

Adelbani Braz da Silva \*\*  
Paulo Cyro Baptista Escodino \*\*  
Antônio Cláudio Foscolo Nery \*\*\*

# Estimulação de poços tubulares por meio de explosivos, no KARST da Região do JAIBA, Norte do Estado de Minas Gerais.

## R E S U M O

Foram realizadas experiências em sete poços localizados no "karst" da região do Jaiba, norte de Minas Gerais, com objetivo de testar a aplicação de explosivos na estimulação de poços perfurados em rochas carbonáticas duras, bem como definir uma metodologia simples e econômica. O explosivo empregado foi a gelatina 60% e como iniciador da explosão o cordel detonante, acoplado a um reforçador "booster" para aumentar a velocidade inicial de detonação. A gelatina possuía uma razão linear de carregamento máxima de aproximadamente 20kg/m, permitindo aplicar até 80kg por fenda profunda e 40 kg por fenda mais superficial. O confinamento do explosivo foi realizado pelo peso da própria água do poço. Dos sete poços testados - quatro tiveram as suas vazões específicas aumentadas entre 103 e 312%, um não teve variação na vazão específica e os dois restantes tiveram suas vazões diminuídas por problemas de desenvolvimento após a detonação. A estrutura geológica, fraturamento original, dureza da rocha, proximidade de zonas com rochas decompostas, quantidade de explosivos e outros fatores devem ter influenciado nesses resultados. Aumentos espetaculares de vazão não devem ser esperados com a estimulação de poços utilizando-se explosivos porque este aumento dependerá da interconexão das fraturas pré-existentes na rocha com o diâmetro do poço criado pela detonação. Em geral a estimulação traz benefícios aumentando a vazão e é mais econômica do que a perfuração de novos poços, apesar de que não raros serem os resultados negativos devido ao uso inadequado de alguns tipos de explosivos, a um carregamento mal posicionado ou ainda a um dimensionamento insuficiente, da carga de explosivo.

\* Trabalho realizado com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq.

\*\* Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC.

\*\*\* Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG.

INTRODUÇÃO

A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, está realizando uma série de estudos e pesquisas hidrogeológicas na região cárstica do Jaíba, ao norte do Estado de Minas Gerais, que visam avaliar e comparar diversas técnicas de prospecção e exploração de água subterrânea, neste tipo particular de aquífero.

No âmbito desses estudos, foram realizadas pesquisas de estimulação de poços tubulares utilizando-se explosivos. O objetivo dessas pesquisas era o de testar a aplicação desse tipo de estimulação nos poços perfurados em rochas carbonáticas duras, bem como o de definir uma metodologia simples, econômica e aplicável às condições da região.

A utilização de explosivos em poços é uma técnica mais utilizada nas explorações de campos petrolíferos e bem pouco empregada para água subterrânea, talvez pela frequência de insucessos obtidos decorrente do seu uso indevido ou pelas dificuldades legais do manejo de explosivos.

Em geral se reconhece que a estimulação de poços traz benefícios e permite aumentar a vazão dos poços de modo mais econômico que a perfuração de outros novos, apesar de que não são raros os casos de resultados negativos devido ao uso inadequado de alguns tipos de explosivos, a um carregamento mal posicionado ou ainda a um dimensionamento insuficiente da carga de explosivos.

Neste trabalho descreve-se a metodologia utilizada na estimulação de sete poços tubulares, as dificuldades encontradas e os resultados obtidos. Esses poços testados foram perfurados e reabertos pelo CETEC através da Mecar-Mecanização Rural Ltda e pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas-DNOCS, seccional de Montes Claros (MG).

METODOLOGIA

As etapas dos trabalhos desenvolvidos para a estimulação dos poços foram basicamente as seguintes:

- Verificação da capacidade de produção dos poços antes da estimulação;
- Detecção das diversas entradas de água dentro do poço através de uma perfilagem com traçador químico;
- Detonações localizadas nos trechos com entradas de água;
- Reabertura e desobstrução do poço após a detonação;
- Desenvolvimento do poço;
- Verificação da capacidade de produção do poço depois da estimulação;
- Perfilagem do poço com traçador químico para verificação do surgimento de novas entradas de água.

Para a verificação da capacidade de produção dos poços foram realizados testes de bombeamento de curta duração a vazão constante e com observação da variação do nível d'água no poço bombeado. Todos os poços foram bombeados pelo sistema "air lift", por um período de, na maioria dos casos, 3 horas. Após este bombeamento foram observadas as recuperações dos níveis d'água desses poços até a volta ao nível estático de antes do início do teste. As medidas de vazão foram efetuadas pelo método volumétrico, utilizando-se como reservatório um tambor aferido de 220 litros. Os níveis d'água foram medidos com medidores elétricos de fita. Não foi possível a realização de testes escalonados com diferentes vazões porque o equipamento disponível não era adequado para este tipo de ensaio. Os testes escalonados seriam importantes para comparar as perdas de carga no poço antes e depois de sua estimulação.

A detecção das entradas d'água no poço foi realizada através do método de perfilagem de poços, desenvolvido pelo CETEC que utiliza como traçador o cloreto de sódio (NaCl). A técnica experimental está baseada na marcação, com traçador (cloreto), de toda a coluna de água do poço de maneira uniforme. A marcação é feita da seguinte forma:

a) Uma mangueira de plástico de seção conhecida é introduzida até o fundo do poço, sendo então preenchida com a solução concentrada (NaCl), até o nível piezométrico. A mangueira leva no seu extremo inferior um lastro que ajuda a descida.

b) Quando a mangueira é retirada lentamente, a solução fica distribuída uniformemente ao longo da coluna de água.

Uma vez realizada a marcação da coluna de água, são obtidos perfis verticais de condutividade por meio de detector, o qual se desloca através desta coluna em intervalos regulares. A frequência dos perfis depende da magnitude do fluxo existente. Logicamente, a concentração do traçador diminui com o tempo nos trechos do poço que têm fluxo. Quando não existe fluxo, a concentração permanece invariável durante longos períodos de tempo.

Este procedimento experimental, para a detecção de fluxos horizontais, proporciona também uma indicação inequívoca da existência de fluxos verticais e da magnitude aproximada dos mesmos. Quando se efetua a marcação de toda a coluna de água em um poço que tem fluxo vertical, observa-se uma diminuição progressiva do traçador, começando pelo trecho em que ocorre a entrada de água terminando no trecho onde se produz a saída. Os sucessivos perfis de condutividade tomam uma forma típica, que indicam claramente a presença de fluxo vertical.

As estimulações de poços foram feitas através de detonações de explosivos nas diferentes entradas d'água detectadas. Como normalmente os poços apresentavam mais de uma entrada d'água o carregamento do explosivo era realizado com diferentes estágios. Estes estágios eram colocados separadamente entre si, nas diversas profundidades, através de uma corda de sisal, previamente medida, de maneira que as cargas fossem dispostas nos trechos onde existiam entradas de água no poço. Após a colocação dos estágios de explosivos, nas profundidades pré-estabelecidas, era realizada a detonação. A figura 1 mostra um croquis do esquema de carga - mento de explosivo de um poço.

Empregou-se como explosivo a gelatina 60% marca BRAGEL CB de fabricação da EMINEX (Minas Gerais), embaladas em salsichas plásticas com 140 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. Como iniciador da detonação foi utilizada a espoleta elétrica diretamente conectada na gelatina ou o cordel detonante (com velocidade de propagação de 7000m/s), envolvendo as salsichas de explosivos. Para aumentar as velocidades iniciais de detonação foi utilizado um reforçador "booster" para iniciar a explosão. Estes "boosters" eram colocados em cada estágio de explosivo dentro do poço em contato direto com o cordel detonante. Foi utilizado o "booster" marca THOREX-3 de fabricação da DU PONT.

Após a detonação o poço fica obstruído principalmente na aqueles trechos onde foram colocados os estágios de explosivos. Parte das rochas da parede do poço é totalmente pulverizada e outra parte transformada em material detritico solto de diferentes tamanhos, chegando a pedaços com até 10 cm de comprimento. Assim a etapa seguinte é a reabertura e desobstrução do poço. Esta etapa foi realizada com perfuratriz a percussão utilizando-se o trépano e a caçamba.

