

IPEN/GRR-REL-08/18

CATEGORIA DISTRIB: A

Eficiência Estimada do Esfregaço

Júlio de Oliveira Júnior

Roberto Vicente

Novembro/2018

Gerência de Rejeitos Radioativos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
São Paulo

**GRR – Gerência de
Rejeitos Radioativos**



IPEN/GRR-REL-08/18

CATEGORIA DISTRIB: A

Eficiência Estimada do Esfregaço

RELATÓRIO TÉCNICO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Júlio de Oliveira Júnior

Orientador: Roberto Vicente

Novembro/2018

Gerência de Rejeitos Radioativos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
São Paulo

**GRR – Gerência de
Rejeitos Radioativos**



Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Presidente: Paulo Roberto Pertusi

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Ipen-Cnen/SP
Superintendente: Wilson Aparecido Parejo Calvo

Gerência de Rejeitos Radioativos - GRR
Gerente: Júlio Takehiro Marumo

A Gerência de Rejeitos Radioativos é o departamento do Ipen-Cnen/SP que tem como Missão promover a gestão segura dos rejeitos radioativos gerados no Brasil, dentro dos princípios éticos de proteção ao homem e ao meio ambiente. O objetivo da gestão dos rejeitos radioativos é assegurar um nível adequado de proteção à população e às gerações futuras e a preservação do meio ambiente, protegendo, além do Homem, as outras espécies e os recursos naturais.

A GRR presta serviços de gestão de rejeitos aos usuários de materiais radioativos das áreas industrial, médica e outras. Desenvolve atividades de pesquisa e desenvolvimento conduzidas no sentido de se aprimorar os métodos, as técnicas e as estratégias de gestão para reduzir os custos e melhorar a segurança no tratamento dos rejeitos. As atividades de P&D estão voltadas para as áreas de caracterização, tratamento e deposição final. Além disso, a GRR participa das atividades de ensino, formação e treinamento nas diversas áreas de aplicação da tecnologia nuclear.

O presente relatório técnico foi preparado para divulgar, da forma mais ampla possível, as informações contidas nos resultados das atividades de pesquisa e desenvolvimento da GRR, para a administração do Estado, para a comunidade acadêmica, e para o público em geral.

Comentários e sugestões sobre este ou outros relatórios da GRR são bem vindos e devem ser dirigidos a

GRR – Ipen-Cnen/SP
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária
CEP 05508-000 – São Paulo, SP
Fone: 11 3133-9745
Junho/2016

Página do Ipen-Cnen/SP na Internet: <http://www.ipen.br>

Página da CNEN na Internet: <http://www.cnen.gov.br>

Sugestão de referência deste relatório:

Oliveira, Júlio Jr. Eficiência estimada do esfregaço. Ipen-Cnen/SP, São Paulo, Novembro de 2018. (IPEN/GRR-REL-08/18)

Palavras-chave: wipe test, radioactive waste, waste characterization, surface contamination

NOTA: Nem o Ipen-Cnen/SP nem a GRR dão garantias, expressas ou implícitas, da exatidão, completeza ou utilidade de quaisquer informações, produtos ou processos descritos neste relatório, ou de que seu uso não infrinja direitos privados. A referência, neste relatório, de qualquer produto comercial, processo ou serviço pelo nome comercial, marca ou fabricante não constitui nem implica necessariamente a recomendação ou favorecimento pela GRR ou pelo Ipen-Cnen/SP.

As conclusões e pontos de vista apresentados neste relatório são do autor.

Para cópias deste documento, contatar:

Biblioteca Terezine Arantes Ferraz
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária
CEP 05508-000 – São Paulo, SP
Fone: 11 3133-9094
bibl@ipen.br

Para contatos sobre o conteúdo:

Roberto Vicente
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária
CEP 05508-000 – São Paulo, SP
Fone: 11 3133-9758
rvicente@ipen.br

Resumo

O desafio de caracterizar rejeitos constituídos de peças contaminadas com grandes dimensões decorre da dificuldade em executar métodos de medida com boa precisão e exatidão. A técnica do esfregaço é usada com frequência para determinar a concentração de radioatividade desse tipo de rejeito. Contudo, a eficiência estatística do esfregaço é pouco conhecida, dificultando o uso do método para análises quantitativas. Neste trabalho usou-se da Lei dos Grandes Números e de simulações computacionais para elaborar uma técnica capaz de determinar a eficiência média de um esfregaço e, usando esse valor, prever o valor das medidas de amostras radioativas, permitindo assim obter uma estimativa dos valores de atividades totais fazendo poucos ensaios. Os resultados se mostraram satisfatórios e descrevem uma proposta de arranjo experimental para verificar, empiricamente, a validade do método.

Abstract

The main challenge in the characterization of radioactive waste constituted of contaminated pieces with large dimensions is finding methods with good accuracy and precision to determine the concentration of activity. The swipe method is often used to estimate the activity on this kind of waste. However, the statistical efficiency of the swipe method is poorly known, discouraging the use of the method for quantitative assay. This paper uses the Law of the Great Numbers and computer simulations to develop a method that can estimate the average efficiency of a swipe and, using this information, predict the value of the measurements of radioactive samples, thus allowing the estimation of the total radioactivity on the waste, using few swipes. Current results are satisfactory and allow the proposal of a future experiment to verify empirically the applicability of the method.

Sumario

1. Introdução	3
1.1 Superfícies Contaminadas	1
1.2 O Problema do Esfregaço e a Eficiência Média	1
1.3 Hipóteses Adotadas	2
2. Objetivo	3
3. Materiais e métodos	3
3.1 Fórmula para a Eficiência de Amostragem do Esfregaço	3
3.2 Média Harmônica e Desvio Padrão da Taxa de Eficiência	4
3.3 Método computacional para simular sucessivos esfregaços e Lei dos Grandes Números	5
3.4 Método para determinar a atividade inicial da amostra	6
3.5 Estimando a atividade inicial de um rejeito por meio do uso do esfregaço	7
3.5 Estimativa das incertezas para atividade total da superfície amostral	7
3.5.1 Estimativa de incerteza por meio do desvio padrão da média	7
3.5.2 Estimativa de incerteza usando propagação de incertezas	8
3.6 Proposta de classificação para rejeitos caracterizados por meio do esfregaço	8
3.7 Proposta para montagem de arranjo experimental	8
4. Resultados	9
4.1 Assumindo uma distribuição uniforme	9
4.2 Assumindo uma distribuição gaussiana	13
5. Conclusão	16
Referências Bibliográficas	18

1. Introdução

1.1 Superfícies Contaminadas

O estudo de superfícies contaminadas existe em diversas áreas da indústria e da ciência [1], e é particularmente importante para as áreas de proteção radiológica e gestão de rejeitos radioativos.

A técnica do esfregaço tem sido usada nos últimos 50 anos tanto em institutos de pesquisa como na indústria como uma forma de caracterizar rejeitos a partir da contaminação de suas superfícies [2].

