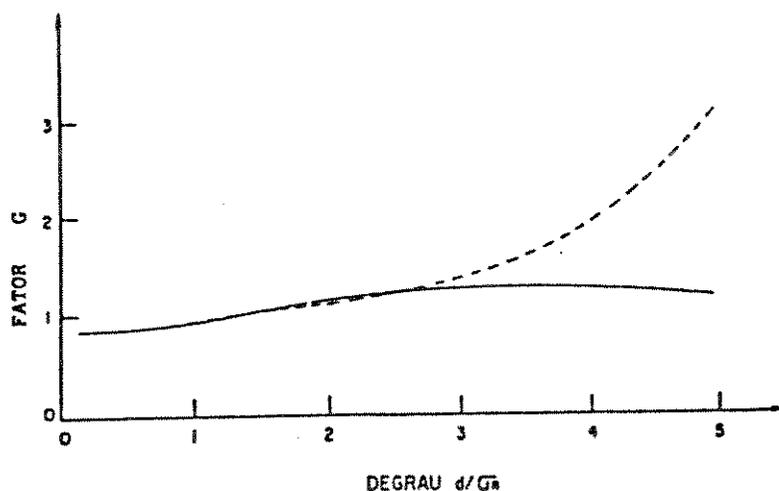


Fig. 6.1 - Fator G

Até  $d = 2,5 \sigma R$ , que foi o intervalo simulado pode-se notar que o valor de G, portanto  $\sigma X$ , aumenta com o degrau de tensão, o que também está de acordo com os resultados de simulação (figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 em  $N=20$  aplicações).

Deveríamos escolher então um degrau de tensão o menor possível para obter melhores resultados. Mas por outro lado os resultados das figuras 5.10, 5.11 e 5.12 mostram que para degraus  $d < \sigma R$  a escolha da tensão inicial influencia de forma significativa no cálculo de  $V50C$ . Se a tensão inicial for mal escolhida, apesar da dispersão ser pequena,  $d < \sigma R$  podem fornecer valores de  $V50C$  menores ou maiores que o valor real esperado.

Esse resultado foi também obtido por Dixon:

"A curva G indica que o intervalo deveria ser o menor possível para obter máxima precisão no cálculo da média. Mas na prática isto não é verdade por muitas razões. Em primeiro lugar, as curvas são para valores esperados onde é utilizada uma amostragem essencialmente infinita. Ou seja, na prática são exigidas amostras muito grandes para se obter uma boa estimativa da mé-

dia

para intervalos muito pequenos. A estimativa pode ser errada por causa do valor escolhido da tensão inicial de ensaio, a menos que a amostra seja grande. Em segundo lugar, um pequeno intervalo pode resultar em observações errôneas a menos que seja feita uma boa escolha para a tensão inicial. Se a escolha não é boa; muitas aplicações devem ser realizadas para se chegar à uma região da média."

A influência do valor inicial  $V_i$  no cálculo de  $V_{50C}$  pode ser observado das figuras 5.14 e 5.15. A figura 5.14 mostra a existência de pouca influência de  $V_i$  na dispersão de  $V_{50C}$ , enquanto que a figura 5.15 mostra a existência de uma forte influência de tensão inicial sobre o valor médio  $\bar{V}_{50C}$ .

Essa influência é maior quanto menor for o  $N$ , anulando-se para  $N > 70$  aplicações (figura 5.5).

As figuras 5.11 e 5.12, mostram ainda a influência de  $V_i$  no valor médio  $\bar{V}_{50C}$  em relação ao degrau de tensão. A dispersão  $\sigma V_{50C}$  cresce com o aumento do degrau de tensão, tendo-se como valor ótimo, o degrau em torno de  $d = \sigma R$ . Tem-se também um menor efeito de  $V_i$  associado ao valor intermediário de dispersão  $\sigma V_{50C}$ . Dixon indica como valor ótimo de degrau um intervalo  $0.5 \sigma$  a  $2 \sigma$  sem explicitar categoricamente o melhor valor.

