

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE DRENAGEM EM MINA A CÉU ABERTO

Araújo, C. E. da S.<sup>1</sup>; Schuster, H. D. M.<sup>2</sup>; Lima, A. A.<sup>3</sup>.

O presente trabalho tem o objetivo de realizar uma modelagem, baseada no método numérico de diferenças finitas através do modelo de fluxo de água subterrânea, *MODFLOW* que se encontra incorporado ao programa *PMWIN Pro*. A modelagem foi aplicada em uma mina de kimberlito, em fase de planejamento, do projeto intitulado *Victor Diamonds* da empresa *DeBeers Canada* na província Ontário no Canadá. O mineral de interesse é o diamante e está situado no interior de duas chaminés adjacentes de kimberlito que atravessam formações de rochas em camadas que atingem uma profundidade de aproximadamente 200 metros. Para o planejamento seguro de um sistema de desaguamento, foram realizadas simulações alternativas, por meio do programa *MODFLOW*, que originou resultados satisfatórios e bastante similares aos resultados da simulação efetuada por *Hydrologic Consultants, Inc.*, e que pode ser confirmado por meio dos resultados mostrados nos mapas potenciométricos, corte vertical da mina escavada, extensão dos cones de rebaixamento e da curva de rebaixamento no interior da mina *Victor* projetada.

The present research has the objective of perform a modeling, based on finite differences numerical method, concerning the groundwater flow, using *MODFLOW* program, which is incorporated into *PMWIN Pro* software. The modeling was applied to a kimberlite mine, in the planning stage, a project named *Victor Diamond*, that belongs to *DeBeers Canada*, in Ontario Province, Canada. The mineral resource of interest for the venture is diamond, which is placed inside two adjacent kimberlite pipes. The kimberlite pipes cross strataform rock formations for an approximated depth of 200 meters. The simulation alternative undertaken in this study using *MODFLOW* program yielded satisfactory results, which were in close agreement with the results of the simulation results obtained by *Hydrologic Consultants, Inc.*, what can be confirmed by means of potentiometric maps, vertical cuts across the planned mine, expansion of water table lowering cones, as well as the water lowering curve in the interior of the planned *Victor* project mine.

**Palavras-Chave** – Hidrogeologia, drenagem de minas, diferenças finitas.

<sup>1</sup> UFCG: Carlos Eduardo da Silva Araújo, UFCG/UAMG, Rua Aprígio Veloso, 882, Campina Grande, PB, fone/fax (83) 8841 1400, cesaraujo@gmail.com

<sup>2</sup> UFCG: Hans Dieter Max Schuster, UFCG/UAMG, Rua Aprígio Veloso, 882, Campina Grande, PB, fone/fax (83) 9979 8122, didischuster@yahoo.com.de

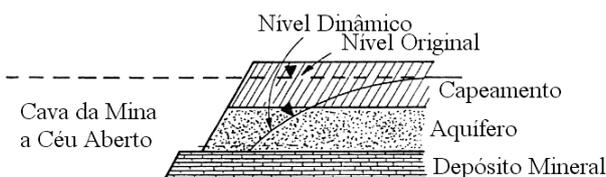
<sup>3</sup> UFCG: Aarão de Andrade Lima, UFCG/UAMG, Rua Aprígio Veloso, 882, Campina Grande, PB, fone/fax (83) 9372 0269, aaraolima@uol.com.br

## 1 - INTRODUÇÃO

Sistemas de drenagem servem, dentre outras funções, para o rebaixamento dos níveis de água. Eles reduzem as pressões e os gradientes ascendentes na base de uma escavação, portanto provêm proteção contra a elevação e deslocamento das camadas de base. A drenagem na escavação também permite a redução na pressão de poros sob as camadas inclinadas melhorando sua estabilidade. No planejamento de minas a céu aberto isso é um fator de muita importância, pois a diminuição da pressão de poros pode permitir um aumento da inclinação da bancada e a economia criada pela redução da escavação pode ser de muitos milhões de dólares.

O controle de fluxos subterrâneos ao interior da escavação pode ser realizado de diversas formas. Sharp (1979) citou vários métodos que são largamente utilizados atualmente como: (1) furos horizontais de drenagem (drainholes) perfurados na face do talude (slope face) (Figura 1); (2) galerias de drenagem (drainage galleries) atrás do talude com ou sem furos radiais perfurados a partir da galeria; (3) poços verticais perfurados atrás da crista do talude (slope crest) ou a partir das bancadas do talude (Figura 2). Vutukuri (1986) também descreve alguns métodos de desaguamento tais como trincheira de drenagem na superfície (Figura 3) e na base da cava (Figura 4).

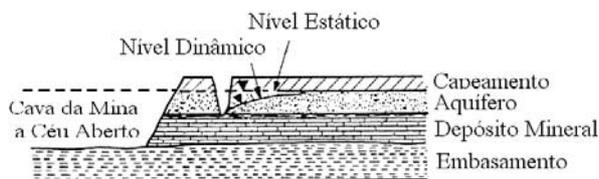
Drenos horizontais é o método mais rápido, mais barato e o mais flexível. Piteau e Peckover (1979) providenciaram muitas sugestões práticas para o seu projeto e seu emplantamento no talude. Galerias e poços são os métodos mais caros, mas têm a vantagem que eles não interferem com os trabalhos no talude e o desaguamento (dewatering) pode ser executado antes da escavação. O projeto de um sistema de desaguamento por meio de um arranjo de poços perfurados é baseado no princípio de sistema de poços múltiplos de modo que o cone de rebaixamento de nível de água é a superposição dos cones individuais de rebaixamento de cada poço bombeado e depende dos parâmetros hidrodinâmicos, tais como transmissividade e armazenamento do meio poroso, determinados pelos estudos hidrogeológicos procedentes.



**Figura 1: Dreno horizontal na face do talude (Fonte Modificada: Vutukuri e Lama, 1986).**



**Figura 2: Perfuração vertical (Fonte Modificada: Vutukuri e Lama, 1986).**



**Figura 3: Trincheira de drenagem na superfície**  
(Fonte Modificada: Vutukuri e Lama, 1986).



**Figura 4: Trincheiras de drenagem na base da cava**  
(Fonte Modificada: Vutukuri e Lama, 1986).

## 2 - OBJETIVOS

### 2.1 - Objetivo Geral

Avaliar o desaguamento da infiltração das águas subterrâneas nas minas a céu aberto e o rebaixamento do lençol hídrico abaixo do nível de extração de minérios através da modelagem e simulação numérica com o programa de fluxo subterrâneo MODFLOW que permite simular todas as situações hidrogeológicas conhecidas. Como área de estudo será selecionada a mina a céu aberto Victor Diamond Project situada em Ontário, Canadá.

### 2.2 - Objetivos Específicos

Desenvolver um estudo de simulação de desaguamento (dewatering) na mina de kimberlito Victor (Victor Diamond Project) situado na província Ontário, Canadá, que solicitou recentemente um estudo hidrogeológico detalhado sobre a hidráulica, o esquema e duração de bombeamento, os custos e fatores ambientais desta mina cuja previsão para início da lavra seria no ano de 2007. O relatório final deste estudo oferece muitos dados geológicos e hidrológicos, que permitem fazer a modelagem numérica de drenagem nesta mina. Nesse trabalho será apresentada uma remodelagem alternativa das simulações realizadas pela empresa de consultoria Hydrologic Consultants, Inc (HCI) que utilizou o seu programa, baseado no método de elementos finitos, especializado neste tipo de problema na mineração (HCI, 1993). Serão realizadas simulações por meio do programa numérico do fluxo de água subterrânea MODFLOW com o objetivo de alocar poços para o desaguamento da mina, determinar o balanço hídrico do impacto de bombeamento de longa duração aos rios nas proximidades da área da cava e analisar os possíveis impactos ambientais, provenientes dessa drenagem, na região de mineração.

