



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS  
ESCOLA DE MINAS



**INUNDAÇÃO CONTROLADA COMO ALTERNATIVA DE FECHAMENTO  
DE MINA SUBTERRÂNEA**

**CAIO CEZAR ALVES PINTO**

Ouro Preto - MG

2021

CAIO CEZAR ALVES PINTO

**INUNDAÇÃO CONTROLADA COMO ALTERNATIVA DE FECHAMENTO  
DE MINA SUBTERRÂNEA**

Monografia de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para conclusão do curso.

Área de concentração: Lavra de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida Da Silva

Ouro Preto – MG

2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P659i Pinto, Caio Cezar Alves.  
Inundação controlada como alternativa de fechamento de mina  
subterrânea. [manuscrito] / Caio Cezar Alves Pinto. - 2021.  
71 f.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas subterrâneas. 2. Desativação de minas. 3. Drenagem ácida  
de minas. I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro  
Preto. III. Título.

CDU 622.538

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

---



---

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e sete dias do mês de maio de 2021, às 14h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Caio Cezar Alves Pinto** matrícula: 15.2.1337, intitulado: **INUNDAÇÃO CONTROLADA COMO ALTERNATIVA DE FECHAMENTO DE MINA SUBTERRÂNEA**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho Prof. Dr. José Margarida da Silva, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rita de Cassia Pedrosa Santos, e Prof. Dr. Osvail André Quaglio. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rita de Cassia Pedrosa Santos, segundo, o Prof. Dr. Osvail André Quaglio e em último, o Prof. Dr. José Margarida da Silva. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 7,8 (sete inteiro e oito décimos), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão, que recebeu os termos dos membros da banca. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 27 de Maio de 2021.

  
Presidente: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Membro: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rita de Cassia Pedrosa Santos

Membro: Prof. Dr. Osvail André Quaglio

Discente: Caio Cezar Alves Pinto

---

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho  
À minha mamãe Máxima e minha mãe Mirica por tudo.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor e amigo José Margarida, pela paciência e incentivo desde o primeiro dia frente ao colegiado.

À Adriana por representar o carinho dentro da Escola de Minas.

À Escola de Minas e a UFOP pelo ensino de qualidade.

À Ouro Preto pelo acolhimento. Viver Ouro Preto foi um sonho de criança.

and last but not least,

Ao QN, irmão que Deus e OP me deu.

## RESUMO

Quando os recursos de um depósito são esgotados ou não são mais economicamente viáveis, a mina cessa suas operações. Neste momento se inicia a fase do fechamento de mina, com o estágio final da reabilitação (recuperação) do local. A reabilitação inclui atividades relacionadas ao armazenamento, aterro, demolição, preenchimento e gerenciamento de rejeitos e/ou resíduos e ao reflorestamento e recuperação das áreas afetadas. O uso da área pós-fechamento também deve ser avaliado e definido. Assim, o plano de fechamento de mina deve traçar os caminhos pelos quais a reabilitação será feita. Ademais, o fechamento da mina deve abranger tanto o fechamento programado quanto um possível fechamento prematuro. O encerramento da mina não só gera impactos apenas no meio físico, mas também traz mudanças sociais, econômicas e culturais, tanto no nível local quanto regional, tornando o conceito de fechamento de mina muito mais abrangente que a simples desativação do empreendimento e promoção da recuperação ambiental das áreas degradadas. Nesse contexto, ações capazes de contribuir para a estabilidade e a autosustentabilidade ambiental, econômica, social e cultural das comunidades circunvizinhas devem ser incorporadas. Uma alternativa de fechamento de mina subterrânea pode ser a inundação controlada, que é conduzida em áreas onde a população e demais componentes do ambiente podem ser afetados pela água poluída da lavra ou pela elevação do nível da água. Nesses casos, a velocidade da inundação não é grande, leva tempo e depende muito do tipo de rocha, tipo de aquífero, condutividade hidráulica da rocha, porosidade, entre outros fatores. Neste trabalho é apresentado um estudo baseado em casos reais de diversas minas ao redor do mundo, fazendo uma descrição de estudos de caso cuja finalidade é comprovar a eficiência da técnica de inundação controlada como recurso de fechamento de mina. O fechamento de minas é algo tão importante quanto complexo, que ainda precisa vencer vários desafios, ambientais quanto socioeconômicos. Comparando-se modelos de fechamento de mina subterrânea, observam-se vários fatores que requerem tempo e dinheiro com a manutenção. Como alternativa, a inundação pode ser vista como fonte de renda para a região, juntando-se ao geoturismo e à energia geotérmica, como algumas opções que podem trazer receita.

**Palavras-chave:** fechamento de mina, planejamento, recuperação ambiental, inundação controlada, drenagem ácida.

## ABSTRACT

When the deposit's resources are depleted or are no longer economically viable, the mine ceases operations. At this point, the mine closure phase begins, with the final stage of site recovery (recovery). Rehabilitation includes activities related to the storage, landfill, demolition, filling and management of tailings and/or residues and the reforestation and restoration of affected areas. The use of the post-closure area should also be assessed and defined. Thus, the mine closure plan should outline the paths by which the rehabilitation will be carried out. In addition, mine closure should encompass both scheduled closure and premature mine closure. The closure of the mine does not only generate impacts on the physical environment, but also brings social, promotion and cultural changes, both local and regional, making the concept of mine closure much broader than simply deactivating the project and promoting the environmental recovery of the areas degraded. In this context, actions capable of contributing to the environmental, economic, social and cultural stability and self-sustainability of the surrounding communities must be incorporated. An underground mine closure can be controlled flooding, which is carried out in areas where the population and other components of the environment can be affected by polluted water from the mine or by rising water levels. In these cases, the speed of the flood is not great, it takes time and depends a lot on the type of rock, type of aquifer, hydraulic conductivity of the rock, porosity, among other factors. In this work, a study based on real cases of several mines around the world is presented, describing case studies whose proof is the efficiency of the controlled flooding technique as a mine closure resource. Mine closure is as important as it is complex, which still has to overcome several environmental and socio-economic challenges. Comparing underground mine closure models, several factors are observed that exaggerate time and money with maintenance. As an alternative, flooding can be seen as a source of income for the region, producing geotourism and geothermal energy, as some options that can bring revenue.

**Keywords:** Mine closure, planning, environmental recovery. controlled flooding, acid drainage.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Entrada da Mina Cabaçal após recuperação. ....	14
Figura 2: Barragem de rejeitos da Mina Cabaçal após recuperação. ....	14
Figura 3: Trolley de visitação da Mina de Passagem. ....	15
Figura 4: Escada de acesso ao lago para mergulhadores na Mina de Passagem. ....	15
Figura 5: Integração do Plano de Fechamento e Implementação nos vários estágios dentro do Ciclo de Vida de uma Mina. ....	19
Figura 6: Maturação de queijo em túneis na mina Ollomont-Itália. ....	<del>25</del> 24
Figura 7: Museu da mina de Wieliczka – Mina de sal (Polônia). ....	25
Figura 8: Catedral do sal (Zipaquirá, Colômbia). ....	<del>27</del> 26
Figura 9: Localização global das minas inundadas. ....	<del>40</del> 39
Figura 10: Localização Picher Mining. ....	<del>41</del> 40
Figura 11: Localização North-Rhine/Westphalian Coal Mines. ....	<del>44</del> 43
Figura 12: Medições de temperatura e condutividade elétrica no poço. ....	<del>45</del> 44
Figura 13: Medições de temperatura e condutividade elétrica no poço Sicília da mina abandonada de Meggen / Alemanha. ....	<del>46</del> 45
Figura 14: Localização Ronneburg Uranium Mine. ....	<del>47</del> 46
Figura 15: Gráficos de temperatura e condutividade elétrica do poço noroeste de Ronneburg / Alemanha. ....	<del>49</del> 48
Figura 16: Localização da mina de sal Hope Alemanha. ....	<del>51</del> 50
Figura 17: Comparação da situação de pós e pré-aterro no poço Adolfsglück em 1985 e 1988. ....	<del>53</del> 52
Figura 18: Resultados das medições multiparâmetros no poço Hope em 20 de setembro de 1985. Apenas estratificação menor pode ser observada, a qual - exceto que o nível da água subiu - não mudou significativamente até o final da inundação da mina. ....	<del>53</del> 52
Figura 19: Perfil de temperatura no eixo Peißen. A linha horizontal mais baixa é o 1º nível das minas. Cada uma das zonas de temperatura "estáveis" representa uma célula convectiva, como mostrado pelas investigações do marcador. ....	<del>55</del> 54
Figura 20: Perfis de profundidade de temperatura em duas minas de sal inundadas no noroeste da Alemanha. Esquerda: Beienrode, à direita: Ronnenberg. ....	<del>56</del> 55
Figura 21: Localização da Mina do Verdinho. A mina está localizada em área rural do município de Forquilha, Santa Catarina. ....	<del>57</del> 56

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1:</b> Métodos de lavra subterrânea e suas relações com os possíveis usos. ....	23
<b>TABELA 2:</b> Reutilização de minas para aplicações civis. ....	28
<b>TABELA 3:</b> Reutilização de minas para depósito de lixo. ....	<del>32</del> 34
<b>TABELA 4:</b> Reutilização de minas para estações de pesquisa. ....	<del>35</del> 34
<b>TABELA 5:</b> Quadro das Situações de Uso da Inundação Controlada .....	<del>62</del> 60

## SUMÁRIO

<b>1) INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2.) OBJETIVOS</b> .....	<b><del>10</del>11</b>
2.1) OBJETIVO GERAL .....	<del>10</del> 11
2.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	<del>10</del> 11
2.3) ESTRUTURA DO TRABALHO .....	<del>10</del> 11
<b>3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b><del>11</del>12</b>
3.1) MINA SUBTERRÂNEA.....	<del>12</del> 13
3.2) FECHAMENTO DE MINA .....	<del>16</del> 17
<b>3.2.1 Reutilização de Minas Abandonadas</b> .....	<b><del>22</del>23</b>
<b>3.2.2 Exemplos Importantes de reuso em Minas Subterrâneas</b> .....	<b><del>24</del>26</b>
3.3) INUNDAÇÃO CONTROLADA.....	<del>37</del> 38
<b>4) METODOLOGIA</b> .....	<b><del>39</del>40</b>
<b>5) ESTUDOS DE CASO</b> .....	<b><del>40</del>41</b>
5.1) CASO DE PICHER MINNING DISTRICT, OKLAHOMA, USA .....	<del>40</del> 41
5.2) CASO DE NORTH-RHINE/WESTPHALIAN COAL MINES, GERMANY .....	<del>43</del> 44
5.3) CASO DE RONNEBURG URANIUM MINE, THURINGIA, GERMANY .....	<del>47</del> 48
5.4) CASO DE HOPE SALT MINE, ALEMANHA .....	<del>50</del> 51
5.5) CASO DA MINA VERDINHO, CRICIÚMA, SANTA CATARINA, BRASIL.....	<del>56</del> 57
5.6) CASO DE MINAS DE URÂNIO ELLIOT LAKE, CANADÁ .....	<del>59</del> 60
<b>6) DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b><del>61</del>62</b>
<b>7) CONCLUSÕES</b> .....	<b><del>63</del>64</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b><del>66</del>67</b>

## 1) INTRODUÇÃO

O fechamento da mina é pensado antes mesmo do início das operações de mineração. As preocupações e as ações da empresa de mineração devem priorizar também as comunidades que receberam os impactos – positivos e negativos – da implantação do projeto.

Os impactos do encerramento da lavra não recaem apenas sobre o meio físico, mas também trazem mudanças sociais, econômicas e culturais, no âmbito local e regional. Assim, o conceito de fechamento de mina torna-se muito mais abrangente que a simples desativação do empreendimento e promoção da recuperação ambiental das áreas degradadas, devendo incorporar ações capazes de contribuir para a estabilidade e a autosustentabilidade ambiental, econômica, social e cultural das comunidades circunvizinhas.

Segundo Wolkersdorfer (2005) *apud* Vieira (2020), após a extração do minério, ocorre uma redistribuição de tensões e a deformação causada pode afetar o gradiente hidráulico, podendo causar inundações ou drenagem das áreas superficiais. Maciços rochosos podem perder a estabilidade devido a presença de água, principalmente em áreas carbonáticas, cavernas ou carstes, que podem ser agravados com o tempo.

As aberturas subterrâneas para lavra podem comprometer a qualidade do maciço rochoso, os recursos hídricos; levar a fenômenos como a subsidência de terrenos e os golpes de terreno (*rock bursts*), entre outros impactos (SILVA & CURI, 1998, 2001).

Duas diferentes fontes de água são encontradas em minas subterrâneas: águas subterrâneas e água de serviço da mina. Na lavra, a escavação pode interconectar aquíferos e, abatimentos e subsidências podem ocasionar conexão com aquíferos na sua parte superior ou provocar acesso de águas superficiais.

Os vários estudos para fechamento propõem alternativas que sejam mais viáveis economicamente, como a inundação controlada. Cuidados especiais devem ser tomados para que não haja contaminação do lençol freático.

A inundação de água subterrânea pode acontecer quando o nível da água dentro da rocha ou solo subterrâneo, conhecido como lençol freático, aumenta. Quando o lençol freático sobe e atinge o nível do solo, a água começa a vazar para a superfície e podem ocorrer inundações, o que significa que a água pode subir pelos espaços subterrâneos (ENVIRONMENT AGENCY, 2019).

Um dos muitos desafios das inundações de águas subterrâneas é que muitos métodos tradicionais de proteção contra inundações podem não ser eficazes contra inundações de águas subterrâneas. A razão disso é que a água pode subir pelo piso (da escavação) e pode continuar

a subir por muito tempo. A maneira mais eficaz de manter as águas subterrâneas fora de sua propriedade (mina) é usar um sistema de drenagem ou bomba para drenagem.

Na mineração subterrânea a paralisação do sistema de drenagem (desaguamento) da água subterrânea propicia a inundação das galerias e dos acessos da mina.

Do ponto de vista ambiental, minas com túnel de acesso (ou ádito) devem ser fechadas, preferencialmente, com construção de cercas ou barramentos nas entradas para permitir a inundação restabelecendo o nível anterior à lavra.

A inundação controlada é conduzida em áreas onde a população e demais componentes do ambiente podem ser afetados pela água poluída da lavra ou pela elevação do nível da água. Isso se dá pelo fato de que, quando a água da inundação intercepta o lençol freático, as possíveis contaminações serão passadas ao lençol e conseqüentemente podem chegar às águas superficiais.

Uma das principais razões para a inundação é prevenção de oxidação de sulfetos e conseqüentemente da drenagem ácida. Razões de segurança são outra motivação para inundação e selagem de poços.

O processo de inundação da mina pode levar de vários meses a mais de uma década. O tempo depende do espaço disponível, da disponibilidade de água e da natureza da inundação (descontrolada, controlada ou monitorada).

Bandeira (2006) e Nóbrega *et al.* (2008) *apud* MORAES (2010) relatam que o custo de tratamento da drenagem ácida com a utilização de aditivos químicos é da ordem de milhões de reais. A companhia de mineração Nanisivik, fundada em 1975 para atender a mina de chumbo-zinco Nanisivik, em Strathcona, Canadá, cuja produção de deu de 1976 a 2002, teve seu plano de fechamento apontando problemas de drenagem ácida. Ao submeter o problema aos órgãos competentes em 2002, os custos de recuperação foram estimados, inicialmente, em 10 milhões de dólares canadenses e, em 2004 ultrapassou a casa dos 15 milhões, de acordo com relatos de Cassie *et al.* (2007, *apud* MORAES, 2010).

No mundo existem cerca de 1 milhão de minas abandonadas, segundo Hall *et al.* (2011). No pós-abandono, usualmente as minas são inundadas pela elevação natural ou artificial do nível de água.

## 2.) OBJETIVOS

### 2.1) OBJETIVO GERAL

Avaliar a possibilidade de implantação de inundação controlada como alternativa de fechamento de mina subterrânea, que visa à economia financeira e de tempo.

### 2.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar modelos de fechamento de mina subterrânea;
2. Apresentar e comparar alguns estudos de caso;
3. Desenvolver o conhecimento quando se trata de fechamento de mina e apresentar suas dificuldades mostrando estudo de casos em que se aplicou a inundação controlada como alternativa.

### 2.3) ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo faz uma breve introdução acerca da mineração subterrânea e sobre as características da água subterrânea.

O segundo capítulo apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre minas subterrâneas com o foco em mineração subterrânea, apontando definições de modo a facilitar a compreensão, discutindo as vantagens deste tipo de aproveitamento das águas e a viabilidade do uso de tais técnicas como parte de um plano de fechamento de mina subterrânea.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia, explicando o fato desta escolhida na produção do trabalho.

No quinto capítulo são descritos estudos de caso de diversas minas ao redor do globo terrestre.

No sexto capítulo são discutidos os estudos de caso.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões obtidas com base nos objetivos.

Finalizando, são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

### 3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de extração e beneficiamento de minérios impactam direta ou indiretamente o meio ambiente, em particular os recursos hídricos, provocando modificações na qualidade e/ou quantidade desse recurso. A atividade mineral pode alterar as águas superficiais e subterrâneas devido ao lançamento de águas residuais e/ou lamas, de maneira acidental ou proposital, ao consumo desse bem em seus processos ou ao impacto nas regiões de nascentes e recarga hídrica.

Água é requerida em quase todas as atividades envolvidas na mineração, desde a etapa de pesquisa mineral, seguida pela lavra, tratamento de minério e metalurgia extrativa; e a quantidade consumida é bastante expressiva (CIMINELLI *et al.*, 2006).