Com relação aos resultados experimentais, estes podem ser vistos nas figuras 5.31 e 5.40. Não há uma tendência muito forte de diminuição de  $\sigma V_{50C}$  com o aumento de  $N$ , conforme esperado pelos resultados de simulação. Em valores numéricos, da figura 5.31 temos valores de  $V_{50C}$  bem maiores que os esperados em simulação computacional a menos do eletrodo haste-placa (-) cujos resultados se aproximam bastante daqueles da simulação.

A figura 5.40 também não confirma os resultados de simulação de que uma menor dispersão é esperada para menores degraus de tensão. Experimentalmente as menores dispersões foram

observadas para  $d = 1,5 \sigma R$ . Para haste-haste(-) a dispersão em  $d = 0,5 \sigma R$  foi maior que para  $d = 1,0 \sigma R$ , embora as maiores dispersões tenham sido verificadas para  $d = 2 \sigma R$  com  $N$  grande de aplicações. Com  $N = 20$  aplicações (figuras 5.38 e 5.39) também se confirmam estes resultados de que menor dispersão ocorre para  $d = 1,5 \sigma R$ .

A existência dessas discordâncias entre os resultados experimentais e os teóricos podem ser debitados a vários fatores. Em primeiro lugar, um ensaio com  $N = 100$  aplicações é bastante demorado com duração aproximada de 2 horas, o que implica em variação das condições atmosféricas no decorrer dos ensaios, mesmo que leve em consideração a não influência da descarga anterior na ocorrência ou não de descarga na aplicação posterior (ionização do meio).

Outro fator a ser considerado é que os ensaios desta natureza são realizados em vários dias ou semanas, que levam a variação das condições do circuito, comportamento dos eletrodos, condições ambientais, fatores humanos, entre outros. Neste aspecto, supomos que todos estes fatores tenham contribuído na variação encontrada entre os resultados experimentais e os da simulação.

Brasca, Tellarini e Zaffanella por exemplo, colocam como principais causadores de erros e de causa de diferença de valores para mesmo ensaio em diferentes lugares e/ou condições fatores tais como:

- erros relacionados ao sistema de medição e métodos de ensaio.
- fatores de correção para densidade do ar e umidade.
- fatores à serem considerados em ensaios realizados em diferentes laboratórios.

- modificações no circuito e na disposição do laboratório entre dois testes depois de um longo período de paralização.
- fatores humanos (diferença de treinamento e experiência).

Neste aspecto, como os testes foram realizados no mesmo laboratório, a menos do item 3, todos os demais fatores podem ter influído na variação entre os resultados teóricos e experimentais.

Questionamos também quanto a tensão inicial  $V_i$ , visto ser esse um parâmetro de difícil controle na prática uma vez que não se conhece o valor de  $V_{50}$  real.

Avaliando-se o método em termos de confiabilidade na obtenção de  $V_{50\%}$  com  $20 < N < 40$  notamos que a dispersão conforme tabela 5.1 e 5.2, para  $d = \sigma R$  e tensão inicial de  $V_{50R} \pm \sigma R$ , é de  $V_{50R} \pm 0,367 \sigma R$  em  $N=20$ ;  $V_{50R} - 0,233 \sigma R$  a  $V_{50R} + 0,300 \sigma R$  em  $N=40$  aplicações.

Se levarmos em conta os resultados para impulso atmosférico onde  $\sigma R = 3\%$ , temos para  $N = 20$  um valor calculado de  $V_{50C}$  para um intervalo de confiança de 95% ( $\bar{x} \pm 1,96 \sigma$ ) com um erro de aproximadamente  $\pm 2,2\%$ . Para  $N = 40$  esse valor reduz para  $\pm 1,6\%$ .

Os resultados experimentais para  $N = 20$ ,  $d = 3\%$  são mostrados nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13. Num intervalo de confiança de 95% encontramos um erro de  $\pm 5\%$  no pior caso (Haste-Placa(+)) e de  $\pm 1,7\%$  no melhor caso (HP(-)). Para  $N = 40$  temos  $\pm 5\%$  (HP(+)) e  $\pm 1\%$  (HP(-)).

