

FRATURAMENTO HIDRÁULICO  
PARA ESTIMULAÇÃO DE  
POÇOS DE BAIXA PRODUTIVIDADE  
PERFURADOS NO CRISTALINO  
NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

POR

CLAUDIO LUIZ REBELLO VIDAL<sup>1</sup>  
DEXPO

1993



1. Engenheiro de Perfuração, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM

## A P R E S E N T A Ç Ã O

O fraturamento hidráulico (FH), técnica bastante utilizada pela indústria petrolífera para estimulação de poços produtores de petróleo, começou a ser estudado e testado recentemente para se determinar o quanto poderia contribuir para aumentar a produtividade em poços produtores de água, perfurados no cristalino.

Este trabalho apresenta proposta para os serviços que deverão ser executados em poços perfurados no cristalino da região Nordeste do Brasil, visando estimulá-los através do fraturamento hidráulico, bem como os resultados que poderão advir a partir destas intervenções. No trabalho estão contidos os procedimentos que deverão ser executados no campo, para operacionalização do fraturamento. A duração prevista para cada intervenção, o pessoal técnico e os equipamentos necessários para a execução dos trabalhos, bem como todos os custos envolvidos também serão apresentados.

O trabalho contém ainda um resumo da técnica de fraturamento hidráulico, dos trabalhos já desenvolvidos nesta área e um anexo, que descreve resumidamente o comportamento de poços produtores perfurados em aquíferos de baixa transmissibilidade.

S U M Á R I O

F R A T U R A M E N T O H I D R Á U L I C O

- 1 - INTRODUÇÃO
- 2 -- FRATURAMENTO HIDRÁULICO no CRISTALINO
- 3 - TRABALHOS ANTERIORES

F R A T U R A M E N T O H I D R Á U L I C O e m P O Ç O S  
n o C R I S T A L I N O d o N O R D E S T E  
d o B R A S I L

- 1 -- HISTÓRICO
- 2 - PROCEDIMENTOS de CAMPO
- 3 -- ANÁLISE dos TESTES de BOMBEAMENTO
- 4 - PERFILAGEM
- 5 - CONSIDERAÇÕES sobre CUSTOS e INVESTIMENTOS
- 6 - RECOMENDAÇÕES

A N E X O

B I B L I O G R A F I A

---

F R A T U R A M E N T O

H I D R Á U L I C O

---

## 1 - INTRODUÇÃO

A tecnologia de fraturamento hidráulico (FH) foi desenvolvida para aumentar a produção de poços perfurados em rochas de baixa produtividade ou transmissibilidade. Atualmente, após muitos estudos e constante utilização, é considerada bastante eficaz na estimulação efetiva destes poços.

É definido como um processo no qual um diferencial de pressão é transmitido à rocha, através da injeção do fluido de fraturamento, até a sua ruptura. O fraturamento da formação começa na parede do poço quando a sua resistência à tração é ultrapassada pela tensão tangencial efetiva ou pela tensão vertical efetiva. Após iniciada, a fratura se propagará pela formação através do bombeamento do fluido com pressões maiores do que a de fechamento da mesma.

A técnica de FH começou a ser utilizada pela indústria petrolífera, no ano de 1947, nos Estados Unidos, e hoje é largamente empregada para aumentar a produção de poços profundos perfurados em formações sedimentares consolidadas. Nos poços de petróleo, o FH aumenta a produção porque modifica o modelo de fluxo do reservatório para o poço, que passa a ser linear dentro da fratura e pseudo-radial próximo à mesma, expondo uma área maior do reservatório ao fluxo, permitindo que o fluido percorra caminhos de muito menor resistência. A produção também aumenta porque as fraturas podem atingir uma nova área do reservatório, mais distante do poço, com melhores condições de permoporosidade ou conectar reservatórios lenticulares não atingidos pelo poço.

Na elaboração de um projeto de fraturamento, é necessário o conhecimento dos dados referentes ao poço, das formações, do fluido de fraturamento e dos parâmetros que serão usados na operação. Os aspectos geológicos da área, a permeabilidade efetiva e a porosidade das rochas, o gradiente de fratura da formação a ser fraturada também são dados importantes que devem ser conhecidos antes da elaboração do projeto.

As operações de FH são iniciadas quando o fluido de fraturamento é bombeado para o poço, utilizando-se bombas especiais de alta pressão, até o intervalo pré-determinado e já isolado, com pressão superior à pressão de ruptura da formação que se deseja fraturar. O controle das operações é exercido a partir da superfície, pelo registro das pressões, vazões e concentrações dos agentes de sustentação, quando for o caso.

Os fluidos de fraturamento, principal elemento da operação, podem ter a capacidade ou não de transportar agentes de sustentação. Estes agentes são materiais particulados que, quando transportados pelo fluido, servem para preencher as fraturas abertas na rocha, evitando que se fechem ao cessar o diferencial de pressão exercido sobre as formações. Ao manter a fratura permanentemente sustentada, os agentes permitem a criação de um canal de fluxo de alta condutividade que aumentará os níveis de produção do poço. A capacidade de carregamento dos fluidos depende das substâncias usadas na sua composição. Os tipos de fluidos de fraturamento e seus principais componentes são:

a) Fluidos base água - são os mais utilizados. Possuem baixo custo, alta performance e facilidade de manuseio. Podem adquirir elevada viscosidade e alto poder de carregamento, quando recebem um polímero gelificante ou espessante.

b) Fluidos base óleo - foram os primeiros a serem utilizados, principalmente em formações sensíveis a água. Hoje em dia são pouco usados, devido ao seu custo elevado, dificuldade de manuseio, inferioridade reológica em comparação com fluidos base água e risco de poluição.

c) Espumas - são fluidos pseudoplásticos, com excelente capacidade de transporte de sólidos, bom controle de filtrado e facilidade de recuperação devido a expansão do gás no backflow.

d) Emulsões - a mais usada é a poli-emulsão, composta por 67% de hidrocarboneto, 33% de solução salina viscosificada e surfactante. Possuem boa capacidade de transporte de sólidos, causam poucos danos à formação e facilitam a limpeza do poço.

e) Gelificantes ou Espessantes - são polímeros que adicionados ao fluido proporcionam alta viscosidade e elevada capacidade de transporte de sólidos ao fluido. Os mais utilizados são: goma guar, goma xantana e hidroxipropilguar.

f) Reticuladores - provocam a formação de ligações cruzadas entre as moléculas dos gelificantes, elevando de modo exponencial a viscosidade dos fluidos. Os mais usados são: ácido bórico, sal básico de alumínio e íons metálicos de titânio e zircônio.

g) Ativadores - servem para iniciar e controlar a reticulação. Os mais usados são: soda cáustica e ácido acético.

h) Quebradores - servem para diminuir a viscosidade dos géis reticulados. Os mais utilizados são: enzimas e persulfato de amônia.