O consumo da água nas atividades de mineração pode variar segundo o tipo de mineral explorado, as tecnologias envolvidas no processo de lavra e beneficiamento, a taxa de produção etc (CIMINELLI *et al.*, 2006). A água utilizada nos processos minerários pode ser proveniente de fontes superficiais, subterrâneas ou de recirculação de água do processo. Na grande maioria dos casos, as águas superficiais estão mais acessíveis e possuem padrões de qualidade aceitáveis para o processo de beneficiamento, dispensando tratamentos avançados para o seu uso. Custos de captação e adução são menores. Sendo assim fontes superficiais são mais atrativas (FREITAS, 2012).

As fontes subterrâneas são viabilizadas nas situações em que a disponibilidade superficial é reduzida, quando existem restrições ambientais quanto à captação e principalmente nas situações em que há a necessidade de rebaixamento do aquífero para permitir as operações de lavra (FREITAS, 2012).

Segundo Cope (2013), gestão da água significa coletar e conduzir o fluxo, controlar e descarregar dos reservatórios, bombear até a superfície.

Neste capítulo são apresentados conceitos fundamentais relativos à operação de fechamento de mina subterrânea, sendo estes: drenagem de mina, inundação controlada, inundação não controlada, nível de base (freático) COPE (2013).

Após infiltrar na superfície do solo, parte da água das chuvas percola através dos poros até atingir certa profundidade. Ao longo do seu caminho, parte desta água fica retida nos poros, tornando o solo úmido. Já a parte que não é retida, descerá cada vez mais, até atingir a camada impermeável onde a água é depositada até um determinado nível, de baixo para cima. O ar existente no interior dos poros é então expulso e substituído por água. Em outras palavras, desde a camada impermeável até um determinado nível acima dela, haverá outra camada de solo onde

todos os seus poros serão preenchidos, exclusivamente, por água. Quando isso acontece, passa a existir no solo uma linha chamada “linha freática”. Entre a linha freática e a camada impermeável fica acumulado um grande volume de água, o qual é denominado lençol freático. Esta água é a principal responsável pela manutenção das nascentes. Em determinadas situações, este tipo de lençol poderá ser abastecido apenas com a água que infiltra na bacia a que pertence ou, então, por águas que infiltraram na bacia vizinha. Quando o divisor freático coincidir com o divisor de águas, cada lençol freático será abastecido apenas pelas águas que infiltrarão através da superfície do terreno da bacia a qual ele se encontra associado (COPE, 2013).

Em suma, o abastecimento dos lençóis freáticos é feito por águas da chuva, que infiltram através da superfície do solo das bacias que os abastecem (COPE, 2013).

### 3.1) MINA SUBTERRÂNEA

Segundo Oliveira Junior (2006):

“...Minerar é a arte de extrair economicamente bens minerais da crosta terrestre, utilizando técnicas adequadas a cada situação. Estas técnicas visam minimizar os impactos ambientais ao meio ambiente, dentro dos princípios da conservação mineral, e tem como compromisso a recuperação das áreas mineradas durante a extração e após a desativação, dando a estas áreas um outro uso apropriado...”

A Organização das Nações Unidas (1987) define desenvolvimento sustentável como o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades. Na essência, o desenvolvimento sustentável é um processo de mudança no qual a utilização dos recursos, investimentos, tecnologias e mudanças institucionais estão em harmonia, satisfazendo as aspirações e necessidades humanas no presente e futuro.

Assim, é necessário então elaborar um projeto para extração do bem mineral de forma menos impactante, bem como elaborar o plano de fechamento da mina que leve em conta a recuperação da área impactada com todos os aspectos técnicos de preocupação no encerramento das atividades do empreendimento.

Ribeiro e Mendes (2013) definem que o fechamento de mina deve ser planejado desde a concepção do empreendimento visando, sobretudo, garantir que no pós-mina, os impactos ambientais, sociais e econômicos sejam mitigados e que a área impactada tenha condições seguras e estáveis, a partir das melhores técnicas de controle e monitoramento, proporcionando



um uso futuro que respeite os aspectos socioambientais e econômicos da área de influência do empreendimento.

Os empreendimentos minerários devem apresentar um estudo de impacto ambiental (EIA), relatório de impacto ambiental (RIMA) e o plano de recuperação de área degradada (PRAD), uma vez que a responsabilidade pela recuperação da área é do empreendedor e ele deve arcar com os custos de mitigação dos impactos por ele gerados.

O Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) reconhece a atividade minerária como importante para o desenvolvimento, mas também afirma que esta deve ser voltada para função ambiental, sendo necessária o estabelecimento de instrumentos a fim de garantir a reabilitação das áreas mineradas e a proteção do meio ambiente.

Desta forma, Deliberação Normativa no.127/ 2008 do COPAM, segundo Silva (2016), define, em seu artigo 5º, que seja apresentado dois anos antes do fechamento da mina o Plano Ambiental de Fechamento de Mina (PAFEM), que é um instrumento de gestão ambiental composto por todas as informações necessárias que visam à manutenção não só dá segurança, mas também do monitoramento e da reabilitação da área impactada pela atividade. Um fechamento de mina, seja ela em mina subterrânea ou a céu aberto, pode ser dividido em descomissionamento, reabilitação, monitoramento e manutenção e o pós-fechamento.

Porém em uma mina subterrânea vários itens de preocupação devem ser levados em conta como os túneis, poços, pilares, galerias, acessos e contaminantes presentes, bem como os impactos sociais gerados pelo fim da atividade. Para se elaborar um plano eficaz de encerramento de atividades, é necessário levar em conta que o novo uso da área contribua com o desenvolvimento econômico, com meio ambiente e com a sociedade que é a principal impactada por todo o ônus da atividade.

Silva (2016) apresenta casos de fechamento das minas com diferentes destinos. Algumas foram completamente exauridas e fechadas, como é o caso da Mina Cabaçal de ouro e cobre da Mineração Manati Ltda (Rio Tinto) que, após o encerramento das atividades, recuperou toda a área, como pode ser visto nas Figura 1 e Figura 2. Por este trabalho de recuperação, a empresa foi a primeira no Brasil a receber, em 1992, um Certificado de Descomissionamento Ambiental, concedido pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Mato Grosso, atestando o cumprimento dos trabalhos de fechamento de mina e reabilitação da área minerada.



Figura 1: Entrada da Mina Cabaçal após recuperação.

Fonte: RIO TINTO (2008).



Figura 2: Barragem de rejeitos da Mina Cabaçal após recuperação.

Fonte: RIO TINTO (2008)

Silva (2016) cita também caso da Mina de Passagem, uma antiga mina de ouro localizada na cidade de Mariana, Minas Gerais, que após o encerramento das atividades teve sua área destinada para um novo uso, sendo transformada em uma atração turística como observado na Figura 3.



Figura 3: Trolley de visitação da Mina de Passagem.

Fonte: REVISTA FERNÃO DIAS (2016)

A mina é considerada, segundo Miranda (2010), a maior mina de ouro aberta   visitação do mundo, onde também   possível fazer mergulho nas áreas inundadas da mina (Figura 4).



Figura 4: Escada de acesso ao lago para mergulhadores na Mina de Passagem.

Fonte: MIRANDA (2010).

Existem também casos de fechamentos temporários, onde as minas encerram suas atividades por um certo período de tempo e depois acabam por retomar suas atividades, por viabilidade econômica e/ou tecnológica, como são os casos citados por Silva (2016) da Mina São Bento, em Santa Bárbara-MG, atual Córrego do Sítio II e a Mina Brejuí, em Currais Novos-RN.

Ao final das atividades em uma mina subterrânea, cessado o bombeamento, é comum deixar inundar-se a mesma para assim impedir a circulação nas dependências da mina, inundação esta que pode ocorrer de 3 maneiras diferentes, seja através das águas de chuva, que por ação da gravidade acaba encontrando um caminho para as galerias subterrâneas, pelas águas de aquíferos que podem ter sido interceptados pela abertura de galerias de exploração, ou pela inundação artificial, bombeando águas de lagos e rios próximos ao empreendimento para dentro da mina.

Segundo Ghoreishi - Madiseh *et al.*, (2012) a infiltração de água em uma mina irá depender da permeabilidade do maciço rochoso, a qual pode ser de 2 tipos, a permeabilidade natural causada pelas formações geológicas e processos tectônicos e a artificial feita pelo homem, que no caso do da mineração subterrânea são os poços, galeria e demais aberturas do empreendimento onde a água pode fluir com resistência praticamente nula.

### 3.2) FECHAMENTO DE MINA

O fechamento da mina pode acontecer de forma programada ou repentina. O fechamento programado é aquele que ocorre de forma preparada e planejada, com um Plano de Fechamento bem definido, em que suas atividades e etapas são identificadas, bem como suas durações e sequências. O fechamento programado é previsível e se dá normalmente com a exaustão da mina. Contrariamente, o fechamento prematuro ou repentino acontece devido a razões distintas da exaustão da mina, de forma inesperada e indesejada, muitas vezes sem qualquer tipo de planejamento.

O Plano de Fechamento de Mina deve contemplar todos os aspectos, desde a recuperação das áreas degradadas até a sua integração à economia regional. As implicações econômicas devem ser consideradas nos custos de operação das minas, e os procedimentos de recuperação devem ser desenvolvidos desde a etapa inicial de implantação das operações.

É necessário pensar no uso futuro das áreas impactadas e áreas de influência de modo sustentável, incluindo nesse processo a consulta e participação das partes interessadas. O adequado planejamento para o fechamento pode proteger acionistas, governos, fornecedores,

comunidades locais e as gerações futuras dos impactos socioeconômicos do fechamento, assim como reduzir o passivo ambiental, recuperar ambientes degradados e resultar em um balanço positivo para a região onde se insere cada mina.

Segundo Sánchez (2011), onze ações demonstram um bom nível de maturidade de uma empresa quanto ao fechamento prematuro de mina, ao atender os seguintes itens:

- 1) O plano de fechamento deve contemplar o cenário de fechamento prematuro.
- 2) O plano de fechamento deve identificar as possíveis causas de fechamento prematuro pertinentes à mina.
- 3) O plano de fechamento deve descrever com suficiente detalhe as ações necessárias em caso de fechamento, especificando as responsabilidades das partes.
- 4) O plano de fechamento deve incluir, para o cenário de fechamento prematuro, ações pós-fechamento de monitoramento, manutenção e possíveis compensações sociais.
- 5) As ações previstas no plano de fechamento devem ser baseadas em conhecimento sólido acerca do ambiente biofísico e socioeconômico da mina e seu entorno; para tal, estudos de detalhe sobre aspectos como hidrogeologia, geotécnica, recuperação de áreas degradadas e outros temas pertinentes devem ter sido realizados e mantidos atualizados.
- 6) O risco de fechamento prematuro deve ser avaliado e comunicado às partes interessadas. Os custos das ações previstas no cenário de fechamento prematuro devem ser estimados.
- 7) Os custos das ações previstas no cenário de fechamento prematuro devem ser estimados.
- 8) A empresa deve fazer provisões financeiras ou fornecer garantias suficientes para cobrir os custos do fechamento prematuro.
- 9) As partes interessadas e, em especial, a comunidade local, devem ter sido consultadas quanto às ações a serem implementadas em caso de fechamento prematuro.

- 10) A empresa deve desenvolver um conjunto de indicadores apropriados que possibilitem demonstrar, ao fim do processo, que os objetivos do fechamento tenham sido atingidos.
- 11) O plano de fechamento deve ser revisto e atualizado periodicamente.

Finalmente, segundo Sánchez (2011), “uma empresa satisfatoriamente preparada para o fechamento prematuro de uma mina provavelmente estará também adequadamente preparada para o fechamento programado”.

Segundo Wolkersdorfer (2005) *apud* Australian Government Department of Industry, Tourism and Resources, estudos mostram que na Austrália, por exemplo, 70% dos fechamentos nos últimos 25 anos tiveram fechamentos inesperados e não planejados. Ou seja, o fechamento se deu por razões distintas da exaustão de reservas, como a seguir:

- Razões econômicas: preços de “commodities” (mercadorias) em declínio, aumento nos custos de extração, etc.;
- Razões geológicas: diminuição inesperada do *grade* (teor) ou do corpo mineral, conhecimento insuficiente acerca da jazida, etc.;
- Razões técnicas: acidentes ou incidentes de operação, falha em equipamentos mecânicos, condições geotécnicas adversas, erros de projetos, etc.;
- Razões regulatórias: violações de segurança ou ambientais;
- Razões políticas: mudanças de governos com alteração da política de incentivo, mudança de políticas governamentais como aumento de impostos, etc.;
- Razões sociais: pressões das comunidades e organizações não governamentais, como ONGs;
- Razões de mercado: fechamento de mercados com o desinteresse pelo produto minerado;
- Razões empresariais: decisões empresariais decorrentes de venda de ativos, fusões ou aquisições, ou mudança de composição acionária.

Independente de algumas razões não serem passíveis de controle ou influência pela empresa mineradora, estas devem estar preparadas para a eventualidade do fechamento prematuro da mina, uma vez que suas consequências ambientais e socioeconômicas são tão importantes quanto, ou mais críticas do que aquelas que decorrem de um fechamento programado.

Fechamentos mal direcionados e executados, ou simplesmente negligenciados, como em minas abandonadas, são um legado extremamente complicado para os governos e suas comunidades e podem representar inclusive uma má reputação para a empresa empreendedora, especialmente no momento atual, onde o assunto Sustentabilidade é tão discutido e vendido como valor agregado.

Quanto à implementação do Plano de Fechamento, diversos autores e Instituições internacionais sugerem que, apesar da dificuldade de previsão do fechamento da mina, o Plano de Fechamento deva ser iniciado nos estágios iniciais do processo, se possível ainda na fase de pedido de concessão de lavra, ou no mais tardar, na fase de estudos de viabilidade do empreendimento, como mostra a figura 5.

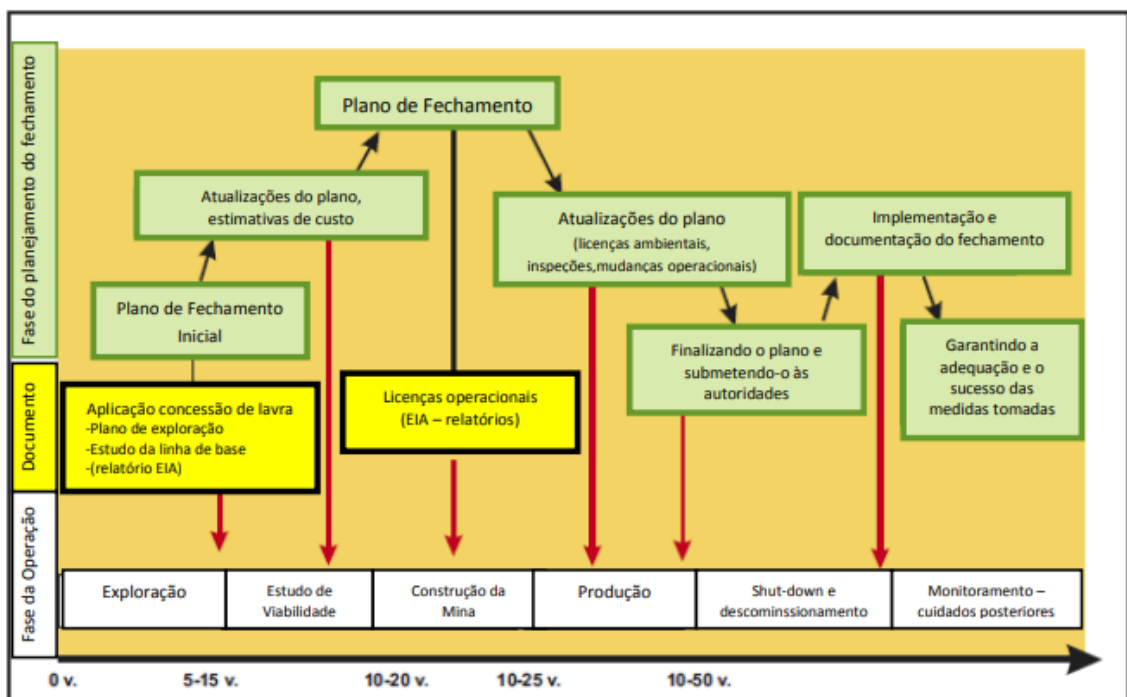


Figura 5: Integração do Plano de Fechamento e Implementação nos vários estágios dentro do Ciclo de Vida de uma Mina.

Fonte: Adaptado de HEIKKINEN (2008).

A experiência com a desativação e o fechamento planejado de minas no Brasil ainda é pequena. Todavia houve avanços importantes em recuperação de áreas degradadas, para vários

minérios e métodos de lavra a céu aberto, inclusive no restabelecimento de comunidades vegetais nativas. Porém, a quantidade de minas subterrâneas no Brasil é muito pequena quando comparada à quantidade de minas a céu aberto.

Segundo os Conselhos “Australian and New Zealand Minerals and Energy Council”, ANZMEC, e “Minerals Council of Australia” (2000), o desenvolvimento do Plano de Fechamento deve levar em conta os requerimentos legais e as propriedades únicas ambientais, econômicas e sociais da operação, onde os objetivos seguintes devem ser seguidos.

- Proteger a saúde e segurança ambiental e pública através de práticas de fechamento seguras e responsáveis;
- Reduzir ou eliminar efeitos ambientais após o encerramento das operações;
- Estabelecer condições consistentes com objetivos finais de uso do solo previamente determinados;
- Reduzir a necessidade de monitoramento e manutenção em longo prazo estabelecendo estabilidade física e química das áreas danificadas ou perturbadas.

