

AVALIAÇÃO QUALITATIVA DE AQUÍFEROS FISSURADOS

A. Hausman *

* Companhia Riograndense de Saneamento

ABSTRACT

Wells drilled in crystalline basement rocks may present unpleasant surprises when put under constant rate operational conditions, even if based on well executed pumping tests of prolonged duration. Observations demonstrated the existence of a certain relationship between the real well production and the specific capacity calculated on the base of the transmissibility coefficient. Productivity of a well in fractured rock may present a much higher specific capacity during pumping test than it effectively possesses resulting in a false notion of productivity. In prolonged pumping tests the recuperation graph enabling the calculation of the transmissibility coefficient achieves a characteristic form, indicative for the aquifer which can not sustain a certain yield under explorational condition. This means that the well should not be pumped constantly at the pumping rate of the test. The identification of this graph, based only on some recuperation data in the pumped well, permits a qualitative prediction of well performance.

INTRODUÇÃO

A circulação da água através de rochas fissuradas, constitui, apesar dos grandes avanços obtidos no setor, um desafio a capacidade de investigação no campo da Hidrogeologia. A partir dos trabalhos de quantificação com base na Lei de Darcy, e o desenvolvimento da equação de Theis, para aquíferos porosos, o avanço e a sofisticação, foi de tal ordem, que os métodos relativos à quantificação e determinação das características hidrogeológicas, apesar das complexidades existentes, motivadas pela variação vertical e horizontal da permeabilidade, foram bastante grandes, permitindo uma quantificação razoável dos aquíferos porosos. No que toca a rochas fissuradas, o problema é muito mais complexo, pois a anisotropia e as características hidrológicas, em grande parte, eram desconhecidas, ou simplesmente inferidas. Os primeiros trabalhos visavam determinar a permeabilidade dos maciços rochosos *in situ*, com finalidade de definir condições de estabilidade e estanqueidade para barragens, túneis e etc. Estes primeiros dados, e a continuidade das pesquisas no campo da Geologia Aplicada, permitiram um grande número de dados e avanços no conhecimento das características das rochas fissuradas, quanto ao seu comportamento com relação ao fluxo de água, permitindo uma série de conhecimentos aplicáveis aos problemas de poços. Devido a grande complexidade dos aquíferos fissurados, a aplicação de fórmulas usadas em aquíferos porosos, na grande maioria das vezes, não apresenta resultados coerentes, capazes de inspirar confiança, fato que também se observa nas fórmulas desenvolvidas especialmente para aquíferos fissurados, como mostram claramente as fórmulas de A C Gringarten e P A Witherspoon (1.972), que especificam uma fórmula para juntas horizontais e outra para verticais, o que é dificilmente observado na natureza separadamente. As generalizações atribuídas com a finalidade de elaborar modelos, também tem resultado, na grande maioria das vezes, em dados incoerentes.

ESTADO ATUAL

Os conhecimentos adquiridos, com relação a circulação da água em aquíferos fissurados, foram em sua maioria resultante dos ensaios in situ, e alguns de observação do comportamento dos poços neles perfurados, os quais, podem ser resumidos no seguinte:

- a - o fluxo através das fissuras se faz isoladamente ou através de um sistema de fraturas, havendo sempre uma intercomunicação entre as micro e macro fraturas;
- b - a permeabilidade se apresenta com variações para mais ou menos segundo faixas determinadas;
- c - a permeabilidade das juntas varia com a profundidade e a pressão, variação esta que não é linear. O limite da permeabilidade para determinada pressão, varia com a abertura, profundidade das fraturas e densidade do maciço;
- d - nos túneis, foi observado que a circulação nem sempre se faz ao longo do plano de juntas, mas sim de forma cilíndrica, provavelmente devido a rugosidade nos seus planos. O processo de circulação cilíndrica é muito notada em rochas calcáreas;
- e - a resposta da variação dos níveis em poços interferentes, quando um deles é bombeado, pode oscilar desde instantaneamente (mesmo que o poço esteja situado a quase 1 km), até um retardamento bastante grande.