Depois de reabertos, os poços foram submetidos a um intenso desenvolvimento da seguinte maneira:

- a) super-bombeamento com ar comprimido durante 2 a 3 horas;
- b) injeção de ar comprimido diretamente nas paredes do poço, durante um período de 6 a 10 horas, naqueles trechos onde foram colocados os explosivos, para soltar o material fino impregnado nas fraturas;
- c) nova detonação, com pequena carga de explosivo (1 a 2 kg de gelatina), para desalojar as partes fraturadas do poço que por ventura estivessem em equilíbrio instável;
- d) colocação do gêlo sêco para limpeza da zona fraturada com a retirada dos materiais finos de preenchimento das fraturas;
- e) super-bombeamento com ar comprimido até a completa limpeza do poço.

Para verificar a variação da produtividade dos poços após a estimulação foram realizados novos testes de bombeamento utilizando-se a mesma metodologia e o mesmo equipamento empregado antes da detonação. Os tempos de bombeamento também foram os mesmos dos testes anteriores. Assim foi possível comparar as capacidades de produção dos poços antes e depois das estimulações.

Finalmente, estava prevista a perfilagem dos poços com traçador químico após a estimulação, para verificar o surgimento de novas entradas d'água no poço ou mesmo estudar o comportamento das existentes. Infelizmente no primeiro poço que foi perfilado o equipamento danificou-se e não foi possível recuperá-lo em tempo hábil.

#### PARÂMETROS DE CARREGAMENTO

A ação de explosivos no poço é consequência das transformações químicas violentas e rápidas após a detonação, que resultam na liberação de grande quantidade de energia em reduzido espaço de tempo. Esta energia é suficiente para fraturar a rocha do poço que está diante do explosivo ou ao longo da linha de menor resistência da rocha. Num furo suficientemente adensado um explosivo pode produzir pressão de até 100.000 atmosferas e energia superior a 25.000 MW. A maior parte desta energia provém do grande volume de gases produzidos pela explosão.

Quando um explosivo detona ocorrem simultaneamente e em rápida sucessão, uma série de fenômenos de natureza dinâmica e estática, destacando-se as seguintes:

- a) Verificada a explosão, a onda de choque percorre a rocha e uma velocidade de 5000-8000 m/s;
- b) O diâmetro inicial do furo é alargado para cerca do dobro;
- c) A onda de choque, ao se deslocar do centro para a periferia produz na rocha tensões radiais e tensões tangenciais. Num certo ponto, ambas as tensões sofrem variações, que vão de um máximo positivo (compressão) a um máximo negativo (distensão) e a seguir anulam-se. As tensões radiais não produzem efeito sensível e visível na rocha. As tensões tangenciais porém, quando são de distensão, produzem fendilhamento segundo raios que partem do centro do furo;
- d) Até este estágio a ação do explosivo foi apenas dinâmica. A ação estática se faz sentir pela pressão dos gases que se estão formando dentro do furo. Estes têm pressão elevadíssima e empurram as rochas para frente, servindo-se das facilidades provocadas pela onda de choque, fissurando-a radialmente. Com a ação deste empuxo vencem-se as resistências internas e dá-se a fragmentação.

Pelo fato de que estes fenômenos ocorrem em um curto espaço de tempo e para um melhor aproveitamento dessa soma fabulosa de energia liberada pelo explosivo, deve-se considerar alguns "parâmetros de carregamento" durante os trabalhos de estimulação de poços, dos quais destacam-se os seguintes:

- a) Tipos de explosivos;
- b) Iniciadores;
- c) Carga;
- d) Acoplamento;
- e) Confinamento;
- f) Efeitos dos explosivos.

#### TIPOS DE EXPLOSIVOS

Uma melhor estimulação do poço é obtido através do maior fraturamento possível da rocha. Para isto é aconselhável usar um explosivo rápido, potente e resistente a umidade. A gelatina explosiva (Blasting gelatine) 93% é o explosivo mais adequado para esse tipo de trabalho pela sua ação penetrante, certeza de propagação e potência. Além desse tipo, a gelatina sismográfica de alta velocidade é recomendada em muitos casos. No entanto estes explosivos são perigosos de manipular e de difícil obtenção nos locais de trabalho. A gelatina explosiva 60% é a mais adequada devido a segurança no seu manejo. Com ela é possível executar um trabalho satisfatório, desde que a coluna de água no poço não exceda uns 60 metros de altura.

Outros tipos de explosivos também podem ser utilizados para a estimulação de poços, tais como: nitroglicerina, dinamite, trinitroglicerina e lamas explosivas (Custódio, Llamas, 1974; Walton, 1970).

#### INICIADORES

A detonação da carga pode ser feita simples ou elétrica, contudo por motivos de segurança, deverá ser dada preferência ao uso do cordel detonante.

Para iniciar a explosão eletricamente deve-se usar espoletas elétricas submarinas que são mais impermeáveis e suportam melhor a pressão da coluna de água do poço. Deve-se considerar que cada 10 cm<sup>2</sup> de coluna de água no furo exercem uma pressão de 0,01 kg/cm<sup>2</sup>. Conseqüentemente, uma coluna de água de 30 m sobre uma carga de explosivos exercerá uma pressão de 3 kg em cada centímetro quadrado da superfície da carga. É essa pressão que deve suportar a espoleta para não ser danificada pela umidade. Como a pressão pode também tender a expulsar a nitroglicerina dos cartuchos (se for usado este explosivo) é importante detonar o mais cedo possível depois de feito o carregamento.

Além da vantagem de segurança o cordel produz uma iniciação simultânea nos diversos estágios de carga dentro do poço. A detonação do cordel é feita fora do espaço utilizando-se espoleta comum e estopim.

Como se sabe a iniciação de qualquer explosivo é alcançada pela transferência da onda de choque do iniciador. A temperatura e a pressão produzidas pelo iniciador devem ser desenvolvidas em um período de tempo relativamente curto. Por isso, quanto maior for a pressão de detonação, mais rapidamente a carga do material explosivo alcançará sua velocidade de detonação característica e começará provendo a máxima possível libertação de energia. Assim para obter-se maiores velocidades iniciais de detonação aconselha-se colocar, em cada estágio de carga dentro do poço um reforçador de iniciação ligado ao cordel detonante. Estes "reforçadores" ou "boosters" têm alto poder de detonação e altíssima pressão de detonação, extremamente necessária para iniciar o explosivo na sua velocidade máxima e, em consequência liberar num curto intervalo de tempo todas as suas energias. Por outro lado,

os "boosters" são embalados de forma a ter resistência à água e de serem pouco sensíveis ao atrito e ao choque, podendo assim serem usados na estimulação de poços.

#### CARGA DE EXPLOSIVO

A quantidade de explosivos que deve ser utilizada no poço depende essencialmente do diâmetro do poço, natureza da rocha, estado de fraturamento original da rocha, profundidade de detonação abaixo do nível da água e efeito desejado.

Considerando-se dois furos de diâmetros diferentes (figura 2.a) carregados com o mesmo explosivo e em ambos os casos ocupando toda a seção do furo, tem-se, após a detonação, um maior número de fissuras, de maior comprimento, no furo com maior quantidade de carga. Um aumento do diâmetro da carga implica até certo ponto, em um aumento da velocidade, havendo, portanto, um maior desenvolvimento da pressão de detonação, o que explica razoavelmente tal fenômeno.

Quanto à natureza da rocha e ao seu estado de fratura original a estimulação com explosivos deve ser aplicada em rocha dura em que a permeabilidade dominante seja por fissuração. Pode ser nociva em materiais que contenham nódulos ou camadas de argilas, como alguns arenitos, calcários margosos e basaltos alterados (Custódio, Llamas, 1974). No caso de calcários maciços, a sua resistência à tração é da ordem de 22 a 98 kg/cm<sup>2</sup> e a compressão de 358 a 1827 kg/cm<sup>2</sup>.