Para se definir o uso futuro da área, é importante considerar os impactos e condições que podem afetar o objetivo do Plano de Fechamento de Mina. Sendo os principais

- Estabilidade física: edifícios, estruturas, encostas, aberturas subterrâneas, por meio do controle da subsidência. etc.
- Estabilidade geoquímica: minerais, metais ou outros contaminantes.
- Uso da terra: a mina fechada deve ser reabilitada para condições de background anterior à mineração, ou compatíveis com as terras ao redor. Ou ainda ter um uso produtivo.
- Desenvolvimento sustentável: benefício social e econômico, devem ser mantidos quando da transferência de custódia.

A avaliação destes impactos deve abordar os componentes do local e região, desde a fase de planejamento, devem ser adotadas medidas e recursos para tratar dos impactos, a fim de minimizar os riscos e passivos. A avaliação do Plano de Fechamento de Mina, pelos órgãos governamentais e participação da comunidade desde a fase de início do projeto, irá minimizar



os riscos associados às incertezas no atendimento aos requisitos para o fechamento e reabilitação das áreas impactadas, evitando a rejeição ou objeção pelas partes, quando no futuro houver a execução do fechamento, e evitará custos com ações dispensáveis ao fechamento.

O suporte para o planejamento de mina carece de literatura nacional. Neste sentido, o IBRAM elaborou um Guia, onde são oferecidas diretrizes aos profissionais da mineração, de modo a facilitar a inserção das questões atinentes ao fechamento, desde o planejamento de uma nova mina até sua fase de operação, assim como para planejar o fechamento de minas já em funcionamento. O mesmo não é uma Lei ou Norma, trata-se de um guia com metodologias e estudos que nortearão os empreendedores para o a questão do fechamento da Mina.

É essencial para uma mineração quantificar e reutilizar corretamente a água de processo e seu abastecimento natural.

Um aspecto importante da modelagem de águas é o balanço hídrico para se quantificar a contribuição de águas de diversas origens na recarga e na descarga do contexto da mina. Pois segundo Domingues; Boson, (2006, *apud* ANDRADE, 2016) para se processar uma tonelada minério de ferro itabirítico, apenas na etapa de flotação, utilizam-se 3,8 m<sup>3</sup> de água. Esse valor corresponde a 80% do que um brasileiro consome em um mês.

He *et al.* (2019) estudaram o fluxo natural de água em Tianjin, que leva à diminuição da retirada de calor do bombeamento. Foi projetado bombeamento e recarga (periódica) alternados. Por meio de testes e modelo físico e as observações em furos, poropressão e subsidência em diversos pontos foram monitoradas e analisadas. Como resultado, as taxas razoáveis de fluxo, a subsidência é pequena ou mesmo desprezível. A camada de argila tem deformação principalmente plástica que, com o processo alternado, vai se tornando menor. A camada de areia tem comportamento elástico e plástico que tende gradualmente a elástico.

Delaminações significativas dos estratos foram observadas no intercapeamento, indicando uma alta permeabilidade horizontal. Mudanças de poropressão foram observadas em diferentes taxas, para duas camadas de carvão.

Construcci *et al.* (2019) mostram que, na região de Lorraine, França, colapsos após décadas de extração e inundação foram verificados. Foi realizado monitoramento microsísmico em tempo real, verificando subsidência. Onda teve atenuação anelástica pelo sistema de falhas. Então foi projetado sistema de GPS móvel para monitoramento futuro.

Minderhoud *et al.* (2017) chamam a atenção para que muitos deltas de rios no mundo estão sofrendo subsidência e ficando vulneráveis à inundação. No delta do Mekong, as taxas de subsidência alcançaram vários cm. A retirada excessiva de água induz movimentação por meio da compactação de aquífero; neste caso, isso levou à queda do mesmo. Autores estudaram a

partir da extração de água com modelo hidrogeológico 3D, com distribuição espacial. Durante este tempo, o delta afundou cerca de 18 cm.

Parte das análises, pelas limitações, foram feitas por interferometria. Modelos hidrogeológicos surgiram a partir da interpolação de 95 registros de testemunhos de sondagem em 10 seções. Na subsidência, a espessura da camada movimentada foi considerada. A deformação vertical incremental foi calculada para cada tempo. Deslocamento horizontal foi assumido desprezível para escala do delta.

Um fechamento de sucesso depende da definição, da revisão e da validação contínuas e, finalmente, da conquista dos objetivos de fechamento, alinhados com os requisitos da empresa e dos interessados diretos, para que a comunidade perceba benefícios que continuarão a existir mesmo sem novas contribuições da empresa.

### **3.2.1 Reutilização de Minas Abandonadas**

Após o abandono de uma mina, a manutenção dos batentes ou pilares de suporte de madeira e aço começa a sofrer alterações e, dependendo das propriedades físicas do suporte, a sua estabilidade vai diminuindo gradativamente. Se a pressão da rocha, causada pelo carregamento estático ou dinâmico, ultrapassar as forças de suporte, o suporte falha e o funcionamento colapsa, causando eventualmente o afundamento da superfície (subsidência). Em partes não suportadas da mina, especialmente nos *stopes* (realces) e *adits* (áditos), a pressão de sobrecarga diminui a estabilidade da rocha e, dependendo das taxas de extração, causa falhas no telhado ou esmagamento de pilares. Alternativamente, as forças de flutuação da água crescente da mina, durante a inundação da mina, farão com que as pressões dos poros diminuam e a pressão de sobrecarga e o potencial de subsidência possam ser minimizados, até mesmo a elevação pode ocorrer. (WOLKERSDORFER, 2008).

As minas subterrâneas, depois de exauridas, resultam em grandes aberturas ou saguões completamente vazios e abandonados. Com a crescente conscientização ambiental e leis ambientais cada vez mais rigorosas, hoje não basta apenas extrair, é também necessário recuperar a área lavrada, além de se preocupar com questões socioeconômicas ocasionadas pela mineração.

Questões geomecânicas, econômicas e ambientais devem ser consideradas e avaliadas na determinação das possibilidades de reutilização de galerias de mina. Algumas alternativas podem, inclusive, gerar receita. A tabela 1 mostra uma classificação simplificada dos métodos de lavra e possíveis reutilizações (SILVA FILHO & SILVA, 2008).

**TABELA 1:** Métodos de lavra subterrânea e suas relações com os possíveis usos.

Método de lavra	Suporte	Dimensão da abertura	Reutilização possível
Alargamento	Pilares	Grande	Estocagem de lixo, óleo, etc. Problemas: Nenhum acesso aberto depois da reutilização. Ausência de controle das paredes vazias. Dificuldade para controlar a detonação. Estabilidade do Pilar (local e global).
Câmaras e Pilares	Pilares	Médio	Todos os tipos de uso. Problemas: Estabilidade do pilar (local e global). Estabilidade do teto (local e global).
Corte e enchimento	Enchimento	Pequeno	Estocagem de rejeito como estéril. Problemas: Propriedades do material de enchimento (químico e geomecânico).
Recalque	Pilares de fragmentos de rocha <sup>1</sup> .	Médio - grande	Como alargamentos. Problemas: Estabilidade local e global tanto dos pilares quanto das aberturas.
Método da cratera vertical ( <i>V.C.R. stoping</i> )	Pilares de fragmentos de rocha 1.	Grande	Como recalque.
Abatimento por sub-nível	Nenhum (abatimento)	Grande	Nenhum.
Abatimento de blocos ( <i>Block caving</i> )	Nenhum (abatimento)	Grande	Nenhum.
<i>Long wall</i>	Nenhum (abatimento). Enchimento	Grande (em uma dimensão)	Estocagem de rejeito nos espaços vazios da galeria. Como corte e enchimento.
Lavra de solução de sal	Grande	Grande	Estocagem de hidrocarbonetos, lixos, ar comprimido. Problemas: Cavernas podem ser inspecionadas diretamente por funcionários.

			Inspeção e recuperação não são possíveis.
Túnel	Nenhum – revestimento.	Seção pequena	Estocagem de mercadorias, hidrocarbonetos, água potável.
Poço vertical ( <i>shaft</i> )	Poço vertical ( <i>shaft</i> )	Seção pequena.	Estocagem de hidrocarbonetos.

<sup>1</sup> Depois de terminada a exploração da mina.

Fonte: Adaptado de PELIZZA & PEILA, 1995.

### 3.2.2 Exemplos Importantes de reuso em Minas Subterrâneas

O mais famoso e talvez um dos maiores espaços destinado ao reuso, situa-se na cidade do Kansas (Missouri, EUA). Os técnicos da mina têm conseguido utilizar o espaço lavrado para atividades secundárias, enquanto continuam obtendo lucros com a lavra de calcário que serve de material para a construção de estradas e para produtos agregados. O espaço subterrâneo gerado pelas operações de lavra acaba servindo como uma atividade secundária para a própria mineração. Iniciada na década de 60, a mina localizada no Kansas foi convertida, a uma taxa anual de aproximadamente 9000 m<sup>2</sup>, em instalações para depósito, fábricas, escritório e operações de serviços. Dos 23 milhões de m<sup>2</sup> de espaço lavrado até hoje, aproximadamente 2,3 milhões foram desenvolvidos para atividades auxiliares, cerca de 5,6 milhões de m<sup>2</sup> estão disponíveis para desenvolvimento imediato, e 0,5 milhões de m<sup>2</sup> são anualmente adicionados ao montante de espaço disponível. (PELIZZA & PEILA, 1995)

Várias minas de sal na Alemanha são reutilizadas como depósito de lixo. Em países como Itália e França, bem como outros países europeus, esses locais são utilizados para cultivo de cogumelos, maturação de queijos e vinhos, como citam Pelizza & Peila (1995) (fig. 6.), e salas de exposição têm sido criadas em minas subterrâneas de rocha ornamental. Outras minas tem sido reutilizadas para estocagem de óleo na Suécia e França. Os mesmos autores mostram que galerias da mina de Wieliczka (Polônia) têm sido transformadas em várias aplicações possíveis, incluindo-se museus, acomodações hospitalares e igreja (fig.7).



Figura 6: Maturação de queijo em túneis na mina Ollomont-Itália.

Fonte: PELIZZA & PEILA, 1995.



Figura 7: Museu da mina de Wieliczka – Mina de sal (Polônia).

Fonte: PELIZZA & PEILA, 1995.

Existem poucos exemplos interessantes de reutilização de minas subterrâneas no mundo. Os principais tipos de reutilização são divididos em quatro categorias:

1. museus;
2. aplicações civis (por exemplo: escritórios, depósitos, usos industriais, hospitais);
3. instalações para disposição de lixo;
4. laboratórios experimentais e instalações de pesquisa.

As tabelas 2 a 4 listam exemplos de reutilização de minas nas categorias acima, cada uma é descrita detalhadamente a seguir.

- Minas reutilizadas como museus.

Diversos exemplos da reutilização de minas subterrâneas como museus podem ser encontrados na Áustria, Brasil, Bélgica, Canadá, Colômbia, Finlândia, França, Alemanha, Itália, Japão, Noruega, Polônia, Espanha, Suíça e Reino Unido.

A mina de cobre Keretti em Outokumpu (Finlândia) terminou recentemente suas atividades e, é agora um importante ponto turístico. Esta mina fica situada sob uma antiga vila de Outokumpu, possuindo um museu e um parque de diversões para crianças.

Segundo PELIZZA & PEILA (1995). Na Suécia, a mina de cobre Falu e a mina de prata Sala foram transformadas em museus. Encontra-se também, no Japão, um importante museu na mina Moe que se destaca como belo ponto turístico.

A antiga mina em Wieliczka foi transformada num grande museu e, na Itália, várias minas abandonadas estão sendo estudadas ou desenvolvidas para o mesmo fim. Mais de 50 exemplos de museus dentro de minas subterrâneas podem ser encontrados na Europa, onde muitas delas reutilizam partes das galerias das minas antigas como pontos turísticos para mostrar a vida e o trabalho dos mineiros.

Na Colômbia, o grande destaque é a Catedral do Sal (fig.8), localizada na mina Zipaquirá a 35 m de profundidade. Dentro da mina encontram-se representados, de maneira simbólica, as quatorze estações da via cruces em esculturas de sal que levaram três anos para serem esculpidas. Anualmente, a catedral recebe a visita de aproximadamente 300 mil pessoas. Além de ser uma atração turística, na mina também são realizados batizados, missas e casamentos. A mina continua funcionando produzindo 80% do sal colombiano.

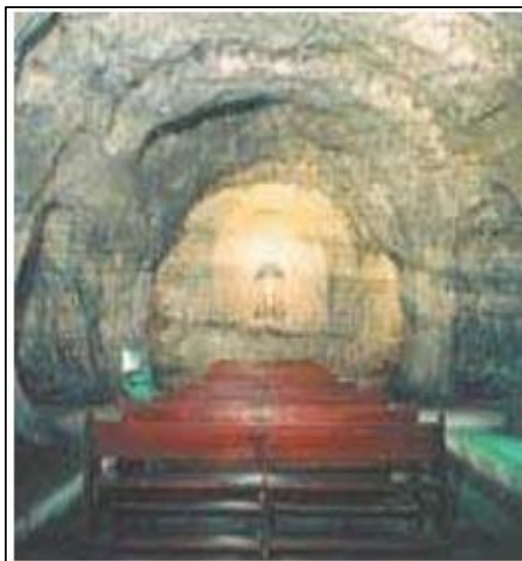


Figura 8: Catedral do sal (Zipaquirá, Colômbia).

Fonte: PELIZZA & PEILA, 1995.

No Brasil, o melhor exemplo deste tipo de reutilização é a mina da Passagem situada entre Ouro Preto e Mariana (Minas Gerais). Desde 1985, quando a mina foi desativada, as galerias da mina de ouro se tornaram um ponto turístico atraindo pessoas de várias partes do mundo. Além do turismo, a mina é utilizada para a prática de mergulho, pois algumas de suas galerias encontram-se submersas em águas cristalinas. Em 2006 a mina promoveu uma etapa do “Down Hill” (competição ciclística realizada na descida de montanhas). Pela primeira vez, este tipo de competição foi realizado dentro de uma mina subterrânea, contando com a participação de competidores nacionais e internacionais.

- Minas reutilizadas para aplicações civis

Os espaços subterrâneos produzidos pela lavra podem ser transformados em vários exemplos de aplicações civis. O espaço em subsolo apresenta algumas vantagens, tais como: proteção contra o barulho, isolamento do ambiente e atmosfera livre de vibração.

A tabela 2 apresenta exemplos de reutilizações civis de minas antigas, constando algumas das seguintes aplicações:

- câmaras para maturação de queijo e vinho.
- hospitais.
- laboratórios.
- escritório e salas de conferências.
- cultivo de cogumelos.

- instalações esportivas.
- fábricas.

O ambiente isolado, seguro e livre de vibração dos espaços subterrâneos são, também, apropriados para estocagem. Entre eles podem ser citados:

- estocagem de óleo, água e produtos agrícolas;
- armazenamento de arquivos;
- depósitos;
- instalações para guardar carros e barcos.

**TABELA 2:** Reutilização de minas para aplicações civis.

Pais	Nome da Mina	Tipo de minério	Tipo de reutilização	Observações
Brasil	Mina da Passagem	Ouro	Museu; turismo e práticas esportivas	Câmaras e Pilares.
Colômbia	Mina Zipaquirá	Sal	Catedral (Catedral do sal), turismo.	Um dos cartões postais da Colômbia.
Eslovênia	Mina Lasko	Carvão	Cultivo de cogumelo; fonte de água potável (sob estudo).	
	Mina Senovo		Cultivo de cogumelo (sob estudo); fonte de água potável (sob estudo).	
	Mina Hrastnik		Cultivo de cogumelo (sob estudo).	
	Mina Kanizarica		Fonte de água potável (sob estudo).	
	Mina Trbovlje		Cultivo de cogumelo (sob estudo).	
Estados Unidos	Mina Kellogg (Idaho)	Pb-Zn	Crescimento de mudas sob luz artificial	



	Mina Butte (Montana)	Cobre	Crescimento de mudas sob luz artificial	
	Mina Butte Crested (Colorado)	Molibdênio	Crescimento de mudas sob luz artificial	
	Mina Randolph (Missouri)	Calcário	Usina de aço para fabricação de tanques e correias transportadoras. Fabricação de manilhas. Estocagem de mercadorias.	Câmaras e Pilares.
	Mina da companhia Pixley (Missouri)	Calcário	Construção de barcos a vela feitos de vibra de vidro reforçado.	Câmaras e Pilares.
	Mina Zenith (Minnesota)	Ferro	Mina usada como fonte de calor	Concepção sob estudo.
	Minas da cidade do Kansas (MissouriKansas)	Calcário	Escritórios/espço para armazenagem/Fábricas.	Câmaras e Pilares.
	Minas de calcário Boyce (Pensilvânia)	Calcário	Escritórios	Câmaras e Pilares.
França	Minas abandonadas	Materiais para construção civil	Maturação de queijo e vinho; crescimento de cogumelos; sala de exposição; museus.	Câmaras e Pilares.
	Minas Mendon	Calcário e materiais de construção	Atividades industriais e museu (sob estudo); cultivo de cogumelo (desde 1960).	Câmaras e Pilares. Minas exploradas desde o século XVIII.
Holanda	Minas Valkenburg	Calcário	Turismo, indústria.	Concepção sob estudo. Câmaras e Pilares. A exploração começou no período pré-histórico. Algumas minas ainda são exploradas
Hungria	Mina Fertoràkos	Calcário	Teatro	Câmaras e Pilares
Itália	Mina Cogne	Ferro	Transporte de turistas por vagões entre dois vales de montanhas adjacentes	Túnel de mina antiga
	Minas abandonadas	Materiais de construção civil	Cultivo de cogumelos	Câmaras e Pilares.

