

I Simpósio Nacional de Gerenciamento Ambiental na Indústria

1990

ANAIS

Promoção:

**saneamento
ambiental** 



Patrocínio:



Kälte-Tec
Sistemas Antipoluentes

BRASIL  **mineral**

DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E SUAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS

Luiz Guilherme F. S. de Mello

- Prof. Assist. Escola Politécnica USP

- Vector Projetos Integrados

A) INTRODUÇÃO

A conceituação do que vem a ser um **rejeito/resíduo**, tanto como material quanto como fonte de problema potencial, é consideravelmente diferente de pessoa a pessoa, de situação a situação.

Os profissionais que trabalham em contato direto com o rejeito/resíduo (engenheiros, sanitaristas, advogados, políticos, etc.) tem, em geral, visões específicas e isoladas. A população, sem contato íntimo com o assunto e com o material, também tem opinião diferente em cada indivíduo.

A verdade que permanece é a consciência que devemos ter é que o problema do Gerenciamento de Rejeitos/Resíduos - de sua geração à disposição final - não está tendo solução adequada em inúmeras situações.

No enfoque da Engenharia Geotécnica de Meio Ambiente, o problema do gerenciamento dos rejeitos/resíduos é aquele da contenção adequada daqueles materiais que são liberados ao final do beneficiamento/tratamento de um minério para sua disposição no terreno, impedindo a contaminação de aquíferos e mananciais, e facilitando a recuperação ambiental futura da área.

Entretanto, é importante colocar que a escolha das soluções junto com a ênfase, o detalhamento e o enfoque colocado nas várias partes que constituem o problema variará, e poderá até resultar no abandono ou esquecimento de tópicos relevantes.

O fato que é particularmente evidente é aquele que coloca que a concepção do que é REJEITO/RESÍDUO não é obrigatoriamente similar para todos indivíduos.

As diferenças de enfoque podem incluir:

- * se consideramos o assunto um problema,
- * se chegamos a entender, em toda sua magnitude, os tópicos e preocupações que aparecem quando começamos a manipular o resíduo,
- * se conseguimos prever o que acontecerá quando iniciamos e/ou concluimos a sua disposição final.

A periculosidade de um resíduo é usualmente avaliada a partir do conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e, em alguns casos, infecto-contagiosas.

Estas propriedades de um resíduo podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou acentuando a mortalidade ou a incidência de doenças, e/ou risco ao meio ambiente e à população, até com a degeneração de espécies, quando o resíduo é manuseado ou destinado de forma inadequada.

Os resíduos podem ser agrupados em dois grupos principais:

a- resíduos ativos ou perigosos, a partir de uma das características principais: toxicidade, reatividade, corrosividade, inflamabilidade e/ou patogenicidade;

b- resíduos inertes;

A indústria da mineração, em específico, anualmente produz um volume considerável de resíduos que precisam ser estocados de maneira equilibrada com o meio ambiente e dentro de uma relação de custo-benefício compatível com o empreendimento.

Grande parte desta atividade de mineração é desenvolvida a partir da superfície do terreno e dependendo da geometria do corpo mineralizado, em cavas a céu aberto ou em técnica de "strip mining". Todas as variantes destes processos de lavra envolvem a

remoção da terra vegetal e do estéril existente nas vizinhanças do minério para permitir ou facilitar o acesso a este. A lavra subterrânea em galerias permite o acesso ao corpo mineralizado com a escavação de um volume reduzido de material estéril.

Como exemplo quantitativo, 112000 km². da superfície dos EUA serão afetados por minas de superfície até o ano 2000, podendo resultar em até 102000 km². de área a ser recuperada ambientalmente.

Os resíduos do beneficiamento por britagem de minérios representam uma porcentagem significativa dos resíduos de uma mineração.

Ilustrando, sabe-se que até 1985 os Estados Unidos da América haviam estocado 15 bilhões de toneladas de resíduos, ocupando uma área total de 913 km².

A demanda de mercado hoje existente empurra os empresários a processar minérios com baixo teor de pureza, gerando volumes cada vez maiores de resíduos.

Os avanços tecnológicos da área de mineração permitem que depósitos de menor teor sejam explorados sem significativo aumento de custo. A lavra de cobre pode ser citada como exemplo; o teor mínimo considerado viável para lavra foi, nos EUA, reduzido de 10 vezes desde 1900 e de 250 vezes desde o início da exploração deste minério.

Isto, entretanto não significa que se pode minerar teores sempre menores. Existe um limite geológico, energético e ambiental.

Somente alguns metais são encontrados em abundância na crosta terrestre: ferro, alumínio, magnésio, manganês, cromo e titânio. Todos os outros metais de amplo uso, como o cobre, estanho, chumbo, zinco, urânio, níquel, tungstênio e mercúrio são escassos.

Todos estes metais são encontrados em minérios de baixo teor e, em geral, seus depósitos não são homogeneamente distribuídos na Terra.

A lavra de minérios de teor cada vez mais baixo se torna de custo proibitivo, não somente em termos de custo monetário, mas também em termos do custo da energia necessária para beneficiamento, da área global do empreendimento e das consequências finais ao meio ambiente.

Eventualmente atingiremos depósitos de teor tão baixo que o custo da energia necessária para extrair e beneficiar o minério passará a ser condicionante.

Tal fato, dizem certos ambientalistas de renome, poderia ser conceituado a partir da Segunda Lei da Termodinâmica quando aplicada à discussão de Energia/Meio Ambiente, que diz que:

" em todas as transformações de energia calorífera em trabalho, parte desta energia sempre degrada a uma forma mais dispersa e de menor utilidade " ou,

" qualquer sistema e seus arredores (ambientais) espontaneamente tendem a um incremento de desordem, de aleatoriedade ou de entropia " ou,

" qualquer redução de poluição em certo local aumenta a poluição em outro local e, principalmente, a poluição global aumenta ".

Os conceitos da Engenharia Ambientalista que devemos postular podem não ser tão rigorosos quanto a Segunda Lei da Termodinâmica, mas devemos focar os problemas dentro de dois critérios:

- * o aumento "líquido" de poluição deve ser minimizado,
- * a "nova" poluição deve ser distribuída de maneira equiparada e equilibrada.

No passado era suficiente que um engenheiro geotécnico otimizasse seu projeto; hoje um projeto geotécnico deve ser focado como um subsistema de um sistema maior e o sistema global deve ser otimizado.

Como ilustração aos conceitos genéricos apresentados, a fig. 1, apresenta uma indicação das porcentagens relativas, em diversos países, dos resíduos de: lixo industrial (MSW), industrial, mineração, agricultura, sistemas de esgotos e diversos.

B) GERAÇÃO

Rejeitos são sempre gerados pelas atividades industriais de lavra, britagem e metalurgia das reservas minerais.

Resumidamente pode-se colocar que rejeitos sólidos e líquidos estão associados a cada uma destas atividades, da seguinte maneira:

a) atividade de lavra

rejeitos sólidos: o maior problema de rejeitos sólidos na atividade de lavra está vinculado com o manuseio e a deposição do material de decapagem;

rejeitos líquidos: este problema é restrito a situações de minas que atinjam o lençol freático e cujas matriz contenha pirita ou outro material a base de sulfetos.

b) britagem

rejeitos sólidos: são uma grande preocupação; consistem no material hospedeiro dos minerais a serem retirados pelos procesos de concentração. Em certas ocasiões a simples lavagem dos minérios também gera resíduos sólidos;

rejeitos líquidos: consiste na água decantada das lagoas ou barragens de deposição; algumas vezes contém ions dissolvidos indesejáveis ou um teor de sólidos em suspensão incompatível com os critérios locais de lançamento no sistema hidrico;

c) indústria metalúrgica

rejeitos sólidos: como o termo industria metalurgica é muito amplo fica difícil definir quais tipos de rejeitos devem ser considerados. Como em muitas situações as atividades metalurgicas (ou parte delas) são geografica ou operacionalmente ligadas com a lavra e/ou com a britagem, seus rejeitos serão tratados junto com estes ultimos.

rejeitos líquidos: variam de águas de lavagem do minério bruto ao efluente dos processos de limpeza de dispositivos antipoluição.

A transformação de bauxita em alumínio pode envolver resíduos sólidos inertes gerados pela simples lavagem do minério e rejeitos com elevadas quantidades de NaOH (soda cáustica) utilizada para dissolver a alumina e formar aluminatos de sódio. A britagem por via úmida da hematita produz rejeitos de acelerada velocidade de decantação. A elevada quantidade de pirita associada ao carvão permite a produção natural de ácido sulfúrico nas áreas de deposição dos rejeitos e a metalurgia do ouro inclui o uso de cianeto. Inúmeros outros exemplos poderiam ser mencionados.

O atual Código de Mineração Brasileiro divide os minerais em 8 (oito) classes:

- Classe I - minérios de alumínio, antimônio, arsênico, etc.
- Classe II - ardósias, areias, cascalhos, gnaisses, granitos, quartzitos e saibros, quando utilizados "in natura" para preparo de agregados, pedra de talhe ou argamassa, e não se destinem, como matéria prima, à indústria de transformação.
- Classe III - fosfatos, guano, sais de potássio e salitre.
- Classe IV - carvão, linhito, turfa e sapropelitos.
- Classe V - rochas betuminosas e pirobetuminosas.
- Classe VI - gemas e pedras ornamentais.
- Classe VII - substâncias minerais industriais, não incluídas nas classes precedentes, anfibólios, areias de fundição, argilas, argilas refratárias, etc.
- Classe VIII - águas minerais.

As minerações foram também definidas a partir do método de exploração, sendo quatro os tipos:

- mineração por escavação mecânica,
- mineração por dragagem,
- mineração por desmonte hidráulico,
- mineração por explosivos.

As regulamentações internacionais existentes impõe que as atividades de mineração sejam objeto de estudos e planejamentos ambientais.

A legislação brasileira atual impõe que se prepare um Relatório de Impacto Ambiental - RIMA para o licenciamento de qualquer extração de minério, inclusive os de Classe II. Este estudo deve, entre outros tópicos, avaliar o impacto ambiental gerado na operação da atividade, e na sua desativação futura, indicando os procedimentos de recuperação da área degradada.