O peso da coluna de água no poço também influi no cálculo da carga de explosivo. Quanto maior for a profundidade abaixo do nível da água, maior deverá ser a carga, a fim de neutralizar o efeito do aumento da pressão hidrostática.

A gelatina utilizada neste trabalho tinha uma razão linear de carregamento máximo de aproximadamente 20 kg/m, para poço com 150 mm (6") de diâmetro. Cada salsicha de gelatina (140x600mm) tinha um peso da ordem de 12 kg. Para o carregamento dos poços foram utilizados dois critérios: o primeiro, devido ao fato de que nos poços testados as fraturas eram pequenas (da ordem de milímetros), estabeleceu-se que cada estágio de carga profunda teria um comprimento de 2 a 4 m e os ramos de 1 a 2 metros; o outro critério adotado foi o de que as maiores quantidades de explosivos seriam colocadas naquelas fendas que apresentaram os maiores fluxos de água.

#### ACOPLAMENTO

Acoplamento (Ac) é a relação entre o diâmetro da carga explosiva (d') e o diâmetro do furo (d), dado em percentagem, ou seja:  $Ac = (d'/d) \cdot 100$  (Figura 2.b).

Um explosivo acoplado (ou bem confinado), ou seja (Ac=100%) tem maior velocidade de detonação que o desacoplado, a menos que o explosivo seja especificamente designado para ser usado sem confinamento.

Por outro lado, o acoplamento tem uma íntima relação com as tensões de deformação na rocha. Um menor fissuramento em volta de um furo de baixo valor de acoplamento é facilmente explicado a través da análise da propagação das tensões através da rocha quando existe ou não diferença entre o diâmetro do explosivo e do furo (Cintra, 1972).

Com um acoplamento, a onda de choque produz uma forte tensão de compressão radial nas paredes do poço (figura 2.b). Se o acoplamento é baixo a tensão inicial da onda de compressão é pequena e sofre uma defasagem podendo alcançar uma certa distância sem atingir a tensão máxima do caso anterior.

A figura 2.c ilustra a influência da simetria de uma carga em relação as paredes do poço em material homogêneo e isotrópico. Em materiais anisotrópicos e heterogêneos as irregularidades podem mudar inteiramente a direção das fendas.

#### CONFINAMENTO

O confinamento é o obstáculo que o meio oferece à expansão dos gases gerados na explosão. Nas detonações subaquáticas não há necessidade de tamponamento algum, desde que a capa de água que cobre o explosivo tenha alguns metros de altura (3 a 5 metros). Além disso, com explosivos de velocidades de detonação adequadas que sejam indiferentes à umidade ou estejam perfeitamente impermeabilizados, o tamponamento com a água supera a qualquer outro, pois embora a resistência de água ao arranque seja menor que a de areia compactada, o hermetismo, que também é um dos fatores do tamponamento, não pode ser superado por nenhum outro tipo de obstrução.

#### EFEITOS DOS EXPLOSIVOS

O resultado da detonação do explosivo no poço é o aumento de seu diâmetro real e o aparecimento de fraturas radiais, nos trechos carregados, que podem interconectar fissuras pré-existentes e aumentar o diâmetro efetivo do poço.

Ao redor da explosão se cria um espaço vazio (V), que varia de 10 a 250 vezes o volume do explosivo (Vp) com uma área de destruição que varia de 2000 a 6000 vezes o valor de Vp e que pode aumentar de 1,5 se houver fraturas prévias. O volume do espaço vazio (V) pode ser calculado pela seguinte equação: (Custódio, Lima, 1974).

$$V = 0,5.C.K.q.m.n$$

onde:

- V = volume vazio criado pela explosão no poço (m<sup>3</sup>)
- C = quantidade de explosivos (kg)
- K = coeficiente que caracteriza a potência do explosivo (K = 1,2 para gelatina)
- q = coeficiente de dureza do material, tanto menor quanto mais duro (0,5 para calcário)
- m = coeficiente de folga do explosivo no poço
- n = coeficiente de embalagem do explosivo.

O raio real do poço, após a explosão será:

$$r_p = \sqrt{\frac{V}{\pi}}$$

e o raio efetivo

$$r_e = \sqrt{\frac{Vf}{\pi}}$$

onde Vf é o volume da rocha fraturada pelo explosivo.

O aumento do diâmetro do poço acarreta, normalmente, um aumento de 10% na sua vazão específica. A remoção do material fino (argilas, siltes) das fraturas e das paredes do poço aumentam também a vazão específica. Este aumento é em média de 20% (Walton, 1970). No entanto o maior aumento será decorrente de interconexão da zona fraturada pelo explosivo com as fraturas pré-existentes no aquífero.

#### TRABALHOS REALIZADOS

Os trabalhos de estimulação foram realizados em sete poços perfurados em rochas carbonáticas do Eo-cambriano do Grupo Bambuí.

No quadro I estão as principais características destes

poços. No quadro II encontram-se um resumo dos trabalhos realizados, de acordo com a metodologia anteriormente descrita.

Nas figuras de 3 a 10 encontram-se os perfis dos poços obtidos com traçador químico.

No quadro III encontram-se além das principais características dos poços, as profundidades das fendas detectadas nas perfilagens e a distribuição das cargas explosivas dos diversos trechos carregados nos poços.

#### RESULTADOS OBTIDOS

No quadro IV encontram-se as variações das vazões específicas dos poços após a estimulação com explosivos.

No poço MA-651, após 41 minutos de teste de bombeamento para avaliar a sua vazão depois da estimulação, houve um desmoronamento de um material argiloso misturado com areia grossa a cascalho que obstruiu o poço. Tentou-se então reabrir e desenvolver o poço novamente mas não foi possível. Admitiu-se que este fato ocorreu devido a que o espaço vazio criado pela detonação atingiu a parte detrítica de preenchimento da dolina onde este poço estava locado e consequentemente todo este material entrava para o poço durante o seu desenvolvimento. Antes do desmoronamento o poço apresentava um acréscimo na vazão específica da ordem de 142%.

O poço MA-652 (locado na mesma dolina do MA-651) apresentou problemas na fase de desenvolvimento. Este poço só produziu água limpa, com baixa turbidez, após ser submetido a diversas e rigorosas técnicas de desenvolvimento. No entanto, apesar da boa qualidade da água a vazão do poço diminuía sensivelmente depois do seu desenvolvimento, não atingindo nem a vazão de antes da estimulação. Pode-se explicar este fato de duas maneiras. A primeira seria admitir que o aquífero, naquele local, seria de baixa transmissividade (dolina preenchida por argila) e de reserva limitada (aquífero com pequena recarga e de pouca extensão). Esta reserva teria sido exaurida nas fases de desenvolvimento através dos superbombeamentos a que o poço foi submetido. A segunda hipótese seria a de que a argila da dolina preencheu as fraturas ao redor do poço durante o desenvolvimento e consequentemente não permite a passagem de água para o poço.

O poço MZ-208 foi desobstruído após a detonação mas não foi desenvolvido. Por outro lado na completação desse poço foram utilizados (na zona decomposta permeável) tubos perfurados com pouca área livre. A vazão específica obtida de 0,011 l/s/m, não é representativa.

No quadro V encontram-se os prováveis valores dos diâmetros criados e de influência dos diversos trechos dos poços após a estimulação com explosivos.

Convém salientar que todos os revestimentos metálicos, que não estavam bem cimentados, foram atirados para fora do poço durante a explosão e que os revestimentos de PVC dos poços MA-656 e MA-033 foram totalmente destruídos.

#### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De uma maneira geral os resultados obtidos com a estimulação de poços perfurados em rochas carbonáticas foram promissoras. As conclusões que podem ser destacadas são as seguintes:

- o carregamento do explosivo sempre deve coincidir com as entradas de água no poço;
- a iniciação com cordel detonante e "booster" é a mais indicada pela segurança e pela sua velocidade de detonação;

- a estimulação com explosivos não deve ser feita em rocha mole ou em rocha dura próxima a zonas decompostas;
- os revestimentos de PVC são totalmente destruídos pela explosão;
- os revestimentos metálicos devem estar bem cimentados;
- os poços depois de reabertos devem ser submetidos a um intenso desenvolvimento através de super-bombeamento, injeção de ar nos trechos detonados, detonação com pequena carga e limpeza com gêlo sêco.

