

Antônio Carlos Bertachini*

RESUMO

As atividades de desaguamento para o rebaixamento do nível d'água da Mina de Águas Claras, vem permitindo um melhor conhecimento da hidrogeologia local. O minério de ferro de alto teor, que tem a sua origem na lixiviação dos itabiritos dolomíticos, apresenta elevada capacidade de armazenamento e circulação das águas subterrâneas. Outras unidades hidrogeológicas situadas no entorno da mina também vem sendo estudadas, cabendo destaque aos quartzitos da formação Cercadinho. Com uma vazão de produção oscilando entre 300 m³/h e 600 m³/h, de 1989 a 1993 o nível d'água da cava da mina foi rebaixado da cota 1113 metros para a cota 1020 metros. No referido período a produção de água subterrânea atingiu o valor de 8,5 milhões de metros cúbicos, representando um volume de 90 mil metros cúbicos de água por metro de rebaixamento no nível d'água na mina.

1 INTRODUÇÃO

A mina de Águas Claras está situada no flanco sudeste da Serra do Curral, no município de Nova Lima, em área limítrofe ao município de Belo Horizonte. Trata-se de uma mina explotada a céu aberto, com uma produção anual de 14 milhões de toneladas de minério de ferro de alto teor. Teve o início de sua exploração em 1972. No ano de 1988 iniciaram-se as atividades de rebaixamento do nível através da operação de baterias de poços tubulares profundos para permitir as operações de lavra abaixo do nível d'água original.

2 GEOLOGIA REGIONAL

No âmbito regional, a área está inserida em rochas do super-grupo Rio das Velhas e do super-grupo Minas (figura 1). O super-grupo Rio das Velhas é uma seqüência de idade arqueana dividida em dois grupos a saber: Nova Lima e Maquiné. O grupo Nova Lima é constituído por rochas metavulcânicas e metassedimentos clásticos e químicos, enquanto que no grupo Maquiné predominam rochas clástica com xistos, filitos, quartzo-filitos e quartzitos. O super-grupo Minas formado por metassedimentos clásticos e químicos é de idade proterozóica e repousa em discordância angular e erosiva sobre o super-grupo Rio das Velhas. É dividido nos grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará.

Na área da mina ocorrem rochas dos grupos Nova Lima, Caraça e Itabira, que ocupam o flanco sudeste da Serra do Curral. Os grupos Piracicaba e Sabará ocorrem no flanco noroeste da Serra. O grupo Nova Lima é a unidade mais antiga, ocupa a porção sudeste da mina, está representado por clorita-xistos avermelhados. O grupo Caraça é constituído basicamente por sedimentos clásticos e sua porção basal, a formação Moeda, é composta por quartzitos compactos de granulação média a grossa e por quartzo-filitos brancos esverdeados. A formação Batatal é formada por uma seqüência de filitos sericíticos por vezes grafitosos, de coloração cinza esverdeado quando frescos a amarelo-

claro quando alterado. O contato entre as formações Moeda e Caraça é transicional, com intercalações de filito sericítico entre os quartzitos e quartzo-filitos.

A transição entre os sedimentos clásticos/pelíticos do grupo Caraça para os sedimentos químicos do grupo Itabira é evidenciada por uma extensa faixa de filitos dolomíticos com intercalações centimétricas de metachert e dolomita. O grupo Itabira é subdividido nas formações Cauê e Gandarela. A formação Cauê é composta por itabiritos, itabiritos dolomíticos, corpos de hematita friável, frutos da climatização dos itabiritos dolomítico e lentes de hematita compacta. A espessura desta formação é da ordem de 400 metros e o contato com a formação Gandarela é gradacional. A formação Gandarela ocorre fora da área da mina de Águas Claras, já no flanco noroeste da serra, é constituída por dolomitos cinza-claros a brancos e itabiritos, com lentes esparsas de hematita compacta.