Quantificação

A quantificação dos aquíferos fissurados, esbarra com um dos problemas mais graves, quais seja, a grande anisotropia do meio o qual deve ser superado pela generalização, para o que se assume um valor médio que possa representar as condições generalizadas do maciço. Entre as hipóteses assumidas para a quantificação podemos citar:

- a - existência de junta alimentadora vertical ou horizontal;
- b - a determinação do tipo de junta alimentadora é realizada a partir do próprio teste;
- c - o sistema anisotrópico é reduzido a um equivalente isotrópico;
- d - as soluções podem ser de dois tipos: 1 - para pressão constante ao longo da fratura e 2 - para fluxo constante por unidade de área da fratura;
- e - existe uma variação do fluxo com a mudança do ângulo formado pelas juntas em relação a direção da circulação da água;
- f - a obtenção dos dados quantitativos para o cálculo devem, de preferência, basear-se em dois poços observatórios, a fim de neutralizar a anisotropia do aquífero;
- g - o reservatório é infinito;
- h - as fraturas apresentaram-se isotrópicas ao longo do seu comprimento;
- i - o aquífero apresenta-se confinado;
- j - as pressões estão uniformemente distribuídas;
- k - a circulação é ilimitada;
- l - os aquíferos apresentam um coeficiente de armazenamento comparável ao dos aquíferos porosos;
- m - o comportamento dos poços em bombeamento, com relação ao observatório, é semelhante ao dos poços em aquíferos porosos;
- n - o aquífero é totalmente penetrado;
- o - a densidade das juntas por unidade de área;
- p - abertura juntas. A maior parte dos elementos levados em conta para o cálculo, são estimados, ou atribuídos valores, que segundo as deduções levam em conta o bom senso para a sua valorização matemática e alguns de muito difícil verificação e avaliação. A complexidade dos dados requeridos, bem como os elementos levados em conta para a quantificação, tornam-a muito onerosa e difícil e de resultados nem sempre dignos de confiança.

Modelos

Em face da complexidade da circulação em meio fissurado, a tentativa de quantificação através de modelos, tanto físicos como matemáticos, permitiram equacionar alguns dos problemas, ressaltando que:

- a - para as rochas fissuradas assume importância a aplicação de modelos descontínuos, em face da grande anisotropia observada neste tipo de material;

- b - a aplicabilidade dos modelos descontínuos depende da possibilidade de medir com suficiente precisão os elementos individuais o que nem sempre é factível;
- c - a heterogeneidade do meio, rocha - fissurada, constitui um obstáculo muito difícil de ser resolvido;
- d - com o grande número de ensaios existentes, e com o aumento constante de dados de observação, a aplicação de métodos estatísticos podem facilitar a definição de parâmetros que permitem o cálculo;
- e - o emprego de modelos, somente é viável, quando as linhas equipotenciais forem elípticas, concordando com os principais teóricos que regem tais problemas, partindo principalmente para generalização isotrópica equivalente;
- f - o melhor meio de se obter grandezas relacionadas como as características hidrogeológicas dos maciços rochosos é a medição das descargas.

Observações de Campo

A nossa observação, como relação ao comportamento do fluxo da água em maciços fissurados, não coincide com uma parte das generalizações apresentadas anteriormente, as quais, podem ser aplicadas a casos particulares, quando as observações coincidem com as generalizações teóricas. A nossa experiência, em um grande número de poços, mostrou que mesmo em casos de interferência, o comportamento deles, quando em repouso ou bombeamento, não obedece aos padrões teóricos atribuídos, quando se tenta generalizar para efeito de cálculo ou de construção de modelos. Constatamos na grande maioria dos casos que:

