

**APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NAS INDÚSTRIAS  
DO PETRÓLEO, GÁS E PETROQUÍMICA**

**PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS**

**Parte I**

**(Perfilagens gama natural e gama-gama)**

**A. C. CASTAGNET, URIEL DUARTE, TAIZIRO OHARA,  
MOHSEN SAID e CLÁUDIO SZULAK**

**INFORMAÇÃO IEA N.º 27**  
Março — 1974

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA** ©  
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)  
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"  
SAO PAULO — BRASIL

**APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NAS INDÚSTRIAS  
DO PETRÓLEO, GÁS E PETROQUÍMICA**

**PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS**

**Parte I**

**(Perfilagens gama natural e gama-gama)**

**A. C. Castagnet, Uriel Duarte, Taiziro Ohara,  
Mohsen Said e Cláudio Szulak**

**Coordenadoria de Aplicação de Radioisótopos  
na Engenharia e na Indústria  
Instituto de Energia Atômica  
São Paulo - Brasil**

**Informação IEA Nº 27  
Março - 1974**

**Instituto de Energia Atômica**

**Conselho Superior**

Eng<sup>o</sup> Roberto N. Jafet – Presidente  
Prof.Dr.Emilio Mattar – Vice-Presidente  
Prof.Dr.José Augusto Martins  
Dr.Affonso Celso Pastore  
Prof.Dr.Milton Campos  
Eng<sup>o</sup> Helcio Modesto da Costa

**Superintendente**

Rômulo Ribeiro Pieroni

## PRÓLOGO

O presente relatório faz parte de uma série de 10 publicações de caráter informativo e didático, que serão editadas pelo Instituto de Energia Atômica de São Paulo, com o título "Aplicação de Radioisótopos nas Indústrias do Petróleo, Gás e Petroquímica".

A lista de temas básicos considerados nos diferentes fascículos da série é a seguinte:

- 1 - PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS, Parte I.  
(Perfilagem gama natural e gama-gama).
- 2 - PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS, PARTE II.  
(Perfilagens neutrônicas).
- 3 - ENGENHARIA DE CAMPO.
- 4 - TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS.
- 5 - ENGENHARIA DE PROCESSOS, Parte I.  
(Aplicação de traçadores radioativos).
- 6 - ENGENHARIA DE PROCESSOS, Parte II.  
(Instrumentos radioisotópicos de medição e controle).
- 7 - PRODUÇÃO, Parte I.  
(Processos por aplicação da radiação ionizante).
- 8 - PRODUÇÃO, Parte II.  
(Técnicas nucleares de análise).
- 9 - MANUTENÇÃO E SEGURANÇA INDUSTRIAL.
- 10 - INVESTIGAÇÃO TECNOLÓGICA.

Estes temas foram originalmente desenvolvidos a nível de pós-graduação durante o curso de "Aplicação de Radioisótopos nas Indústrias do Petróleo, Gás e Petroquímica", ministrado no IEA, pelo Eng<sup>o</sup> Antonio C. Castagnet, durante o primeiro semestre de 1972.

A série de relatórios além de constituir uma compilação ordenada e bastante completa do emprego de radioisótopos e radiações ionizantes nestas importantes indústrias, contém a contribuição pessoal dos autores no esclarecimento e aprofundamento de alguns temas, assim como na inclusão e análise de aplicações práticas, realizadas pela Coordenadoria de Aplicação de Radioisótopos na Engenharia e na Indústria (CAREI).

O nível em que foram abordados os diferentes temas esteve condicionado, fundamentalmente, ao caráter didático que se pretendeu imprimir a esta obra a fim de facilitar no futuro, a repetição de cursos similares. Não obstante, muitos destes relatórios podem chegar a constituir verdadeiros guias teóricos-práticos para os projetos e ou utilização industrial de técnicas e equipamentos baseados no uso de radioisótopos e radiações ionizantes.

## ÍNDICE

SEÇÃO	TEMA	Pág.
1.0.0	<b>PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS</b>	1
1.1.0	<b>PERFILAGEM GAMA NATURAL</b>	6
1.1.1	Introdução	6
1.1.2	Teoria de Medição	6
	1.1.2.1 Radioatividade gama natural total	8
	1.1.2.2 Espectrometria gama natural	8
1.1.3	Projeto e construção das sondas	11
	1.1.3.1 Características construtivas	12
	1.1.3.2 Cálculo da constante de tempo	12
1.1.4	Calibração dos equipamentos	13
1.1.5	Aplicações e limitações	17
1.2.0	<b>PERFILAGEM GAMA-GAMA</b>	20
1.2.1	Introdução	20
1.2.2	Teoria de medição	20
1.2.3	Projeto, construção e calibração das sondas de perfilagem G-G	27
1.2.4	Execução, aplicações e limitações da perfilagem GG	34
<b>APÊNDICE A</b>	<b>PROJETO DE UMA SONDA PARA A MEDIÇÃO DE DENSIDADE POR REFLEXÃO GAMA</b>	<b>39</b>
A.1	Características da sonda	39
A.2	Instrumentos de leitura e registro	40
A.3	Amostra utilizada	40
A.4	Descrição da experiência	40
A.4.1	Determinação do coeficiente mássico de atenuação dos raios gama de $^{60}\text{Co}$ no dolomito	40
A.4.2	Determinação do espectro de energias da radiação gama na amostra, para várias distâncias fonte-detetor (r)	41
A.4.3	Determinação da energia dos fótons secundários refletidos	48
A.4.4	Determinação da contagem total $R_{T2}$ em função da distância fonte-detetor (r)	48
A.4.5	Determinação da radiação direta (BG) em função da distância fonte-detetor (r)	50
A.4.6	Determinação da constante n para a amostra utilizada e a fonte de $^{60}\text{Co}$	53
A.4.7	Determinação da distância ótima ( $r_{\text{ót}}$ ) entre fonte e detetor	55
A.4.8	Curva de calibração da sonda utilizada	55
A.4.9	Erro relativo na determinação da densidade	56

# APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS NAS INDÚSTRIAS DO PETRÓLEO, GÁS E PETROQUÍMICA

A. C. Castagnet, Uriel Duarte, Taiziro Ohara, Mohsen Said e Cláudio Szulak

## RESUMO

São descritos os objetivos gerais da perfilagem de poços petrolíferos e a teoria de funcionamento, projeto e aplicação das sondas para a perfilagem gama natural e gama-gama.

A medição da radiação gama natural é utilizada principalmente para identificar a litologia das formações atravessadas pela perfuração e constitui também um meio auxiliar para diferenciar os estratos produtivos, estimar o índice de permeabilidade em formações xistosas, medir a espessura das camadas e, finalmente, facilitar a interpretação e correção de outras medições.

A perfilagem gama-gama tem por objetivo a medição e registro contínuo das variações da densidade global dos estratos, em função da profundidade. Esta medida serve, por sua vez, para calcular a porosidade das formações litológicas. Combinada com outros tipos de perfilagem, constitui uma boa aproximação para o estudo de zonas de interesse sob condições adversas, tanto no que diz respeito a perfuração como ao tipo de jazida.

O relatório apresenta alguns exemplos práticos em relação com o projeto e utilização das sondas para a perfilagem gama natural e gama-gama.

## 1.0.0 - PERFILAGEM DE POÇOS PETROLÍFEROS

### Parte I

A perfilagem de poços tem por objetivo obter informações das características litológicas dos estratos atravessados pela perfuração, dos fluidos presentes nas formações e, finalmente, das condições de construção e ou estruturas dos poços.

Em suma, uma perfilagem consiste na medida e registro contínuo de um determinado parâmetro, ao longo das paredes do poço, em função da profundidade. Com este propósito utiliza-se uma sonda de medição que é introduzida e deslocada progressivamente na perfuração.

Cada tipo de perfilagem tem um nome próprio, o qual pode ser derivado tanto do parâmetro a ser medido, como da técnica utilizada para efetuar a medição. Assim sendo, entre as perfilagens clássicas, tem-se:

#### a) AUTO POTENCIAL (AP) ou potencial espontâneo (PE).

É a medição e registro contínuo das pequenas variações naturais, devidas à diferença de potencial ao longo da coluna de fluido no poço, com relação a terra na superfície, a medida que a sonda desce ou sobe na perfuração. Estas variações de potencial são motivadas, principalmente, pela presença de correntes eletroquímicas nos contatos entre o fluido, contido no poço e os fluidos originais das formações perfuradas.

Normalmente, a perfilagem de P. E. é registrada em forma simultânea com a perfilagem de

resistividade e é utilizada para correlação litológica e determinação da resistividade da água contida nas formações. Quando a resistividade do fluido contido no poço é conhecida, a da água da formação pode ser deduzida matematicamente.

Este tipo de perfilagem somente pode ser feita em poços não revestidos, cheios de fluidos.

#### **b) RESISTIVIDADE PUNTUAL.**

É um registro contínuo de resistência entre dois eletrodos, um colocado na superfície do terreno e outro na sonda, este último em contato permanente com a parede do poço. O contato pode ser obtido através do fluido (em poços cheios) ou por meio de uma sapata especial acoplada a sonda. Como no caso anterior, esta perfilagem somente poderá ser executada em poços não revestidos. Nos que estão cheios de fluido, a perfilagem de resistividade é feita utilizando-se a mesma sonda empregada na perfilagem P. E.. Nesse caso é introduzida na formação, pelo eletrodo da sonda, uma corrente alternada de intensidade constante, detetando-se no eletrodo de superfície, a sua correspondente voltagem alternada.

Os valores de resistividade elétrica das formações, calculados por este método, dependem das resistividades da matriz, da água nela contida, do diâmetro do poço e da resistividade do fluido que enche a perfuração.

#### **c) TEMPERATURA.**

É o registro contínuo da temperatura em função da profundidade do poço por meio de uma sonda dotada de um elemento sensor semi-condutor, de alta sensibilidade. A perfilagem de temperatura é utilizada para localizar a altura do cimento e detetar zonas de entrada ou saída de fluidos. Pode ser executada em poços com ou sem revestimento.

#### **d) CALIBRE.**

É o registro contínuo do diâmetro médio do poço. Normalmente esta perfilagem é realizada em poços não revestidos, embora em certos casos também seja útil quando executada dentro do tubo de revestimento.

A sonda de calibre tem, geralmente, três braços retráteis, os quais são abertos ou fechados por meio de um motor, comandado da superfície do terreno. Os braços permanecem fechados durante a descida da sonda, até se atingir a profundidade desejada para o início das medições. Neste ponto, os braços são abertos executando-se a perfilagem de calibre durante a ascensão da ferramenta. Um "transductor" (sensor-transformador) converte os movimentos dos braços em um sinal elétrico que é transmitido à superfície.

Esta perfilagem é utilizada na determinação do diâmetro do poço em função da profundidade, com a finalidade de selecionar-se o assento do tubo de revestimento, calcular o volume de encascalhamento, a quantidade de cimento requerida para encher o espaço anelar e para outros propósitos.

#### **e) SÔNICO.**

É o registro contínuo da amplitude e do tempo de trânsito de um pulso acústico,

detetado após a sua propagação e reflexão na formação e ou nos elementos estruturais do poço. Nos poços revestidos, a amplitude detetada na tubulação é função da porcentagem da área do tubo, com relação a sua superfície total, que ficou efetivamente aderida ao cimento do espaço anelar. O tempo de trânsito na formação é governado principalmente pela porosidade, embora a matriz da rocha e conteúdo de fluidos tenham também alguma influência. A amplitude dos pulsos provenientes das formações pode ajudar na localização de fraturas.

As perfilagens de poços denominadas "nucleares", caracterizam-se pela utilidade de sondas contendo somente detetores ou detetores junto com emissoras de radiação atômica.

Tanto a radioatividade natural das formações, como os processos de interação entre a formação e a radiação nuclear emitida por uma fonte artificial introduzida na perfuração, constituem meios eficazes e muitas vezes únicos de se obter alguns dos dados procurados pela perfilagem de poços.

Dentro da classificação das perfilagens nucleares de poços, poderiam ser incluídas também certas técnicas de traçadores radioativos. Estas últimas geralmente são referidas ao estudo das características dinâmicas do sub-solo, associados tanto a fenômenos naturais como a processos artificiais de perfuração, complementação, desenvolvimento e reativação secundária de poços petrolíferos.

Neste capítulo serão considerados apenas as perfilagens baseadas na detecção de radiação gama natural e na utilização de fontes seladas de radiação nuclear. As Técnicas que empregam traçadores radioativos são descritas no capítulo 2.0.0 em relação com as diferentes aplicações de radioisótopos e fontes de radiação nuclear na engenharia de campos petrolíferos.

Na figura 1 é mostrado, esquematicamente, os componentes básicos de um equipamento para perfilagem de poços, baseado na emissão e detecção de radiação nuclear.

A sonda contém a fonte radioativa, um detetor apropriado para o tipo e energia da radiação a medir (gama ou neutrons) um circuito eletrônico para a polarização do detetor e o processamento do sinal antes de sua transmissão a superfície.

O movimento vertical da sonda dentro da perfuração é obtido por meio de um cabo de aço acionado por um guincho motorizado. O cabo contém no seu interior, um ou mais condutores elétricos, para alimentação da sonda e transmissão dos sinais. A extremidade livre do mesmo termina em uma peça denominada "cabeça do cabo", a qual serve para se efetuar a conexão elétrica e mecânica da sonda ao sistema de medição.

Geralmente os equipamentos são projetados de maneira que um mesmo sistema possa ser utilizado para diferentes perfilagens. Portanto, a "cabeça do cabo" deve permitir o engate de uma ampla variedade de sondas nucleares ou elétricas.

A rapidez com que a sonda é descida ou subida no poço, durante uma perfilagem, depende do parâmetro que se mede, dos propósitos da medição e das características do equipamento utilizado. O cabo corre sobre uma polia cujas rotações são utilizadas para medir a profundidade em que se encontra a sonda no poço e para controlar o movimento do papel de registro, de modo que a sua escala vertical corresponda com a profundidade do registro.

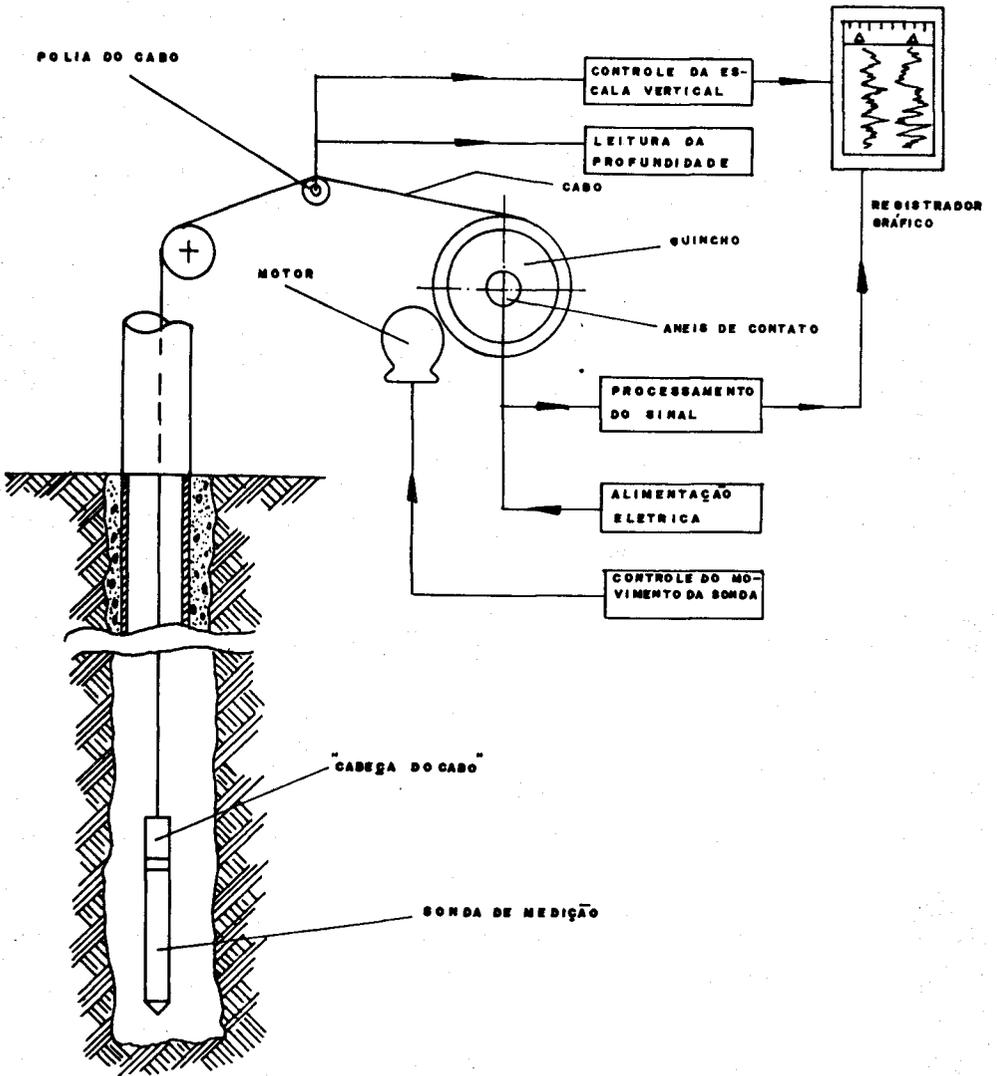


Fig. 1 - Componentes Básicos de um Sistema de Perfilagem de Poços

Os receptores eletrônicos de superfície incluem circuitos seletores de impulsos, os quais podem variar desde simples discriminadores de "ruído" até complicados analisadores multicanaís de amplitude e tempo. Após ser dada a forma e acondicionamento, os pulsos passam a um integrador que gera uma tensão de saída proporcional a taxa de contagem. Esta tensão de corrente contínua pode ser comparada contra uma tensão de referência (deslocamento de zero) e as diferenças amplificadas (controle de sensibilidade), antes de sua apresentação no registro gráfico.

Dependendo dos propósitos e características das perfilagens os equipamentos podem ser simples, leves e portáteis ou resultar em unidades complexas, pesados, que necessitam ser instalados sobre veículos para seu transporte e operação. O primeiro elemento do sistema a ser selecionado é o cabo, devendo-se determinar seu tamanho, tipo e número de condutores em função das perfilagens a serem executadas. Por exemplo as curvas de resistividade, com múltiplos eletrodos espaçados, requerem cabos de vários condutores. No caso de se desejar a obtenção simultânea, em uma única perfilagem, dos valores da radioatividade gama natural, do P. E. e da resistividade puntual, também seria necessário utilizar um cabo multi-condutor. Se a perfilagem necessitar de tomada de amostras laterais (extraídas com aparelhos especiais), máxima importância deve ser dada ao tamanho do cabo.

Após determinar-se o número de condutores, a seção do cabo e o comprimento necessário para executar as operações previstas, pode-se selecionar o tipo e tamanho do guincho e aparelhos complementares.

Isto, por sua vez, orientará a seleção do sistema de transporte e montagem mais apropriados. Em geral, os cabos de um só condutor têm mais isolamento elétrico e são mais robustos e confiáveis que os cabos multi-condutores. Nos equipamentos menores o cabo de 3/16" de um só condutor é o mais utilizado. Em seguida vem o de 3/16" com quatro condutores, para o caso em que se requer a obtenção simultânea das perfilagens gama natural, P. E. e resistividade puntual em apenas uma "corrida" dentro da perfuração.

A alimentação elétrica dos circuitos contidos na sonda e a transmissão e recepção dos sinais, se fazem no eixo do tambor de arrolamento do cabo, por meio de um sistema de anéis e contatos deslizantes.

Como qualquer outro método de prospecção geofísica, as técnicas nucleares de perfilagem de poços têm suas vantagens e limitações próprias. Também, tal como as perfilagens clássicas, sua utilidade aumenta consideravelmente quando executadas e interpretadas em conjunto com outros registros.

Os méritos principais das técnicas nucleares de perfilagem podem ser assim resumidos:

- a) são aplicáveis indistintamente a poços com ou sem revestimentos;
- b) o tipo e a energia da radiação emitida e o tipo e a energia da radiação detetada, permitem selecionar um determinado processo de interação, o qual, por sua vez é específico de uma propriedade física ou química da formação investigada;
- c) possibilitam o estudo dinâmico do movimento de fluidos e das operações de desenvolvimento da perfuração.

A exatidão dos resultados está limitada por três fatores:

- 1) condições de medição, determinadas pelas características da perfuração e pela posição relativa da sonda na seção de medida;
- 2) erros instrumentais, incluindo os de calibração do sistema;
- 3) volume da formação investigada, sendo que a maior influência sobre as medições provém de uma esfera com raio variável entre 15 e 60 cm, com respeito a fonte, dependendo do tipo de perfilagem e do terreno investigado.

## 1.1.0 - PERFILAGEM GAMA NATURAL

### 1.1.1 - Introdução

A perfilagem gama natural (G. N.) consiste na medição e, em alguns casos, na análise da radiação gama emitida pelos elementos radioativos naturais, que podem existir nas formações atravessadas pela perfuração, com o objetivo de diferenciar zonas potencialmente produtivas de gás ou de petróleo e de efetuar estudos de correlação litológica.

Em virtude da natureza penetrante, dos raios gama, o método é aplicável indistintamente em poços com ou sem revestimento. Normalmente é empregado em conjunto com outras perfilagens, afim de ampliar ou complementar as informações necessárias nas distintas etapas de estudo e posterior aproveitamento das perfurações.

A radioatividade natural de uma rocha depende principalmente do seu conteúdo em  $^{40}\text{K}$  (potássio-40) e dos elementos radioativos originados durante o decaimento do  $^{238}\text{U}$  (série do urânio/rádio) e do  $^{232}\text{Th}$  (série do tório). A sucessão de decaimento e as características destes elementos radioativos são apresentados nas tabelas 1 e 2, para cada uma das séries, acima mencionadas.

As porcentagens indicadas para as energias dos diferentes tipos de radiação, estão relacionadas com as desintegrações do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ , respectivamente.

Como pode ser observado, ambas as séries terminam em um outro isótopo estável do chumbo.

A existência de elementos radioativos naturais, apesar do tempo transcorrido desde a origem da Terra, explica-se por suas meias-vida extremamente longas, a saber:

potássio 40	—	$1,3 \times 10^9$ anos
urânio 238	—	$4,5 \times 10^9$ anos
tório 232	—	$1,41 \times 10^{10}$ anos.

### 1.1.2 - Teoria de Medição

A distribuição dos elementos radioativos naturais pode ser relacionada com o desenvolvimento das formações geológicas individuais (associado com a atividade tectônica terrestre) e com processos de sedimentação, que deram origem a muitas das rochas sedimentares existentes. Estas tiveram sua origem na erosão mecânica e química das rochas, principalmente das rochas ígneas, as quais continham originariamente a maior quantidade do potássio terrestre e uma grande parte dos elementos radioativos das séries do urânio e do tório, sendo que no

decorrer dos processos erosivos houve a separação e deposição seletiva destes elementos.

Uma característica dos cations  $U^{4+}$  e  $Th^{4+}$  é o seu tamanho relativamente grande (0,97 e 1,02Å de raio, respectivamente). Isto faz com que eles tenham dificuldades em entrar na estrutura cristalina dos constituintes minerais essenciais, mais comuns das rochas ígneas e tendam a se concentrar em seus minerais acessórios. No caso do granito, o quartzo presente possui uma rede cristalina bem ordenada e com fortes uniões em todas as direções e quando cristaliza em forma pura, tende a eliminar as impurezas do fluido silicático, tais como os elementos radioativos. Os arenitos, provenientes da erosão mecânica do quartzo assim cristalizado, irá portanto, apresentar um baixo nível de radioatividade.