É aconselhável que após o desenvolvimento do poço seja feita uma perfilagem com traçador químico para verificar o aparecimento de novas entradas d'água e uma perfilagem "caliper" para observar o diâmetro criado pelo explosivo. É importante a realização de testes escalonados com diferentes vazões, antes e depois da estimulação para se estudar as perdas de cargas de circulação nas imediações do poço.

No caso da estimulação não provocar um aumento sensível na vazão do poço pode-se tentar uma nova estimulação com a colocação de maiores cargas nos mesmos trechos anteriormente detonados.

Para se obter um maior raio de influência de um poço em uma determinada direção, deve-se perfurar um piezômetro alinhado na direção desejada. Este piezômetro servirá de zona de alívio das ondas de choque e facilitará a ruptura da rocha. Outros fatores poderão influenciar no aumento do raio de influência criado por explosivo, tais como: estrutura geológica, fraturamento original da rocha, dureza da rocha e outros. É aconselhável um estudo para definir estes diversos fatores e a influência de cada um deles nos trabalhos de estimulação de poços.

Recomenda-se também um estudo para a criação de reservatórios de águas subterrâneas utilizando-se explosivos em diversos poços perfurados em uma área com geologia conhecida.

Vale ressaltar que não devem ser esperados resultados espetaculares com a estimulação de poços com explosivos. Normalmente as fraturas produzidas, que aumentam o diâmetro efetivo do poço, são pouco extensas.

Como foi visto neste trabalho, o maior aumento da vazão do poço será decorrente da interconexão dessas fraturas com as pré-existentes no aquífero. Se o poço está alimentando por poucas fraturas abertas ou se as fraturas estão colmatadas por argila provavelmente o aumento da produtividade desse poço será pequena. Por outro lado se o fraturamento criado no poço atingir canais de circulação de água ou zonas intensamente fraturadas pode-se esperar um sensível aumento na vazão do poço. Em poço totalmente seco não é aconselhável a estimulação.

Se o que se busca é o aumento da produtividade com um mínimo de custos, é fundamental uma seleção prévia dos poços a serem estimulados. Devido à anisotropia do sistema aquífero, deve ser verificada nas vizinhanças dos poços, a existência de estruturas potencialmente portadoras de água, ou seja, a possibilidade de que condutos hidráulicos importantes possam ser interligados com o poço através das novas fraturas produzidas pela detonação. Vale ressaltar também que nos aquíferos fraturados normalmente é baixo o coeficiente de armazenamento e que a estimulação de poços apenas influi na permeabilidade ao redor do poço. Assim pode-se melhorar essa permeabilidade e o poço não aumentará vazão devido ao baixo coeficiente de armazenamento.

Outros aspectos importantes nesta seleção referem-se a detalhes da construção de poços, tais como: verticalidade, inter-

valo revestido, a natureza do revestimento, existência de filtros e outros, que poderiam causar problemas nas operações de limpeza e recuperação.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos o empenho e a ajuda que recebemos para execução dos trabalhos de campo do Sr. Francisco Pedro Neto - Chefe do Setor de Perfuração de Poços do DNOCS e do Dr. Manoel Nazareno Procópio de Moura - Diretor da MECAR-Mecanização Rural Ltda.

#### BIBLIOGRAFIA

- BENITEZ, A. - (1972) - Captacion de águas subterrâneas. 2.<sup>a</sup> Edição Editorial Dossat, Madrid, Espanha.
- CAMPBELL, M.D. e LEHR, J.H. - (1973) - Water Well Technology NWWA McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, USA.
- CINTRA, B.H. - (1972) - Desmonte escultural. Revista da Escola de Minas, Ano XXXVI, vol. XXX, nº 3, out. Ouro Preto, MG.
- CUSTÓDIO, E. e LLAMAS, M.R. - (1974) - Hidrologia Subterrânea. Vol. II, Ediciones Omega, Barcelona, Espanha.
- DU PONT DO BRASIL - (1976) - Dinamitação de Poços Perfurados para Aumento do Suprimento de Água. Brochura inédita.
- FREEZE, R.A. e CHERRY, A.J. - (1979) - Ground Water. Prentice Hall Inc. USA.
- FETTER-JR, C.W. - (1980) - Applied Hydrogeology. Editora Merril Columbus-Ohio, USA.
- IMBEL - (1975) - Curso Intensivo de Explosivos Civis. Apostila, inédita, São Paulo.
- PULIDO, J.L. - (1978) - Hidrogeologia practica. Urno S/A Ediciones, Bilbao, Espanha.
- SILVA, A.B. e ESCODINO, P.C.B. - (1980) - Desenvolvimento de um método de perfilagem de poços tubulares utilizando-se traçador químico. Anais do I Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. pp. 119-130 - Recife-PE.
- WALTON; W.C. - (1970) - Groundwater resource evaluation. McGRAW - HILL. New York, USA.

QUADRO I  
 CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS ESTIMULADOS

Nº DO POÇO	NÍVEL ESTÁTICO		NÍVEL DDM - PICO		VAZÃO		VAZÃO ESPECÍFICO		DURAÇÃO DO TESTE		PERFUNDIDADE DO POÇO		ESPESURA DE REVESTIMENTO		PROFUNDIDADE DE DAS EM TOMBOS D'ÁGUA		
	(m)	(m)	1	2	1	2	1	2	(hora)	1	2	(m)	1	2	(m)	2	
PA-033	50,0	51,00	90,00	75,23	0,600	0,895	0,0170	0,0370	3,00	3,00	184,0	184,0	12,0	12,0	12,0	12,0	54,0 73,0 86,0
PA-650	11,25	10,10	11,68	10,67	2,750	3,190	2,7900	5,6000	3,00	3,00	116,0	116,0	14,0	14,4	15,5	14,0	14,0 31,0 55,0
PA-651	22,00	25,0	30,47	30,01	1,240	2,350	0,1240	0,3000	2,00	2,00	101,0	92,0	15,0	15,0	36,0	15,0	31,0 83,0
PA-652	24,36	23,30	36,82	60,07	1,880	0,540	0,1950	0,0150	3,00	3,00	80,0	90,0	25,0	25,0	25,0	25,0	29,0 37,0 59,0 63,0 65,0 70,0 80,0
PA-656	24,09	23,87	55,00	49,65	0,220	0,860	0,0080	0,0330	1,00	1,00	64,0	70,0	27,0	27,0	27,0	27,0	25,0 34,0 36,0 41,0 64,0
PA-207	36,5	35,55	71,16	97,41	0,530	1,080	0,0169	0,0175	3,00	3,00	120,0	120,0	20,0	20,7	20,7	20,0	38,0 46,0 58,0 62,0 69,0 89,0
PA-208	13,5	12,0	69,94	85,70	1,350	0,790	0,0230	0,0110	3,00	3,00	148,0	148,0	21,0	30,0	-	30,0	21,0 50,0 69,0 75,0

 1: antes da estimulação  
 2: após a estimulação

QUADRO II  
RESUMO DOS TRABALHOS REALIZADOS

ETAPAS DE OPERAÇÃO	Q U A N T I D A D E S		O B S E R V A Ç Õ E S
	Nº de Poços	Metros	
Testes hidráulicos preliminares	7	-	18
Perfilagens com traçador químico	8	730,0	80
Carregamento e Detonação explosivos	7	44,5	-
Reabertura e recuperação de poços	7	769,0	-
Desenvolvimento com gelo seco	7	-	7
Desenvolvimento por processos clássicos	7	-	42
Testes hidráulicos finais	7	-	18