	Mina Santa Brígida	Giz	Cultivo de cogumelos	Câmaras e Pilares.
	Mina Traversella	Ferro	Museu e laboratórios para testes de equipamentos de perfuração, dispositivos de monitoramento de mecânica das rochas e explosivos.	Concepção sob estudo
Japão	Mina Ohya	Rochas para construção (pó vulcânico)	Usos industriais, estocagem de mercadoria, galeria de arte.	Câmaras e Pilares
	Mina Kamasashi		Vários laboratórios de testes em explosivos, estocagem de alimentos frescos, e dispositivos de monitoramento em mecânica das rochas.	Cavernas com comprimento e largura de aproximadamente 100m e com altura variável.
Polônia	Mina Wieliczka	Sal	Museu; instalações esportivas; hospital para tratamento de doenças pulmonares	Mina explorada desde a idade média
Reino Unido	Mina Liechwedd	Carvão	Turismo	
Romênia	Mina Slanic Prahova	Sal	Hospital para tratamento de doenças pulmonares	Câmaras e Pilares.
Rússia	Mina Berezni-I (West Urais-depósito de potássio e sal Verkhnekamsoye)	Potássio	Hospital para doenças pulmonares	Câmaras e Pilares. O hospital foi construído em 1975. Deste então, cerca de 5000 pacientes foram tratados neste hospital.
	Mina Berezni-IV (West Urais-depósito de potássio e sal Verkhnekamsoye)	Potássio	Hospital para doenças pulmonares; instalações esportivas.	A estrutura foi especialmente construída para ser hospital, com o minério extraído como um produto secundário. Um extenso túnel de 4 km foi especialmente construído para fornecimento de ar.

	Minas em Verkhnekamsoye	Potássio	Cultivo de flores (concepção sob estudo); Cultivo de cogumelos.	Câmaras e Pilares.
Suécia	Mina Dannemora	Ferro com uma porcentagem de manganês	Atividades educacionais: atividades de treinamento para operadores de máquinas destinadas à lavra e execução de túneis.	<i>Sublevel caving.</i>

Fonte: Adaptado de PELIZZA E PEILA, 1995.

- Minas reutilizadas para depósito de lixo

O aterramento de lixo industrial não-nuclear e lixo radioativo em escavações subterrâneas é um conceito bem recente, mas esse reuso tem atraído considerável interesse nos últimos 20 anos.

Minas de sal, que geralmente são lavradas pelo método de câmaras e pilares, são muito importantes devido à possibilidade de reutilização das aberturas para depósito de lixo. Desde 1972, o lixo industrial na Alemanha tem sido estocado no subsolo de Herfa – Neurode. Muitos outros locais já estão sendo utilizados, sob preparação ou sob estudo, para depósito de lixo. Entretanto, problemas de contenção de lixo a longo prazo, estabilidade geológica e a necessidade de reciclagem devem ser estudadas cuidadosamente com relação a este tipo de reutilização. A tabela 3 apresenta a reutilização de minas para depósito de lixo em 10 países.

**TABELA 3:** Reutilização de minas para depósito de lixo.

Pais	Nome da Mina	Tipo de minério	Tipo de reutilização	Observações
Alemanha	Mina Asse	Potássio e sal	Estocagem de lixos radioativos. Testes para estocagem de lixos radioativos.	Câmaras e Pilares (profundidade de 490-830 m). Desde 1967, lixo com baixo nível de radiação tem sido utilizado experimentalmente. Estocagem de lixos com nível médio de radiação numa câmara em um nível superior (profundidade de 511m).
	Mina Bartensleben	Sal	Estocagem de lixo radioativo. Testes para estocagem de lixo radioativo.	
	Mina Konrad	Ferro	Estocagem de lixo radioativo (sob estudo)	Mineração realizada de 1965 a 1976. Mina com boa impermeabilidade em relação ao lençol freático, devido à existência de camadas argilosas (profundidade de 800-1300 m).
	Mina Heilbroun	Sal	Estocagem de cinzas; Estocagem de anidrido e lama contaminada com mercúrio.	Câmaras e Pilares. As câmaras possuem 15 m de largura, 10-20 m de altura e 200m de extensão; pilares estão espaçados de 15-17m. Profundidade de 200m.
	Mina de sal Kochendorf	Sal	Estocagem de gás combustível, resíduos incinerados de plantas (para eliminar o enxofre) e escória silicosa (sob estudo).	Câmaras e Pilares. As câmaras são preenchidas com camadas alternadas de sacos com resíduos e rejeitos de sal.
	Mina Walsum	Carvão	Estocagem de cinzas obtidas pela incineração de plantas (sob estudo).	Concepção sob estudo. <i>Longwall</i>

	Mina Haus Aden	Carvão	Estocagem de cinzas obtidas pela incineração de plantas (sob estudo).	<i>Longwall</i>
	Mina Zielitz	Potássio	Estocagem de lixo industrial.	Concepção sob estudo. Câmaras e Pilares.
	Mina Zielitz	Potássio	Estocagem de lixo (cinzas obtidas através de incineração de plantas de grandes quantidades de lixo acumulado).	Câmaras e Pilares. Iniciado em 1972 numa seção abandonada da mina de Wintershall.
Austrália	Mina Burwood Beach	Carvão	Depósito de lama.	Longwall. Concepção estudada e abandonada.
Eslovênia	Velenje	Carvão	Estocagem de cinzas	Sob construção. Longwall
Estados Unidos	Mina Retsof	Sal	Preenchimentos dos vazios com lama contendo cinzas obtidas pela incineração de plantas.	Mina de 350m de profundidade (maior mina de sal dos Estados Unidos). Concepção sob estudo)
	Projeto Geostow	Sal	Estocagem de cinzas obtidas pela incineração de plantas.	Na mina, a redução da razão de recuperação tem sido projetada com o objetivo de projetos de estocagem.
França	Mina Joseph-Else	Potássio	Estocagem de lixo industrial.	Concepção sob estudo. Câmaras e Pilares. A área de estocagem situa-se abaixo do nível de exploração da mina (900 m de profundidade)
Índia	Minas de Korba	. Carvão	Estocagem de lixo industrial	Concepção sob estudo
Itália	Mina Codana	Gipsita	Estocagem de lixo industrial.	Câmaras e pilares.
	Minas Besta	Dolomita	Estocagem de entulho (36000 m <sup>3</sup> reutilizados)	Câmaras e Pilares.
Japão	Mina Nakatatsu	Pb-Zn-Ag	Estocagem de cinzas obtidas pela incineração de plantas.	As cinzas são misturadas com o solo e estocadas em minas abandonadas. 9.500 m <sup>3</sup> estocados em 1989; 12.000 m <sup>3</sup> estocados em 1991.
	Mina Shin-Yakuki	Tungstênio e Calcário	A mina abandonada de	<i>Sublevel stoping</i> .

			calcário é utilizada para disposição de particulados provenientes de uma estação de queima de carvão.	
Reino Unido	Mina Watsall Wood	Carvão	Estocagem de rejeitos químicos.	Mina com 900 m de profundidade. A estocagem iniciou-se em 1965.
	Minas Dudley	Calcário	Rejeitos da mina de carvão e particulados bombeados em espaços vazios a partir da superfície.	Câmaras e Pilares. O colapso de muitas câmaras causou instabilidade na superfície. A disposição de rejeitos fez com que a mina se tornasse mais estável.
Rússia	Mina Verkhnekamsoye	Potássio	Estocagem de rejeito.	Câmaras e Pilares. As câmaras são preenchidas com rejeito.

Fonte: PELIZZA & PEILA, 1995.

- Minas reutilizadas como instalações de pesquisa e laboratórios experimentais

A tabela 4 apresenta vários países que transformaram minas abandonadas ou minas ainda ativas, em instalações e laboratórios de pesquisa. Segundo Pelizza e Peila (1995, p.183), um dos mais notáveis exemplos está na mina de Stripa na Suécia, que foi utilizada a cerca de 20 anos como instalação experimental para um programa de pesquisa internacional que tinha como objetivo avaliar o comportamento do granito com relação ao depósito de lixo (extremamente radioativo), proveniente de reatores nucleares.

**TABELA 4:** Reutilização de minas para estações de pesquisa.

Pais	Nome da Mina	Tipo de minério	Tipo de reutilização	Observações
Canadá	Mina Creighton	Níquel	Laboratório de observação de Neutrino	A cavernas possuem a forma de um cilindro vertical com 20 m de diâmetro, 30 m de altura (localizadas a 1500 m de profundidade). Construída especialmente para atender o objetivo de reuso.
Estados Unidos	Mina Tower Soundan (Minnesota)	Ferro	Laboratório de pesquisas em Física.	Caverna construída especialmente para atender o objetivo de reuso. Primeira mina de ferro de Minnesota.
Japão	Mina Kamioka.	Pb-Zn-Ag	Estação experimental de explosivos.	Caverna em forma de domo (20 m de largura, 18 m de altura) com um túnel de 230 m. Construída especialmente para atender o objetivo de reuso.
	Mina Sunagawa	Carvão	Tubo de queda em micro-gravidade (centro de micro-gravidade Japonês).	Um poço vertical da mina tem sido reutilizado (776 m de extensão, 4,9 m de diâmetro interno).
Suécia	Mina Stripa	Ferro	Projeto de pesquisa internacional	

			de disposição de lixo nuclear radioativo.	
--	--	--	---	--

Fonte: PELIZZA E PEILA, 1995.

Ainda quanto à aplicação de mina subterrânea abandonada, segundo HALL *et al.*, (2001), verifica-se que há um leque muito grande de possibilidades de reutilização do espaço subterrâneo e, essas reutilizações dependem das características econômicas, sociais e culturais da região. Além disso, as características do maciço rochoso devem ser levadas em consideração (estabilidade local, estabilidade global, propriedades geomecânicas, lençol freático etc).

Também conforme Hall *et al.*, (1997) Todas as águas subterrâneas, mas especialmente as de fissuras quentes e reservatórios de rocha, são fontes de calor dentro da mina. Como a água e o calor são derivados da rocha circundante ou da fonte geotérmica, a temperatura da água se aproximará ou até excederá a da rocha. A transferência de calor da água para o ar é feita, principalmente por evaporação, aumentando o calor latente do ar.

O gradiente térmico aumenta com a profundidade das minas, se aproximando da zona de influência do núcleo da Terra, que é a parte mais quente da mesma. A rocha em grande profundidade abriga uma quantidade significativa de energia térmica que é liberada pela mineração e bombeada para as vias aéreas e o sistema de ventilação precisa lidar com isso.

Em algumas minas, a surgência de água quente das fissuras do maciço rochoso libera energia térmica no ambiente, aumentando a temperatura (MILIYUNDA, 2018). Isso traz a necessidade de mais ventilação, como em alguns locais, no fechamento de mina, dá a possibilidade de aproveitamento dessa energia para residências (BENFENATTI, 2018).

Questões pós-lavra de utilização da área servem para acentuar como é importante incorporar aspectos de desenvolvimento sustentável em projetos de lavra de rocha (PELIZZA E PEILA, 1995).

Porém, em uma mina subterrânea vários itens de preocupação devem ser levados em conta como os túneis, poços, pilares, galerias, acessos e contaminantes presentes, bem como os impactos sociais gerados pelo fim da atividade. Para se elaborar um plano eficaz de encerramento de atividades, devemos levar em conta que o novo uso da área deve ser de forma a contribuir com o desenvolvimento econômico, com meio ambiente e com a sociedade que é a principal impactada por todo o ônus da atividade.



### 3.3) INUNDAÇÃO CONTROLADA

A inundação da mina pode ser dividida em dois tipos: inundação não controlada e inundação controlada. As inundações não controladas geralmente acontecem acidentalmente devido à irrupção de água na mina após danos na construção ou falha da bomba (WOLKERSDORFER, 2008).

Uma das razões principais para deixar a inundação acontecer, pós-término da extração de minério, é evitar oxidação de sulfetos e, portanto, a DAM (Drenagem Ácida de Mina). Outra razão importante é de segurança, sendo necessário evitar que pessoas entrem sem precaução além da possível presença de gases perigosos.

As águas ácidas representam uma questão ambiental complexa em vários países. Minerações ao redor de todo o globo lidam com questões envolvendo a DAM. Nos EUA são comuns os casos de drenagem ácida em minas de carvão. Na Europa vários países enfrentam o problema, entre eles a Noruega, Finlândia, Alemanha, Suécia, Polônia e França (WOLKERSDORFER, 2005)

No Brasil não existem levantamentos exaustivos a respeito dos locais de ocorrência de DAM. Alguns casos, porém, têm sido objeto de estudo intenso, recentemente, como o do minério de urânio do complexo minerioindustrial das Indústrias Nucleares do Brasil - INB em Poços de Caldas, sul do Estado de Minas Gerais, e o das minas de carvão da região de Criciúma, sudeste do Estado de Santa Catarina, e da região de Candiota, sul do Estado do Rio Grande do Sul. Em todos os casos, a geração de DAM deve-se à presença de sulfetos associados aos minérios.

Nessas regiões, em maior ou menor grau, a população vive nas proximidades das áreas de mineração e faz uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos para a agricultura e pecuária (SOARES *et al.*, 2005).

Diversas técnicas são sugeridas na literatura para tratamento de efluentes de DAM. A escolha do processo de tratamento de águas ácidas deve ser economicamente viável, simples e eficiente, considerando que seu custo é sempre tido como extra na produção (WOLKERSDORFER, 2005). Atenção especial deve ser dada a estudos voltados à minimização e prevenção de sua ocorrência.

O fechamento de minas é algo tão importante quanto complexo, que ainda precisa vencer vários desafios, ambientais quanto socioeconômicos.

Os aspectos relativos à segurança e estabilidade de estruturas, recuperação ambiental e aspectos socioeconômicos previstos no pós-fechamento são peças fundamentais para o desenvolvimento sustentável dos territórios.

Para Sánchez (2021), o fechamento de mina será cada vez mais uma questão estratégica tanto para as mineradoras quanto em termos de políticas públicas.

"Nos últimos 20 anos, muito se aprendeu sobre planejamento de fechamento de mina, avançou-se em termos conceituais, assim como no entendimento das questões centrais e críticas. A elaboração do plano é necessária, mas é apenas uma parte do processo, que deve envolver diversos setores das empresas, que vão desde recursos humanos até suprimentos. Há ainda uma série de desafios, como a comunicação do fechamento, governança corporativa e governança pública do processo".

As metas do fechamento estão no Programa de Mineração e Desenvolvimento, que é o atual programa de ações do Ministério de Minas e Energia para o setor mineral e na Agenda Regulatória 2020/2021 da Agência Nacional de Mineração (ANM), com os desafios para a nova normatização em vigor, para ser cumprida e obter resultados.

O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) desenvolve programa sobre reconversão produtiva em territórios dependentes de mineração de Minas Gerais, que visa implantar estratégias para reduzir a dependência em relação à atividade minerária a partir de uma estratégia de desenvolvimento econômico local.

Sistemas de tratamento passivo da DAM são projetados para fazer uso de processos naturais resultantes das interações entre atmosfera, hidrosfera e biosfera, como por exemplo: sedimentação, filtração, transferência gasosa, adsorção, trocas iônicas, precipitações químicas, reações de hidrólise e oxi-redução. Sistemas passivos necessitam de pouca ou nenhuma manutenção, sendo essa uma de suas principais vantagens sobre o tratamento ativo, além de não exigirem a adição constante de produtos químicos. (TRINDADE e SOARES, 2004).

#### **4) METODOLOGIA**

Foi realizado um estudo de revisão bibliográfica acerca da inundação controlada de mina subterrânea como alternativa de fechamento de mina visando economicidade, seja ela direta ou indireta, utilizando-se de artigos científicos e base de dados disponíveis na literatura atual.

Foram levados em consideração casos publicados sobre uso desta técnica, bem como as estruturas necessárias para construção do sistema, abordando as possíveis vantagens adquiridas com uso da mesma como uma opção para o fechamento de mina. De acordo com Ferrari (1982), a pesquisa bibliográfica tem por finalidade conhecer as contribuições científicas realizadas sobre determinado assunto.

A metodologia baseia-se na definição de pesquisa bibliográfica proposta pelo citado autor, e na definição de pesquisa exploratória proposta por Gil (2008), segundo o qual, o trabalho é desenvolvido a partir de material já elaborado, constituído de livros e artigos científicos.

## 5) ESTUDOS DE CASO

Os pontos no mapa mundial, na figura 9, mostram localizações de minas inundadas ao redor do globo. Pode se notar que esta não é uma prática muito utilizada.



Figura 9: Localização global das minas inundadas

Fonte: WOLKERSDORFER (2008).

Wolkerdosfer (2008) mostra esses estudos de caso que serão apresentados a seguir.

### 5.1) CASO DE PICHER MINNING DISTRICT, OKLAHOMA, USA

Localizado no nordeste de Oklahoma / EUA, Picher era um dos maiores campos de mineração de chumbo-zinco do mundo, cobrindo uma área de 186 km<sup>2</sup> (a área estudada cobre cerca de 40 km<sup>2</sup>) e originalmente contém reservas de minério de 1,22 · 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>. A figura 10 mostra a localização geográfica da mina citada.

A mineração de galena e esfalerita começou entre 1891 e 1901 e cessou em 1976 com um período de pico entre 1915 e 1920, quando 230 minas estavam em operação. Durante a Segunda Guerra Mundial, 63 grandes estações de bombeamento bombearam no máximo 60 m<sup>3</sup>/min de água das minas; isso diminuiu para 24 m<sup>3</sup>/min após a guerra. A mina mais profundas do distrito mineiro de Picher atingiu uma profundidade de cerca de 200 m, o volume das galerias inundadas totalizou 4 · 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>.