A fig. 2 apresenta dados da porcentagem de rejeito gerado pelo beneficiamento de algumas substâncias minerais encontradas no Brasil.

Os resíduos de beneficiamento por britagem de um minério são, em geral, quimicamente similares ao minério de origem, mas a presença de reagentes, a ação de alteração do resíduo após deposição e evaporação da água livre podem alterar significativamente alguma de suas propriedades químicas e físicas. Já os rejeitos de outros processos de beneficiamento podem ter características físico-químicas bem diversas.

Estes rejeitos de processamento de minérios constituem-se e expressiva fonte potencial de poluição ambiental. Além da grande quantidade de sólidos gerados, geralmente incorporam contaminante físico-químicos, com solução de metais tóxicos, radioatividade, acidez, etc..

Alguns processos de beneficiamento de minérios podem gerar materiais de granulometrias bem diferenciadas: uma fração arenosa (mais grosseira) e outra argilosa (mais fina e plástica).

Sua separação pode ser resultante do próprio processo de beneficiamento ou pode ser planejada e forçada em ciclones instalados já no processo de deposição.

C) DISPOSIÇÃO

A indústria da mineração anualmente produz um volume considerável de rejeitos a serem depositados de maneira não danosa ao meio ambiente e dentro de um limite aceitável de custos.

O beneficiamento dos minérios quando feito por via úmida, pode gerar polpas, que são depositadas hidraulicamente em lagoas ou reservatórios construídos para recebê-las, ou nas próprias áreas anteriormente lavradas.

Se as partículas sólidas que constituem os rejeitos são essencialmente areias finas e siltes, a polpa sedimentará rapidamente próximos de sua densidade final e pouca consolidação (adensamento) ocorrerá pelo acúmulo sistemático de mais material no local de deposição. O sedimento terá uma boa resistência ao cisalhamento inicial e uma elevada permeabilidade.

Já se o rejeito contiver uma significativa porcentagem de argilas ou colóides, sua deposição resultará em um material com porosidade inicial muito elevada e sujeito a grandes variações volumétricas quando da aplicação de cargas adicionais, ou seja, com a elevação do nível de rejeitos na área de deposição. Sua resistência inicial será mínima e terá baixa permeabilidade.

É importante colocar que mesmo que a porcentagem de argilo-minerais (partículas de diâmetro inferior a 0.002 mm.) seja pequena, o comportamento de um rejeito pode ser do tipo "argiloso", em função da alta atividade desta pequena porcentagem de argila. Em certas situações a presença de somente 25 a 30% de partículas argilosas imprimem um comportamento argiloso à matriz do rejeito.

Existem quatro opções básicas para a disposição de rejeitos sólidos ou líquidos:

- *** estocar/enterrar em reservatórios ou áreas especialmente preparadas,
- *** tratamento químico,
- *** reciclagem,
- *** incineração.

As discussões que seguem dizem respeito somente aos conceitos que possibilitam otimizações e garantia de comportamento futuro da estocagem adequada de rejeitos de mineração em áreas preparadas para recebê-los, sejam elas lagoas ("ponds") ou barragens em vales mais fechados.

Normas de projeto e construção de áreas preparadas para receber rejeitos são hoje abrangentes e complexas; os critérios e os níveis de atendimento são constantemente atualizados. O interesse técnico e a legislação que rege a deposição de rejeitos de mineração tem aumentado nos anos mais recentes.

Foi comum, durante o início da fase moderna de deposição de rejeitos e resíduos, o uso direto dos conceitos da engenharia geotécnica aplicada ao projeto de barragens para contenção de água; o conhecimento do comportamento de inúmeras obras e o desenvolvimento de modelos específicos de análise permite que substanciais otimizações sejam introduzidas ao se considerar o tipo de material a ser estocado e os conceitos de comportamento em pauta.

Vamos dar atenção principal às discussões relativas à estocagem de rejeitos em áreas ou reservatórios especialmente conceituados, projetados e construídos para receber de maneira satisfatória estes materiais.

CONCEITOS BASICOS

O projeto de uma área de deposição de rejeitos não se restringe à otimização da seção transversal que permitirá a estocagem do material; deve incluir considerações à sedimentação e consolidação do rejeito; ao tempo de retenção para garantir clarificação da água sobrenadante, à manutenção da qualidade da água e à dissecação da crosta aflorante de material para permitir o início dos serviços futuros de recuperação ambiental da área..

Deve também considerar a otimização da relação custo por metro cúbico (ou tonelada) de rejeito depositado, que associada às demais análises econômicas do empreendimento, indicará sua viabilidade.

As condições topográficas, geológicas e hidrologicas dos locais a serem estudados para receber os rejeitos, junto com as características poluentes e geomecânicas do material a estocar e dos materiais de empréstimo, possibilitarão a análise e as decisões do tipo de solução a ser desenvolvida.

1- Barramentos em Vales Estreitos

Quando a topografia permitir, a validade de se fechar um vale com uma barragem deve ser estudada dentro dos outros aspectos que condicionarão as decisões.

Atenção deve ser dada à existência de vazão perene no vale e à quantidade mínima de água necessária para garantir as necessidades das populações ribeirinhas de jusante; as consequências ao Meio Ambiente geradas pelo fechamento do vale devem ser analisadas rigorosamente.

Considerando-se que o uso de uma barragem em vale estreito tenha se demonstrado válido nas análises preliminares, dois tipos principais de obra devem ser considerados: barragens convencionais de aterros trazidos de empréstimos externos ou barragens construídas com os próprios rejeitos.

a - barragens convencionais

Quando do estudo e projeto de uma barragem convencional, as teorias e os conceitos já consagrados da geotecnia devem ser usados, incorporando a enorme experiência brasileira de construção deste tipo de obras e as características do tipo de rejeito a ser estocado.

O uso de materiais não tão "convencionais" deve ser previsto e até encorajado, uma vez que materiais oriundos da decapagem da mina,

de parte do processo de beneficiamento do minério, etc. poderão estar disponíveis a um custo unitário mais baixo.

É comum dizer que se constrói barragens praticamente de qualquer material, desde que com comportamento bem estudado a priori e uso em posições otimizadas da seção transversal.

A fig. 3 resume, na seção transversal da barragem convencional corriqueira, o tipo de comportamento pretendido e necessário em cada zona da sua seção transversal.

A fig. 4 apresenta os principais conceitos aplicados na otimização de uma seção transversal de barragem de terra convencional, de terra-enrocamento e tipo ensecadeira; a fig. 5 mostra alguns tipos corriqueiros de seções transversais que incorporam sérios problemas conceituais.

Destas figuras verifica-se que o atendimento com segurança a três fenomenologias principais deve sempre nortear os estudos de projeto de uma barragem: a permeabilidade absoluta e relativa, a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade de cada um dos materiais usados na seção transversal do maciço, e dos materiais naturais da fundação da barragem, e, eventualmente, do próprio rejeito.

b - barragens construídas com os rejeitos

No caso de se utilizar os próprios rejeitos para a construção da barragem, três são os métodos comumente usados.

Campanhas especiais de ensaios de laboratório devem ser programadas para possibilitar o conhecimento do comportamento dos rejeitos em seu estado natural, após segregação natural ou forçada pelo processo executivo, e após adensamento aos níveis de tensão impostos pela obra em estudo.

b1 - processo de montante - "upstream"

A construção de barragens de rejeitos pelo processo de montante ("upstream method") usa com sucesso os comportamentos diferenciados entre a fracção fina e a grossa de um rejeito para o fechamento de vales com o próprio rejeito e o acúmulo das águas liberadas a montante.

O método de construção (fig. 6) inicia pela implantação de uma pequena barragem convencional no pé de jusante da obra. É importante que esta barragem inicial seja suficientemente permeável para permitir a fácil passagem das águas de percolação futuras, sem risco de rupturas por erosão interna (piping). Os rejeitos são então lançados da crista da barragem inicial, com uso de bicos de lançamento ("spigots") ou ciclones para desenvolver o corpo principal da barragem a partir da fracção mais grosseira dos rejeitos. Com a elevação da barragem, sua linha de centro da crista é sistematicamente levada para montante.

O pé do talude de cada incremento se apoia no topo da etapa anterior, enquanto que seu talude montante se apoia nos rejeitos recém lançados. Estes rejeitos poderão vir a ter uma baixa resistência ao cisalhamento: estudos criteriosos se fazem necessários para assegurar a estabilidade da obra. Rupturas deste tipo de barragem sempre se configuram como "ondas de lama", com efeitos catastróficos para a população ribeirinha e o meio ambiente de jusante.

A fig. 7 apresenta um sequencial resumido do comportamento adverso sofrido por uma barragem, que teve consequências catastróficas em uma ruptura com liquefação dos rejeitos.

b2 - processo de jusante - "downstream method"

O método de jusante tem a linha de centro da barragem deslocada para jusante simultaneamente à sua elevação (fig.8). Uma barragem inicial também é necessária, sendo que neste caso ela deverá ser impermeável para minimizar a perda de água pela barragem. Cada incremento da obra se apoia no topo do talude de jusante do

incremento anterior. Sómente a fração grossa dos rejeitos deve ser usada nos alteamentos, e um dreno de pé deve ser continuamente prolongado na base da barragem. É importante otimizar o processo de construção deste talude de jusante, incluindo especificações de sua compactação, para impedir rupturas catastróficas. Um selo impermeável de montante também é prática recomendável, sua construção com argilas compactadas pode até ser excluída com o lançamento adequado da fração fina dos rejeitos.

b3 - método de centro - "centre line method"

O método de centro tem a crista da barragem mantida na mesma locação horizontal enquanto a obra sobe (fig.9). A subida da barragem se dá com o lançamento e a compactação de rejeitos grossos no topo, na face de jusante e no espaldar de montante. A impermeabilização da barragem é conseguida pelo lançamento da fração fina (argilosa) a montante da sua crista.