## 2 - FRATURAMENTO HIDRÁULICO no CRISTALINO

Os poços produtores de aquíferos de baixa transmissibilidade, entre os quais se encontram os perfurados em rochas cristalinas, apresentam muitos problemas na sua produção, os quais precisam ser solucionados para que as populações abastecidas por estes poços sejam melhor assistidas. Em todo o mundo, muitos estudos são desenvolvidos visando aumentar a produtividade destes poços e o fraturamento hidráulico (FH) de rochas é uma das soluções estudadas para este fim.

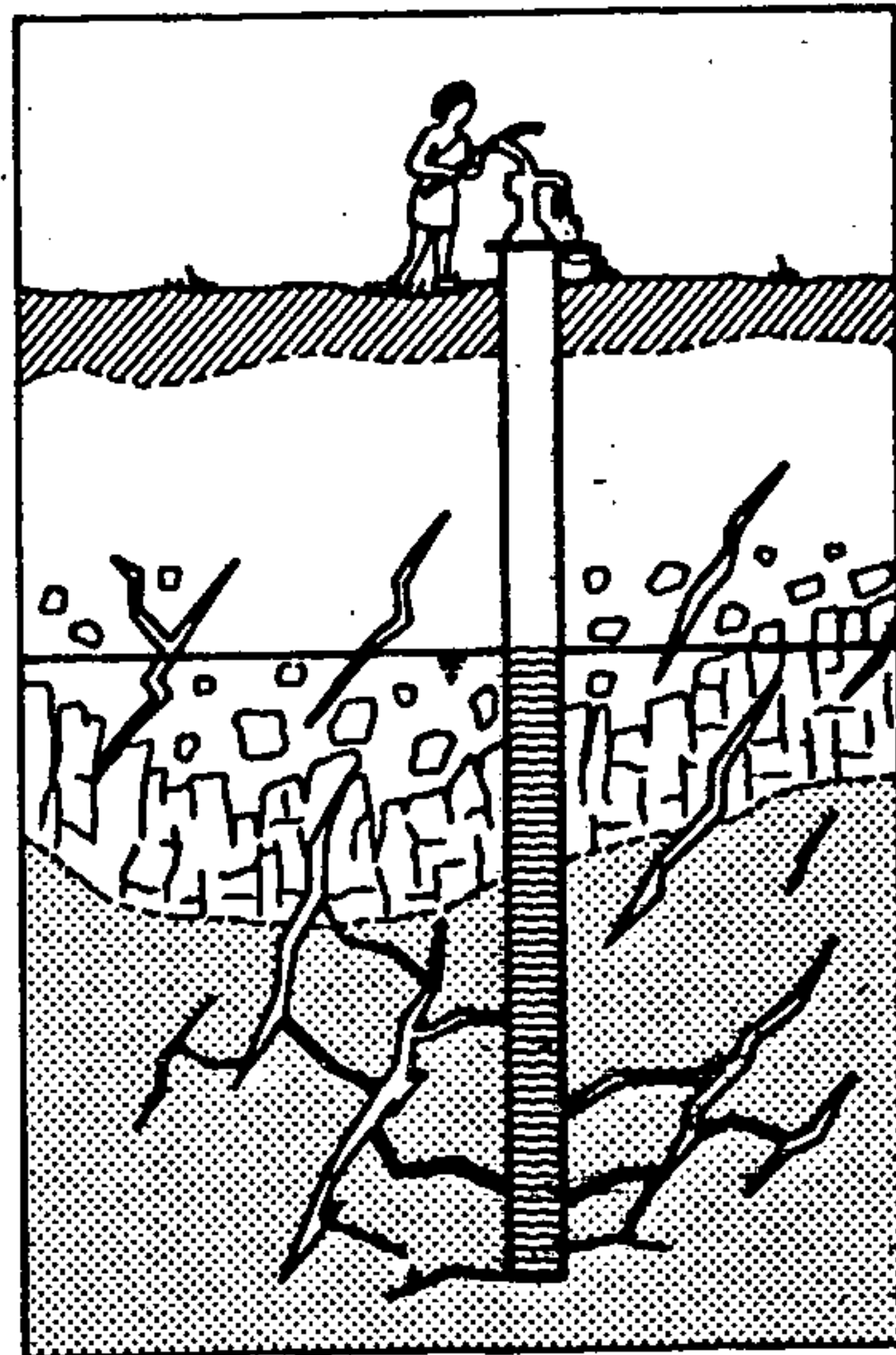
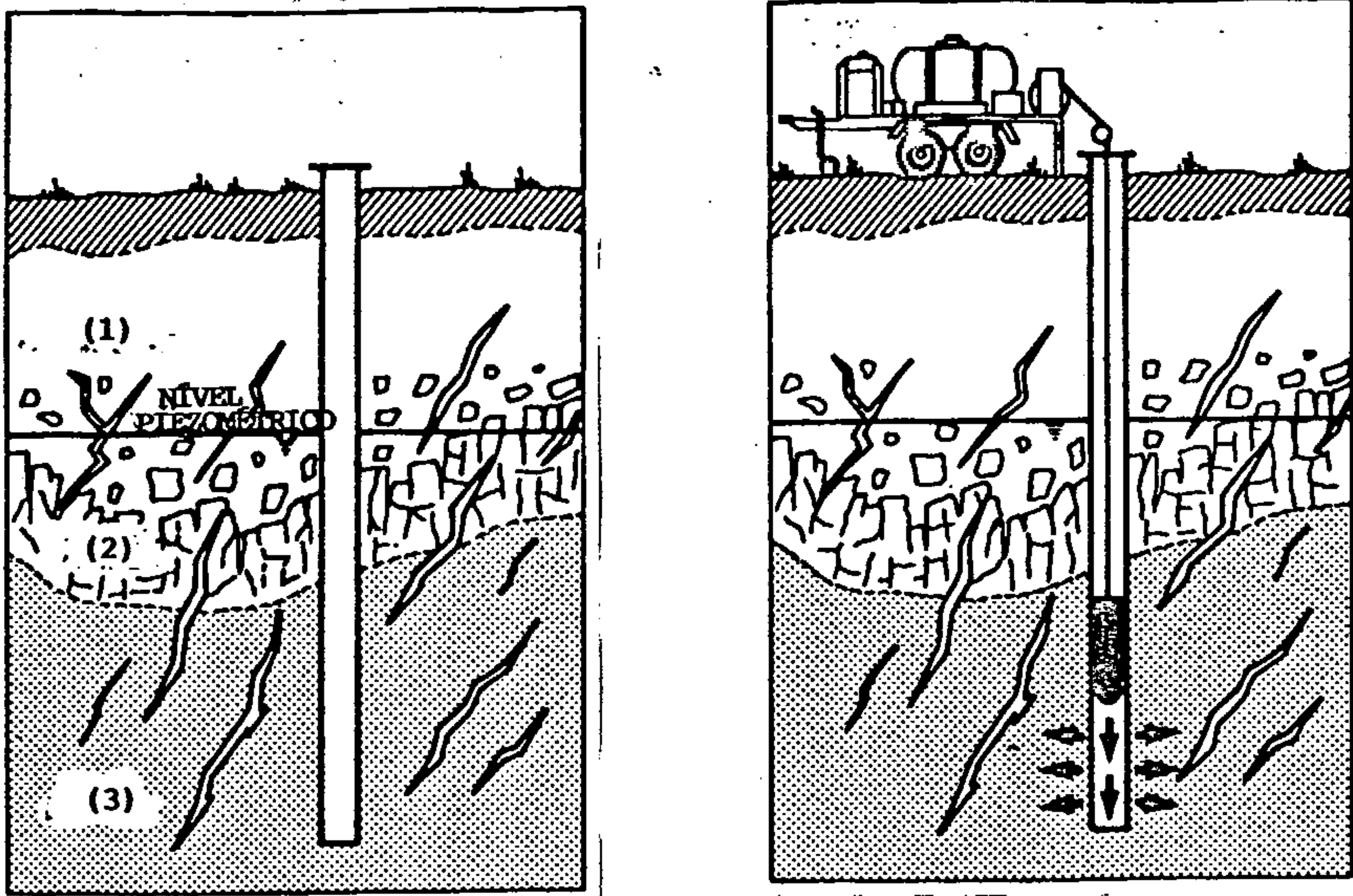
A partir da observação de que um grande número de poços perfurados no cristalino ou são secos (10 a 50% do total, segundo Wright et Al., 1989) ou apresentam vazões muito baixas (são raros os poços onde as vazões são maiores do que 5 m<sup>3</sup>/h), foram desenvolvidos vários estudos e trabalhos de campo visando minimizar estes problemas.