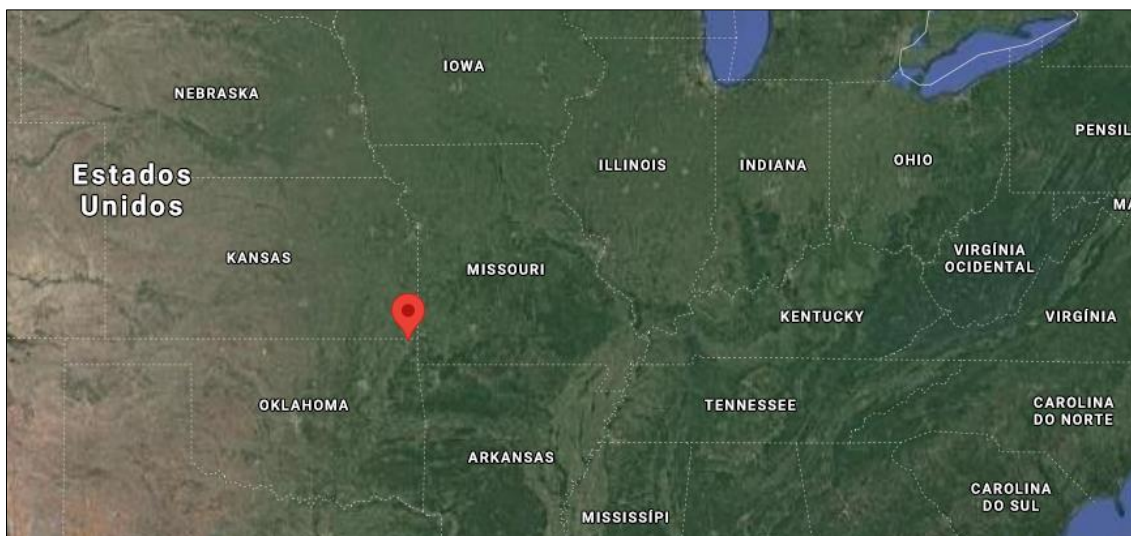


Figura 10: Localização Picher Mining.

Fonte: GOOGLE MAPAS (2021)

Devido à técnica de mineração de câmaras e pilares (parte do corpo do minério não é extraído porque os pilares de sustentação são formados pelo próprio minério), os resíduos de pirita e marcassita foram depositados nas áreas mineradas, dando origem a água ácida altamente contaminada com valores de pH de 4 a 5. Além disso, a água da mina é enriquecida em zinco e ferro, atingindo até 150 mg/L de cada. Em 1979, os níveis de água atingiram a superfície, finalmente descarregando no córrego Tar Creek.

As rochas mais antigas do distrito mineiro de Picher são dolomitos ordovicianos com camadas de arenito entrelaçadas, que estão sobrepostas por folhelhos devonianos.

Em janeiro de 2000, um subcomitê foi nomeado no Distrito Mineiro de Picher para “[desenvolver] um plano abrangente de remediação para a área infestada do nordeste do país no condado de Ottawa” (WOLKERSDORFER, 2005).

Durante seus oito meses de trabalho, a Força-Tarefa, composta por oito subcomitês, desenvolveu um plano de remediação para toda a área. Além do mais, o subcomitê de poços de minas identificou mais de 1.300 poços no nordeste de Oklahoma e assumiu que havia até 2.600 poços abandonados em todo o distrito mineiro Tri-State.

#### ▪ Aparecimento da estratificação

A maioria dos poços amostrados mostrou uma estratificação clara identificada facilmente pela condutividade elétrica específica e pelo pH, e dada a extensão da área minerada, pode-se concluir que é a maior estratificação do corpo de água conhecido até agora.

Foram observadas duas camadas de água: uma superior, caracterizada por menores condutividades elétricas ( $0,7-1,9 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e maior pH, e uma inferior menor, com maiores condutividades elétricas ( $3-4 \text{ mS cm}^{-1}$ ) e pH ácido. Os poços acima dessa elevação não mostraram estratificação clara. Playton *et al.*, (1980) perceberam que nenhuma variação espacial clara dos dados físico-químicos poderia ser observada.

Além disso, eles discutiram o fato de que a água mais fria sobrepuja a água mais quente e concluíram que “uma estratificação térmica instável aparentemente existe”, mascarada pela maior densidade da água mineralizada mais alta. No entanto, eles esqueceram que a estabilidade de um corpo de água estratificada é resultado da densidade da água, que é uma função da temperatura da água e de sua mineralização. Nenhuma explicação foi dada para a estratificação do corpo d'água da mina.

Sheibach *et al.*, (1982) também relataram que menos água mineralizada era sobreposta a um corpo de água da mina com uma mineralização mais alta e valores mais baixos de pH, embora a separação dos dois corpos de água estivesse a uma profundidade de cerca de 50 m. Nos três poços em que foram coletadas amostras (poços Kenoyer, Consol 2 e Lawyer), o total de sólidos dissolvidos variou aproximadamente entre 1 e 3 g/L na parte superior e 3,5 e 5 g/L na água da mina inferior. Sem investigações adicionais, eles concluíram que a estratificação pode ter sido resultado de resíduos de rocha produtora de ácido deixados nas partes mais profundas das minas.

Mais de 20 anos depois, DeHay (2003) e DeHay *et al.*, (2004) reinvestigaram o Distrito Mineiro de Picher. Embora a condutividade elétrica tivesse diminuído de  $3,5-4,5 \text{ mS cm}^{-1}$  para  $2,5 \text{ mS cm}^{-1}$ , e o pH aumentou de 5,5-6 para mais de 6, os padrões de estratificação no campo de mineração eram semelhantes aos do final dos anos 70 e início dos anos 80. O limite entre os corpos d'água inferior e superior da mina estava aproximadamente a 185-202 m, e foi indicado por um salto significativo na condutividade elétrica e nas concentrações dos constituintes da água.

As determinações de idade nos poços com estratificação mostraram que o menor corpo de água da mina teve um tempo médio de permanência significativamente maior que o superior (anos 80 na década de 1990 até o início do século 21 na camada superior, com algumas exceções a essa regra geral). Embora a água estivesse fluindo através do reservatório de água da mina, as estratificações permaneceram muito estáveis nos últimos 20 anos. Não existem dados suficientes apresentados pelos autores para uma descrição mais detalhada.

## ▪ Discussão

Com base nos dados apresentados pelos vários pesquisadores entre os anos 1980 e 2004, a estratificação no distrito mineiro de Picher permaneceu muito estável por quase 25 anos, com os parâmetros físico-químicos do corpo d'água superior e inferior da mina sendo muito semelhantes em todos os casos investigados. Isto mostra, por um lado, que a conexão hidrodinâmica entre a parte superior e os corpos d'água inferiores das minas é extremamente pobre e não há fluxo convectivo entre os dois.

Por outro lado, os parâmetros físico-químicos semelhantes em cada um dos corpos d'água levam à conclusão de que eles estão hidráulicamente bem conectados, como também podem ser deduzidos dos tempos médios de permanência da água da mina. Além disso, as medições nos poços mostram que o fluxo é dominado pelo fluxo convectivo e não pelo fluxo difusivo, porque as condutividades elétricas e temperaturas nas diferentes profundidades são muito semelhantes em cada poço. O fluxo controlado por difusão parece dominar esse poço e a determinação da idade da água difere de fato dos outros poços investigados terem cerca de 35 anos.

Nenhum teste de rastreamento ainda foi relatado para o Distrito Mineiro de Picher. Seria interessante ver se as determinações da idade da água seriam validadas por um teste de rastreamento ou não. Além disso, esse teste poderia ser usado para caracterizar o tipo de estratificação na região. (WOLKERSDORFER, 2005)

## 5.2) CASO DE NORTH-RHINE/WESTPHALIAN COAL MINES, GERMANY

Coldewey *et al.*, (1999) investigaram 19 poços e poços no Ruhr alemão (Niederrhein-Westfalen: Baixo Reno / Vestfália) e o campo de carvão de Aachen bem como as áreas de mineração de Sauerland. A figura 11 mostra a região das minas de carvão citadas.



Figura 11: Localização North-Rhine/Westphalian Coal Mines.

Fonte: GOOGLE MAPAS, (2021)

Além dos parâmetros físico-químicos medidos com sondas de fundo de poço (temperatura, condutividade elétrica, pH, EH e pressão), foram analisados (em laboratório) amostras de água coletadas de profundidades diferentes nos poços. Além disso, eles conduziram um experimento de laboratório para investigar e entender alguns dos padrões de estratificação nos poços inundados. As seguintes descrições são baseadas no trabalho de Coldewey *et al.*, (1999). Todas as três áreas de mineração diferem geologicamente, embora todas pertençam ao mesmo sistema geológico.

#### ▪ Aparecimento da estratificação

No total, 24 medições contínuas e descontínuas foram realizadas nos poços das minas. À primeira vista, parece que nenhuma conclusão geral pode ser tirada porque os resultados das medições variam de poço para poço. No entanto, existem algumas semelhanças características nos parâmetros dependentes da profundidade:

- zonas com parâmetros físico-químicos constantes;
- zonas com mudança gradual de parâmetros;
- mudanças bruscas nos parâmetros;
- zonas de transição.



A condutividade elétrica e a temperatura, geralmente, mas nem sempre, aumentam com a profundidade, e mudanças bruscas de parâmetros geralmente ocorrem nas estações de início do poço (Fig. 12). Essas mudanças repentinas eram muito constantes em relação à profundidade, de modo que mesmo medições em anos diferentes eram relativamente consistentes. As linhas horizontais indicam os níveis na mina.

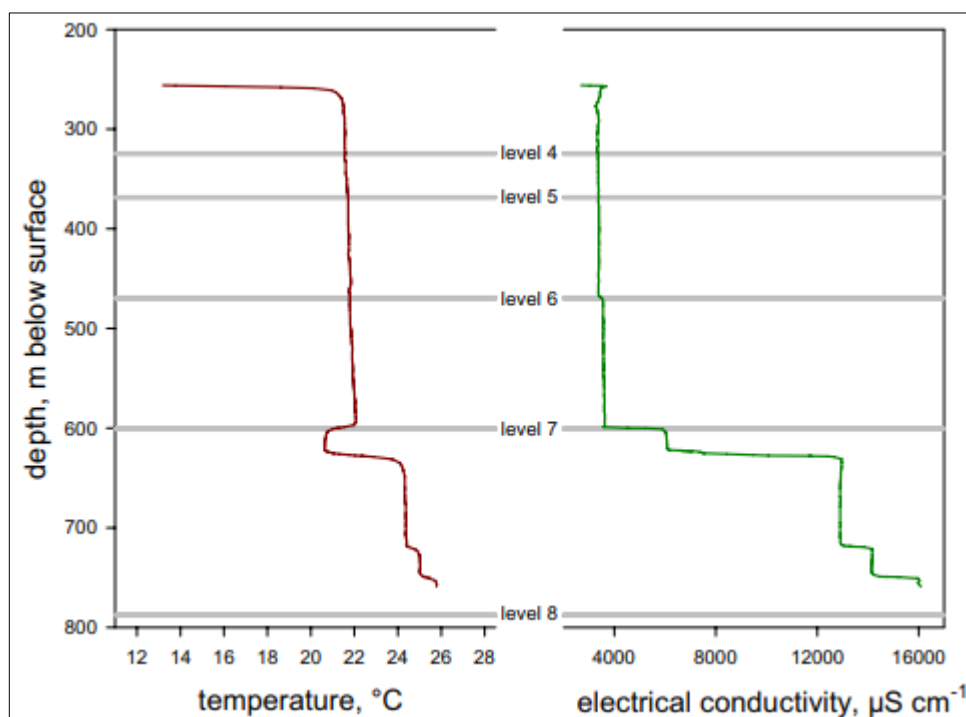


Figura 12: Medições de temperatura e condutividade elétrica no poço.

Fonte: modificado de COLDEWEY *et al.*, (1999); *apud* WOLKERSDORFER, 2005.

O gradiente geotérmico não pareceu ter uma influência importante nos perfis de profundidade de temperatura dos poços, mas teve nos poços de pequeno diâmetro. A água subterrânea na área de mineração de carvão do Ruhr é geralmente altamente salina; a condutividade elétrica nos poços pode variar de vários milli-Siemens a  $189 \text{ mS cm}^{-1}$ . Como as zonas mais profundas da mina são geralmente cobertas por águas subterrâneas de condutividades mais baixas, as diferenças de densidade são muito grandes e a estratificação é, portanto, constante por um longo tempo. Embora as zonas de transição sejam geralmente pequenas entre diferentes corpos d'água, também pode haver zonas de transição, com espessuras de até 20 m, o que parece ser mais típico para poços (o poço Landwehr 1 mostra uma zona de transição de 20 m).

Isso ocorre porque o fluxo em um poço é mais estabelecido do que o outro poço. Alguns poços mostram uma mudança gradual na salinidade ou temperatura (Fig. 13. Linhas horizontais indicam os níveis na mina).

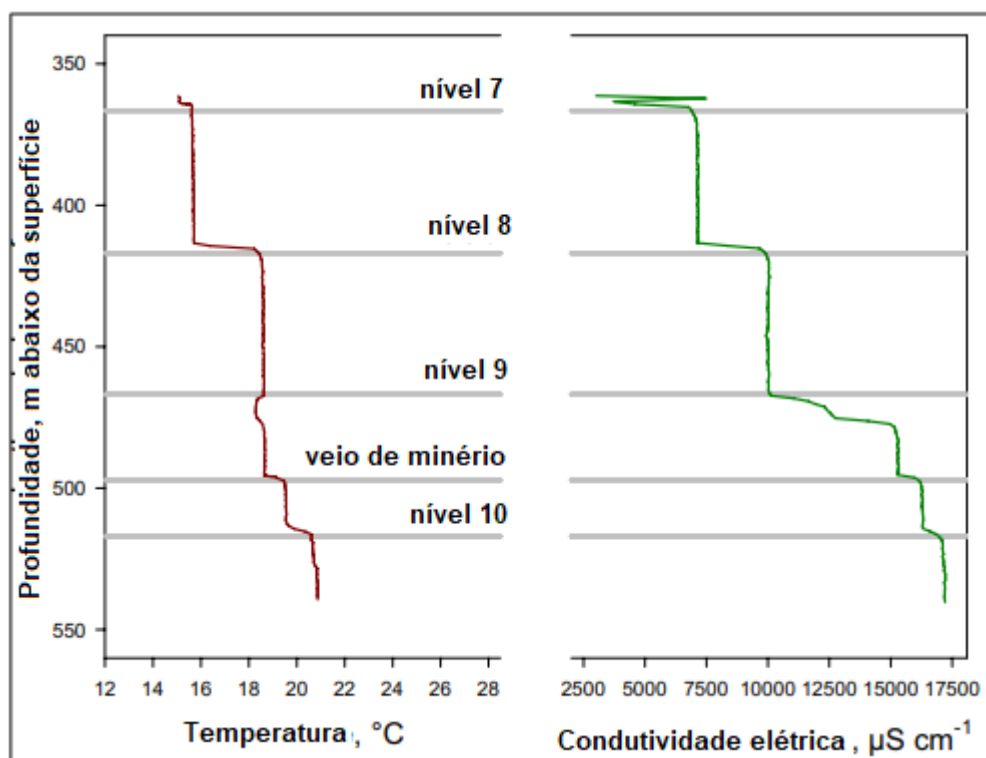


Figura 13: Medições de temperatura e condutividade elétrica no poço Sicília da mina abandonada de Meggen / Alemanha.

Fonte: Modificada de WOLKERSDORFER, 2005.

No poço da Sicília, as etapas estão claramente ligadas à estação de partida e, portanto, podem refletir diferentes células de fluxo ou a entrada de água com diferentes parâmetros físico-químicos.

#### ▪ Discussão

Os perfis finais de temperatura e salinidade de um poço são claramente imprevisíveis. É altamente provável que etapas ou zonas de transição ocorram nas estações de partida, mas qual estação de partida exibirá essas etapas parece imprevisível. Curiosamente, uma vez que a estratificação ocorre, ela parece ser bastante constante, mesmo em escalas de tempo de vários anos ou décadas. A estratificação em poços é caracterizada por pequenas zonas de transição entre diferentes corpos d'água na mina, onde os poços geralmente têm zonas de transição maiores. Outra característica interessante é o fato de que - embora a profundidade dos diferentes

corpos d'água da mina pareça ser constante - isso não é verdade para as condutividades elétricas nas diferentes camadas. Parece haver uma tendência comum de que as condutividades elétricas diminuam com o tempo. Essas diferenças provam que a água não está em estado estacionário.

### 5.3) CASO DE RONNEBURG URANIUM MINE, THURINGIA, GERMANY

Ronneburg está localizado na Turíngia / Alemanha, 8 Km a sudeste de Gera e 250 Km ao sudoeste de Berlim.