As micas e feldspatos, em troca, contém uma grande proporção de potássio terrestre e se decompõem com relativa facilidade em minerais argilosos. Os minerais que compõem as argilas têm uma rede cristalina aberta, caracterizada por fracas uniões entre si, favorecendo a inclusão de elementos radioativos na sua estrutura, por troca iônica e ou adsorção. Os ions dos elementos radioativos pesados, presentes nas águas percolantes responsáveis pelos processos de desgaste e transporte, resultam assim firmemente incorporados nas partículas de argila arrastadas em suspensão e que posteriormente se depositam.

O potássio presente na crosta terrestre, do qual 0,012% é o isótopo instável  $^{40}K$ , representa 0,3 %, em média, do volume das argilas comuns. Sabendo que os minerais de argila são os constituintes principais dos folhetos, é de se supor que estes apresentem elevados teores de radioatividade, sendo o que de fato ocorre.

Os cations de urânio e tório têm uma alta reatividade química. Por este motivo, eles são encontrados em uma ampla variedade de minerais, como compostos simples ou complexos.

A radioatividade total de um dado tipo de rocha depende tanto dos elementos instáveis, presentes em sua estrutura, como das concentrações de cada um destes elementos. Os níveis de radioatividade total variam dentro de amplos limites para as diferentes classes de rocha, como é mostrado na tabela 3.

TABELA 3

Radioatividade natural de alguns tipos de rochas, colocada em concentração equivalente em rádio.

Tipo de rocha		Ra pg/g.	U µg/g	Th µg/g	Th/U	$^{40}K$ g/g
ÍGNEAS	Ácida	1,34	4,0	13,4	3,3	0,026
	Intermediária	0,51	1,4	4,4	3,2	0,020
	Básica	0,38	1,1	4,0	3,6	0,014
	Ultrabásica	0,20	0,6	2,0	3,3	0,004
SEDIMENTARES E PARA-METAMÓRFICAS	Calcário	0,5	1,50	0,5	0,33	0,001
	Dolomito	0,11	0,30	-	-	-
	Quartzito	0,54	1,60	-	-	-
	Arenito	0/1,5	até 4	5	1,2	0,004
	Folhelho argiloso	1,09	3,0	10,0	3,3	0,008
	Argila	1,3	4,3	13,0	3,0	0,011

A tabela 3 não dá a contribuição relativa de cada elemento para a atividade total, pois ela depende da atividade específica dos diferentes radioelementos. A menor radioatividade total é encontrada nas rochas ígneas ultrabásicas e nas rochas sedimentares de origem química ou clástica de composição uniforme, tais como a anidrita (sulfato de cálcio anidro), dolomita, calcário, arenitos quartzosos puros e quartzitos.

Uma feição característica dos arenitos e das rochas carbonatadas é o aumento de seus níveis normais de radioatividade, com o aumento do teor em argila. Este efeito é devido ao fato de que as argilas, como já foi anteriormente explicado, apresentam um alto conteúdo em potássio e podem ter incorporado, por adsorção ou troca iônica, urânio e tório na sua estrutura.

Entre as formações sedimentares, os folhetos e as argilas são os que apresentam geralmente os mais altos níveis de radioatividade. As areias arcossianas (com alto teor em feldspato) e as areias misturadas com certos minerais pesados, como a monazita, torita e zircão exibem um nível de radioatividade maior que as areias de quartzo puro. Acréscimos da concentração de argila nas rochas carbonatadas, são acompanhadas por correspondentes aumentos nas relações de tório e potássio, com respeito a urânio e tório. Em geral, as concentrações relativas dos elementos radioativos de uma formação, podem ser relacionados com o conteúdo e composição mineralógica das argilas nela contidas.

Estas características físicas e a distribuição dos elementos radioativos, observada na crosta terrestre, fornecem as bases teóricas para utilização da perfilagem gama natural, em estudos de correlação litológica e para determinar a porcentagem de argila nas formações atravessadas pela perfuração.

#### 1.1.2.1 - Radioatividade gama natural total:

Nesta perfilagem só interessa a radiação gama total e, mais particularmente, a radiação gama natural, possuidora de energia adequada de maneira a satisfazer as condições e propósitos da medição. É a mais simples das técnicas nucleares de perfilagem, sendo geralmente empregada para delimitar a espessura e localizar as interfaces das camadas, individuais, que compõem o perfil geológico, penetrado pela perfuração.

Porém, quando interpretados corretamente, os dados obtidos por esta medição, são úteis na avaliação da porosidade efetiva das formações.

#### 1.1.2.2 - Espectrometria gama natural:

Nesta perfilagem mede-se o conteúdo relativo de urânio, tório e potássio da rocha mediante comparação das intensidades de radiação gama, características destes elementos. Isto requer uma análise espectrométrica da radiação detetada, a fim de identificar os picos correspondentes às energias individuais do urânio, tório e potássio.

Por exemplo, o tório pode ser identificado pelo pico de radiação gama de 2,62 MeV de energia, característico do tálio 208 (um dos elementos da série do tório); o urânio pelo pico 1,76 MeV do bismuto 214 (elemento da série do urânio/rádio) e, finalmente, o potássio 40 pelo seu pico de 1,46 MeV.

A aplicação desta perfilagem requer sondas mais complexas que as do caso anterior, e a

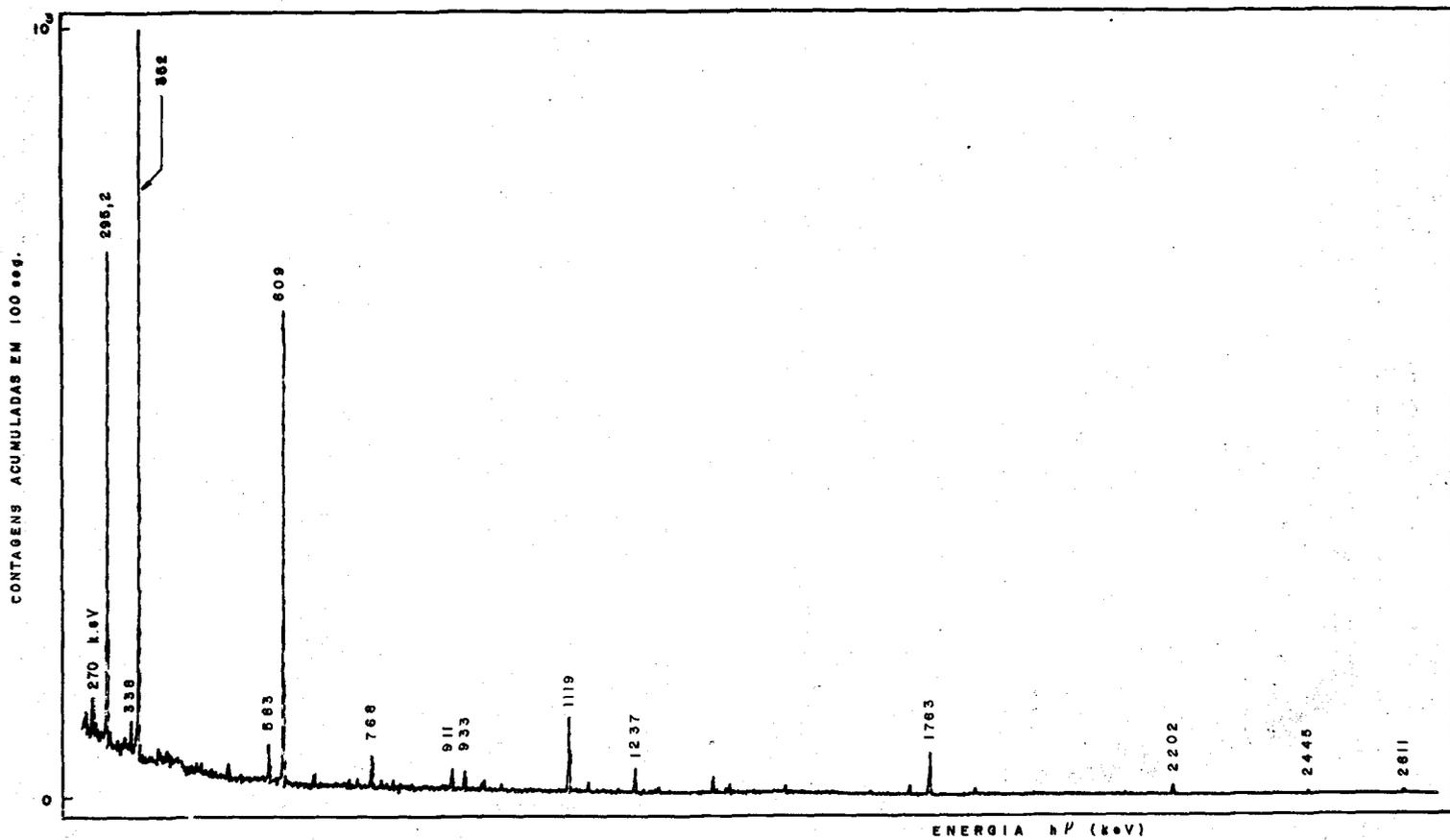


Fig. 2 - Espectro gama de minério de Urânio ( $\sim 2\% \text{U}_3\text{O}_8$ ) obtido com um detetor de estado sólido de Ge(Li), mostrando a energia dos picos principais.

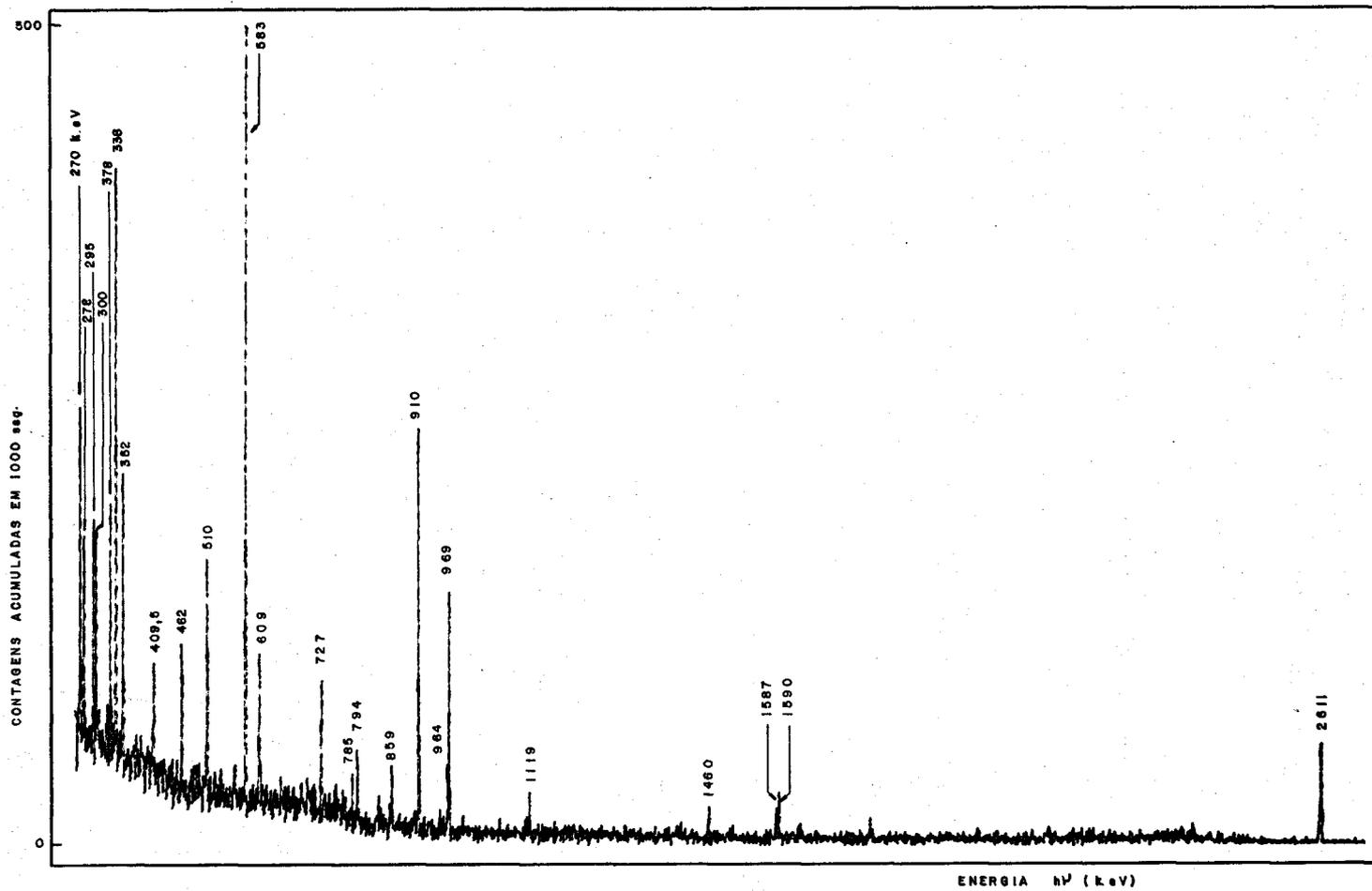


Fig. 3 - Espectro gama de um minério de Tório (1,0% Th, 0,04% U) obtido com um detector de estado sólido de Ge(Li), mostrando a energia dos picos principais.

correta identificação dos picos é dificultada pelo fato de que a energia inicial dos raios gama é diminuída pelos sucessivos processos de interação com o meio onde eles se propagam, de maneira que os fótons que efetivamente chegam ao detector, têm uma distribuição espectral de energias substancialmente distinta do espectro primário de emissão.

A potencialidade do método espectrométrico é evidenciada pelos gráficos das figuras 2 e 3, as quais mostram a diferença entre os espectros obtidos ao se analisar a radiação gama natural, proveniente de amostras minerais de urânio e tório.

Os espectros representados nas figuras 2 e 3, foram obtidos em condições de laboratório, utilizando-se um detector de estado sólido de Ge(Li), refrigerado com nitrogênio líquido, e um analisador de amplitude de impulsos de 4096 canais. O tempo de medição das amostras foi da ordem de quinze minutos, para o mineral de tório e de dois minutos para o de urânio.

O estado atual (1973) de desenvolvimento das sondas de sub-superfície, para a análise espectrométrica da radiação gama natural, e as limitações impostas pelas condições e características das perfilagens geofísicas, fazem com que espectros como os mostrados nas figuras 2 e 3, não possam ser ainda obtidos em campanha. Porém, já está se tentando construir sondas criogênicas, equipadas com detectores de estado sólido, capazes de operar satisfatoriamente nas severas condições em que são realizadas as perfilagens de poços petrolíferos (tempo relativamente longo, altas pressões e temperaturas, etc).

### 1.1.3 - Projeto e construção das sondas

Nesta seção serão consideradas apenas as sondas que medem a radioatividade gama total específica da rocha, sem distinção do tipo e concentração de cada emissor, por ser esta técnica mais utilizada na perfilagem gama natural dos poços petrolíferos.

Estas sondas são basicamente medidoras de radioatividade gama ambiental e como tais, são projetadas e construídas no que concerne ao detector e circuito eletrônico associado. Sempre que as condições imperantes dentro da perfuração o permitam, empregam-se detectores de cintilação acoplados a um tubo fotomultiplicador. O reduzido volume destes detectores a sua grande eficiência, na detecção de radiação gama, permitem obter assim uma boa resolução na delimitação da espessura das camadas rochosas, inclusive aquelas bem delgadas ( $\cong 1m$ ). A interface dos diferentes estratos corresponde ao ponto médio da reflexão observada no registro gráfico da perfilagem, quando a sonda transpõe a superfície de contato.

Nos casos em que as dimensões do poço obrigam o emprego de sondas miniaturizadas de pequeno diâmetro, nas quais não é possível se colocar a proteção térmica requerida pelos detectores de cintilação, utilizam-se tubos "Geiger Müller", os quais são menos sensíveis aos efeitos das temperaturas elevadas.

A teoria geral do projeto de sistemas para a medição de radiação gama, baseados na utilização de detectores de cintilação e de tubos G. M. é bem conhecida e não será discutida nesta seção. Serão considerados somente duas especificações aplicáveis ao projeto da quase totalidade das sondas empregadas nas técnicas nucleares de perfilagem de poços. Uma delas refere-se às características construtivas das sondas e a outra ao cálculo da constante de tempo do equipamento.

### 1.1.3.1 - Características construtivas.

As sondas para perfilagem gama natural formam parte de um cabeçote de sondagem para medições múltiplas e em alguns casos também simultâneas, tais como as perfilagens neutrônicas, de calibre do poço, densidade global e de localização de luvas (em poços revestidos). Sua construção deve ser robusta para suportar as severas condições de trabalho impostas pela manipulação e operação das ferramentas e sondagens e altas pressões e temperaturas encontradas durante a perfilagem.

As sondas são normalmente projetadas para resistir uma pressão máxima de 1400 kg/cm<sup>2</sup> e uma temperatura máxima de 150°C.

### 1.1.3.2 - Cálculo da constante de tempo

Dado que a perfilagem da radiação gama natural envolve uma medição dinâmica, na qual o parâmetro medido pode variar em função do tempo, deve-se conceder especial atenção a velocidade de resposta do equipamento, isto é, ao valor de sua constante de tempo.

No cálculo da constante de tempo ótima, a ser utilizada em cada caso particular, intervêm três fatores:

- 1) mínima variação brusca de intensidade de radiação que se quer medir;
- 2) intensidade de equilíbrio medida, onde se apresenta a variação mencionada em 1);
- 3) máximo intervalo de tempo disponível para indicar a ocorrência desta variação de intensidade.

A condição estabelecida em 3) está relacionada com a velocidade de perfilagem e com a espessura da formação que apresenta a variação de radioatividade.

Seja  $I_0$  unidades API (definida na seção 1.1.4) a intensidade de radiação medida em uma formação de radioatividade gama natural constante. A deflexão  $\Delta I$  do registro gráfico frente a uma variação brusca real  $\Delta I_0$  na intensidade detetada, será então:

$$\Delta I = \Delta I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (\text{unidades API}) \quad (1)$$

onde

$t$  : intervalo de tempo transcorrido desde a ocorrência da variação  $\Delta I_0$  (s)

$\tau$  : constante de tempo do instrumento de medição (s)

Para que a deflexão indicada no registro seja discernível com 99,8% de certeza das flutuações estatísticas que acompanham o registro de  $I_0$ , deverá cumprir-se a condição

$$\Delta I \geq 6\sigma(I_0) = 6\sqrt{\frac{I_0}{2\tau}} \quad (\text{unidades API}) \quad (2)$$

sendo  $\sigma(I_0)$  o desvio padrão de  $I_0$ , em unidades API.

Portanto, no caso limite:

$$\Delta I_o (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 6 \sqrt{\frac{I_o}{2\tau}} \quad (\text{unidades API}) \quad (3)$$

Esta equação presume que a variação  $\Delta I_o$  se mantém constante durante o intervalo  $t$ . Se a perfilagem for executada em uma velocidade  $v_o$  (cm/s), a distância  $d$  (cm) percorrida pela sonda durante o intervalo  $t$  será:

$$d = v_o t \quad (\text{cm}) \quad (4)$$

Das equações (3) e (4) resulta:

$$e^{-\frac{d}{v_o \tau}} = 1 - \frac{6}{\Delta I_o} \sqrt{\frac{I_o}{2\tau}} \quad (5)$$

A velocidade  $v_o$  está geralmente limitada pelo tempo total disponível para efetuar a perfilagem. Denominando

$$\epsilon = \frac{\Delta I_o}{I_o}$$

a mínima variação relativa de intensidade que se deseja registrar, obtém-se:

$$e^{-\frac{d}{v_o \tau}} = 1 - \frac{6}{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2I_o \tau}} \quad (6)$$

A equação (6) representa a relação entre a constante de tempo e os restantes parâmetros que definem as características principais da perfilagem. Geralmente empregam-se constantes de tempo da ordem de 2 segundos, para velocidades de perfilagem em torno de 10 metros por minuto.

Para uma avaliação prática do efeito das flutuações estatísticas na posterior interpretação de uma perfilagem, é conveniente registrar durante vários minutos a intensidade de radiação medida com a sonda estacionada em uma dada profundidade. Este controle deve ser realizado calibrando o instrumento com a mesma constante de tempo e sensibilidade de escala, que vão ser utilizadas durante a execução da perfilagem.

#### 1.1.4 - Calibração dos equipamentos

Os equipamentos são calibrados no campo, antes de cada perfilagem, empregando-se para isto uma fonte de referência que é colocada a uma distância fixa da sonda. Esta fonte de referência constitui na realidade, um padrão secundário de calibração, em unidades de leitura estabelecidas pelo "American Petroleum Institute", e que se denomina unidades API de radiação gama.

O padrão primário encontra-se na Universidade de Huston, Texas, U.S.A. e consiste em um poço que simula um setor de perfuração apresentando uma zona com atividade relativamente alta, entre outras duas (uma superior e outra inferior), de baixa atividade. As

dimensões e características construtivas do poço para o ensaio de calibração, são ilustradas na figura 4.

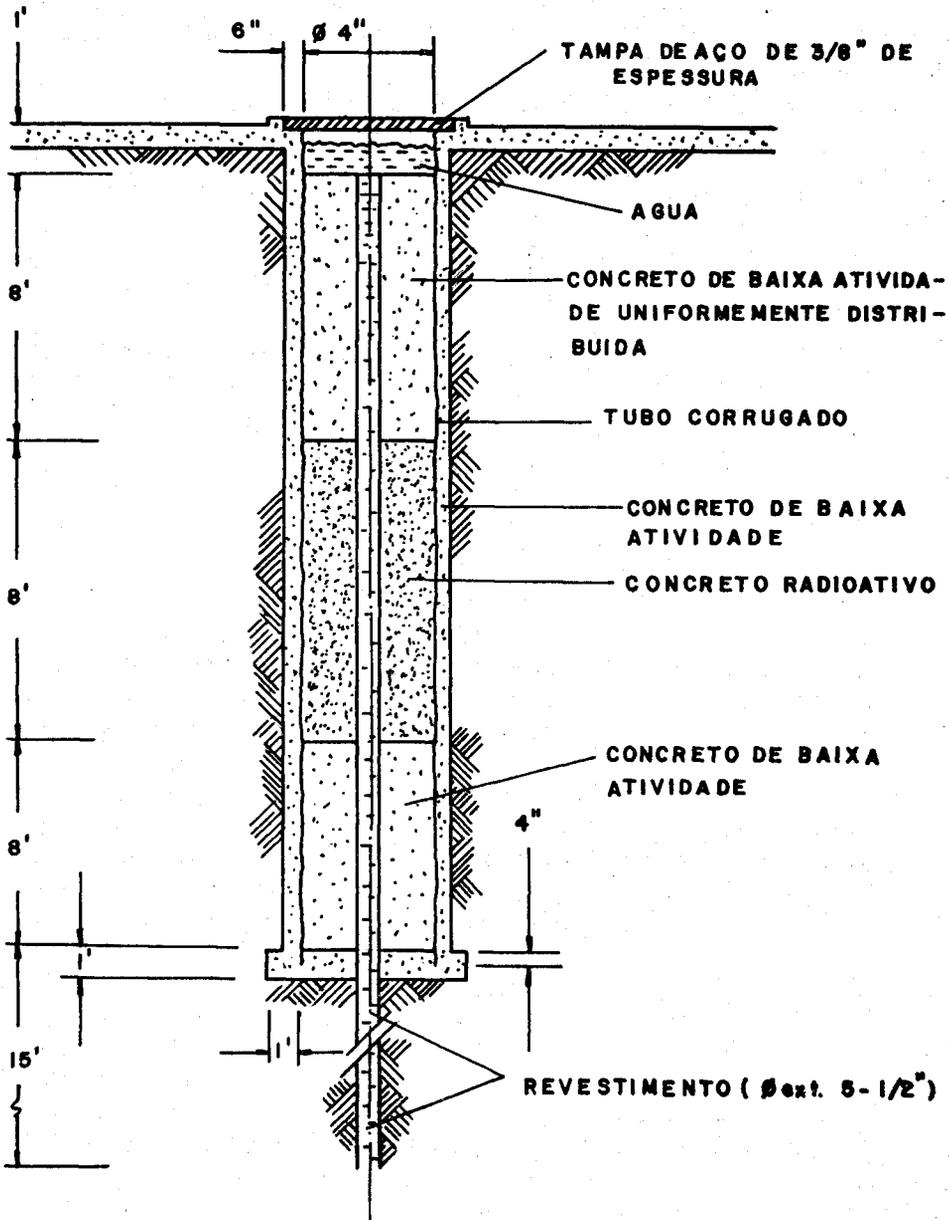


Fig. 4 - Poço experimental para calibração primária de equipamentos de perfilagem em unidades de radiação gama . API

A unidade de radiação gama API se define como 1/200 da diferença de leituras registradas pelo instrumento, quando a sonda passa entre as duas zonas de diferente atividade específica.

