

# Estimulação de poços para captação de água subterrânea

ADELBANI BRAZ DA SILVA\*

## ABSTRACT

Stimulation of groundwater wells is a technique that increases well discharge more economically than drilling a new well. This technique is little employed in Brazil because few recognize its advantages and because of lack of experience, improper use, lack of equipment, and because of some negative results. The principal methods of well stimulation and some results of this technique are described in this paper.

## RESUMO

As estimulações de poços para água subterrânea são técnicas que permitem aumentar as vazões de modo mais econômico que a perfuração de outros novos poços. No Brasil estas técnicas ainda são pouco utilizadas devido ao desconhecimento de suas vantagens, falta de experiência, emprego inadequado, falta de equipamentos apropriados e a alguns casos negativos. Neste artigo são descritos os principais métodos de estimulação e alguns resultados obtidos.

## INTRODUÇÃO

O termo estimulação de poços, utilizado na hidrogeologia, é proveniente da literatura existente na "indústria do Petróleo". A estimulação é a modificação das condições do poço por meios mecânicos, químicos ou outros visando diminuir a resistência ao fluxo de água subterrânea da forma notável.

Por outro lado, na hidrogeologia existem termos para outros diferentes métodos que são utilizados também para diminuir a resistência ao fluxo. Estes métodos são utilizados logo após a conclusão do poço ou quando diminui a sua produção depois de certo tempo de exploração de água. Os termos mais comuns são: desenvolvimento, redesenvolvimento e reabilitação. Desenvolvimento usualmente é um tratamento aplicado após a conclusão do poço para extrair restos do fluido de perfuração, detritos da perfuração, estabilizar a formação aquífera e o pré-filtro, etc. O redesenvolvimento é aplicado tempos depois, normalmente quando o poço diminui a sua produção. Reabilitação é quando implica em uma reconstrução do poço, como por exemplo: substituindo filtros ou revestimento, aumentando a profundidade ou diâmetro do poço, etc.

Na realidade trata-se de diferentes aspectos de uma mesma coisa, aplicada em diversas circunstâncias, que na maioria das vezes se sobrepõem ou são utilizadas simultaneamente ou conjuntamente e que em muitas ocasiões são denominadas genericamente de desenvolvimento, principalmente quando são técnicas simples.

Em geral, reconhece-se 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 técnicas apropriadas.

A estimulação de poços para água subterrânea no Brasil ainda é pouco frequente devido ao desconhecimento de suas vantagens, falta de experiência, emprego de técnicas inadequadas, falta de equipamentos apropriados e a alguns casos negativos. A realização da estimulação de forma adequada é normalmente técnica e economicamente justificável.

Os principais métodos de estimulação de poços para água subterrânea são: explosivos, acidificação, gelo seco e fraturamento hidráulico. Outros métodos estão sendo pesquisados, dos quais podem-se destacar: congelamento do poço, faíscas elétricas, ondas ultrasônicas, ciclo térmico, campos elétricos de altas frequências, micro-ondas, raios laser, reatores nucleares, arco voltáico, químicos e outros.

A seguir, são descritos os principais métodos de estimulação de poços.

\* Professor de Hidrogeologia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, e Geólogo da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC.

### ESTIMULAÇÃO DE POÇOS COM EXPLOSIVOS

Este método de estimulação consiste em detonar cargas de explosivos nas entradas de água dentro do poço. Como resultado da explosão tem-se um aumento do diâmetro do poço e formação de fraturas radiais ao seu redor. Com isso é possível aumentar o fluxo para o poço e conseqüentemente melhorar a sua vazão específica.

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. Casos de resultados negativos ocorrem devido ao uso inadequado de alguns tipos de explosivos, a um carregamento mal posicionado, ou ainda, a um dimensionamento insuficiente da carga de explosivos.

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

- Verificação da capacidade de produção do poço antes da estimulação.
- Detecção das diversas entradas de água dentro do poço através de uma perfilagem com traçadores químicos, perfilagem geofísica com registro gama, SP e outros.
- Detonações localizadas nos trechos com entradas de águas.
- 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 águas.

As estimulações dos poços são feitas através de detonações de explosivos nas diferentes entradas d'água detectadas. Como normalmente os poços apresentam mais de uma entrada d'água, o carregamento do explosivo é realizado com diferentes estágios. Estes estágios são colocados separadamente entre si, de maneira que as cargas são dispostas nos trechos onde existam entradas de água no poço.

Após a detonação, o poço fica obstruído principalmente naqueles trechos onde são colocados os estágios de explosivos. Parte das rochas da parede do poço é totalmente pulverizada e outra parte transformada em material detrítico de diferentes tamanhos, chegando a pedaços com até 10 cm de comprimento. Assim a etapa seguinte é a reabertura e desobstrução do poço.