Com o uso dos esfregaços, é possível determinar a radioatividade da área de uma superfície e assim estimar a atividade total do rejeito sem precisar medir toda a superfície do material.

Todavia, essa técnica demonstrou-se de difícil reprodução [3] e costuma apresentar dados poucos confiáveis, que são mais proveitosos para determinar se uma superfície está contaminada do que para estimar um valor específico para a atividade total dessa superfície.

Esse problema de precisão é tratado neste trabalho como o “Problema do Esfregaço”, e discorreu-se sobre suas causas e possíveis soluções nos capítulos seguintes.

1.20 Problema do Esfregaço e a Eficiência Média

O problema do esfregaço consiste em descobrir qual é a eficiência média de amostragem de um esfregaço, de modo a determinar qual é a quantidade de material removido da superfície contaminada e quantos esfregaços serão necessários para remover todo o material da superfície.

Entende-se por eficiência média de amostragem de uma superfície, a fração média da quantidade de material contaminado que ele conseguirá remover de uma superfície por unidade de área, em ensaios com condições operacionais constantes, quando repetidos.

Contudo, a eficiência de amostragem de um método pode ser altamente variável para um mesmo equipamento, e é dependente de diversos fatores externos que são difíceis de determinar. Tentar entender esses fatores externos pode ajudar a

diminuir a variação entre as medidas, possibilitando assim obter um valor médio para o esfregaço.

Esse valor médio é importante, pois tornará muito mais fácil realizar a medida da radioatividade da superfície contaminada. Conhecendo o valor da eficiência do método usado é possível utilizar uma fórmula para determinar um valor estimado para a concentração de atividade na superfície do material contaminado.

A técnica do esfregaço é particularmente útil para caracterizar peças de equipamentos substituídos de usinas nucleares, as quais devido às suas grandes dimensões e altas taxas de dose são consideradas como rejeitos difíceis de medir com métodos diretos.

Após conhecer a eficiência média de amostragem é possível estimar a concentração de atividade da superfície e, usando esses dados, extrapolar a atividade total do rejeito medido, levando em conta sua geometria.

1.3 Hipóteses Adotadas

Todos os cálculos assumem as seguintes condições como verdadeiras:

- A eficiência média de amostragem do esfregaço é um valor mensurável constante com uma incerteza avaliada pelo desvio padrão de várias medidas.
- A eficiência média depende da pressão exercida pelo operador sobre a superfície amostrada e, portanto, se supõe que a pressão para todos os esfregaços é constante de modo a se obter um valor representativo.
- A fração do material só é removida por meio do esfregaço, ignorando fatores como decaimento, mudança de estado, etc.
- A atividade removida da superfície depende da área amostrada e, portanto, supõe-se que essa área é igual e constante para todas os ensaios. Ou seja, os cálculos desconsideram alterações nas medidas que podem estar associadas à alteração da geometria da superfície contaminada após cada esfregaço.
- A geometria da superfície da área amostrada é considerada regular

É importante destacar que a última condição é a mais difícil de ser cumprida em um experimento real. Para isso, o experimento precisa ser realizado de modo a mitigar os efeitos causados pela contínua aplicação de esfregaços na superfície contaminada.

2. Objetivo

Identificar uma fórmula analítica para conhecer a eficiência média de amostragem do esfregão utilizando resultados de medidas de atividade em esfregaços sucessivos da mesma área. Buscou-se também entender e descrever quais seriam os equipamentos e métodos mais adequados para averiguar os resultados experimentalmente.

Desenvolver cálculos capazes de solucionar o problema do esfregão através de uma postulação matemática que possa ser verificada experimentalmente no futuro.

Propor experimentos que serão capazes de confirmar se a solução matemática encontrada é condizente com a realidade ou se precisará ser modificada para descrever corretamente o problema do esfregão.

3. Materiais e métodos

3.1 Fórmula para a Eficiência de Amostragem do Esfregão

Para obter o valor da eficiência lançou-se uso da generalização de equações que descrevem o processo de limpeza de superfície. Neste caso, considerando uma atividade inicial A_0 , distribuída sobre uma superfície, medida em becquerel:

$$A_0 \times E_1 = \frac{R_1}{\epsilon} \quad (1)$$

sendo E_1 a eficiência de amostragem do primeiro esfregão, R_1 a contagem da atividade no esfregão, medida em contagens por minuto, e ϵ a eficiência global do detector, medida em contagens por minuto por becquerel, para a geometria de contagem. Simplificando a equação:

$$A_0 \times E_1 = C_1 \quad (2)$$

na qual C_1 é a quantidade de material radioativo que foi retirada da superfície amostrada, medida em becquerel, e que é determinada experimentalmente. A quantidade de material restante na superfície amostrada pode ser expressa por:

$$A_0(1 - E_1) = A_1 \quad (3)$$

em que A_1 representa a atividade restante na superfície do material, após o primeiro esfregão. Fazendo um novo esfregão na mesma superfície, chegamos à seguinte expressão para a atividade contida no segundo esfregão (C_2):

$$A_0(1 - E_1)E_2 = C_2 \quad (4)$$

em que E_2 é a eficiência de amostragem do segundo esfregão, e da qual se pode concluir que a atividade A_2 restante na superfície após o segundo esfregão é:

$$A_0(1 - E_1)(1 - E_2) = A_2 \quad (5)$$

Supondo que exista como definir uma média para todos os n valores de E , E_1 , E_2, \dots, E_N ; então pode-se chamar E de eficiência média, e assim podemos simplificar as equações considerando $E_N \cong \bar{E} = E$.

Deste modo é possível reescrever a última expressão como:

$$A_0(1 - E)^2 = A_2 \quad (6)$$

Por fim, combinando as expressões obtêm-se:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{EA_0}{EA_0(1 - E)} \quad (7)$$

e cancelando os termos semelhantes:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{(1 - E)} \quad (8)$$

Manipulando a equação de modo a escrever E em função dos valores de C_1 e C_2 , os quais podem ser medidos experimentalmente, obtêm-se uma expressão para cada valor da eficiência de amostragem:

$$E_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \quad (9)$$

Por indução matemática é possível concluir que o valor de E será sempre dado por:

$$E_N = \frac{C_N - C_{N+1}}{C_N} \quad (10)$$

3.2 Média Harmônica e Desvio Padrão da Taxa de Eficiência

Como E tem a natureza de uma taxa, para se obter seu valor médio, deve-se usar a aproximação da média harmônica [4], que é descrita pela equação:

$$\bar{E} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i}} \quad (11)$$

na qual N é o número de esfregaços realizados e E_i é o valor da eficiência E para cada esfregaço. Para se chegar ao desvio padrão da média harmônica [5] é necessário aplicar a seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha^2} \frac{S_1/E_i}{\sqrt{N-1}} \quad (12)$$

Onde S_1/E_i é o desvio padrão das recíprocas das observações da amostra e α é o coeficiente que pode ser obtido através da expressão:

$$\alpha = \frac{1}{E} \quad (13)$$

3.3 Método computacional para simular sucessivos esfregaços e Lei dos Grandes Números

Para verificar se a aproximação de que cada medida da eficiência de uma amostra poderia ser considerada como sendo igual à eficiência média, usou-se uma simulação simples, elaborada na planilha eletrônica Excel.