Uma comparação das tabelas 5.3 e 5.4 (simulação com  $N = 20$ ), tabela 5.6 (simulação com  $N = 20$  e 40 aplicações) e a tabela 5.14 (experimental com  $N = 20$  e 100 aplicações) mostram claramente a discrepância entre os resultados experimentais e os simulados. Com  $N = 20$ , observamos os menores valores de disper-

são, para decaiu 4.5% ( $d = 1.5 \sigma R$ ). Num intervalo de confiança de 95%, observamos um erro de  $\pm 2.4\%$  para HH(+) e de  $\pm 1\%$  para HH(-).

No caso de  $d = 6\%$  ( $d = 2 \sigma R$ ) temos num intervalo de confiança de 95%, um erro de aproximadamente  $\pm 5.5\%$  enquanto que o esperado, num mesmo intervalo de confiança é de  $\pm 2.4\%$

## 6.2 Desvio padrão $\sigma$ da probabilidade de descarga pelo método de acréscimo e decréscimo:

O cálculo do desvio padrão é importante sobretudo do ponto de vista de projetos de isolamento em sistemas de potência. Um valor de  $\sigma$  estimado incorretamente pode levar, a superdimensionamento ou a um subdimensionamento.

Os resultados obtidos por simulação mostram que para degraú de tensão fixo  $d = \sigma R$  e  $V_i = V_{50R}$ , o valor médio de desvio padrão tende a ser menor que o valor real quando o número de aplicações é menor que 30, e este valor tendendo para  $\sigma R$  com o aumento de  $N$ .

Em termos de dispersão dos resultados ( $\sigma_C$ ), seus valores diminuem com o aumento do número de aplicações, qualquer que seja o degraú de tensão utilizado (figuras 5.17 a 5.20) embora em termos percentuais, seus valores sejam elevados. Por exemplo para  $N = 20$ ,  $\sigma_C = 0.4 \sigma R$ , o que significa 40% de erro em relação ao valor real esperado. Ou seja, num intervalo de confiança de 95% teremos um erro de até 80% de  $\sigma R$ .

As experiências realizadas com eletrodos haste-haste (+) mostram que em termos de valor médio, estes tendem a valores pouco maiores que o esperado de 3%, e no caso da polaridade negativa a valores menores ainda. Ambos os casos se referem a degraú de 3% e  $N = 40$ .

A dispersão do desvio padrão confirma a tendência de diminuição com o aumento de  $N$  para qualquer degraú  $d$ . Mas os valores são elevados principalmente para haste-haste (+) sendo maiores que as obtidas por simulação.

Uma comparação dos resultados experimentais com os de simulação é mostrada na tabela 6.1

TABELA 6.1

Dispersão  $\sigma_{\sigma}$  (em % de  $\sigma_R$ ) para  $V_i = V_{50R}$  e  $d = \sigma_R$

N	SIMULAÇÃO	EXPERIMENTAL			
		HH(+)	HH(-)	HP(+)	HP(-)
10	47	57	40	53	20
20	40	84	32	52	21
30	37	62	25		
40	34	56	24	46	26
70	25	44	18	37	18
100	18	39	18	31	17

Numericamente, a dispersão do desvio padrão possui valores bastante elevados, podendo apresentar como no caso de haste-haste (-) para  $N = 20$ , valores tão altos quanto  $0,84 \sigma_R$ . Isto não é de se estranhar, considerando-se que o próprio método de ensaio leva a valores numericamente elevados como pode ser notado pelos resultados da tabela 6.2. Os resultados obtidos pelo método de Dixon bem como os de simulação são comparativamente de mesma magnitude. Por outro lado, o desvio padrão num ensaio depende da escolha adequada da tensão inicial e do degrau de tensão que é uma função indireta do número de aplicações.

Por exemplo, o erro previsto por simulação ao calcularmos o desvio padrão  $\sigma_\sigma$ , com  $N = 20$ ,  $V_i = V_{50R}$  e  $d = \sigma R$ , num intervalo de confiança de 95% é de:

$$e = 2 \times \sigma_\sigma \times \sigma R = 2 \times 0,4 \times \sigma R = 0,8 \sigma R$$

Ou seja, podemos ter na estimativa do desvio padrão dos resultados, um erro de até 80% do valor real  $\sigma R$ .