## 3 - DESAGUAMENTO DA MINA VICTOR EM ONTÁRIO / CANADÁ

No presente tópico será descrito um estudo de um caso real de um sistema de desaguamento de uma cava em uma mina a céu aberto do projeto *Victor Diamond* situada em Ontário, Canadá o

qual será modelado utilizando o modelo de fluxo de água subterrânea de diferenças finitas, *MODFLOW* (McDonald and Harbaugh, 1988), que se encontra incorporado ao programa *PMWIN Pro* (Chiang, 2005). As simulações realizadas são baseadas em um documento produzido por meio de pesquisas sobre as águas subterrâneas conduzidas pela empresa *Hydrologic Consultants, Inc.*, do Colorado (HCI, 2004), em um projeto denominado *Victor Diamond Project* durante o período compreendido entre 2000 e 2004. Os mais importantes resultados desse documento técnico são as taxas de drenagem requeridas para um desaguamento de uma cava proposta de 228 metros de profundidade em uma mina a céu aberto, custos associados às operações planejadas e os possíveis impactos ambientais provenientes de tal desaguamento. A investigação também incluiu vários tipos de testes hidráulicos para determinar as propriedades hidráulicas das unidades hidrogeológicas presentes e efetuou um sistema de poços de monitoramento para determinar o gradiente de fluxo horizontal como também vertical. Compõe o documento coletas de amostras de água para determinar a origem da alta concentração de cloro e um modelo de fluxo de água subterrânea por meio de elementos finitos para prever o desaguamento necessário, garantindo a cava desenvolvida, a ausência de água e, conseqüentemente, permitindo os trabalhos de lavra. Com este modelo, produzido por HCI, também é possível prever os impactos ambientais provenientes desse desaguamento. O documento também relata o desenvolvimento de um modelo hidrogeoquímico que tem como finalidade prever a composição química final da água que irá formar o lago após o desligamento das bombas no fim das operações da mina.

O mineral de interesse econômico da mina a céu aberto do projeto *Victor Diamond* é o diamante. O diamante é a forma cristalizada do carbono e se forma a uma profundidade de, aproximadamente, 161 km no interior do manto e próximo a Crosta, onde estão submetidos a condições extremas de temperatura e pressão. Nesta mesma zona se formam rochas denominadas kimberlitos que migram até a superfície da terra por meio do fraturamento da crosta. Essas fraturas conduzem o kimberlito fundido à superfície e ao longo do trajeto o material da rocha encaixante é desagregado se incorporando à rocha fundida conferindo a sua matriz a aparência de concreto após o resfriamento. Quando o material fundido está em ascensão ele traz consigo os diamantes que se formaram anteriormente. Desse modo o kimberlito constitui a principal rocha encaixante dos diamantes (AMEC, 2001).

O interesse da pesquisa está voltado para duas chaminés de kimberlito adjacentes situadas ao norte de Ontário-Canadá (Figura 5 e Figura 6) e estão sendo minuciosamente pesquisadas como parte do projeto *Victor Diamond* por meio da empresa *De Beers Canada Exploration Inc* para desenvolver uma mina a céu aberto. Esse projeto envolve o planejamento de uma cava, planta de

beneficiamento dentre outras infra-estruturas associadas. Está prevista, em 13 anos de vida útil da mina, uma produção de 28 milhões de toneladas de minério de kimberlito do quais 18 milhões serão materiais grosseiros cuja granulometria varia entre 6 e 1,5 mm e 10 milhões representará frações com granulometria menor que 1,5 mm.

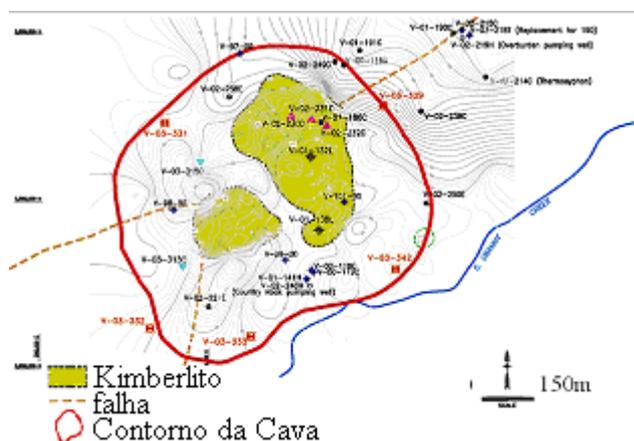


Figura 5: Detalhe da área da cava( Fonte modificada: HCI, 2004).

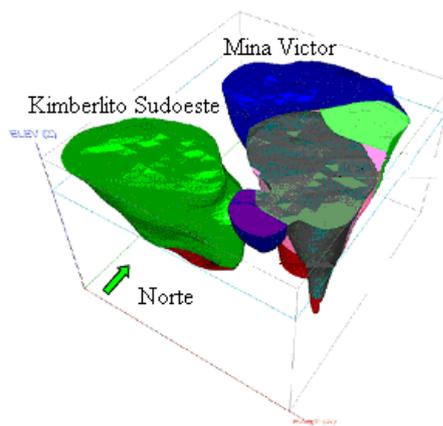


Figura 6: Suposta geometria e disposição das chaminés de kimberlito (Fonte modificada: HCI, 2004).

### 3.1 - Localização da área

A área de interesse está localizada ao norte de Ontário, Canadá dentro da região ecológica James Bay Lowlands da planície de Hudson, situada a 90 km a oeste da comunidade de Attawapiskat cujas coordenadas geográficas são latitude 52°48' N e longitude 83°53' W (Figura 7). A área se encontra entre os rios Nayshkootayaow e o rio Attawapiskat apresentando uma drenagem pobre o que favorece a proliferação de musgo formando a cobertura vegetal do terreno. A região tem a peculiaridade de apresentar geada conferindo ao solo a presença de uma fina camada de gelo (permafrost). A baía de Hudson e a baía de James influenciam no clima da região proporcionando alta umidade e um clima boreal.

### 3.2 - Geologia da Região

O embasamento cristalino é formado por rochas graníticas do período Pré-cambriano. Sobre o granito se encontra, discordantemente, uma seqüência paleozóica constituída por unidades estratigráficas do período Ordoviciano e Siluriano (HCI, 2004). Por fim essa seqüência apresenta uma cobertura sedimentar não consolidada .

A superfície erodida do embasamento granítico é primeiramente coberta por até 4 metros de arenito. Três unidades estratigráficas do período Ordoviciano cobrem o granito pré-cambriano e inclui o grupo Bad Cachê Rapids e Churchill River e a formação Red Head Rapids. Essas unidades representam várias mudanças entre um ambiente marinho regressivo e transgressivo. A seqüência Ordoviciano é coberta, discordantemente, pelas unidades Siluriana, incluindo as formações Severn River e Ekwon River (HCI, 2004). A Figura 8 representa o mapa geológico da região do projeto Victor Diamond.

