

## REDE DE DRENAGEM EM PILHAS DE LIXIVIAÇÃO EM TERMOS DE MELHOR SERVIÇO E REDUÇÃO DE CUSTOS

por Mark E. Smith<sup>1</sup>, PE, GE

e  
Aigen Zhao<sup>2</sup>, PhD, PE

Lixiviação em pilhas é uma tecnologia de processamento de minerais usada nas pilhas de minério britado ou de ROM - minério de mina (ou talvez rejeitos de moinho) quando os minérios são lixiviados com várias soluções químicas que extraem minerais valiosos. As maiores instalações em termos da área da pilha e tonelagem anual são associadas com as minas de cobre onde o minério de cobre é irrigado com uma solução fraca de ácido sulfúrico. Esta solução dissolve o cobre do minério e a Solução de Lixiviação Rica (PLS) resultante filtra pela pilha de minério e recupera-se no fundo do pad de lixiviação, que normalmente consiste em um revestimento de geomembrana, ou às vezes de argila (para criar um verdadeiro revestimento composto ou simplesmente instalado como uma camada de base de boa qualidade para a geomembrana), e uma camada de proteção de rocha britada permeável (overliner) com rede de tubulação de drenagem. Em algumas aplicações (principalmente nos casos de minérios de óxido de cobre) os revestimentos magros instalam-se entre camadas de minério para interceptar a PLS mais rápido. A extração de cobre é levada a cabo por meio de processo de electrowinning seguido por reciclagem da solução ácida à pilha de lixiviação. A operação das pilhas de ouro é semelhante, só que o solvente é uma solução de cianeto alcalina.<sup>3</sup>

Os pads de lixiviação podem ser divididos em quatro categorias: convencionais ou planos, lixiviação em bota-foras, aterros de vale e pilhas dinâmicas. Os pads de lixiviação convencionais são relativamente planos, ou nivelados de acordo com contornos do terreno em sedimentos aluviais suaves e normalmente o minério é britado e empilhado nas camadas relativamente magras (tipicamente de 5 a 15 m). Os sistemas de lixiviação em bota-fora são semelhantes ou podem incluir terreno rolante; o termo “ bota-fora” normalmente significa que as camadas são muito mais grossas (at é 50 m) e frequentemente o minério não é britado (ROM). Sistemas de aterro de vale são os pads de lixiviação projetados em vales naturais suportados por uma barragem no fundo do vale,

---

<sup>1</sup> Mark Smith é vice presidente de operações de Vector Engineering, Inc. na América do Sul. [smith@vectoreng.com](mailto:smith@vectoreng.com)

<sup>2</sup> Aigen Zhao é vice presidente de engenharia para Tenax Corporation. [AZhao@tenax.com](mailto:AZhao@tenax.com)

<sup>3</sup> Thiel, R. e M. E. Smith, “State of the Practice Review: Heap Leach Pad Design Issues,” apresentado na reunião anual de Instituto de Investigações de Geosintéticos, em Las Vegas, Nevada, E.U.A, Dezembro, 2003 e publicado nos procedimentos de conferência.

ou aterro nivelador dentro do mesmo. O processo é semelhante para estes três tipos de pads de lixiviação: uma camada nova de minério é colocada sobre o minério empilhado e lixiviado (ripios) repetindo-se o processo. As alturas finais de pilhas de lixiviação variam entre 50 a 135 m ( $\gamma_{\text{seco}} \approx 1,450$  a  $1,750 \text{ kg/m}^3$ ).

As pilhas dinâmicas, ou pads on-off, recebem uma única camada de minério tipicamente de 4 a 8 m de espessura. Esta camada é lixiviada durante um período prescrito, seguido por uma irrigação, e então os rípios são descarregados para disposição. Logo, a pilha de lixiviação é recarregada com uma nova carga de minério e o ciclo repete-se. Ciclos de lixiviação variam de 2 a 12 meses e funcionamento de instalações pode exceder 20 anos.

### **Sistemas de Revestimento Típico de Pads de Lixiviação**

O sistema de revestimento mais comum é uma geomembrana colocada no subleito preparado ou em uma seção magra composta de argila (tipicamente de 200 a 300 mm de espessura). Na maioria dos pads de lixiviação HDPE ou LLDPE de 1.5 mm e/sao instalados, mas nos casos de aterros de vale fundos uma alternativa comum é HDPE ou LLDPE de até 2.5 mm e PVC de 1.0 mm.

Considerando que instalações de pilhas de lixiviação aplicam um sistema de lixiviação ativo, irrigando o minério para recuperar os metais, o assunto de drenagem de pilhas é crítico para a estabilidade, controle de filtrações e recuperação de metal. Adicionalmente, o sistema de drenagem serve como a camada protetora de revestimento, e este sistema combinado (freqüentemente chamado “overliner”) normalmente consiste em uma camada de rocha britada de 300 a 1,500 mm (o tamanho máximo de partículas comum é de 25 a 40 mm) com tubos de drenagem perfurados instalados a curta distância (de 2 a 10 m). As camadas de drenagem geosintéticas são ocasionalmente usadas, principalmente para aplicações de aterros nos taludes de vale íngremes onde a colocação de pedregulho é difícil e arriscada.