Realizada uma perfilagem após estimulação

utilizados 685 kg

utilizados 360 kg

QUADRO III - DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS EXPLOSIVAS NOS POÇOS ESTIMULADOS

POÇO Nº	PROFUNDIDADE DO POÇO (m)	CORRIMENTO DO REVESTIMENTO (m)	PROFUNDIDADE DO VEL ESTÁTICO (m)	PROFUNDIDADE DAS FENDAS DETECTADAS (m)	PROF. DOS TRENCHES CARREGADOS (m)	EXPLOSIVOS (kg)
MA-033	184,0	12,0*	50,0	54,0 73,0 86,0	54-55 72-73 85-86,5	18,0 72,0 54,0 27,0
MA-650	116,0	14,4	11,2	14,0 83,0	82-87	75,0
MA-651	92,0	15,0	22,0	31,0 55,0	30-32 54-58	36,0 72,0
MA-652	90,0	25,0	24,3	29,0 50,0 50,0 62,0 70,0 80,0	— — — 62-66 — — 75,5-80	— — — 72,0 — — 81,0
MA-656	70,0	27,0*	24,0	25,0 31,0 38,0 64,0	— — 39-41,5 59,5-64	— — 30,0 54,0
MZ-207	120,0	20,7	36,5	38,0 46,0 58,0 80,0 89,0	— — 57,5-59 60-83	— — 27,0 54,0
MZ-208	148,0	30,0	13,5	21,0 56,0 69,0 75,0	48-53 69-71	64,0 21,0
TOTAL						685,0

\* Revestimento de pvc

QUADRO IV

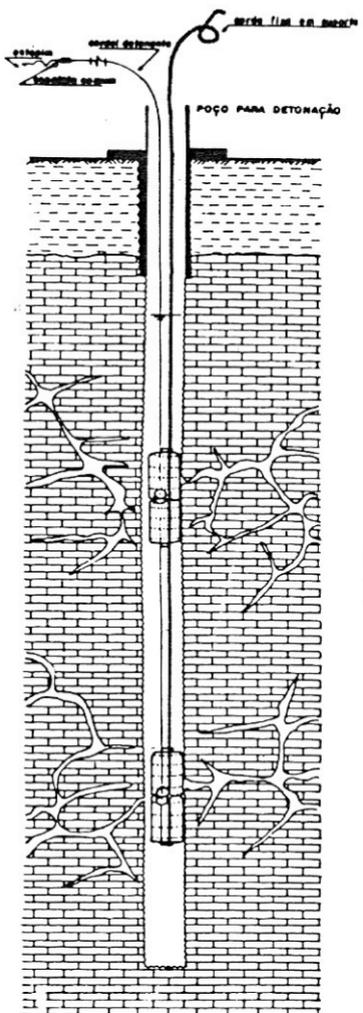
AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DOS POÇOS APÓS A ESTIMULAÇÃO

Nº DO POÇO	VAZÃO ESPECÍFICA (l/s/m)		VARIACÃO DE PRODUTIVIDADE (%)
	ANTES DA DETONACÃO	APÓS A DETONACÃO	
MA-033	0,0170	0,0370	+ 117,6
MA-650	2,7500	5,6000	+ 103,6
MA-651	0,1240	0,3000	+ 141,9
MA-652	0,1590	0,0150	- 90,6
MA-656	0,0080	0,0330	+ 312,5
MZ-207	0,0169	0,0175	+ 3,5
MZ-208	0,0230	0,0110	- 52,2

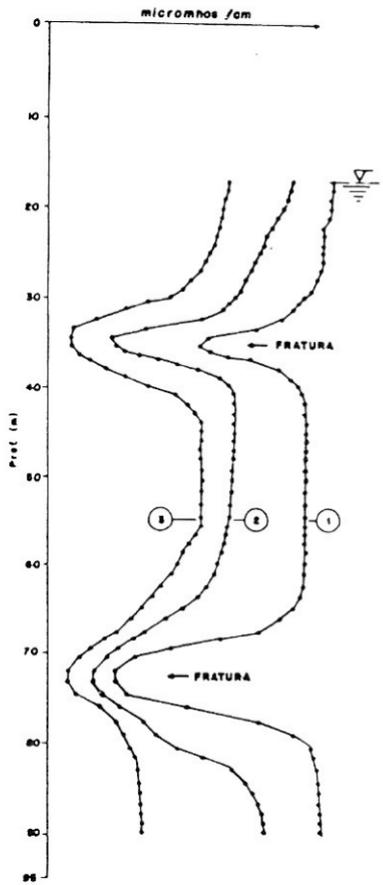
QUADRO V

VALORES PROVÁVEIS DOS DIÂMETROS CRIADOS E DE INFLUÊNCIA DOS POCOS APÓS A ESTIMULAÇÃO

Nº do Poço	Diâmetro Inicial (m)	Diâmetro Final (m)	Diâmetro criado (m)	Diâmetro de Influência (m)
MA-033	0,15	2,56	2,41	3,40
MA-650	0,15	2,26	2,11	2,15
MA-651	0,15	2,56	2,41	3,40
MA-652	0,15	2,56	2,41	3,40
MA-656	0,15	1,92	1,77	2,15
MZ-207	0,15	2,56	2,41	3,40
MZ-208	0,15	1,98	1,83	2,15



PERFILAGEM COM TRAÇADOR QUÍMICO (NaCl)

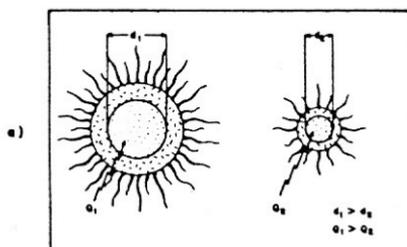


LEGENDA

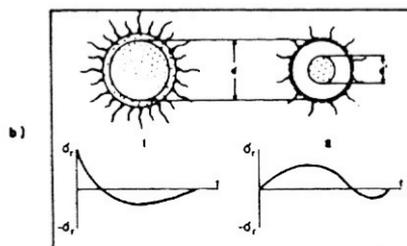
- |                     |                   |                                      |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------|
| SOLO                | FISSURAS COM ÁGUA | ENTRADA DE ÁGUA COM FLUXO HORIZONTAL |
| CALCÁRIO DECOMPOSTO | BOOSTER           | NÍVEL ESTÁTICO DO POÇO               |
| CALCÁRIO FRESCO     | CARGAS EXPLOSIVAS | 1ª MEDIDA                            |
|                     |                   | 2ª MEDIDA                            |
|                     |                   | 3ª MEDIDA                            |

CROQUIS DO CARREGAMENTO DE EXPLOSIVOS NUM POÇO

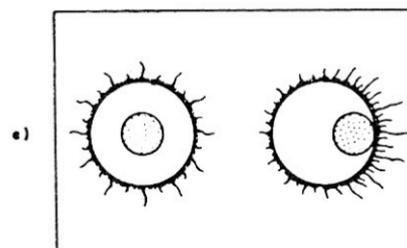
FIGURA: 1



a) Quantidade de carga



b) Acoplamento

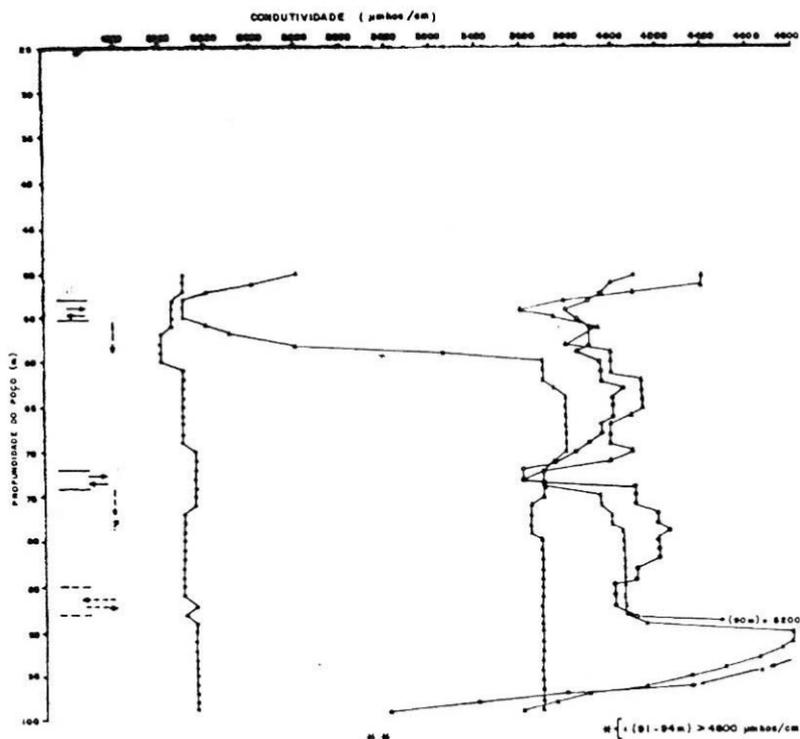


c) Simetria da carga

Fonte: Cintra (1972)