- a - os reservatórios não são infinitos, nem para efeito de cálculo na grande maioria dos casos;
- b - os aquíferos, ou melhor as entradas de água, podem ocorrer em vários níveis, ou linhas localizadas, por se manifestarem sob forma de horizontes. Não temos uma distribuição uniforme das fraturas, e as juntas resultantes das tensões, não formam um sistema fissurado idealmente distribuído, quanto a abertura das juntas e sua distribuição;
- c - as fissuras não apresentam isotropia ao longo dos seus planos;
- d - as pressões não se apresentam uniformemente distribuídas, pois verificamos em poços interferentes, situados na mesma cota topográfica e cortando a mesma fratura, variações dos níveis estáticos, indicando claramente diferenças nas pressões ao longo da fratura;
- e - a circulação apresenta variação bastante acentuada ao longo de um plano de fratura, determinado mudanças na descarga, de poços ao longo dele perfurados;
- f - os poços observatórios, em aquíferos fissurados, dão resultados totalmente fora da realidade, com valores de transmissibilidades muito exagerados, provavelmente devido a anisotropia do maciço, resultando na variação das respostas, de acordo com a posição e o afastamento, dos poços observatórios, em relação a direção das linhas de maior circulação, desenvolvendo-se geralmente os cones de influência, de forma extremamente alongada, acompanhando a direção das linhas de maior fraturamento;
- g - a aplicação da lei de Darcy, a um aquífero fissurado, parece que não funciona, pois as características são distintas. O traçado das isopiésticas, levando em conta os níveis dos poços, em aquíferos fissurados, mostrou ser totalmente errônea, tanto no que diz respeito à direção da circulação com a permeabilidade relativa, indicada pelo afastamento entre as isopiésticas. A simplificação, por vezes em demasia, faz com que os resultados, na melhor das hipóteses representem um caso particular, e não a generalização do problema. Em outros casos, ao não levar em conta a tectônica, pode introduzir erros de difícil avaliação. As hipóteses que consideram a existência de um nível homogêneo, para os aquíferos fissurados, tampouco é observado na maioria dos casos, levando a supor que, o sistema fissurado, não se enquadra sempre, num conjunto submetido as leis dos vasos comunicantes. Os ensaios realizados com poços observatórios nos mostraram, na grande maioria das vezes que isto foi possível, resultados inconsistentes com valores muito superiores aos reais. Algumas quantificações levam em conta, para cálculos, o número ou a densidade das fraturas, valores estes de difícil avaliação, principalmente quando se trata de ter

renos em clima úmido ou com cobertura de rigolito ou sedimento. Na grande maioria dos casos, os valores de quantificação quando aplicados para casos individuais, dão uma disparidade que invalida qualquer generalização. Devido a grande anisotropia e variações muito grandes, entre poços perfurados na mesma área, as necessidades práticas exigem uma definição para cada poço individualmente, bem como ter segurança na sua exploração.

AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DOS POÇOS

O conhecimento com relação a circulação e comportamento, dos poços perfurados em rochas cristalinas, é pequeno e imperfeito sendo a aplicação dos princípios que regem a circulação em materiais porosos, por analogia, a este tipo de aquífero, apresentar uma série de surpresas por não funcionar, para o caso, a contento. Um dos problemas que temos tido, durante vinte anos que tratamos com poços em rochas fissuradas, perfurados em granitos, metassedimentos, basaltos, etc., é o da manutenção da vazão de teste determinados em bombeamentos com duração superior a vinte e quatro horas, e quando postos em regime de produção, desencadearam um processo de diminuição gradativa da descarga, diminuição esta que chegava, em alguns deles, quase a exaustão. O período de tempo de bombeamento necessário para desencadear o processo acima citado, varia bastante de poço para poço, podendo se manifestar após meses, ou mesmo mais de um ano, de sua entrada em operação, dependendo do volume e intensidade de bombeamento. Estes fatos nos levaram a procurar utilizar todos os recursos possíveis, a fim de evitar o desencadeamento do fenômeno acima citado, procurando elaborar quantificação cada vez mais sofisticados, que não apresentaram os resultados esperados. A necessidade de prever os casos em que os poços entrariam em queda de produtividade, são bastante óbvios, uma vez que os equipamentos de bombeamento, representam um investimento adicional por vezes superior ao custo do próprio poço, visando com isto, evitar um investimento oneroso em poços que, com o tempo, passariam a ser anti-econômicos ou inoperantes. A obtenção de um método que nos permite prever com antecedência esta possibilidade, foi fruto de observação empírica, relacionando os dados hidrológicos dos poços, com os resultados observados durante a sua entrada em regime de operação, quando utilizados para o abastecimento de núcleos urbanos, evoluindo através de duas etapas. O método desenvolvido, permite avaliar qualitativamente o desempenho futuro do poço, caso bombeado com a vazão de teste, usando unicamente os dados de ensaio de bombeamento, utilizando-se da curva de recuperação.