O poço experimental foi construído de tal maneira que um folheto intermediário apresentará no registro umas 100 unidades de radiação gama API. Os padrões secundários de calibração (ou fontes de referência) representam um número de unidades API que geralmente é distinto para cada tipo de equipamento em virtude das variações na eficiência de detecção e características construtivas das sondas.

Antes de iniciar a perfilagem se calibra o zero do instrumento. Em seguida, com uma dada sensibilidade, registram-se sucessivamente, durante vários minutos, a intensidade de radiação gama natural ("background") da superfície e a intensidade correspondente a fonte de referência, na posição de calibração. A deflexão obtida no registro corresponderá ao número de unidades API, especificado para esse instrumento.

Se a perfilagem vai ser executada com uma outra sensibilidade, a calibração do registro em unidades API para essa nova sensibilidade, pode ser calculada mediante uma simples fórmula matemática. Denominando-se:

$S_1$  : sensibilidade utilizada na calibração (divisão/volt);

$N_1$  : número de divisões do registro para a deflexão obtida com a sensibilidade  $S_1$ , durante a calibração;

$S_2$  : sensibilidade empregada durante a perfilagem (divisões/volt);

$N_2$  : número de divisões para um ponto qualquer no registro, obtido durante a perfilagem;

$U_1$  : número de unidades API representadas pelo padrão de calibração;

$U_2$  : número de unidades API correspondentes a  $N_2$ ; então, deverá cumprir-se a seguinte relação:

$$\frac{N_1}{S_1 \cdot U_1} = \frac{N_2}{S_2 \cdot U_2} \quad (7)$$

de onde

$$U_2 = \frac{N_2 \cdot S_1 \cdot U_1}{N_1 \cdot S_2} \quad (\text{unidades API}) \quad (8)$$

O novo fator F de calibração, para converter número de divisões  $N_2$  do registro em unidades API, resulta:

$$F = \frac{S_1 \cdot U_1}{S_2 \cdot N_1} \quad (\text{unidades API/divisão}) \quad (9)$$

ou seja:

$$U_2 = F \cdot N_2 \quad (\text{unidades API}) \quad (10)$$

O procedimento descrito é repetido após a perfilagem ter sido completada, para verificar se a calibração do sistema de medição permaneceu estável.

Na parte superior do registro devem constar todas as anotações necessárias para permitir e facilitar a correta interpretação da perfilagem em todos seus aspectos.

Para ilustrar a utilização das fórmulas analisadas nesta seção, calculou-se em seguida o fator de calibração de escala e a velocidade de uma perfilagem de radiação gama natural hipotética, a ser realizada com uma constante de tempo de 2 segundos, que permite:

- a) localizar a presença de uma camada de arenito argiloso de 1 m de espessura, intercalada em uma formação de calcário;
- b) registrar uma intensidade máxima equivalente até 500 unidades API de radiação gama.

Sabe-se de antemão, por medições anteriores, que a resposta do instrumento é de 100 e 132 unidades API para o calcário e o arenito argiloso respectivamente. O papel do registrador gráfico tem 100 pequenas divisões.

A fonte de referência na posição de calibração equivale a 100 unidades API para a sonda que vai se utilizar. Ao se efetuar a calibração do equipamento, com uma sensibilidade correspondente a 20 divisões por volt, obteve-se uma deflexão de 50 divisões, ou seja 2 unidades API por divisão.

Pela condição imposta no ponto b), a sensibilidade ótima para realizar a perfilagem deve ser tal, que o fundo de escala do registro corresponda a 500 unidades API.

Portanto, da equação (7)

$$S_2 = \frac{N_2 S_1 U_1}{N_1 U_2} \quad (\text{divisões/volt})$$

onde, neste caso:

$$\begin{aligned} S_1 &= 20 \text{ (div/volt)} \\ N_1 &= 50 \text{ (div.)} \\ U_1 &= 100 \text{ (unidades API)} \\ N_2 &= 100 \text{ (div)} \\ U_2 &= 500 \text{ (unidades API)} \end{aligned}$$

Substituindo estes valores na equação anterior temos:

$$S_2 = \frac{100 \cdot 20 \cdot 100}{50 \cdot 500} = 8 \quad (\text{divisões/volt})$$

O fator de calibração para a interpretação do registro em unidades API resulta, da equação (9):

$$F = \frac{20 \cdot 100}{8 \cdot 50} = 5 \text{ (unidades API/divisão)}$$

Em seguida, com o auxílio da equação (9), calcula-se a velocidade máxima ao qual pode ser executada a perfilagem nas condições impostas, sendo, no presente caso.

- $d = 100$  cm (espessura do arenito argiloso);  
 $I_0 = 100$  unidades API (registro no calcário);  
 $\Delta I_0 = 32$  unidades API (variação no arenito argiloso);  
 $\tau = 2$  segundos (constante de tempo já selecionada)

Substituindo-se estes valores na equação (5), temos:

$$e^{-\frac{100}{2v_0}} = 1 - \frac{6}{32} \sqrt{\frac{100}{4}}$$

$$e^{-\frac{50}{v_0}} = 0,0625$$

$$v_0 = 18 \text{ cm/s} = 10,8 \text{ m/min}$$

O número  $N$  de divisões pequenas abrangido pela deflexão do registro, quando a sonda passar da formação calcária ao arenito argiloso será:

$$N = \frac{\Delta I_0}{F} = \frac{32 \text{ unidades API}}{5 \text{ unidades API/div.}} = 6,4 \text{ divisões}$$

A máxima flutuação estatística no registro de  $I_0$ , no calcário, será:

$$(\Delta I_0)_{\text{máx}} = \pm 3\sigma(I_0) = \pm 3\sqrt{\frac{100}{4}} = \pm 15 \text{ (unidades API)}$$

$$(\Delta I_0)_{\text{máx}} = \pm 3 \text{ (divisões no registro)}$$

Portanto, a deflexão de 6,4 divisões obtida quando a sonda ultrapassar a superfície de contato entre o arenito e a capa, será facilmente discernível das flutuações estatísticas que acompanham o registro da radiação gama natural do calcário.

De fato, a distância percorrida pela sonda, quando a deflexão da linha média no registro alcança o valor de 6,4 divisões, será de 100 centímetros.

### 1.1.5 - Aplicações e limitações

Como já foi dito no começo da seção 1.1.1, a medição da radiação gama natural é

utilizada principalmente para identificar a litologia das formações atravessadas pela perfuração. Esta perfilagem constitui também um meio auxiliar para diferenciar os estratos potencialmente produtivos de gás ou petróleo (arenitos e calcários) daqueles que não o são, estimar o índice de permeabilidade em formações xistosas, medir a espessura das camadas e, finalmente, facilitar a interpretação e correção de outras medições.

Quando empregada em conjunto com a perfilagem de luvas de tubo em poços revestidos, permite a correlação direta em profundidade de outras perfilagens, já feitas na mesma perfuração, antes do revestimento ter sido colocado.

Finalmente, outra aplicação importante do registro da radiação gama natural é a determinação quantitativa da concentração volumétrica de argila em arenitos. Este dado, como se verá adiante, intervém nos cálculos da saturação de água dessas formações.

A resposta de um detetor de radiação gama para uma mistura homogênea de argila e areia, variará geralmente desde um mínimo para 100% de areia até um máximo para 100% de argila. A calibração do equipamento pode ser feita empiricamente, correlacionando-se as leituras  $I_\gamma$  com a concentração  $C_a$  de argila, determinada a partir de amostras retiradas da perfuração. A curva assim obtida poderá ser aplicada com razoável exatidão, dentro da mesma província geológica.

Normalmente a função  $I_\gamma = f(C_a)$  resulta em uma relação linear. A concentração de argila poderá então ser calculada a partir do registro da radiação gama natural, utilizando-se apenas duas amostras litológicas de referência, por meio da fórmula:

$$C_a = \frac{I_\gamma - I_{\gamma\min}}{I_{\gamma\max} - I_{\gamma\min}} \quad (11)$$

onde:

- $C_a$  : fração volumétrica de argila na formação
- $I_\gamma$  : intensidade de radiação gama natural registrada (unidade API)
- $I_{\gamma\min}$  : intensidade de radiação gama correspondente a uma amostra de areia pura contida na formação (unidades API)
- $I_{\gamma\max}$  : intensidade de radiação gama correspondente a uma amostra de argila pura contida na formação (unidades API)

A validade desta relação, suposta entre a intensidade da radiação gama natural e o conteúdo de argila nas formações rochosas investigadas, está limitada pela alta mobilidade dos elementos das séries do urânio e do tório, que podem ser encontrados em quase todo tipo de formação litológica. Alguns dos depósitos de minerais radioativos, melhor conhecidos, tiveram sua origem no enriquecimento supérgino de arenitos e conglomerados. Portanto, devem ser evitadas, sempre que possível, as interpretações de porosidade e permeabilidade baseadas somente na perfilagem gama natural. Também deve ser considerado o fato que os elementos das séries de urânio e tório se acumulam preferencialmente em materiais orgânicos. Por exemplo, não é difícil encontrar até 0,01% de urânio e tório em xistos betuminosos pretos.

A figura 5 mostra os níveis de radioatividade e sua frequência de apresentação normalmente observados nas rochas sedimentares.

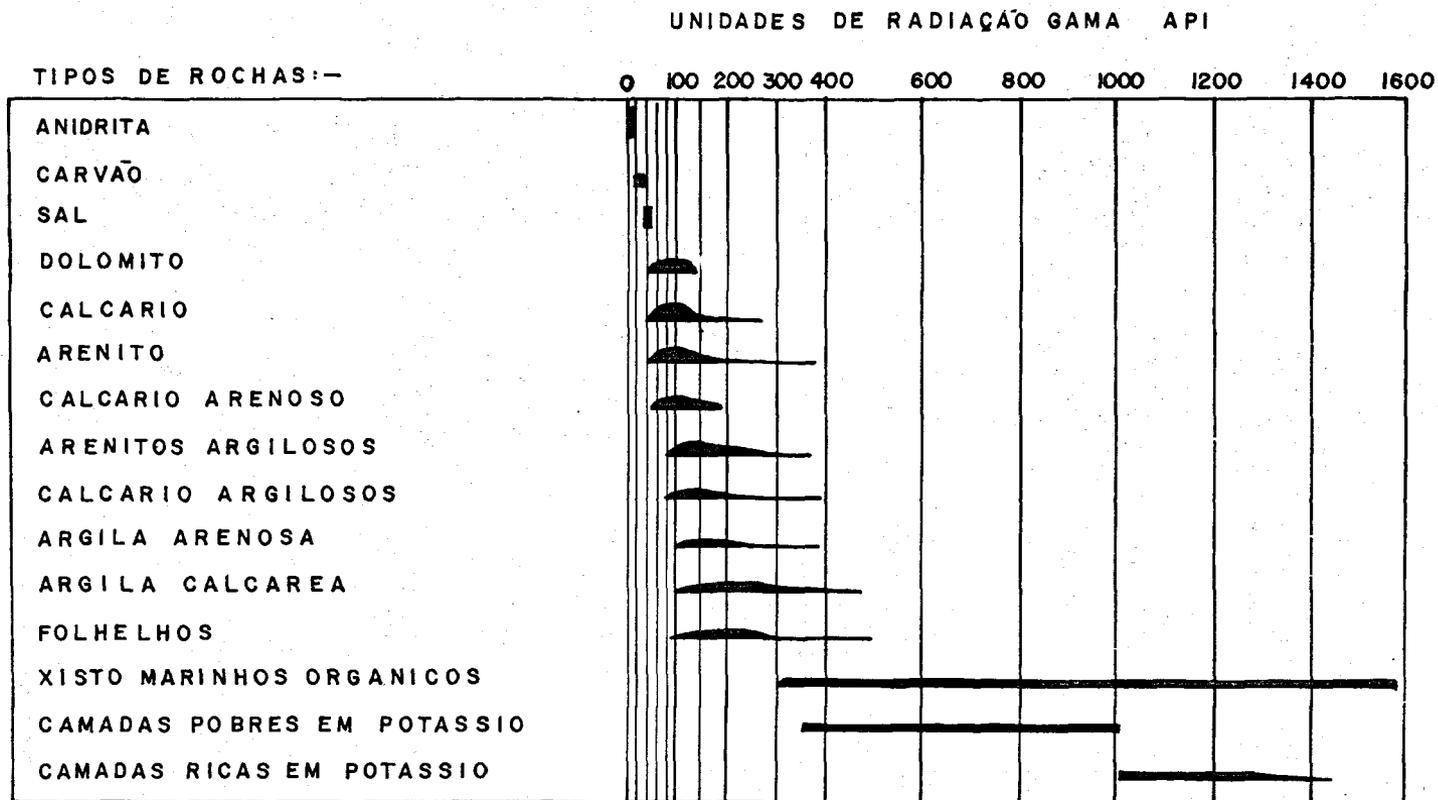


Fig. 5 - Níveis de radioatividade gama, normalmente associados com diferentes tipos de rochas sedimentares. O comprimento das linhas indica a intensidade de radiação gama em unidades API. A altura do traço (alargamento) é proporcional à freqüência dessa intensidade.

## 1.2.0 PERFILAGEM GAMA-GAMA

### 1.2.1 - Introdução

A perfilagem gama-gama (G - G) tem por objetivo a medição da densidade global das formações litológicas atravessadas pela perfuração. O resultado desta perfilagem é um registro contínuo das variações da densidade global em função da profundidade.

O termo "densidade global" se usa para definir o peso bruto ou total da unidade de volume da formação e inclui, no caso de rochas porosas, tanto a densidade do fluido que enche os poros, como a do grão da rocha. É evidente então que deve existir uma relação entre a densidade global de uma formação e sua porosidade. Esta relação, como será visto adiante, fornece os fundamentos para o cálculo da porosidade das formações, a partir do registro da densidade global.

Ambas informações, porosidade e densidade global, combinadas com os resultados de outras técnicas de perfilagem, servem para se avaliar com boa aproximação e sob diferentes condições de perfuração, zonas de interesse. Constituem, ademais, dados suplementares para estudos litológicos e de outros tipos.

As sondas dos equipamentos de perfilagem G-G contêm uma fonte radioativa gama na forma de uma pequena cápsula metálica hermeticamente selada e um ou mais detectores, espaçados e blindados com relação à fonte. Os radioisótopos geralmente utilizados são  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{226}\text{Ra}$ .

Os fótons emitidos pela fonte interagem com a formação circunvizinha e alguns deles são espalhados em direção aos detectores da sonda. A intensidade de radiação dispersa medida nestas condições resulta, como se demonstra seguidamente, função da densidade global do material irradiado.

### 1.2.2 - Teoria de medição

Se um emissor gama é introduzido em um meio de volume praticamente infinito, (em relação com o alcance das radiações), se estabelecerá dentro desse material um transporte e uma transferência da energia irradiada pela fonte.

No transporte e transferência de energia intervêm os fótons primários, emitidos originariamente pela fonte, e toda a complexa família de radiações secundárias nascida dos diversos e sucessivos processos de interação da radiação com a matéria.

Um pequeno elemento de volume  $\Delta V$  de material, afastado da fonte, receberá portanto, energia transportada por fótons primários (radiação direta) e secundários (radiação dispersa). Supondo que  $\Delta V$  seja o volume sensível de um detector, poderá se estudar a correlação que existe entre a intensidade de radiação secundária que chega a  $\Delta V$  e um parâmetro do meio que neste caso é a densidade global  $\rho$ .

O processo em si de transporte dos fótons e da energia secundárias em função da densidade  $\rho$  tem evidentemente, para os demais fatores fixos, uma lei física determinada, suscetível da correspondente análise teórica. Experimentalmente, no entanto, a relação obtida

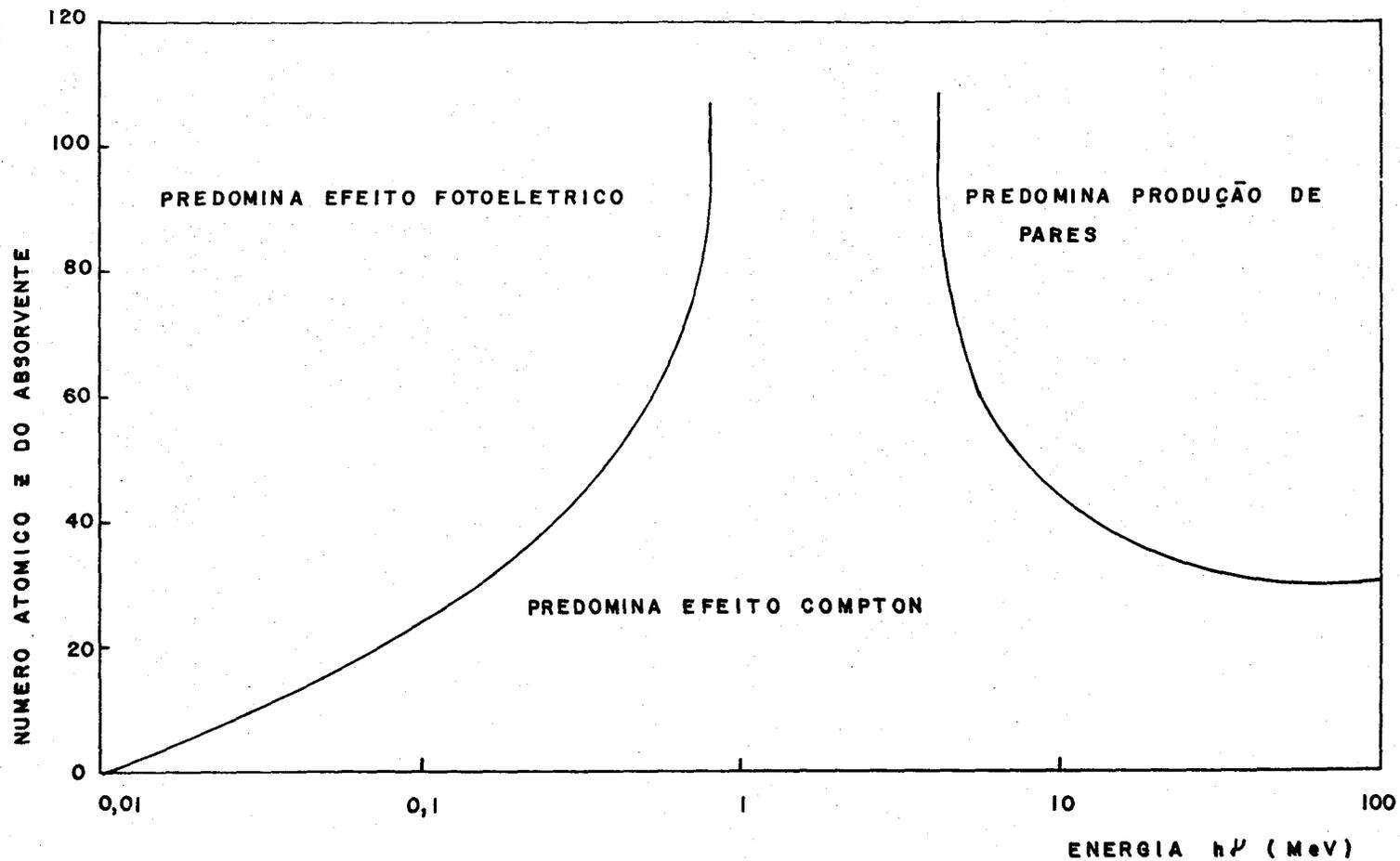


Fig. 6 - Importância relativa dos processos de interação da radiação gama com a matéria, em função da energia dos fótons e do número atômico do material.

dependerá muito das características do detector utilizado, principalmente de sua sensibilidade para as diferentes energias do espectro da radiação incidente, a qual nem sempre pode ser conhecida com exatidão.

Os processos fundamentais de interação da radiação gama com a matéria são: Compton, fotoelétrico e produção de pares. A probabilidade de que um ou outro ocorra, depende da energia  $h\nu$  dos fótons e do número atômico  $Z$  do material.

Na fig. 6 mostra-se gráficamente a importância relativa de cada um destes processos.

Observa-se que para valores intermediários de  $h\nu$  e toda a faixa de  $Z$ , predomina o efeito Compton. Este efeito, pelo qual um fóton é dispersado, tem lugar com elétrons livres ou fracamente unidos ao átomo, e sua probabilidade de ocorrência se define por elétron, independentemente do átomo a que este possa pertencer.

Portanto, denominando-se de  $\sigma_e$  ( $\text{cm}^2/\text{elétron}$ ) a esta probabilidade absoluta, a seção eficaz atômica de choque  $\sigma_a$  para um elemento de número atômico  $Z$ , será:

$$\sigma_a = Z \cdot \sigma_e \quad (\text{cm}^2/\text{átomo}) \quad (12)$$

e para  $N$  átomos por  $\text{cm}^3$ , o coeficiente linear de atenuação por efeito Compton resulta:

$$\sigma = N \cdot \sigma_a = N \cdot Z \cdot \sigma_e \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (13)$$

O termo  $N \cdot Z$  é a densidade eletrônica do elemento ( $\text{elétrons}/\text{cm}^3$ ) e pode ser expressa como:

$$N \cdot Z = \rho \cdot N_0 \cdot \frac{Z}{A} \quad (\text{elétrons}/\text{cm}^3) \quad (14)$$

onde:

$\rho$  : densidade do material ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$N_0$  : número de Avogadro =  $6,02 \times 10^{23}$  átomos/átomo-grama

$A$  : peso atômico do elemento em gramas ( $\text{g}/\text{átomo}$ )

Substituindo a eq. (14) na eq. (13), o coeficiente linear de atenuação por efeito Compton resulta:

$$\sigma = \rho \cdot N_0 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \sigma_e \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (15)$$

Sendo que  $\sigma_e$  só depende da energia dos fótons,  $N_0$  é uma constante e como  $Z/A$  é aproximadamente igual a 0,5 para todos os elementos, exceto o hidrogênio (para o qual  $Z/A = 1$ ), segue-se que a probabilidade por unidade de percurso de remover um fóton por choque Compton, quando um feixe de raios gama atravessa uma substância, é proporcional a densidade do material, independentemente de sua composição química. Isto equivale a dizer que a intensidade de radiação secundária, originada na dispersão de fótons por efeito Compton é função da densidade do material. A detecção e medida da radiação dispersa, quando feita nas devidas condições, fornece um meio para se determinar a densidade dos materiais e constitui o fundamento da perfilagem gama-gama.