Depois de reabertos, os poços devem ser 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 pequenas cargas de explosivos (1 a 2 kg de gelatina), para desalojar as paredes fraturadas do poço que porventura estivessem em equilíbrio instável;
- d. colocação de gelo seco 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, devem-se realizar novos testes de bombeamento, utilizando-se a mesma metodologia e o mesmo equipamento empregado antes da detonação. Os tempos de bombeamento devem ser os mesmos dos testes anteriores. Assim será possível comparar a capacidade de produção dos poços antes e depois das estimulações.

Finalmente, deve-se perfilar os poços com traçador químico ou geofísico (inclusive caliper) após a estimulação, para verificar o surgimento de novas entradas d'água no poço ou mesmo estudar o comportamento das existentes, além de observar o diâmetro criado.

A ação de explosivos no poço é conseqüência 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.

Pelo fato de que o efeito de explosão em um curto espaço de tempo, para um melhor aproveitamento da fabulosa 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.
- a. Tipos de explosivos

Uma melhor estimulação do poço é obtida através do maior fraturamento possível da rocha.

Para isto, é aconselhável usar um explosivo rápido, potente e resistente a umidades. 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 à 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 e LLAMAS, 1976; WALTON, 1970).

#### b. Iniciadores

A detonação da carga pode ser feita simples ou eletricamente, 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 de coluna de água no furo exercem uma pressão de 0,01 kg/cm<sup>2</sup>. Consequentemente, uma coluna de água de 30 m sobre uma carga de explosivo 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 poço, 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 se obter 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.

#### c. 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 da água e efeito desejado.

Considerando-se dois furos de diâmetros diferentes 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 fraturamento 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 e LLAMAS, 1976). No caso de calcários maciços, a sua resistência à tração é da ordem de 22 a 98 kg/cm<sup>2</sup> e à 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, normalmente encontrada no Brasil, tem uma razão linear de carregamento máximo de aproximadamente 20 kg/m, para poço de 150 mm (6") de diâmetro. Cada salsicha de gelatina (140 x 600 mm) tem um peso da ordem de 12 kg.

#### d. Acoplamento

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

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 ex-

plicado através da análise da propagação das tensões através da rocha, quando existe ou não diferença entre o diâmetro do explosivo e do furo (CINTRA, 1972).

#### e. 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 e que sejam indiferentes à umidade ou estejam perfeitamente impermeabilizados, o tamponamento com a água supera qualquer outro, pois, embora a resistência da água ao arranque seja menor que o da areia compactada, o hermetismo, que também é um dos fatores do tamponamento, não pode ser superado por nenhum outro tipo de obstrução.

#### EFICIÊNCIA DAS ESTIMULAÇÕES COM EXPLOSIVOS

A estimulação de poços com explosivos normalmente tem dado bons resultados. Logicamente, estes resultados dependem de diversos fatores como foi discutido anteriormente. Uma média de aumento da vazão de poços perfurados em vários aquíferos e em diversas unidades nos USA, encontram-se a seguir (WALTON, 1970).

Unidade ou aquífero	Aumento da vazão específica (%)
Arenito Glenwood-St. Peter	38
Aquífero Cambrian-Ordovician	22
Arenito Iron-ton-Galesville	30
Aquíferos Cambrian-Ordovician e Mt. Simon	25

No Brasil, várias experiências isoladas foram feitas sem que os resultados fossem publicados. O trabalho realizado em calcários da região ao norte de Minas Gerais (SILVA et alii, 1981) mostrou os resultados do Quadro I. As características desses poços estimulados e as cargas utilizadas encontram-se no Quadro 2.

De uma maneira geral, devem-se considerar as seguintes observações durante os trabalhos de estimulação com explosivos (SILVA et alii, 1981):

- o carregamento do explosivo sempre deve coincidir com as entradas de água no poço;
- para se aumentar a resistência ao arranque do explosivo, pode-se encher o poço com lama bem grossa de argila e barita;
- a iniciação com cordel detonante e "booster" é a mais indicada pela segurança e pela sua velocidade de detonação;
- a estimulação com explosivo não deve ser feita em rocha mole ou em rocha dura próxima a zonas decompostas;
- os requerimentos de PVC são totalmente destruídos pela explosão;
- os requerimentos metálicos devem estar bem cimentados;
- os poços depois de reabertos devem ser submetidos a um intenso desenvolvimento através de superbombeamento, injeção de ar nos trechos detonados, detonação com pequena carga e limpeza com gelo seco.
- É aconselhável que, após o desenvolvimento do poço, seja feita uma perfilagem com traçador químico ou geofísico 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, distante de 2 a 8 metros. 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.