No final dos anos 80, a técnica de FH, que até então só era utilizada em poços produtores de petróleo, começou a ser estudada e testada em poços de baixa produtividade perfurados no cristalino, visando determinar a eficiência do FH no aumento da produção destes poços. Os estudos nesta área foram executados devido, principalmente, a relação entre o baixo custo da operação e o benefício que uma estimulação pode proporcionar para a população abastecida pelo poço.

A utilização do FH, neste tipo de poços, tem como objetivo básico a construção de ligações entre o maior número possível de fraturas naturais existentes na rocha com o poço aberto, permitindo que um volume maior de água contribua para recarga do poço, aumentando assim a sua produtividade. O fraturamento neste tipo de rocha não visa alterar a permeabilidade natural da formação, mas sim permitir a interligação das fraturas que não estavam previamente conectadas ao poço, aumentando a área do aquífero exposta ao fluxo e conseqüentemente a sua produção.

Como a geometria natural das fraturas que ocorrem neste tipo de rocha é pouco conhecida, devendo variar de local para local, fica difícil representá-la num modelo fiel de redes de fraturas. Na figura 1, apresentamos um modelo estilizado para esta representação, mostrando a disposição das fraturas na rocha e os objetivos do FH. Mostramos também uma camada de rocha alterada que pode ou não ocorrer acima da rocha fresca e a posição do nível piezométrico, que pode ou não ficar dentro da camada de rocha não-alterada.

A execução das operações de FH neste tipo de rocha tem metodologia igual a executada em qualquer outro tipo de rocha. Inicia-se com a injeção de um fluido de fraturamento para um intervalo pré-determinado e previamente isolado, com pressão suficiente para fraturar as formações cristalinas.



- (1) Rocha totalmente alterada argilosa
- (2) Rocha parcialmente alterada friável
- (3) Rocha base não-alterada

Figura 1 - Uma Representação do Processo de FH



---

Os poços do cristalino normalmente são de pequena profundidade (40 à 80m), portanto as pressões necessárias para o fraturamento da formação não deverão ser muito elevadas. A fratura, que inicia na parede do poço, se propagará pela formação cristalina através do bombeamento do fluido com pressão superior a de fechamento da mesma. Devem ser executados testes de bombeamento e perfilagem dos poços antes e depois de cada estimulação, para que os resultados obtidos sejam mais facilmente avaliados.

### 3 - TRABALHOS ANTERIORES

O fraturamento hidráulico (FH), devido ao seu uso rotineiro em poços de petróleo, tem sido constantemente estudado (ex: Melinger et al, 1964; Veatch, 1983; etc), porém estudos específicos para a sua utilização em rochas cristalinas só foram iniciados no final da década passada, e foram se tornando cada vez mais comuns.

Em 1989, Smith publica o 1º trabalho sobre FH neste tipo de rocha, onde descreve uma experiência desenvolvida nos Estados Unidos para estimulação de poços no cristalino. Também em 1989, Bonnet et al. relatam um projeto piloto executado em Burkino Faso, Africa, onde foram estimulados 21 (vinte e um) poços utilizando-se a técnica de FH e equipamentos norte-americanos. Antes da estimulação dos poços, 4 (quatro) deles eram secos e 6 (seis) outros tinham uma produção menor do que 500 l/h. Após o FH, os testes de bombeamento registraram um aumento na produção dos poços entre 40 e 260 %.