No grupo Piracicaba, destaca-se do ponto de vista de potencial de água subterrânea a formação Cercadinho que está em contato com a formação Gandarela, localmente as demais formações dos grupos Piracicaba e Sabará são predominantemente constituídas por xistos e filitos de baixa permeabilidade. A formação Cercadinho é constituída por quartzitos ferruginosos, filitos, filitos ferruginosos e subordinadamente conglomerados e dolomitos.

Do ponto de vista estrutural, a Serra do Curral apresenta-se como um extenso homoclinal invertido, ou seja, com as seqüências mais antigas sobrepostas às mais novas. O acamamento pode ser observado pelas intercalações de materiais de diferentes constituições e texturas e a xistosidade pela disposição planar dos minerais. Estas duas estruturas estão paralelas a sub-paralelas, sendo denominadas genericamente como foliação, cujo ponto de máxima freqüência possui atitude 142°/42°, isto é, corresponde a um plano orientado na direção N52°E, mergulhando 42° para sudeste.

Do ponto de vista rúptil ocorrem zonas de transcôrrências de extensão decamétricas, geralmente paralelas à foliação e em alguns casos com zonas de brechação. Regionalmente também são observados falhamentos de alto ângulo com rejeitos na horizontal e zona de brechação associada, estes são geralmente ortogonais a foliação. Juntas são encontradas em duas famílias com pontos de maior freqüência nas atitudes: 225°/86° (N45°W, 86°SW) e 315°/75° (N45°E, 75°NW).

3 OS AQUÍFEROS

Dentre as unidades litológicas presentes, destacam-se como aquíferos potenciais: os quartzitos da formação Moeda, o minério de ferro, os itabiritos alterados e os quartzitos ferruginosos da formação Cercadinho. As demais unidades têm comportamento de aquíclde ou apresentam zonas aquíferas localizadas.

Quartzito Moeda: Os quartzitos e quartzo-filitos da formação Moeda, constituem-se em uma unidade aquífera de pequena expressão, confinada entre os filitos Nova Lima e Batatal. A sua espessura, em áreas onde é contínuo, varia de 40 a 80 metros e, assim como os demais corpos da Serra do Curral, tem direção nordeste e mergulho de cerca de 40° para sudeste. Comporta-se como aquífero confinado com porosidade de fraturas, podendo, em áreas intensamente fraturadas, apresentar valores de transmissividade da ordem de 600 m²/dia e porosidade eficaz de 5%.

* Geólogo, MSc, Minerações Brasileiras Reunidas, Av. de Ligação, 3000 CEP 34000 Nova Lima MG

Minério de Ferro: As hematitas friáveis, compactas e semi-compactas, em conjunto com os itabiritos alterados formam um importante sistema aquífero confinado entre os filitos da formação Batatal (capa), itabiritos dolomíticos (lapa e porção nordeste da mina), itabiritos compactos (lapa) e dolomitos da formação Gandarela (lapa). O sistema aquífero é do tipo semi-confinado, heterogêneo e anisotrópico, com porosidade intersticial e de fraturas. A porosidade intersticial é decorrente da própria gênese do minério de ferro e está mais desenvolvida onde a lixiviação dos itabiritos dolomíticos foi mais intensa.

A atuação do intemperismo sobre as rochas da formação Cauê, principalmente nos itabiritos dolomíticos que é uma rocha originalmente constituída de intercalações de bandas centimétricas de dolomitos e hematita é o principal responsável pelo desenvolvimento do *minério friável* de alto teor de ferro. Em determinações de laboratório foram encontrados valores da porosidade total das hematitas friáveis de até 50% e ensaios em campo apresentaram valores para a porosidade eficaz na faixa de 10% a 15%. As hematitas compactas comporta-se como meio fraturado, com baixa capacidade de armazenamento mas com elevada permeabilidade. Os valores deste parâmetro na ordem de 10 m/dia, devem ser atribuídos às hematitas compactas e fraturadas.