O maior aumento da vazão do poço será decorrente da interconexão das fraturas criadas com as pré-existentes no aquífero. Se o poço está alimentado por poucas fraturas abertas ou se as fraturas estão colmatadas por argila, provavelmente o aumento da produtividade desse poço será

Nº DO POÇO	VAZÃO ESPECÍFICA (l/s/m)		VARIAÇÃO 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 01 - Aumento da produtividade dos poços com explosivos (Silva et alii - 1981)

POÇO Nº	PROFUNDIDADE DO POÇO (m)	COMPRIMENTO DO REVESTIMENTO (m)	PROFUNDIDADE DO NÍVEL ESTÁTICO (m)	PROFUNDIDADE DAS FENDAS DETECTADAS (m)	PROP. DOS TRECHOS CARREGADOS (m)	EXPLOSIVOS (kg)
MA-033	184,0	12,0*	50,0	54,0 73,0 86,0	54-55 72-75 85-86,5	18,0 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 37,0 59,0 63,0 65,0 70,0 80,0	- - - 62-66 - - 75,5-80	- - - 72,0 - - 81,0
MA-655	70,0	27,0*	24,0	25,0 34,0 39,0 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 85,0	- - 57,5-59 80-83 -	- - 27,0 54,0 -
MZ-208	148,0	30,0	13,5	21,0 50,0 69,0 75,0	- - 48-53 69-71 -	- - 64,0 21,0 -
TOTAL						685,0

\* Revestimento de pvc

Quadro 02 - Distribuição das cargas explosivas nos poços estimulados. (SILVA et alii-1981)

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 dos sistemas aquíferos, 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 aumentar a vazão devido ao baixo coeficiente de armazenamento.

Outros aspectos importantes nesta seleção referem-se a detalhes da construção dos poços, tais como: verticalidade, intervalo revestido a natureza do revestimento, existência de filtros e outros, que poderiam causar problemas nas operações de limpeza e recuperação.

#### ACIDIFICAÇÃO

A acidificação consiste em introduzir uma quantidade de ácido no interior de um poço perfurado em rocha carbonática, o que provocará um aumento da espessura das fendas pela dissolução da rocha. O ácido comumente utilizado é o clorídico (ácido muriático), que reage com o carbonato produzindo  $\text{CO}_2$ , água e cloreto de cálcio ou magnésio, que são solúveis em água. O ácido sulfúrico não deve ser usado porque forma o sulfato de cálcio, que pode precipitar-se no poço e nas fraturas.

Esse tipo de estimulação pode ser empregado em poços recém construídos e com baixa vazão. A acidificação pode aumentar a vazão desses poços através do alargamento das fraturas ou de interconexão com outras fraturas pré-existentes. A acidificação pode também remover os resíduos do fluido de perfuração ou argilas que preenchem as fraturas e, conseqüentemente, aumentar a produtividade dos poços.

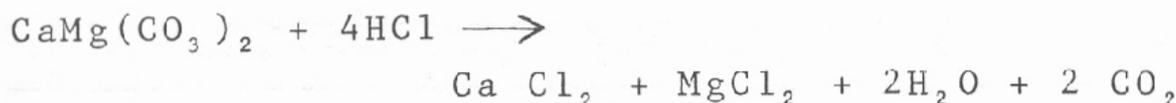
Outro caso de aplicação da acidificação é quando poços antigos diminuem a vazão por problemas de incrustação nos filtros do poço ou nas fraturas da rocha. Sabe-se que, quando se provoca um superbombamento, o  $\text{CO}_2$  se libera e o  $\text{CaCO}_3$  precipita-se nas fraturas ou ao redor do poço, reduzindo a sua permeabilidade.

#### CONSIDERAÇÕES QUÍMICAS

O fundamento da acidificação é o seguinte:



Para as dolomitas, a quantidade de ácido necessária é maior e a reação é a seguinte:



A quantidade de ácido a injetar é elevada, sempre da ordem de várias toneladas até algumas dezenas.

#### FATORES QUE AFETAM A REAÇÃO

Vários fatores podem intervir no equilíbrio das reações supracitadas. O conhecimento desses fatores pode deslocar a reação para direita ou para a esquerda, isto é, acelerando ou retardando a acidificação segundo o mais conveniente.

Esses fatores são: pressão, temperatura, concentração dos reagentes e outros.

##### a. Pressão

Se na reação da acidificação, quando se aumenta a pressão (fechando o poço), a quantidade de  $\text{CO}_2$ , que é gerada, é menor à medida que aumenta a pressão. Se as quantidades de cloreto de cálcio e água permanecem constantes, ao diminuir a formação de  $\text{CO}_2$  diminui a velocidade de reação para a direita.

Este efeito deve ser levado em conta quando o poço está fechado, pois não convém ultrapassar pressões superiores a  $5 \text{ kg/cm}^2$ , devido ao comportamento mecânico do solo.

##### b. Temperatura

Segundo a teoria cinética molecular, ao aumentar a temperatura, aumenta a atividade molecular e, conseqüentemente, a velocidade de reação. Para conseguir um aumento de temperatura, pode-se aquecer o ácido ou a água antes de se injetar no poço.