Nas pilhas dinâmicas tende-se a usar sistemas de revestimento mais robustos e overliners mais grossos, às vezes também compostos de duas camadas para criar um overliner relativamente grosso. Este overliner tem uma função adicional de proteger o revestimento e sistema de drenagem durante às operações repetidas do equipamento de carregamento/empilhamento e descarregamento. Uma aplicação comum incluiria um overliner de 1,000 a 1,500 mm e também uma camada de drenagem nivelada aberta de -25 a -40 mm colocada diretamente na geomembrana, e coberta com uma camada protetora de estéril ou minério britado, com o tamanho máximo das partículas entre 100 a 200 mm. Os tubos de drenagem estariam diretamente na camada mais funda da geomembrana.

### **Resumo de Tecnologia de Drenagem Sintético**

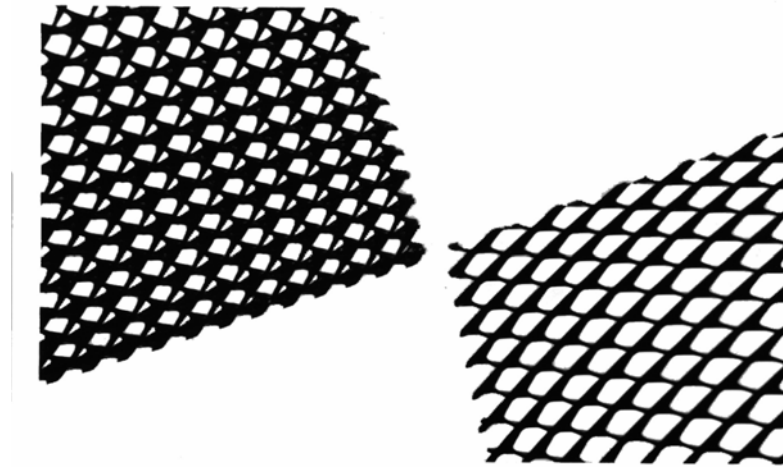
A camada de drenagem líquida à base de pads de lixiviação precisa cumprir as exigências seguintes:

- ter permeabilidade de fluxo suficientemente alta para permitir a filtração do material de aterro adjacente;
- manter capacidade de fluxo em-plano suficientemente alta para limitar a carga hidráulica acima do revestimento;
- resistir cargas compressivas de curto e longo prazo; e
- prover estabilidade adequada.

Durante o processo de avaliação e seleção de camadas de drenagem potenciais, um engenheiro projetista tipicamente pode considerar duas opções: materiais naturais ou produtos de drenagem geosintéticos. As vantagens dos materiais naturais é a familiaridade dos engenheiros geotécnicos e mais conhecimento de espessura de seções transversais. Porém, o uso de materiais naturais causa problemas de viabilidade de construção e garantia de qualidade, incluindo: estabilidade de taludes laterais; danos à geomembrana; cronograma e sucessão de instalação; consistência e qualidade do tipo de aterro e sua profundidade. Por outro lado, a drenagem do geocomposto tem muitas vantagens. Por exemplo, a facilidade de instalação em taludes, consistência das propriedades de materiais inerentes com materiais industriais, e, em muitos casos, isto significa uma diminuição de custos.

Baseada nas estruturas de geonets de drenagem diferenciam-se dois tipos comuns: Bi-planar e Tri-planar. Geonets Bi-planares, como insinua o seu nome, consistem de duas camadas de cordas sobrepostas, uma em cima da outra; e os geonets Tri-planares consistem em duas camadas de cordas separadas por costelas verticais grossas, criando um canal de fluxo extenso. Fotografia 1 mostra estes dois tipos de geonets.

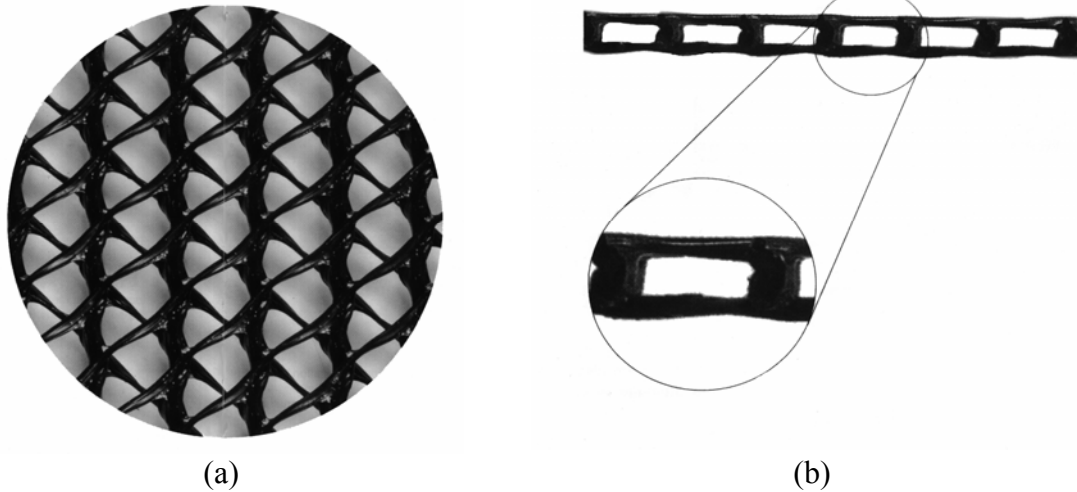
O desenvolvimento de geonets de drenagem pode alcançar capacidade de fluxo em-plano mais alta (transmissividade) e reduzir a compressibilidade a longo prazo da estrutura de geonet. Geonets Bi-planares têm certas limitações devido às suas estruturas. Por exemplo, o aumento da espessura das costelas pode resultar em uma estrutura instável com baixa resistência a deslocamento por compressão; e o aumento da porosidade em-plano por meio de aumento do espaçamento entre costelas origina uma maior intrusão de geotextil no núcleo da geonet. Porém, o geonet Tri-planar elimina as limitações do geonet Bi-planar. O plano de fluxo primário do geonet fica entre o plano superior e inferior de fluxo secundário. Os planos superiores e inferiores de fluxo auxiliares acomodam a intrusão de geotextil instalado com o geonet para funções de filtração ou proteção. Fotografia 2 provê uma vista detalhada da estrutura Tri-planar.