PARÂMETROS DE CARREGAMENTO DO EXPLOSIVO NO POÇO

FIGURA: 2

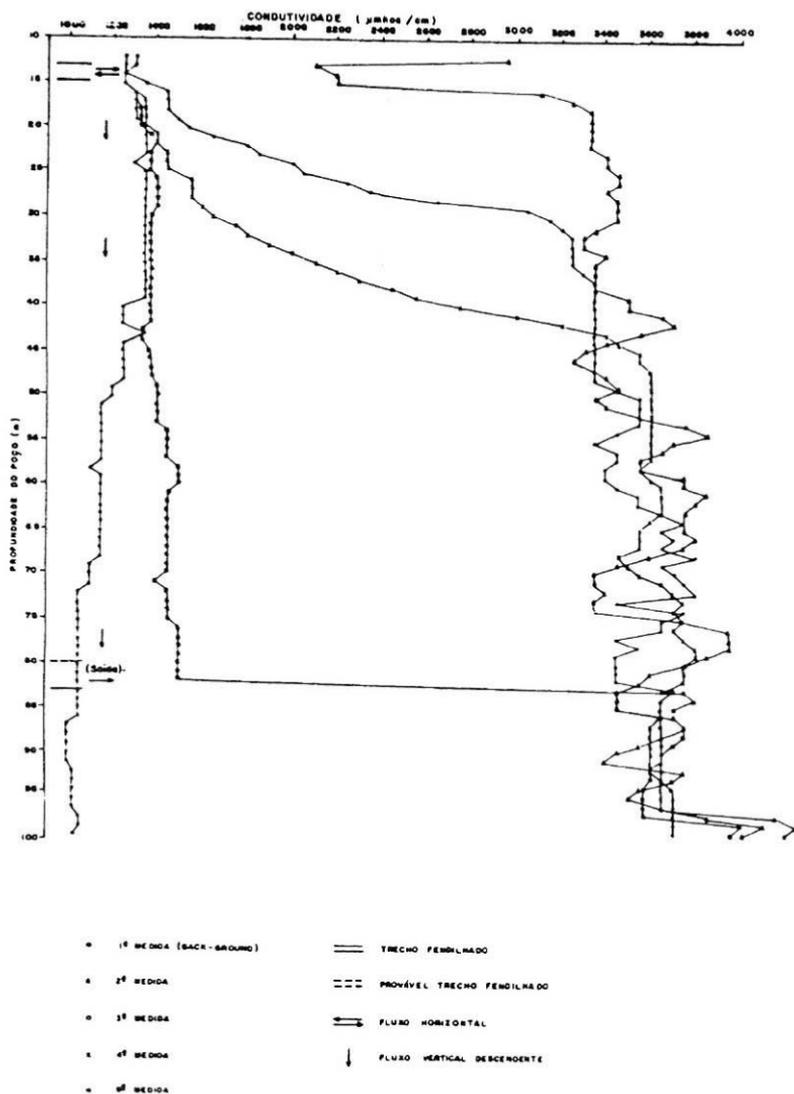


|| Efeito da diluição no poço aos 94 m.  
Cabeça trapada entre 90m e 80m

- |   |                        |         |                                     |
|---|------------------------|---------|-------------------------------------|
| o | 1ª MESSA (BACK-GROUND) | —       | TRECHO FERRILHADO                   |
| A | 2ª MESSA               | - - -   | PROVÁVEL TRECHO FERRILHADO          |
| o | 3ª MESSA               | — —     | FLUXO HORIZONTAL                    |
| z | 4ª MESSA               | - - - — | PROVÁVEL FLUXO HORIZONTAL           |
|   |                        | ↓       | PROVÁVEL FLUXO VERTICAL DESCENDENTE |

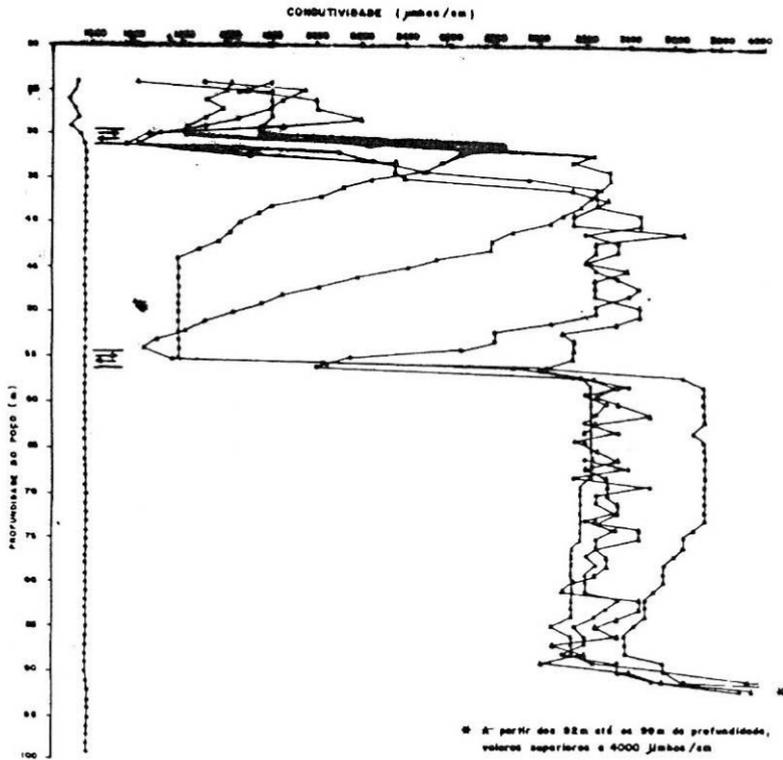
PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA-33

FIGURA 3



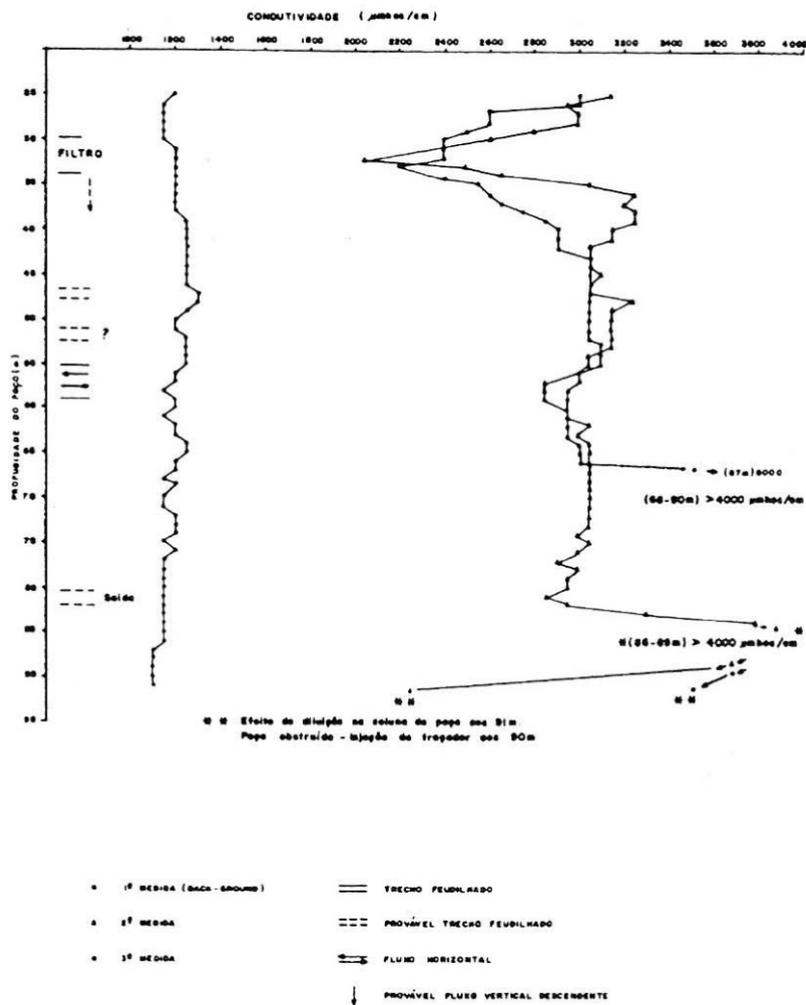
PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA-650