A simulação consiste em usar um valor fixo para a atividade total da superfície amostral e a partir desse valor calcular a eficiência média da amostra usando eficiências aleatórias para cada amostragem. Na literatura, o valor de 10% é considerado satisfatório e conservador para a eficiência de amostragem. Neste trabalho, adotou-se um valor de E variando entre 10% e 20%. Para gerar uma tabela de valores que pudesse ser usada para gerar gráficos adequados, a atividade inicial foi fixada em 100 kBq. O valor é arbitrário e foi escolhido apenas para facilitar a visualização e interpretação dos resultados.

A eficiência média de amostragem, por sua vez, é calculada usando a média harmônica, que é mais indicada para esse tipo de taxa. O resultado obtido para a média foi usado em um novo cálculo, substituindo os valores das eficiências aleatórias.

Após esboçar um gráfico da atividade total restante na superfície amostral em função da quantidade de medidas realizadas usando a eficiência média, esboçaram-se gráficos para mais 23 simulações aleatórias.

Analisou-se os gráficos obtidos e, com eles, pode-se determinar se existia uma tendência no comportamento dos dados. Além disso, usou-se dessas simulações para avaliar estatisticamente a incerteza na estimativa da atividade inicial da superfície amostral.

A Lei Fraca dos Grandes Números [7] garante que o valor esperado das amostras tem grande probabilidade de ser próximo da média de um número grande de diferentes conjuntos de medidas. Ou seja, que o valor esperado de uma medida real da amostra provavelmente é muito próximo do valor estimado computacionalmente pelas simulações.

3.4 Método para determinar a atividade inicial da amostra

Como o método computacional demonstrou que é possível estimar a eficiência do esfregaço com a média harmônica, desenvolveu-se um método que usa esse valor médio para estimar a atividade inicial da superfície.

O método consiste em realizar 4 esfregaços consecutivos na mesma superfície para coletar amostras, medir a concentração de atividade presente nas amostras coletadas e a partir desses valores calcular 3 valores de eficiência, permitindo assim o cálculo da média harmônica da taxa de eficiência dos esfregaços. Considerando que a eficiência média pode ser uma boa estimativa para a eficiência, calcula-se então o valor da atividade inicial A_0 , deixando o valor em função das amostras e da eficiência média.

Manipulando as expressões anteriores e usando indução matemática, obtêm-se:

$$A_0 = \frac{C_1}{\bar{E}} \quad (14)$$

e

$$A_0 = \frac{C_2}{(1 - \bar{E})^1 \bar{E}}$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$A_0 = \frac{C_i}{\left(1 - \bar{E}\right)^{i-1} \bar{E}} \quad (15)$$

nas quais i é o número natural correspondente à amostra coletada. A aplicação da fórmula para todas as 4 amostras coletadas fornece 4 estimativas diferentes de A_0 . A média desses valores será a estimativa da atividade inicial da superfície amostral.

3.5 Estimando a atividade inicial de um rejeito por meio do uso do esfregaço

Conhecendo a média da eficiência e a atividade de cada amostra tomada, pode-se calcular o valor da atividade total da superfície amostral testada. Assumindo uma distribuição homogênea para a superfície total do rejeito, pode-se deduzir a sua atividade total.

Usando a equação (1), manipulando a expressão e adicionando um fator de eficiência para os demais processos de medição, obtêm-se:

$$A_t = C_t \times \varepsilon_t \quad (16)$$

na qual C_t é a concentração de atividade removida pelo esfregaço, medida em Bq, ε_t é a eficiência de todos os demais processos de medição, sendo adimensional, e A_t é a atividade inicial estimada para a superfície amostral, medida em Bq.cm⁻². Como por hipótese a distribuição de atividade pelo rejeito é uniforme, basta conhecer a área total de sua superfície para chegar a um valor de atividade total.

3.5 Estimativa das incertezas para atividade total da superfície amostral

3.5.1 Estimativa de incerteza por meio do desvio padrão da média

A incerteza na estimativa da atividade da superfície amostral pode ser obtida usando o desvio padrão da média das 23 simulações aleatórias e comparando esse resultado com os gráficos observados. Usou-se para isso as fórmulas habituais para calcular a média simples, o desvio padrão e o desvio padrão da média, sendo o último o valor usado como estimativa da incerteza.

3.5.2 Estimativa de incerteza usando propagação de incertezas

Assumindo que a covariância entre as amostras coletadas seja nula, uma vez que as medidas não interferem com a incerteza da anterior, que a distribuição dos dados é gaussiana, e usando a teoria geral de propagação de incertezas [6]:

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial C_n}\right)^2 \sigma_{C_n}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \bar{E}}\right)^2 \sigma_{\bar{E}}^2} \quad (17)$$

na qual σ_A é a incerteza da atividade inicial, σ_{C_n} é a incerteza de C_n e $\sigma_{\bar{E}}$ é incerteza de \bar{E} . Aplicando a propagação para cada uma das fórmulas usadas para encontrar os diferentes valores de A_0 e extraindo a média das incertezas obtidas, chega-se um valor final de aproximadamente 5% do valor da média.

3.6 Proposta de classificação para rejeitos caracterizados por meio do esfregaço

Como o esfregaço não é uma técnica indicada para determinar com grande exatidão a atividade de superfícies contaminadas, não é prudente caracterizar os rejeitos baseando-se apenas no resultado das medidas realizadas, à exceção de casos onde há pouco ou nenhuma ambiguidade no resultado.

Propõe-se um limite superior e um limite inferior, equidistantes do limite de dispensa, como referência para classificar os rejeitos avaliados por esfregaço. Rejeitos com valores de atividade acima desse limite seriam indubitavelmente considerados como radioativos para os propósitos de armazenamento, e rejeitos abaixo do limite inferior seriam considerados rejeito comum.

Para todos os rejeitos com valores de atividade situados entre os limites determinados considera-se a possibilidade de uma reavaliação, tanto por método do esfregaço como por outro método para determinar com a maior exatidão possível a necessidade do armazenamento.

3.7 Proposta para montagem de arranjo experimental

A validação empírica dos resultados obtidos pelas simulações pode ser feita em um experimento que busque replicar todas as hipóteses adotadas na introdução deste relatório. Discorre-se a seguir sobre um resumo para um método empírico de validação.