**Fotografia 1. Fotografias de tipos diferentes de produtos de drenagem geonet (esquerda: Tri-planar, direita: Bi-planar).**

O geonet Tri-planar incorpora costelas medianas verticais construídas que são mais fortes que as costelas inclinadas dos geonets Bi-planares. A comparação da resistência compressiva entre o geonet Tri-planar e geonet Bi-planar é feita na Figura 1. A estrutura do geonet Tri-planar permanece estável inclusive nas condições de pressão normal muito alta sem ponto de inflexão, enquanto a maioria dos geonets Bi-planares podem desmoronar ou virar de cabeça para baixo sob pressão entre 600 e 800 kPa. Para enfrentar os problemas de estabilidade estrutural de um produto de geonet debaixo de carga normal grande contínua, Holtz, Christopher e Berg (1997)<sup>4</sup>) recomendam limitar a carga em cima de um geonet por meio de qualquer dos seguintes meios: (a) a pressão máxima sustentada no núcleo por meio de um teste de duração mínima de 10,000 horas; ou (b) a pressão limite de colapso de um núcleo definida por meio de um teste de carga rápida, dividida por um fator de segurança de 5. A resistência compressiva de 800 kPa mostrada em Figura 1 seria equivalente a somente 9 m de profundidade da pilha (sem consideração do peso do equipamento de empilhamento e outros) assumindo uma densidade média de 1,700 kg/ m<sup>3</sup> e um fator de segurança de 5 por carga. Tecnicamente, um geonet Bi-planar com resistência compressiva tão baixa não é conveniente como um meio de drenagem para a maioria dos pads de lixiviação.

<sup>4</sup> Holtz, R., Christopher, B. y Berg, R. (1997), Geosynthetic Engineering, BiTech Publisher, Canadá



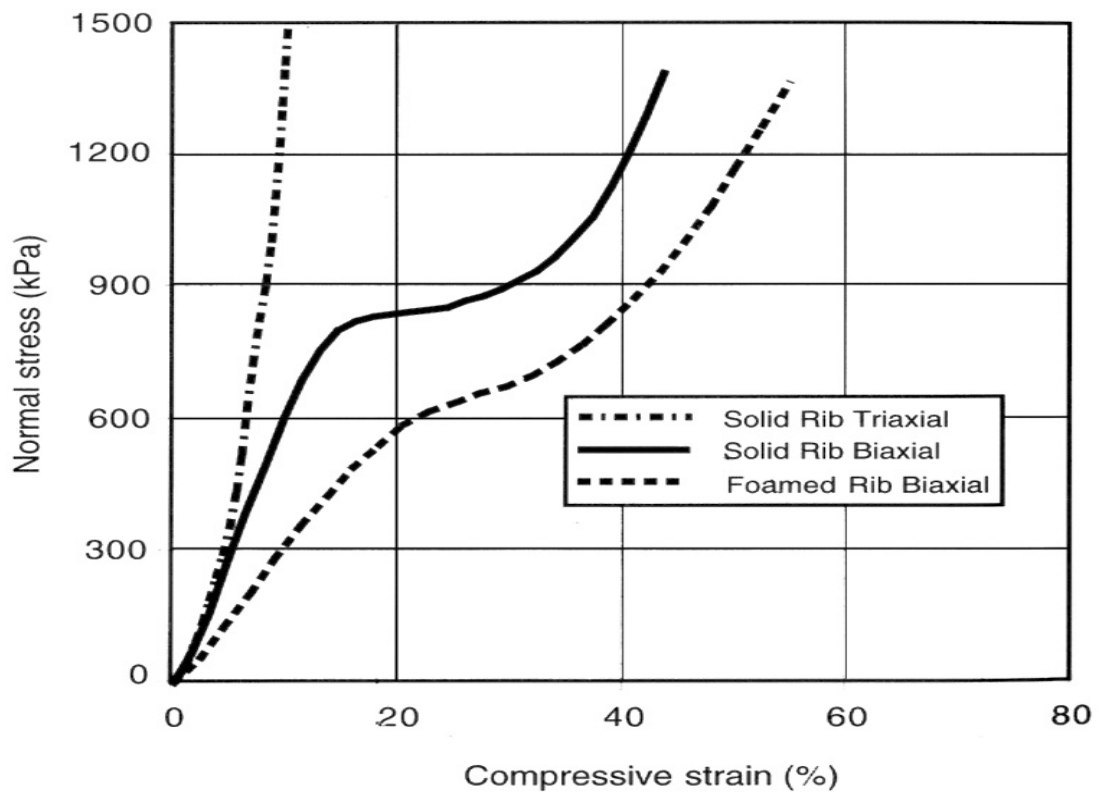
**Fotografia 2 Estrutura de geonet Tri-planar, (a) vista em planta, (b) seção transversal.**