O semi confinamento e a conseqüente anisotropia da permeabilidade, está fortemente influenciada pelo bandamento do minério. A alternância entre bandas de hematita compacta ou semi compacta com hematita granular ou mesmo argilas ferruginosas, condicionam o desenvolvimento de maiores valores da permeabilidade no interior dos planos de bandamento e menores valores na direção ortogonal ao bandamento.

Assim, o tensor de anisotropia do minério de k_x , k_y e k_z , seria formado por k_x e k_y contidos dentro do plano de bandamento (N52E/42SE), com maiores valores de permeabilidade e k_z , de menor valor, orientado ortogonalmente ao bandamento (N38W/48NW). Os valores do tensor de permeabilidade diminuí de sudoeste para noroeste onde o intemperismo do itabirito dolomítico foi menos intenso. De um modo geral, na porção sudoeste da mina, a permeabilidade média é da ordem de 3 m/dia, enquanto que na porção noroeste, este parâmetro cai para 0,3 m/dia.

Dolomitos: Os dolomitos da formação Gandarela, na área próxima à mina de Águas Claras, também não reúnem boas condições de circulação e armazenamento de água subterrânea, com pequenas zonas conforme pode ser atestado pelos poços do Hospital Hilton Rocha (vazão específica de 0,02 m³/h/m) e pelo desaguamento da cava da mineração Lagoa Seca, com vazões da ordem de apenas 12 m³/h.

Quartzito Cercadinho: Os quartzitos ferruginosos da formação Cercadinho, situados no flanco noroeste da Serra do Curral, também apresentam boas condições de circulação e armazenamento de água subterrânea, em meio aparentemente com porosidade de interstícios. No Parque das Mangabeiras existe um poço tubular com transmissividade de 90 m²/dia e capacidade específica de 4,0 m³/h/m, apesar de não se dispor de piezômetro para a determinação do coeficiente de armazenamento podem ser inferidos valores acima de 0,1 para este parâmetro.

HIDROQUÍMICA

Dentre as unidades aquíferas presentes dispomos de dados de análises físico-químicas e isotópicas das águas do minério de ferro, dos dolomitos da formação Gandarela e dos quartzitos da formação Cercadinho. Na Figura 2 mostra a seção geológica da mina de Águas Claras, com os diagramas de

Stiff das águas subterrâneas, que em conjunto com as análises efetuadas pelo laboratório do CETEC e do CDTN permitiram elaborar as seguintes características gerais destas águas:

Formação Cauê - minério de ferro: Condutividade elétrica inferior a 10 µmho/cm e pH de 5,9 (*in situ*). Como os elementos estão muito próximos aos seus limites de detecção, estima-se que se trata de águas bicarbonatada-cloretadas calco-sódicas, que refletem uma pequena interação água-rocha e uma infiltração muito rápida. São as águas de maior tempo de residência no aquífero com concentrações de trítio de 1,5 UT (Unidades de Trítio).

Dolomitos da formação Gandarela: Condutividade elétrica de 148 µmho/cm e pH de 7,6 (*in situ*). São águas fortemente bicarbonatadas magnesianas a cálcicas, que refletem forte interação água-rocha. São as águas aparentemente com menor tempo de residência no aquífero com 2,2 UT (Unidades de Trítio).

Quartzitos da formação Cercadinho: Este aquífero apresenta condutividade elétrica de 90 µmho/cm e pH de 7,2 (*in situ*). São águas bicarbonatadas calco-magnesianas, que refletem forte interação água-rocha. São águas comparativamente com médio tempo de residência no aquífero com 2,0 UT (Unidades de Trítio).

Nos quartzitos da formação Moeda não se dispõe de análises físico-químicas completas, porém análise parcial indica serem águas bicarbonatadas calco-magnesianas. O pH é de 7,6 e a condutividade elétrica de 66 µmho/cm, valores de laboratório (SANEAR). As águas que percolam nestes aquíferos reúnem características distintas entre si, com as águas mais duras nos dolomitos e as mais desmineralizadas e mais antigas no minério de ferro. Existe assim uma faciologia hidroquímica, com tipos hidroquímicos característicos de cada aquífero.