Uma das principais dificuldades de obter resultados uniformes em um esfregaço decorre das variações de força exercidas durante a aplicação do método. Para mitigar esse efeito propõe-se o uso de fita adesiva como material, ao invés dos papéis usados. A fita já mostrou em estudos anteriores [2] que não só é mais eficaz na remoção de contaminantes das superfícies contaminadas como apresenta resultados mais uniformes que outros tipos de técnicas de medição.

Para garantir que a fita será aplicada com pressão constante, pode-se usar de uma máquina que aplica a fita sob um peso que desce sempre com a mesma velocidade e distribuirá sua massa de forma igual entre todos os pontos da fita.

Os efeitos geométricos e perdas devido às alterações nas superfícies reais também podem ser reduzidos drasticamente em um laboratório escolhendo usar uma superfície de vidro. Recomenda-se o uso de um vidro quadrado de tamanho bem conhecido e com bordas feitas com alguma substância que possa ser removida sem dificuldade. O vidro deve ter indicações de suas dimensões em sua superfície, de modo a facilitar a compreensão do operador da máquina sobre onde foram realizados os esfregaços anteriores.

Para contaminar a superfície do material, deve-se usar uma solução líquida radioativa com atividade previamente determinada. O isótopo escolhido deve ser razoavelmente puro, apresentar uma meia-vida superior a alguns dias e o menor nível de toxicidade possível.

Após aplicar a substância, basta aguardar até ocorrer a precipitação do isótopo radioativo e por fim iniciar a amostragem do esfregaço. Realizando o maior número de medidas que as condições permitirem será possível determinar um valor confiável para a eficiência média do esfregaço, e com esse valor observar se os dados tomados correspondem às simulações realizadas em função dessa eficiência média.

4. Resultados

4.1 Assumindo uma distribuição uniforme

Assumindo uma distribuição uniforme da probabilidade de uma amostragem ter eficiência entre dois valores pré-fixados, usou-se as fórmulas obtidas para simular computacionalmente o comportamento esperado de vários conjuntos de medidas de atividade total, variando aleatoriamente a taxa de eficiência entre os esfregaços em um

intervalo com variação de 10% a 20%, e esboçou-se gráficos ligando os pontos obtidos com linhas, para melhor visualizar o modelo, chamando tais conjuntos de linhas de “simulações realistas”.

Por hipótese, a média de um dos conjuntos de medidas obtidos no gráfico deve ser uma boa estimativa para qualquer conjunto que possa ser gerado aleatoriamente, dentro de uma incerteza conhecida.

Como os dados variam aleatoriamente, os gráficos gerados (Figura 1) jamais coincidem perfeitamente uns com os outros, mas é possível observar que apresentam uma tendência ao comportamento esperado.

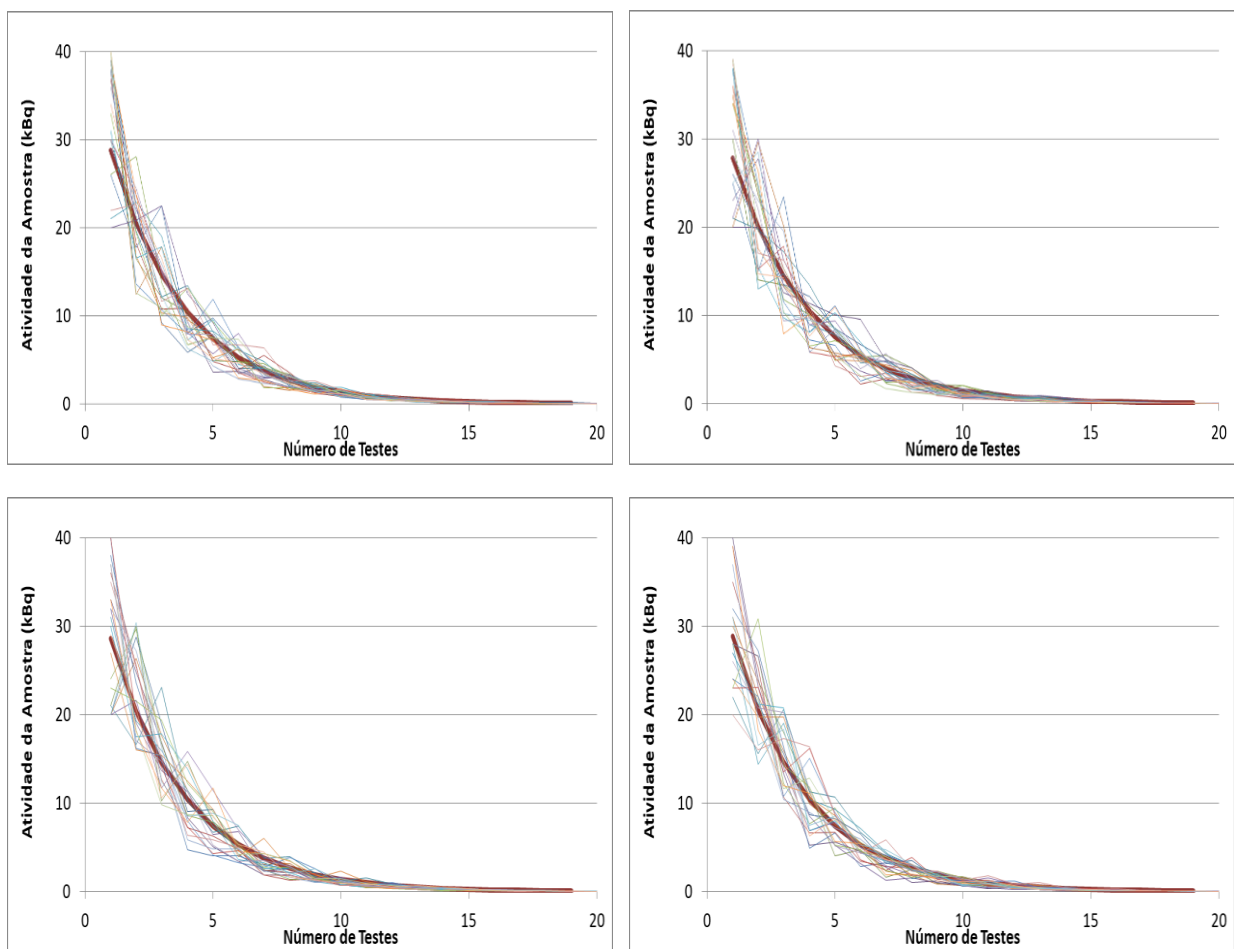


Figura 1: Amostra de um conjunto típico de gráficos da atividade de uma série de amostras de esfregaço em função da quantidade de esfregaços gerados por simulações, assumindo uma distribuição uniforme. A linha mais grossa representa a média das medidas enquanto cada linha mais fina representa uma série de medidas usando valores aleatórios para a eficiência dentro do limite estabelecido. (continua)