O principal trabalho de FH, que subsidiou nossos estudos, foi desenvolvido no Zimbabue, Africa, por Herbert et al. (1991) e Talbot et al. (1992). O projeto foi executado numa cooperação entre o Serviço Geológico Britânico (BSG), que providenciou o pessoal técnico especializado em perfuração, geofísica e hidrogeologia, e o Ministério da Energia e Desenvolvimento dos Recursos Hídricos daquele país, que forneceu os equipamentos e os recursos necessários. Os trabalhos de campo foram executados na província de Masvingo em duas etapas (a 1ª em 1991 e a 2ª em 1992), visando avaliar a eficiência do FH em poços perfurados no cristalino daquele país africano.

No primeiro trabalho foram visitados 16 (dezesesseis) poços, sendo que 4 (quatro) destes poços não puderam sofrer intervenções por problemas técnicos de construção ou operação. Nesta etapa do projeto não foram utilizados agentes de sustentação e a perfilagem geofísica resumiu-se aos perfis caliper e resistividade. Nos 12 (doze) poços submetidos à FH foram realizados testes de bombeamento, antes e depois da estimulação, para que fosse possível calcular o aumento da produtividade. As operações completas de fraturamento em cada poço levaram, em média, 3 (três) dias para serem executadas, incluindo a montagem, transporte e desmontagem dos equipamentos. Os resultados obtidos estão apresentados resumidamente na tabela 1 e mostram que a capacidade de bombeamento aumentou em 50 % dos poços, enquanto que a produtividade obteve ganhos que variaram entre 10 e 240 %, com uma média de 80 % de aumento.

TABELA 1 - RESULTADOS RESUMIDOS DOS POÇOS COM FRATURAMENTO HIDRÁULICO

LOCAÇÃO	NÍVEL PIEZOMÉTRICO ABAIXO DA ZO NA ALTERADA	UTILIZADO PACKERS DUPLOS?	RESULTADOS APARENTES			RESULTADOS CORRIGIDOS			
			% AUMENTO NA CAPACI DADE ESPE CÍFICA	% AUMENTO NA CAPACI DADE DE BOM BEAMENTO	Nº BALDES DE 20 LI TROS EX TRAS	MELHORADOS	AUMENTADOS	SEM ALTERAÇÃO	PIORADOS
MARAMBA *	NÃO	NÃO	15	11	78	X			
MHATIWA	NÃO	NÃO	-61	-41	-11				X
MHATIWA VALLEY *	NÃO	NÃO	-12	-194	-19			X	
ZVIRIKURESCH	SIM	SIM	179	124	66	X			
SHAZHAUME	?	SIM	26	59	3		X		
GUIDING STAR	SIM	NÃO	42	64	19		X		
CIKADZI **	SIM	SIM	-270	-1.020	-			?	
KUWRIRANA *	SIM	NÃO	116	241	17	X			
MASHAVA ***	SIM	NÃO	-	-	-			X	
SARAHURU	NÃO	NÃO	9	24	9		X		
CHIMBUDZI ***	SIM	NÃO	-	-	-			X	
MASOGWE	NÃO	NÃO	-38	24	-9			X	

OBS: DENTRO DO TOTAL DE 16 POÇOS VISITADOS, 1 ESTAVA COLAPSADO E FORA DE USO E 3 TINHAM REVESTIMENTO E NÃO PODERIAM SER ESTIMULADOS.

\* - SE, ANTES OU DEPOIS, PONTOS DO GRÁFICO S/Q ESTIVEREM SOBREPOSTOS PARA OS TEMPOS INICIAIS, COMO DEVERIAM ESTAR (VER TEXTO), PODERIA SER UM SIGNIFICATIVO AUMENTO NOS RESULTADOS. ISTO ESTÁ REFLETIDO NA COLUNA "RESULTADOS CORRIGIDOS".

\*\* - O TESTE DE BOMBEAMENTO PRÉ-FH ESVAZIOU UMA FRATURA PRINCIPAL QUE NÃO FOI PREENCHIDA ANTES DO TESTE PÓS-FH, ASSIM O DESEMPENHO DO FH FOI IMPOSSÍVEL JULGAR NESTE LOCAL.

\*\*\*- POÇOS MUITO SECOS, ANTES E DEPOIS DO FH, PARA EXECUÇÃO DE TESTES DE BOMBEAMENTO.

A segunda fase do trabalho de campo, desenvolvido em outubro de 1992, teve o objetivo de melhorar a compreensão de todo o processo de FH, do sistema de fluxo do poço e avaliar a eficiência dos agentes de sustentação nas operações de fraturamento. Nesta etapa, foram utilizados fluidos de fraturamento mais complexos, que permitiam a injeção dos agentes de sustentação para dentro das fraturas abertas, e uma camera de TV colorida de fundo de poço, para ajudar nas avaliações dos resultados obtidos. Foram estimulados 3(três) poços na região de Maramba, sendo que 2(dois) destes apresentaram fraturas após o FH e conseqüentemente aumento na produção de água.

Em quase todos os trabalhos executados até hoje na área de FH no cristalino, o fluido de fraturamento utilizado foi a água pura, sem que houvesse o uso de qualquer agente de sustentação. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e demonstraram que é possível realizar um projeto de FH com este tipo de fluido.

Apesar de serem ainda poucos os estudos e informes sobre o FH, todos parecem mostrar que é possível se obter um aumento médio de 100 % na produtividade dos poços perfurados no cristalino, se as operações de FH forem executadas dentro dos parâmetros e procedimentos pré-estabelecidos.

FRATURAMENTO

HIDRÁULICO

EM

POÇOS NO CRISTALINO

DO

NORDESTE DO BRASIL

---



## 1 - HISTÓRICO

As populações que habitam as regiões áridas do Nordeste do Brasil enfrentam um grave problema de abastecimento de água para a sua subsistência. Este problema, de difícil solução, tem sido combatido ao longo do tempo de diversas maneiras, sendo a perfuração de poços em rochas do cristalino uma das soluções utilizadas para tentar minimizar este drama nordestino.