5 O DESAGUAMENTO DA MINA

A lavra da mina de Águas Claras atingiu o nível d'água subterrânea por volta de 1981, convivendo com água nos bancos inferiores até 1990 enquanto a mina era lavrada em flanco. Durante este período a água subterrânea que aflorava no piso da mina foi drenada por gravidade através de um sistema de drenos a céu aberto. No ano de 1986 prevendo-se que em 1990 a mina deveria entrar em cava (fechada) sem condições de drenagem por gravidade iniciou-se um programa de estudos, culminando com a perfuração de poços pioneiros e piezômetros. Os estudos realizados indicaram como solução para o rebaixamento do nível d'água a técnica do **pré-rebaixamento** que consistem em se bombear por um período maior de tempo um número menor de poços com vistas a diminuir os custos de perfuração.

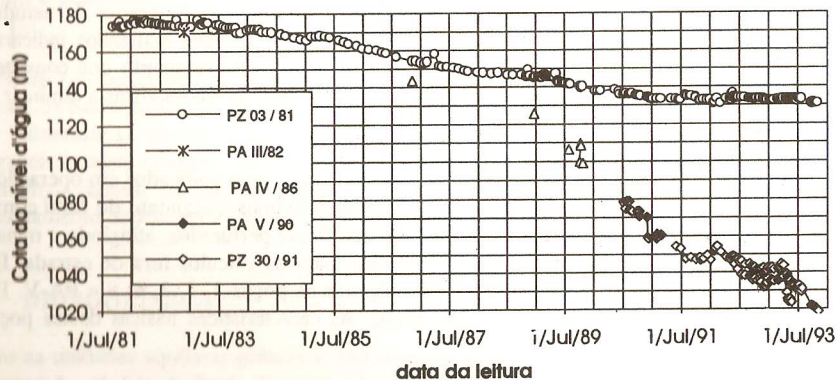
No ano de 1988 iniciou-se a perfuração de poços de rebaixamento sendo colocados em operação 9 poços, espaçados de 100 em 100 metros (Figura 1) e situados próximos ao contato do filito com o minério. Estes poços entraram em operação a medida em que foram perfurados, atingindo a mina o ano de 1990 toda drenada com ótimas condições de tráfego para os veículos fora de estrada. Em 1992 foram perfurados três poços com o objetivo de substituir os poços 1, 2, 3, 6, 8 e PA-V. Em 1993 o rebaixamento foi reforçado com mais dois poços. As características básicas destes poços estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais Características dos Poços Tubulares da Mina de Águas Claras

Poço número	Profundidade (m)	Vazão (m ³ /h)	Níveis Iniciais		Operação	
			Estático (m)	Dinâmico (m)	início	termino
01/89	160	40	52	62	08/89	04/92
02/89	212	70	jorrante	20	03/90	04/92
03/89	196	32	jorrante	68	03/90	04/92
04/88	282	180	jorrante +40	20	02/89	operando
05/89	280	41	jorrante	67	07/90	operando
06/88	160	29	jorrante	100	01/89	06/93
07/89	189	55	jorrante	83	09/89	operando
08/89	182	40	jorrante +10	93	11/88	05/93
09/89	197	30	jorrante	89	06/89	operando
10/92	110	5	25	72	Não operado	
12/92	207	66	23	115	02/93	operando
13/92	233	51	14	155	02/93	operando
14/92	347	300	jorrante	60	04/93	operando
15/93	289	80	20	133	05/94	operando
16/93	274	230	47	78	05/94	operando
PA-V	106	90	80	95	11/90	11/91