##### c. Concentração do ácido

Aumentando a concentração do ácido a reação se desloca para a direita, formando uma grande quantidade de espuma. Esta espuma impede a passagem do ácido através do fraturamento. Por isto, não se deve empregar elevadas concentrações. A solução ideal é de 12% de concentração a  $80^\circ\text{Bé}$ . Para o caso de incrustações, deve-se empregar até 25%.

#### ADITIVOS

São certas substâncias que são adicionadas ao ácido para trocar ou encobrir algumas de suas propriedades, com objetivo de obter melhores benefícios em sua utilização. Estes aditivos são os seguintes: inibidor de corrosão, retardador de ataque, anti-espumante, estabilizador de ferro, dissolução dos sulfatos.

##### a. Inibidor de corrosão

Evita o efeito da corrosão do ácido sobre o revestimento, filtros, bombas, etc. Estes inibidores podem ser fosfatos, polifosfatos, tiofenóis, poliaminas, gelatina, etc. Eles devem ser adicionados um pouco antes da injeção, porque são destruídos facilmente.

##### b. Retardador de ataque

A sua função é regular a tensão superficial do ácido, conseguindo assim a dupla função de

retardar a reação e favorecer a sua penetração à grandes distâncias. Como retardador, pode-se usar o  $\text{CaCl}_2$  ou álcool amílico a 1 e 10 g/l.

#### c. Anti-espumante

O ácido em elevada concentração e alguns retardadores provocam grandes quantidades de espuma. Por este motivo, convém adicionar um anti-espumante. É um produto líquido, de aspecto leitoso e inodoro, dispersável em meio ácido aquoso. Pode-se utilizar o álcool amílico de 1 a 10 g/l.

#### d. Estabilizador de ferro

Sua função é complexar os sais de ferro e alumínio procedentes da dissolução ácida, evitando a sua precipitação gelatinosa, que pode originar colmatações ou obstruções. O ácido cítrico ou o ácido láctico, numa concentração de 2 a 10 g/l, complexam o ferro e o alumínio (um calcário normal tem menos de 1% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

#### e. Dissolução dos sulfatos

Quando o meio carbonático tem  $\text{CaSO}_4$  ou a água é sulfatada, o ácido pode aumentar muito a concentração de Ca e precipitar o  $\text{CaSO}_4$ . Para evitar esta precipitação, é adicionado o hidrogeno fluoreto de amônia  $(\text{NH}_4)_2\text{HF}$ , que produz o  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , que é solúvel.

### QUANTIDADE DE ÁCIDO A EMPREGAR

A quantidade de ácido depende da vazão inicial do poço, de grau de fraturamento do aquífero e da distância do poço que se pretende atingir.

Na prática, para se ter um incremento do raio de ação do poço da ordem de 6 metros, são necessários 5.000 litros de ácido clorídrico a 12%.

O efeito dominante é a limpeza das fraturas e não o seu alargamento. Para se ter um grande aumento na espessura das fraturas, por exemplo de 0,2 mm, deverão ser realizadas três acidificações.

### EFEITOS DA ACIDIFICAÇÃO

O resultado da acidificação depende, como foi citado anteriormente, das condições iniciais dos poços e do aquífero. Os fatores principais que influem são a permeabilidade original, a espessura das fissuras, a sua menor ou maior abertura, o material de preenchimento da fratura, etc.

No Brasil, ainda não se tem estatísticas de acidificação de poços para água. A maioria dos trabalhos de acidificação são realizados pela Petrobrás para a produção de petróleo.

Algumas vezes, os incrementos de vazão são espetaculares devido ao aumento do raio de influência do poço. Observe-se que o aumento da vazão específica de um poço varia com  $\ln \frac{1}{r}$  ( $r$  = raio do poço). Por isto, para se obter o dobro da vazão, o aumento do diâmetro deve ser quase vinte a trinta vezes o raio inicial. Para um poço de 400 mm, por exemplo, o raio de influência deveria ser da ordem de 6 m. Este seria o limite mínimo que o ácido deveria penetrar.

### FRATURAMENTO HIDRÁULICO

O fraturamento hidráulico é um dos mais avançados métodos de estimulação de poços utilizado na indústria do petróleo. Recentemente, nos Estados Unidos, uma versão adaptada de baixo custo vem sendo aplicada em poços para água subterrânea com resultados bastantes satisfatórios.

O método consiste em injetar líquido, água na maioria das vezes, a elevadas pressões para criar ou aumentar fissuras na rocha. Quando cessa a pressão aplicada no poço, a rocha volta à posição inicial e as fissuras podem se fechar. Para isto, simultaneamente, são injetadas partículas de areia, bolinhas de vidro ou de plástico de alta densidade, que penetram nas fissuras abertas para impedir o seu fechamento. Normalmente, são adicionados à água de injeção um gelificante ou outros aditivos a fim de aumentar a viscosidade e, conseqüentemente, diminuir a vazão de injeção para a mesma pressão.