Observa-se por outro lado, das figuras 5.21 e 5.23 que o valor médio de desvio padrão quando  $V_i = V_{50R}$  e  $N > 20$ , tende para  $\sigma R$  no intervalo  $0,75 \sigma R < d < 2,0 \sigma R$ . Abaixo de  $0,75 \sigma R$  os valores são menores que o real, ocorrendo o inverso para  $d > 2,0 \sigma R$ . Este resultado da simulação está de acordo com os de Dixon onde define este intervalo do degrau de tensão como sendo uma faixa ideal de utilização do método para a realização dos ensaios quando  $V_i = V_{50R}$ . Este resultado é satisfeito mesmo que  $V_i$  seja diferente de  $V_{50R}$  desde que  $N > 20$ .

Quanto a dispersão do desvio padrão  $\sigma_\sigma$ , pela simulação esta decresce com o aumento do degrau de tensão  $d$  qualquer que seja o valor de  $N$ . Experimentalmente, no caso específico de haste-haste, a dispersão decresce com o aumento de  $N$ , mas o comportamento em relação a  $d$  não é a mesma do resultado obtido por simulação.

Em ambas as polaridades nota-se a presença de pontos de máximos que variam com o degrau de tensão utilizado. O degrau  $d = \sigma R$  parece ser o ponto de convergência para qualquer número de aplicações  $N$ .

Se analisarmos o método originalmente proposto por Dixon,  $\sigma_\sigma$  é dado por:

$$\sigma_\sigma = \frac{H\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

Ou seja, a dispersão é inversamente proporcional a  $N$ , o que confirma os resultados obtidos por simulação e experimentalmente, da diminuição de  $\sigma_\sigma$  com  $N$ . Na expressão de Dixon, o fator  $H$  depende do degrau de tensão utilizado (fig. 6.2). O valor médio calculado  $V50\%$  pode estar em qualquer dos níveis (curva 1 ou 2) de aplicações de tensão mostrado na figura.

Num dos casos a dispersão tende a aumentar com  $d/\sigma R$  (para  $d/\sigma R > 2$  - curva 1) ou então com a tendência oposta de diminuir com  $d/\sigma R$  (curva 2).

Isso explica a dificuldade em se caracterizar a variação de  $\sigma_\sigma$  com  $d$ , principalmente se  $V_i$  for diferente de  $V50R$ .

De qualquer maneira, os resultados experimentais e de simulação estão de acordo com os de Dixon, no que diz respeito a pequenos intervalos ( $d \leq 0,5 \sigma R$ ), ou seja, de que estes intervalos não são propícios para se estimar o desvio padrão.

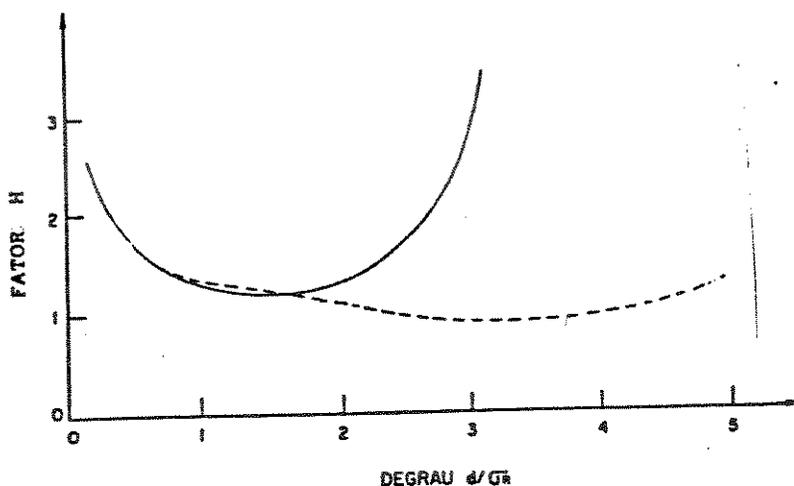


Fig. 6.2 - Curva H.