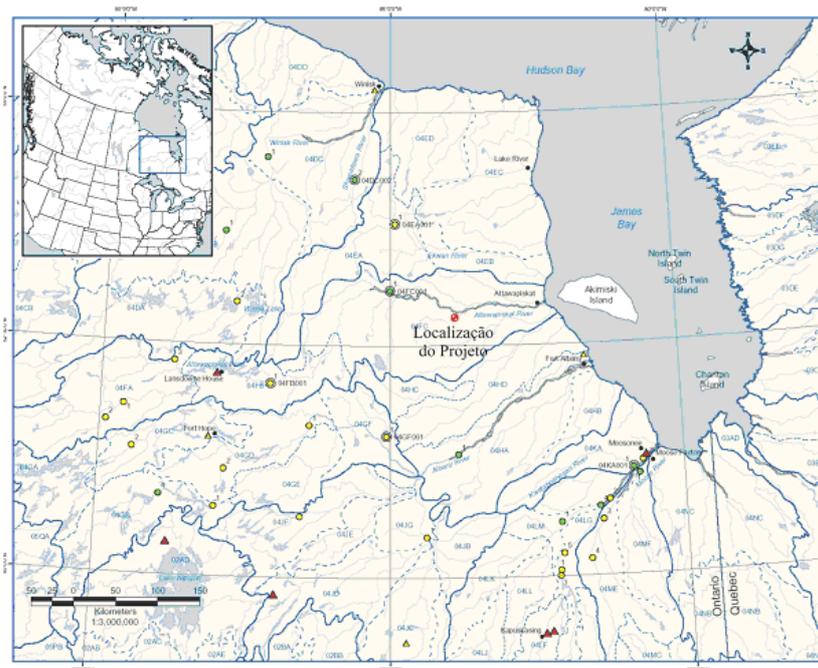


Figura 7: Mapa de localização da área do projeto Victor Kimberlite (Fonte Modificada: HCI, 2004).

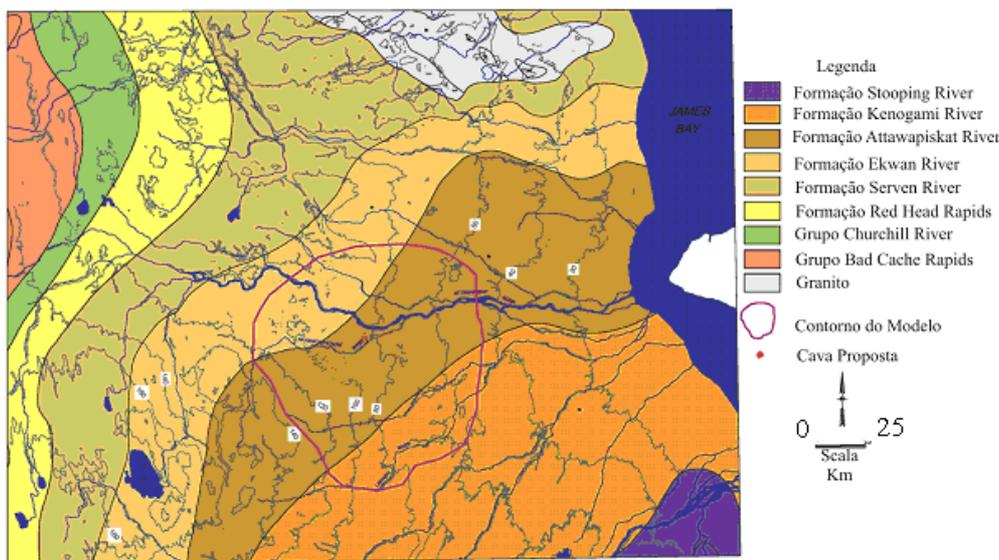


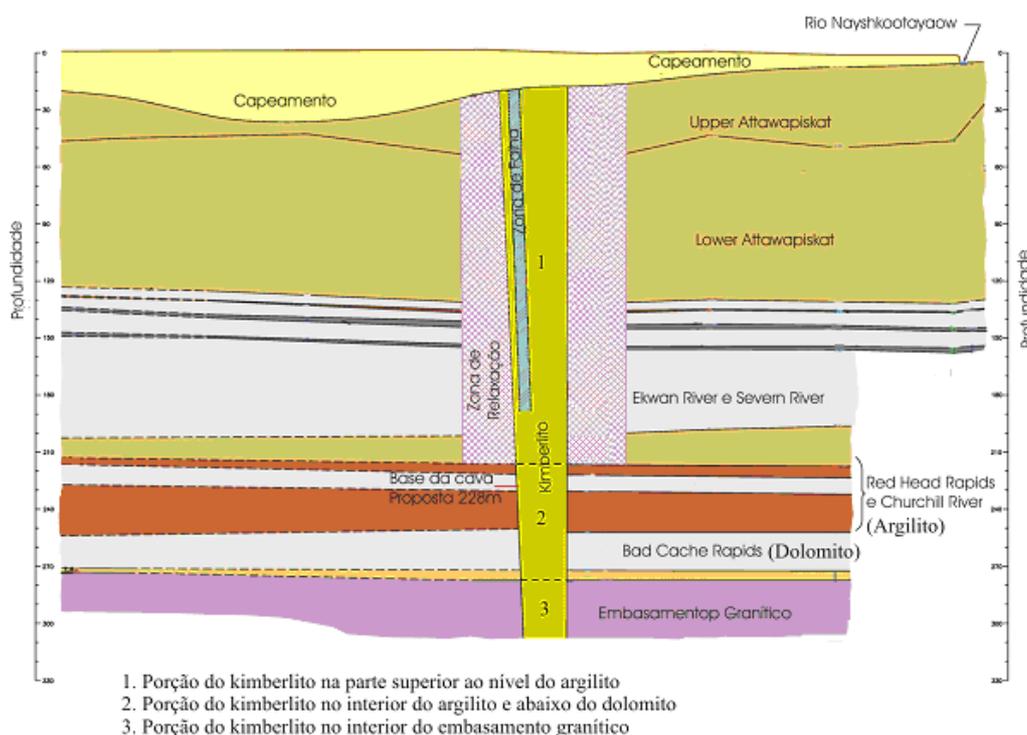
Figura 8: Mapa geológico da área do projeto Victor Kimberlite (Fonte Modificada: HCI, 2004). O contorno vermelho representa a limitação da área modelada.

### 3.3 - Descrição das Unidades Hidrogeológicas

Foram definidas sete unidades hidrogeológicas em função das condutividades hidráulicas de cada uma delas (HCI, 2004). Em seqüência descendente, temos (Figura 9):

- Uma unidade hidroestratigráfica determinada por carstificação local e calcário fossilífero na parte superior da formação Attawapiskat (Siluriano).
- Na parte inferior da formação Attawapiskat se encontra uma mistura entre argilito e calcário (Siluriano).
- Nas formações Ekwan River e Severn River têm-se a presença de calcário intercalado por argilitos finos (Siluriano).
- Argilito originado pela combinação das formações Red Head Rapids e o grupo Churchill River. (Ordoviciano)
- Fina camada de arenito pouco consolidada situada no interior da formação Red Head Rapids (Ordoviciano).
- Mais a baixo o dolomito se apresenta na formação Bad Cachê Rapids (Ordoviciano).
- E por fim o embasamento granítico (Pré-Cambriano).

Fora da área do projeto ainda existe uma formação denominada Kenogami River que está situada a 30 km a sudeste e consiste de dolomito e calcário com camadas de argilito, siltito e arenito.



**Figura 9: Unidades hidrogeológicas (Fonte modificada: HCI, 2004).**

Na área do projeto existem três unidades hidrogeológicas não estratificadas, sendo:

- A primeira formada por uma heterogênea argila orgânica, argila marinha e capeamento glacial cuja espessura varia entre 5 a 30 metros sobre a área. A espessura do capeamento varia atingindo profundidades superiores a 200 metros.
- A segunda unidade é formada pelo kimberlito que pode ser dividido em três porções: uma compreendida na parte superior ao nível do argilito, outra no interior do argilito e abaixo do dolomito, e a última porção no interior do embasamento granítico.
- A terceira unidade hidrogeológica é formada pela zona de relaxação entre o kimberlito e a unidade de calcário.

Por fim, uma zona de falha dentro da zona do kimberlito forma mais uma unidade hidrogeológica.