FIGURA 4



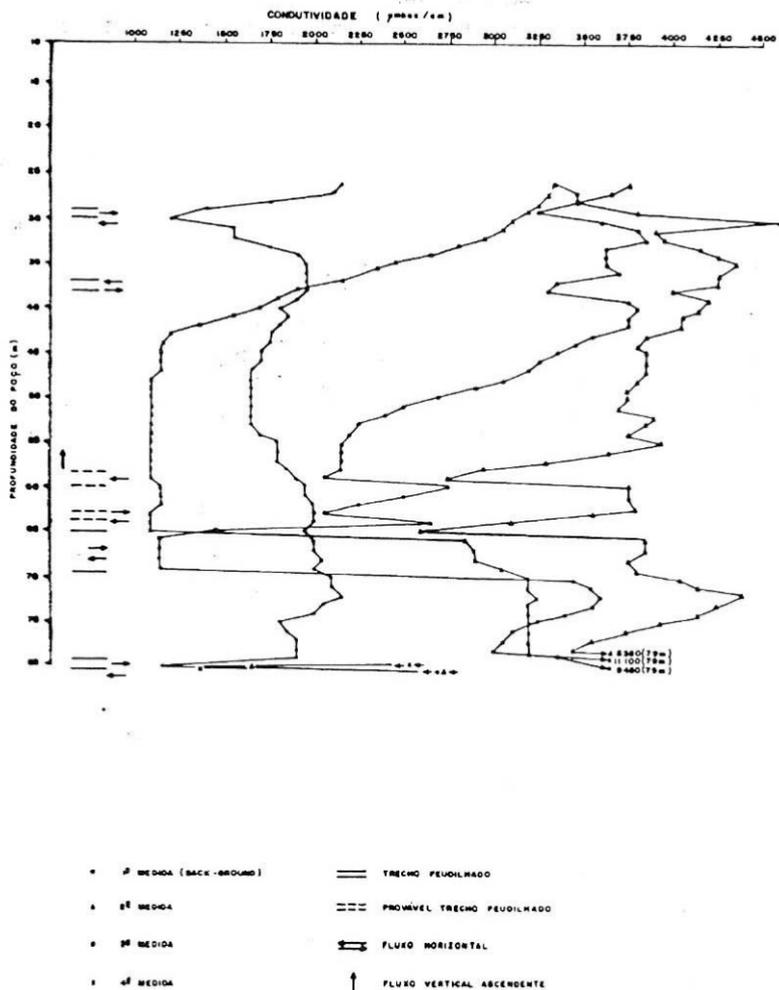
PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA - 651

FIGURA 5



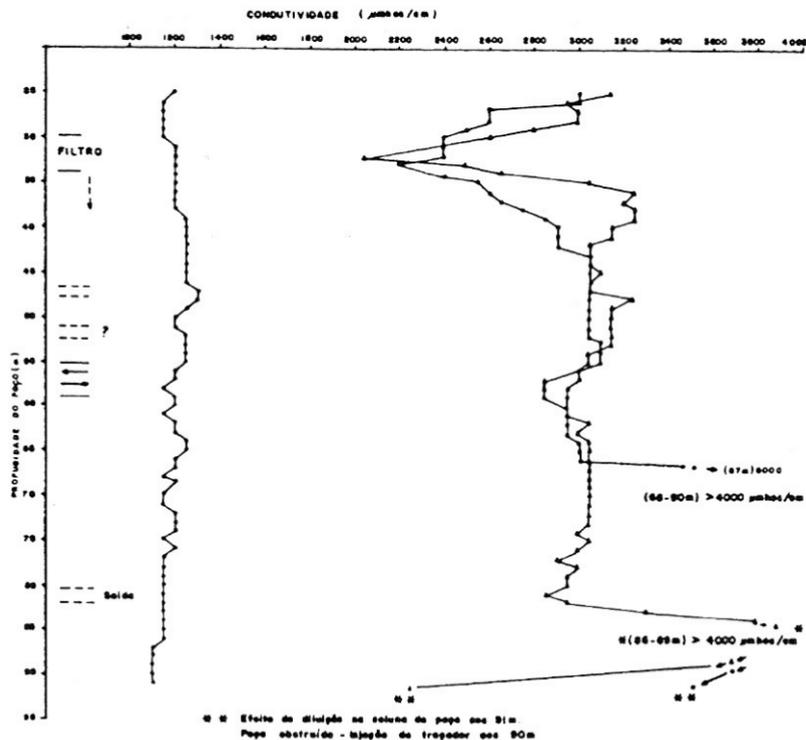
### PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA - 651

FIGURA 6



PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO - MA - 652

FIGURA: 7

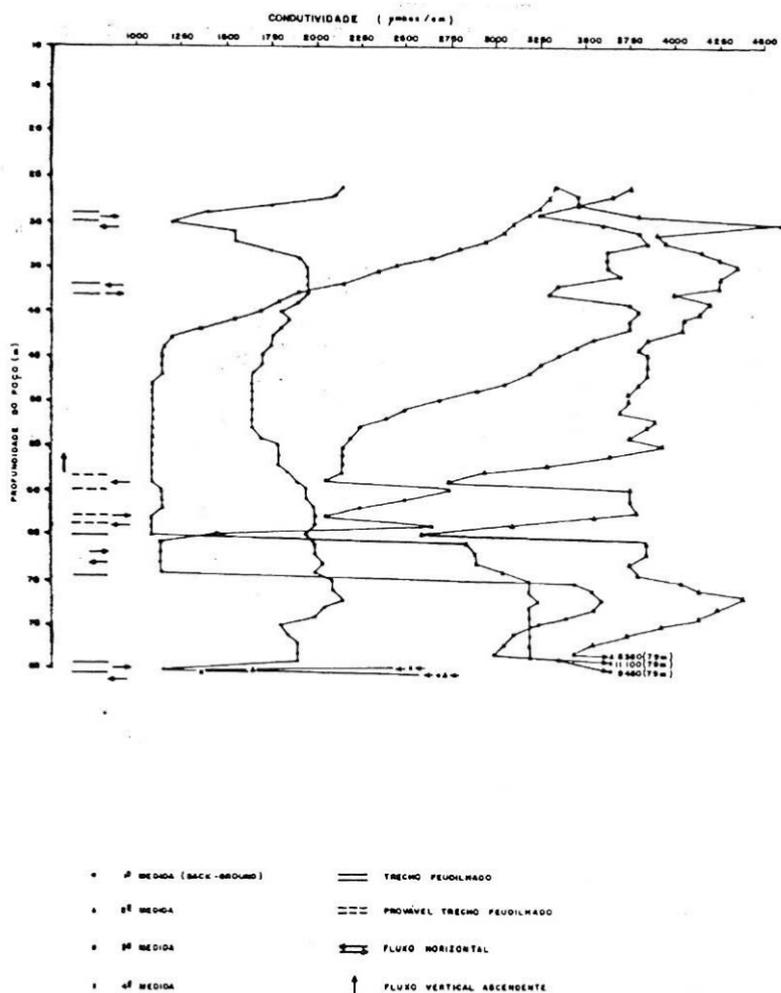


- |                            |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|
| * 1ª medição (back-ground) | ===== TRECHO FECHADO                  |
| * 2ª medição               | ----- PROVÁVEL TRECHO FECHADO         |
| * 3ª medição               | → FLUÍO HORIZONTAL                    |
|                            | ↓ PROVÁVEL FLUÍO VERTICAL DESCENDENTE |