Pode-se realizar uma análise aproximada da teoria de medição, considerando somente o

transporte dos fótons originados em processos Compton primários (i. e., fótons que sofrerão apenas um só choque). Para tais efeitos, seja  $\Delta V$  um elemento de volume num ponto P do material irradiado, distante  $r_c$  (cm) de uma fonte F que emite  $n_0$  fótons por segundo. Supondo-se que o material constitui um meio homogêneo "infinito" de número atômico Z e densidade  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), o fluxo de fótons primários à distância r (cm) da fonte será (fig.7) . . .

$$\frac{dn}{ds} = \frac{n_0}{4\pi r^2} \cdot \exp(-\mu_0 r) \left( \frac{\text{fóton}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \right) \quad (16)$$

onde:

$\mu_0$  : coeficiente linear de atenuação para a energia  $h\nu_0$  da radiação primária, no meio considerado.

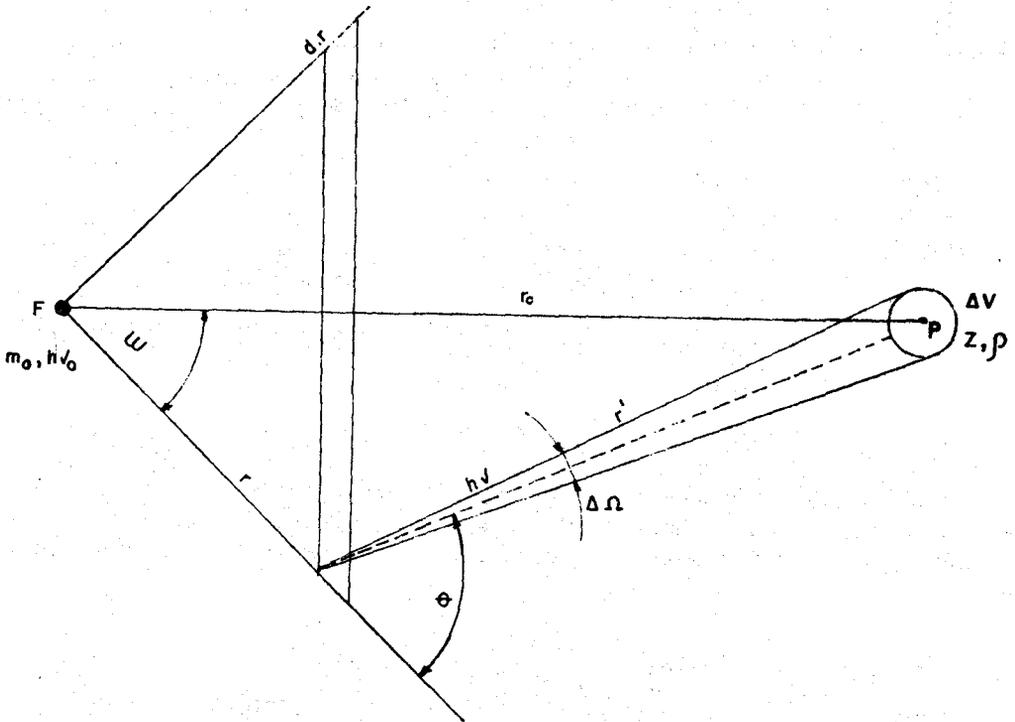


Fig. 7 - Geometria para estudar o transporte de fótons secundários provenientes de uma fonte pontual num meio homogêneo.

Entre  $r$  e  $r+dr$  um certo número destes fótons sofrerão interação Compton. Neste caso interessam apenas aqueles que após a interação se dirigem ao volume  $\Delta V$ . A probabilidade de que um fóton primário de energia  $h\nu_0$  seja desviado em direção a  $\Delta V$  por choque Compton, está expressa pela fórmula:

$$\frac{d\sigma_e}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^2 \left(\frac{\nu_0}{\nu} + \frac{\nu}{\nu_0} - \sin^2\theta\right) \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{elétron. esferorradiano}}\right) \quad (17)$$

onde:

$r_0$  : raio clássico do elétron ( $2,818 \times 10^{-13}$  cm)

$\nu$  : frequência do fóton disperso ( $s^{-1}$ )

$\theta$  : ângulo de dispersão com respeito à direção do fóton incidente ( $^\circ$ )

A eq. (17) representa a probabilidade por unidade de ângulo sólido, de que um fóton de energia  $h\nu_0$  seja desviado de um ângulo  $\theta$ , ao atravessar um absorvente que contém um elétron por  $\text{cm}^2$ .

Observa-se na fig. 7 que o ângulo  $\theta$  é o mesmo para todos os pontos localizados sobre o segmento esférico diferencial de superfície:

$$dS = 2\pi r^2 \cdot \sin\omega \cdot d\omega \quad (\text{cm}^2) \quad (18)$$

Portanto, o número de fótons por segundo e por unidade de ângulo sólido refletidos na direção de  $\theta$  entre  $r$  e  $r + dr$ , para o segmento  $dS$  em um material de  $Z.N$  (elétrons/ $\text{cm}^3$ ), resulta:

$$dn_1 = \frac{dn}{ds} \cdot dS \cdot \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot N \cdot Z \cdot dr \left(\frac{\text{fótons}}{s \cdot \text{esferorradiano}}\right) \quad (19)$$

Substituindo-se na eq. (19) as expressões de  $dn/dS$ ,  $dS$  e  $N.Z$  dados pelas equações (16), (18) e (14) se obtém:

$$dn_1 = \frac{n_0}{2} \exp(-\mu_0 r) \cdot \rho \cdot N_0 \cdot Z \cdot \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot \sin\omega \cdot d\omega \cdot dr \left(\frac{\text{fótons}}{s \cdot \text{esferorradiano}}\right) \quad (20)$$

Denominando  $\Delta\Omega(r, \omega)$  o ângulo sólido de  $\Delta V$  quando visto desde o ponto de interação, e supondo este ângulo sólido suficientemente pequeno para que  $\theta$  possa ser considerado constante para todos os fótons refletidos em  $\Delta\Omega$ , o número de fótons secundários que se dirigem a  $\Delta V$  será:

$$dn_2 = dn_1 \cdot \Delta\Omega(r, \omega) \left(\frac{\text{fótons}}{\text{segundo}}\right) \quad (21)$$

Estes fótons de energia  $h\nu$  (função de  $\theta$  e portanto de  $r_c$ ,  $r$  e  $\omega$ ) sofrerão por sua vez, em seu caminho  $r'$  até  $\Delta V$ , processos secundários de interação que os eliminarão do feixe incidente. Por este motivo, a quantidade de  $dn'$  de fótons que realmente chega a  $\Delta V$  será:

$$dn' = dn_2 \cdot \exp(-\mu r') \quad (\text{fótons/s}) \quad (22)$$

onde:

$\mu$  : coeficiente linear de atenuação total para a energia  $h\nu$  do fóton disperso ( $\text{cm}^{-1}$ )

Cada um dos fatores  $\mu$  e  $r'$  é também função de  $r_c$ ,  $r$  e  $\omega$ . Portanto a integral da equação

(22) para toda a faixa de variação de  $r$  e  $\omega$ , daria o número total de fótons secundários incidente por segundo em  $\Delta V$ , e originados somente em processos primários de interação Compton:

$$n' = \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} dn_1 \cdot \Delta\Omega(r, \omega) \exp(-\mu r') \left( \frac{\text{fótons}}{\text{s}} \right) \quad (23)$$

Esta integração pode-se efetuar por métodos numéricos, mediante o emprego de um computador.

Note-se que os  $n'$  fótons secundários por segundo que chegam ao volume  $\Delta V$ , tem uma distribuição diferencial contínua de energias.

Se o volume de  $\Delta V$  é agora substituído pelo volume sensível de um detector, a resposta final  $R$  deste último em contagens por segundo, dependerá não só do número total  $n'$  de fótons incidentes no mesmo intervalo, como também da forma de seu espectro de energias.

Afortunadamente, para um mesmo material e fonte radioativa, a distribuição diferencial de energia dos fótons secundários é, dentro de certos limites (até  $\mu_0 r_c \cong 7$ ) insensível às variações da distância fonte-detector. Em virtude disto pode-se definir uma eficiência média de detecção  $\bar{\epsilon}$ , e relacionar a resposta do detector com a energia secundária total  $E_{st}$  incidente por segundo.

Com efeito, se  $dn'/dE = f(E)$  representa o espectro diferencial de energia dos fótons secundários,  $\bar{E}$  a energia correspondente ao baricentro do espectro e  $\epsilon(E)$  a eficiência do detector para fótons de energia  $E$ , obtém-se:

$$n' = \int_0^{E_{\max}} f(E) dE \quad (\text{fótons/segundo}) \quad (24)$$

(esta equação não é mais que a expressão generalizada da equação (23))

$$E_{st} = \int_0^{E_{\max}} f(E) \cdot E \cdot dE = \bar{E} \int_0^{E_{\max}} f(E) dE \left( \frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right) \quad (25)$$

$$R = \int_0^{E_{\max}} f(E) \epsilon \cdot dE = \bar{\epsilon} \int_0^{E_{\max}} f(E) dE \quad \left( \frac{\text{contagens}}{\text{segundo}} \right) \quad (26)$$

e finalmente:

$$R = \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{E}} \cdot E_{st} \quad \left( \frac{\text{contagens}}{\text{segundo}} \right) \quad (27)$$

Enquanto a forma do espectro de energias dada por  $f(E)$  permaneça praticamente invariável, a relação  $\bar{\epsilon}/\bar{E}$  também manter-se-á constante e a resposta do detector será diretamente

proporcional à energia total incidente. Esta condição rege satisfatoriamente dentro da faixa de distâncias fonte-detetor utilizada na construção das sondas de densidade.

A equação (27) é muito importante porque permite relacionar a resposta do detetor com o fator de multiplicação ("build-up") de energia, para o qual existe, fórmulas empíricas simples que dão excelente aproximação.

O fator B de multiplicação relaciona a energia total  $E_t$  transportada por fótons primários e secundários até um ponto P do meio, distante  $r$ (cm) da fonte pontual, com a energia  $E_{ot}$  transmitida somente pelos fótons primários.

$$E_t = B E_{ot} \quad (\text{MeV/s}) \quad (28)$$

A expressão empírica para B é:

$$B = 1 + a(\mu_o r)^n \quad (29)$$

onde os valores de  $a$  e  $n$  devem ser determinados experimentalmente para cada material e tipo de fonte gama.

Substituindo-se a eq. (29) na eq. (28):

$$E_t = E_{ot} + a(\mu_o r)^n E_{ot} \quad (\text{MeV/s}) \quad (30)$$

O segundo termo da eq. (19) representa a energia  $E_{st}$  transportada até o ponto de medição pelos fótons secundários. Portanto:

$$E_{st} = a(\mu_o r)^n E_{ot} \quad (\text{MeV/s}) \quad (31)$$

Da eq. 27:

$$R = \frac{\bar{\epsilon}}{E} a (\mu_o r)^n E_{ot} \quad (\text{c p s}) \quad (32)$$

Ademais, neste caso:

$$E_{ot} = \frac{n_o \exp(-\mu_o r)}{4\pi r^2} \cdot h\nu_o \cdot S \quad \left(\frac{\text{MeV}}{\text{s}}\right) \quad (33)$$

onde  $S$  é a seção transversal do detetor, em  $\text{cm}^2$ , exposta a radiação direta. Das equações (32) e (33) têm-se:

$$R = \frac{\bar{\epsilon}}{E} a (\mu_o r)^n \frac{n_o}{4\pi r^2} \exp(-\mu_o r) h\nu_o S \quad (\text{c p s}) \quad (34)$$

Agrupando todas as constantes da eq. (34) em uma só, representada por  $C$ , resulta finalmente:

$$R = C \cdot \frac{(\mu_o r)^n}{r^2} \cdot \exp(-\mu_o r) \quad (\text{c p s}) \quad (35)$$

Esta equação relativamente simples, permite analisar o comportamento das sondas para

medição de densidade por dispersão de raios gama, e como se verá em seguida determinar os parâmetros do projeto.

### 1.2.3 - Projeto, construção e calibração das sondas de perfilagem G-G

O coeficiente linear de atenuação  $\mu_0$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) pode ser expresso em função do coeficiente mássico de atenuação  $\mu_m$  ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ), mediante a relação:

$$\mu_0 = \mu_m \rho \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (36)$$

Substituindo-se na eq. (35):

$$R = C \frac{(\mu_m \rho r)^n}{r^2} \exp(-\mu_m \rho r) \quad (\text{c.p.s.}) \quad (37)$$

Esta expressão mostra claramente que, para um dado material e uma determinada distância fonte-detetor, a resposta deste último para a radiação secundária é só função da densidade  $\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ ) do material (já que  $\mu_m$  não depende da densidade). Isto é válido tanto para as sondas de superfície (que se empregam para medir a compactação do solo) como para as sonda de profundidade utilizadas na perfilagem G-G de poços, e se aplica também ao caso de materiais compostos, constituídos pela mistura homogênea de diferentes elementos.

A aplicação prática da eq. (37) requer reduzir a um mínimo a possibilidade de se detetar a radiação direta proveniente da fonte. Utiliza-se para este fim, meios de discriminação eletrônica de energias ou uma blindagem adequada entre fonte e detetor.

A equação (37) pode ser escrita sob a forma:

$$Rr^2 = C (\mu_m \rho r)^n \exp(-\mu_m \rho r) \quad (38)$$

$Rr^2$  resulta assim função do produto  $(\mu_m \rho r)$ , que atua como variável independente.

Podem-se obter diferentes valores do produto  $(\mu_m \rho)$  variando a densidade  $\rho$  do material para uma distância  $r_c$  fixa, ou variando a distância  $r$  fonte-detetor em um material de densidade constante  $\rho_c$ . No primeiro caso:

$$R_1 r_c^2 = f(\mu_m \rho r_c)$$

e no segundo:

$$R_2 r^2 = f(\mu_m \rho_c r)$$

As variações de densidade serão inteiramente equivalentes às variações de distância, quando se cumpra a seguinte igualdade:

$$\mu_m \rho r_c = \mu_m \rho_c r \quad (39)$$

pois neste caso

$$R_1 r_c^2 = R_2 r^2 \quad (40)$$

A aplicação das equações (39) e (40) permite obter a resposta R da sonda em função da densidade  $\rho$  e para qualquer distância  $r_c$  escolhida, variando apenas a distância r fonte-detetor em uma amostra de densidade  $\rho_c$  conhecida.

Neste caso, para cada valor de r se terá da eq. (39):

$$\rho = \frac{\rho_c r}{r_c} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (41)$$

e da eq. 40 (fazendo  $R_1 \equiv R$ ):

$$R \equiv R_1 = \frac{R_2 r^2}{r_c} \quad (\text{cps}) \quad (42)$$

O método acima descrito para a determinação de  $R = f(\rho)$ , evita os inconvenientes e erros acarretados pela preparação de amostras volumosas de diferentes densidades, bastando uma só amostra de densidade  $\rho_c$  conhecida, para efetuar o estudo e calibração da sonda.

Para ilustrar o comportamento da eq. (38), efetuou-se na fig. 8 a representação gráfica de:

$$Rr^2 = (\mu_m \rho \cdot r)^2 \exp(-\mu_m \rho r) \quad (43)$$

em função do produto  $\mu_m \rho r$ .

Tal como foi explicado e demonstrado (equações (41) e (42)), uma vez fixado a distância  $r_c$  entre fonte e detetor, as ordenadas resultarão proporcionais a R e as abscissas à densidade  $\rho$ .

Observa-se que a curva da fig. 8 cresce rapidamente, passa por um máximo em seguida decresce em forma contínua, para densidades crescentes a partir de zero.

A utilização do equipamento na faixa de densidade correspondente ao máximo da curva, daria lugar a uma incerteza nas leituras e portanto deve ser evitado. Resulta então a alternativa de se empregar a parte ascendente ou a parte descendente da curva. No primeiro caso, para as densidades normalmente encontradas nas formações rochosas, a distância  $r_c$  fonte-detetor teria que ser muito pequena, o que dificultará a colocação da blindagem requerida para atenuar suficientemente a radiação direta. Conseqüentemente óptima-se por projetar os equipamentos para operar na parte descendente da curva, onde a resposta é função inversa da densidade.

A densidade  $\rho'$  correspondente ao máximo da curva se obtém igualando a zero a derivada de R com respeito a  $\rho$ , na eq. (35);

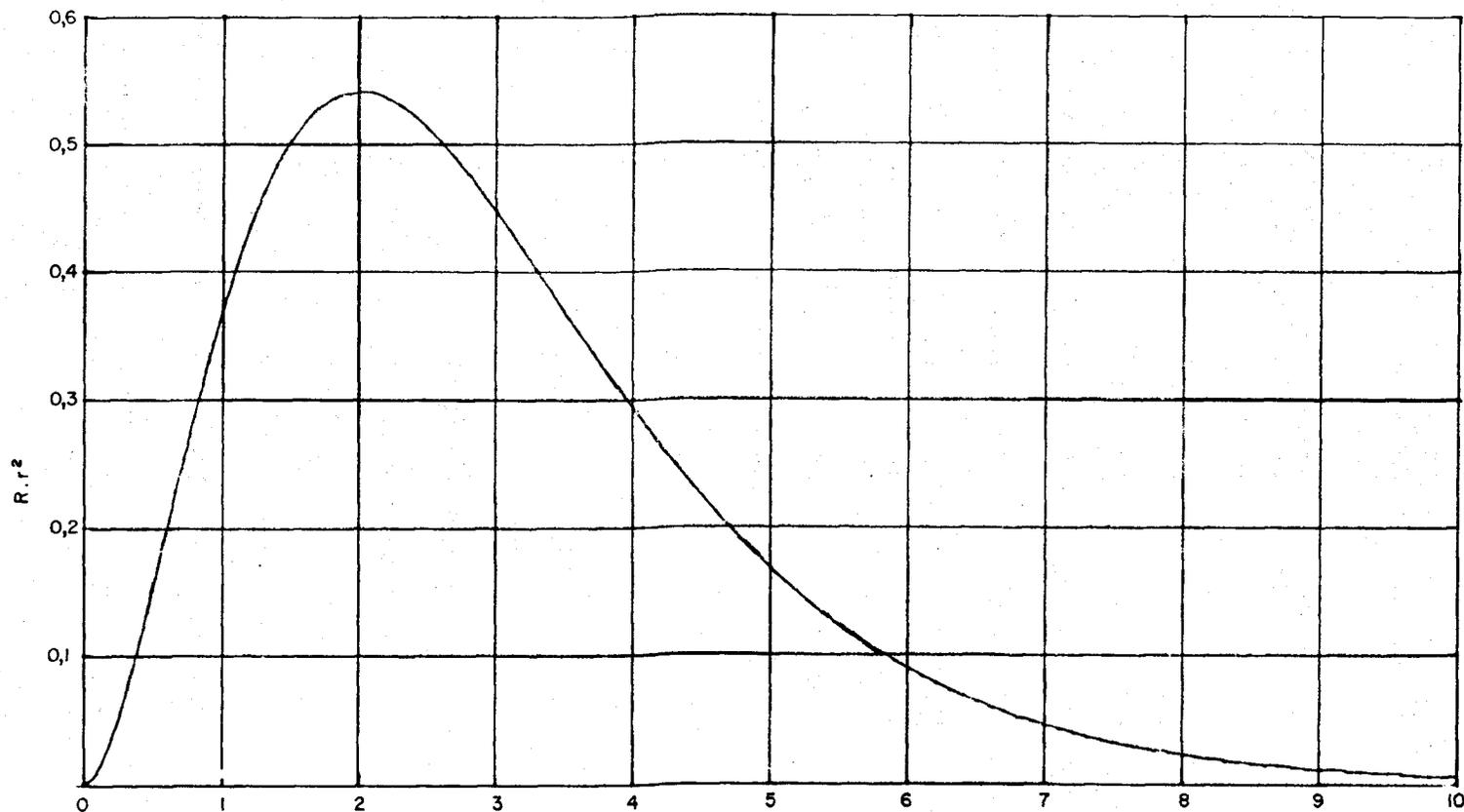
$$\rho' = \frac{n}{\mu_m r} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (44)$$

A curva de  $R = f(\rho)$  apresenta também dois pontos de inflexão; os valores das densidades nesses pontos calculam-se da condição:

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} = 0$$

Para o ramo descendente da curva, resulta:

$$\rho'' = \frac{n + \sqrt{n}}{\mu_m r} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (45)$$



$$\mu_m \rho \cdot r$$

Fig. 8 - Representação gráfica de  $(\mu_m \rho \cdot r)^2 \cdot \exp(-\mu_m \rho \cdot r)$  em função do produto  $(\mu_m \rho \cdot r)$

As sondas são projetadas de maneira que o ponto de inflexão da curva, onde é máxima sua pendente, corresponda ao valor médio da faixa de variação de densidades que se deseja medir.

Em lugar da média aritmética dos valores limites superior e inferior do intervalo de medição ( $\rho_{\min}$  e  $\rho_{\max}$ ) utiliza-se a média geométrica, isto é:

$$\rho'' = (\rho_{\max} \cdot \rho_{\min})^{1/2} = \frac{n + \sqrt{n}}{\mu_m r} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (46)$$

Como para cada material  $n$  e  $\mu_m$  são constantes; a condição estabelecida pela eq. (46) permite determinar a distância ótima para o intervalo escolhido. Resulta:

$$r_{\text{ót}} = \frac{n + \sqrt{n}}{\mu_m \sqrt{\rho_{\max} \cdot \rho_{\min}}} = \frac{n + \sqrt{n}}{\mu_m \rho''} \quad (\text{cm}) \quad (47)$$

Convém verificar que, para este valor de  $r$ , se cumpre também a condição:

$$\rho'' > \rho' = \frac{n}{\mu_m r_{\text{ót}}} \quad (48)$$

O valor da constante  $n$  calcula-se a partir dos dados experimentais, tendo em conta que da eq. (38), para  $\rho = \rho_c$ :

$$\log (Rr^2 e^{-\mu_m \rho_c r}) = \log C + n \log (\mu_m \rho_c r) \quad (49)$$

A representação gráfica de :

$$y = \log (Rr^2 e^{-\mu_m \rho_c r})$$

em função de :

$$x = \log (\mu_m \rho_c r)$$

resulta em uma reta de equação:

$$y' = K + n x \quad (50)$$

onde  $K$  é uma constante igual a  $\log C$ .

Os valores  $n$  e  $K$  podem ser obtidos por interpolação gráfica de uma reta entre os pontos experimentais. A pendente desta reta será igual a " $n$ " e sua ordenada na origem dará o valor de  $K$ .