Em geral, a pressão de fraturação é proporcional à profundidade da formação a estimular. Este fator de proporcionalidade é igual ou superior a 0,23  $\text{kg/cm}^2$  por metro. As fissuras produzidas têm uma espessura de poucos milímetros e uma extensão de várias dezenas, talvez centenas, de metros. Cada uma dessas fissuras pode ter uma transmissividade de uma a várias dezenas de  $\text{m}^2/\text{dia}$ .

### CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

O fraturamento deve ser aplicado em poços pouco produtores, porque do contrário não seria possível aumentar suficientemente a pressão com as bombas de altas pressões e grandes vazões. Várias razões influem no insucesso de um poço. Pode-se destacar, por exemplo, que em rochas cristalinas as fraturas naturais tendem a serem congeladas em profundidade, devido ao peso das rochas sobrejacentes, reduzindo assim grandemente a permeabilidade ou a capacidade de transmissão de água pelas fraturas. As fraturas também tendem a diminuir em número com a profundidade. Por outro lado, as fraturas mais produtoras são as verticais porque não são fechadas em profundidade devido ao peso das rochas sobrepostas e são mais facilmente alimentadas pela drenagem superficial. No entanto, muitas vezes os poços são perfurados paralelos a essas boas fraturas e resultam secos ou pouco produtivos porque não interceptam as zonas permeáveis. Nestes casos, o fraturamento hidráulico é indicado porque criará um sistema de fraturamento que interconectará os poços com as zonas permeáveis.

Um requisito indispensável é que o poço deve ser revestido com tubos resistentes e bem cimentados na zona acima da profundidade a ser fraturada. Ao contrário a água escapa para o exterior ou para formações sobrejacentes.

As fissuras criadas pelo fraturamento hidráulico normalmente são verticais, tendo em vista que o esforço principal é o peso das rochas sobrepostas. A existência de zonas de fraquesa na rocha, tais como falhas, diáclases, e outras, podem condicionar o fraturamento em outra direção. Por outro lado, os planos de estratificação podem condicionar o aparecimento de fissuras horizontais.

O peso do material suprajacente origina, como foi dito anteriormente, pressões da ordem de  $0,23 \text{ kg/cm}^2$  por metro de profundidade e a maioria dos materiais fraturam  $0,13$  e  $0,41 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$  ou, em alguns casos, em pressões,  $0,13$  e  $0,22 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$  (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976), quando existem diáclases ou planos de estratificação. Em terreno saturado, esta pressão não pode ser menor que  $0,10 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$ , que é a pressão hidrostática.

A pressão de injeção, medida na boca do poço, é igual à medida no nível de injeção menos o peso da coluna de fluido e menos a perda de carga de circulação. Por exemplo, para um poço de 120 m, são necessários de 28 a  $32 \text{ kg/cm}^2$  de pressão para o fraturamento.

Os equipamentos necessários ao fraturamento são os seguintes: a) um reservatório de água com  $2 \text{ m}^3$ ; b) bomba d'água para  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  a  $98 \text{ kg/cm}^2$ ; c) motor hidráulico para bomba com 10 hp; d) um obturador de borracha inflável com 12 cm de diâmetro e 1,2 m de comprimento. Quando inflado, este obturador pode atingir um diâmetro de até 23 cm e uma pressão de  $105 \text{ kg/cm}^2$  e deve ser capaz de aguentar uma diferença de pressão da ordem de  $270 \text{ kg/cm}^2$ , em um poço de 6 polegadas de diâmetro. O obturador deve ser colocado abaixo do nível estático; f) um compressor de ar para  $279 \text{ kg/cm}^2$ ; g) um guincho e um tripé para descer o obturador e as ferramentas no poço.

#### APLICAÇÃO DO FRATURAMENTO HIDRÁULICO

O fraturamento hidráulico em poços para água subterrânea só recentemente vem sendo aplicado nos Estados Unidos e na Europa. No Brasil, o fraturamento hidráulico é aplicado apenas na "indústria do petróleo".

Em um trabalho realizado por WALTZ e DECKER (1981) na região entre Colorado Springs e Fort Collins nos Estados Unidos, o fraturamento apresentou bons resultados. Cerca de 30 poços foram hidro-fraturados com pressão média de  $55 \text{ kg/cm}^2$ . Em apenas 25% dos poços foram aplicadas pressões superiores a  $70 \text{ kg/cm}^2$ . A vazão de injeção foi da ordem de 1,5 a  $1,5 \text{ m}^3/\text{hora}$ , com um volume total de 7,5 a  $15 \text{ m}^3$ .

Em alguns poços, o obturador foi colocado em diversas posições para aumentar as fraturas existentes em diferentes profundidades.

Mais da metade desses poços mostraram aumento de vazão e/ou elevação do nível estático.