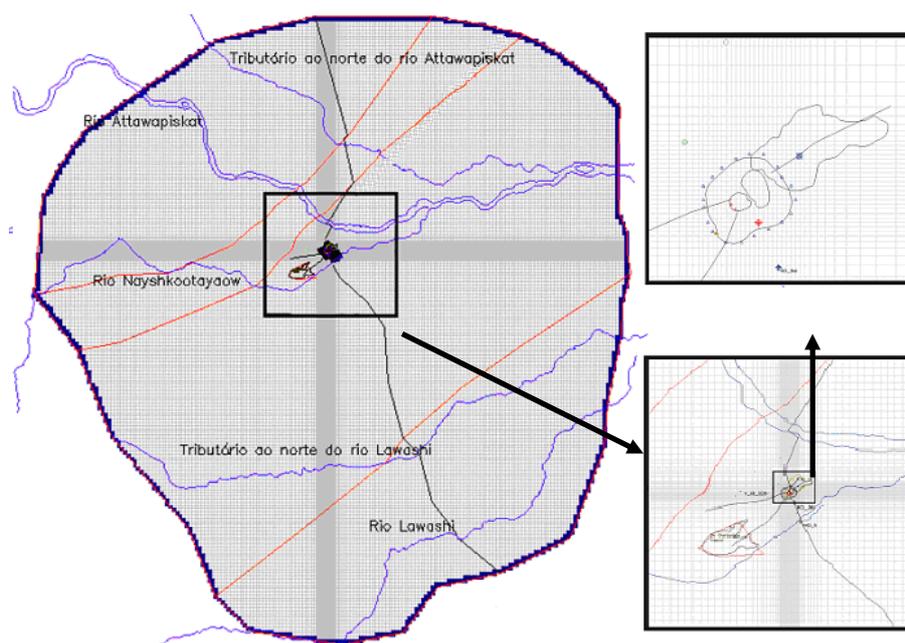
Os dados hidrogeológicos foram obtidos a partir de teste com obturadores (*packer tests*), suspensão em ar (*airlift tests*) e testes de bombeamento. A Tabela 1 relaciona os valores dos parâmetros hidráulicos de cada uma das unidades hidrogeológicas bem como as suas zonas definidas.

**Tabela 1: Propriedades hidráulicas das unidades hidrogeológicas usadas no modelo de fluxo de água subterrânea (HCI, 2004).**

Zona do Modelo	Unidade hidrogeológica	$K_x$ [m/d]	$K_y$ [m/d]	$K_z$ [m/d]	$S_s$ [m <sup>-1</sup> ]	$S_Y$ [-]
1	Kimberlito (Acima do Argilito)	10	10	10	10 <sup>-5</sup>	0,010
2	Kimberlito (dentro do Argilito e Dolomito)	0,03	0,03	0,03	10 <sup>-6</sup>	0,005
3	Kimberlito dentro do Granito	0,0001	0,0001	0,0001	10 <sup>-6</sup>	0,005
16	Formação Kenogami River	0,5	0,5	0,005	10 <sup>-6</sup>	0,005
4	Upper Attawapiskat (Calcário)	1	1	0,01	10 <sup>-6</sup>	0,005
5	Lower Attawapiskat (Calcário)	0,5	0,5	0,005	10 <sup>-6</sup>	0,005
6	Ekwan River & Severn River (Calcário)	1,5	1,5	0,015	10 <sup>-6</sup>	0,005
7	Read Head Rapids (Argilito)	0,1	0,1	0,0001	10 <sup>-6</sup>	0,005
8	Arenito dentro de Argilito	5	5	5	10 <sup>-6</sup>	0,005
9	Bad Cache Rapid (Dolomito)	0,1	0,1	0,001	10 <sup>-6</sup>	0,005
10	Granito	0,0001	0,0001	0,0001	10 <sup>-6</sup>	0,005
13	Zona de Contato no calcário entre kimberlito e as zonas 4 até 6	5	5	5	10 <sup>-5</sup>	0,005
11	Capeamento	0,001	0,001	0,001	10 <sup>-6</sup>	0,005
12	Arenito dentro da trincheira de capeamento	3	3	3	10 <sup>-6</sup>	0,200
14	Zona de Falha	500	500	500	10 <sup>-6</sup>	0,005
15	Silte dentro do de capeamento	0,01	0,01	0,001	10 <sup>-5</sup>	0,005

### 3.4 - Discretização da Área do Modelo

Utilizando-se os dados do trabalho efetivado por (HCI 2004) e dando início a remodelagem, objetivo desse trabalho, criou-se um modelo proposto que inicialmente foi discretizado utilizando diferenças finitas como método numérico originando uma malha de 235 linhas, 250 colunas e 13 camadas que representa uma área de 7,093 km<sup>2</sup>. As primeiras 11 camadas do modelo possuem uma espessura total de 273 metros representando as rochas sedimentares e as duas últimas camadas, representando o embasamento cristalino, possuem espessuras de 400 metros cada uma delas. Dessa forma o embasamento cristalino é representado por 800 metros de espessura. Na região onde foi projetada a cava o modelo foi refinado para células de 50m por 50m para obter soluções numéricas mais refinadas de cargas hidráulicas e fluxo como também representar mais adequadamente a geometria da cava proposta e a localização dos poços de drenagem. O refinamento permitiu a delimitação aproximada da geometria das chaminés de kimberlito, a zona de relaxação na rocha encaixante, as estruturas associadas e os rios (Figura 10).



**Figura 10:** Área de estudo definida pelo projeto Victor Diamond e discretizada por meio do software PMWIN.

### 3.5 - Contornos do Modelo

Para a calibração em regime estacionário e em regime transiente dos dados de bombeamento atribuiu-se a todas as células de todas as camadas cargas hidráulicas especificadas. Os potenciais fixos foram baseados na topografia do terreno de modo que as elevações iniciais da água

subterrânea, para a simulação estacionária, foram assumidas como sendo 2 metros abaixo da superfície do terreno. Na base do modelo as células permaneceram com carga especificada no valor de 150 metros em relação ao nível do mar. A elevação de 150 metros foi adotada devido à exposição do granito na superfície ocorrer nessa altitude. Essas cargas hidráulicas especificadas têm o objetivo de garantir o gradiente vertical ascendente (drenança vertical) identificado nos testes de bombeamento.

### 3.6 - Simulação da Hidrogeologia

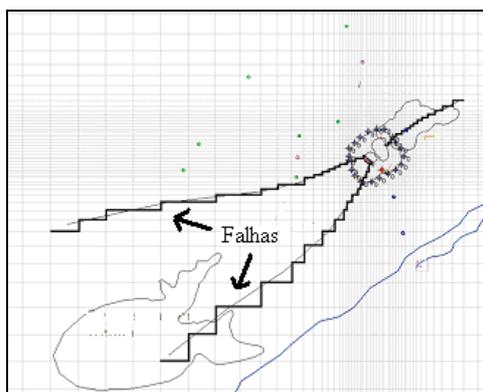
O modelo tem espessura de simulação de aproximadamente 1073 metros sendo distribuídas ao longo de 13 camadas (Tabela 2 e Figura 9).

**Tabela 2: Seqüência de camadas, formação geológica, profundidade e espessura das camadas (HCI, 2004).**

Camada	Formação Geológica	Litologia	Elevação (masl*)	Profundidade [m]	Espessura (m)
1	Capeamento	Musgo, Silte, Argila, Arenito.	84 a 58	0 a 26	variando 5 a 30
2	Upper Attawapiskat	Calcário Cársticos	58 a 34	26 a 50	variando 20 a 45
3	Lower Attawapiskat	Calcário Fundido	34 a 9	50 a 75	25
4			9 a -48	75 a 132	57
5	Ekwan River e Severn River	Calcário intercalado com finas camadas de Argilito	-48 a -68	132 a 152	20
6			-68 a -114	152 a 198	46
7			-114 a -135	198 a 219	21
8	Red Head Rapids e Churchill River	Xisto, Siltito, Argilito	-135 a -143	219 a 227	8
10			-151 a -176	235 a 264	29
9	Red Head Rapids e Churchill River	Arenito friável	-143 a -151	227 a 235	8
11	Bad Cache Rapids	Dolomito	-176 a -189	264 a 279	15
12	Granito Pré-Cambriano	Granito pré-cambriano e Gnaisse	-189 a -589	279 a 679	400
13			-589 a -989	679 a 1079	400

\* MASL: Meters Above Sea Level.