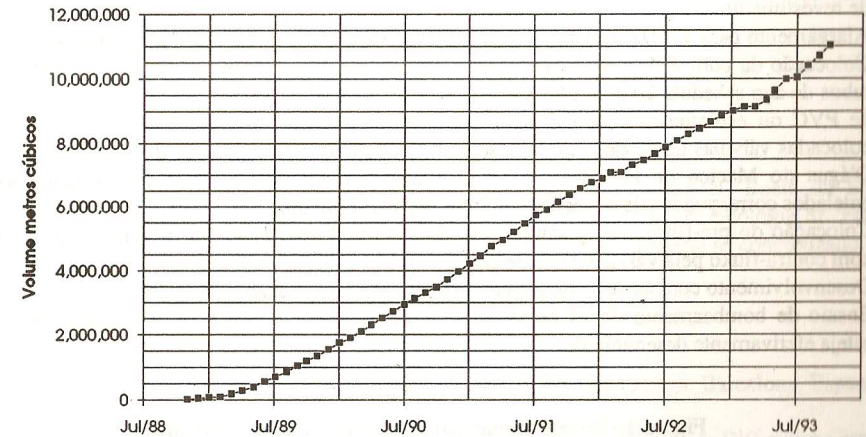
De 1981 até 1988 o sistema de drenos produzia em média 80 m³/h, podendo ser estimado para o período uma produção em torno de cinco milhões de metros cúbicos de água, com um rebaixamento da cota 1174 metros até a cota média de 1113 metros (Figura 1). De 1989 até outubro de 1993, foram bombeados através da bateria de poços onze milhões de metros cúbicos de água, rebaixando os níveis d'água do minério até a cota média de 1020 metros. Com os poços perfurados em 1993, a partir de julho de 1994 a bateria de poços atingiu a capacidade média de 600 m³/h e a produção mensal em torno de 300.000 metros cúbicos.

Gráfico 1 - Evolução dos Níveis D'água



O Gráfico 1 mostra a evolução do nível d'água na mina de Águas Claras, com o piezômetro 3/81 representando os itabiritos silicosos e dolomíticos da parede norte da cava, e os demais correspondendo ao níveis d'água no minério dentro da cava da mina. Percebeu-se nitidamente o incremento do rebaixamento a partir de janeiro de 1989, quando inicia-se o bombeamento dos poços (Gráfico 2). Comparando-se os gráficos 1 e 2 durante o período de julho de 1989 a julho de 1993, verifica-se que para um rebaixamento de 80 metros foram bombeados 9.200.000 metros cúbicos de água subterrânea. Deste fato pode-se estimar que para um rebaixamento de um metro no nível d'água da mina, é necessário bombear cerca de 115.000 metros cúbicos de água subterrânea.

Gráfico 2 - Volume Bombeado



O planejamento do sistema de desaguamento é realizado em conformidade com a filosofia do pré-rebaixamento e emprega-se a técnica de modelagem matemática de aquífero, através de modelos matemáticos de simulação numérica do fluxo d'água subterrânea. Os modelos mais empregados são o Prickett & Lonquist (1971), para resolução de problemas bidimensionais e o MODFLOW, Mac Donald & Harbaugh (1988), para a resolução de problemas tridimensionais. Ambos modelos utilizam-se do método das diferenças finitas para resolver os sistemas de equações do fluxo d'água subterrânea.

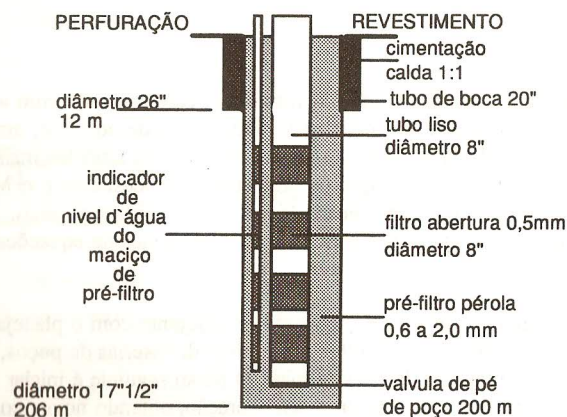
O planejamento do desaguamento de mina é executado em conjunto com o planejamento a medio e longo prazo das minas, permitindo assim escolher alternativas de baterias de poços, que contemplem a evolução futura dos níveis inferiores da cava da mina. O passo seguinte é iniciar a construção dos poços no momento certo, bem como monitorar a sua operação, obtendo novos conjuntos de dados para efetuar novas calibrações do modelo e simulações, sempre atendendo ao planejamento da lavra.