#### GELO SECO

O baixo custo e a segurança que o gelo seco oferece pode tornar este método de estimulação bastante atraente.

Inicialmente, pode-se distinguir dois tipos de aplicação de gelo seco. O primeiro, utiliza o efeito físico da sublimação do gelo seco em determinadas condições de temperatura e pressão (estimulação aberta). O outro tipo é aplicável apenas em rochas carbonáticas e utiliza propriedades físico-químicas do  $\text{CO}_2$  quando varia o seu estado físico (estimulação sob pressão).

O gelo seco possui as seguintes propriedades: ponto de sublimação  $-78,5^\circ\text{C}$  na pressão atmosférica; ponto triplo  $-56,6^\circ\text{C}$  a 5,11 atm e temperatura crítica de  $31,0^\circ\text{C}$ ; pressão crítica 72,80 atmosferas; calor latente de vaporização  $83,12 \text{ cal/g}$  no ponto triplo e  $56,13 \text{ cal/g}$  a  $0^\circ\text{C}$  e 1 atm, densidade do líquido  $0,914 \text{ kg/l}$  a  $0^\circ\text{C}$  a  $34,3 \text{ atm}$ ; densidade do sólido  $1,512 \text{ g/cm}^3$  a  $-56,6^\circ\text{C}$ ; solubilidade na água,  $1,713 \text{ vol/vol}$  a  $0^\circ\text{C}$  e  $0,759 \text{ vol/vol}$  a  $25^\circ\text{C}$  e 760 mm de pressão parcial de  $\text{CO}_2$ .

A vantagem de  $\text{CO}_2$  sólido sobre o gelo comum é somente porque o  $\text{CO}_2$  tem mais capacidade de refrigeração ( $153 \text{ Kcal/kg}$ ) que o gelo comum ( $86 \text{ Kcal/kg}$ ) e quando o primeiro funde-se não formando água.

#### ESTIMULAÇÃO ABERTA

O volume de gás despreendido pelo gelo seco, quando passa do estado sólido para o gasoso, tende a produzir dentro do poço o mesmo efeito de sucção de um pistão. Por debaixo do nível estático, forma-se uma verdadeira câmara de gás, levantando toda a coluna de água que se encontra acima. Para que se forme esta câmara de gás é necessário que a velocidade de sublimação do gelo seco seja maior que a velocidade ascensional das bolhas formadas. No caso de ser igual ou menor, o gás escapa e não consegue expulsar a água do poço.

Nos poços com lâmina d'água superior a 41 m, a velocidade de sublimação torna-se muito grande e pode produzir expulsões rápidas da água do poço. O fenômeno é o seguinte: quando desce o bloco sólido de  $\text{CO}_2$  dentro da água do poço aumenta a pressão sobre ele (a hidrostática mais a atmosférica). Até os 42 m ( $4,1 + 1 = 5,1 \text{ atm}$ , pressão do ponto triplo) o calor de troca de estado físico é elevado ( $75 + 33 = 128 \text{ Kcal/Kg}$ ) e, portanto, a formação de gás está muito limitada. Quando chega às condições de ponto triplo (41 m de profundidade) ou em profundidades maiores, já o  $\text{CO}_2$  passa do estado sólido a líquido com poder calorífico menor ( $-8 + 53 = 45 \text{ Kcal/kg}$ ). Isto

faz com que o fenômeno de desaparecimento do sólido se acelere repentinamente uma vez que o líquido se elimina da superfície do sólido com tanta ou maior rapidez que o gás, devido a sua grande solubilidade na água, aliada ao calor de dissolução, que acelera a rapidez do fenômeno. Esta mudança de estado físico produz um notável aumento de volume, superior a 150 vezes (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976), que projeta a coluna de água para fora do poço. Se o nível estático é profundo, pode acontecer que a água não jorre, mas tem-se um movimento de vai e vem dentro do poço, similar ao pistoneamento ou a outros tipos de desenvolvimento de poços.

A estimulação com gelo seco não deve ser empregada em todas as circunstâncias. Deve sempre ser executada conjuntamente com outros métodos de desenvolvimento e estimulação de poços. Este método deve ser empregado para remover finos detritos que colmatam os poços, tanto em aquíferos consolidados como os não consolidados. É conveniente colocar previamente polifosfatos na água para manter as argilas em suspensão. Se for possível, sempre deve ser feito um pistoneamento do poço antes de se colocar o gelo seco.

Para que os pedaços de gelo seco atinjam a profundidade requerida, vencendo o efeito de frenagem das bolhas e o empuxo da água, é necessário uma queda livre acima do nível estático de no mínimo 15 a 20 m. Quanto menor o tamanho dos pedaços de gelo, mais eficiente é o método (maior reação de superfície e volume). No entanto, pedaços muito pequenos flutuarão na água e não atingirão a profundidade desejada para a sublimação rápida. Por outro lado, pedaços muito grandes poderão aprisionar-se nas saliências das paredes do poço.