2- Diques em Regiões de Topografia Suave

Quando a topografia da região em estudo for suave, sem a presença de vales marcantes, a criação de um reservatório a partir da construção das laterais do polígono de fechamento se faz necessária. Este tipo de solução é comumente chamada de lagoa ou "pond".

Quando os rejeitos a serem estocados são produzidos nas proximidades da área de lavra, a otimização do projeto da seção transversal destes diques periféricos deve incorporar ao máximo as condições particulares de cada mina, usando sempre que possível as sistemáticas de lavra para "produzir" parte da seção transversal para uma minimização dos custos.

Quando o beneficiamento do minério é realizado a distância da lavra e a topografia regional é suave, a otimização da seção transversal dos diques periféricos deve incluir os tipos de material e de empréstimo disponíveis e as condições de operação previstas para o reservatório.

Atenção deve sempre ser dada às condições previstas de operação dos "ponds", implicando em uma otimização bem conceituada dos projetos destas lagoas.

A fig.10 mostra uma seção transversal concebida para minimizar a percolação de resíduos perigosos, com sua recuperação para a planta de beneficiamento. As especificações construtivas desta obra impuseram uma energia de compactação imediatamente sobre a tubulação de coleta do líquido incompatível com seu projeto estrutural e uma ruptura generalizada das paredes de toda a lagoa ocorreu durante o teste de rebaixamento inicial.

diques em áreas anteriormente lavradas

A figura 11 apresenta a seção transversal utilizada na construção do dique periférico do reservatório de rejeitos diluídos das atividades de beneficiamento da MRN em Porto Trombetas.

Nesta seção transversal otimizada é importante ressaltar o uso das pilhas cônicas de material simplesmente lançado pelas draglines, durante a operação de decapagem da mina, para constituir o núcleo dos diques.

O planejamento da decapagem foi alterado nos alinhamentos particulares dos diques, de maneira a permitir o lançamento duplo em cada ponto, ou seja, que se atingisse cota mais elevada que o normal, sem uso de equipamento especializado de terraplenagem.

Estudos de estabilidade de longo prazo destes diques levaram à necessidade de execução de um solo impermeável de montante, compactado com o próprio equipamento de transporte (motoscrapers), e de um sistema de drenagem de pé.

Os estudos de projeto destes diques incluíram as características de selagem, e consequente impermeabilização, que os sólidos em suspensão na água facultam ao comportamento geral do reservatório.

Já os reservatórios de rejeitos espessados, que receberão os rejeitos após o adensamento inicial, tem sua seção transversal

substancialmente otimizada. A simples conformação topográfica das pilhas de lançamento por dragline permitirão a estocagem segura dos rejeitos espessados, uma vez que pouca água livre resultará do fim do adensamento destes rejeitos.

3- Condições Particulares de Deposição de Rejeitos e Resíduos

a- impermeabilização de fundo

Outra situação muito comum ao se estocar rejeitos com características adversas ao aquífero da região do empreendimento é a impermeabilização do fundo do reservatório com mantas especiais de PVC ou butílicas. Estas membranas tem sido usadas com sucesso em casos de reservatórios para contenção de rejeitos de beneficiamento de urânio, ouro, bauxita (alumina), etc.

A figura 12 apresenta uma seção típica recomendada para uso nos EUA quando da estocagem de rejeitos perigosos; este sistema inclui duas membranas que se sobrepõe a duas camadas de argilas compactadas, sendo que entre elas se intercalam camadas drenantes para possibilitar o escoamento e a coleta dos líquidos poluentes. Proposta equivalente normalizada na Alemanha Ocidental pode ser vista na fig. 13.

Esta situação extrema de impermeabilização de reservatórios vem sendo simplificada na prática brasileira, como demonstra a solução empregada em atividade de beneficiamento de bauxita, Fig. 14 ou de ouro, Fig. 15.

b- barreiras impermeáveis verticais

Certas situações topográficas, geológicas e hidrogeológicas particulares podem levar à necessidade de otimização da conceituação de uma barreira impermeável a líquidos perigosos através da construção de uma barreira vertical. Esta barreira vertical é, em geral, concebida com o uso de paredes diafragma plásticas (solo-cimento), embutidas em rochas tratadas por injeções de impermeabilização, incorporando ou não sistema auxiliar de drenagem profunda interna.

A área passa então a constituir um reservatório para a estocagem segura dos rejeitos.

A garantia de impermeabilização total pode ser obtida a partir da incorporação de um simples conceito geotécnico: com a manutenção de um nível de água externo superior aquele interno do reservatório, é gerado um gradiente hidráulico e um fluxo sempre de fora para dentro da área de estocagem. A figura 16 apresenta esquemas básicos deste conceito.

c- drenagem de fundo - "underdrains"

Um interessante detalhe de projeto usado em certas atividades de beneficiamento cujos líquidos de processo mereçam recuperação (alumina, ouro, etc.), é aquele do uso de drenos de fundo ("underdrains") para coletar e reutilizar tais líquidos (soda cáustica, cianeto, etc.) e, potencialmente, acelerar o processo de consolidação destes rejeitos, para aumentar o tempo de utilização de cada reservatório e a vazão recuperada de líquido.

A fig. 17 apresenta um fluxograma simplificado de operação de uma destas situações. A Fig. 18 apresenta a implantação de um sistema de drenagem de reservatório de um projeto de beneficiamento de ouro.

Análises numéricas de simulação do adensamento de diversos tipos de rejeitos indica que, mesmo para materiais de compressibilidade intermediária (lamas vermelhas), o benefício trazido pela existência de um sistema de drenos de fundo não supera 5% na capacidade de estocagem de um reservatório, mas a um incremento de 25% de custo do reservatório.

A fig. 19 apresenta os resultados típicos deste tipo de simulação de adensamento, ressaltando as conclusões acima discutidas.

4- Pré-espessamento de Rejeitos e Deposição de rejeitos Pré-espessados

Inúmeras situações de otimização global da deposição de rejeitos podem levar à validade de se pré-espessar o material antes de sua deposição definitiva.

As principais vantagens deste pré-espessamento são:

- * bombeamento a curta distância dos grandes volumes de rejeitos gerados com baixo teor de sólidos,
- * recuperação de grande porcentagem da água liberada pela consolidação destes rejeitos nas proximidades da planta de beneficiamento,
- * minimização dos custos de projeto e construção das barragens/diques para contenção final dos rejeitos, uma vez que somente aquela que receberá os rejeitos diluídos merece cuidados especiais,
- * bombeamento a grandes distâncias dos volumes consideravelmente menores dos rejeitos espessados.

As técnicas de pré-espessamento de rejeitos a serem utilizadas podem incluir a deposição inicial em reservatório, o uso de centrifugas contínuas, a adição de floculantes, o uso de eletro osmosis, etc..

a) reservatórios de rejeitos diluídos

Uma das técnicas mais utilizadas de pré espessamento de rejeitos é sua estocagem temporária em reservatórios especialmente construídos.

O volume destes reservatórios deve ser cuidadosamente estudado tendo-se em consideração um equilíbrio entre a taxa de produção de rejeitos, a velocidade de adensamento do material e a vazão de rejeitos espessados levados às áreas de deposição definitiva,

resultando em uma vazão conhecida de água liberada e passível de retorno ao beneficiamento.

A manipulação dos rejeitos, uma vez adensados a teores de sólidos que o trazem a um estado de comportamento viscoso, é feito a partir de dragas especialmente estudadas para bombear o rejeito em regime laminar.

Este material pode então ser estocado de maneira definitiva em áreas anteriormente lavradas ou outras, as quais não precisam de concepção e construção sofisticada, como com a construção de barragens com sistemas de drenagem interna, etc.

A fig. 20 apresenta uma visão deste tipo de área de deposição, aonde se constata que os estudos de projeto permitem prever o adensamento dos rejeitos de teor de sólidos inicial de 12% para 35% em 6 meses e que um volume de água liberada por este adensamento de 0.29 m³/seg. pode ser incorporado ao balanço hídrico da operação do beneficiamento de minério.

b) deposição em cones suaves - "thickened discharge method"

A deposição de rejeitos pré-espessados pode, em certos casos, ser realizada em "pilhas" especialmente estudadas, fig 21.

Para que este método de deposição possa ser estudado é fundamental que, inicialmente, os rejeitos sejam espessados a teores de sólidos que os tragam a um estado viscoso e que sua taxa de produção não seja elevada.

A polpa nesta densidade e umidade é homogênea gerando uma sedimentação sem segregação.

A baixa vazão de descarga e um clima apropriado permitem que o material lançado em finas películas na pilha seque durante o escoamento pela face da pilha, o suficiente para se manter estável em taludes com alguma inclinação.

No processo de descarga os sólidos podem se estabilizam em taludes de inclinação de 5 a 8%. A pilha resultante chega a conter 95% dos sólidos do rejeito e é estável e resistente a erosão superficial.

As maiores vantagens de se utilizar este sistema de deposição estão ligadas a:

- * os sólidos são depositados em uma geometria estável,
- * o sistema pode incorporar um sistema de tratamento e de estocagem de água,
- * o sistema se adaptaria a sólidos de granulometria bem fina,
- * o investimento inicial é reduzido e os custos operacionais são baixos,
- * a capacidade de estocagem apresenta um alto fator em relação ao volume de terraplanagem necessária para implantar os diques periféricos,
- * o problema de erosão eólica é mínimo em função do contínuo lançamento de rejeitos na pilha,
- * a recuperação ambiental é fácil, uma vez que a pilha resultante está pronta para revegetação.

5- Sistemas Alternativos de Deposição

Sistemas alternativos de tratamento e deposição de rejeitos foram objeto de pesquisas detalhadas nos EUA; algumas destas pesquisas resultaram em conclusões que podem ser apresentadas como generalizáveis:

a - A adição de floculantes orgânicos polieletrólíticos adicionados aos rejeitos em espessadores mecânicos possibilitam uma rápida consolidação dos rejeitos finos,

b - A adição da fração arenosa dos próprios rejeitos se demonstrou mais eficiente após a fração fina já ter um teor de sólidos elevado, ou seja, após um desaque por ciclonagem, por adensamento e gravidade, etc..