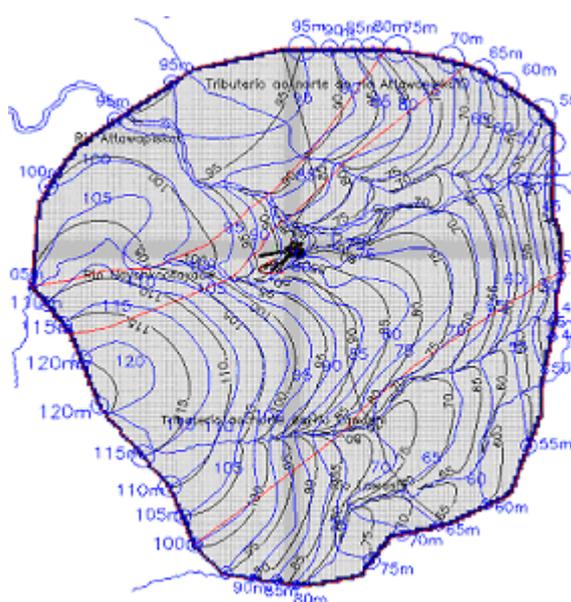
O modelo de diferenças finitas, que consiste de 13 camadas, é dividido em 16 diferentes zonas. As propriedades hidráulicas das várias zonas no modelo são sumarizadas na Tabela 1. Algumas das unidades (kimberlito, arenito, granito, zona de falhas e a zona de relaxação) são consideradas isotrópicas, mas a maioria das unidades sedimentares é assumida como anisotrópicas com a relação geral  $K_x = K_y > K_z$  (HCI, 2004). A chaminé de kimberlito é incorporada no modelo como um corpo de transição de três zonas penetrando todas as 13 camadas: a primeira zona fica sobre o argilito, a segunda zona dentro do argilito e dolomito, e a terceira zona dentro do granito. As duas zonas de falha (Figura 11) são incorporadas no modelo com cerca de 10 m a 20 m de largura causando zonas de condutividade hidráulica maior no interior da seqüência de calcário, ou seja, da base do capeamento para o topo do argilito.



**Figura 11:** Falhas discretizadas por diferenças finitas com pacote *Horizontal-Flow Barrier* do PMWIN. As falhas interceptam todas as seis primeiras camadas do modelo.

### 3.7 - Ajuste do modelo

Além de uma calibração em regime estacionário foi realizado um ajuste no modelo para obter um mapa potenciométrico mais próximo do resultado calibrado por HCI (Figura 12). O modelo de simulação em regime estacionário de diferenças finitas foi complementado atribuindo valores da condutividade hidráulica das diversas zonas hidrogeológicas (Tabela 1) bem como fatores de condutância para os rios (Tabela 3), fator de recarga ( $2,0 \cdot 10^{-5}$  m/dia), cargas hidráulicas específicas para as fronteiras laterais do modelo baseado no mapa de nível d'água calibrado por HCI (2004), carga hidráulica especificada na base do granito do modelo ( $h = 150\text{m}$ ) e o uso do pacote *Horizontal-Flow Barrier* no software *PMWIN* para simular os três alinhamentos de falha em torno do sitio da mina definindo a direção da barreira e atribuindo para cada célula o fator de condutividade hidráulica/espessura da barreira.



**Figura 12:** Comparação entre o mapa potenciométrico do modelo de diferenças finitas (linhas pretas) e o mapa proposto do modelo de elementos finitos (linhas azuis) realizado por HCI (2004).

**Tabela 3: Parâmetros utilizados para a modelagem dos rios (HCI, 2004).**

Rio	Condutividade Hidráulica do Leito de Rio [m/d]	Nível do Rio [masl*]	Largura do Rio [m]
Attawapiskat	0,01	74 – 41	800
Tributário ao norte do rio Attawapiskat	0,01	81 – 61	30
Nayshkootayaow	0,14	94 – 59	30
Lawashi	0,01	72 – 47	30
Tributário ao norte do rio Lawashi	0,01	120 – 40	30

\* MASL: Meters Above Sea Level.

Com base neste modelo ajustado pôde-se calcular as linhas principais de fluxo ao redor da área de mina. Nota-se que as falhas (Figura 11), que foram incorporadas no modelo numérico através da subrotina *Horizontal Flow Barrier*, são os principais condutores de fluxo em direção a mina bombeada (Figura 13). Além disso, os dois rios (Attawapiskat e Nayskootayaow) são os principais contribuintes de água subterrânea que entra na cava durante os 12 anos de bombeamento.

### 3.8 - Simulação dos Poços de Desaguamento

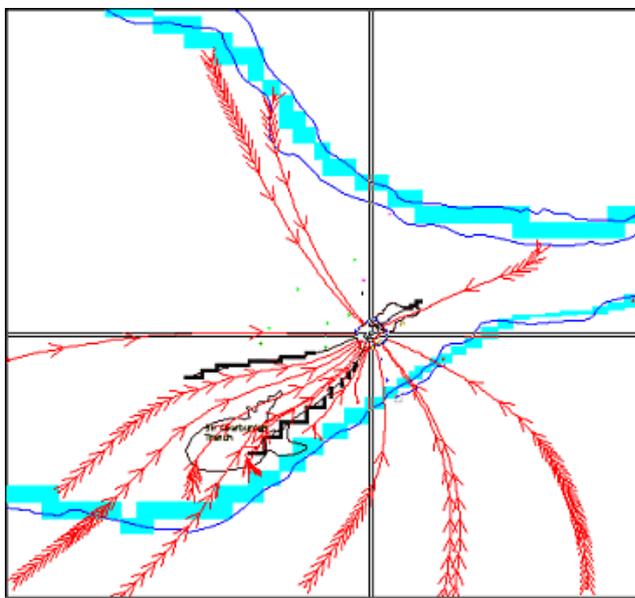
O desaguamento da cava do projeto Victor será realizado com poços de drenagem no perímetro da cava. Conforme relatado por HCI (2004), um importante fator limitante na efetividade do sistema de drenagem no terreno do projeto Victor será a presença de argilito (camadas 8 e 10 da formação Red Head Rapids e do grupo Churchill River) na base relativamente permeável da seqüência calcária. A base da cava proposta deve ser cerca de 9 metros abaixo do topo do argilito ou 228 metros de profundidade. A unidade de argilito reduzirá severamente a efetividade dos poços de desaguamento durante a fase tardia da mina limitando o rebaixamento disponível.

Conforme descrito e mostrado no relatório HCI (2004), 23 poços de bombeamento devem ser instalados sob o perímetro da cava e três desses poços devem estar no interior do perímetro (Figura 14). A localização dos filtros dos poços é simulada apenas no calcário (camada 3 a 6) devido à baixa condutividade hidráulica na camada inferior (argilito).