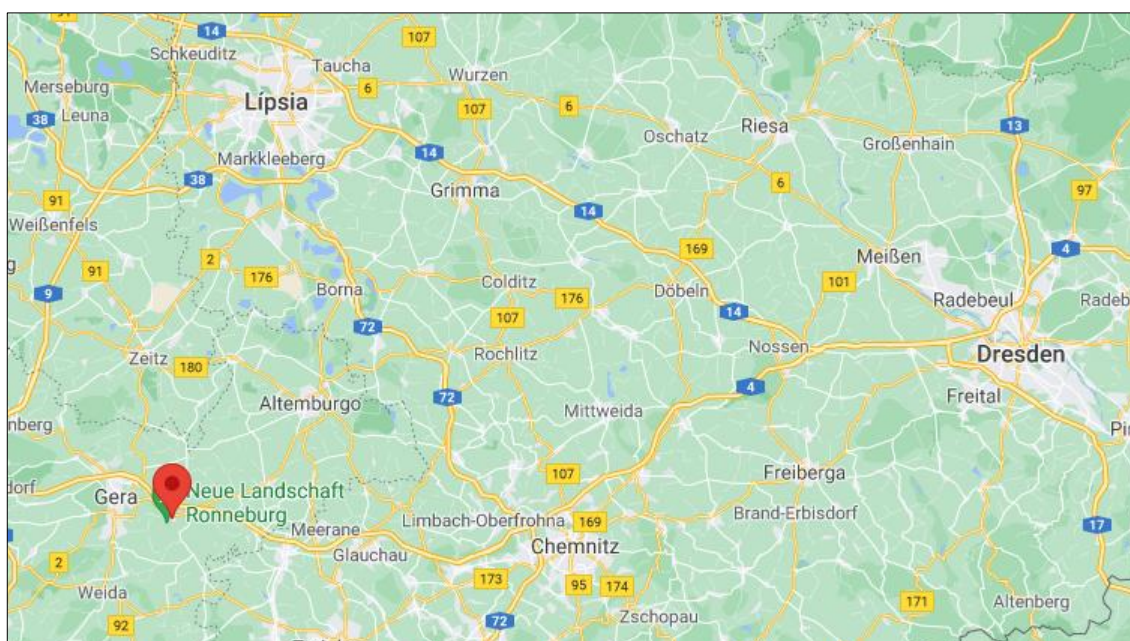


Figura 14: Localização Ronneburg Uranium Mine.

Fonte: GOOGLE MAPAS, (2021).

A mineração de urânio pela antiga empresa soviético-alemã SDAG Wismut teve início em 1951 e se encerrou em 1991. Durante esse período, várias minas subterrâneas interconectadas com um volume total de 68.106 m<sup>3</sup> estavam em operação, das quais 44.106 m<sup>3</sup> estão aterradas. Havia 22 níveis na mina a profundidades de 30 a 940 m abaixo da superfície, interconectados por 40 poços, totalizando um comprimento de 3.000 Km. Em 1998, começaram as inundações das minas subterrâneas, após a instalação de cerca de 120 barragens subterrâneas para separar áreas com alto potencial de poluição daquelas com baixo. Somente parte mais profunda da mina foi isolada totalizando 800.000 m<sup>3</sup>, ela foi inundada entre 1989 e 1997.

Espera-se que a infiltração da água de drenagem da mina ocorra em várias áreas topográficas baixas. Enquanto a água da mina nos campos do sul deve ser tratada para remover urânio, rádio, ferro, arsênico e metais potencialmente tóxicos, a água da mina no campo do

norte provavelmente não precisará de tratamento. O fim das inundações foi projetado para ocorrer entre 2003 e 2005, e foi previsto que o tratamento seria necessário por mais 20 anos (WOLKERSDORFER,2005). Em março de 2007, a inundação completa ainda não tinha acontecido. Um grande esforço para modelar cenários de inundação e pós-inundação foi realizada anteriormente na mina de Ronneburg.

- **Aparecimento da estratificação**

A estratificação foi observada nos poços de monitoramento não revestidos desde o início das medições de temperatura e condutividade elétrica dependentes da profundidade no local da mina de Ronneburg (WOLKERDORFER, 2005), o que forneceu detalhes de três medições no poço de observação e-1260, localizado no campo de minas noroeste de Ronneburg (março de 2000, dezembro de 2000, março de 2001). Ao contrário dos outros estudos de caso, os poços e a maioria das galerias da mina foram preenchidos. Assim, o monitoramento está sendo realizado em poços especialmente perfurados de diâmetros comparativamente pequenos. Nesses poços, a água não será afetada pelo fluxo convectivo livre devido à pequena relação diâmetro / comprimento, portanto, é possível que os efeitos observados sejam devidos, pelo menos em parte, à hidrodinâmica que ocorre em tubos de pequeno diâmetro. A figura publicada em Wolkersdorfer (2005) é típico para água parada em poços e as conclusões aqui tiradas e pelos autores, portanto, devem ser interpretadas com cautela (Fig. 15).

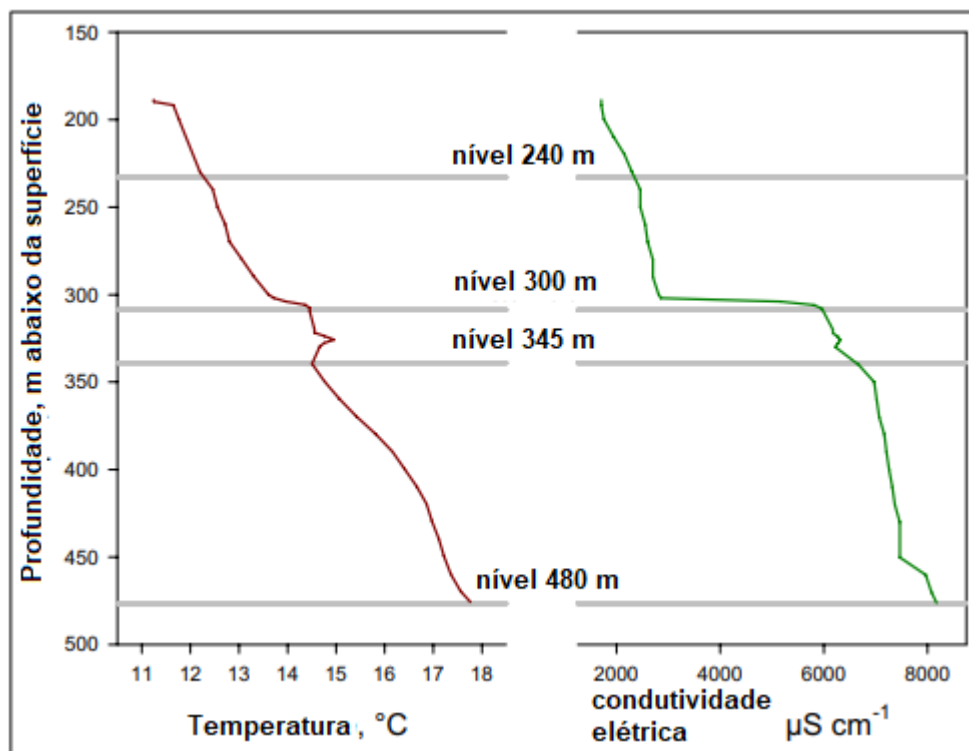


Figura 15: Gráficos de temperatura e condutividade elétrica do poço noroeste de Ronneburg / Alemanha.

Fonte: Modificado de WOLKERSDORFER (2005)

No entanto, fica claro que há uma estratificação na mina de urânio de Ronneburg noroeste com água altamente contaminada (condutividade elétrica acima de 4 mS/cm) nos níveis mais baixos e menos água contaminada (1-3 mS/cm) nas partes superiores do poço. Além disso, não há evidências de um fluxo convectivo geral, pois o perfil de temperatura reflete muito bem o gradiente geotérmico. Essa ausência de mistura explicaria as diferenças na composição química da água da mina nos vários campos e também prova que barragens e aterros atrasam o desenvolvimento de misturas em larga escala. No entanto, as investigações experimentais de Robillard *et al.* (1986) ou as observações de campo de Le Carlier de Veslud *et al.* (1998) mostraram que meios porosos não excluem a convecção térmica de longo prazo.

Alguns processos dinâmicos podem ser observados entre os níveis 300 e 345 (os níveis na Figura 15 são retirados da publicação do Wolkersdofer. As diferenças entre os números fornecidos aqui e a figura se devem ao fato de que os níveis das minas geralmente não são horizontais, de modo que os níveis atendem a todos os poços em diferentes profundidades).

#### 5.4) CASO DE HOPE SALT MINE, ALEMANHA

A Alemanha abriga inúmeras minas de sal abandonadas que foram inundadas de maneira controlada ou descontrolada (SCHWANDT e SEIFERT, 1999). Elas foram intensivamente estudadas porque a Alemanha tem uma longa história de mineração subterrânea de sal e porque a política de eliminação de resíduos radioativos da Alemanha, por um longo tempo, focou-se nessas minas de sal. A situação nas minas de sal inundadas difere significativamente das minas de metal ou carvão, porque além da estratificação térmica, os efeitos químicos devem ser considerados.

As diferenças de densidade nas minas de sal são geralmente maiores do que nas minas de metal porque a mineralização é maior. Isso faz das minas de sal um excelente local para estudar a estratificação da água das minas, mas é preciso lembrar que esses estudos de caso são transferíveis apenas para as minas de metal e carvão com restrições. Existem minas, que não são minas de sal, com conteúdo de cloreto de até 130 g/L e condutividade elétrica de até 190 mS/cm (COLDEWEY *et al.*, 1999), mas esses casos são raros. Embora a publicação do Wolkersdorfer se concentre em minas de metal e carvão, algumas minas de sal serão incluídas aqui porque a primeira inundação controlada monitorada de uma mina foi realizada na mina de sal Hope, ao norte de Hannover / Alemanha. Além disso, várias das experiências descritas nos documentos sobre a inundação de minas também foram usadas em investigações sobre água oriundas das minas, programas de monitoramento e testes de rastreamento realizados pelo citado autor.

Hope está localizado a 30 km ao norte de Hannover / Alemanha (figura 16) e foi inundada com salmoura saturada pela dissolução da caverna de sal.

As inundações começaram em 12 de março de 1984, depois que a mina foi abandonada em janeiro de 1984. Antes da inundação, 16 instalações de medição no local foram instaladas para monitorar o processo de inundação. Além disso, uma barragem subterrânea foi construída para estudar barragens de segurança para a eliminação de resíduos radioativos. Todo o programa foi iniciado em um período relativamente curto, apenas seis meses antes da inundação planejada. Além das instalações geoquímicas, geomecânicas, geofísicas e de monitoramento de barragens, o objetivo era investigar “o transporte de calor e massa em áreas inundadas, galerias não preenchidas, minas e poços” (WOLKERSDORFER, 2005).



Figura 16: Localização da mina de sal Hope Alemanha.

Fonte: GOOGLE MAPAS (2021).

A mineração na Hope salt mine começou em 1907, com 521,2 m de profundidade com o poço Adolfglück. Em 1909, o poço Hope, de 628,5 m de profundidade foi desenvolvido. A camada de sal tem uma profundidade de cerca de 4.000 m, um diâmetro máximo de 6 km e consiste em diferentes tipos de sal da idade do Permiano (Zechstein): sal-gema, silvita, kieserita e anidrita. Um volume total de cerca de  $1,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  foi inundado com salmoura NaCl saturada (densidade: 1.200 g/m) do campo da caverna Empelde. Durante o processo de inundação e desde que as partes não inundadas da mina estivessem acessíveis, a salmoura era analisada regularmente, coletando várias amostras no subsolo. Além disso, o caminho do fluxo da salmoura foi controlado e monitorado (HERBERT, 1989).

A mineração na área de Bernburg começou em 31 de janeiro de 1852 com o poço Manteuffel, onde foi desenvolvida a primeira mina de sal de potássio do mundo (RIEMANN 1913; HILTSCHER, 1999). Todas as minas estão dentro da formação de sal de Zechstein. Czolbe *et al.*, (1992) investigaram o poço inundado através de registros de temperatura e densidade, bem como análises químicas e um teste traçador com um marcador  $\gamma$  radioativo. Além disso, eles modelaram a situação hidrodinâmica do poço com o código KASOMO.

#### ▪ Aparecimento da estratificação

Herbert e Sander (1982), responsáveis pelo experimento de inundação Hope, haviam estabelecido anteriormente que as salmouras nas minas inundadas eram comumente

estratificadas em três camadas: uma camada superior com água ligeiramente salina ou fresca, uma camada média saturada de NaCl com uma densidade de cerca de  $1,20 \text{ g/cm}^3$  e uma camada mais rica em  $\text{MgCl}_2$  com uma densidade de  $1,29\text{-}1,30 \text{ g/cm}^3$ . Entre essas três camadas, eles encontraram camadas intermediárias. Eles concluíram que a composição química da rocha em contato com o poço e o gradiente geotérmico atuam em conjunto para controlar a formação das várias camadas. Além disso, eles observaram fluxo convectivo em camadas homogêneas e nenhum fluxo entre camadas com gradientes de densidade ou temperatura (HERBERT e SANDER, 1982; SANDER e HERBERT, 1985).

Além disso, eles descobriram que mais de um corpo de água convectivo e também células sem fluxo e fluxo convectivo podem se unir. Segundo a opinião deles, resultado do cenário geológico. A geometria da mina foi vista apenas como uma razão adicional para a estratificação. Em outro artigo (SANDER e HERBERT, 1985), eles concluíram que o limite de NaCl /  $\text{MgCl}_2$  pode ser bem-sucedido usado como uma barreira contra o transporte, pois notaram que a halita cristalina (sal-gema) estava se formando na fronteira. No entanto, e esse fato está ausente em suas investigações, essa barreira só pode ser estável se nenhuma convecção forçada de fluxo ocorrer no poço.

Durante a inundação ativa da mina de sal Hope, foram feitas inúmeras medições físico-químicas (GSF - GESELLSCHAFT FÜR STRAHLEN- UND UM - WELT FORSCHUNG, 1986; HERBERT, 1989). Foram publicadas 14 medições contínuas no poço Hope, Adolfsglück e Abbau 4. Havia muitas diferenças e muitas semelhanças, das quais a estratificação nos poços é a mais relevante para esta discussão. Infelizmente, os resultados do poço Hope e Adolfsglück não podem ser comparados diretamente, pois o poço Adolfsglück foi preenchido em 1985, portanto as medições tiveram que ser realizadas em um tubo dentro do aterro. Das diferenças nas medições antes e depois do aterro, fica claro que a situação pós-aterro era hidraulicamente significativamente diferente das condições de pré-aterro. A estratificação foi modesta no poço de Adolfsglück antes do aterro, enquanto depois, pelo menos dois corpos de água de minas separados podiam ser identificados (Fig. 17).



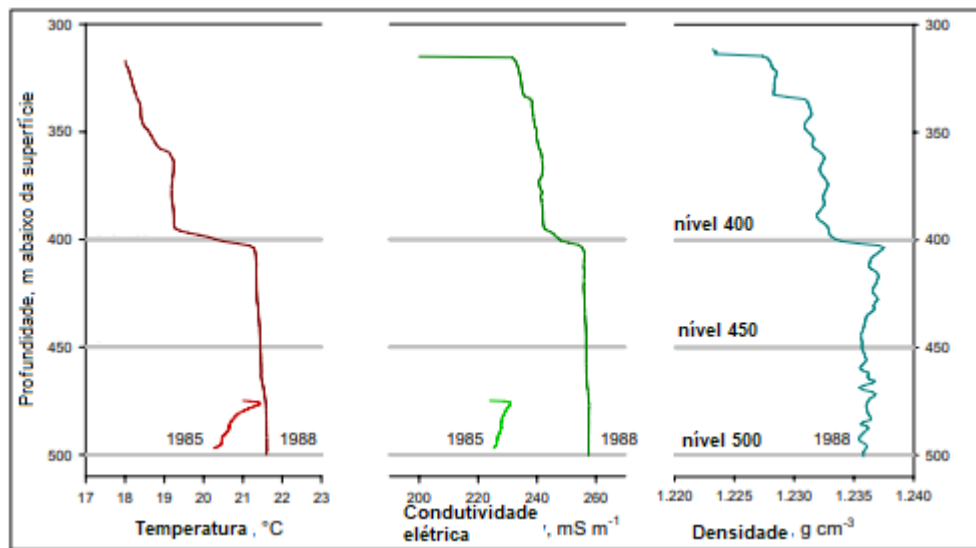


Figura 17: Comparação da situação de pós e pré-aterro no poço Adolfs Glück em 1985 e 1988.

Fonte: Modificado de WOLKERSDORFER (2005).

Novamente, como no caso dos poços na área do Ruhr, os poços não podem ser usados para interpretar a estratificação em uma mina, pois a situação do fluxo em um poço de pequeno diâmetro difere significativamente do fluxo em um poço de grande volume. Enquanto o “poço” de Adolfs Glück estratificava após o aterro, esse não era o caso do poço Hope, que não era aterrado (Fig. 18).

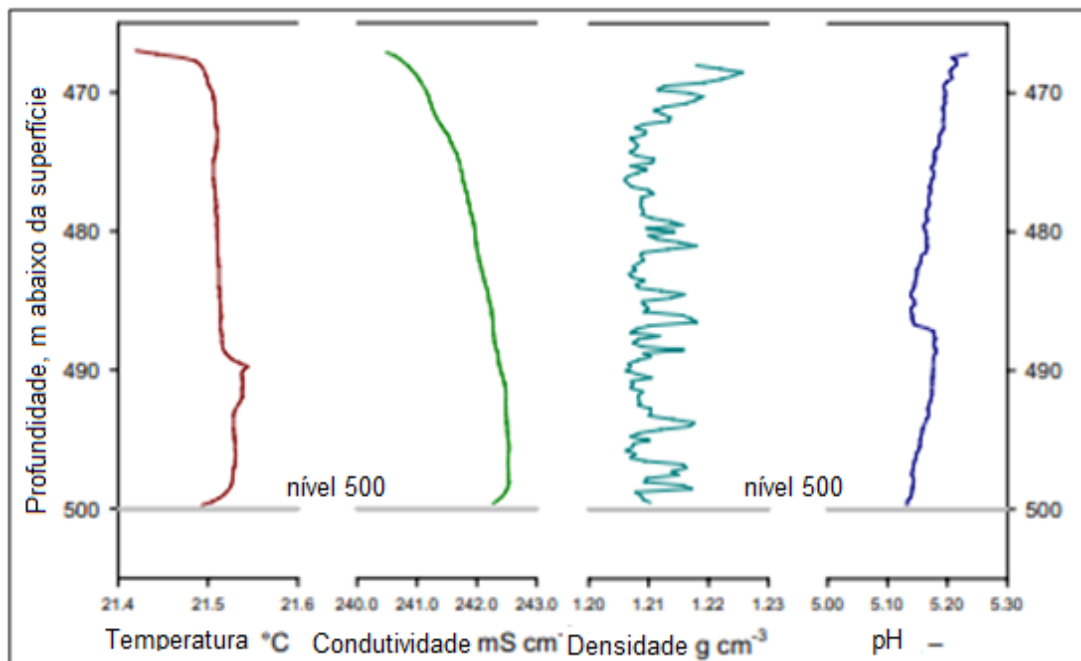


Figura 18: Resultados das medições multiparâmetros no poço Hope em 20 de setembro de 1985. Apenas estratificação menor pode ser observada, a qual - exceto que o nível da água subiu - não mudou significativamente até o final da inundação da mina.