A mistura de argila-areia bombeada para as áreas anteriormente lavradas pode ser feita normalmente; a relação areia-argila deve ser estudada com critério cuidadoso, de maneira a impedir que a

areia sedimento/segrege nas tubulações de bombeamento do material, nem dificulte a consolidação/deságue da fração argilosa.

A presença da fração fina em porcentagem adequada permite que o aumento de peso dos rejeitos acelere seu adensamento sem que os grãos desta fração arenosa estabeleçam um esqueleto estruturado e passem a impedir qualquer consolidação.

c - Outra alternativa estudada e que se demonstrou economicamente atraente foi chamada de pulverização de areia ("sand spray"). O sistema consiste no bombeamento da polpa argilosa diluída para áreas preparadas; quando a polpa atinge um teor médio de sólidos (da ordem de 12% e em aproximadamente 7 meses nas lamaz fosfáticas), uma suspensão arenosa é pulverizada sobre a argila, formando canais arenosos em seu interior (facilitando a liberação de água) e adicionando peso (acelerando a consolidação da polpa).

Uma nova quantidade de argila pode então ser depositada na lagoa e o processo de pulverização de areia repetido.

Uma análise de custo operacional destas alternativas propostas foi realizada, incluindo custo de energia elétrica para os bombeamentos, o custo de mão de obra necessário para manutenção dos diques, das tubulações, bombas e demais equipamentos, o custo dos eventuais floculantes químicos, a depreciação dos equipamentos e o custo da terraplenagem de construção de novos diques sempre que necessário.

Uma mina típica de fosfato da região da Flórida foi utilizada nas análises, uma vez que seus rejeitos são extremamente plásticos, e conhecendo-se que o custo unitário da deposição de rejeitos convencional é de \$0.30/ton. de rejeitos, obteve-se que: o uso do sistema de floculantes aumentaria o custo de deposição para \$0.41/ton. enquanto que os outros dois sistemas de deposição diminuiriam o valor para \$0.25/ton. de rejeitos.

As figuras 22 e 23 apresentam o fluxograma de operação destas alternativas de deposição de rejeitos.

A principal redução de custo com a deposição de rejeitos espessados advém da redução dos custos de construção e de manutenção dos diques e barragens para recebimento do material em relação à deposição convencional de rejeitos diluídos.