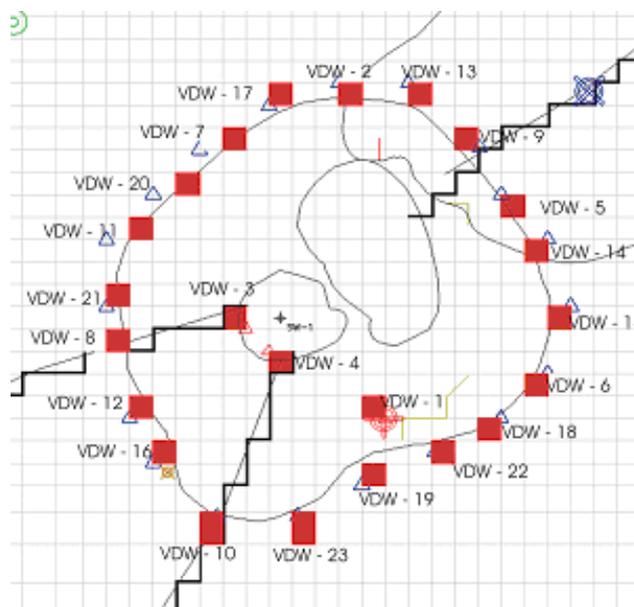
### 3.9 - Simulação do Desaguamento

Numerosas simulações interativas foram feitas com o modelo de diferenças finitas ajustado para simular o volume de água que necessitaria ser bombeado para garantir, tanto quanto possível, um piso seco à cava. O modelo simula 23 poços de desaguamento. Três poços no interior da cava irão ser desativados após cinco anos de funcionamento. Os outros 20 poços estarão em

funcionamento continuamente, sendo distribuídos ao redor do perímetro (Figura 14). Os poços serão completados a aproximadamente 10 a 20 metros abaixo do topo do argilito. É assumido que os poços de desaguamento iniciarão em janeiro de 2007 (Tabela 4) um ano após o início do descapecamento. O desaguamento em 2007 está simulado com 11 poços (VDW-1 até VDW-11). Em 2008 serão adicionados três novos poços. Nos anos de 2009 a 2011, o modelo prevê que 18 poços de desaguamento (incluindo a instalação de 4 novos poços em 2009) estarão em operação. Como indicado na Tabela 4, três poços do interior do perímetro estabelecido serão desativados após 5 anos de bombeamento (fim de 2011) e 4 adicionais poços deverão ser instalados durante 2012. Subseqüentemente, o desaguamento concluirá com 20 poços no fim da mineração, em 13 anos de atividade (fim de 2018).



**Figura 13: Linhas de fluxo em direção à mina Victor durante o procedimento de desaguamento produzido no software PMWIN.**



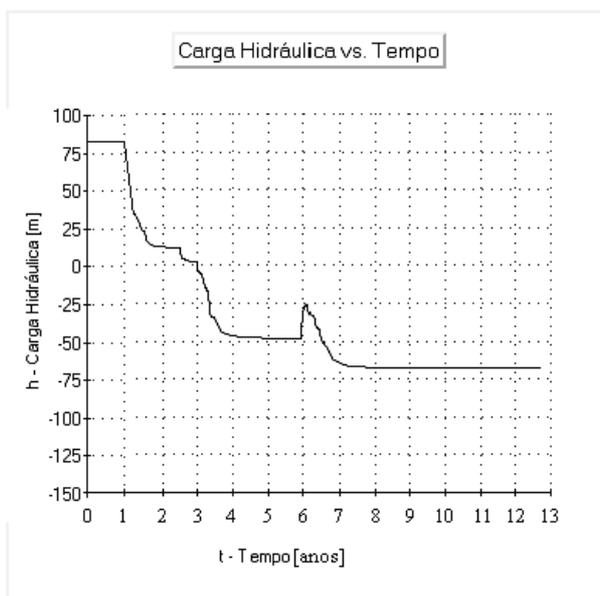
**Figura 14: Células vermelhas representando a disposição dos poços de desaguamento utilizados para o desaguamento da cava.**

A variação dos níveis de água da simulação realizada está representada por meio do gráfico na Figura 15. Esse rebaixamento do nível de água garante que a cava se manterá seca durante os primeiros 11 anos de operação da mina, ao longo do desenvolvimento das bancadas propostas por HCI, 2004. A partir desse período será necessário a utilização de bombas de fossa no interior da cava para retirar o influxo passivo residual (RPI).

O total das taxas de bombeamento durante o período completo de desaguamento e as variações de bombeamento estão sumarizado na Tabela 5. É assumido na simulação por HCI que cada poço irá bombear no máximo uma taxa de 5450 m<sup>3</sup>/dia.

**Tabela 4: Esquema de bombeamento para a efetivação do desaguamento durante os 13 anos previstos da exploração da mina Victor. No ano de 2006 não houve bombeamento (HCI, 2004).**

Peço	Bomba ligada	Bomba desligada	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
VDW-1	Jan -07	Dec -11	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX							
VDW-2	Jan -07	Dec -18	XXXXXX											
VDW-3	Jan -07	Dec -11	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX							
VDW-4	Jan -07	Dec -11	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX							
VDW-5	Jan -07	Dec -18	XXXXXX											
VDW-6	Jan -07	Dec -18	XXXXXX											
VDW-7	Jan -07	Dec -18	XXXXXX											
VDW-8	Jan -07	Dec -18	XXXXXX											
VDW-9	Mar -07	Dec -18	XXXXX	XXXXXX										
VDW-10	May -07	Dec -18	XXXX	XXXXXX										
VDW-11	Jul -07	Dec -18	XXX	XXXXXX										
VDW-12	Jul -08	Dec -18		XX	XXXXXX									
VDW-13	Sep -08	Dec -18		XX	XXXXXX									
VDW-14	Nov -08	Dec -18		X	XXXXXX									
VDW-15	Jan -09	Dec -18			XXXXXX									
VDW-16	Mar -09	Dec -18			XXXXX	XXXXXX								
VDW-17	May -09	Dec -18			XXXXX	XXXXXX								
VDW-18	Jul -09	Dec -18			XXX	XXXXXX								
VDW-19	Jan -12	Dec -18						XXXXXX						
VDW-20	Mar -12	Dec -18						XXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
VDW-21	May -12	Dec -18						XXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX
VDW-22	Jul -12	Dec -18						XXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX



**Figura 15: Rebaixamento de água pela simulação em regime transitório de 13 anos de duração no interior da cava da mina Victor utilizando o esquema de bombeamento como é apresentada na Tabela 4.**

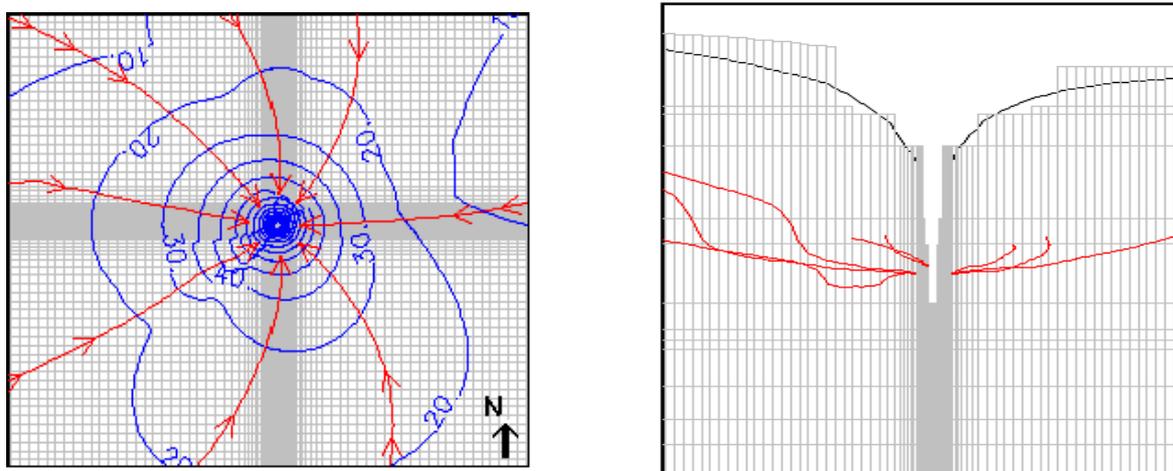
A Figura 16 apresenta um corte da secção transversal na área da cava durante o rebaixamento dos níveis de água com as linhas de fluxo indicando o movimento da água subterrânea em direção a cava proposta. O fluxo será inicialmente horizontal através das unidades hidroestratigráficas, se tornando radial e permeando a cava desenvolvida. As duas falhas de direções nordeste e sudoeste

servirão como coletores laterais aumentando a água subterrânea para o sistema de drenagem. A Figura 17 representa o cone de rebaixamento em visão tridimensionalmente.