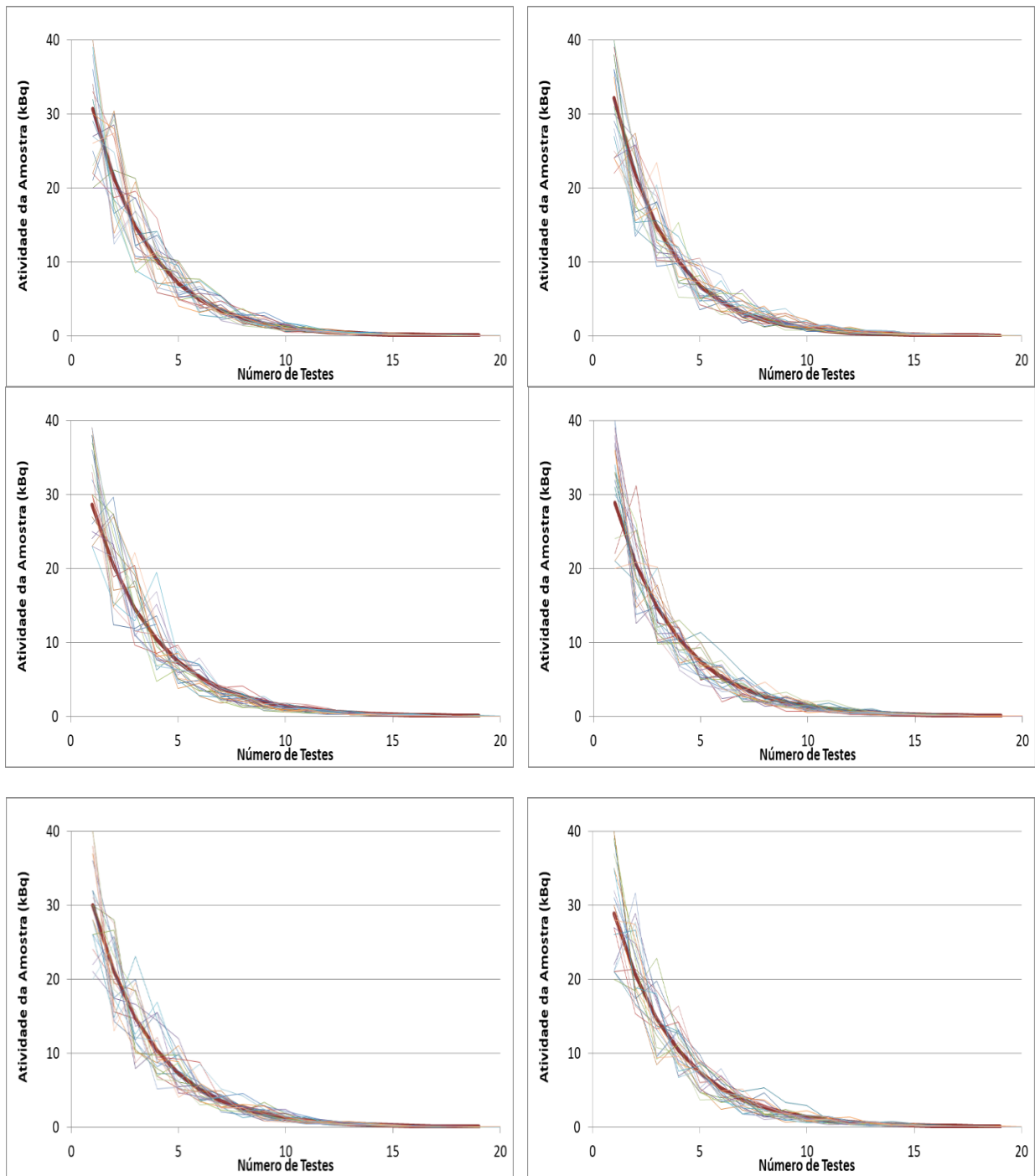


Figura 1: (continuação) Amostra de um conjunto típico de gráficos da atividade de uma série de amostras de esfregaço em função da quantidade de esfregaços gerados por simulações, assumindo uma distribuição uniforme. A linha mais grossa representa a média das medidas enquanto cada linha mais fina representa uma série de medidas usando valores aleatórios para a eficiência dentro do limite estabelecido.

Os gráficos da figura 1 representam os valores da atividade de cada amostra de um esfregaço em função da quantidade de esfregaços realizados. Esses gráficos exibem um comportamento caótico, e a média da atividade de cada medida seria uma estimativa ‘pobre’ para o valor de cada uma das simulações.

No entanto, usando-se o valor da atividade total contida na superfície amostral em função da quantidade de esfregaços o resultado é diferente. Com esses gráficos é possível determinar um alcance para os valores máximos e mínimos esperados em uma medida experimental (figura 2).