A Figura 2 apresenta a transmissividade em-solo de um geocomposto Tri-planar medido nas condições de cargas normais e gradientes hidráulicos diferentes. A transmissividade diminui com cargas normais crescentes e aumenta com gradientes de fluxo decrescentes. A capacidade de fluxo em-solo do geocomposto Tri-planar excede o de outros geocompostos, especialmente para cargas normais pesadas. Nas condições de lixiviação, o pad com maior capacidade de fluxo em-plano resulta em menor quantidade de tubos de drenagem e um overliner mais magro, como também em uma carga hidráulica menor em cima do revestimento. Devido ao tamanho típico dos pads de lixiviação, pode-se resultar em significantes reduções da quantidade de tubulação e pedregulho.

Para o funcionamento efetivo da geonet como uma camada de drenagem lateral, o componente de filtro geotextil do geocomposto deveria ser projetado para prevenir a obstrução ou perda excessiva de minério lixiviado fino, mais as equações empíricas são disponíveis para avaliar o potencial de obstrução. Além disso, pode-se aplicar o ensaio da razão do gradiente para avaliar o potencial de obstrução do geotextil com respeito a um material de aterro específico<sup>5</sup>.

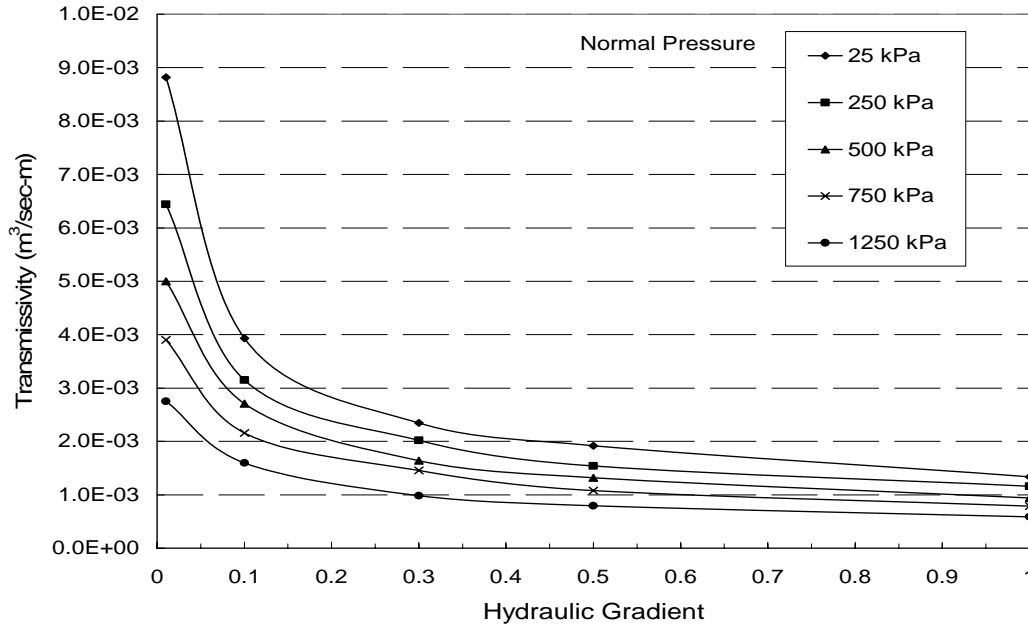
---

<sup>5</sup> ASTM D5101, Método de ensaio padrão para medir o potencial de obstrução de sistema solo-geotextil de acordo com razão do gradiente.



**Figura 1. Dados de Ensaio Compressivo de Diferentes Geonets (de acordo com Koerner, 1998)<sup>6</sup>**

<sup>6</sup> Koerner, R.M. 1998, *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall, New Jersey.



**Figura 2. Resultados de Ensaio de Transmissividade Em-Solo – Geocomposto Tri-planar**

### Descrição de Projeto

As instalações de um pad de lixiviação de cobre de tamanho médio é planejado para um local na bacia Amazônica. Uma pilha dinâmica foi considerada devido a ao clima (para minimizar a área de coleção de chuva) e fatores metalúrgicos. O projeto de base considerou um revestimento LLDPE de 2.0 mm com um sistema de duas camadas de proteção (drenagem mais operações), a primeira consistindo de 500 mm de rocha britada com tamanho inferior a 40 mm e a segunda em 1,000 mm de rocha britada com tamanho inferior a 100 mm. O pad de lixiviação é de aproximadamente 540 m por 1,200 m, com um total de 650,000 metros quadrados. O minério seria transportado para um lado do pad de lixiviação por um conveyor (a correia transportadora) por terra alimentando um tripper (transportadora direccional) e bridge conveyor (transportadora de ponte) e uma séries de grass hoppers através da pilha. Um stacker (empilhador) radial instalado acima do overliner realizará o empilhamento de minério. Para as operações de descarga os carregadores dianteiros seriam usados (classe GATO 988 ou 992) e caminhões para puxar (de uma capacidade de 180 toneladas). As cargas de rodas dos caminhões e carregadores, enquanto em movimento ou freando, originam a carga de projeto estrutural para a geomembrana e tubulação, como opostos ao peso estático da pilha, a qual é a carga de projeto típica para uma pad convencional.