RECUPERAÇÃO AMBIENTAL

A recuperação ambiental de áreas utilizadas para deposição de rejeitos de mineração deve incluir considerações, quanto às suas características químicas e físicas ao longo do tempo.

Considerando que as características químicas de um rejeito estejam em faixas aceitáveis, é importante estimar a variação da sua densidade com o tempo. Este conhecimento permite estimar a traficabilidade que a camada superficial de material propiciará para que equipamentos leves e especiais possam iniciar os serviços de recuperação ambiental propriamente ditos.

Considerando-se que o adensamento do material se dá somente devido ao seu peso próprio e que na grande maioria dos casos uma camada superficial de água pode permanecer sobre os rejeitos, o início das atividades de recuperação ambiental deve ser o esgotamento da água superficial e a abertura de valas razas periféricas. Estas valas permitirão a formação de uma crosta ressecada de maior resistência que, por sua vez, possibilitará a escavação de outras valas na região interna do reservatório.

Nesta oportunidade o plantio de leguminosas e arbustivas específicas, com semeadura por via aérea, acelera o secamento da água intersticial dos rejeitos.

Com o ressecamento superficial do material sua resistência atingirá valores tais que permitirá o tráfego de equipamentos especiais e leves de terraplenagem e o início propriamente dito da recuperação e reabilitação ambiental do reservatório.

A partir do momento que a traficabilidade esteja garantida, a materialização da recuperação da área de deposição pode ser iniciada sem restrições.

BIBLIOGRAFIA BASICA

* Tailing Disposal Today, Proceedings of the International Tailing Symposium, Arizona, 1972;

* Tailing Disposal Today, Proceedings of the Second International Tailing Synposium, Colorado, 1978;

* Waste Production and Disposal in Mining, Milling and Metallurgical Industries, by Roy Williams, 1975;

* Simpósio de Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, Rio de Janeiro, 1987;

* Congresso Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, 1989;

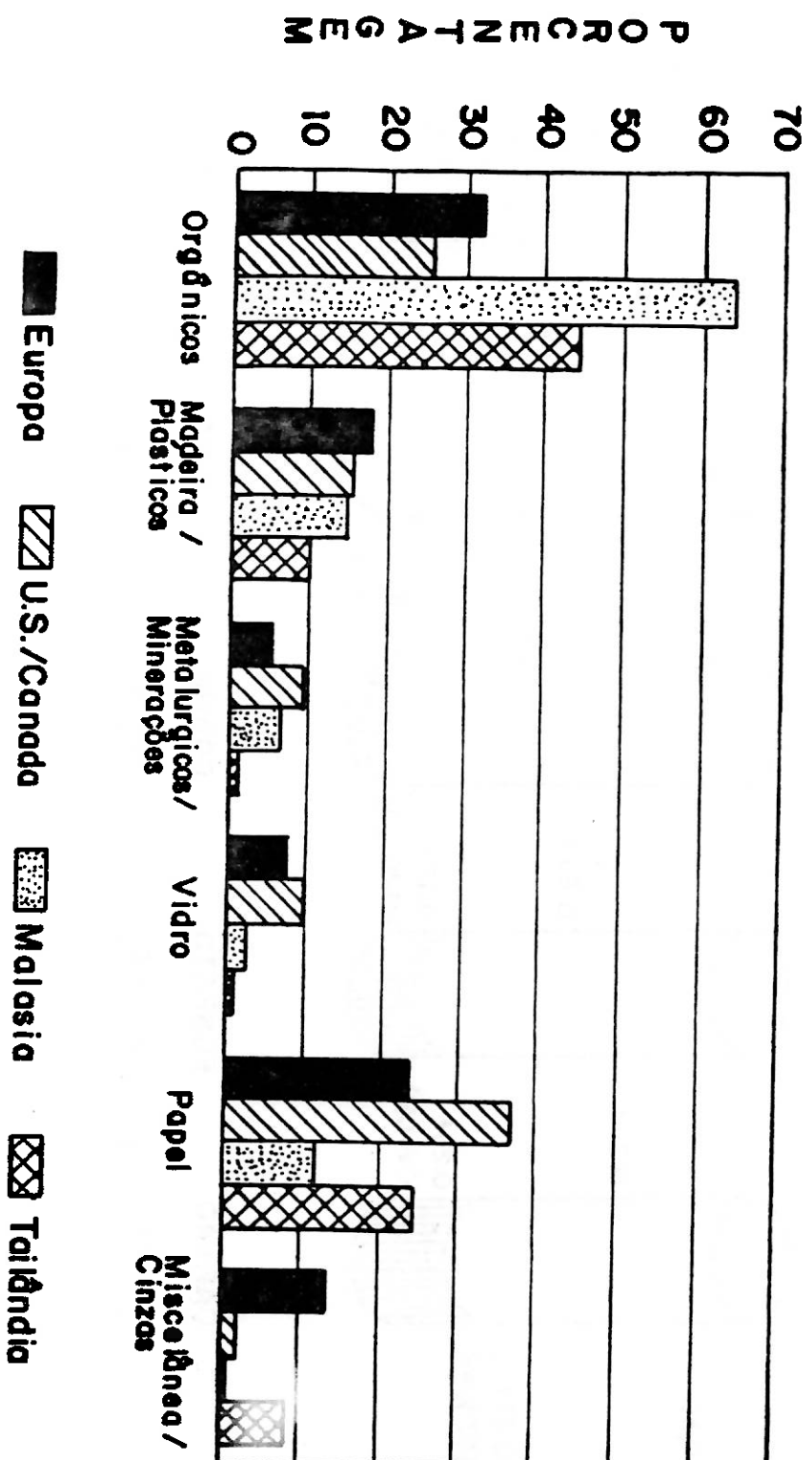
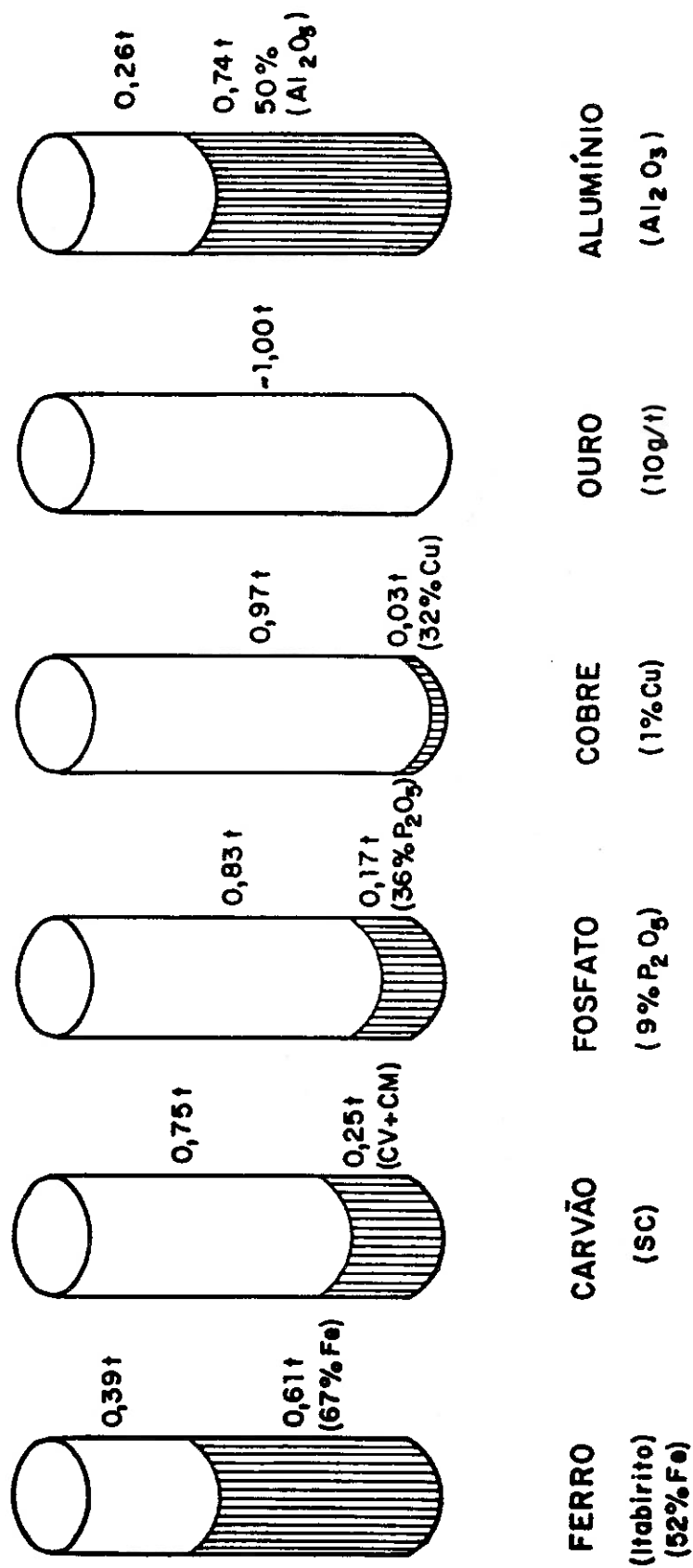
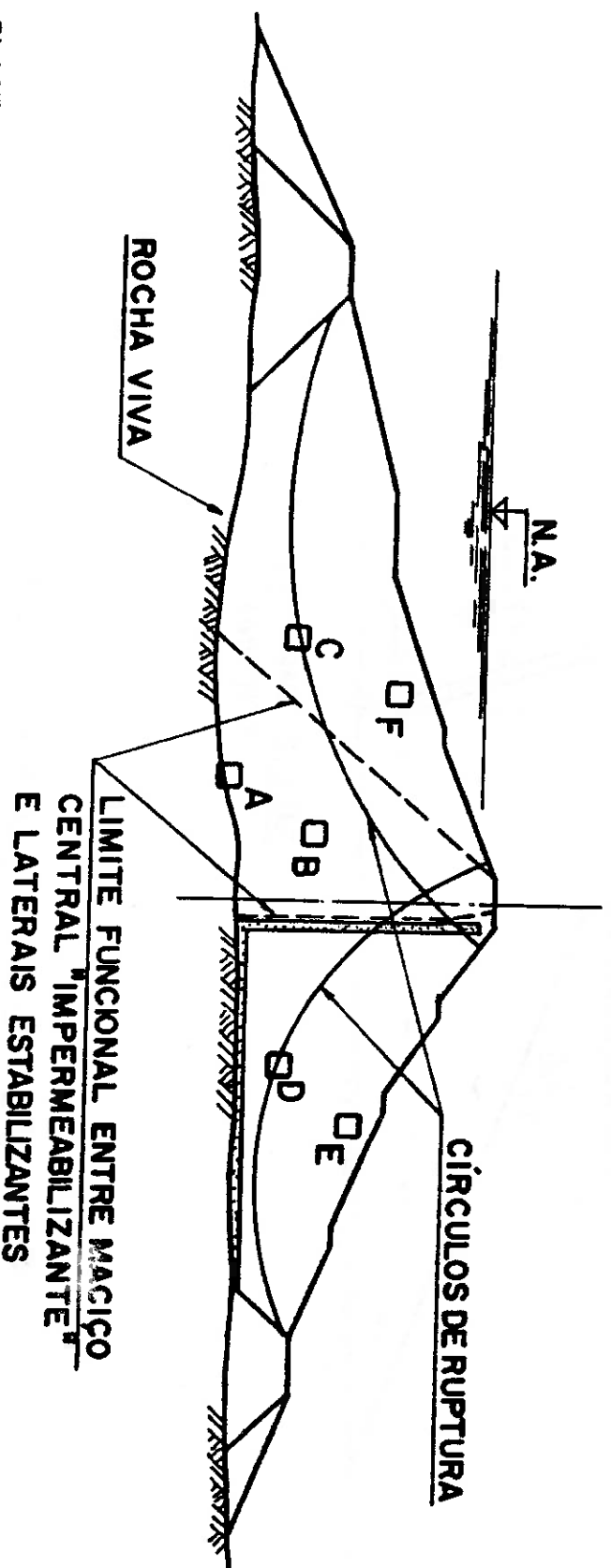