Na tabela 6.2 os valores de  $\sigma_\sigma$  calculados de acordo com [6.2] supondo-se  $n = N/2$  onde  $N$  = número de aplicações de tensão e  $d/\sigma R = 1,0$  e ao seu lado, para a sua comparação, os resultados de simulação e experimentais.

TABELA 6.2 - Dispersão do Desvio Padrão.

N	(DIXON)	(simulação)	Experimental	
			H-H(+)	H-H(-)
10	0,54	0,47	0,58	0,41
20	0,38	0,40	--	--
40	0,27	0,34	0,55	0,23
70	0,20	0,25	0,43	0,18
100	0,12	0,18	0,38	0,20

Os valores de simulação e os de DIXON evidenciam o fato dos valores elevados de  $\sigma$  em relação à  $10R$ , mostrando que o método do acréscimo e decréscimo tem valores elevados de dispersão quando usado para cálculo de desvio padrão  $\sigma$  da probabilidade de descarga.

### 6.3 Número Necessário de Aplicações

Com os dados obtidos podemos estimar a probabilidade de quanto estamos incorrendo em erro no cálculo do valor da tensão disruptiva crítica V50% em relação ao seu valor real V50R, num dado ensaio realizados com N aplicações e degrau de tensão d.

A diferença entre o valor calculado (simulado) e o real pode ser observada nas figuras 6.3 e 6.4 onde temos o valor médio  $\bar{V}_{50C}$  e dispersão dos resultados  $\sigma_{V50C}$ , em função da variação N e degrau d.

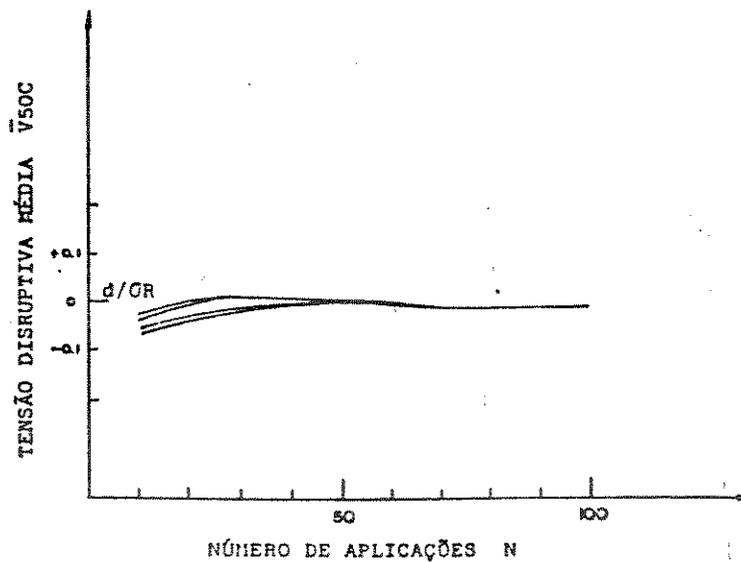


Fig. 6.3 - Variação de  $\bar{V}_{50C}$  com número de aplicações N em função de  $V_i$ .

Em termos de valor médio  $\bar{V}_{50C}$ , considerando-se que o teste foi iniciado com a tensão inicial  $V_i = V_{50R}$ , observamos que os valores médios de  $\bar{V}_{50C}$  estão bem próximos do valor real.

As maiores diferenças ocorrem para  $N=10$ , o que no pior caso temos:

$$\frac{\bar{V}_{50C} - V_{50R}}{\sigma R} = 0,05$$

Como para impulso atmosférico  $R = 3\%$ , temos uma diferença de:

$$\bar{V}_{50C} - V_{50R} = 0,05 \times 3\% = 0,15\%$$

Considerando-se que o valor médio  $V_{50C}$  é igual ao valor real  $V_{50R}$ , podemos utilizar a dispersão dos resultados  $V_{50C}$ , mostrada na figura 6.4, para calcular a diferença entre o valor real e o valor calculado para cada conjunto  $N$  e  $d$ .

Essa diferença (ou erro) tem uma probabilidade de 68% de ser menor que  $\sigma V_{50C} \times \sigma R$  e 95% de ser menor que  $V_{50C} \times 2\sigma R$  (intervalos de confiança da média).