Também pode ser feito o cálculo analítico dos parâmetros  $K$  e  $n$  pelo método dos mínimos quadrados, a partir de uma série de  $N$  observações experimentais de  $y_i = f(x_i)$ . Neste caso, da eq. (50):

$$n = \frac{N \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - N \sum x_i^2} \quad (51)$$

$$K = \log C = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - N \cdot \sum x_i^2} \quad (52)$$

Outra constante que intervém no cálculo da distância  $r_{OT}$  na eq. (47), é o coeficiente mássico de atenuação  $\mu_m$ . Para um material composto por diferentes elementos com concentrações em peso  $\omega_i$  e coeficientes mássicos de atenuação  $\mu_{mi}$ , resulta:

$$\mu_m = \sum \omega_i \mu_{mi} \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \quad (53)$$

Os valores  $\mu_i$  podem se determinar a partir de tabelas ou gráficos, em função de  $Z_i$  (número atômico do elemento) e da energia  $h\nu_0$  dos fótons emitidos pela fonte.

Para as energias do  $^{137}\text{Cs}$  e do  $^{60}\text{Co}$ , que são as fontes mais empregadas nas sondas de densidade, e para os elementos normalmente encontrados na crosta terrestre, predomina o efeito Compton. Portanto pode-se escrever:

$$\mu_{mi} = \frac{\mu_i}{\rho_i} \cong \frac{\sigma_i}{\rho_i} \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \quad (54)$$

De acordo com a eq. (15):

$$\frac{\sigma_i}{\rho_i} = N_0 \sigma_e \cdot \frac{Z_i}{A_i} \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \quad (55)$$

Como  $N_0$  é uma constante e  $\sigma_e$  só depende da energia dos fótons,  $\sigma_i/\rho_i$  será função apenas da relação  $Z_i/A_i$ .

Com exceção do hidrogênio, esta relação é aproximadamente igual a 0,5 para todos os elementos de baixo e mediano número atômico  $Z$ . Na tabela 4 se mostra a relação  $Z/A$  média para os principais constituintes dos arenitos, calcários e dolomitos, que são por outra parte, as formações litológicas de importância técnica mais frequentemente encontradas nas perfurações.

**TABELA 3**

Relação  $Z/A$  média para os principais constituintes das litogias mais comuns

LITOGIA	PRINCIPAL CONSTITUINTE	Z/A
Arenitos	$\text{Si O}_2$	0,499
Calcários	$\text{Ca CO}_3$	0,500
Dolomitos	$\text{CaMg (CO}_3)_2$	0,499

Portanto, o coeficiente mássico de atenuação da maioria das litologias para fótons de uma dada energia, será aproximadamente constante e a resposta do equipamento dependerá só da densidade global das formações.

Em lugar de se utilizar a eq. (53), o coeficiente  $\mu_m$  pode ser determinado experimentalmente medindo-se a atenuação de radiações através de uma amostra do material investigado.

Conhecidos os valores de  $n$  e  $\mu_m$  e fixados os limites  $\rho_{min}$  e  $\rho_{max}$  da faixa de medição, pode-se projetar e calibrar a sonda segundo o procedimento acima descrito.

Como no caso das sondas para perfilagem gama natural, as sondas de perfilagem gama-gama formam parte de um cabeçote de sondagem capaz de realizar múltiplas medições simultaneamente. O mesmo equipamento pode medir a densidade global e a radiação gama natural das formações litológicas, junto com o diâmetro do poço na zona investigada. Aparelhos ainda mais completos, medem também a resistividade das formações.

Na prática, para evitar erros de medição por variações de geometria e por influência do fluido na perfuração, a sonda de densidade trabalha em contato com a parede do poço, mediante ação de uma mola. Do lado oposto a sonda de densidade, encontra-se normalmente o medidor de diâmetro ou calibre do poço, também acionado por uma mola de pressão constante.

Porém, em poços não revestidos, a resposta da sonda de densidade estaria ainda afetada pelas rugosidades da parede e pela espessura dos revestimentos de lama originados na filtração do fluido que se utiliza nas perfurações.

Com a finalidade de corrigir os erros de medição eventualmente introduzidos por estes fatores, empregam-se sondas de densidade "compensadas" com a incorporação de mais um detetor, de tal modo que ambos dos detetores fiquem espaçados a diferentes distâncias da fonte radioativa e blindados contra a radiação direta. Cada um dos detetores dará uma resposta distinta para uma formação litológica de uma determinada densidade.

Pode-se estabelecer uma correlação entre ambas as leituras e as variações de densidade da rocha, para diferentes espessuras da camada de barro interpostas entre a sonda e a parede do poço.

A fig. 9 esquematiza uma das tais correlações.

Suponha-se que a correlação mostrada na Fig. 9 tenha sido obtida para o caso em que a correção é desnecessária, i. e., para uma camada de barro de espessura zero. Repetindo agora a correlação de leituras para revestimentos de barro de espessuras  $x$  crescentes, obter-se-á uma série de retas que se cruzam com a anterior, tal como se mostra na Fig. 10.

Em virtude da forma do diagrama resultante, a reta central ( $x = 0$ ) é denominada de "coluna" ou "espinha dorsal", enquanto as retas transversais são chamadas de "costelas".

A par de leituras  $R_1$  e  $R_2$  em c.p.s obtidas em uma medição qualquer identificará, (diretamente ou por interpolação), uma das retas transversais no gráfico da Fig. 10, e sobre esta

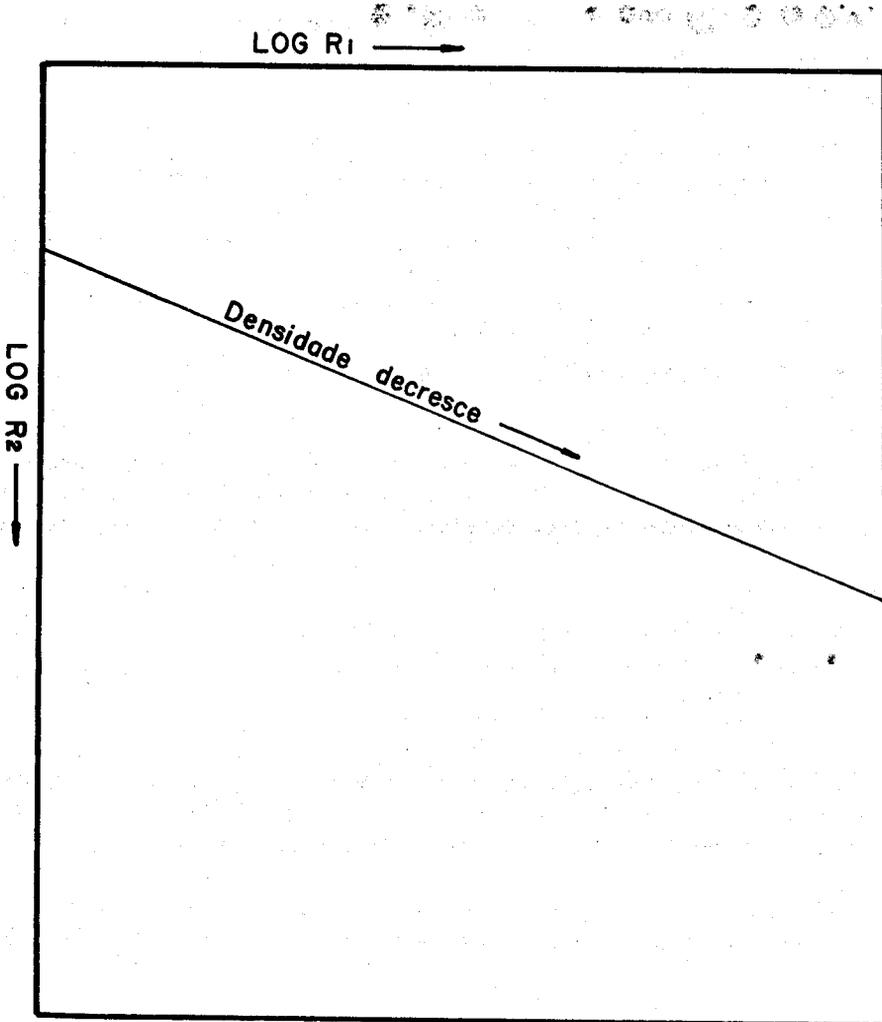


Fig. 9 - Representação esquemática da relação entre as respostas dos detetores de uma sonda "compensada" de medição de densidade, para uma determinada espessura da camada de barro que reveste a parede do poço.  $R_1$  e a leitura do detetor mais afastado e  $R_2$  do mais próximo ( $r_{c1} > r_{c2}$ ).

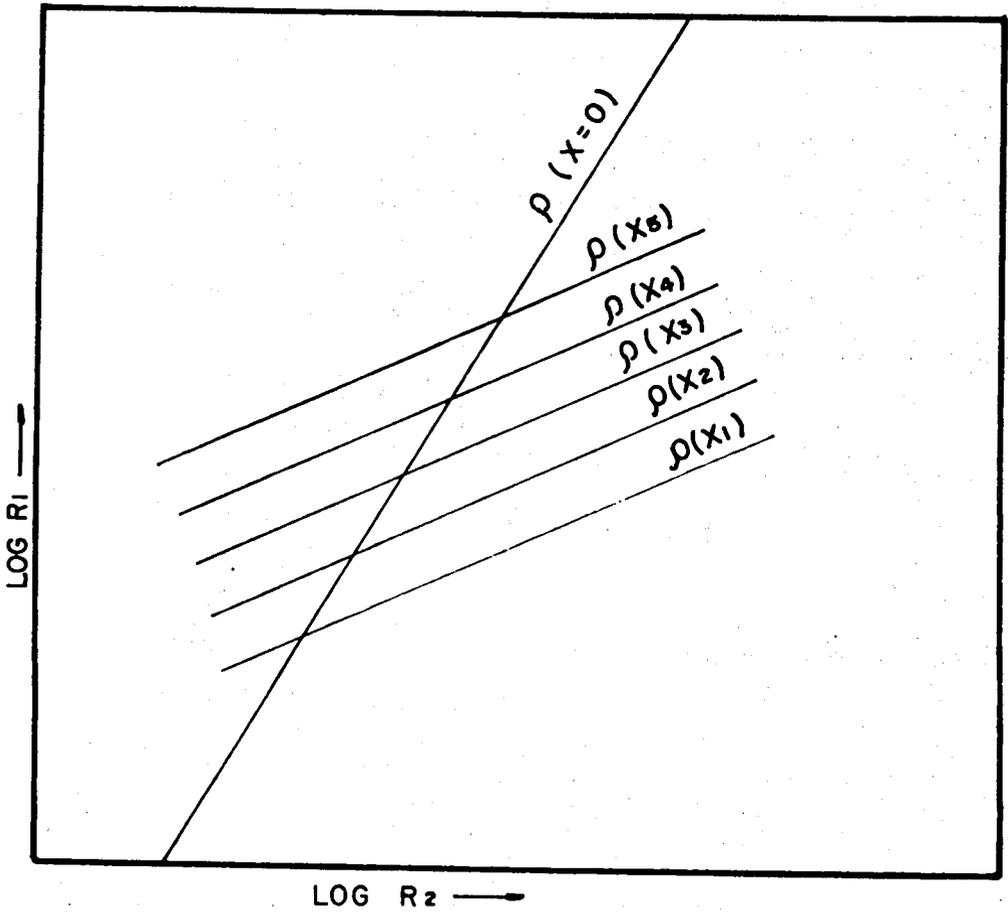


Fig. 10 - Representação esquemática da resposta de uma sonda "compensada" de medição de densidade, para diferentes espessuras do revestimento de barro na parede da perfuração.

reta um ponto determinado. Como cada reta constitui uma escala particular de densidades, o ponto assim obtido permite conhecer a densidade global real da formação, independentemente dos efeitos da camada de lama sobre a qual a sonda pode se assentar.

A compensação das leituras é feita automaticamente por meio de um computador simples, programado para processar os dois sinais  $R_1$  e  $R_2$  e para dar em um registro gráfico a densidade corrigida e também a magnitude da correção aplicada.

Para a calibração primária destas sondas, empregam-se poços experimentais que simulam um setor da perfuração, constituído pelo menos por três camadas de calcários de densidades significativamente diferentes, na faixa de 2 a 3 g/cm<sup>3</sup>.

Efetua-se a calibração em campo com padrões secundários de magnésio e alumínio que correspondem a densidades globais de 2,25 e 3 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. Uma das faces do padrão de magnésio fornece uma densidade global aparente de 2,48 g/cm<sup>3</sup> devendo-se verificar ali em consequência, uma compensação negativa de 0,23 g/cm<sup>3</sup>.

As características construtivas e operacionais típicas de uma sonda para medição simultânea de densidade, radiação gama natural e diâmetro do poço (DRESSER ATLAS, Modelo 2207) são:

- diâmetro externo nominal:  $\cong 12$  cm.
- comprimento (incluindo a cabeça do cabo):  $\cong 4,78$  m;
- peso:  $\cong 150$  kg;
- pressão máxima de trabalho: 1.400 kg/cm<sup>2</sup>;
- temperatura máxima de trabalho:  $\cong 204^\circ$  C;
- velocidade máxima de perfilagem: 7,5 m/min;
- tipo de detetores: G.M.;
- fonte radioativa: 2Ci de <sup>137</sup>Cs;
- área de contato entre a sonda e a parede do poço:  $\cong 470$  cm<sup>2</sup>
- espaçamento entre fonte e os detetores: 20 e 38 cm.
- intervalo perdido no fundo do poço;  $\cong 3$  m.

#### 1.2.4 - Execução, aplicações e limitações da perfilagem G-G

A sonda é colocada na cabeça do cabo e descida até o fundo da perfuração. Durante esta operação tanto a sonda para a medição de densidade com o calibrador de diâmetro, matêm-se retraídos e alojados no núcleo central da ferramenta, para facilitar a descida do conjunto. Uma vez alcançada a profundidade máxima ou o fundo do poço, os braços retratáveis que suportam em posições diametralmente opostas a sonda de densidade e o calibrador de diâmetro, são expandidos por um sistema eletro-hidráulico. A sonda de densidade e o calibrador ficam assim em contato permanente com a parede do poço. A pressão de contato é mantida praticamente constante, por ação de uma mola.

Em seguida dá-se início a ascensão da ferramenta à velocidade uniforme, e durante esta etapa registram-se os perfis de densidade global, radiação gama natural e diâmetro do poço. Este último se obtém transformando os movimentos laterais dos braços retratáveis num sinal elétrico.

As sondas compensadas medem a densidade global em poços não revestidos, com um mínimo efeito das condições físicas e geométricas imperantes na zona de medição. Esta medida serve por sua vez para calcular a porosidade das formações.

A porosidade  $\phi$  de uma amostra mineral define-se como a relação entre o volume  $V_p$  de poros e o volume total  $V_t$  da amostra. De acordo com esta definição:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (56)$$

As perfilagens de densidade realizam-se com o poço cheio da solução aquosa de lama que se utiliza durante a perfuração, para contrabalançar a pressão de escape dos fluidos (petróleo ou gás) das possíveis camadas produtoras e que serve, além disso, como lubrificantes da broca. Por efeito da altura da coluna líquida, origina-se um verdadeiro processo de filtração em virtude de que a água penetra no terreno circundante invadindo, total ou parcialmente, os poros das formações até uma certa distância da parede do poço. Outra consequência deste processo é a formação de revestimento compactos de barro, de espessura variável, sobre as paredes do poço.

O volume do terreno afetado pela invasão do filtrado é maior do que o volume explorado pela sonda de densidade. Portanto, a leitura de densidade global estará relacionada por meio da porosidade, com a densidade da mistura de fluidos nos poros da formação e com a densidade do grão da rocha:

Se  $V_t$  ( $\text{cm}^3$ ) é o volume total do terreno que equivale praticamente a um volume "infinito" para a resposta da sonda, a densidade global  $\rho_b$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) indicada pelo instrumento será:

$$\rho_b = \frac{P_t}{V_t} \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (57)$$

onde:

$P_t$  : peso total do volume  $V_t$  (g).

Denominando respectivamente  $P_f$  e  $P_g$  aos pesos dos fluidos e dos grãos de rocha contidos no volume  $V_t$  da formação, resultam as seguintes equações:

$$P_t = P_f + P_g \quad (\text{g}) \quad (58)$$

$$\rho_b = \frac{P_f + P_g}{V_t} \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (59)$$

$$\rho_b = \frac{\rho_f V_f + \rho_g V_g}{V_t} \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (60)$$

onde:

$\rho_f$  : densidade média do fluido na formação invadida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

- $\rho_g$  : densidade do grão da rocha, que constitui a matriz da formação ( $\text{g/cm}^3$ );  
 $V_f$  : volume ocupado pela mistura de fluidos ( $\text{cm}^3$ );  
 $V_g$  : volume ocupado pelos grãos de rocha ( $\text{cm}^3$ ).

Admitindo-se que todo o volume  $V_p$  de poros presente em  $V_t$  está ocupado pela mistura de fluidos resultantes da invasão, se terá:

$$V_f = V_p \quad (\text{cm}^3) \quad (61)$$

Da equação 56

$$V_f = \phi V_t \quad (\text{cm}^3) \quad (62)$$

$$V_g = V_t - V_f = (1 - \phi) V_t \quad (\text{cm}^3) \quad (63)$$

Substituindo as eqs. 59 e 63 na eq. 60 obtém-se finalmente a relação procurada:

$$\rho_b = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_g \quad (\text{g/cm}^3) \quad (64)$$

A porosidade  $\phi$  resulta então:

$$\phi = \frac{\rho_g - \rho_b}{\rho_g - \rho_f} \quad (65)$$

e pode ser calculada a partir da medida de densidade global  $\rho_g$ , quando se conhecem as densidades do fluido e da rocha na formação.

A escolha da densidade apropriada ao grão da rocha baseia-se no conhecimento da litologia das formações investigadas durante a perfilagem.

Na tabela 4, se indica a densidade de grão dos minerais comumente encontrados nas rochas sedimentares.

A densidade média dos minerais comuns de argila se aproxima a do quartzo. Esta é a razão em virtude da qual o perfil de densidade gama-gama pode ser usado para obter a porosidade efetiva das areias argilosas.

A densidade do fluido na formação pode ser estimada em função das condições de infiltração observadas durante a perfuração do poço.

Quando a perfilagem é executada num poço cheio de fluido, onde as condições de invasão são normais, a densidade da mistura de fluidos nos poros da rocha pode ser considerada igual a 1 ( $\text{g/cm}^3$ ).

Em troca, se a perda de água observada durante a perfuração é pequena ou o poço é perfurado com gás, a densidade do fluido na formação não pode mais ser considerada unitária.

Na tabela 5 dá-se a densidade da mistura de fluidos na formação para diferentes condições de perfuração.

TABELA 4

Densidade do grão de alguns minerais encontrados em rochas sedimentares.

MINERAL	COMPOSIÇÃO	DENSIDADE DO GRÃO (g/cm <sup>3</sup> )
Anidrita	CaSO <sub>4</sub>	2,899 – 2,985
Dolomita	CaMg . (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,8 – 2,9
Calcita pura	CaCO <sub>3</sub>	2,710
Gipsita (Gesso)	CaSO <sub>4</sub> 2(H <sub>2</sub> O)	2,314 – 2,328
Halita (Sal gema)	NaCl	2,1 – 2,6 (pura 2,164)
Ilita (Sal gema)	Grupo argiloso	2,76 – 3,0
Caolinita	Al <sub>4</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ) (OH) <sub>8</sub>	2,6 – 2,65
Montmorillonita	Grupo argiloso	2,2 – 2,7
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	2,653 – 2,660

TABELA 5

Valores da densidade dos fluidos da formação, em diferentes casos

FLUIDO NO POÇO	CONDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO	FLUIDO NA FORMAÇÃO	DENSIDADE DO FLUIDO (g/cm <sup>3</sup> )
Lama	Normal	Filtrado e saturação residual de petróleo	1,0
Lama	Sem invasão	petróleo e gás	0,7
Lama	Sem invasão	gás	0,3

Suponha-se que um poço que está sendo perfurado com lama, exista uma zona de arenitos onde prevalecem condições normais de infiltração. A densidade média do fluido na formação pode ser considerada então igual a  $1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ . O registro da densidade global compensada permite calcular, com auxílio da eq. (65), a porosidade nas diferentes seções de interesse.

Seja  $\rho_b = 2,4 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  a densidade global corrigida de uma dessas seções, e  $\rho_g = 2,66$  a densidade do grão (quartzo). Da eq. (65), expressando a porosidade em percentagem:

Se a densidade do fluido na formação tivesse sido estimada em  $0,3 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  (gás), a porosidade haveria resultado em 11%.

Portanto a exatidão deste método para a determinação da porosidade, está limitada pela correta seleção dos valores que intervêm na eq. (65). Quando se concede devida atenção na escolha desses parâmetros, o perfil de densidade compensada global pode ser utilizado satisfatoriamente para o cálculo da porosidade das formações. Este fato tem sido verificado pela experiência de campo.

Como conclusão pode-se dizer que esta técnica combinada com outras perfilagens, constitui uma boa aproximação para o estudo de zonas de interesse sob condições adversas, tanto no que diz respeito a perfuração como ao tipo de jazida. A medição de densidade global aumenta a exatidão das determinações de porosidade, e fornece informação complementar para estudos litológicos e de outros tipos.

## APÊNDICE A

## PROJETO DE UMA SONDA PARA A MEDIÇÃO DE DENSIDADE POR REFLEXÃO GAMA

## A. 1 - Características da sonda

A sonda se constitui de uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  ( $E_{\gamma} = 1,17$  e  $1,33$  MeV,  $T_{1/2} = 5,3$  anos) com atividade em torno de 5 mCi, uma blindagem de chumbo de 3 cm de diâmetro por 18 cm de comprimento e um detetor de cintilação com cristal NaI (Tl) de 1"x1". Todos estes elementos estão contidos num tubo de alumínio que permite variar a distância fonte-detetor, figura A.1., mantendo-se fixa a posição da fonte de cobalto.