FIG. 1 - PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS



REJEITOS E PRODUTOS DO BENEFICIAMENTO DE 1t DE MINÉRIO
(VALORES APROXIMADOS)

FIG. 2 - QUANTIDADES MÉDIAS DE REJEITOS E PRODUTOS



- A - PLASTICIDADE, ADERÊNCIA, IMPERMEABILIDADE.
- B - IMPERMEABILIDADE, PLASTICIDADE, EVITAR $k_h \geq k_v$.
- C - RESISTÊNCIA APÓS SATURAÇÃO, BAIXA COMPRESSIBILIDADE.
- D - MÁXIMA RESISTÊNCIA A LONGO PRAZO.
- E - COESÃO, AUSÊNCIA DE CONTRAÇÃO POR RESSECAMENTO, BAIXA ERODIBILIDADE.
- F - COESÃO APÓS SATURAÇÃO, BAIXA ERODIBILIDADE, AUSÊNCIA INCHAMENTO.

FIG. 3 - COMPORTAMENTO NECESSÁRIO EM ZONAS DA BARRAGEM

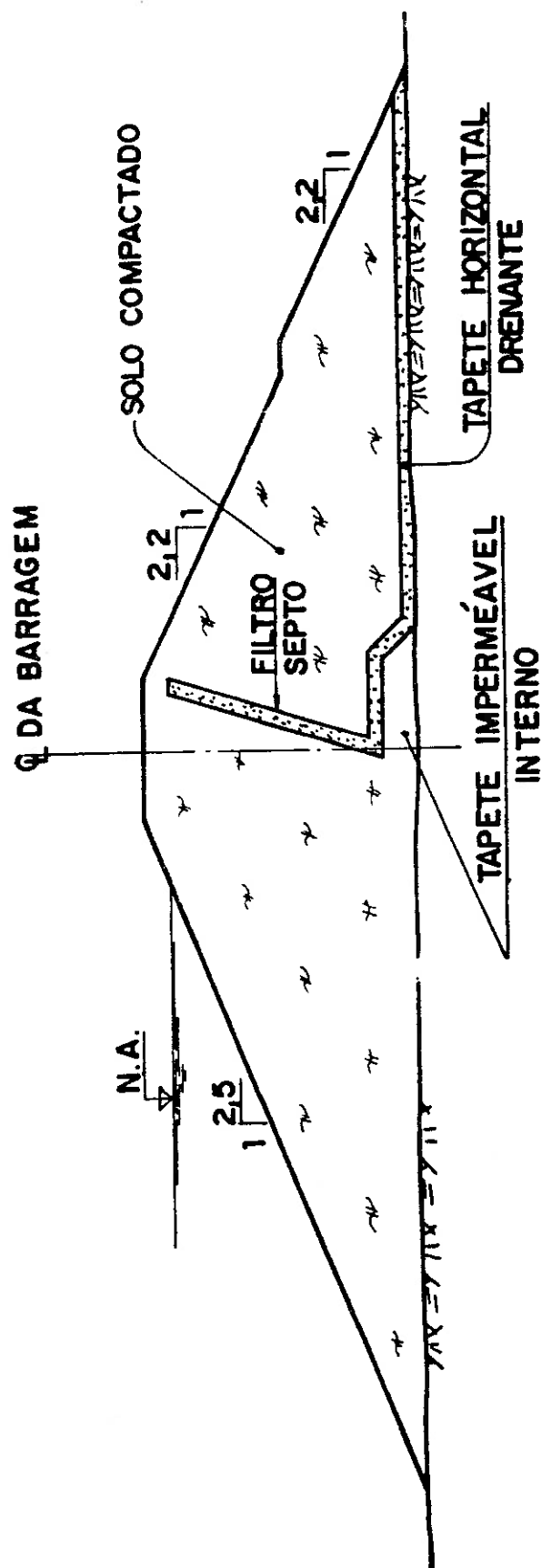


FIG. 4a - OTIMIZAÇÃO DE BARRAGEM DE SOLO COMPACTADO

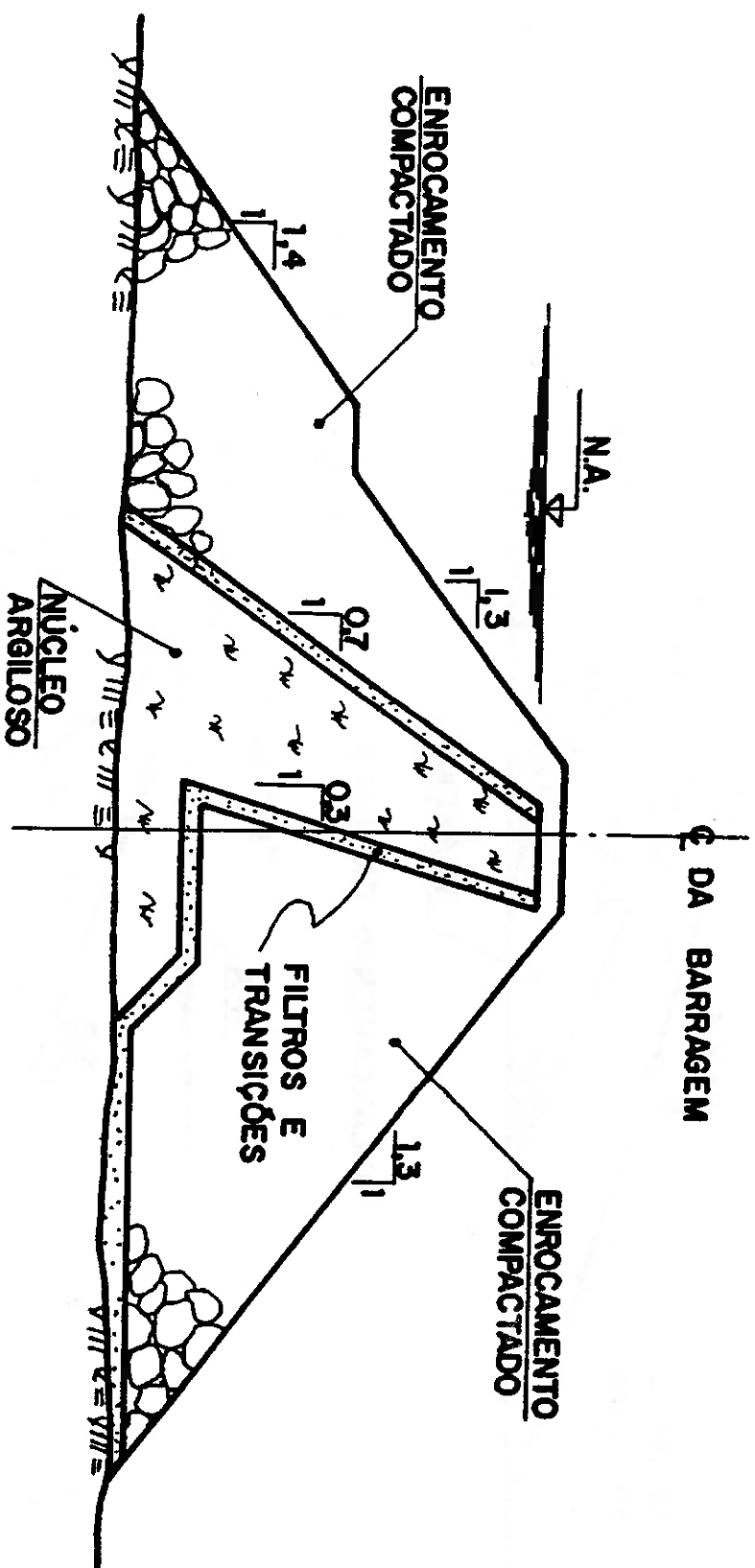
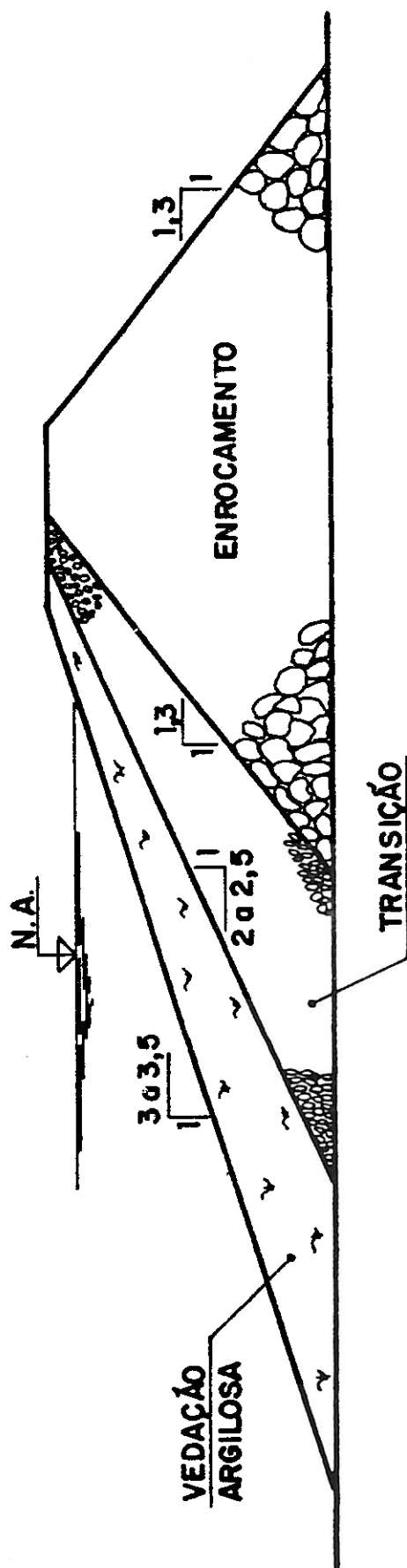
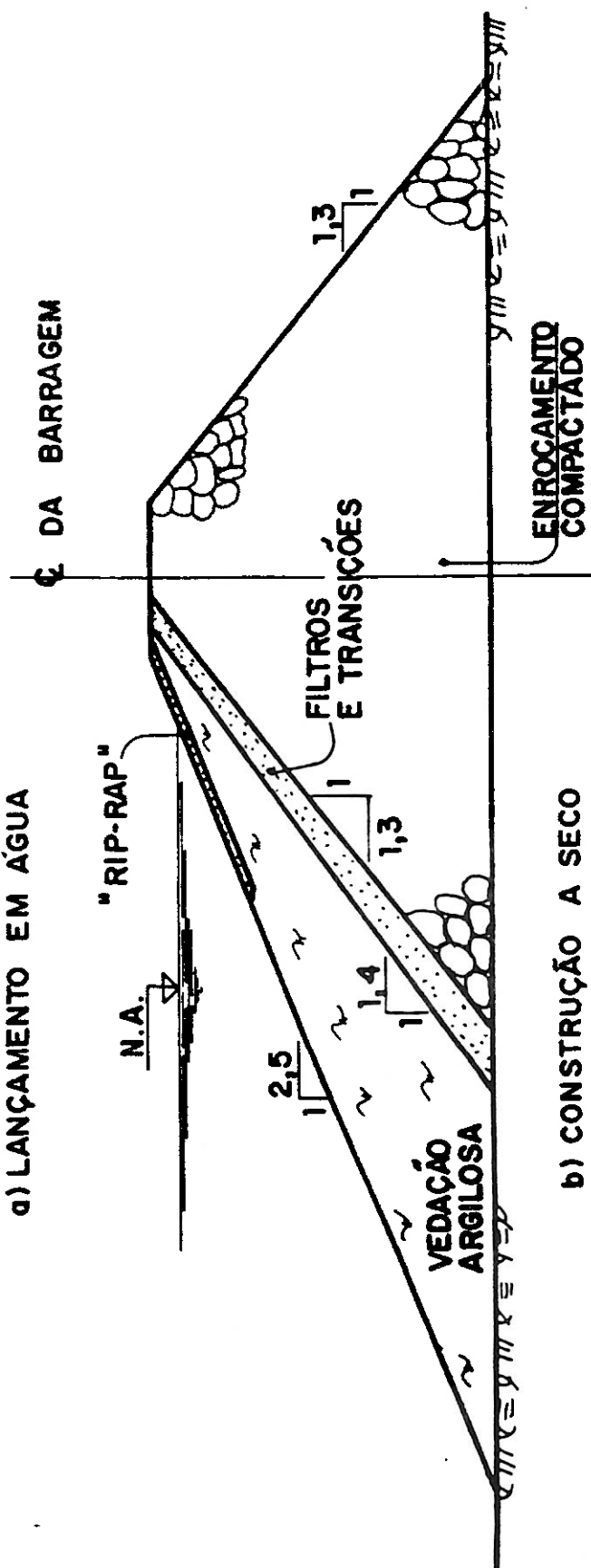