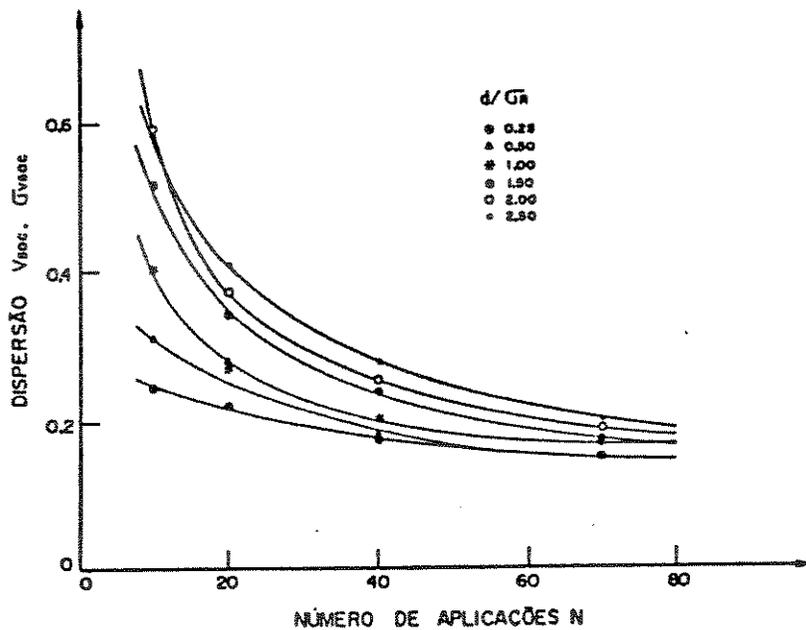


Fig. 6.4 - Dispersão dos resultados  $\sigma V_{50C}$  dos valores de  $V_{50\%}$  calculados em função de  $N$  e  $d$

De uma maneira geral, o erro em relação ao valor real diminui com o aumento do número de aplicações  $N$  e com a diminuição do degrau de tensão, isso se o teste é iniciado num valor ótimo  $V_{50R}$  ou num valor mais próximo deste.

Por exemplo, no caso de  $N = 30$  e  $d = \sigma R$ , normalmente utilizados em ensaios, o erro pode ser, num intervalo de confiança de 95% de:

$$e = 0,25 \cdot \sigma R \cdot 2 = 1,5\%$$

A partir desse erro estimativo, podemos calcular o número mínimo de aplicações de tensão para que se tenha um erro máximo de 3%, em relação ao valor real, com 95% de confiança, para um dado valor de  $\sigma R$  (em %), que pode ser visto na figura 6.5.

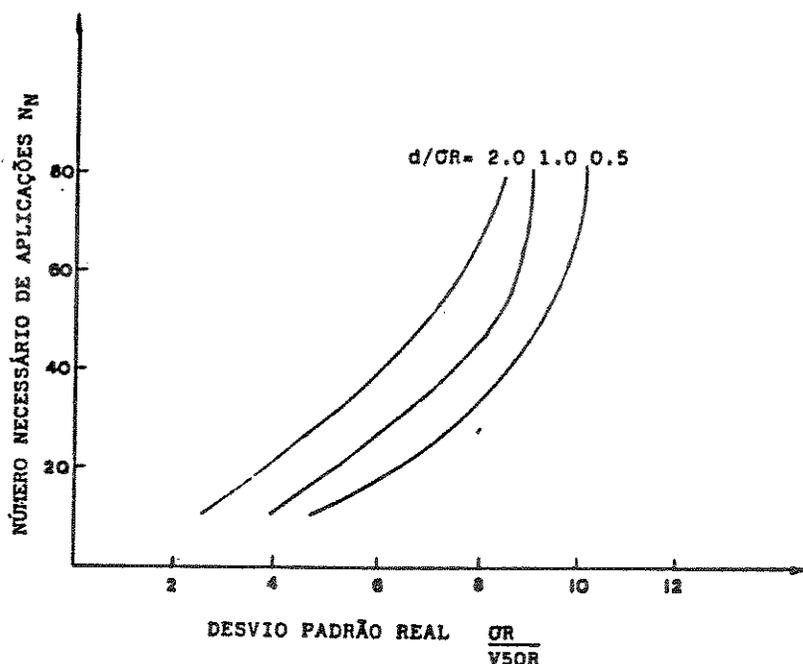


Fig. 6.5 - Número necessário de aplicações para que o erro seja menor que 3% com 95% de confiança.