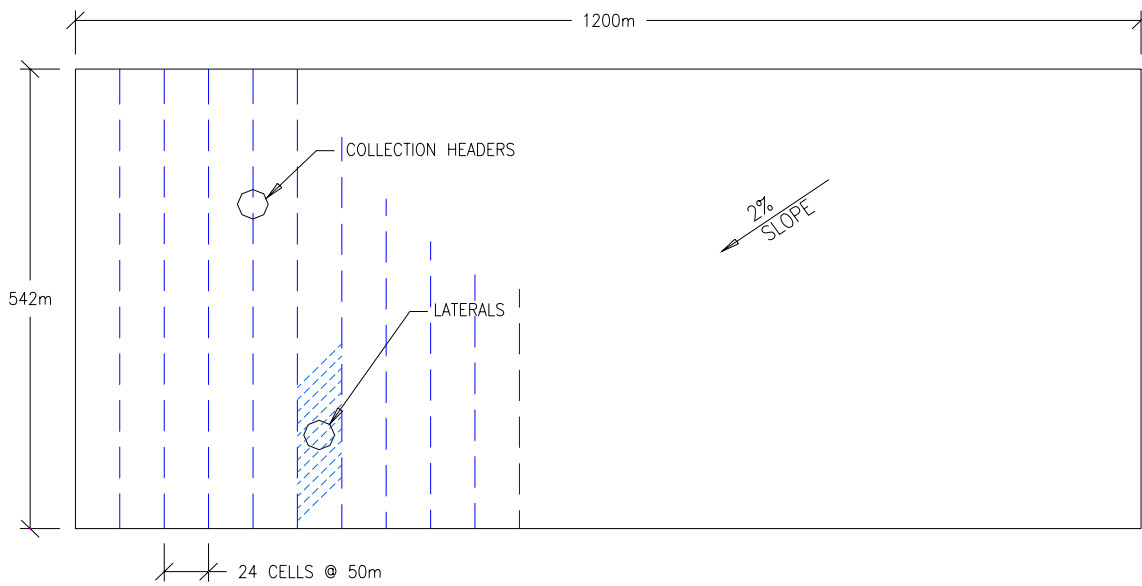
**Fotografia 3: Acesso ao local mostrando os solos saprolíticos e vegetação densa comum na área da Amazônia.**

### **Uma Aproximação Alternativa**

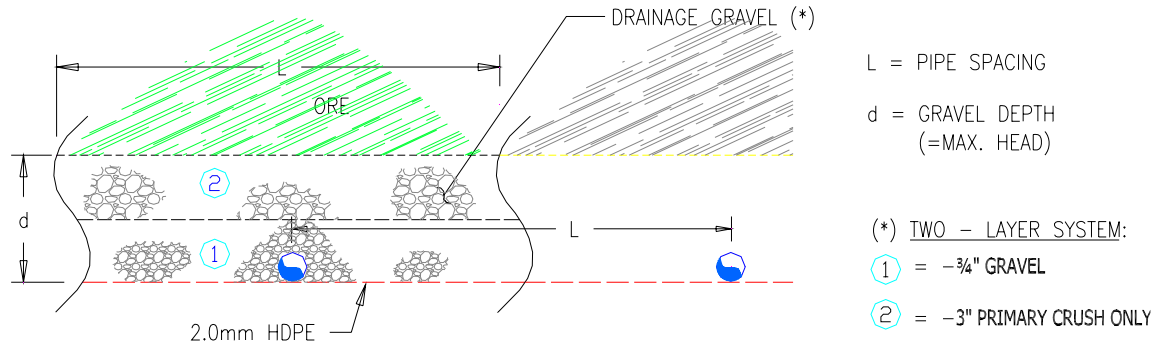
Fontes locais de rocha estavam disponíveis, principalmente resultantes da geração de estéril desta mina, e o volume necessário era bastante grande para gerar uma boa economia. Porém, um fator crítico em locais de precipitação alta é a curta duração da estação seca, durante a qual a maioria da construção deve ser completada. Na área da bacia pode-se chover quase diariamente todo o ano, e a produção do volume de rocha britada necessária exigiria um tempo aproximado de 3 meses, praticamente consumindo a estação seca, permitindo uma margem pequena para qualquer erro no cronograma. Adicionalmente, seria necessário produzir certa quantidade de pedregulho durante a estação de chuvosa, elevando os custos e adicionando problemas operacionais por condições de acessos, erosão e controle de sedimentos. Devido a estas limitações foram considerados modos alternativos de construção de overliner e também a combinação de uma seção de pedregulho reduzida e uma rede de drenagem geocomposto. Quadro 1 resume os cálculos comparativos para este estudo técnico e as vantagens de custos.