A execução de projetos de levantamento hidrogeológico e a perfuração de poços em rochas cristalinas na região nordeste do Brasil por parte da CPRM, possibilitou o conhecimento parcial do comportamento dos aquíferos localizados neste tipo de rocha. Estes aquíferos, que nada mais são do que fraturas existentes na rocha, preenchidas por água, apresentam quase sempre uma baixa transmissibilidade e produtividade.

Perfurados normalmente em pequenos diâmetros (slim-hole: 4"-8") e com profundidade variando entre 40 e 80 metros, os poços visam atravessar as fraturas existentes na rocha. Para que as chances de se encontrar a rede de fraturas seja maior, utilizam-se técnicas geológicas e geofísicas na locação destes poços.

As vazões obtidas nestes aquíferos situam-se na faixa dos 500 a 1.000 l/h, sendo que uma grande parte dos poços são dados como secos e raros são aqueles que apresentam vazões elevadas. Os poços são secos pois durante a perfuração não atravessaram nenhuma fratura preenchida com água. Como a carência de água é muito acentuada na região, em todos os poços são instalados equipamentos de bombeamento mesmo aqueles que apresentam baixa produção.

## 2 - PROCEDIMENTOS de CAMPO

As operações de fraturamento hidráulico(FH) de poços no cristalino devem obedecer uma rotina própria de trabalho, para que os objetivos pretendidos pelo projeto sejam alcançados e possam ser facilmente quantificados. Para a execução de um programa sistemático de FH devem ser estabelecidos procedimentos de campo que visem maximizar o tempo gasto em cada operação a ser desenvolvida e que só são executados verificando-se as necessidades de cada poço.

No primeiro dia de trabalho deve ser feita a instalação dos equipamentos do projeto na locação, a retirada do sistema de bombeamento instalado no poço e a sua perfilagem. Em seguida, são instalados os equipamentos que serão utilizados no teste de bombeamento e ajustada as taxas em que o mesmo será realizado. Esta instalação se faz necessária neste dia para que o nível estático do poço, elevado devido a descida da bomba de teste, seja recuperado. Para que isso ocorra, é necessário que o poço permaneça em repouso durante toda à noite.

O 2º dia de trabalho iniciar-se-á com o teste de bombeamento do poço, operação esta que demora em torno de 5(cinco) horas. Após o encerramento do teste e a retirada dos equipamentos, começa-se a operação de FH propriamente dita. A descida e assentamento do(s) packer(s), vedando o intervalo desejado do poço é o 1º passo da operação. Em seguida, injeta-se o fluido de fraturamento, com auxílio da bomba de alta pressão, na vazão e pressão anteriormente definida(ver Figura 2). O acompanhamento dos valores da pressão exercida sobre as rochas é feito da superfície, e o momento de ruptura da formação é constatado também da superfície. Estas operações terminam com o desassentamento e retirada do(s) packer(s). A execução do FH podem demorar até 2(duas) horas. A reinstalação dos equipamentos de teste e o novo ajuste nas taxas de bombeamento são os procedimentos seguintes a serem observados. Durante à noite, o poço é deixado novamente em repouso para a recuperação dos níveis.

O teste de bombeamento pós-FH do poço é executado como 1ª operação desenvolvida no terceiro dia de trabalho. Concluído o teste e retirados os equipamentos, uma nova perfilagem precisa ser feita, para que junto com o teste de bombeamento proporcionem uma melhor avaliação dos resultados obtidos pelo FH. Após o término da perfilagem e a retirada das ferramentas, o sistema original de bombeamento deve ser reinstalado no poço e a nova capacidade de produção precisa ser informada aos operadores, para que o poço trabalhe dentro dos parâmetros resultantes do FH. Terminada as operações, é feita a mudança para uma nova locação.

Os procedimentos, resumidos conforme o esquema a seguir, possibilitam que um programa sistemático de FH no cristalino realize até 100(cem) intervenções por ano.

## PROCEDIMENTOS para F H

### 1º DIA

- Retirada do Sistema de Bombeamento;
- Perfilagem do Poço;
- Instalação dos Equipamentos de Teste de Bombeamento.

### Recuperação dos Níveis do Poço

### 2º DIA

- Teste de Bombeamento pré-FH;
- Fraturamento Hidráulico;
- Reinstalação do Equipamento de Teste.

### Recuperação dos Níveis do Poço

### 3º DIA

- Teste de Bombeamento pós-FH;
- Perfilagem do Poço;
- Reinstalação Do Sistema de Bombeamento.
- DTM para nova Localização