Correlação das Capacidades Específicas

Há vários anos estamos procurando definir a transmissibilidade de poços em aquíferos fissurados, utilizando para tanto, os dados de recuperação do próprio poço de bombeamento. A não utilização de um piezômetro para este fim, é bastante óbvia, levando-se em conta que o seu custo é muito elevado, o que não permitiria o seu emprego sempre que necessário, e por outro lado, a experiência nos mostrou que os dados obtidos com poços interferentes, em rochas fissuradas, usando um deles como piezômetro, nos deu resultados extremamente altos, incompatíveis com as vazões obtidas no teste. Dos dados obtidos de bombeamento, com medidas de recuperação no próprio poço de bombeamento, é traçada a curva em papel semilog, utilizando-se o método de Jacob para calcular a transmissibilidade, a partir da recuperação. A partir da transmissibilidade, calculamos a capacidade específica, que denominamos de teórica e representamos por "qst". Das vazões de teste se calcula a capacidade específica de teste representada por "qs". O Geólogo Arnaldo Roberto de Brum, tabulando estes dados, verificou que os poços bombeados com a vazão de teste, apresentavam reduções substanciais de vazão, quando os "qs" eram menores que os "qst". Com esta constatação, passamos a dimensionar as descargas dos poços, pela capacidade específica teórica - "qst" - sempre que ela era menor que a de teste - "qs" -. Os rebaixamentos eram limitados pelas profundidades dos níveis de contribuição, e as vazões não deviam superar as vazões de teste. Com a aplicação deste método, eliminamos as reduções de capacidade de descarga de alguns poços, com quanto outros, continuaram com a diminuição gradual da vazão.

Análise das Curvas de Recuperação

A aplicação da técnica anteriormente citada, não eliminou totalmente os casos de perda de capacidade da descarga, o que nos obrigou a revisar os elementos disponíveis, a fim de poder prever as possibilidades de funcionamento prolongado, do poço, na fase de operação. A análise dos poços, que apresentavam exaurimento com a vazão de teste, possuíam todos um aspecto comum entre eles, que os diferenciavam dos poços estáveis, ou seja, a forma da curva de recuperação. Esta observação se baseou em mais de 150 poços em operação, dos quais, 25 apresentaram exaustão, reduzindo as suas descargas, de forma a torná-los anti-econômicos para o abastecimento público. Em geral as curvas de recuperação, desenhadas em papel semilo para poços em aquíferos fissurados, apresentam características semelhantes ao dos aquíferos complexos, principalmente dos que apresentam variação horizontal da permeabilidade. A observação das curvas permite distinguir nelas, aspectos que podem ser interpretados como aquíferos com uma permeabilidade K junto ao poço e outra K_1 mais afastada. O comportamento destes dois segmentos da curva permitem interpretar as condições de funcionamento do poço com a vazão de teste. Curva de Poço Estável - As curvas de recuperação de poço que apresentaram estabilidade de vazão, mostraram uma peculiaridade bem definida, que de certa forma, podemos definir como uma curva que apresenta um aumento de permeabilidade com o afastamento do poço. Esta curva pode ser caracterizada como: $K < K_1$. O segmento da curva representando permeabilidade K_1 deve apresentar sempre a porção do tempo de observação mais prolongada que o do representativo da permeabilidade K . Fig. 1. Curva de Poço Instável - Os poços que não apresentam manutenção da vazão de teste, apresentam as curvas de recuperação com um aspecto inverso ao dos anteriores. Ela pode ser caracterizada como uma curva que apresenta diminuição da permeabilidade com o afastamento do poço. Esta curva pode ser caracterizada como: $K > K_1$. O segmento da curva que representa a permeabilidade K_1 , deve apresentar sempre a porção do tempo de observação mais prolongada caracterizando-se por um mergulho acentuado. Fig. 2.