A quantidade de gelo seco a ser utilizada pode ser da ordem de 1 kg por cada m<sup>3</sup> de água no poço, isto é, da ordem de 30 a 150 kg por experiências (pode-se usar maiores quantidades). O jorro de água ocorre entre 40 e 100 segundos e duram até 30 segundos. Pode ocorrer repetição de jorro d'água segundo a quantidade de gelo colocada no poço e a recuperação do nível estático. Estas repetições podem ocorrer depois de 3 a 6 minutos dependendo das condições do aquífero.

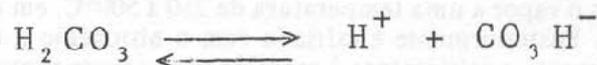
#### ESTIMULAÇÃO SOB PRESSÃO

As rochas carbonáticas (calcários, dolomitos, e outras) são dissolvidas por água com CO<sub>2</sub>. Esta disposição depende da quantidade de CO<sub>2</sub> dissolvido na água e da sua temperatura.

A reação química é:



O ácido carbônico se dissocia, por sua vez, nos seus ions componentes, segundo expressão química:



Aumentando a quantidade de CO<sub>2</sub>, esta reação se desloca para a direita a esta adição ou mesmo subtração de CO<sub>2</sub> depende também da temperatura (inversamente proporcional). A dissolução dos carbonatos depende principalmente da formação do ion CO<sub>3</sub>H por dissociação do ácido carbônico.

A estimulação com gelo seco em rochas carbonáticas baseia-se justamente na dissolução do CO<sub>2</sub> na H<sub>2</sub>O, como consequência da sublimação rápida de CO<sub>2</sub>, que baixa também rapidamente a temperatura da água facilitando esta dissolução. Estas condições favorecem a formação de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> que reage com o CaCO<sub>3</sub> para formar o bicarbonato cálcico Ca(CO<sub>3</sub>H)<sub>2</sub> solúvel em água.



O método consiste em colocar gelo seco no poço, que esteja com revestimento bem cimentado e que sua boca possa ser hermeticamente fechada e aguentar elevadas pressões. Na boca do poço coloca-se um manômetro, uma torneira para saída de gás e um tubo de injeção de CO<sub>2</sub>.

O ácido carbônico gerado no interior do poço penetra no faturamento da formação. Esta penetração é devida à alta pressão acumulada na boca do poço. Esta pressão é conhecida através do manômetro da boca do poço e regulada pela torneira de gás. A formação de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, é contínua porque se pode injetar novas quantidades de gelo seco.

O limite de injeção de CO<sub>2</sub> no poço é função da pressão tolerável do terreno e pelo perigo de congelamento da água no interior do poço. Esta quantidade é dada pela equação:

$$Q = m c \Delta t$$

onde "m" é a quantidade em peso de gelo seco injetado, "c", calor específico e "Δt", o incremento da temperatura.

### OUTROS MÉTODOS DE ESTIMULAÇÃO

Atualmente vários métodos de estimulação e de perfuração de poços encontram-se em fase de experimentação e que podem, em um futuro próximo, tornar-se importantes técnicas de captação de água subterrânea.

Pode-se dividir esses métodos em quatro mecanismos básicos: os de indução de tensões mecânicas, os de indução de tensões térmicas, os de fusão e vaporização das rochas e os químicos.

A seguir, são descritos alguns dos métodos que estão sendo testados.

#### CONGELAMENTO DA ÁGUA DO POÇO

O congelamento da água do poço e das fraturas pode favorecer o aparecimento de novas fraturas ou aumentar os existentes. O aumento do volume da água quando se congela pode provocar um fraturamento no poço e desenvolver as fraturas existentes, aumentando assim a vazão do poço e a capacidade de armazenamento de água ao seu redor.

Os métodos de congelamento de água em rochas atualmente são anti-econômicos. Estes métodos são mais usados para estabilização de taludes em escavações de obras civis ou na mineração.

#### FAÍSCAS ELÉTRICAS

A produção de faíscas elétricas de alta voltagem dentro da água produz pulsações de alta pressão capazes de romper as rochas. Sob a influência de campos elétricos potentes, forma-se um canal condutor de gases ionizados entre os eletrodos. A energia armazenada nesta pequena zona condutora é capaz de criar um fluido de alta temperatura que pode exercer uma pressão da ordem de  $10^4$  a  $10^5$  atmosferas na água, que rodeia a faísca.

#### ONDAS ULTRASSÔNICAS

Para este método utilizam-se fontes magnéticas ou elétricas, que emitem vibrações nas frequências de 20 a 30 quilociclos por segundo. Estas fontes são constituídas de um núcleo magnético de níquel pelo qual passa-se uma corrente elétrica de alta frequência. Sob a ação do campo magnético variável, este núcleo se expande e se contrai com uma amplitude de algumas micra e com uma frequência igual à frequência da corrente. A amplitude desta vibração pode ser ampliada de 10 a 100 vezes utilizando-se uma caixa de ressonância.