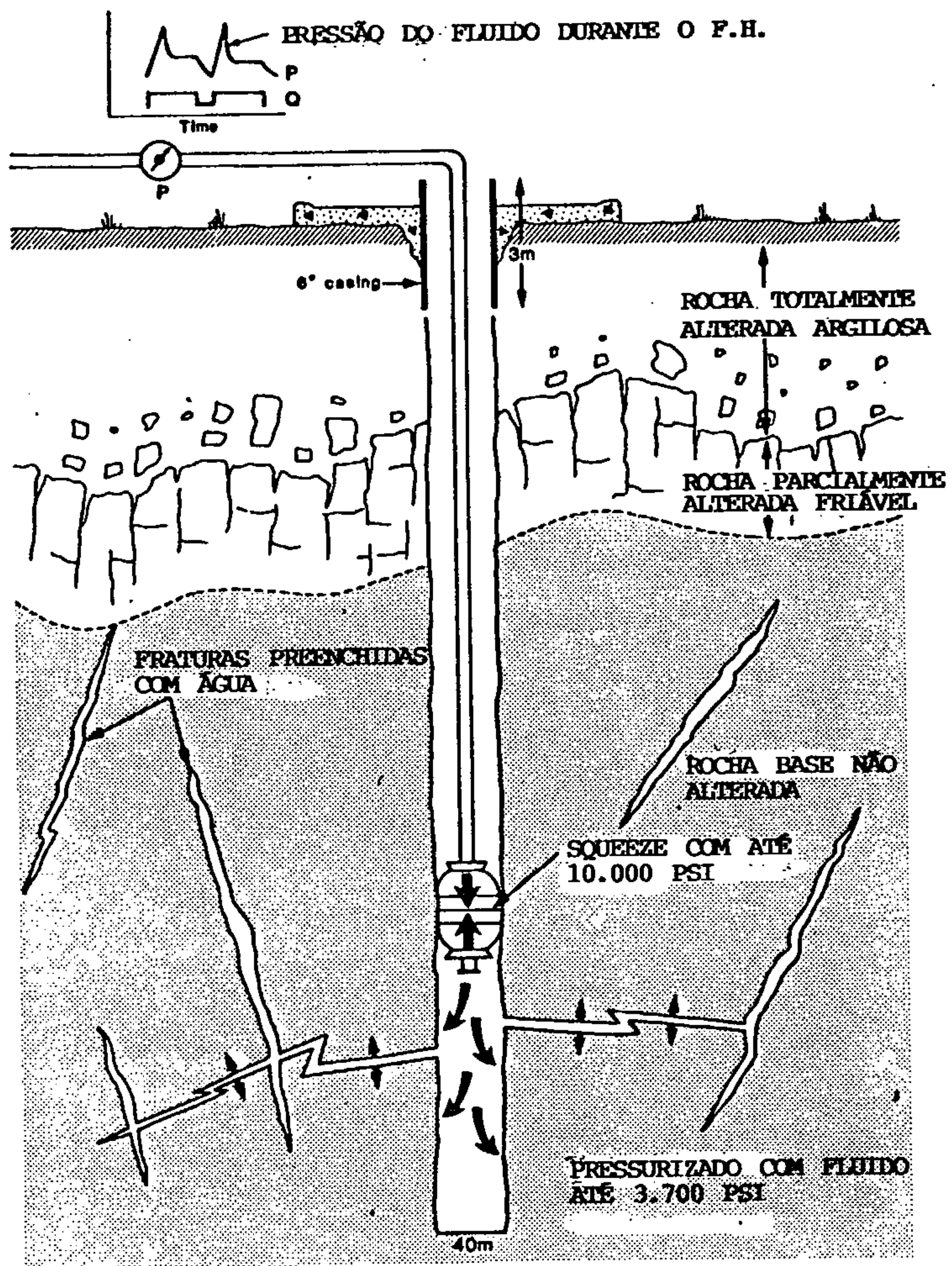


Figura 2 - Situação Típica durante a Operação de FH



### 3 - ANÁLISE dos TESTES de BOMBEAMENTO

Os poços que forem estimulados devem ser submetidos à testes de bombeamentos antes e depois da operação de fraturamento hidráulico (FH), para que se possa avaliar o aumento da produção decorrente desta operação e que seja obtido o maior número possível de informações à respeito das propriedades hidráulicas do sistema local de água subterrânea.

Para análise dos testes é preciso conhecer as características de cada tipo de aquífero produtor. O bombeamento de poços perfurados nos aquíferos de baixa transmissibilidade, a situação que ocorre no Nordeste do Brasil, possui características especiais que normalmente não são encontradas em outros tipos de aquíferos. Para uma melhor compreensão, apresentamos um estudo resumido deste comportamento no Anexo 1.

Nos testes de bombeamento a serem desenvolvidos em poços que sofrerem estimulação, os tópicos principais deste estudo a serem considerados, segundo Herbert et al. (1991), são:

a) Se o poço for bombeado acima da vazão crítica  $Q_c$ , o mesmo secará antes que a contribuição do aquífero diminua os níveis de rebaixamento. No caso de aquífero confinado:

$$Q_c = 1,26 * l * T$$

onde:  $l$  = extensão de água no poço,  
 $T$  = transmissibilidade do aquífero.

b) Após a secagem do poço, deve-se esperar a recuperação dos níveis de água, antes do início do bombeamento para abastecimento. O tempo de recuperação,  $t_r$ , para aquíferos homogêneo não-confinado é dado por:

$$t_r = 1,5 * r_w^2 * l_n (1/r_w) / T \quad (\text{para } 90\% \text{ de recuperação})$$

onde:  $r_w$  = raio do poço.

c) Para se evitar o problema descrito no item (a), os testes de bombeamento de longa duração devem ser feitos com vazões muito baixas, da ordem de 120 l/h.

d) O posicionamento da bomba de teste e da sua admissão abaixo do nível estático do poço pode acarretar uma significativa elevação deste, causando distorções no resultado dos testes. Para evitar que isto ocorra, é necessário que os equipamentos de teste sejam descidos no poço dia anterior ao que efetivamente se realizará o teste.



Portanto, é necessário a escolha de um método, dentre tantos existentes, capaz de se avaliar o aumento da produção de um poço após a execução do FH. Não deve ser utilizado qualquer método que requeira vazão maior do que a vazão crítica  $Q_c$ , pois esta quando utilizada evitará que a produção sofra influência do aquífero.

Os trabalhos de campo, realizados por Herbert(1991), mostraram que o método com vazão constante para os testes de bombeamento de longa duração não era apropriado para medir o desempenho dos poços de baixa produtividade. A interpretação dos testes ficava bastante dificultada quando era necessário utilizar vazões muito baixas, que asseguravam um longo período de bombeamento sem a secagem do poço, pois a estocagem influenciava muito no início dos testes. Utilizando-se o método da linha reta de Jacob, o gráfico Rebaixamento(S) versus logaritmo do tempo(logt), usado para avaliar os resultados obtidos em Masvingo, apresentou valores da transmissibilidade(T) influenciados pela estocagem do poço, nos pontos iniciais do gráfico.

O método mais simples e preciso para avaliação dos resultados é aquele em que um gráfico rebaixamento no poço S/vazão Q versus logaritmo do tempo (logt) é construído logo após o teste de bombeamento, onde são plotados os dados obtidos antes e depois do FH. O valor "regional" da transmissibilidade T é obtido a partir do traçado da linha reta estabelecida por este gráfico. As linhas retas, antes e depois do FH, devem ser estabelecidas para que se possa determinar o máximo rebaixamento disponível por poço. Com este dado podemos obter o tempo máximo,  $t_{máx}$ , que permite a determinação do volume máximo,  $V_{máx}$ , que pode ser retirado do poço e é dado por:

$$V_{máx} = t_{máx} * Q$$

Para calcular o aumento da produtividade de um poço, como resultado do FH, basta se comparar os valores de  $V_{máx}$  obtidos antes e depois da operação de fraturamento.