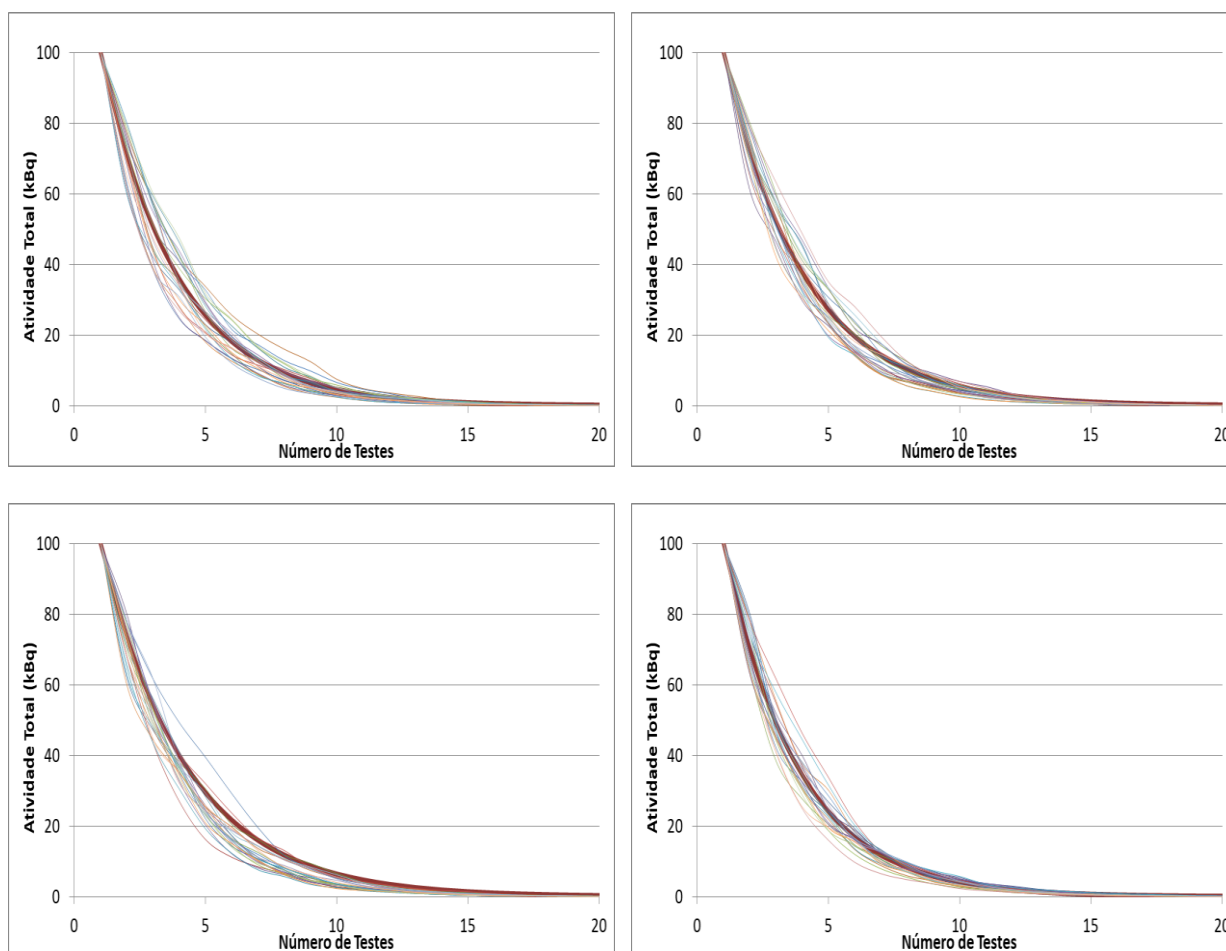


Figura 2: Amostra de um conjunto típico de gráficos da atividade total da superfície amostral em função da quantidade de esfregaços gerados por simulações, assumindo uma distribuição uniforme. A linha mais grossa representa a média das medidas enquanto cada linha mais fina representa uma série de medidas usando valores aleatórios para a eficiência dentro do limite estabelecido.

As amostras de gráficos são em sua maioria quase indistinguíveis umas das outras, evidenciando a existência de um padrão para os resultados das simulações. Com isso, é possível determinar um desvio padrão a partir da média, obtendo-se a incerteza do resultado.

Os gráficos sugerem que, utilizando-se a eficiência média e definindo um intervalo, é possível estimar a atividade total da superfície por meio da fórmula

apresentada anteriormente. No entanto, é preciso ressaltar que isso só é possível com uma boa estimativa do intervalo, e que a eficiência média de amostragem não deve ser muito menor que 10%.

É conveniente lembrar que é impossível realizar muitos testes em uma superfície contaminada real, de modo que não há como efetuar medidas suficientes até os resultados convergirem. Outro fator limitante trata-se da variação da eficiência. O resultado dos gráficos só é válido para intervalos pequenos do valor da eficiência, e quanto menor o intervalo, mais eficaz é o método.

Utilizando outros intervalos na variação entre a taxa mínima e máxima de eficiência pode-se notar que quanto menor o intervalo, menor a dispersão dos dados. Além disso, verificou-se que uma variação igual ou maior que 50% na taxa de eficiência compromete a eficácia do método.

Na simulação do esfregaço, a eficiência foi escolhida aleatoriamente entre os limites, neste caso entre 10% e 20%, ou seja, a distribuição dos valores usados na simulação é uniforme. Porém, é possível determinar um valor médio para ser usado como referência em uma simulação que assuma que a distribuição dos dados será gaussiana. Existem diversas vantagens em adotar a distribuição normal ao invés da uniforme, que serão elaboradas a seguir.

4.2 Assumindo uma distribuição gaussiana

Uma distribuição gaussiana é um comportamento mais provável a eficiência de amostragem nesse tipo de medida, uma vez que ela leva em conta a possibilidade de valores com variações bem maiores que o intervalo de números aleatórios estipulados. Além disso, a distribuição gaussiana possui uma série de propriedades matemáticas convenientes para o tratamento estatístico dos dados obtidos por meio das simulações.

Usando a média da normal como sendo aproximadamente 15%, conforme estimado pela simulação que usava a distribuição uniforme, e usando como desvio padrão um intervalo de 2.5%, chega-se aos gráficos da figura 3.

Observa-se que o gráfico continua apresentando um mesmo padrão em diferentes simulações. Com a distribuição gaussiana esse comportamento fica mais acentuado, sendo ainda mais difícil diferenciar um gráfico do outro. É possível assumir

que o gráfico apresentará um padrão característico para outras formas de distribuição escolhidas ao gerar os dados.

Usando a distribuição gaussiana, os gráficos ficam mais bem-comportados, resultando em médias mais bem definidas e com desvios padrões menores. Nota-se que, diferente da distribuição uniforme, os resultados passam a convergir apenas a partir de 15 medidas, e não 10. Todavia, as variações são muito menores, permitindo uma boa estimativa para a atividade de cada esfregaço em qualquer ponto do gráfico.

Esse resultado é muito importante para a elaboração do experimento empírico, pois é o maior indicador da possibilidade de estimar corretamente um valor para os pontos não medidos do gráfico usando as simulações.