6 CONSTRUÇÃO DOS POÇOS

Os poços tubulares profundos construídos para o desaguamento da mina de Águas Claras, são perfurados pelo método rotativo com circulação direta de lama bentonítica, com profundidade final entre 150 e 300 metros. Os trabalhos de perfuração obedecem em geral a seguinte cronologia:

1. Inicia-se o furo em 26 polegadas para a instalação de doze metros de tubo de boca em chapa soldada diâmetro de 20 polegadas.
2. Executa-se o furo guia em $9\frac{7}{8}$ " alargando-o para $12\frac{1}{4}$ ", obtendo-se nesta etapa avanços de até 15 minutos por metro para o minério macio, 15 a 60 minutos por metro para minério médio e superiores a 60 minutos por metro para minério compacto.
3. Perfilagem elétrica, com raios gama, potencial espontâneo e resistividade e definição da coluna de revestimento.
4. Alargamento para $17\frac{1}{2}$ " quando o furo for revestido em 8", ou 20" para ser revestido em 10".
5. Colocação da coluna de revestimento, em PVC geomecânico reforçado até 8" de diâmetro ou tubos de aço schedule 20 com filtros espiralados reforçados, seção em "v". A abertura dos filtros de PVC ou espiralados é de 0,5 mm. Geralmente em todas as colunas de revestimento são colocadas válvulas de pé de poço. Em seguida é instalada uma tubulação do Indicador de Nível D'água do Maciço de Pré-filtro em PVC branco diâmetro de 1", com filtros ranhurados e entelados correspondentes as seções filtrantes do revestimento.
6. Colocação do pré-filtro com granulometria de 0,6 a 2,0 mm, injetados com tubos de $1\frac{1}{2}$ " e com contra-fluxo pela válvula de pé de poço.
7. Desenvolvimento com air lift, jateamento ou pistoneamento, hexametastato e air-lift.
8. Ensaio de bombeamento de 24 horas, seguido de ensaio escalonado de 4 horas caso o poço esteja efetivamente desenvolvido.

Figura 3 - Projeto Esquemático de Poço Tubular Profundo



7 CONCLUSÕES

As atividades de desaguamento das águas subterrâneas da mina de Águas Claras vem sendo desenvolvidas desde 1988, quando do início da perfuração dos poços, procurando compatibilizar as operações de mina com o desaguamento.

O emprego da técnica do pré-rebaixamento em muito tem nos ajudado, pois estamos operando com apenas nove poços tubulares profundos, enquanto que as estimativas de rebaixamento a curto prazo contemplavam um número mínimo de 25 poços. Esta mudança de filosofia certamente trouxe uma grande economia em perfuração e operação dos poços, sem contar com os transtornos às operações de lavra provocados por um número maior de poços.

O minério de ferro de alto teor é sem dúvida o principal aquífero da Mina de Águas Claras, isto se deve à sua gênese concentração por lixiviação dos itabiritos dolomíticos.