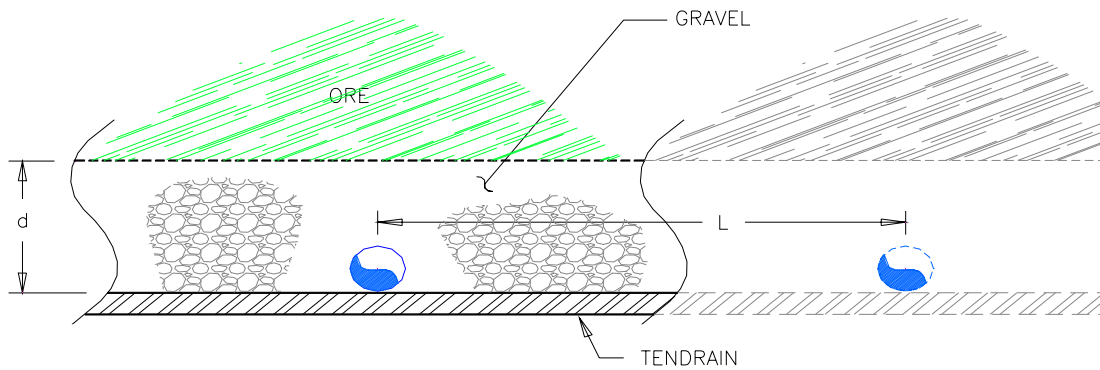
**Fotografia 4: Vista aérea do local e a bacia Amazônica.**



**Figura 3: Vista em Planta do Pad de Lixiviação**



**Figura 4: Sistema de Drenagem Convencional Mostrando o Overliner**



**Figura 5: Camada de Drenagem com Geonet Tri-planar e Camada Overliner Reduzida**

**Quadro 1: Resumo de Análises de Opção Convencional e de Geonet**

<b>Sistema Convencional de Pedregulho e Tubulação</b>	<b>Sistema Geocomposto e de Tubulação</b>
<u>Critério de Projeto:</u>	
(a) Taxa de Irrigação: taxa média de processamento de 9l/hor/m <sup>3</sup> , valor máximo de 15 l/hr/m <sup>2</sup> com a concessão para chuva	
(b) Permeabilidade de Pedregulho, $k = 5 \times 10^{-3}$ cm/seg	
(c) Trasmisvidade de Geocomposto, $T = 3.85 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /seg	
(d) Profundidade máxima de pilha, $h = 10$ metros	
<u>Achar:</u>	
(a) espaço entre tubos para a carga hidráulica máxima de 1.0 metro sobre o revestimento;	
(b) Diâmetro de tubos (para a tubulação corrugada de pared dual/de pared interior lisa (PE)); e,	
(c) Profundidade de pedregulho (semelhante à carga máxima hidráulica, 1.0 m ou menos, de acordo com controle ambiental e convenção da industria).	
<u>Solução:</u>	<u>Solução:</u>
Ver Figuras 3 e 4 para a vista em planta e seção transversal de pad de lixiviação.	Ver Figuras 3 e 5 para a vista em planta e seção transversal de pad de lixiviação.
Espaço entre tubos, $L = 7$ metros ; calculado por meio da equação elíptica de drenagem: $h_{max} = (L^2 \times r / 4K)^{0.5}$	Capacidade de geonet para transmitir o fluxo a tubos laterais (usar Tendrain 5100-2 por Tenax) $Q_{tendrain}/\text{largura da unidade} = (i) \times (T) = (.02) \times 3.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Diâmetro do tubo = nominal 3 polegadas (para 50% de fluxo)	$Q_{tendrain}/\text{largura da unidade} = 0.28 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m-largura}$
Carga máxima = 1.0 metro	$Q_{actual} = 0.075 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m-largura}$
Profundidade de pedregulho requerida = 1.0 metro como segue: 500 mm de estéril britado e peneirado de - 3/4 de polegada, sem partículas pequenas 500 mm de estéril de britadora primária	FOS para o fluxo lateral = $0.28 / 0.075 = 3.7$ Então, pedregulho não é necessitado para o controle da carga hidráulica, mas só para proteção das perfurações.  Carga máxima = espessura da geonet $\ll 1.0$ m
	Verificar o diâmetro do tubo: $Q_{tubo} = (15/1,000) \times 71 \text{ m} \times 10 \text{ m} = 10.65 \text{ m}^3/\text{hr}$ Tamanho do tubo requerido = 4 polegadas nominal (50% full) Profundidade do pedregulho requerida – controlada só para a proteção da geomembrana: Espessura mínima para construir em cima da geonet = 300 mm
<b>\$5,586,000 ou \$8.60/m<sup>2</sup></b>	<b>\$5,372,000 ou \$8.30/m<sup>2</sup></b>

**Aplicações para outras operações de Pad de Lixiviação**

Os custos usados neste exemplo são típicos para muitos projetos na América do Sul. Disponibilidade local de rocha durável e quimicamente resistente varia de local a local; e, em alguns casos tal material simplesmente não está disponível. Adicionalmente, o projeto considerado por este estudo fica situado em um país com taxas de importação

consideradas altas na América do Sul. Com todos outros fatores iguais, a opção de usar geonet para um local no Chile (por exemplo) resultará em uma economia mais favorável.