FIG. 4b - OTIMIZAÇÃO DE BARRAGEM DE ENROCAMENTO
COM NÚCLEO ARGILOSO



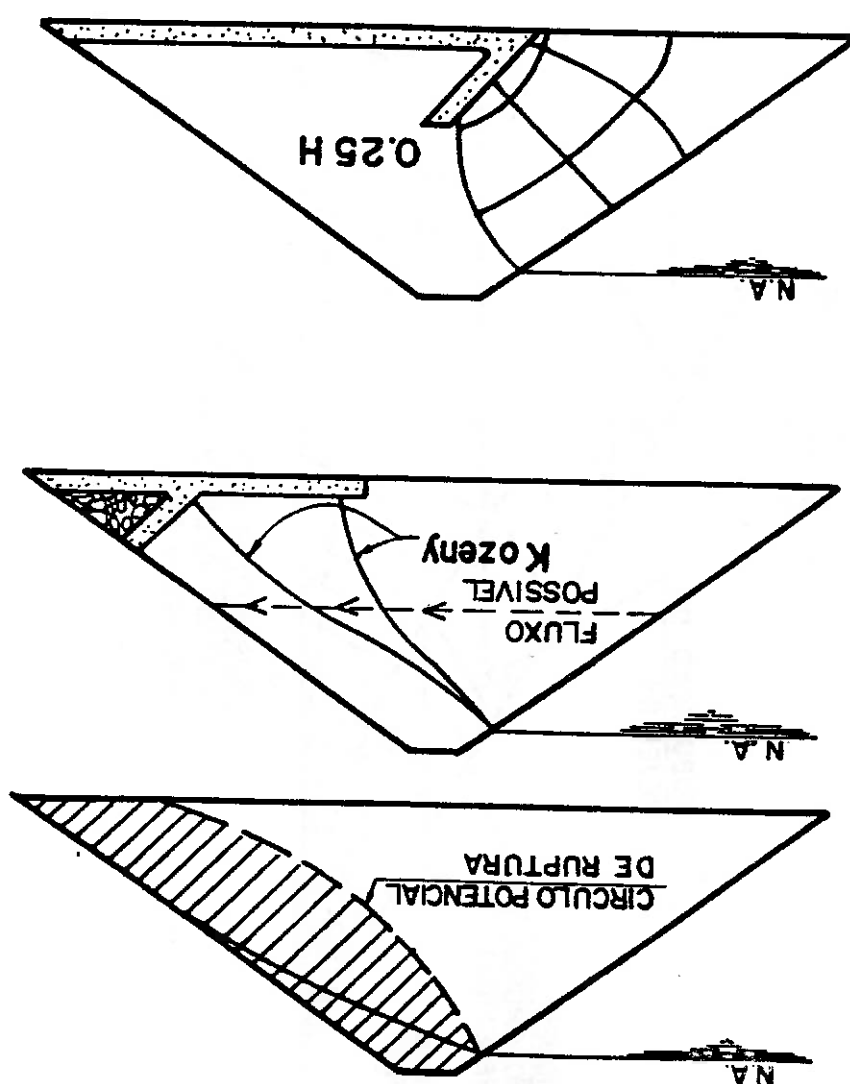
a) LANÇAMENTO EM ÁGUA

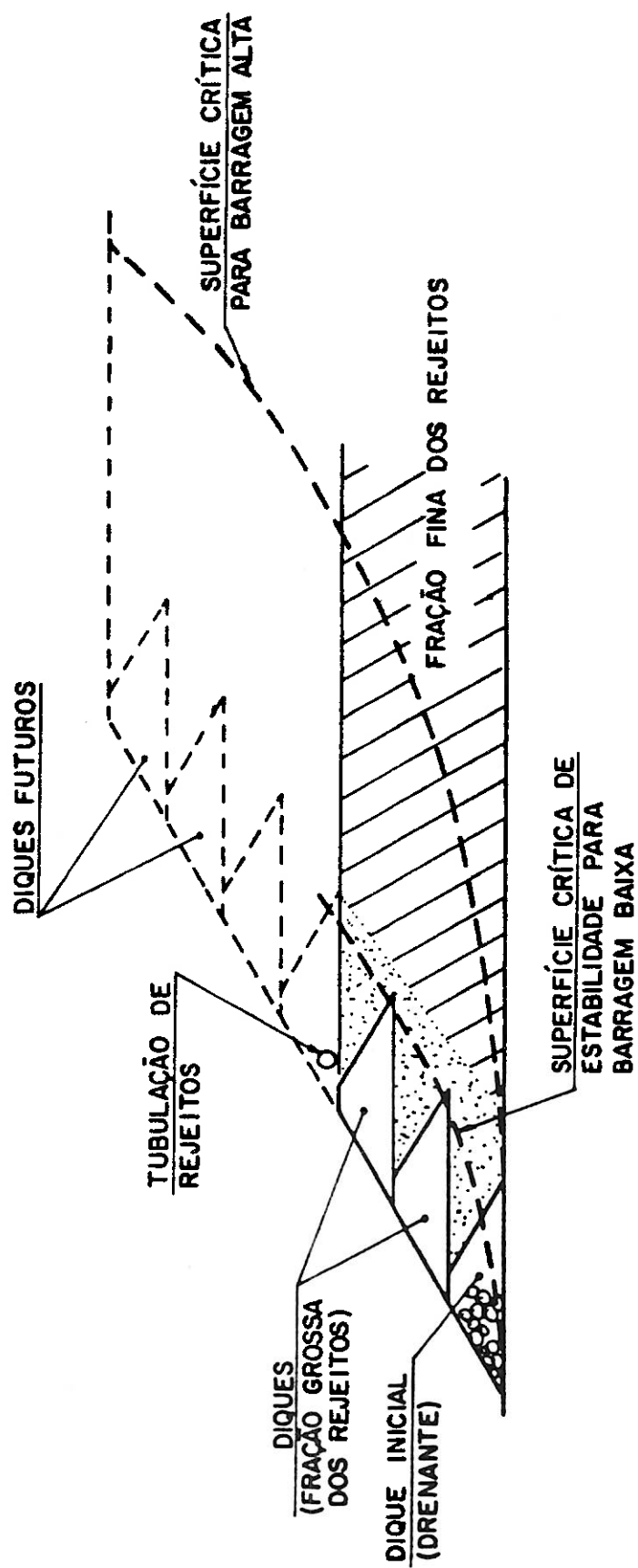


b) CONSTRUÇÃO A SECO

FIG. 4c- SEÇÃO TIPO ———— ENSECADEIRA

FIG. 05 - SEÇÕES TRANSVERSAIS DE BARRAGENS
USADAS ANTIGAMENTE





**FIG. 6 - BARRAGEM DE REJEITOS - PROCESSO DE MONTANTE
"UPSTREAM METHOD"**

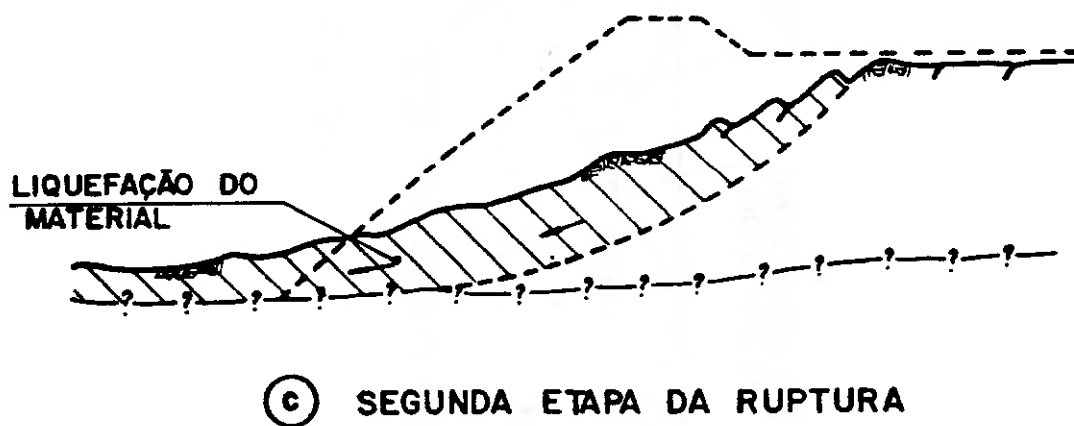
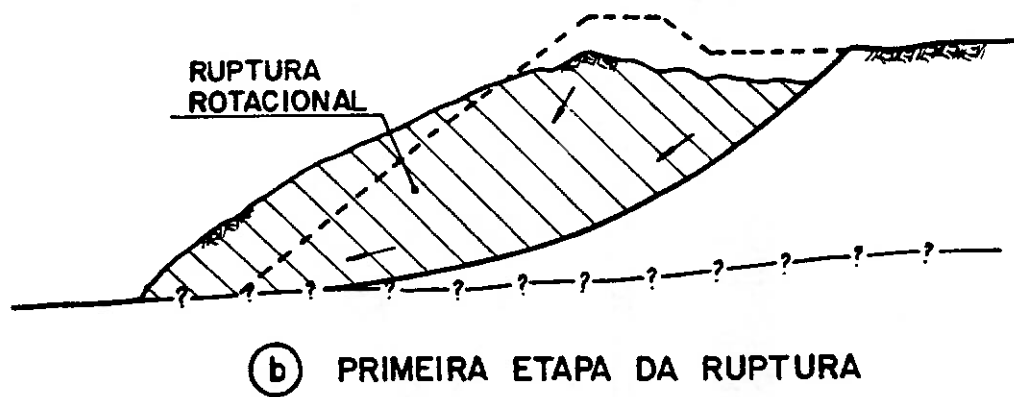
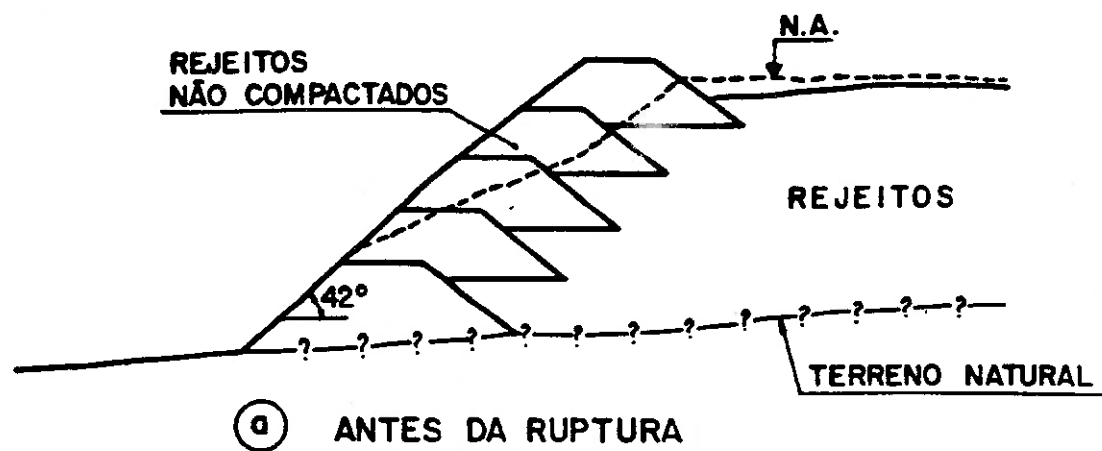


FIG. 7 - RUPTURA TÍPICA EM BARRAGEM DE REJEITOS

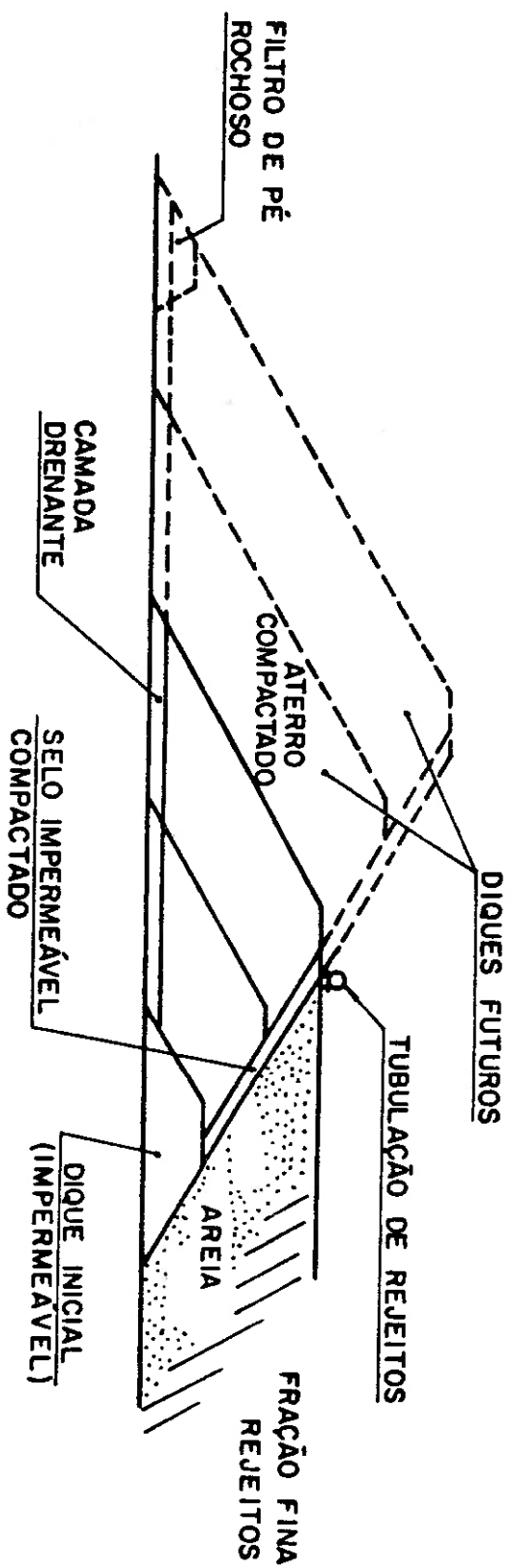


FIG. 8 - BARRAGENS DE REJEITOS - PROCESSO DE JUSANTE
"DOWNSTREAM METHOD"