Como pode ser observado, teoricamente quanto maior o valor de  $\sigma R$ , maior o número necessário de aplicações para se conseguir um resultado confiável no cálculo de  $V50\%$ .

Os resultados de haste-haste e haste-placa confirmam as conclusões mencionadas acima. O  $N$  ótimo varia com a tensão inicial e o degrau escolhido. Se  $V_i$  é diferente de  $V50R$ , no caso de haste-haste temos que, se os ensaios forem realizados com  $N$  em torno de 20 aplicações, os melhores resultados são obtidos na polaridade positiva quando  $d$  for aproximadamente  $1,5\sigma R$  e na negativa quando  $d$  for da ordem de  $\sigma R$ .

## BIBLIOGRAFIA

- [1] - ABNT - NBR 6939/81 - Coordenação de Isolamento - Procedimentos
- [2] - Diesendorf, W. - "Insulation Coordination in H.V. Electric Power Systems" - Butterworths, 1974
- [3] - Hedman, D.E. - "Coordenação de Isolamento" - Conv. UFSM-Eletrobás - Vol. 8. Santa Maria, UFSM, 1979
- [4] - Lewis T.J. "The Statistical Basis of Impulse Testing" PIEEE, vol. 105, pp. 27-34, 1958
- [5] - Hylten-Cavallius. N; Chagas, F.A.; Chakabarti, A - "Métodos Estatísticos Para Ensaio Dielétricos em Alta-Tensão" CEPEL Relatório Técnico nº 437/81, Julho, 1981
- [6] - IEC - 60-2 - "H.V. Test-Techniques - Part 2: Test Procedures" 1st edition, 1971
- [7] - ABNT - NBR 5389/81 - Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta-Tensão - Método de Ensaio
- [8] - DIXON, W.J.; Mood, A.M. - "A Method for Obtaining and Analysing Sensivity Data" JASA - Vol. 43, 1948 - pag. 109

- [9] - ANSI - IEEE - Std. 4 - 1978 - IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing
- [10] - Kouno T.; Oikawa, T. - "Standard Deviations of Flashover Probability" Elect. Eng. in Japan - n<sup>o</sup> 8, pp 84-89, 1967
- [11] - Carrara, G.; Delera, L. - "Accuracy of an Extended Up-and-Down Method in Statistical Testing of Insulation" pp 159-174, - Electra n<sup>o</sup> 23, 1972
- [12] - Mourente, P.; Santiago N.; Portela C. - "Estimation of Standard deviation of disruptive voltage of air gaps under lightning over voltages by modified up-and-down method". 1984 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity - Orlando, Florida, EUA, 1984
- [13] - Anis. H, Abo-El-Saad, M. - "Optimal Up-and-Down Testing of External Insulation".  
3rd International Symposium on H.V. Engineering - 42.08  
- Aug. 1979
- [14] - Kono, T.; Endo, M. - "Simulation of Probability Breakdown Curve and Presumption of the Reliability of 50% Flashover Voltage by Means of Electronic Computer"  
E.E. in Japan - (USA) - Vol. 84, n<sup>o</sup> , Aug. 1964
- [15] - Dixon, W.J. - "Introduction to Statistical Analysis"  
Ed. Frank J. Messer Jr.

[16] - Brasca E.; Tellarini, M.; Zaffanella, L. - "The Confidence Limit of High - Voltage Dielectric Test Results"

IEEE - Trans. on P.A.S. - Vol. PAS-86, no 8, Aug. 1967

[17] - Vibholm S. and Thyregod P. - "The Analysis Insulation Breakdown Probabilities by the Up-and-Down Method"

IEEE - EI-21, no 2, 133-136, 1986