Quadro 2 resume alguns projetos de pads de lixiviação recentes na América Latina, mostrando a magnitude dos projetos em consideração. Devido a constrangimentos logísticos locais como; movimento de pessoal e materiais; acesso ao local; capacidade de produção da planta e disponibilidade do equipamento de instalação; o avanço de instalação máximo em qualquer local varia de 0.5 a 1.0 ha/día. Assim, os períodos de construção/instalação de geomembrana, antes de considerar as obras de movimento de terras, colocação do overliner, e outros componentes de construção, requerem um período de tempo de até um ano, com uma média de 4 a 6 meses. A profundidade típica da camada de drenagem e das operações dos pads de lixiviação aplicando um projeto agregado convencional é de aproximadamente entre 300 a 500 mm para pads convencionais e entre 1,000 mm para pads on/off. Assim, um pad de lixiviação típico requer 500,000 metros cúbicos de pedregulho britado e peneirado, ou aproximadamente de 100 a 200 dias de produção, transporte e colocação. Estas atividades interferem com a instalação da geomembrana, e freqüentemente são iniciadas antes da instalação de revestimento e continuadas depois de sua colocação. Assim, as atividades de instalação de revestimento e construção do overliner podem durar a maior parte do ano em um projeto grande, e aproximadamente 6 meses no caso de um pad de tamanho médio. Para os locais com obras de movimento de terras complexos, como projetos de aterro de vale, podem-se requerir vários meses de preparação antes do início da instalação do revestimento.

A maioria de projetos apresentados são nos Andes (em grande altitude) ou nos trópicos onde o tempo de construção é limitado à estação seca que dura entre 3 a 5 meses. Então, os projetos que reduzem o tempo de construção têm a vantagem adicional de reduzir o risco de atrasos e custos na construção de componentes, que no caso contrário requereriam a instalação durante a estação difícil.

É importante admitir que o emprego de uma camada de drenagem geocomposta provavelmente requereria o uso de geomembrana de polietileno texturado ao redor do perímetro na zona de estabilidade para manter a resistência a cisalhamento de interface de geocomposto/geomembrana. Esta interface mais a interior de geotextil-geonet no próprio geocomposto, necessitaria de uma avaliação no contexto de exigências de estabilidade estática e dinâmica de talude de acordo com as especificações.

A camada de pedregulho e colocada diretamente em cima do geocomposto de drenagem para a proteção da geomembrana inferior. Um pad de ensaios de campo pode ser necessário para assegurar que a camada de pedregulho não causará dano ao filtro do geotextil.

### Quadro 2: Pads de Lixiviação Planejados e Recentemente Construídos na América Latina<sup>7</sup>

Local	Tipo	Area do Pad ha	Revestimento de Base	Profundidade de Minério M
Argentina	Aterro de Vale	150	100 e 80 mil HDPE	130
Brasil	Convencional	119	80 mil HD or LLDPE	75
Chile	On/off	152	80 mil HDPE	10
	On/off	135	80 mil HDPE	10
	On/off	100	80 mil HDPE	10
	Bota-for a	95	60 mil HDPE	110
	Bota-for a	125	60 mil HDPE	125
	Convencional	200	80 mil LLDPE	145
	Convencional	130	30 & 40 mil PVC	75
Costa Rica	Convencional	15	60 mil HDPE	50
Perú	On/off	15	80 mil HDPE	10
	Vale	55	60 mil HDPE	85
	Vale	125	100 e 80 mil HDPE	135
	Vale	75	80 e 100 mil LLDPE	230*

(\*) Sistema novo de base de revestimento e drenagem a ser construído em meia pilha.

#### Observações finais

Tecnicamente, o geocomposto de geonet Tri-planar é conveniente para substituir uma parte do pedregulho de drenagem. A alternativa de drenagem da geonet tem a vantagem de reduzir dramaticamente a carga em cima de geomembrana. Os drenos do pedregulho convencional originam uma carga de 1 m comparada à de 7 mm que correspondem ao projeto da geonet. Assumindo que o tamanho e frequência de defeitos são iguais, o emprego da geonet no sistema de drenagem reduzirá a taxa de filtração potencial por um fator de  $(1.0/0.007)^{0.9} = 87$ . Além disso, a geonet provê uma melhor proteção de perfurações causadas por danos de rotina, e reduz risco de danos relacionados a construção (cortes de plástico por tratores) desde que só uma camada e colocada em cima

<sup>7</sup> Thiel, R. and M.E. Smith, State of the Practice Review of Heap Leach Pad Design Issues, procedimentos de reunião bi-anual de Instituto de Investigações de Geosintéticos, Las Vegas, Nevada, USA, Dezembro 2003.

do revestimento, a qual está separada pelo geocomposto (um núcleo de geonet laminado com dois geotextils não tecidos de 250 g/m<sup>2</sup> neste caso). Como este tipo de danos produz um maior potencial de infiltrações e danos sérios ao ambiente, sem dúvida a vantagem da substituição é enorme. Além disso, o espaço máximo permissível entre tubos é de 10 m de acordo com a prática de HL (pad de lixiviação) convencional baseado em fatores metalúrgicos, o qual produz um fator de segurança “ invisível” provendo mais tubulação necessária no caso contrário.