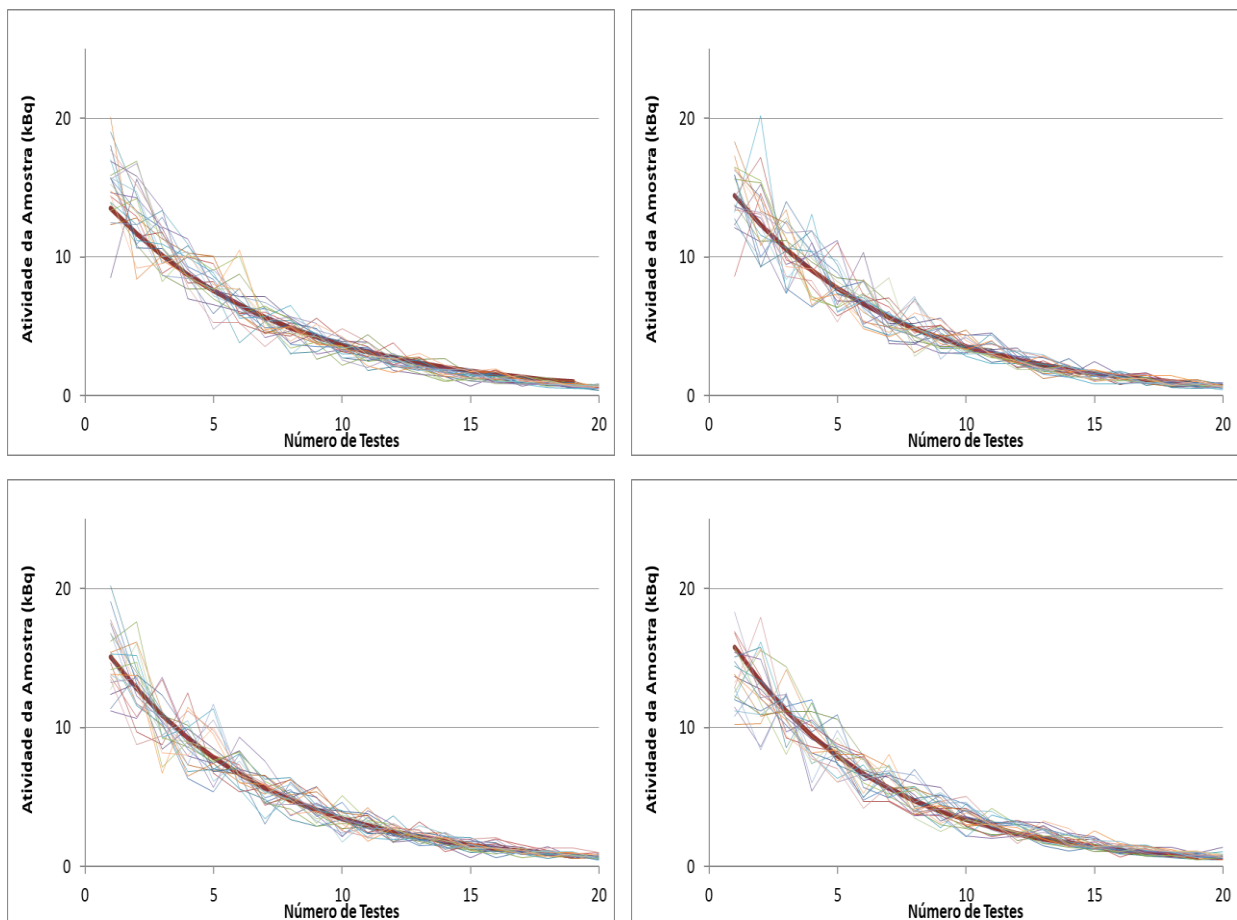


Figura 3: Amostra de um conjunto típico de gráficos da atividade de uma série de amostras de esfregaço em função da quantidade de esfregaços gerados por simulações, assumindo uma distribuição gaussiana. A linha mais grossa representa a média das medidas enquanto cada linha mais fina representa uma série de medidas usando valores aleatórios para a eficiência dentro do limite estabelecido. (continua)

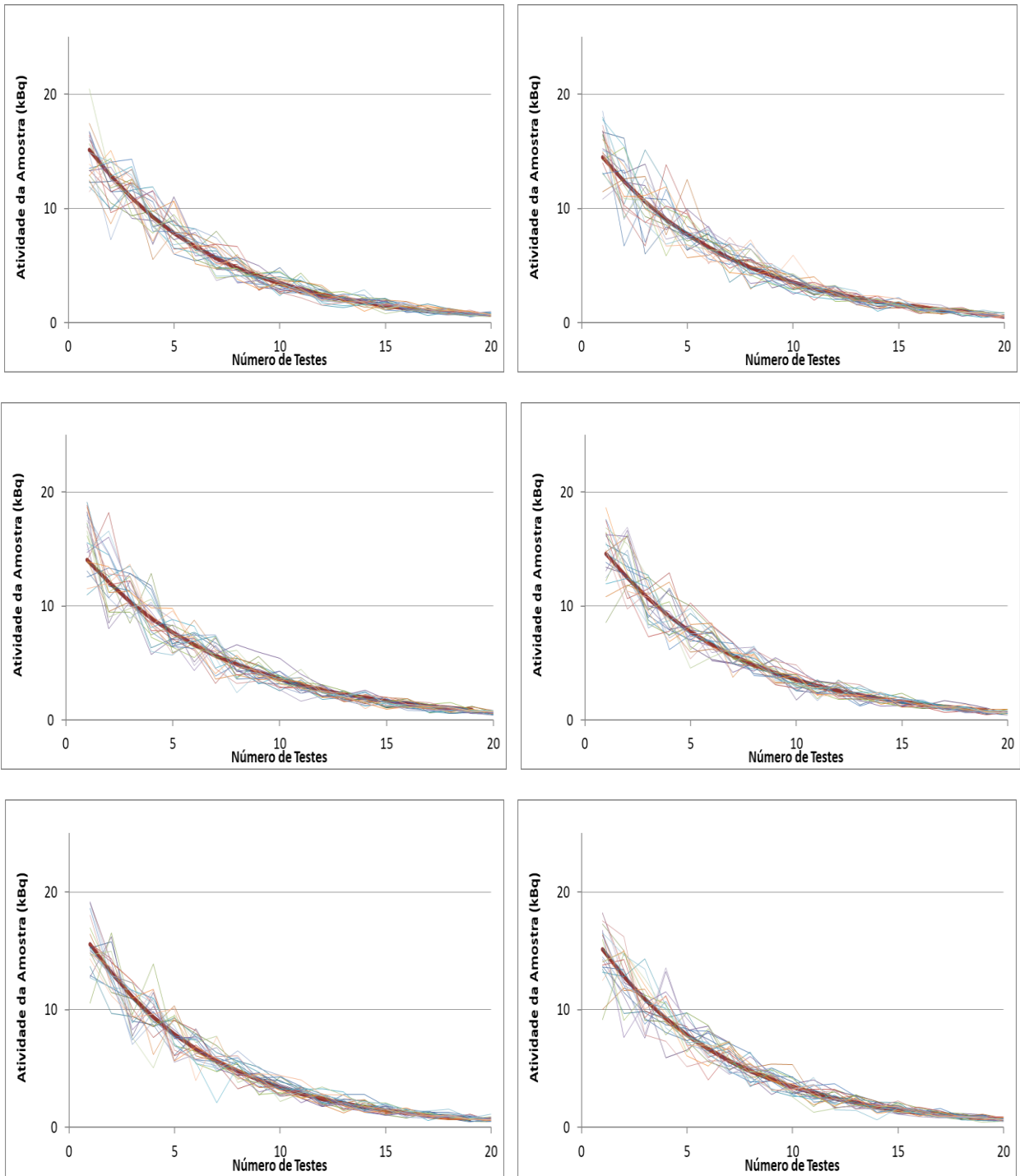


Figura 3: (continuação) Amostra de um conjunto típico de gráficos da atividade de uma série de amostras de esfregaço em função da quantidade de esfregaços gerados por simulações, assumindo uma distribuição gaussiana. A linha mais grossa representa a média das medidas enquanto cada linha mais fina representa uma série de medidas usando valores aleatórios para a eficiência dentro do limite estabelecido.

Testando os limites da validade dos resultados com a distribuição gaussiana (figura 4) observa-se que desvios padrões acima de 20% invalidam o resultado. Contudo, não é esperada uma variação tão abrupta nas medidas empíricas. Não obstante, para um conjunto suficientemente grande de medidas espera-se que o desvio padrão tenda a 2.5%.