#### 4 - PERFILAGEM

A perfilagem geofísica dos poços que sofrerem intervenção é exigência indispensável para que o fraturamento hidráulico (FH) alcance os resultados esperados. Esta exigência decorre da necessidade de um conhecimento maior das características do poço a ser estimulado e das formações atravessadas.

O objetivo principal da perfilagem é determinar a existência ou não da camada de rocha intemperizada, que normalmente ocorre acima das camadas de rochas frescas, e qual a profundidade da interface rocha alterada/rocha não-alterada. O conhecimento desta profundidade é essencial para as operações e deve ser determinada antes do início de qualquer intervenção, para evitar que os packers sejam assentados dentro da zona alterada, o que pode acarretar o colapso das paredes do poço, ocasionando até a perda do mesmo.

A determinação dos diâmetros corretos de cada poço e se existem zonas de alargamento, diferentes do calibre da broca utilizada, é outro importante objetivo da perfilagem. A partir do caliper exato do poço é que será definido o diâmetro do packer a ser descido e calculado o volume do fluido de fraturamento a ser injetado na operação.

Para a execução dos perfis, que proporcionem as informações requeridas acima, são utilizadas técnicas simples de perfilagem geofísica para poços abertos, que incluem os métodos de radiação gama natural, resistividade normal e caliper. Na determinação da existência e localização da camada intemperizada pode ser usado o perfil Raio Gama ou o perfil Resistividade, enquanto que o calibre exato do poço é determinado pelo perfil Caliper.

O perfil Caliper é capaz de determinar, com precisão, os diâmetros do poço e os alargamentos que por acaso ocorram. É feito através de uma ferramenta mecânica que registra o diâmetro da abertura das suas garras até encontrar as paredes do poço. Mostra também a rugosidade destas paredes, que pode indicar as fraturas mais significativas atravessadas durante a perfuração. As fraturas menores não são facilmente identificadas por este perfil.

No perfil Raio Gama, o aumento da quantidade de argila contida em formações alteradas é registrado, permitindo a definição exata da profundidade da camada alterada. Este perfil é construído através do registro da radiação gama natural emitida por todas as formações rochosas.

O perfil Resistividade permite determinar, com maior exatidão, a interface do intemperismo ocorrido nas formações, permitindo que o packer seja assentado abaixo da camada alterada e em rochas estruturalmente seguras. Este perfil é a resposta das superfícies condutoras existentes dentro dos minerais argilosos. As resistividades mais baixas são registradas dentro das formações alteradas. Neste tipo de perfil também é possível se identificar as fraturas menores, através de reduções discretas da resistividade em relação média da área (background). Outro modo de se identificar as fraturas, é que quando estas são permeáveis provocam alterações no perfil, devido a uma zona de resistividade reduzida que aparece acima das fraturas.

Como o perfil resistividade é mais eficiente do que o perfil raio gama, pode-se reduzir a perfilagem geofísica às ferramentas caliper e resistividade, porém nada impede que ferramentas mais complexas sejam utilizadas.

Em todos os poços é necessário que sejam feitas 2(duas) corridas de cada perfil, uma antes e outra depois das operações de fraturamento, apesar de que não deverá ser notada nenhuma diferença significativa entre as duas corridas.

## 5 - CONSIDERAÇÕES sobre CUSTOS e INVESTIMENTOS

Em áreas como a região Nordeste do Brasil, onde são poucas as fontes de abastecimento de água, os custos de qualquer operação, que possa proporcionar aumento na quantidade de água fornecida, devem ser avaliados junto com os benefícios que possam trazer para as populações locais. Por isso, num projeto de fraturamento hidráulico (FH), os investimentos necessários a sua implantação e os custos dos trabalhos devem ser comparados com o incremento da produção de água que pode ocorrer após a execução das operações.

O principal investimento, para a execução de um projeto de FH, é a aquisição de 1(uma) unidade Atlas Copco Aquasplit HFU-140. Este equipamento é uma unidade autônoma, capaz de realizar todas as operações necessárias à execução do FH. É dotada de uma bomba de alta pressão para injeção do fluido de fraturamento, capaz de prover pressões de até 250 bars, suficiente para o fraturamento de formações cristalinas de baixa profundidade e um reservatório para transporte do fluido. A unidade conta ainda com vários conjuntos de packers, com diâmetros que variam entre 4" e 6  $\frac{1}{2}$ ", utilizados para vedar o anular não-revestido dos poços. Possui também uma bomba submersa, para os testes de bombeamento, e um pequeno grupo gerador, que alimenta todos os equipamentos elétricos da unidade. O seu transporte é fácil, pois pode ser rebocada pela camionete do pessoal do projeto.

Se houver a impossibilidade de aquisição da unidade HFU-140, as operações podem ser feitas utilizando-se equipamentos facilmente encontrados no mercado. Com 1(uma) bomba de lama, capaz de proporcionar pressões de até 5.000psi, 1(um) tanque para transporte do fluido de fraturamento, com capacidade para 10.000 litros, 1(um) conjunto de packers para poço aberto, que possam vedar o anular nos diâmetros esperados, 1(uma) bomba submersa para os testes e 1(um) grupo gerador, pode-se executar um projeto de fraturamento. Estes equipamentos podem ser transportados num único caminhão.

Para a perfilagem dos poços, é necessário um equipamento que possua pelo menos as ferramentas caliper e resistividade. Podem também ser utilizados outros perfis no acompanhamento das operações, porém haverá o limite do espaço físico para transporte dos equipamentos, que devem ser acomodados na carroceria da camionete do pessoal de campo.

Para se obter uma significativa redução nos custos de cada operação de FH, deve ser utilizada a água como fluido de fraturamento, sem aditivos e sem o uso de agentes de sustentação. Como informado anteriormente, os resultados conseguidos nos trabalhos já executados mostram que mesmo com a água, o FH pode proporcionar aumentos de até 100% na produção dos poços.



O custo de pessoal se resume a equipe do projeto, composta por 1(um) técnico, 1(um) operador e 1(um) ou 2(dois) motoristas dependendo do tipo do equipamento a ser transportado. O(s) motorista(s) serve(m) como ajudante(s), durante a operação de FH.

Durante a execução das operações, alguns custos menores também ocorrem, como sendo: transporte dos equipamentos, combustíveis, peças de uso e reposição, etc.