Este método requer uma grande quantidade de energia tornando-o anti-econômico para estimulação de poços.

#### CICLO TÉRMICO

O princípio é o aquecimento e esfriamento cíclico da rocha mediante a aplicação de vapor super-aquecido e nitrogênio líquido.

A rocha é aquecida com o vapor a uma temperatura de 250 a 500°C, em uma pressão de 40 a 60 kg/cm<sup>2</sup> durante 3 minutos. Posteriormente é esfriada com o nitrogênio a uma temperatura de -196°C. Este ciclo de aquecimento e esfriamento é repetido várias vezes provocando o fraturamento da rocha do poço por fadiga mecânica.

#### CAMPOS ELÉTRICOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS

Vários ensaios de laboratórios e no campo provam que os campos elétricos de alta frequência podem romper rochas.

Estes campos aquecem a rocha mediante dois mecanismos: um dielétrico e outro de calor produzido pela resistência elétrica. O dielétrico se produz pelo atrito dos eletrodos com a rocha e a resistência pelo efeito da corrente através da rocha.

São utilizadas voltagens da ordem de 1.000 a 10.000 volts. Rochas duras e compactas, tais como granito ou basalto, são mais facilmente desintegráveis por este sistema.

#### MICRO-ONDAS

As rochas se aquecem ou podem se quebrar mediante a aplicação de micro-ondas com frequências de 10 a 3000 megaciclos/segundo.

A diferença entre a estimulação com micro-ondas e as de alta frequência elétrica é a que a micro-ondas opera em frequências muitíssimo mais altas e predomina o aquecimento dielétrico, enquanto na alta frequência são utilizados eletrodos que entram em contato com a rocha e geralmente predomina o calor por resistência, uma vez que forma um canal condutor entre os eletrodos.

As micro-ondas são pouco eficientes porque a água absorve e reflete a maior parte da energia produzida, conseqüentemente a energia requerida para aquecer a rocha até 600°C é muito grande, o que torna o método bastante anti-econômico.

Outros métodos estão sendo pesquisados em laboratório e no campo e cujos resultados são pouco conhecidos. Pode-se destacar os raios laser, reatores nucleares, arco voltaico, químicos com flúor e outros reativos que produzem reações de alta velocidade, etc.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. BENITEZ, A. (1972) Captación de águas subterranas. Nuevos metodos de prospección y de calculo de caudales. 2a ed.. Madrid, Espanha, Editorial Dossat S.A. 618p.

02. BURDON, D. J. (1974) Can freezing improve wells in consolidated rocks aquifers? *Johnson Driller's Journal*, Minnesota, U. S. A., maio/junho p.5-6.
03. CAMPBELL, M. D. & LEHR, J. H. (1973) — Water well technology. McGraw-Hill Bohh Comp., New York. p.681.
04. CASTANY G. (1975) Prospección y explotación de las aguas subterranas. Trad. em espanhol. 1ª ed., Ediciones Omega S.A. p.534-43.
05. CINTRA, B. H. (1972) Desmonte escultural. *Rev. Escola de Minas-Ouro Preto*, MG, ano XXXVI, 3:7-16.
06. CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. (1976) Hidrologia subterrânea. 1ª ed., Barcelona, Espanha, Ediciones Omega s.A. Tomo II:1740-82.
07. GHEORGHE, A. (1978) Processing and synthesis of hydrogeological data. Abacus Press, Romania. p.256-77.
08. GORDON, R. W. (1968) Perfuração de poços a percussão. Recife, Sudene-Dnocs-Conesp. 256p.
09. PULIDO, J. (1978) Hidrogeologia practica. 1ª ed., Bilbao, Espanha, Urmo S/A de Ediciones. p.149-73.
10. SILVA, A. B.; ESCODINO, P. C. B.; NERY, A. C. P. (1981) Estimulação de poços tubulares por meio de explosivos, nos karst da região do Jaíba, norte do Estado de Minas Gerais. *Rev. Águas subterrâneas*, São Paulo, 4:45-68.
11. VARGAS, V. A. (1976) Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y aguas subterranas. 1ª ed., México, Editorial Limusa. p.383-98.
12. WALTON, W. C. (1970) Groundwater resource evaluation. McGraw-Hill serie in water resources and environmental engineering. New York, McGraw Book Company. p.321-59.
13. WALTZ, J. & DECKER, T. L. (1981) Hydro-fracturing offers many benefits. *Johnson Driller's Journal*, Minnesota, U. S. A. Second quarter. p.04-09.
14. YASSUDA, E. R. (1967) Poços. Manual Técnico do Departamento do Exército dos U. S. A., USAID, São Paulo, 5(297):158-210.