O fato da distribuição ser gaussiana permite que seja realizada a propagação de erros usando a fórmula mais simples, que indica uma incerteza esperada de aproximadamente 5% nas medidas. Um resultado surpreendentemente baixo dado a amplitude esperada de variações. O experimento empírico deve averiguar até que ponto a precisão e exatidão dessas estimativas estão adequadas.

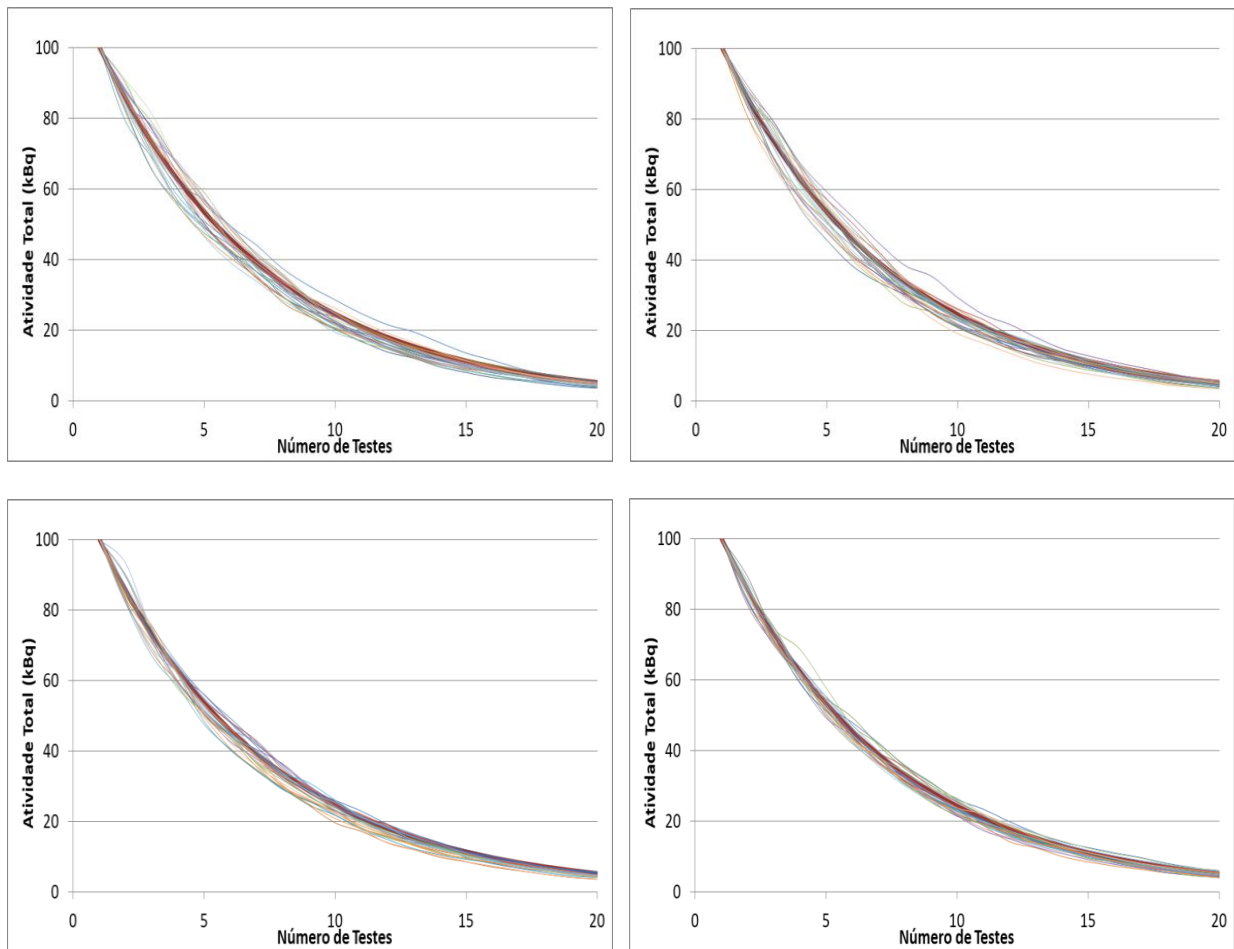


Figura 4: Amostra de um conjunto típico de gráficos da atividade total da superfície amostral em função da quantidade de esfregaços gerados por simulações, assumindo uma distribuição gaussiana. A linha mais grossa representa a média das medidas enquanto cada linha mais fina representa uma série de medidas usando valores aleatórios para a eficiência dentro do limite estabelecido.

5. Conclusão

Obteve-se uma fórmula descritiva do procedimento de amostragem para o problema do esfregaço. Além disso, esboçou-se gráficos com base em simulações que indicam o comportamento teórico esperado para o método. Os resultados indicam que existe a possibilidade de se determinar a atividade total de uma superfície de amostragem, e conseqüentemente a atividade inicial da superfície de um rejeito.

Fornecer-se um método experimental que propõe a verificação dos resultados obtidos. Este método poderá ser aprimorado e desenvolvido em trabalhos futuros, capazes de testar sua validade.

Observa-se que o problema do esfregaço trata-se de um problema de inferência estatística a partir de medidas com flutuações impossíveis de se estimar analiticamente. Esse tipo de problema estende-se a diversas outras áreas que exigem tratamento numérico e estatístico dos dados, e se provado correto pode beneficiar outros ramos de pesquisa.

O desenvolvimento de novas técnicas para realizar medidas e classificações de rejeitos radioativos é importante para o avanço da tecnologia nuclear, visando sempre reduzir os custos envolvidos no processo assim como aumentar a exatidão das medidas realizadas para garantir a segurança dos profissionais do ramo, assim como da população geral e da natureza.

Referências Bibliográficas

- [1]** J.P. Wheeler, J.D. Stancliffe. Comparison of methods for monitoring solid particulate surface contamination in the workplace. Health and Safety Laboratory, Sheffield, U.K.
- [2]** United States Environmental Protection Agency. A Performance-Based Approach to the Use of Swipe Samples in Response to a Radiological or Nuclear Incident. Cincinnati, Ohio. Outubro de 2011.
- [3]** Bum-Kyoung Seo et al. Development of an automatic smear sampler and evaluation of surface contamination. Division of Decommissioning Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Deokjin-dong Yuseong-gu Daejeon, Korea
- [4]** Ya-lun Chou. Statistical Analysis. Holt International, 1969.
- [5]** Norris, Nilan. The Standard Errors of the Geometric and Harmonic Means and Their Application to Index Numbers. The Annals of Mathematical Statistics Vol. 11, No. 4. 1940.
- [6]** Clifford, A. A. Multivariate error analysis: a handbook of error propagation and calculation in many-parameter systems. 1973.
- [7]** William Feller. An introduction to probability theory and its applications Vol 2, 2nd Edition, 1968.