É importante salientar que o custo unitário de cada operação de FH pode ser bastante reduzido se for executado um programa sistemático de estimulação de poços na região Nordeste, principalmente porque haverá a diluição dos custos de aquisição da unidade HFU-140 e dos equipamentos de perfilagem. O custo final de cada operação, dentro de um programa contínuo de estimulação, com perspectiva de se obter um aumento de 100% na produção dos poços, é aproximadamente a metade dos custos de perfuração de um poço na mesma região.



## 6 - RECOMENDAÇÕES

Para que os objetivos deste trabalho e de qualquer outro que vise aumentar a produção de poços perfurados no cristalino sejam alcançados, listamos abaixo as principais recomendações que devem ser observadas para a execução do fraturamento hidráulico (FH).

a) como as operações de FH tem custo bem mais baixo do que a perfuração de um novo poço, na mesma área, recomenda-se que seja executada uma estimulação nos poços não-secos com baixa produtividade, como primeira intervenção, na tentativa de melhorar a produtividade destes poços.

b) que seja determinada a vazão crítica  $Q_c$  de cada poço. Esta vazão não deve ser excedida, pois isto resultará no esvaziamento do poço antes que o aquífero possa contribuir significativamente para a produção.

c) que vazões maiores do que  $Q_c$  só sejam usadas quando a produção do poço estiver sendo medida e a recuperação do nível estático sendo monitorada. Com isto, é possível se obter o tipo e o tempo da recuperação do poço, que indicará qual o modelo do aquífero e a capacidade de produção diária do poço. Este método necessita de menos tempo para execução do que os testes de bombeamento de longa duração e produz melhores resultados.

d) que no 1º projeto de campo seja utilizada a água como fluido de fraturamento, o que possibilitará uma redução nos custos envolvidos e evitará qualquer dano ao aquífero.

e) que seja realizado um trabalho complementar de campo, utilizando-se fluidos de fraturamento mais complexos, com capacidade de carrear agentes de sustentação. A avaliação do FH no aumento da produção de poços no cristalino deve ser feita comparando-se os resultados obtidos com e sem a utilização destes agentes.

f) em poços com produção muito baixa, Herbert et al. recomenda que os trabalhos de FH sejam executados em 4(quatro) dias, ao invés dos 3(três) dias normais necessários. Este aumento será usado para permitir uma melhor recuperação dos níveis do poço antes do teste de bombeamento pós-FH, para que seja possível uma avaliação mais eficiente dos resultados obtidos pelo FH.

A N E X O

---

*Comportamento de Poços perfurados em Aquíferos  
de Baixa Transmissibilidade*

*1 - Vazão de bombeamento  $Q_c$ , que secará o poço rapidamente*

Em 1967, Papadopulos e Coper publicaram curvas típicas para ilustrar a relação existente entre o rebaixamento e o tempo de bombeamento que acontece em poços produtores de aquíferos confinados com diâmetros relativamente grandes. As curvas são representadas em gráficos de Rebaixamento (S) versus Logaritmo do Tempo (logt). Na análise dessas curvas constata-se que quase toda a água bombeada vem da estocagem do poço durante um certo tempo,  $t_c$ , após o início do bombeamento desde que:

$$t_c < 2,5 * r_w^2 / T \quad (1)$$

onde: T = transmissibilidade do aquífero,  
 $r_w$  = raio do poço.

Então, se considerarmos que o poço é bombeado numa vazão Q, se a extensão inicial da coluna d'água no poço for dada por l e desprezando-se as contribuições do aquífero, conclui-se que o tempo decorrido para bombear o poço até secá-lo será dado por:

$$t = \pi * r_w^2 * l / Q \quad (2)$$

igualando (1) com (2):

$$Q_c > 1,26 * l * T \quad (3)$$

onde:  $Q_c$  = vazão crítica de bombeamento, que quando excedida secará o poço antes do aquífero contribuir significativamente para a produção.

É importante notar que a expressão (3) é aproximada e deve ser aplicada unicamente em aquíferos confinados. Neste tipo de aquífero os rebaixamentos serão rápidos e o nível piezométrico será pouco diferente, sendo portanto possível a utilização da equação (3). Para outros tipos de aquíferos, é preciso se determinar a equação que represente esta relação, para que seja possível trabalhar com os rebaixamentos necessários.

## 2 - Tempo necessário para recuperação dos níveis

Em 1931, Hvorslev mostra que a vazão de fluxo (q) dentro de um poço é dada aproximadamente por:

$$q = 2 * \pi * l * K * h / l_n (1 / D + \sqrt{1 + (1/D)^2}) \quad (4)$$

onde: l = extensão da coluna d'água no poço,  
K = permeabilidade,  
h = altura do rebaixamento,  
D = diâmetro do poço.

a equação (4) também pode ser escrita por:

$$q * dt = - \pi * r_w^2 * dh \quad (5)$$

Equacionando e integrando (4) e (5), com h variando de l a 0,1l (para 90 % de recuperação), obtém-se o tempo decorrido até o poço recuperar cerca de 90 % após o início do esvaziamento,  $t_{90}$ , que é dado grosseiramente por:

$$t_{90} = r_w^2 * l * 15 l_n (21/D) / T \quad (6)$$

onde:  $T = K * l$ .

## Referências

Papadopulos, I.S. and Copper, H.H.- 1967. Drawdown of a well of large diameter. Water Resources Research, vol. 3 : 241 - 244.

Hvorslev, J.M.- 1931. Time lag and soil permeability in groundwater observations. Waterways experiment Station, Bull. Nº 35, April.

B I B L I O G R A F I A

---



*BIBLIOGRAFIA*

- A Pilot Study of Hydraulic Fracturing used on Low Yielding Wells in the Basement Rocks of Masvingo, Zimbabwe.

R. Herbert, J.C. Talbot, S.L. Shedlock, P. Rastall, P. Sinnett-Jones and G. Nhunhuma. British Geological Survey Technical report WD/91/4.

- Hydraulic Fracturing - Further Investigations on its use on Low Yielding Boreholes in the Basement Rocks of Zimbabwe.

J.C. Talbot, D.K. Buckley and R. Herbert. British Geological Survey Technical report WD/93/16.

- Fraturamento Hidráulico.

Vicente, Ronaldo. Cen-Nor, Petrobrás. 1989.