OBS: Teste realizado após detonação

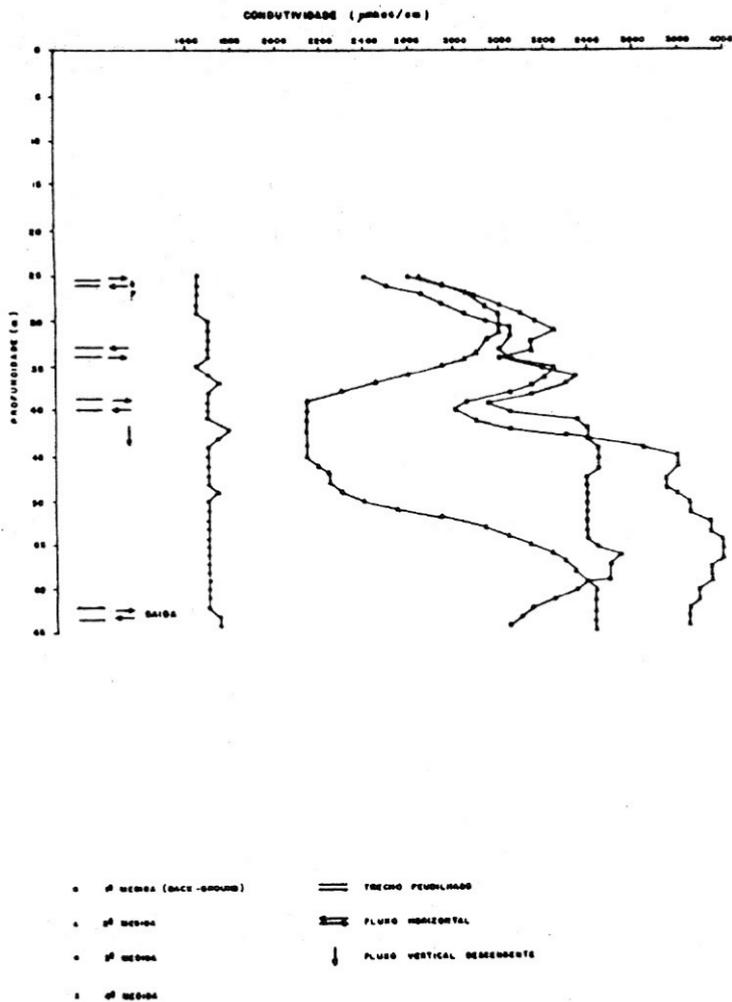
### PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA - 651

FIGURA 6



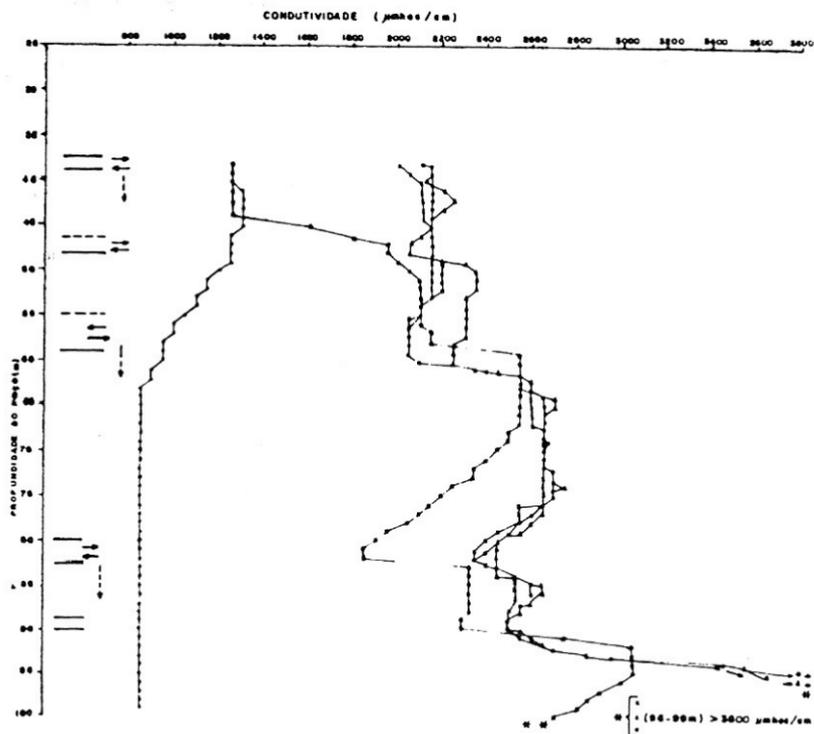
PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA-652

FIGURA 7



PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MA-656

FIGURA: 8

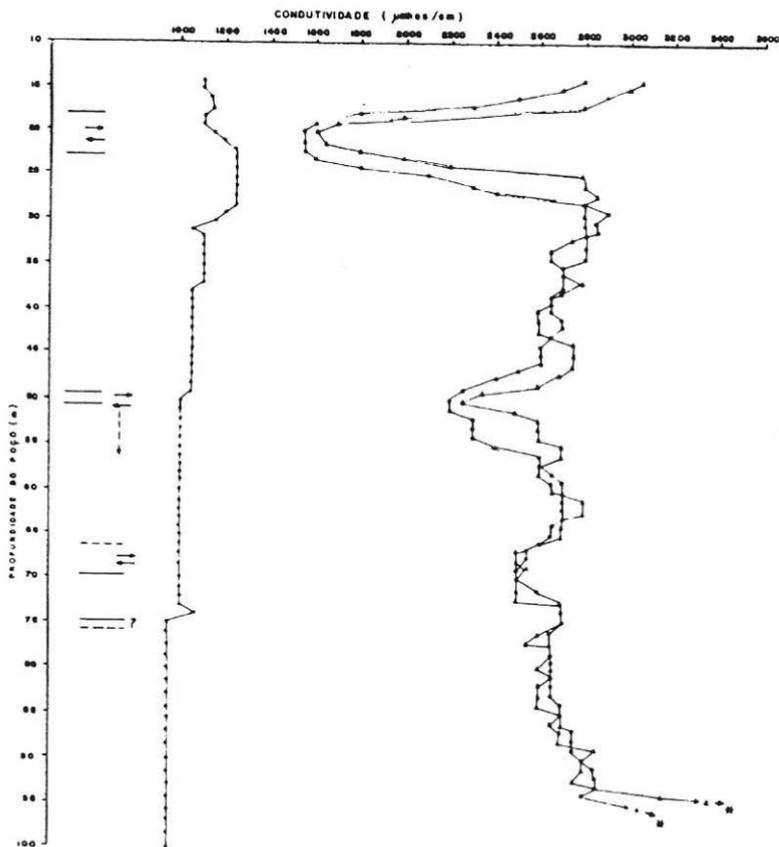


\* \* Efeito de diluição ao poço aos 99 m.  
 Coluna traçada entre 99m e 36m

- 1ª MEDIDA (BACK-GROUND)
- 2ª MEDIDA
- 3ª MEDIDA
- 4ª MEDIDA
- 5ª MEDIDA
- ==== TRECHO FENILHADO
- PROVÁVEL TRECHO FENILHADO
- ==== FLUO HORIZONTAL
- ↓ PROVÁVEL FLUO VERTICAL DESCENDENTE

PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MZ - 207

FIGURA: 9



- |                           |                                       |
|---------------------------|---------------------------------------|
| • 1ª MEDIDA (BACK-GROUND) | ==== TRECHO FENDILHADO                |
| • 2ª MEDIDA               | --- PROVAVEL TRECHO FENDILHADO        |
| • 3ª MEDIDA               | ⇌ FLUXO HORIZONTAL                    |
|                           | ↓ PROVAVEL FLUXO VERTICAL DESCENDENTE |

### PERFILAGEM QUÍMICA DO POÇO MZ-208

FIGURA 10