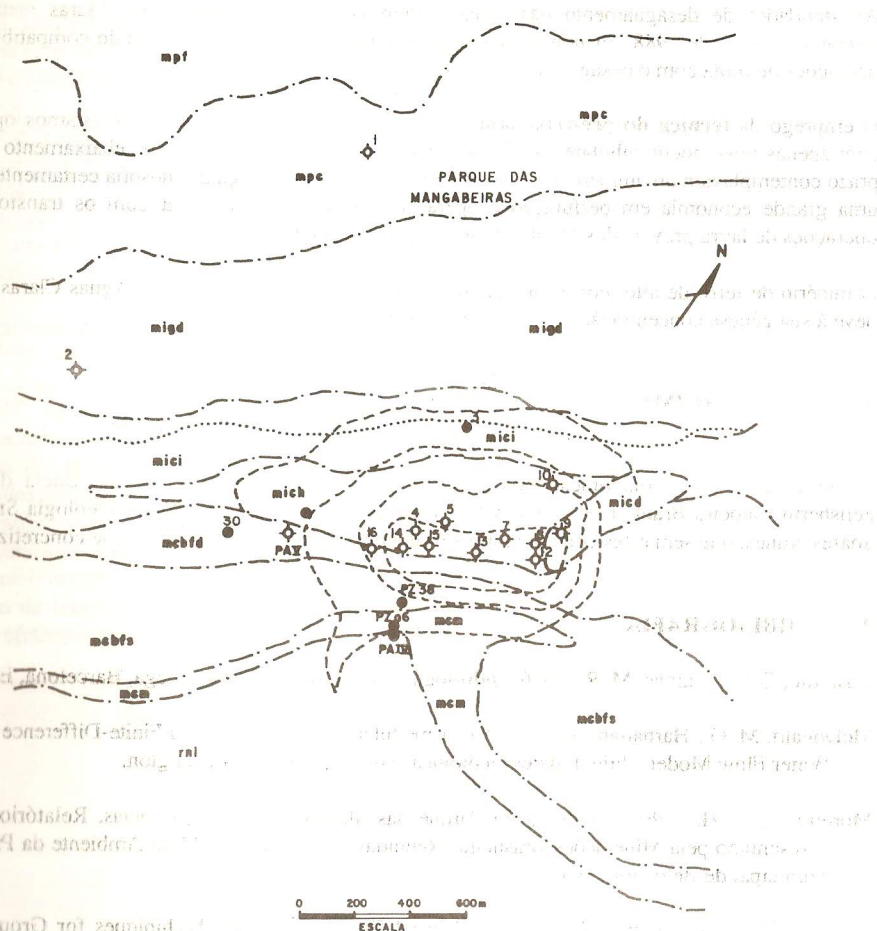
8 AGRADECIMENTOS

O autor agradece a colaboração dos Técnicos em Geologia Srs. Nayrton N. Baeta da Silva, Felisberto Caldeira Brant Jr. e Aylton Martins dos Santos e do Graduando em Geologia Sr. Flavio Soares Nunes, que sem estes colaboradores certamente este trabalho não haveria se concretizado.

9 BIBLIOGRAFIA

- Custódio, E. G.; Llamas, M. R. 1976. Hidrologia Subterrânea, Editora Omega, Barcelona, Espanha.
- McDonald, M. G.; Harbaugh, A. W. 1988. A modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model. United States Geological Survey, Book 6. Washington.
- Moreira, P. C. H. 1991. Geologia do Parque das Mangabeiras e Adjacências, Relatório Inédito apresentado pela Minerações Brasileiras Reunidas a Secretaria de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.
- Prickett, T. A.; Lonquist, C. G. 1971. Selectal Digital Computer Techniques for Groundwater Evaluation. Illinois State Survey Bulletin 55.
- Viel, R. S.; Moreira, P. C. H.; Alkimin F. F. 1987. Faciologia da Formação Cauê e Gênese do Minério de Ferro Friável da Mina de Águas Claras, Serra do Curral - Minas Gerais. Simpósio sobre sistemas deposicionais do Pré-Cambriano, Ouro Preto.