Fonte: Modificada de HERBERT (1989).

A interpretação da GSF - Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (1986), de que o aterro evita a mistura turbulenta geral, é definitivamente verdadeira, mas isso não pode ser verificado a partir de uma medição em um pequeno diâmetro dentro de um poço aterrado. Algumas estratificações menores foram observadas durante o estágio inicial do processo de inundação, mas essa estratificação foi interrompida no final da inundação, deixando apenas uma lente de água menos mineralizada com uma espessura de 30 a 40 m no topo dos 180 a 190 m corpo grosso da água da mina do poço. As seguintes descobertas do subprojeto “Hope - geochemistry” são relevantes para este estudo de poços inundados (GSF - GESELLSCHAFT FÜR STRAHLEN- UND UMWELTFORSCHUNG, 1986; HERBERT, 1989):

- um poço pode consistir em dois ou mais corpos de água misturados turbulentos que fazem fronteira entre si, mas as camadas sem fluxo também podem fazer fronteira com corpos misturados turbulentos;
- corpos d'água com fluxo turbulento são caracterizados por temperatura uniforme, condutividade elétrica, densidade e composição química;
- as camadas sem fluxo são refletidas pelos gradientes de concentração e temperatura;
- o transporte de massa é dominado pela difusão lenta em camadas sem fluxo, e principalmente pelo fluxo rápido em turbulentas camadas mistas;
- limites entre camadas únicas agem como barreiras mecânicas, resultando em uma mudança na direção do fluxo;
- o transporte de massa através das fronteiras é dominado pela difusão, mesmo quando as duas zonas são misturadas por fluxo turbulento; e
- os trabalhos de minas a céu aberto e corte e enchimento mostram um fluxo significativamente diferentes padrões; em minas a céu aberto abertas, o fluxo é dominado por convectivos enquanto as condições de não fluxo predominam nas de aterro.

A estratificação de densidade e temperatura permaneceu estável por um período de pelo menos 4 meses no poço Peißen (CZOLBE *et al.*, 1992; Fig 19.).

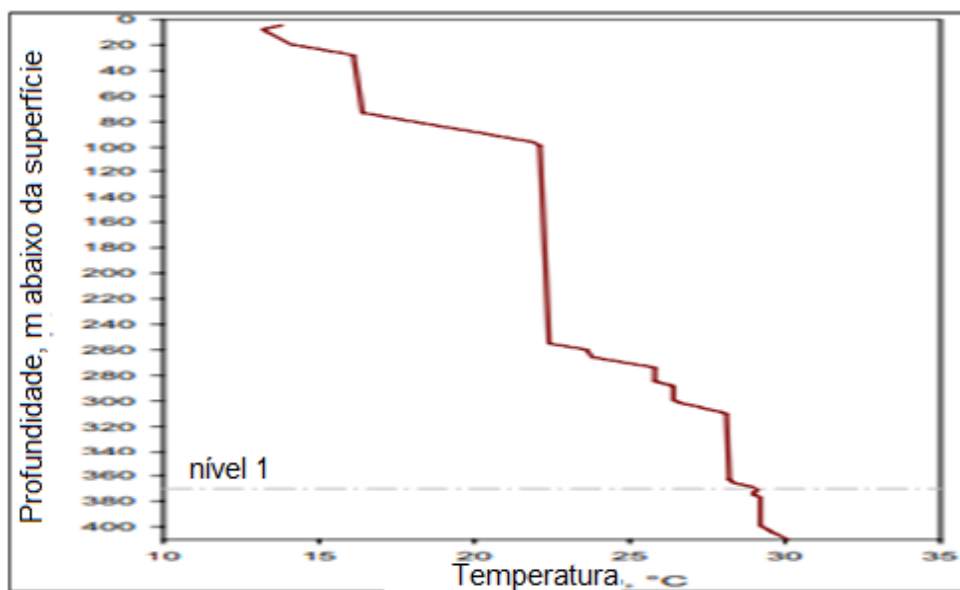


Figura 19: Perfil de temperatura no eixo Peißen. A linha horizontal mais baixa é o 1º nível das minas. Cada uma das zonas de temperatura "estáveis" representa uma célula convectiva, como mostrado pelas investigações do marcador.

Fonte: Modificado de CZOLBE, *et al.*, 1992.

As densidades da água e da salmoura variaram entre  $1,1 \text{ g/cm}^3$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$  e a temperatura variou entre  $13,2$  e  $30,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Foram observados quatro corpos d'água sem ou com pequenas camadas intermediárias. Eles foram caracterizados por sua composição química e são semelhantes às observações de Herbert e Sander (1982): uma camada de água "mineral" levemente mineralizada, uma camada de NaCl, uma camada de NaCl-KCl e uma camada mais baixa de  $\text{MgCl}_2$ . Além das investigações físico-químicas, a investigação incluiu um teste de rastreamento. Um traçador  $\gamma$  radioativo foi injetado em 10 locais no poço. As velocidades variaram entre  $0,003$  e  $1,17 \text{ m min}^{-1}$ , o que se encaixa bem na faixa geral dos testes de rastreador de água da mina (embora suas velocidades sejam velocidades in situ da água no poço e não da água que flui na mina).

Além disso, foram identificadas várias (pelo menos 5 e no máximo 8) células convectivas dentro do poço, que estavam diretamente ligadas aos diferentes corpos d'água da mina. A partir de suas medições, eles também concluíram que a água quente estava jorrando perto das paredes dos veios e fluindo para baixo no meio do poço, como foi postulado para a mina Niederschlema/ Alberoda. Usando o código hidrodinâmico KASOMO, originalmente escrito para modelar o fluxo em cavernas para descarte de resíduos radioativos, eles foram capazes de modelar e entender suas observações. Suas medições são semelhantes às discutidas anteriormente para minas de poço único, pois não há fluxo entre o Peißen e outros poços. As

camadas intermediárias formam barreiras relativamente estáveis que não podem ser cruzadas pelos diferentes tipos de água no poço. Isso é apoiado pelo fato de que Czolbe *et al.*, (1992) não foram capazes de detectar os traçadores injetados fora de cada uma das células isoladas.

Uerpmann (1980) investigou a temperatura, a condutividade elétrica, a velocidade e as composições químicas das águas das minas em cinco poços de minas de sal inundados com profundidades entre 200 e 800 m. Como nos estudos de caso listados anteriormente, ele foi capaz de identificar diferentes corpos de água separados um do outro por camadas intermediárias menores de temperatura diferente (Fig. 20).

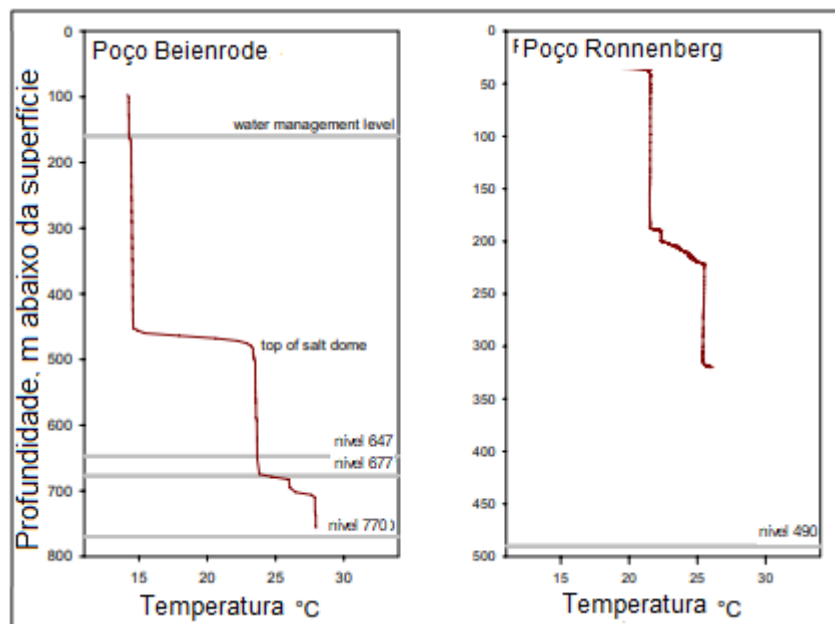


Figura 20: Perfis de profundidade de temperatura em duas minas de sal inundadas no noroeste da Alemanha.

Esquerda: Beienrode, à direita: Ronnenberg.

Fonte: Modificado de UERPMANN (1980).

Uma observação interessante feita durante a inundação das minas de sal foi que as temperaturas da água levaram apenas algumas semanas para atingir quase as temperaturas finais observadas no final do processo de inundação.

### 5.5) CASO DA MINA VERDINHO, CRICIÚMA, SANTA CATARINA, BRASIL

As jazidas de carvão, em Santa Catarina, se localizam na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná nas áreas das bacias hidrográficas formadas pelos rios Tubarão, Urussanga e Araranguá (KREBS/CPRM, 1995). A mineração no local (figura 21), ocorre desde o final do século dezenove. Durante os anos da primeira e a segunda grandes guerras o carvão na região teve grande destaque, pela impossibilidade de importações, e propiciou condições

para a consolidação da indústria carbonífera. Entre os anos de 1930 e 1960 a produção do carvão ocorria em cerca de oitenta pequenas empresas e era destinada principalmente ao transporte ferroviário e à navegação. Contribuíram para o fortalecimento da cadeia produtiva, a construção da Ferrovia Dona Tereza Cristina, a partir de 1884, e os portos de Laguna e Imbituba. Cabe observar que 25% do carvão minerado eram aproveitados e os 75% restantes eram rejeitos depositados sem técnica especial ou legislação seguindo a lógica econômica de cada minerador. Ruiz *et al.*, (2014).

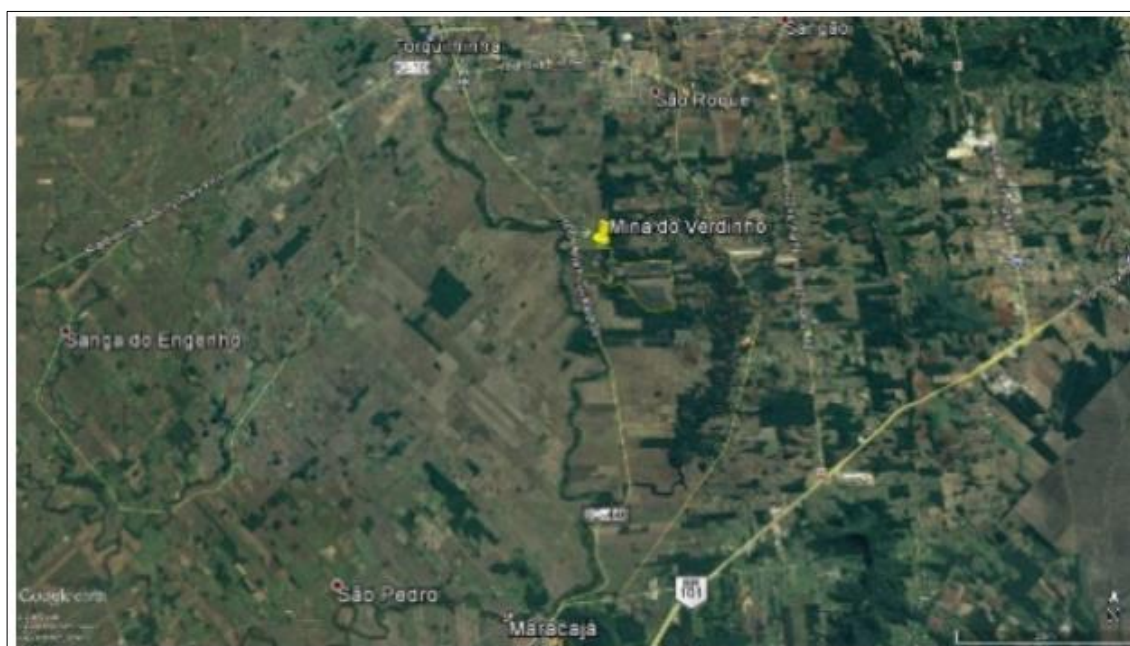


Figura 21: Localização da Mina do Verdinho. A mina está localizada em área rural do município de Forquilha, Santa Catarina.

Fonte: GOOGLE MAPAS (2021)

Na década de 1970, o DNPM (hoje ANM) autorizou carboníferas a efetuarem a remoção parcial dos pilares em Santa Catarina, com aumento da incidência dos casos de subsidência, com consequência, também no rebaixamento do nível freático e a redução da vazão ou o desaparecimento de águas superficiais, bem como danos em obras civis. Esses efeitos resultaram em um número crescente de conflitos entre superficiários e mineradores (VALIATI, 2013). Segundo o DNPM, no período de 1972 a 1989 ocorreu 80% da extração do carvão ROM (*Run of mine*). Nesse tempo, o carvão passou a ser explorado em minas de grande porte com extração mecanizada e construção de novas usinas de beneficiamento.

Em Verdinho, mina de carvão cujas reservas foram exauridas após aproximadamente 30 anos de lavra no subsolo, foram abandonadas as instalações de acesso ao subsolo (plano inclinado, poço vertical) e as galerias com equipamentos. (ZINGANO et al., 2021)

Em 2015, a empresa concessionária Carbonífera Criciúma S.A paralisou a extração. Um grupo de mineiros procurava manter o sistema de bombeamento operando com a esperança da retomada das atividades de lavra, e resgate de equipamentos.

Em 2016, a inspeção da Agência Nacional de Mineração (ANM) constatou que o sistema de bombeamento atendia a 20% da necessidade e ocorriam alagamentos nas galerias, a ventilação era precária, o sistema de escoramento tinha sinais evidentes de falta de manutenção. Toda a água bombeada nesse período foi jogada nos cursos d'água sem nenhum tipo de tratamento. A mina ficou totalmente inundada, não tendo ocorrido “surgências” na superfície. Houve a construção de mais um poço de monitoramento de nível d'água e qualidade em áreas que ainda não estavam contempladas por monitoramento.

Foi estudado o bombeamento das águas da mina. Os principais aspectos mencionados para a necessidade de bombeamento estavam relacionados com:

- (i) necessidade de remoção de equipamentos;
- (ii) necessidade de acessar áreas já lavradas e com processos de desabamento para tentar isolar painéis e para selar fraturas diminuindo o processo de interação entre o aquífero profundo e o superficial;
- (iii) necessidade de remover óleo mineral do subsolo, presente principalmente nos transformadores para evitar uma maior contaminação das águas subterrâneas;
- (iv) decisão de manter permanentemente ou parcialmente o bombeamento das águas de mina para evitar surgências na superfície, pela interação citada.

A outra possibilidade era deixar a mina inundar. Foram feitas considerações a respeito das características geoquímicas dos processos envolvidos, do modelo hidrogeológico, da qualidade da água dos aquíferos existentes, do potencial de poluição e de surgência de águas de mina em superfície, das condições de segurança operacional e dos principais aspectos para efetivação de bombeamento e tratamento da água de mina para diferentes cenários.

Recomendou-se a não retomada do bombeamento das águas de mina, deixando a mina inundar.

Adicionalmente foi recomendado: construir barreiras nos acessos e raízes de ventilação; selagem de furos de sondagem e de cabos elétricos (após retirá-los); manutenção/ampliação dos piezômetros.

Os resultados de condutividade apresentados por Schneider (2006), medidos no efluente bombeado de subsolo da mina Verdinho foram de  $1.400 \mu\text{S cm}^{-1}$  e de  $3.100 \mu\text{S cm}^{-1}$  no efluente tratado, abaixo dos valores medidos neste estudo.

Em 2011 medições de pH dos efluentes da mina de verdinho mostraram que não apresentava drenagem acida, pH 6,46 e a condutividade elétrica apresentou valores próximos de  $3.720 \mu\text{S cm}^{-1}$ , antes do tratamento na mina Verdinho (DILLENBURG, 2011).

#### 5.6) CASO DE MINAS DE URÂNIO ELLIOT LAKE, CANADÁ

Em 2005, existiam cerca de 200 milhões de toneladas de rejeitos de minas de urânio e resíduos de rocha em pilhas de rejeito no Canadá. Alguns dos depósitos de resíduos foram desativados (e agora sendo monitorados), alguns estão sendo ativamente encerrados, alguns abandonadas, e algumas áreas de disposição de resíduos estão ativas.

Nas Minas de urânio Elliot Lake (Canadá), houve audiências para fechamento de minas subterrâneas de urânio e instalações em superfície das minas da região. Dentre alternativas, conceito de dispor todo estéril em profundidade, na mina, teve primeiro apelo pela ideia simples de retornar materiais à sua fonte, onde não causariam perigo posterior.

Conforme AECB (1996), *apud* Silva (2020) essa solução de colocação de estéreis nas escavações poderia se criar novas minas para esta finalidade, que elevariam a necessidade de se encontrar um local adequado para a rocha recém-lavrada. Não foi considerada uma alternativa realística.

Outra alternativa seria utilizar outras minas abandonadas para essa finalidade. O custo e a dificuldade no remanuseio, transporte e colocação do estéril em minas distantes não justificaram os ganhos questionáveis.