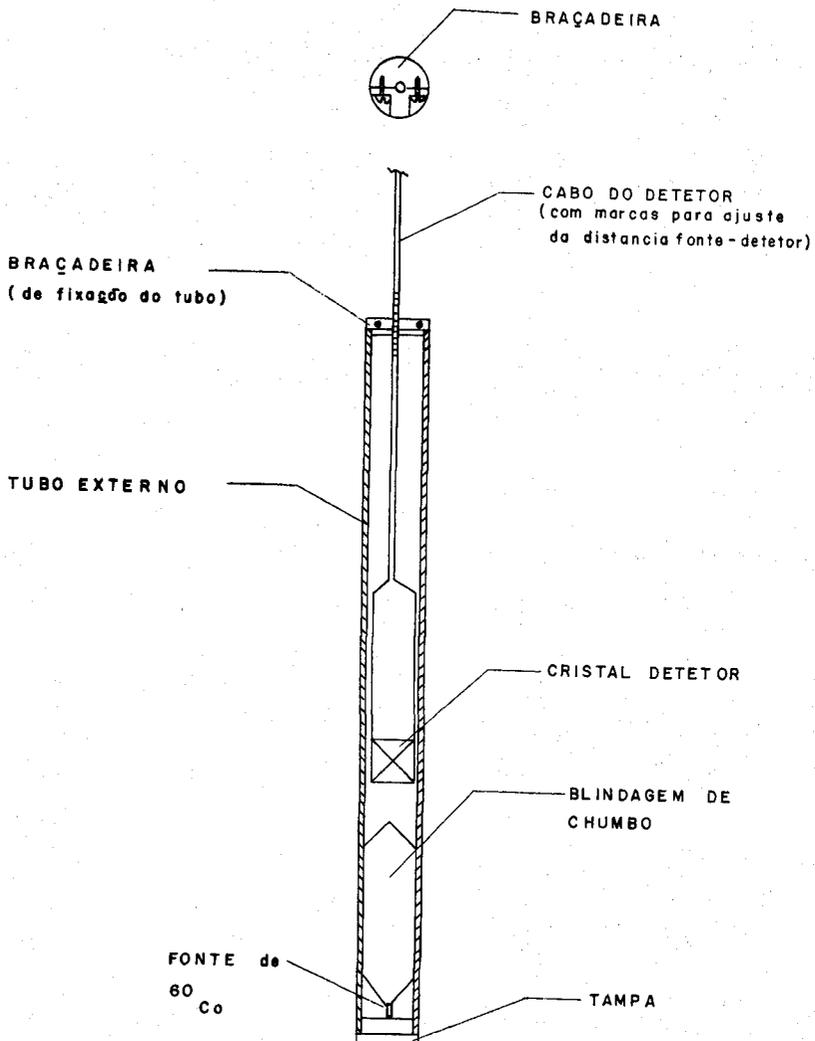


Fig. A.1 - Esquema de sonda

## A. 2 - Instrumento de leitura e registro

Foi utilizado um escalímetro BASIC monocanal, acoplado a um registrador gráfico tipo RUSTRAK.

## A. 3 - Amostra utilizada

O material utilizado como amostra de calibração foi dolomita moída com umidade de 4,69% em volume, e densidade de  $1,48 \text{ g/cm}^3$ . Este material foi colocado num recipiente de 55,5 cm de diâmetro por 82,5 cm de altura (200 l), assegurando assim um volume "infinito" de medição (definido em 1.2.2).

## A. 4 - Descrição da experiência

### A. 4.1 - Determinação do Coeficiente Mássico de Atenuação dos Raios Gama do $^{60}\text{Co}$ no Dolomito.

Para determinar o coeficiente mássico de atenuação  $\mu_m$  montou-se o arranjo experimental mostrado na figura A.2, que apresenta uma "boa geometria" de medição.

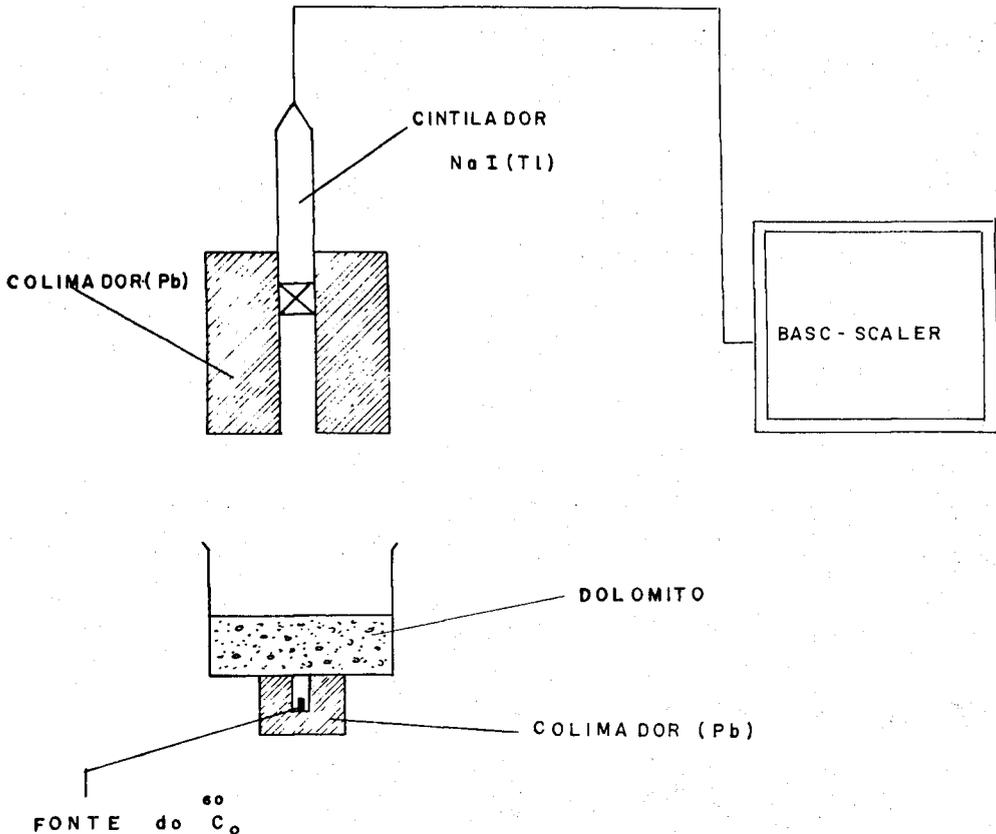


Fig. A.2 - Arranjo experimental para a determinação do coeficiente mássico de atenuação  $\mu_m$ .

Inicialmente foi feita a leitura de intensidade  $I_0$  (cpm) da radiação que alcança o detetor com o recipiente vazio (sem atravessar o absorvedor de dolomito). A seguir, fizeram-se as leituras da intensidade  $I$  (cpm) variando-se a densidade superficial ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) da amostra. Os dados obtidos estão mostrados na Tabela A.1.

**TABELA A.1**

Dados experimentais para a determinação do coeficiente mássico de atenuação  $\mu_m$

Peso (g)	espessura (cm)	densidade sup. ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$I$ (cpm)
5 000	5,50	6,127	78 200
13 000	12,00	15,932	45 550
18 000	16,00	22,060	31 660

Levantando-se o gráfico  $I$  (cpm) em função da densidade superficial ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) em papel semi-logarítmico, obtém-se uma reta cujo coeficiente angular permite a determinação do coeficiente mássico de atenuação (Fig. A.3). Este coeficiente resultou em:

$$\mu_m = 0,0566 \text{ cm}^2/\text{g}$$

#### A.4.2 - Determinação do Espectro de Energias da Radiação Gama na Amostra, para Várias Distâncias Fonte-Detetor ( $r$ )

Utilizando-se do arranjo da figura A.4, determinaram-se os espectros da radiação gama do  $^{60}\text{Co}$  para distâncias fonte-detetor de 18, 26, 32 e 40 cm, e com o sistema de detecção BASC operando nas seguintes condições:

Alta tensão: 1100 V

Janela: 20 mV

Constante de tempo: 5 s.

Umbral inferior: variável de 10 a 200 mV.

Os espectros obtidos, normalizados com respeito aos respectivos máximos, foram representados para fins de comparação nas figuras A.5, A.6, A.7, e A.8. Pode-se verificar que a distância fonte-detetor não altera a forma do espectro de energias, tal como foi antecipado na seção 1.2.2.

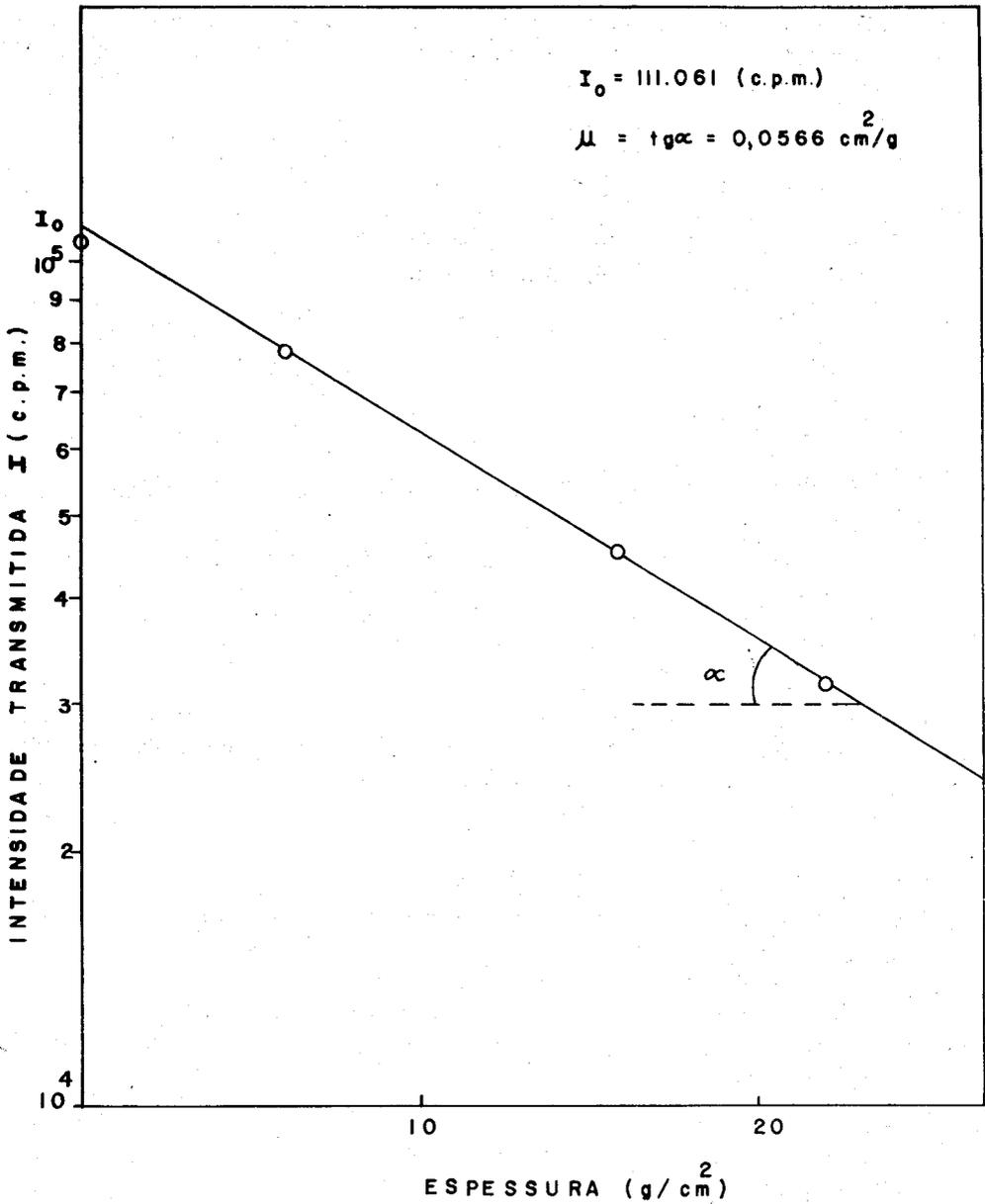


Fig. A.3 - Intensidade de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  transmitida através de diferentes espessuras de material dolomítico em ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), medida em "boa geometria" com um cristal NaI (T1).

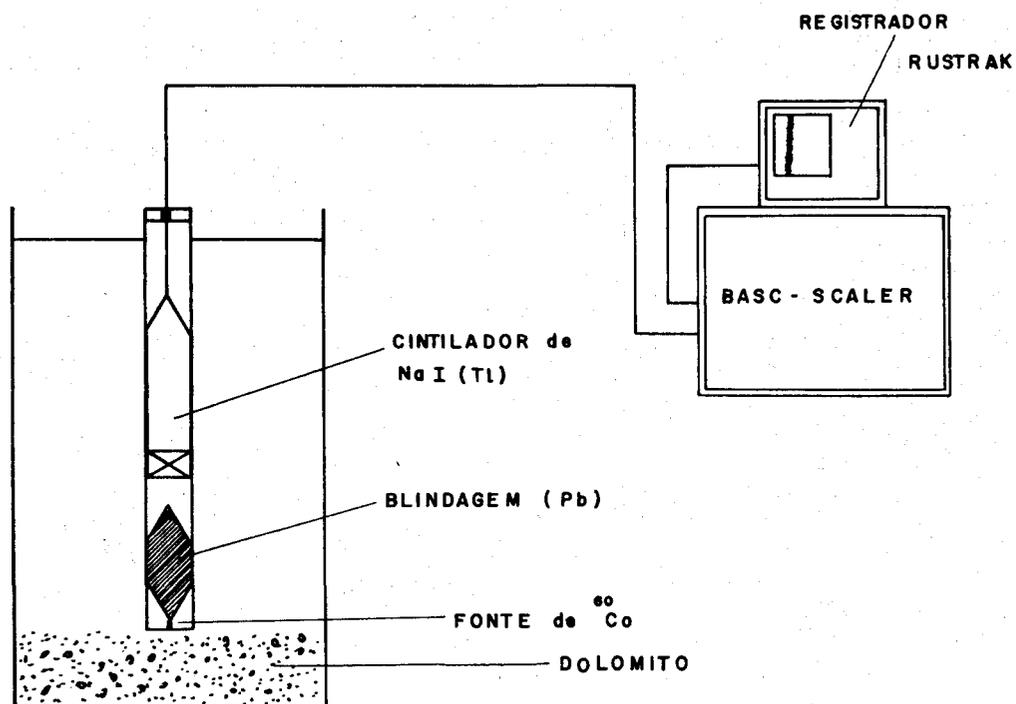


Fig. A.4 - Arranjo experimental para determinar a distribuição espectral de energia da radiação detetada a diferentes distâncias da fonte.

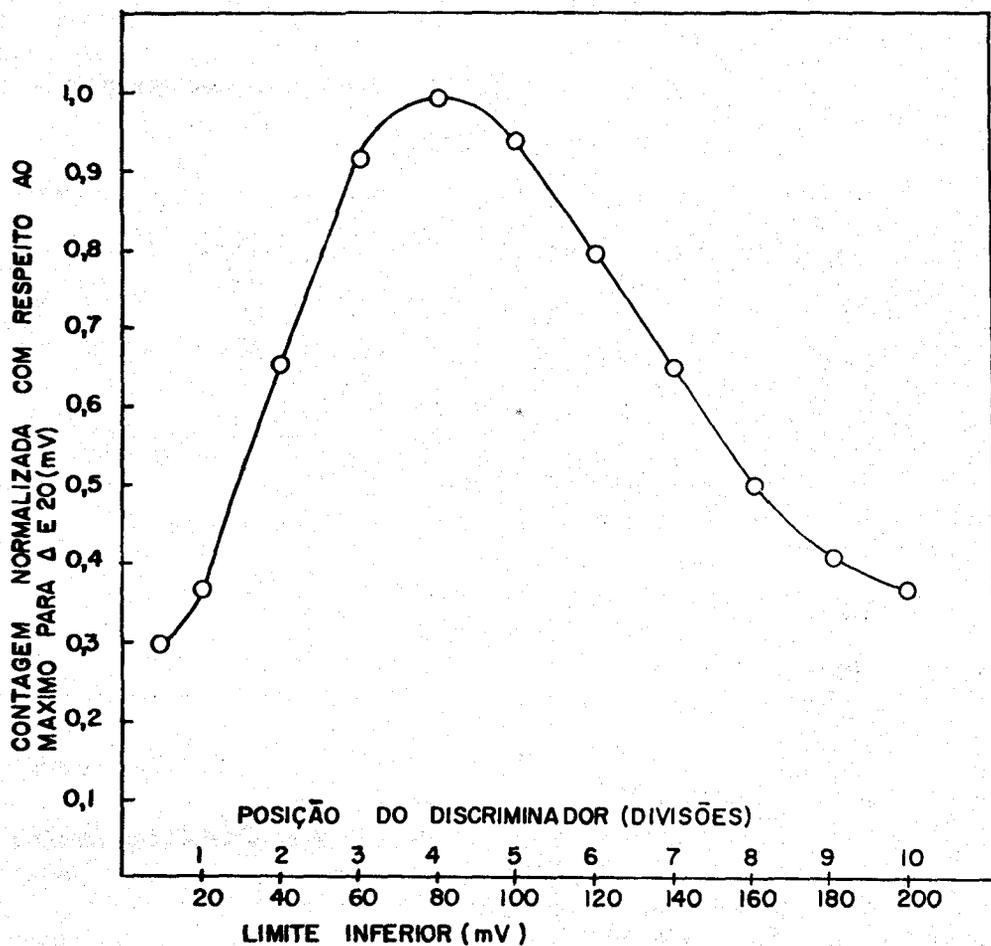


Fig. A.5 - Espectro de energia da radiação gama detetada a 18cm da fonte de  $^{60}\text{Co}$  com a sonda colocada numa amostra de material dolomítico de volume "infinito"

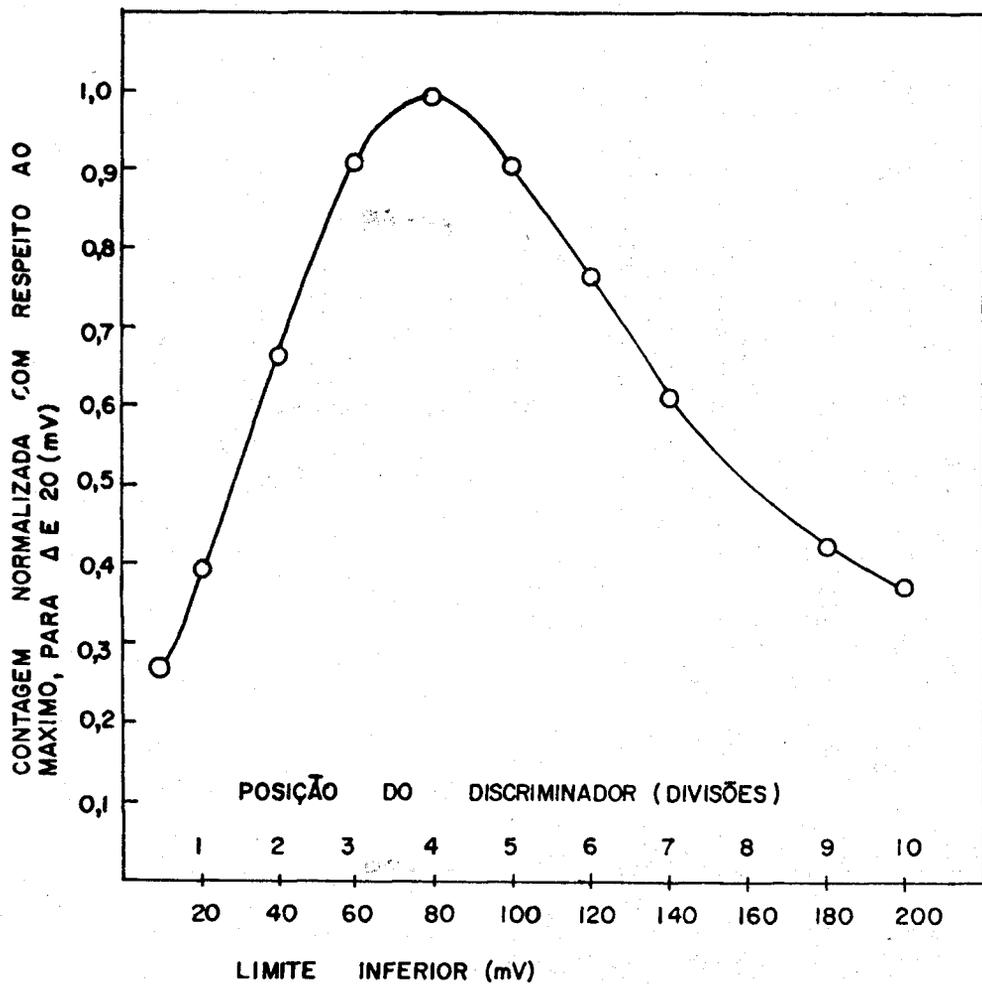


Fig. A.6 - Espectro de energia da radiação gama detetada a 26cm da fonte de  $^{60}\text{Co}$ , com a sonda colocada numa amostra de material dolomítico de volume "infinito".

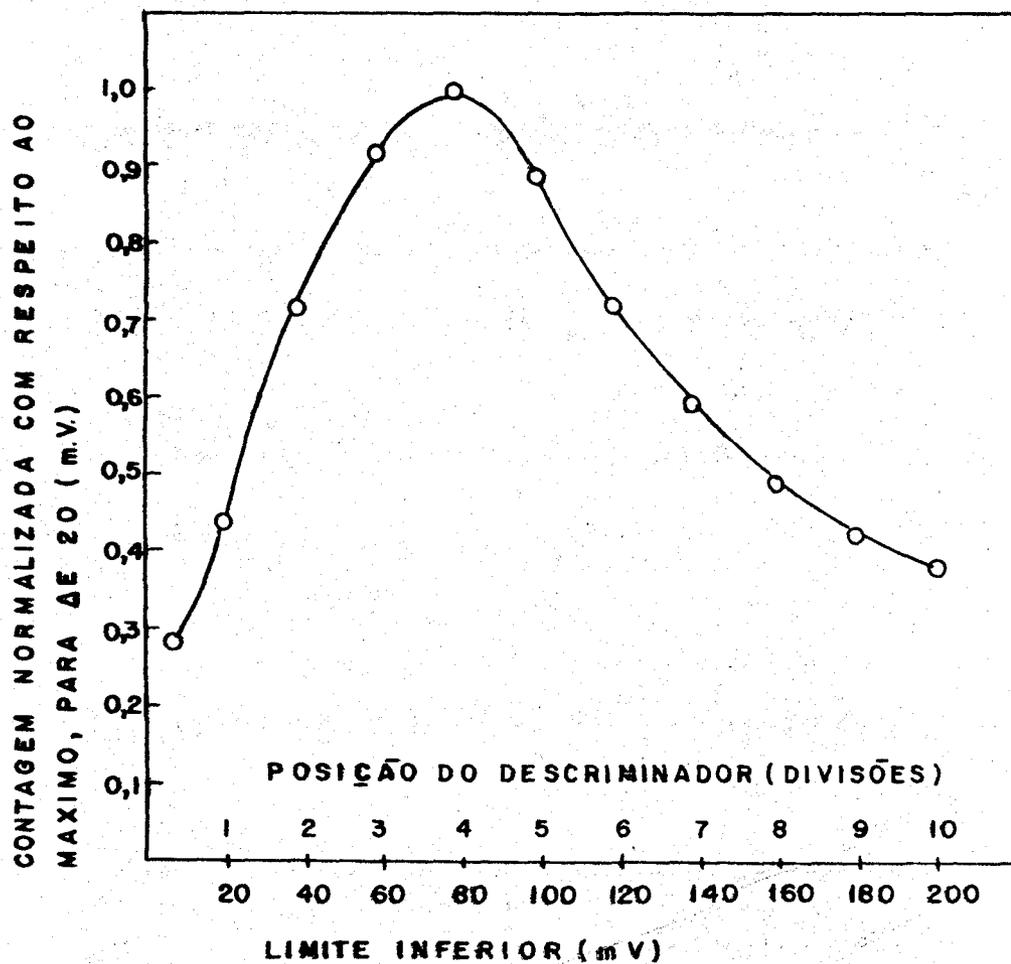


Fig. A.7 - Espectro de energia da radiação gama detetada a 32cm da fonte de  $^{60}\text{Co}$ , com a sonda colocada numa amostra de material dolomítico de volume "infinito".