Também, o projeto alternativo de geocomposto resultou em aproximadamente \$200,000 economizados para um pad de 65 hectares de acordo com estimativas de custos para a camada de drenagem/overliner.

NOTA A EDITOR: FIGURAS 4 E 5 SÃO OPCIONAIS: USAR A FIGURA MAIS ADEQUADA PARA IMPRESSORA.

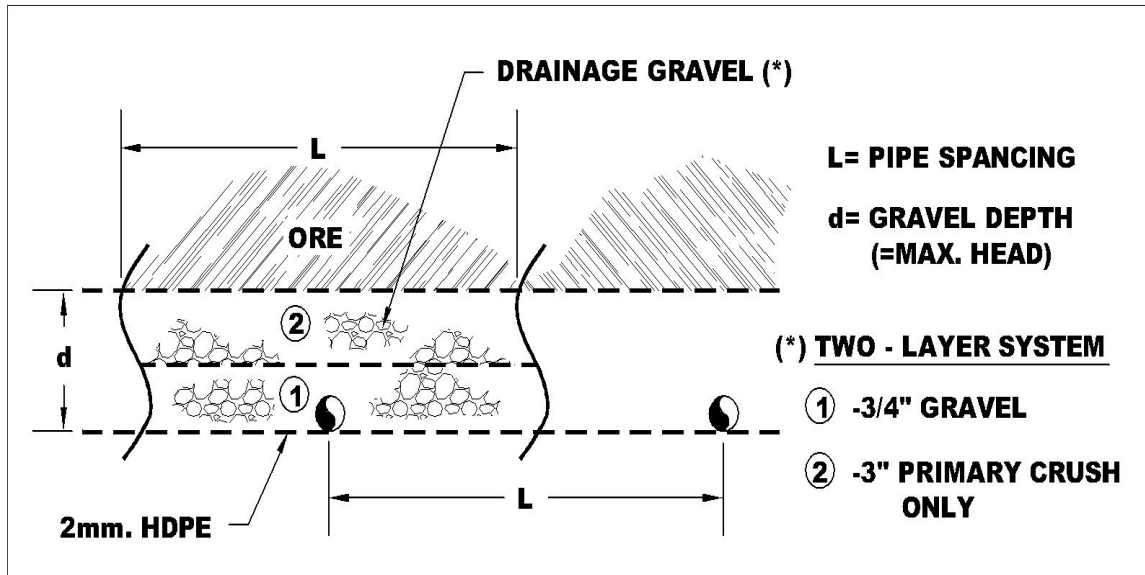


Figura 4: Sistema de Drenagem Convencional Mostrando o Overliner (d=1,000 mm, L=7 m)

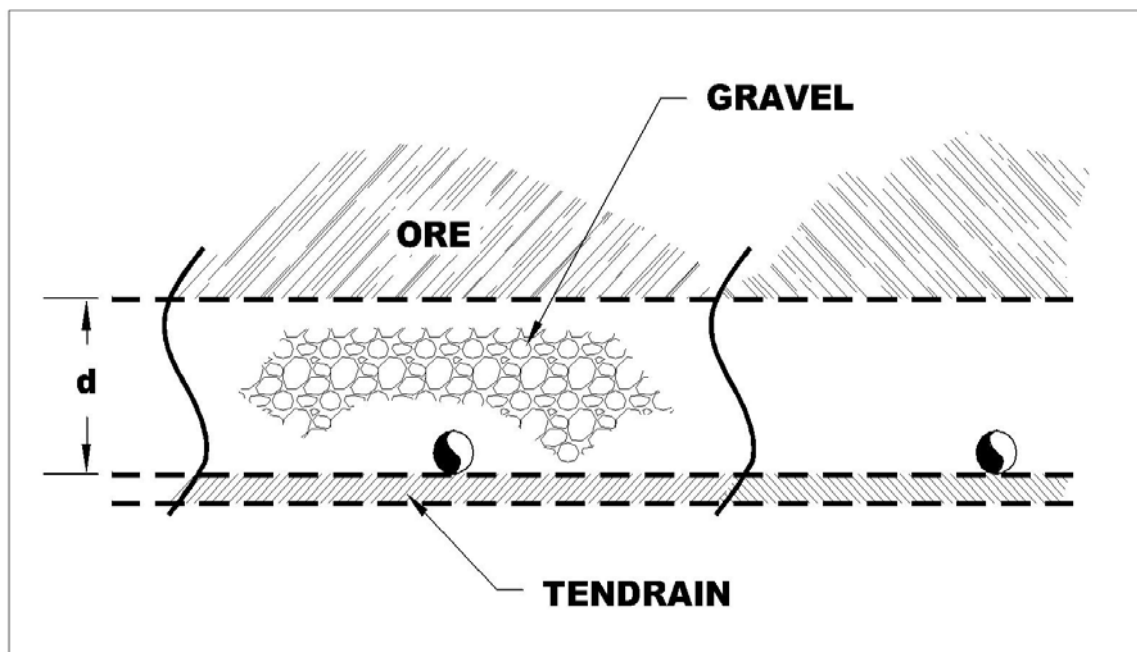


Figura 5: Camada de Drenagem da Geonet com Camada Overliner Reduzida (d=300 mm, L=10 m)