MINA DE ÁGUAS CLARAS



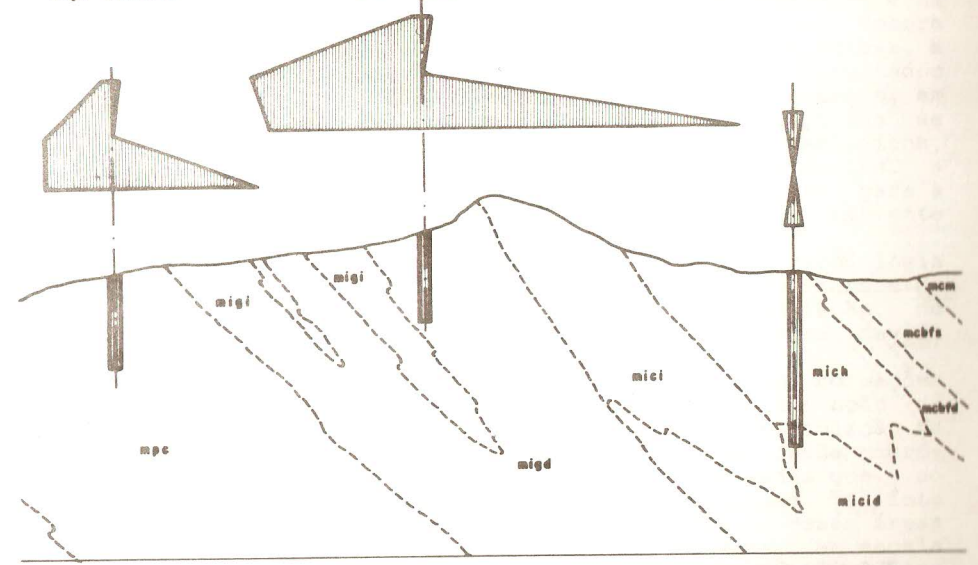
0 200 400 600m
ESCALA

LEGENDA

- | | | | |
|-------|------------------------|-----|-------------------------------|
| mpf | - FORMAÇÃO F. FUMIL | --- | CONTATO GEOLÓGICO |
| mpc | - FORMAÇÃO CERCADINHO | --- | SERRA DO CURRAL DEL REY |
| migd | - FORMAÇÃO GANDARELA | --- | CAVA DA MINA |
| mic | - FORMAÇÃO CAUÊ | ⊠ | POÇO - Nº DO POÇO |
| mici | - ITABIRITO SILICOSOS | ● | PIEZÔMETRO - Nº DO PIEZÔMETRO |
| mich | - MEMATITAS | | |
| micd | - ITABIRITO DOLOMÍTICO | | |
| mcb | - FORMAÇÃO BATATAL | | |
| mcbfd | - FILITO DOLOMÍTICO | | |
| mcbfs | - FILITO SERICÍTICO | | |
| mcm | - FORMAÇÃO MOEDA | | |
| rnl | - GRUPO HOVA LIMA | | |

FIGURA 1

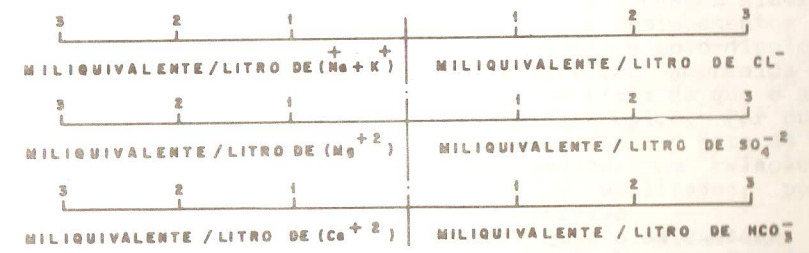
PARQUE DAS MANGABEIRAS POÇO TUBULAR HOSPITAL MILTON ROCHA POÇO TUBULAR MINA ÁGUAS CLARAS POÇO TUBULAR 04/88



0 100 200 300 400m
ESCALA 1: 10.000

LEGENDA

DIAGRAMA DE STIFF DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| Formação Moeda | Formação Cauê |
| mcm - Quartzitos | micid - Itabirito dolomítico |
| Formação Batatal | mich - Hematita |
| mcbfs - Filites sericíticos | mici - Itabirito |
| mcbfd - Filites dolomíticos | Formação Gandarela |
| | migd - Dolomitos |
| | migi - Itabiritos |
| | Formação Cercadinho |
| | mpc - Quartzitos e filites |

FIGURA 2