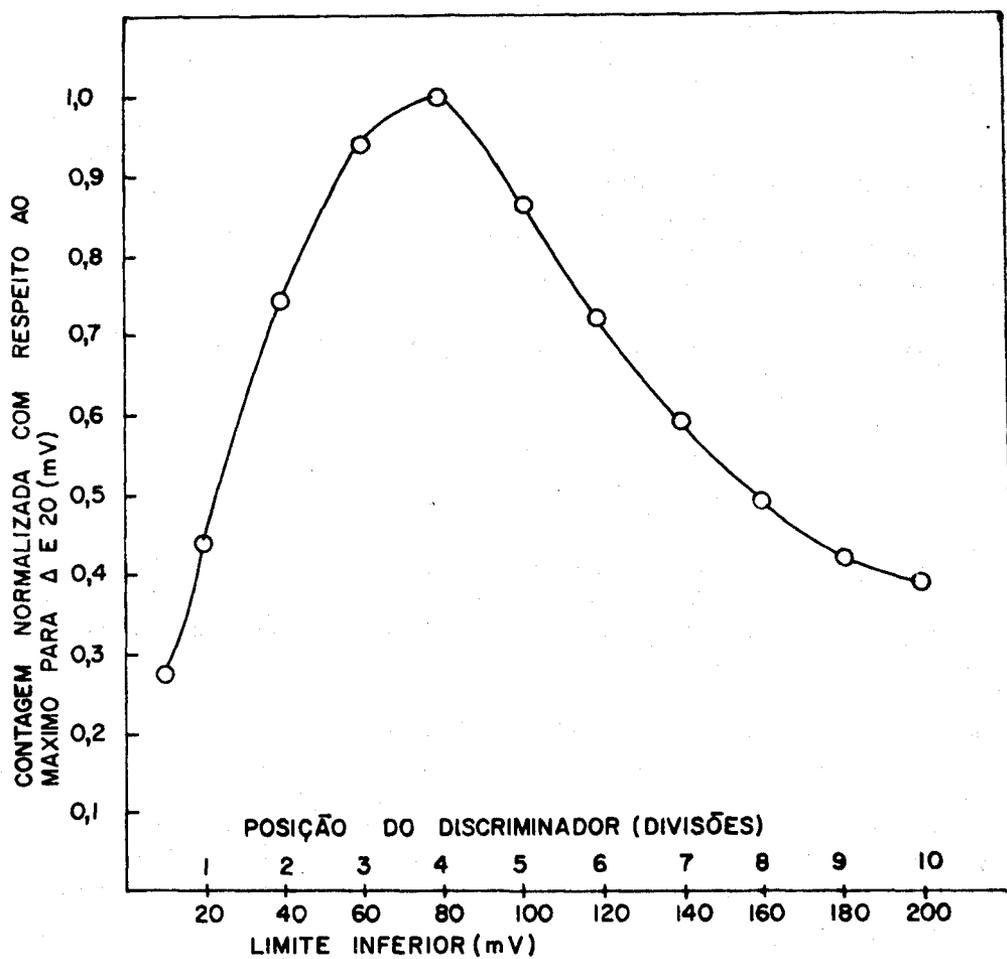


Fig. A.8 — Espectro de energia da radiação gama detetada a 40 cm da fonte de  $^{60}\text{Co}$  com a sonda colocada numa amostra de material dolomítico de volume "infinito".

#### A. 4.3 - Determinação da Energia dos Fótons Secundários Refletidos.

Como foi visto na seção 1.2.2, o efeito Compton predomina na medição de densidade por perfilagem gama-gama. Neste caso, a energia dos fótons espalhados pode ser obtida através da seguinte equação:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E(1 - \cos \theta)}{m_0 C^2}} \quad (\text{MeV})$$

onde:

$E$  = energia do fóton primário (MeV)

$E'$  = energia do fóton espalhado (MeV)

$\theta$  = ângulo de espalhamento ( $^\circ$ )

$m_0 C^2$  = energia de repouso do elétron = 0,511 MeV.

Para a energia dos raios gama do cobalto-60 e para um ângulo de espalhamento de  $90^\circ$ , a energia dos fótons refletidos resulta em:

$$E' = \frac{1,33}{1 + \frac{1,33(1 - 0)}{0,511}} = \frac{1,33}{3,60} = 0,37 \text{ MeV} = 370 \text{ keV.}$$

Para reduzir ao mínimo a radiação direta proveniente da fonte, utilizou-se uma discriminação eletrônica baseada na curva de calibração da energia em função da discriminação, mostrada na Fig. A.9. A faixa escolhida foi entre 95 e 295 mV, para discriminar a detecção de raios gama com energias maiores que 370 KeV.

#### A. 4.4 - Determinação da Contagem Total $R_{T2}$ Em função da Distância Fonte-Detector ( $r$ ).

Fixando-se a discriminação já estabelecida na Seção anterior e utilizando-se do arranjo experimental da figura A.4, determinaram-se as contagens totais  $R_{T2}$ , ou seja,  $R_2 + BG$  para distâncias fonte-detector variáveis entre 18 e 44 cm, com intervalos de 2 cm. Os dados obtidos estão indicados na tabela A.2.

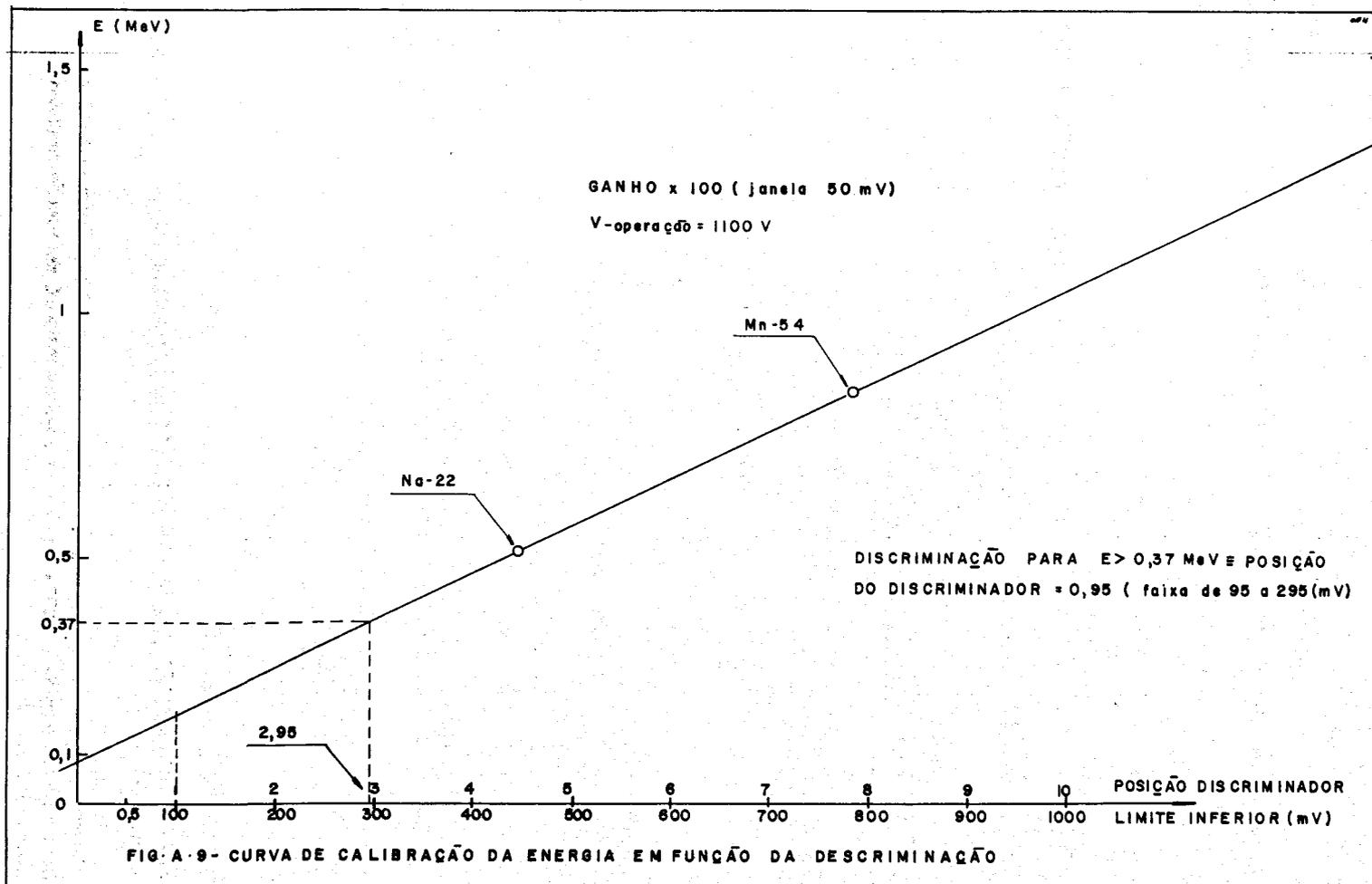


Fig. A.9 - Curva de Calibração da energia em função da descriminação

TABELA A.2

Resposta total do detetor em função da distância fonte-detetor

r (cm)	$R_{T2} = R_2 + BG$ (cpm)
18	1.198.295
20	1.127.125
22	1.004.895
24	862.070
26	722.735
28	601.420
30	489.520
32	408.370
34	343.740
36	286.910
38	234.235
40	193.820
42	160.775
44	134.020

#### A. 4.5 - Determinação da Radiação Direta (BG) em Função da Distância Fonte-Detetor (r).

Esta determinação foi efetuada com a sonda no ar e longe de qualquer material que pudesse refletir a radiação emitida pela fonte. Os valores obtidos do BG em função da distância r estão mostrados na tabela A.3.

TABELA A.3

Contagens da radiação direta (BG) em função da distância fonte-detetor

r (cm)	BG (cpm)
18	16.860
20	17.590
22	17.040
24	16.500
26	16.145
28	16.150
30	16.300
32	15.920
34	15.875
36	15.055
38	14.640
40	14.360
42	14.345
44	14.235

A curva da contagem líquida  $R_2 = R_T - BG$  em função da distância fonte-detetor, está representada na figura A.10. A partir dos pontos experimentais pode-se verificar que a intensidade da radiação cai gradativamente nos três primeiros pontos, não coincidindo com a curva representativa dos demais. Isto deve-se ao fato de que as contagens obtidas nas três primeiras distâncias (18, 20 e 22 cm) excedem o valor de saturação do escalímetro, fixado pelo fabricante em  $10^6$  cpm. Além disso, quando a distância fonte-detetor é pequena, parte da radiação refletida, que normalmente deveria alcançar o detetor, é absorvida pela blindagem de chumbo, contribuindo ainda mais para a obtenção de uma intensidade detetada menor que aquela prevista pela teoria.

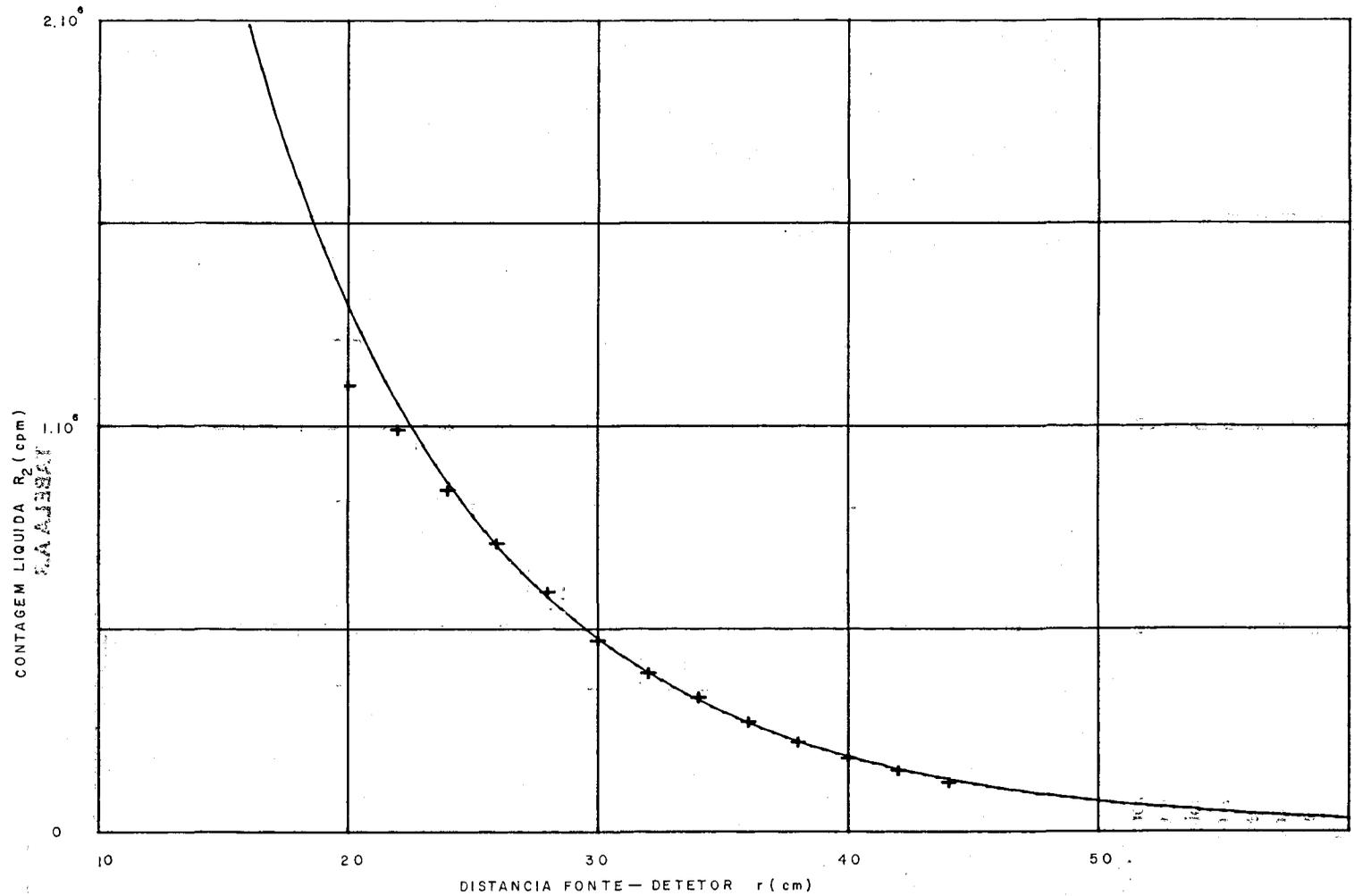


Fig. A.10 - Curva de resposta líquida (cpm) da sonda em função da distância fonte-detetor, para uma amostra de dolomito de densidade  $\rho_c = 1,48$  (g/cm<sup>3</sup>).

#### A. 4.6 - Determinação da Constante n Para a Amostra Utilizada e a Fonte de $^{60}\text{Co}$ .

Calculou-se o valor da constante n a partir dos dados experimentais, tendo-se em conta que da eq. (38) para  $\rho = \rho_c$  e  $R = R_2$  resulta:

$$\log (R_2 r^2 e^{-\mu_m \rho_c r}) = \log C + n \log (\mu_m \rho_c r)$$

Os valores experimentais relativos a esta equação estão mostrados na tabela A.4, para  $\rho_c = 1,48 \text{ g/cm}^3$  e  $\mu_m = 0,0566 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

A determinação da reta correspondente a estes pontos efetuou-se pelo método dos mínimos quadrados utilizando uma calculadora programável HP-9810. Em virtude do discutido na Seção A.4.5, não foram considerados os três primeiros pontos e não se considerou, também, o último ponto ( $r=44 \text{ cm}$ ), por estar o detetor já bastante próximo da superfície superior da amostra de dolomito, afastando-se portanto da condição de geometria "infinita".

Obtiveram-se assim os valores:

$$n = 1,589$$

$$C = 1,22 \cdot 10^9$$

A reta interpolada e os pontos experimentais, estão representados na figura A.11.

**TABELA A.4**  
Valores experimentais para a determinação da constante

r (cm)	$R_2 \times 10^{-6}$ (cpm)	$\mu_m \rho_c r$	$e^{-\mu_m \rho_c r}$	$R_2 r^2 e^{-\mu_m \rho_c r} \times 10^{-9}$
18	1,18	1,507	0,221	1,727
20	1,10	1,675	0,187	2,350
22	0,99	1,842	0,158	3,026
24	0,84	2,010	0,133	3,616
26	0,71	2,178	0,113	4,237
28	0,59	2,345	0,095	4,828
30	0,47	2,513	0,081	5,221
32	0,39	2,680	0,068	5,828
34	0,33	2,848	0,058	6,582
36	0,27	3,015	0,049	7,139
38	0,22	3,183	0,041	7,663
40	0,18	3,350	0,035	8,214
42	0,15	3,518	0,029	8,924
44	0,12	3,685	0,025	9,264

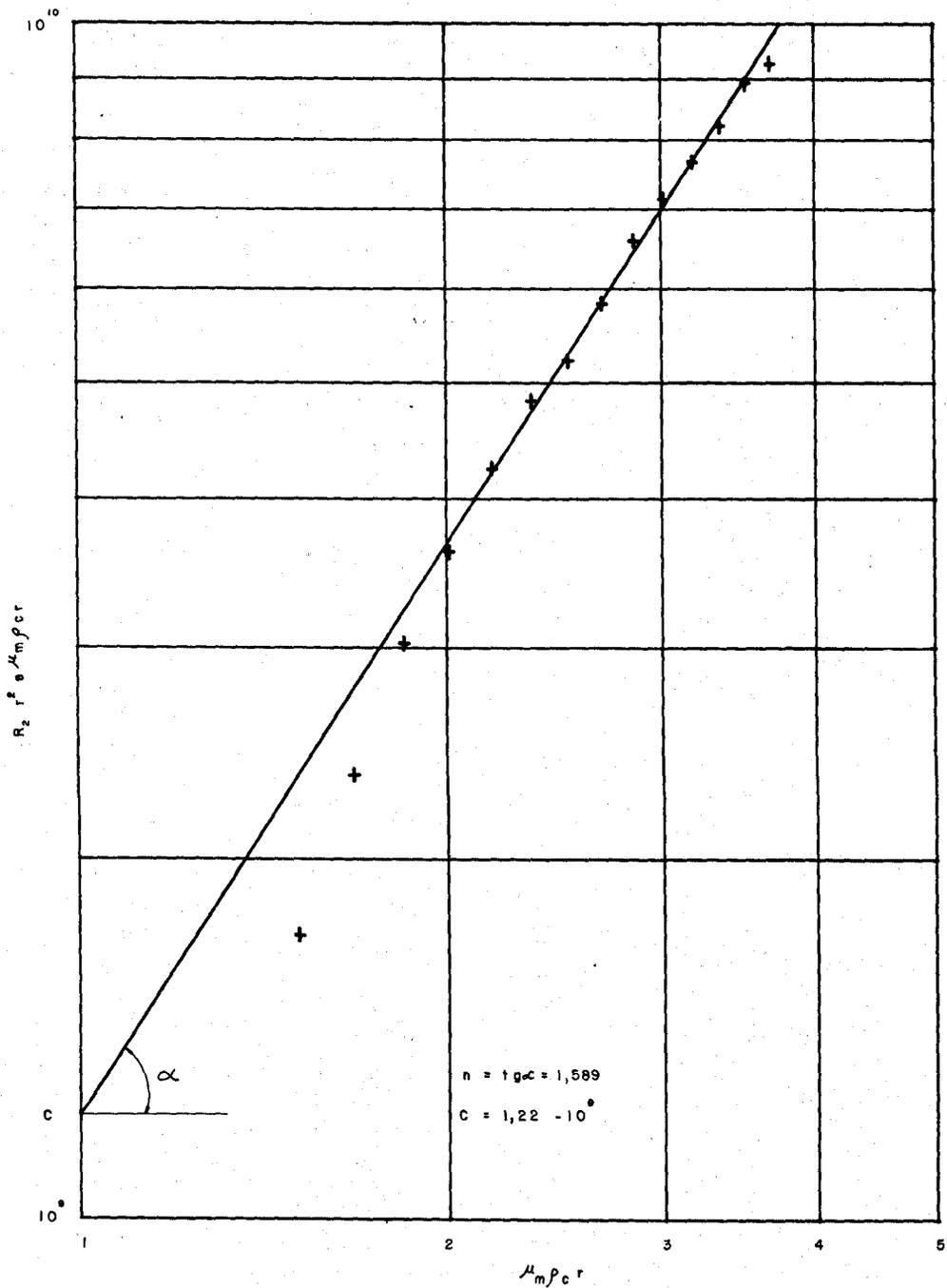


Fig. A.11 - Curva para a determinação da constante  $n$ , obtida processando os dados experimentais com uma calculadora programável H.P. - 9810.

#### A. 4.7 - Determinação da Distância Ótima ( $r_{\delta t}$ ) Entre Fonte e Detetor.

Utilizando-se da eq. (47) para um intervalo de densidades entre 1 e 3 g/cm<sup>3</sup>, ou seja:  $\rho_{mín} = 1 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{máx} = 3 \text{ g/cm}^3$  e tomando-se o valor de n obtido, resultou:

$$r_{\delta t} = 29 \text{ cm}$$

#### A. 4.8 - Curva de Calibração da Sonda Utilizada

Com os dados experimentais obtidos nas Seções A.4.4 e A.4.5 e calculados os parâmetros  $\mu_m$ ,  $\rho_c$  e  $r_{\delta t}$ , levantou-se a curva de calibração em função da densidade  $\rho$ , para a distância  $r_{\delta t}$ , mostrada na figura A.12.

Os valores experimentais relativos a esta curva estão indicados na tabela A.5. O BG referente a distância  $r_{\delta t}$  resultou em:

$$BG(r_{\delta t}) = 16100 \text{ cpm.}$$

TABELA A.5

Dados correspondentes a curva de calibração  $R_T = f(\rho)$  para  $r_{\delta t}$

r (cm)	$R_2 \times 10^{-6}$ (cpm)	$R = \frac{R_2 r^2}{r_{\delta t}^2} \times 10^{-5}$ (cpm)	$R_T = R + BG$ (cpm) $\times 10^{-5}$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
18	1,18	4,55	4,71	0,919
20	1,10	5,23	5,39	1,021
22	0,99	5,70	5,86	1,123
24	0,84	5,75	5,91	1,225
26	0,71	5,71	5,87	1,327
28	0,59	5,50	5,66	1,429
30	0,47	5,03	5,19	1,531
32	0,39	4,75	4,91	1,633
34	0,33	4,54	4,70	1,735
36	0,27	4,16	4,32	1,837
38	0,22	3,78	3,94	1,939
40	0,18	3,42	3,59	2,041
42	0,15	3,15	3,31	2,143
44	0,12	2,76	2,92	2,246

Os três primeiros pontos ( $r = 18,20$  e  $22$  cm) e o último ponto ( $r = 44$  cm) da curva de calibração da figura A.12, foram desprezados pelas razões citadas nas Seções A.4.5 e A.4.6.

#### A. 4.9 - Erro relativo estatístico na Determinação da Densidade

A partir da eq. (38), para  $\mu = \mu_m$  e  $r = r_{ót}$ , tem-se:

$$R = C \cdot \frac{(\mu_m r_{ót} \cdot \rho)^n}{r_{ót}^2} \cdot e^{-\mu_m r_{ót} \rho}$$

Por diferenciação da equação acima, chega-se a

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{(n - \mu_m r_{ót})} - \frac{\Delta R}{R}$$

Considerando-se um tempo de contagem  $T$  e um intervalo de confiança de  $3\sigma$ , o erro estatístico relativo na determinação do ritmo de contagem resulta:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{3}{\sqrt{RT}}$$

Consequentemente, o erro relativo na determinação da densidade fica expresso pela função:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{3 r_{ót}}{[n - \mu_m r_{ót}] \sqrt{C \cdot (\mu_m r_{ót} \rho)^n \cdot e^{-\mu_m r_{ót} \rho} \cdot T}}$$

Na figura A.13, representam-se as curvas destes erros, expressos em porcentagem, para tempos de amostragem desde 10 até 120 segundos.