A ideia de disposição em lago continuou recebendo atenção séria na prevenção da geração de acidez e oxidação de sulfetos. Estudos indicaram a forma efetiva, quando se considera controle de DAM e mobilidade de contaminantes associada, geralmente favorecida apenas se lagos construídos pelo homem são usados.

Consideração se deu à possibilidade de disposição no Lago Quirke. Alternativa revista por proponentes como meio de alcançar, eventualmente, repositório livre de manutenção segura

e relativa que eliminaria bases de longo prazo de geração de DAM e riscos de radiação à biota terrestre.



## 6) DISCUSSÃO DE RESULTADOS

É de grande importância o entendimento do fluxo das águas subterrâneas na mineração. A infiltração das águas para o interior da mina pede a implementação de um sistema de controle.

Há necessidade de se drenar as águas nas áreas das minas, muitas vezes com grandes vazões para que não ocorra inundação durante a exploração do minério.

A viabilidade técnica e econômica de uma lavra está condicionada, com muita frequência, ao adequado conhecimento desse componente.

A quantidade de água encontrada em operações de lavra subterrânea varia muito, dependendo do tipo de depósito e da situação geológica. Algumas minas devem estar preparadas apenas para reuso da água introduzida, outras para surgências volumosas.

Os fatores de projeto de desaguamento são o método de lavra, a profundidade, tipo de capeamento, pressão nas fraturas e falhas. Para projetar e implantar desaguamento de mina, é necessário entendimento de hidrogeologia, técnicas de desaguamento e dos possíveis impactos ambientais.

Para inundação, Guerra (2021), chama atenção sobre o tempo necessário para água percolar dentro das rochas, que depende do formato das escavações. A velocidade de enchimento depende também de alguns outros fatores: tipo de rocha, tipo do aquífero, condutividade hidráulica e porosidade.

Em muitos casos de mineração subterrânea com processos de colapso, que provocam subsidências sobre grandes superfícies, produzem-se entradas rápidas de água em épocas de chuva, que originam picos importantes nas vazões extraídas. Nesses casos, as entradas podem corresponder não só a precipitações diretas sobre áreas de colapso, mas também sobre a bacia vertente interceptada por elas, e sobre a rede hidrográfica que escoar sobre essa superfície.

O número de casos de fechamento de minas subterrâneas no Brasil ainda é pequeno e não nos permite ter um banco de dados mais robusto para analisar e simular, por essa falta de informação, fica difícil simular custos dessa técnica.

Das soluções usuais de fechamento (enchimento, museus, estocagem entre outras), a possibilidade de deixar mina inundar é prática usual na maioria de minas fechadas em Santa Catarina (Brasil), USA, Inglaterra, Alemanha, Polônia, França e África do Sul.

A partir dos casos apresentados no item 5, estabelecemos comparação na tabela 5, acerca das principais características apresentadas pelas minas inundadas.

**TABELA 5:** Quadro das Situações de Uso da Inundação Controlada

Mina	<b>Picher Mining District</b>	<b>North-Rhine/Westphalian Coal Mines</b>	<b>Ronneburg Uranium Mine</b>	<b>Hope Salt Mine</b>	<b>Mina Verdinho</b>	<b>Minas de Urânio Elliot Lake</b>
País	USA	Alemanha	Alemanha	Alemanha	Brasil	Canadá
Tipo de minério	Chumbo e zinco	Carvão	Urânio	Sal	Carvão	Urânio
Profundidade (m)	200	800	940	521	175	I.N.D.
Volume inundado (m <sup>3</sup> )	4 x 10 <sup>7</sup>	I.N.D.	8 x 10 <sup>5</sup> (até 1997)	1.6 x 10 <sup>6</sup>	I.N.D.	I.N.D.
pH água	4-5	I.N.D.	-	5.15 – 5.25	6.46	I.N.D.
Temperatura água (°C)	14 - 16	14 – 26	11 -18	13.2 - 30.5	I.N.D.	I.N.D.
Condutividade da água (mS/cm)	700 - 3400	4000 - 16000	1800 – 8000	200 – 260	3.720	I.N.D.

Fonte: adaptado dos artigos/livros referência

LEGENDA:

(I.N.D.) INFORMAÇÃO NÃO DISPONÍVEL

## 7) CONCLUSÕES

O fechamento de minas é algo tão importante quanto complexo, que ainda precisa vencer vários desafios, tanto ambientais quanto socioeconômicos.

Comparando-se modelos de fechamento de mina subterrânea, observa-se vários fatores que requerem tempo e dinheiro com a manutenção. Como alternativa, a inundação pode ser vista como fonte de renda para região, acrescentando-se o geoturismo e a energia geotérmica, como algumas opções que podem trazer receita.

A implantação de inundação controlada como alternativa de fechamento de mina subterrânea é uma técnica viável, quando se trata de economia financeira e tempo. Estando presente em minas de diversas substâncias minerais, tanto em minas rasas quanto minas profundas.

O ambiente mais propício à formação de drenagem ácida da mina poderia inibir essa alternativa, mas aplicando tratamento adequado das águas subterrâneas e controlando os parâmetros frequentemente, formar-se-á um ambiente com baixa formação de DAM.

Os parâmetros da inundação controlada em escavações de minas subterrâneas são pH, temperatura e condutividade elétrica.

Comparando-se os estudos de caso, observa-se que são técnicas frequentemente usadas em países de primeiro mundo por requerer alta tecnologia e com isso o custo de implantação e manutenção ser elevado.

As inundações podem durar de vários meses a mais de uma década, dependendo do espaço aberto, da disponibilidade de água de infiltração e se a inundação é ou não realizada de forma controlada. A taxa de recuperação do nível de água é função da distribuição do volume de armazenamento de água disponível dentro de uma mina e da taxa de influxo de água para a mina.

Os vazios abertos não utilizados em minas subterrâneas geralmente são preenchidos após a extração do minério. No entanto, a menos que os vazios sejam preenchidos com materiais impermeáveis, a porosidade do aterro geralmente excede a porosidade dos estratos adjacentes e as conexões hidráulicas entre os vazios ainda existem. Assim, a água flui sem qualquer restrição através dos vazios abertos, das partes preenchidas e até nos espaços dos poros e fraturas nos estratos adjacentes podendo causar mais impactos a estrutura da escavação e desafios a estabilidade das minas abandonadas.

Entre os aspectos mais controversos da mineração está a alteração na qualidade da água.

Em termos mundiais, é uma tendência que as instituições reguladoras de governo imponham requisitos crescentes às empresas para iniciar um novo projeto de mineração.

O fechamento da mina encerra as atividades de desativação e reabilitação das áreas impactadas, marcando o início da fase de monitoramento e manutenção das medidas implantadas. Poucas minas foram fechadas de acordo com algum plano preconcebido. A experiência ainda é raramente compartilhada com profissionais do setor e o conhecimento adquirido, nesse domínio, ainda carece de uma abordagem sistemática.

A circulação de água subterrânea e superficial, que ocorre naturalmente ou através dos vazios da mina, é espacialmente complexa, interconectada e dinâmica.

Com um modelo apropriado pode-se avaliar a eficiência de diferentes estratégias de gerenciamento de recursos hídricos, projetar sistemas de rebaixamento, desenvolver planos de remediação, e otimizar soluções de armazenamento ou disposição de águas.

Os impactos negativos se manifestam pelo risco de inundação de aberturas, pela infiltração no maciço e pela formação de drenagem ácida.

Em numerosas minas, é extraída muito mais água que minério. O nível aceitável de água no subsolo depende de: tipos de mina, aspectos de segurança, economicidade do bombeamento, considerações ambientais.

Questões relacionadas em diferentes estágios de estudos de engenharia ou de meio ambiente incluem as condições pós-lavra (como inundação). Perante esses problemas, faz-se absolutamente necessária a implementação de atuação adequada

Existem diversas técnicas de controle, mas só algumas destas são práticas e economicamente aplicáveis para minas subterrâneas.

As barreiras físicas e injeções são frequentemente usados como um método de controle de fluxo de água em inundações de minas.

A injeção é técnica aplicada em várias fases da mina subterrânea, como para controle de água, desenvolvimento (poços e galerias), produção (frentes de lavra e desenvolvimento adicional), fechamento (selamento de poços e vias).

A inundação controlada é uma opção que após o encerramento das atividades mineiras permitiria a paralisação de aplicação de injeções e bombeamento para controlar o enchimento dos vazios com água.

Como sugestão de trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes.

- Simular a aplicação dessa técnica controlando parâmetros em modelos reais de minas no Brasil com a finalidade de desenvolver tecnologias em nosso país. Com as ferramentas atualmente disponíveis, é possível modelar

computacionalmente os fluxos de água em uma mina, suas inter-relações e como prever e minimizar seus possíveis impactos.

- Agrupar casos de uma mesma substância mineral.
- Comparar casos de fechamento de mina subterrânea com casos de fechamento de minas a céu aberto, a exemplo, o fechamento da mina de Águas Claras, Vale, Nova Lima - MG.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ, R.; ORDÓÑEZ, A.; ROCÍO, G. J. L. *An Estimation Of Water Resources In Flooded, Connected Underground Mines*. Engineering Geology, Volume 232, 8 January, P. 114-122, 2018.

ANZMEC – *Australian and New Zealand Minerals and Energy Council, Minerals Council of Australia. Strategic Framework for Mine Closure*, Australia, 2000.

CASSIE, J.; CLAYPOOL, G.; CARREAU, B.; MARKLE, M. (2007). Closure of Nanisivik Mine in the Canadian Arctic – Progress and Costs. II Seminario Internacional en Cierre de Minas. October 16-19, Chile. Disponível em: [www.mineclosure.com/presentations/Cassie\\_NanClosure\\_Oct07.pdf](http://www.mineclosure.com/presentations/Cassie_NanClosure_Oct07.pdf). Acessado em: 31 de março de 2010.

CONSTRUCCI, E.; BIGARRÉ, P.; BENNANI, I.; BAROUDI, H.; KLEIN, H. *Post-Mining Risk Management Lessons Learnt Form The Microseismic Monitoring Of Flooded Iron-Ore Mines*, 1999, Vol.30(7), P.976-977. 2019.

COPE, L. Measurement of water in underground mines. SME. 2013. Disponível em: <http://www.srk.com/sites/default/files>. Acesso em 2016.

CURI A.; SILVA J.M. *A mineração subterrânea em áreas urbanas: o problema da subsidência dos terrenos*. Revista da Pesquisa e Pós-graduação, v.1, n.2, p. 26-29. UFOP. 2001.

CURI, A. ; SILVA, J.M. *Causas e Consequências dos Fenômenos de Subsidência sobre o Meio Ambiente*. Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Ouro Preto-Núcleo MG, v.14. p. 148-149. SBG. 1997.

E-BOOK MINE CLOSURE – Revista Infomine – Manual disponível em: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/ebook%2002%20mine%20closure.pdf>> Acesso: 2021.

ENVIROMENT AGENCY 2019. What is groundwater flooding. Disponível em: <https://environmentagency.blog.gov.uk/2019/12/23/what-is-groundwater-flooding>. Acesso: 2021.

FERNANDES, F. R. C., LUZ; A. B., MATOS, G. M. M. Matos; CASTILHOS, Z. C. - *Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral* - CETEM/MCT - Rio de Janeiro/RJ: 2007 - 380 p.: il.

FERRARI, A. T. *Metodologia da Pesquisa Científica*. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo. 1982.

GHOREISHI- MADISEH, S. A. *Sustainable Heat Extraction from Abandoned Mine tunnels: A Numerical Model*. 2012.

GIL, A. C. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 6ª edição. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2008.

GUERRA, K. *Hidrogeologia na Mineração e Rebaixamento de Aquíferos*. Instituto Minere. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NyTHw-WxOsE>. Acesso: maio/2021.

GUIMARÃES, E. N. M. B.; PEREIRA, D. C.; ANDRADE, M. A. *A biodiversidade e a perda de serviços ecossistêmicos pela mineração*. In: *Mineração e sociedade: abordagens multidisciplinares sobre desafios e urgências à luz da tragédia da Bacia do Rio Doce*. Belo Horizonte: Editora PUC Minas, 2016, p.107-115.

HALL, A.; SCOTT, J. A.; SHANG, H. *Geothermal Energy Recovery from Underground Mines*. Renewable and Sustainable Energy. Ontario, p. 916-924. 2011.

HE G.; YUN Z.; YANG L.; TIE S.; *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Volume 79, P. 1163–1183. 2020.

HEIKKINEN, P.; NORAS, P.; SALMINEN, R.; MROUEH, U-M.; VAHANNE, P.; WAHLSTRÖM, M.; KAARTINEN, T.; JUVANKOSKI, M.; VESTOLA, E.; MÄKELÄ, E.; LEINO, T.; KOSONEN, M.; HATAKKA, T.; JARVA, J.; KAUPPILA, T.; LEVEINEN, J.; LINTINEN, P.; SUOMELA, P.; HÖYRY, H.; TOLLA, P. *Mine Closure Handbook: Environmental Techniques for the Extractive Industry*. Geological Survey of Finland. (2008).

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Guia para Planejamento de Fechamento de Mina* — setembro, 2013.

MCKNIGHT, E.T; FISHER, R.P. *Oklahoma Geological Survey Circular, Geology And Ore Deposits Of The Picher Fild, Oklahoma and Kansas*; US. Geological Survey Professional paper 588, p. 88, 114. 1970.

MINDERHOUD, P. S. J.; ERKENS, G.; PHAM, V. H.; BUI, V. T.; ERBAN, L.; KOOL, H.; STOUTHAMER, E. *Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam*. Utrecht University, Department of Physical Geography Environmental Research Letters, Vol.12(6). 2017.

MIRANDA, J. F. *Uso Sustentável da Área Minerada da Mina da Passagem*. Universidade Federal de Ouro Preto. Lisboa, p. 29. 2010.

MORAES, N. C. *Abatimento de drenagem ácida de mina com cobertura de entulho de construção civil*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 206p, Ouro Preto – MG. 2010

MULIYUNDA, M.I. *Determination\_Air\_Pressure*, 2018.The University of Zambia.

MURTA, F. C. *Ensaio de Coluna para a Avaliação Passiva de Drenagem Ácida na Mina de Osamu Utsumi (INB)*. Poços de Caldas/MG. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 127p, Ouro Preto - MG. 2006.

NAIRN, R.W.; GRIFFIN, B.C.; STRONG, J.D.; HATLEY, E.L. *The Tar Creek Superfund Site Is a Portion of an Abandoned Lead and Zinc Mining Area Known As challenging HAMR (Hardrock abandoned mine reclamation) sites is found in northeastern Oklahoma*. 2001.

NÓBREGA, F. A.; LIMA, H. M.; LEITE, A.L. (2008). *Análise de Múltiplas Variáveis no Fechamento de Mina: Estudo de Caso da Pilha de Estéril BF-4, Mina Osamu Utsumi*. 2008.

OLIVEIRA JUNIOR, J. B. *Desativação De Mina - Conceitos, Planejamentos e Custos*. Salvador. 2006.

PELIZZA, S; PEILA, D. *Civil Reuses of Underground Mine Openings: A Summary of International Experience. Tunnelling And Underground Space Technology*. Vol.10, n.2, p. 179 – 191. 1995.

PETRITZ, K.; GAMMONS, C.; NORDWICK, S. *Mine Water and the Environment*, Vol. 28 (4), P. 264-273. 2009,

RIBEIRO, J. C. J.; MENDES, S. F. *A Participação no Fechamento de Mina no Direito Comparado*. Belo Horizonte, p. 23-54. 2013.

RIO TINTO. *Encerramento da Mina Cabaçal Mineração Manati*. Mato Grosso, p. 17. 2008.

SÁNCHEZ, L. H. *Planejamento Para O Fechamento Prematuro De Minas*. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 64(1), 117-124, jan. mar. 2011

SMITH, B. *Mining for Closure: Sustainable Mine Practices, Rehabilitation and Integrated Mine Closure Planning*. University of New South Wales, Sidney, Australia. 2007

SILVA FILHO, A.B.; SILVA, J.M. *Custo de Fechamento de Minas Subterrâneas*. Jornada da Rede Medio Ambiente y Sostenibilidad, Cordoba, 2012.

SILVA, J.M. *Aspectos Ambientais e Fechamento de Minas Subterrâneas*. Notas de aula. MIN114- Lavra Subterrânea. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p.12. 2016.

SILVA, J.M. *Drenagem*. Notas de aula. MIN212-Projeto de Lavra Subterrânea. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2019.



SILVA, J.M. *Impactos Ambientais- Subsidência*. Notas de aula. MIN225- Estabilidade de Escavações Subterrâneas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. (2019)

SOARES, E.J.; MENDES, P.R.; *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol.30(2), P.160-165. 2008

TRINDADE, R.B.E. & SOARES, P.S.M. *Tecnologia de Sistemas Passivos para o Tratamento de Drenagem Ácida de Minas*. CETEM/MCT, Série Tecnologia Mineral, n. 30. 52p, Rio de Janeiro – RJ. 2004.

TORAN & BRADBURY. *Groundwater Flow Model of Drawdown and Recovery near an Underground Mine*. NGWA Journal, v.26, n.6, p. 724-733. 1988.

WOLKERSDORFER, C. *Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines*. P.465. 2005.

WOLKERSDORFER, C. *Mine Water and the Environment*, Vol.27(2), P.128. 2008.

YAGER, R. M.; MILLER, T. S.; KAPPEL, W.M., *Simulated effects of 1994 salt-mine collapse on ground-water flow and land subsidence in a glacial aquifer system, Livingston County, New York*. 2001.

ZINGANO, A.C; KOPPE, J.C; GRAVONSKI, J.; CABRAL, R.R. *Fechamento de Mina - Caso Mina Verdinho*. Congresso Brasileiro de Mineração. CBMINA. 2021.