ANÁLISE DA CURVA DE POÇO INSTÁVEL

A ocorrência da curva referida, em 95% dos poços que apresentaram redução da vazão ou esgotamento, quando bombeados com a vazão de teste, nos deu uma indicação que com o tempo confirmava a observação anterior, e permitia a avaliação da possibilidade de sua exploração ou não, evitando o investimento em equipamentos de extração e controle em poços não satisfatórios. Esta curva somente se manifesta quando os bombeamentos tem duração superior a vinte e quatro horas, caracterizando-se com maior intensidade quando os bombeamentos, sem interrupção, atingem grande duração. Ela lembra as apresentadas por W.E. Walton (1970), para aquíferos que estão limitados por barreiras ou por decréscimo lateral da permeabilidade, quando superada a capacidade de reabastecimento vertical, a partir do aquífero. Um fenômeno semelhante, pode ser interpretado para o caso dos poços em rochas fissuradas, refletindo o aumento do gradiente, o decréscimo de "permeabilidade" do aquífero, com o seu afastamento, em uma ou duas direções, em relação ao poço. Usamos o termo "permeabilidade" como sinônimo de fluxo através do sistema de fissuras, reconhecendo que a aplicação "in sensu-strictus" do termo não é recomendável, apesar de usado normalmente para rochas fissuradas. Tratando-se de aquíferos fissurados, a circulação se faz por faixas, na grande maioria das vezes, coincidentes com as linhas tectônicas, o que determina uma variação assimétrica da "permeabilidade", orientada pela direção da estrutura. A tendência mais generalizada é que esta diminuição se faça, muito mais acentuadamente, no sentido normal do que paralelo a ela. Os fatores que influem sobre a variação da "permeabilidade" são: a abertura, a extensão, a rugosidade e paralelismo das juntas e etc. A variação dos parâmetros hidrológicos das juntas, devido aos fatores físicos acima referidos, se faz sentir no sentido horizontal, devido ao afastamento da zona de mais intensa disjunção e no vertical, pela diminuição dos espaços entre as juntas. A diminuição da "permeabilidade" não se faz de forma linear com a profundidade, nem com o afastamento da linha de máxima tensão. A redução das aberturas das juntas, não é gradual, mas descontínua. O bombeamento prolongado, faz com que o cone de influência se estenda até as zonas de menor "permeabilidade", rebaixando a maior área possível, dentro do aquífero de maior "permeabilidade", fato este que exige

um tempo suficientemente longo de bombeamento, a fim de que o cone se estenda suficientemente dentro da área de menor "permeabilidade" possibilitando a sua influência na curva de recuperação. A extensão dos segmentos da curva, bem como o seu aspecto, mais ou menos pronunciado, qual seja, o ângulo de inclinação do setor correspondente a menor "permeabilidade", vai depender da posição do poço em relação as áreas de maior ou menor "permeabilidade".

BIBLIOGRAFIA

- BOGOMOLOV, G. "Hydrogeologic et Notions de Geologie d'Ingenierie", Editions de la Paix, Moscou.
- CALDWELL, I.A. (1972), "The Theoretical Determination of the Permeability Tensor for Jointed Rocks", Stuttgart.*
- CASTILLO, E., (1972), Mathematical Model for Two - Dimensional Percolation through Fissured Rocks", TI-D Stuttgart.
- CUSTODIO, E. E LLAMAS, M.R., (1976), "Hidrologia Subterránea", Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- EAGON Jr., H.B. E JOHE, D.S., (1972), "Practical Solutions for Pumping Tests in Carbonat - Rock Aquifers", Ground Water, Vol. 10 n.4, julho e agosto.
- FAIRHURST, C.E ROEGIER, J.C., (1972), "Estimation of Rock Permeability by Hydraulic Fracturing, A Suggestion", D2-1, Stuttgart.*
- HARPER, T.R., (1972), "Some Observation of the Influence of Geological Environment upon Groundwater", T4, D1, Stuttgart.*
- GRINGARTEN, A.C. E WITHERSPOON, P.A., (1972), "A Method of Analysing Pump test Data from Fractured Aquifers", T3 B1, Stuttgart.*
- KRIZEK, R.J., G.M. E SOCIALS, E., (1972), "Dispersion of a Contaminant in Fissured Rock", T3 - C1 Stuttgart.*
- MORFELDT, C.O., (1972), "Drainage Problems in Connection with Tunnel Construction in Precambrian Granitic Bedrock (in Sweden)", T4 - G1 - Stuttgart.*
- MAINI, Y.N.T. E NOORISHAD, J., (1972) "Theoretical and Field Considerations on The Determination of in Situ Hydraulic Parameters in Fractured Rock", T1 - E1 Stuttgart.*
- SAMEL, E.A., (1974), "Aquifer Tests in Large-Diameter Wells in India", Ground Water vol. 12, n.5 spt. outubro.
- SCHARP, J.C. E MAINI, Y.N.T., (1972) "Fundamental Consideration on the Hydraulic Characteristic of Joints in Rock" T, Stuttgart.*
- SUMERS, W.K., (1972) "Specific Capacities of Wells in Crystalline Rocks", Ground Water, vol. 10 n.4, julho, agosto.
- TIRANT, P. le BARONG, (1972), "Écoulement dans le Roches Fissures et Contraintes Effectives, Application a La Production D'Hydrocarbours et a la Fracturation Hydraulics des Reservoirs", T Stuttgart.*
- WITTEKE, W., RISSLER, P E SEMPRICHS, (1972), "Raumliche Laminare und Stromung in Klüftigem Fels nach Zwei Verschiedenen Rechenmodellen", T1 - H1, Stuttgart.*
- WALTON, W.C., (1970), "Ground Water Resource Evaluation" Mc Graw, Hill Book Company.