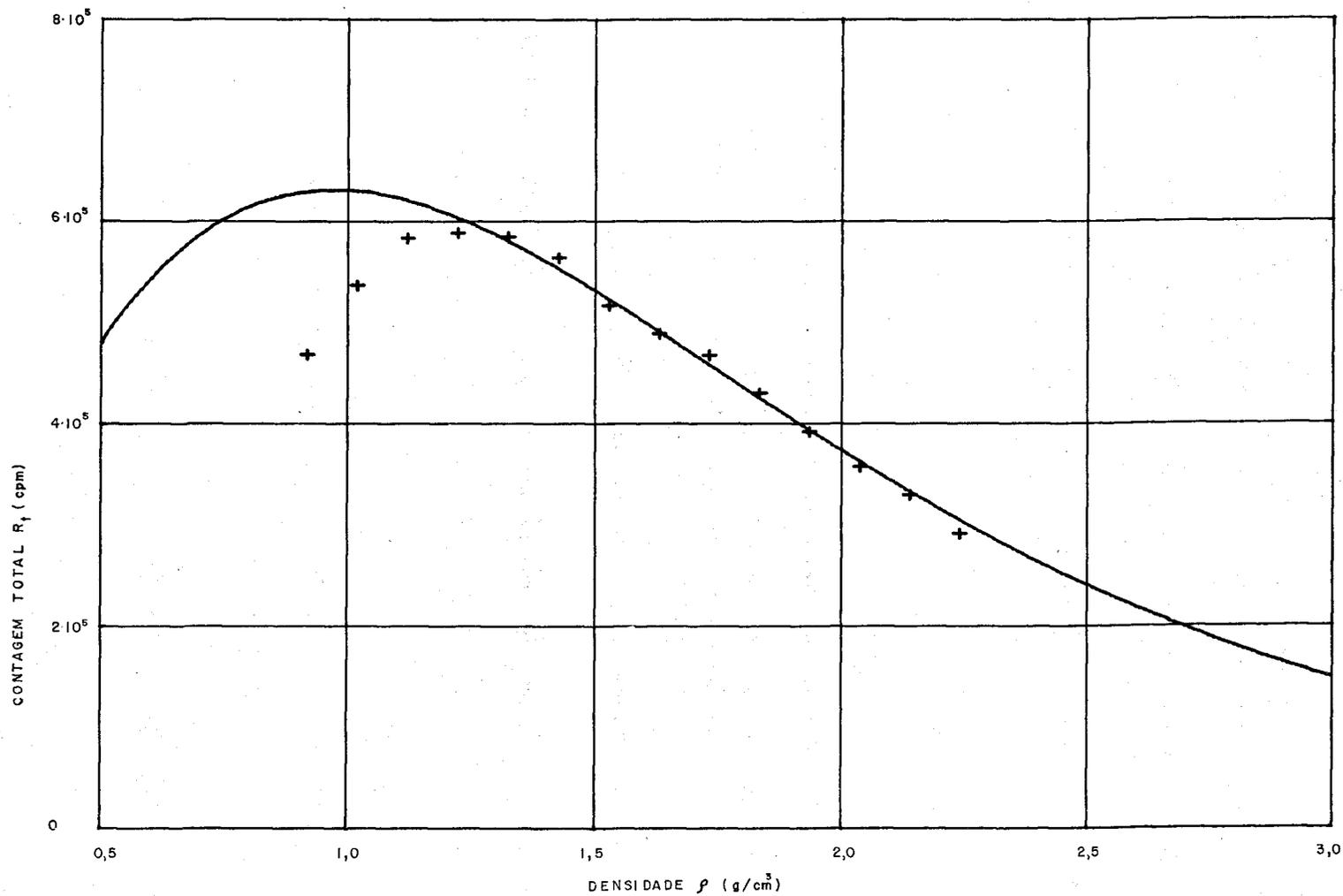


Fig. A.12 - Curva de calibração da sonda de densidade, para uma distância fonte-detetor  $r_c = r_{ot} = 24\text{cm}$

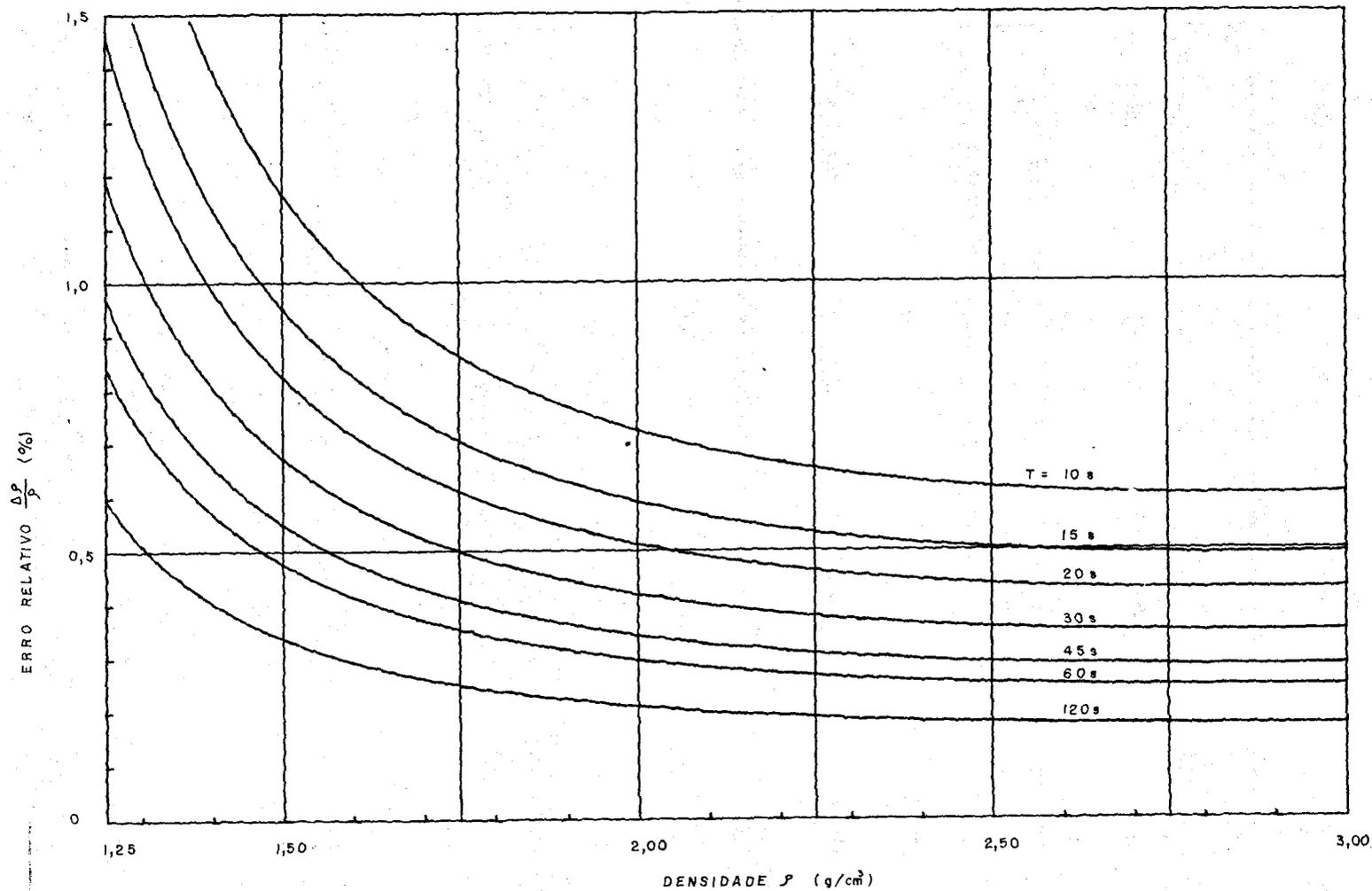


Fig. A.13 - Curvas do erro percentual relativo na determinação da densidade em função do tempo  $T$  de amostragem

## ABSTRACT

The general objectives of the oil well logging and the theory of operation, design and application of the probes for natural gamma and gamma-gamma logging are described.

The natural gamma logging - is mainly used to identify the litology of the formations cutted by the borehole and constitutes also an auxiliary mean to distinguish productive strata, estimate the index of permeability in shaly formations, measure the bed thickness and finally to facilitate the interpretation and correction of other measurements.

The objective of the gamma-gamma logging is the continuous measuring and recording of the strata bulk density variations as a functions of depth. This measurement, in turn, serves to calculate the formations porosity. Combined with other logs, it represent a good approach for studying zones of interest under adverse conditions concerning both, the borehole and type of reservoir.

Some practical examples regarding the project and utilization of natural gamma and gamma-gamma logging probes are given.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - UOP JOHNSON DIVISION, Água Subterrânea e poços tubulares, organização Pan-Americana de Saúde e Faculdade de Engenharia da Universidade Federal do Paraná (1969)
- 2 - AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA, Nuclear well logging in hidrology, Technical Report Series N<sup>o</sup> 126, IAEA, Viena (1971)
- 3 - FRANK, M. R., e BEMERGUY, I., Critérios para utilização de perfis em poços de petróleo. Sociedade Brasileira de Geologia, Anais do XXVI Congresso, Vol.3, Belém, PA, Outubro (1972).
- 4 - DESBRANDES, R., Théorie et interprétation des diagraphies, Publications de L'Institut Français du Pétrole, Collection "Science et Technique du Pétrole", n<sup>o</sup> 13, Editions Technip. Paris, (1968).
- 5 - WOOD, R. D., The gamma ray-neutron log, Technical Bulletin, Dresser Atlas, Houston, Texas (Nov, 1969)
- 6 - WATT, H. B., Densilog, Technical Bulletin, Dresser Atlas, Houston, Texas, (june, 1970).
- 7 - CASTAGNET, A. C., e outros, Medición de densidad por retrodispersión gamma: bases para el diseño de equipos aplicables a suelos y otros materiales, Informe n<sup>o</sup> 137, CNEA, Buenos Aires (1965).

Tabela 1. Série do urânio/rádio,  $A=(4n+2)$ ;  $51 < n(\text{inteiro}) < 59$ 

Isótopo	Meia-Vida	Radiação $\alpha$		Radiação $\beta$		Radiação $\gamma$		Conversão interna Z
		MeV	%	MeV	%	MeV	%	
Urânio - 238	$4,5 \times 10^9$ anos	$\approx 4,2$	100	-	-	0,048	0	23
Tório - 234 (UX <sub>1</sub> )	24,1 dias	-	-	0,10 0,19	35 65	0,029 0,063 0,091		$\alpha - 10$ $\alpha - 0,2$ $\alpha - 2,5$
Protactínio-234 (UX <sub>2</sub> ) <sup>m</sup>	1,18 min	-	-	IT 0,58 1,50 2,31	1 $\approx 1$ $\approx 9$ $\approx 90$	0,75 1,00 outras	mais abund.	-
Protactínio-234 (UZ)	6,66 hs.	-	-	1,13 outras		0,043 0,80 outras		-
Urânio - 234 (U II)	$2,5 \times 10^5$ anos	4,717 4,768	28 72	-	-	0,051	0	28
Tório - 230 (Iônio)	$8,0 \times 10^4$ anos	4,615 4,682	24 76	-	-	0,068 outras	0,6 muito fraca	23,4
Rádio - 226	1.620 anos	4,589 4,777	5,7 94,3	-	-	0,188	$\approx 4$	$\approx 2$
Radônio - 222	3.825 dias	5,48	$\approx 100$	-	-	-	-	-
Polônio - 218 (Rádio A)	3,05 min.	6,00	$\approx 100$	?	0,02	-	-	-
Astatínio - 218	1,3 s.	6,70 6,65	$\approx 0,82$ $\approx 0,001$	?	muito fraca	-	-	-
Radônio - 218	$1,9 \times 10^{-2}$ s	7,13	muito fraca	-	-	0,61	muito fraca	-
Chumbo - 214 (Rádio B)	26,8 min	-	-	0,59 0,65	$\approx 56$ $\approx 44$	0,24 0,30 0,35 outras	fracas	-
Bismuto - 214 (Rádio C)	19,9 min	$\approx 5,5$	0,04	-	-	-	-	-
				0,4 1,0 1,51 1,88 3,26	9 23 40 9 19	0,61 1,12 1,76 14 outr. até 2,43	{ mais abund.	
Polônio - 214 (Rádio C')	$1,6 \times 10^{-4}$ s	7,68	100	-	-	-	-	-
Tálio - 210 (Rádio C'')	1,3 min	-	-	1,96	0,04	várias	muito fracas	-
Chumbo - 210 (Rádio D)	22 anos	-	-	0,017 0,063	85 15	0,047	$\approx 5$	$\approx 80$
Bismuto - 210 (Rádio E)	5,01 dias	5,06	$1,7 \times 10^{-4}$	1,17	$\approx 100$	-	-	-
Polônio - 210 (Rádio F)	138,4 dias	5,305	$\approx 100$	-	-	0,8	$1,2 \times 10^{-3}$	-
Tálio - 206 (Rádio E')	4,2 min	-	-	1,51	$1,7 \times 10^{-4}$	-	-	-
Chumbo - 206	Estável	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Todas as percentagens relacionam-se com as desintegrações do urânio-238

Tabela 2. Série do Tório;  $A=(4n)$ ;  $52 < n$  (inteiro)  $< 58$ 

Isótopo	Meia-Vida	Radiação $\alpha$		Radiação $\beta$		Radiação $\gamma$		Conversão interna $\lambda$
		MeV	%	MeV	%	MeV	%	
Tório - 232	$1,41 \times 10^{10}$ anos	3,948 4,007	24 76	-	-	0,059	0	24
Rádio - 228 (Mesotório - I)	6,7 anos	-	-	$\approx 0,04$	100	-	-	-
Actínio - 228 (Mesotório - II)	6,13 hs.	-	-	1,18 1,76 2,10 outras de bai xa ener gia	$\approx 35$ $\approx 12$ $\approx 12$ 41	0,057 até 1,64 várias energias		
Tório - 228 (Radiotório)	1,91 anos	$\approx 5,2$ 5,338 5,421	1 28 71	-	-	0,084 outras	$\approx 2$ muito fracas	26
Rádio - 224 (Tório X)	3,6 dias	5,445 5,681	4,9 95	-	-	0,241 outras	3,7 muito fracas	1,3
Radônio - 220 (Torônio)	54 s	6,28	$\approx 100$	-	-	-	-	-
Polônio - 216 (Tório A)	0,158 s	6,775	$\approx 100$	---	---	---	---	---
Astatínio - 216	$3 \times 10^{-4}$ s	7,79	0,04	-	-	-	-	-
Chumbo - 212 (Tório B)	10,6 hs	-	-	0,33 0,57 outras de bai xa ener gia	80 12 $\approx 8$	0,12 0,24 0,30	0 $\approx 36$ $\approx 3$	3 $\approx 36$ $\approx 1$
Bismuto - 212 (Tório C)	60,5 min	6,04 6,08 outras	25 10 1	-	-	0,04 outras	$\approx 0$ muito fracas	$\approx 25$
Polônio - 212 (Tório C')	$3 \times 10^{-7}$ s	8,78 outras altas energ.	$\approx 64$ muito fracas	-	-	-	-	-
Tálio - 208 (Tório C'')	3,1 min	-	-	1,03 1,25 1,52 1,79	1 9 7 19	0,28 0,51 0,58 0,86 2,62	$\approx 3$ $\approx 8$ $\approx 31$ 4 36	$\approx 1$ $\approx 1$
Chumbo - 208 (Tório D)	Estável	-	-	-	-	-	-	-

Nota: Todas as percentagens relacionam-se com as desintegrações do Tório-232

=====  
INPUT FOLDER: C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120  
Check once at start time.

OUTPUT FOLDER: C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO Hot Folder\L0000120

SAVE AS TYPE: \*.pdf

FILE OPTIONS: Name files as source images

-----  
3/9/2009, 15:55:43 Running...  
3/9/2009, 15:55:43 Found 67 image files (67 pages). Processing....  
3/9/2009, 15:55:43 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000100.JPG)...  
3/9/2009, 15:55:50 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:55:52 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:55:52 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000200.TIF)...  
3/9/2009, 15:55:54 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:55:55 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:55:55 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000300.TIF)...  
3/9/2009, 15:55:56 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:55:56 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:55:56 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000400.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:00 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:01 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:01 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000500.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:07 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:07 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:07 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000600.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:13 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:13 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:14 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000700.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:19 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:20 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:20 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000800.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:26 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:26 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:27 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000900.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:32 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0000900.TIF, page 1): Check the recognition languages used for auto detection or specify the correct language manually.  
3/9/2009, 15:56:33 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:33 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:33 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001000.TIF)...  
3/9/2009, 15:56:38 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:56:39 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:39 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001100.TIF)..  
3/9/2009, 15:56:45 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:46 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:47 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001200.TIF)..  
3/9/2009, 15:56:54 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:56:54 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:56:54 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001300.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:00 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:01 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:02 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001400.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:08 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001400.TIF, page 1): Increase resolution to improve recognition accuracy of small text.  
3/9/2009, 15:57:08 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001400.TIF, page 1): Increase scanning brightness to make the image lighter.  
3/9/2009, 15:57:11 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:11 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:11 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001500.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:18 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:18 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:19 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001600.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:24 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:25 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:25 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001700.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:30 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:30 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:30 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001800.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:37 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:38 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:38 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0001900.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:42 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:43 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:43 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002000.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:48 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:48 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:49 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002100.TIF)..  
3/9/2009, 15:57:54 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:57:54 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:57:54 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002200.TIF)..  
3/9/2009, 15:58:00 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 15:58:00 No export errors occurred.  
3/9/2009, 15:58:01 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO

PAULO\L0000120\0002300.TIF)...

3/9/2009, 15:58:07 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:07 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:07 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002400.TIF)...

3/9/2009, 15:58:14 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:14 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:14 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002500.TIF)...

3/9/2009, 15:58:19 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:20 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:20 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002600.TIF)...

3/9/2009, 15:58:24 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:24 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:24 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002700.TIF)...

3/9/2009, 15:58:31 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:31 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:31 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002800.TIF)...

3/9/2009, 15:58:35 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:35 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:36 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0002900.TIF)...

3/9/2009, 15:58:48 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:48 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:48 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003000.TIF)...

3/9/2009, 15:58:56 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:58:56 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:58:56 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003100.TIF)...

3/9/2009, 15:59:02 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:03 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:03 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003200.TIF)...

3/9/2009, 15:59:10 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:10 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:10 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003300.TIF)...

3/9/2009, 15:59:17 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:17 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:17 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003400.TIF)...

3/9/2009, 15:59:20 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003400.TIF, page 1): Check the recognition languages used for auto detection or specify the correct language manually.

3/9/2009, 15:59:21 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:21 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:21 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003500.TIF)...

3/9/2009, 15:59:29 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:29 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:29 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003600.TIF)...

3/9/2009, 15:59:35 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:35 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:35 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003700.TIF)...

3/9/2009, 15:59:41 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:41 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:41 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003800.TIF)...

3/9/2009, 15:59:43 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:44 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:44 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0003900.TIF)...

3/9/2009, 15:59:45 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:45 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:45 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004000.TIF)...

3/9/2009, 15:59:50 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:50 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:51 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004100.TIF)...

3/9/2009, 15:59:58 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 15:59:58 No export errors occurred.

3/9/2009, 15:59:58 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004200.TIF)...

3/9/2009, 16:00:05 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004200.TIF, page 1): Reduce scanning brightness to make the image darker.

3/9/2009, 16:00:31 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:31 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:31 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004300.TIF)...

3/9/2009, 16:00:34 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:34 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:34 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004400.TIF)...

3/9/2009, 16:00:37 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:38 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:38 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004500.TIF)...

3/9/2009, 16:00:41 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:42 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:42 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004600.TIF)...

3/9/2009, 16:00:46 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:47 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:47 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004700.TIF)...

3/9/2009, 16:00:51 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:52 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:52 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004800.TIF)...

3/9/2009, 16:00:53 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:53 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:54 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0004900.TIF)...

3/9/2009, 16:00:55 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:55 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:55 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005000.TIF)...

3/9/2009, 16:00:57 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:57 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:57 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005100.TIF)...

3/9/2009, 16:00:59 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:00:59 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:00:59 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005200.TIF)...

3/9/2009, 16:01:01 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005200.TIF, page 1): Increase scanning brightness to make the image lighter.

3/9/2009, 16:01:02 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005200.TIF, page 1): Check the recognition languages used for auto detection or specify the correct language manually.

3/9/2009, 16:01:03 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:03 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:03 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005300.TIF)...

3/9/2009, 16:01:05 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:05 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:05 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005400.TIF)...

3/9/2009, 16:01:09 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:10 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:10 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005500.TIF)...

3/9/2009, 16:01:13 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005500.TIF, page 1): Check the recognition languages used for auto detection or specify the correct language manually.

3/9/2009, 16:01:14 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:14 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:14 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005600.TIF)...

3/9/2009, 16:01:16 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:16 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:16 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005700.TIF)...

3/9/2009, 16:01:19 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:19 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:19 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005800.TIF)...

3/9/2009, 16:01:20 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005800.TIF, page 1): There are no objects to recognize on this page: there are no text, table or barcode areas.

3/9/2009, 16:01:20 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:20 No export errors occurred.

3/9/2009, 16:01:20 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0005900.TIF)...

3/9/2009, 16:01:26 Saving results started (1 pages).

3/9/2009, 16:01:26 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:26 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006000.TIF)..  
3/9/2009, 16:01:29 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:01:29 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:29 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006100.TIF)..  
3/9/2009, 16:01:34 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:01:34 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:34 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006200.TIF)..  
3/9/2009, 16:01:41 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:01:41 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:41 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006300.TIF)..  
3/9/2009, 16:01:44 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:01:44 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:44 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006400.TIF)..  
3/9/2009, 16:01:47 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006400.TIF, page 1): There are no objects to recognize on this page: there are no text, table or barcode areas.  
3/9/2009, 16:01:47 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:01:48 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:48 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006500.TIF)..  
3/9/2009, 16:01:53 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:01:53 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:01:53 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006600.TIF)..  
3/9/2009, 16:02:01 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006600.TIF, page 1): Increase resolution to improve recognition accuracy of small text.  
3/9/2009, 16:02:05 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:02:06 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:02:06 Processing image (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006700.TIF)..  
3/9/2009, 16:02:14 Warning (C:\Documents and Settings\deusmar\Desktop\IPEN SÃO PAULO\L0000120\0006700.TIF, page 1): Increase resolution to improve recognition accuracy of small text.  
3/9/2009, 16:02:17 Saving results started (1 pages).  
3/9/2009, 16:02:17 No export errors occurred.  
3/9/2009, 16:02:17 Completed.

-----  
Pages processed: 67.  
Recognition time: 0 hours 6 minutes 35 seconds.  
Errors/Warnings : 0/12.  
Uncertain characters: 5 % (4065/87036).  
=====