**Tabela 5: Estimativa da taxa de bombeamento, profundidade e elevações da cava e taxa total de desaguamento.**

Fim do Ano	Profundidade da Cava da Mina [m]	Elevação da Cava da Mina [masl*]	Taxa de Bombeamento [m <sup>3</sup> /dia]
1	3	81	0
2	30	54	59.950
3	30	54	76.300
4	60	24	98.100
5	96	-12	98.100
6	144	-60	98.100
7	156	-72	103.550
8	156	-72	109.000
9	156	-72	109.000
10	156	-72	109.000
11	156	-72	109.000
12	180	-96	109.000
13	228	-144	109.000

\* MASL: Meters Above Sea Level.

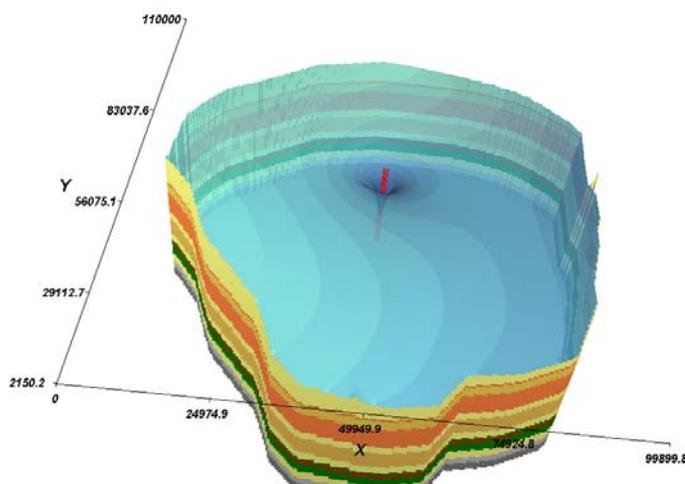


**Figura 16: Planta e seção transversal na área da cava e linhas de fluxo para o movimento da água subterrânea. As setas são espaçadas a cada 100 anos de movimento.**

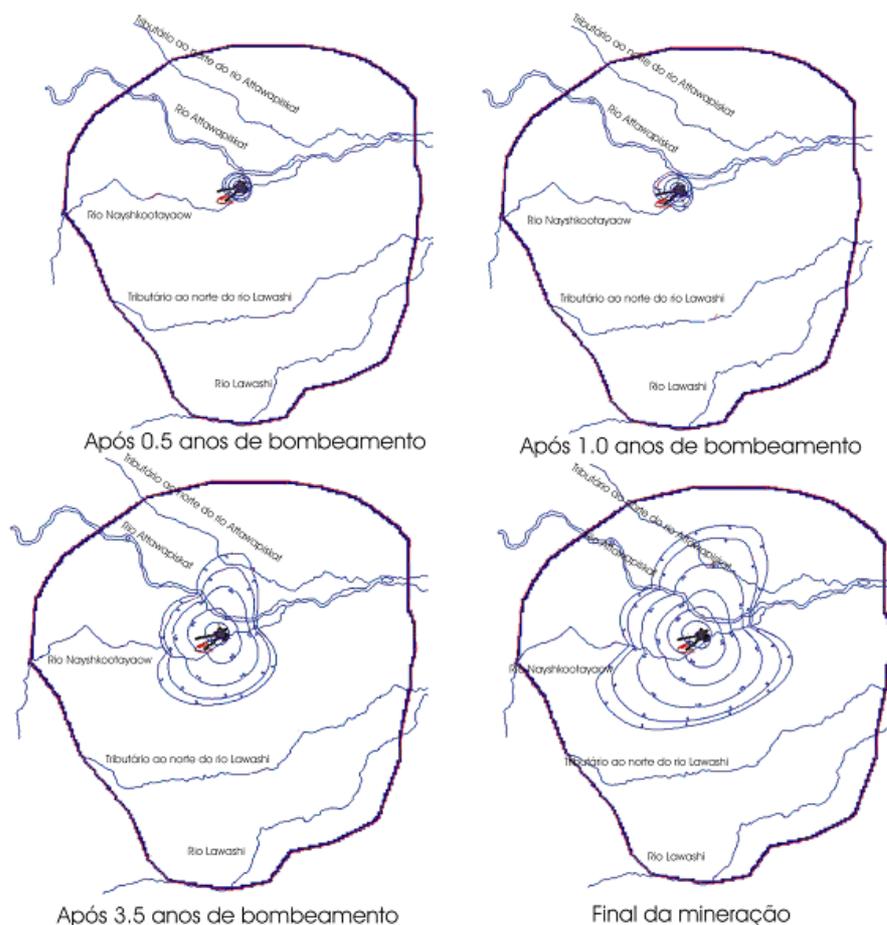
### 3.10 - Previsão dos Impactos no Nível de Água

O cone de rebaixamento induzido pelo desaguamento de 12 anos de duração irá expandir dentro do calcário com o tempo e vai atingir os rios da região. O modelo de fluxo de água subterrânea prevê que no fim de 13 anos (o fim da mineração sob o atual plano da mina) o rebaixamento terá ocorrido na parte superior do calcário da formação Attawapiskat dentro de todo o domínio do modelo. As mudanças previstas no topo do embasamento são ilustradas na Figura 18. O

modelo prevê que no fim da mineração a curva de rebaixamento de 3 metros irá se estender por aproximadamente 23 a 25 km ao norte e a leste e 27 a 30 km a oeste e sul.



**Figura 17: Apresentação 3-D da área de simulação (13 camadas) mostrando a superfície potenciométrica com o cone de rebaixamento resultante do procedimento de desaguamento na cava através dos poços instalados (linha vermelha) .**



**Figura 18: Rebaixamento no nível de água ao longo do processo de mineração. A linha mais exterior é a linha de rebaixamento de 3 metros.**

### 3.11 - Previsão das Fontes de Água para o Sistema de Desaguamento

Os componentes previstos (para as várias fontes de água) do fluxo de água subterrânea que serão removidos pelo sistema de desaguamento durante toda a operação de mineração foram determinados por meio do programa *WATER BUDGET* incorporado no *PMWIN-Pró* e as respectivas taxas de depleção são mostradas na Figura 19. A Tabela 6 sumariza as porcentagens no final da mineração em 13 anos.

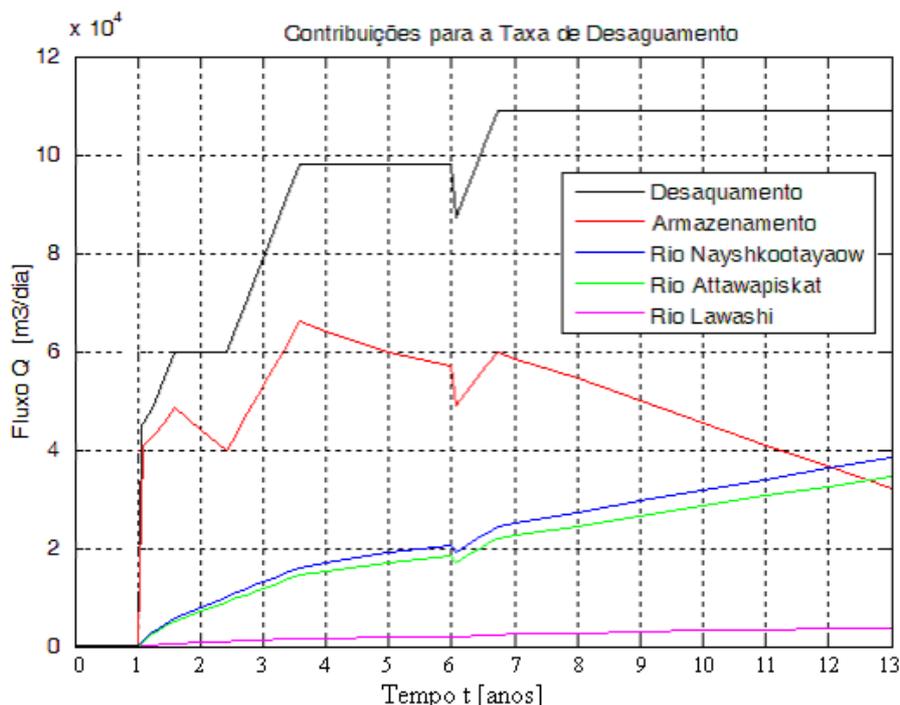


Figura 19: Contribuições (Fluxos [m<sup>3</sup>/dia]) ao desaguamento total das diferentes fontes de água subterrânea. Compare a figura 5.27 com a figura A 15 da análise de HCI (2004).