* O asterístico indica que os artigos foram publicados no Proceedings do Symposium - Percolation Through Fissured Rock Stuttgart 1972 da International Society for Rock Mechanics e International Association of Engineering Geology.

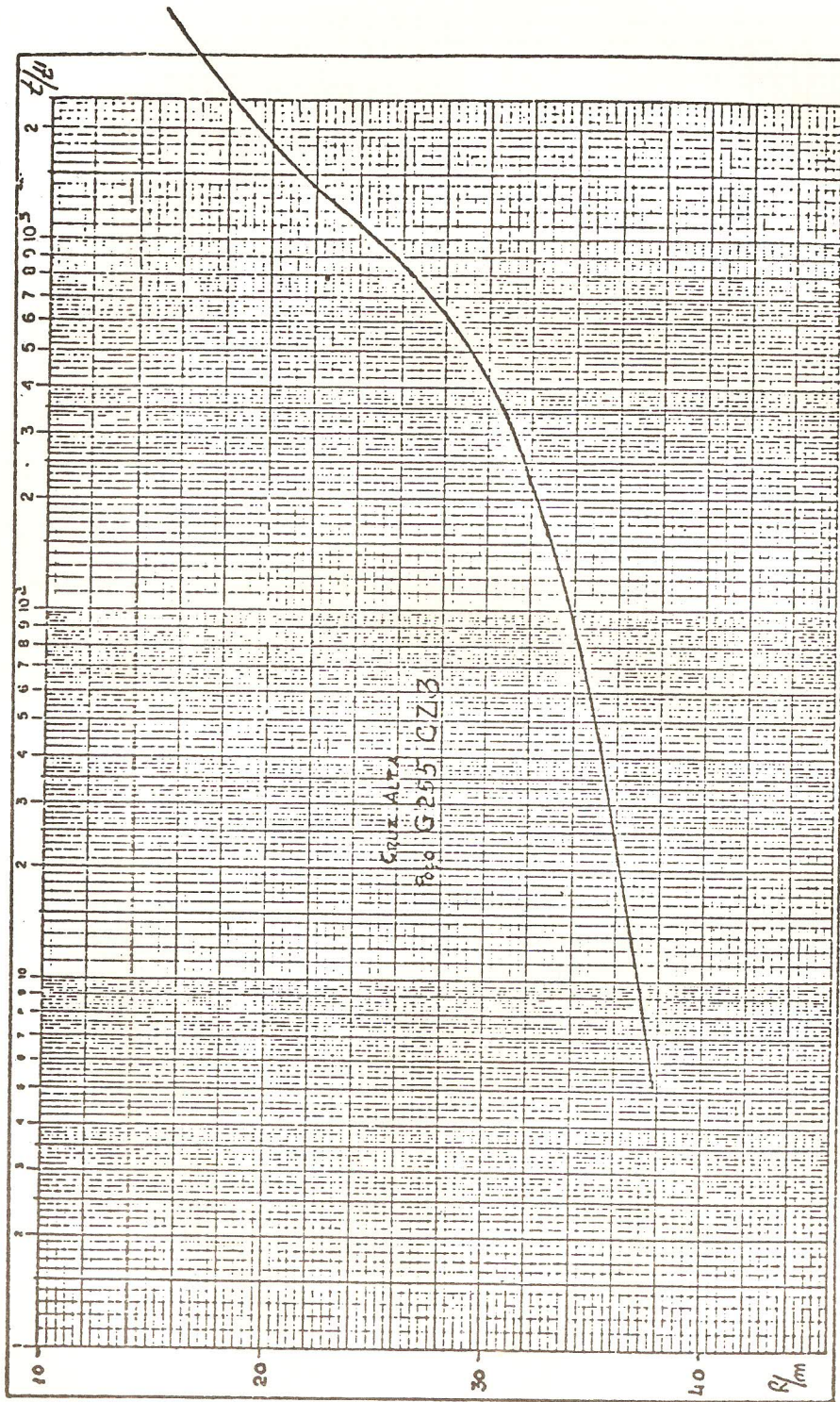


Figura 1

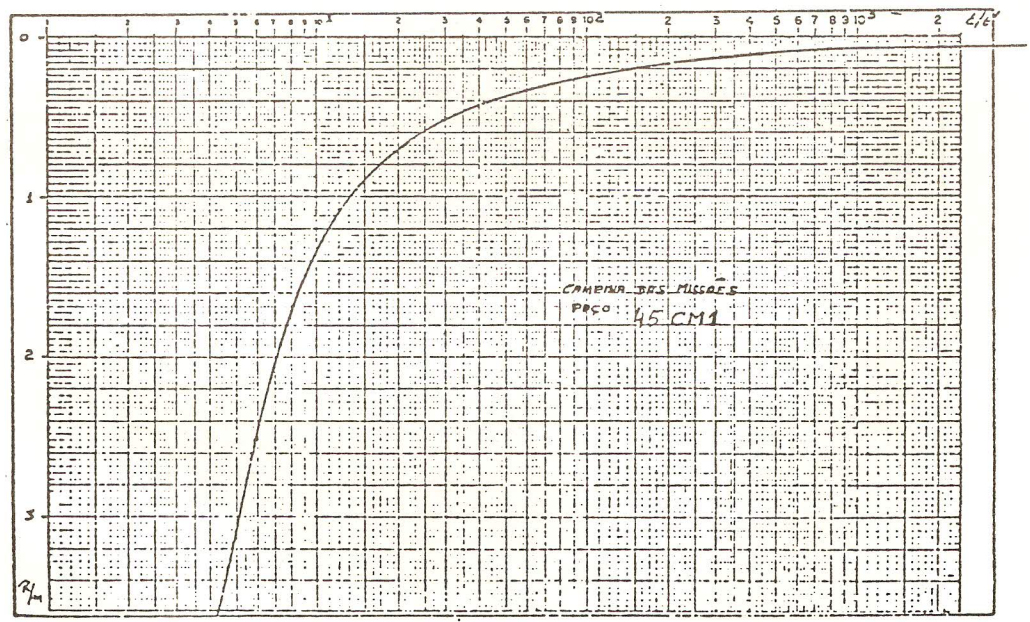
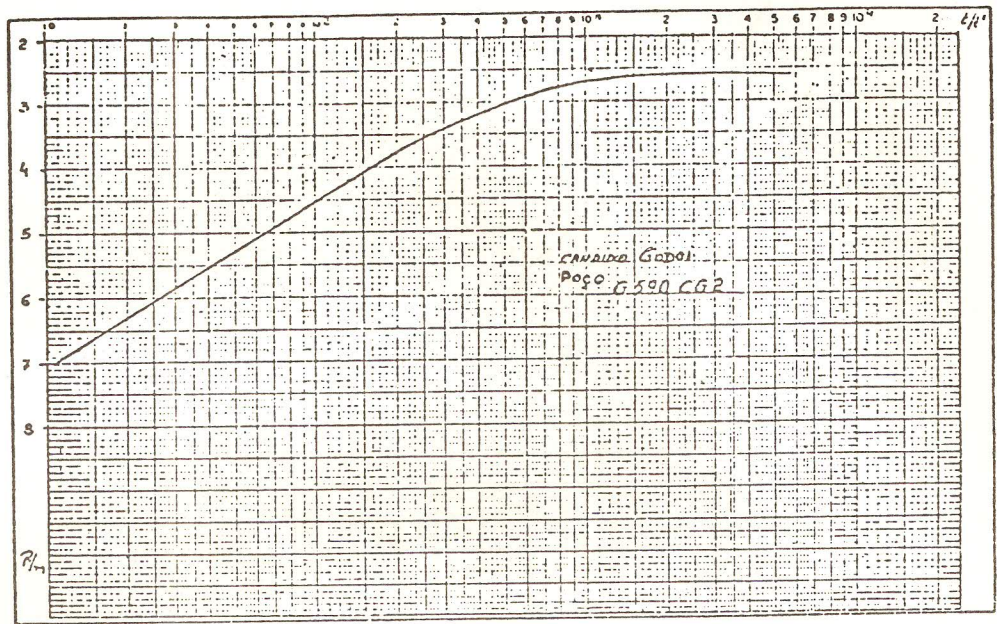


Figura 2