Tabela 6: Contribuições das fontes do desaguamento de água subterrânea.

Fonte	Contribuição [m <sup>3</sup> /12 anos]	Contribuição média [m <sup>3</sup> /dia]	Porcentagem
Taxa de desaguamento dos poços	419·10 <sup>6</sup>	95.671	100
Depleção do armazenamento do modelo	216·10 <sup>6</sup>	49.344	52
Infiltração do rio Nayshkootayaow	102·10 <sup>6</sup>	22.278	23
Infiltração do rio Attawapiskat e do seu tributário na parte norte	99·10 <sup>6</sup>	21.733	22
Infiltração do rio Lawashi e do seu tributário na parte norte	10·10 <sup>6</sup>	2.317	3

As contribuições ao desaguamento da mina durante os 12 anos de bombeamento são provenientes do armazenamento de água subterrânea e dos três rios principais que atravessam a área de modelo. Como se pode ver no gráfico da Figura 19, a maior contribuição provém do

armazenamento, principalmente nos primeiros anos do desaguamento. A partir deste gráfico é possível analisar que ao longo dos anos a contribuição do armazenamento está diminuindo e as contribuições dos rios principais aumentam superando a taxa de armazenamento ao final da mineração.

A descarga do fluxo subterrâneo para o rio Nayshkootayaow é prevista de ter seu maior valor cerca de 22.300 m<sup>3</sup>/dia durante o procedimento de desaguamento. Os impactos de desaguamento no rio Attawapiskat e o seu tributário ao norte é previsto, uma máxima descarga, cerca de 21.700 m<sup>3</sup>/dia no fim da mineração. E finalmente os impactos de desaguamento no rio Lawashi e o seu tributário ao norte prevêem uma descarga máxima aproximadamente de 2.300 m<sup>3</sup>/dia no final da mineração.

### 3.12 - Estimativa dos Custos para o Desaguamento

O capital estimado e os custos de manutenção para o sistema de desaguamento proposto ao projeto Victor é apresentado na Tabela 7 que dá uma boa orientação sobre os custos de instalação e a manutenção dos poços de desaguamento durante o tempo de mineração.

**Tabela 7: Estimativa de custos associados com o sistema de desaguamento (HCI, 2004).**

Itens	Custos (em milhões US\$)	Comentários
Preparação do terreno		Será estimado pela empresa AMEC
Capital para os poços de desaguamento	US\$ 11 M	Assume-se 20 poços para o perímetro e bombas sendo US\$ 550 000 para cada instalação completada.
Capital para os poços de monitoramento	US\$ 0,5 M	Assume-se a instalação de 5 poços de monitoramento por ano. Para os quatros primeiros anos cada poço apresenta o valor de US\$ 25 000.
Custos do sistema de desaguamento (Casa de poço, Linhas de força, instrumentação, Diques de drenagem, etc.).		Será estimado pela empresa AMEC
Custos para bombas de fossa		Será estimado pela empresa AMEC
Energia das bombas		Será estimado pela empresa AMEC
Manutenção e reparo	US\$ 30 M	25% x capital x anos de vida da mina
Custo do tratamento da água (se for necessário).		Será estimado pela empresa AMEC
Mitigação do Rio Nayshkootayaow (se for necessário)		Será estimado pela empresa AMEC
Equipe de desaguamento		Será estimado pela empresa AMEC
<b>Total dos custos</b>	<b>US\$ 41,5 M</b>	Será completado pela empresa AMEC

**M = milhões; AMEC = Companhia de consultoria.**

## 4 - CONCLUSÕES

O principal resultado desse trabalho é apresentado na Figura 15, a qual mostra o rebaixamento no interior da mina Victor planejada garantindo, tanto quanto possível, uma cava livre de água durante os trabalhos de lavra. Este resultado foi obtido pela simulação com o modelo de fluxo MODFLOW em regime transitório em 12 anos de duração utilizando o esquema de bombeamento apresentado na Tabela 4. Outros resultados desse trabalho pode ser observado no mapa potenciométrico (Figura 12), corte vertical da mina escavada (Figura 16) e a extensão do cone de rebaixamento durante as quatro estações de bombeamento (Figura 18).

Os resultados obtidos são promissores com relação à qualidade do modelo estabelecido, referente a discretização em tempo e espaço, a incorporação dos parâmetros hidrodinâmicos e demais informações oriundas do relatório final da empresa Hydrologic Consultants, Inc. (HCI, 2004). A curva de rebaixamento é quase idêntica se comparada com a curva do relatório final produzido por HCI bem como os outros resultados apresentados que são bastante similares se comparados aos resultados do relatório produzido por HCI. Os resultados desta simulação estão publicados e ilustrados no relatório final (HCI, 2004) e serviram como referência às simulações desse trabalho.

A simulação alternativa realizada nesse estudo por meio do programa MODFLOW originou resultados satisfatórios mostrados ao longo desse trabalho e comprovou a sua capacidade e potencialidade na solução dos problemas hidrogeológicos na área de mineração. Deve-se ressaltar que o método de elementos finitos parece ser superior ao método de diferenças finitas devido à uma discretização mais adequada para as áreas de interesse, especialmente ao redor da mina. O programa MINEDW lançado por HCI (1993) é um programa especialmente concebido para os problemas de mineração, possuindo diversas subrotinas específicas que faltam nos programas como PMWIN e os outros baseados no modelo de água subterrânea MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988). O pleno desempenho de poços (neste caso os poços de desaguamento), com as suas dificuldades inerentes tais como as perdas de poços e os efeitos de vários filtros instalados ao longo do furo do poço, não pode ser tratado adequadamente com MODFLOW.

Concluindo pode-se dizer que a remodelagem da mina Victor, cujos resultados são apresentados nesse trabalho, são de qualidade satisfatória e precisão confiável e justificam simulações futuras em projetos de desaguamento na mineração.

## 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMEC Earth & Environmental Limited (2001). Victor project, hydrometric monitoring, year 2000 monitoring, preliminary report. Report submitted to De Beers Canada Exploration Inc.

Chiang, W-H. (2005). 3D-Groundwater Modeling with PMWIN Pro – A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, Second Edition, 397 pp.

Hydrologic Consultants Inc.- HCI (1993). MINEDW – a finite element program for three-dimensional simulation of mine dewatering: unpublished report, 79 pp.

Hydrologic Consultants Inc.- HCI (2004). Dewatering of Victor Diamond Project. Predicted Engineering, Cost and Environmental Factors. Report submitted to SRK Consulting, Vancouver, British Columbia, 55 pp.

McDonald, M. G. e A.W. Harbaugh. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 576p

Piteau, D. R. e F. L. Peckover (1979). Rock Slope Engineering. Landslides: Analysis and Control, ed. R. Schuster e R. Krizek. Transportation Research Board, U.S. Department of Transportation.

Sharp, J.C.(1979).Pit Slope Manual.Canada Department of Energy Mines and Resources.

Vutukuri, V. S. e R. D. Lama (1986). Environmental Engineering in Mines. Cambridge University Press, Cambridge, 504 pp.