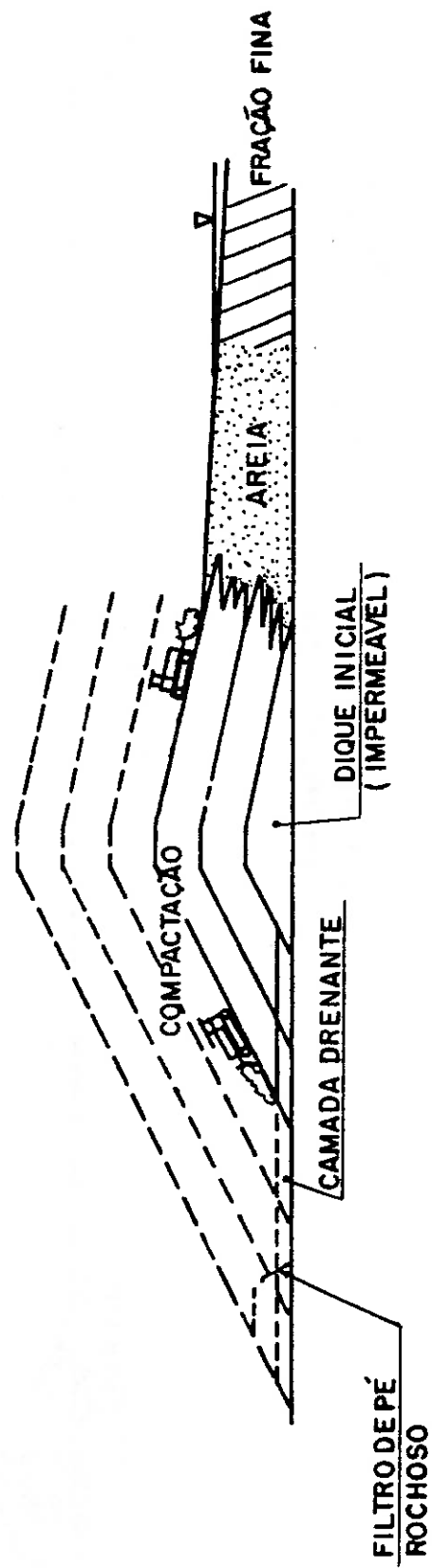
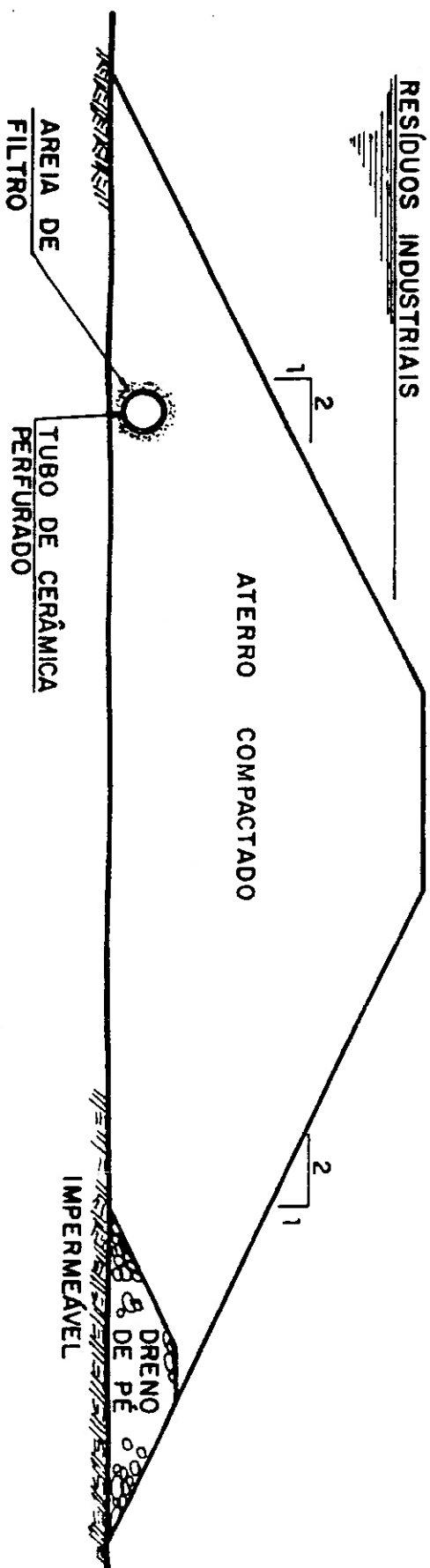
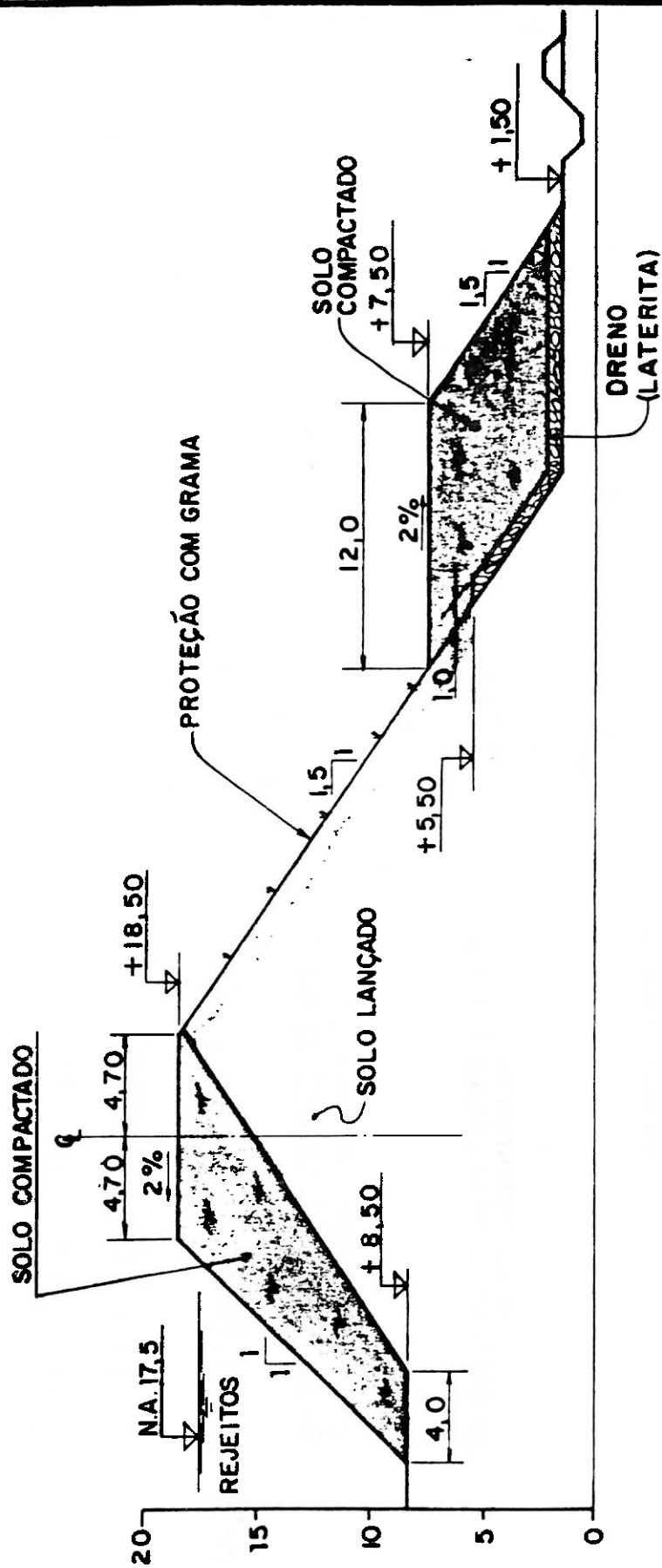


FIG. 9 - BARRAGEM DE REJEITOS - MÉTODO DE CENTRO
"CENTRE LINE METHOD"



OBS. - O TUBO DE CERÂMICA PERFORADO ENCAMINHA OS LÍQUIDOS DE PERCOLAÇÃO PARA A PLANTA DE BENEFICIAMENTO.

FIG. 10 - SISTEMA DE LAGOAS DE DEPOSIÇÃO CONCEBIDO PARA MINIMIZAR PERCOLAÇÃO DE RESÍDUOS LÍQUIDOS



OBS. - 1 - SOLO COMPACTADO POR TRÁFEGO DE EQUIPAMENTO ROTINEIRO.
 2 - SOLO LANÇADO POR DRAGLINE NA DECAPAGEM DA MINA.
 3 - NÍVEL D'ÁGUA REGIONAL MUITO ABAIXO DA BASE DO DIQUE.

FIG. 11 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE DIQUE OTIMIZADA A PARTIR DO USO DE SOLO LANÇADO POR DRAGLINE

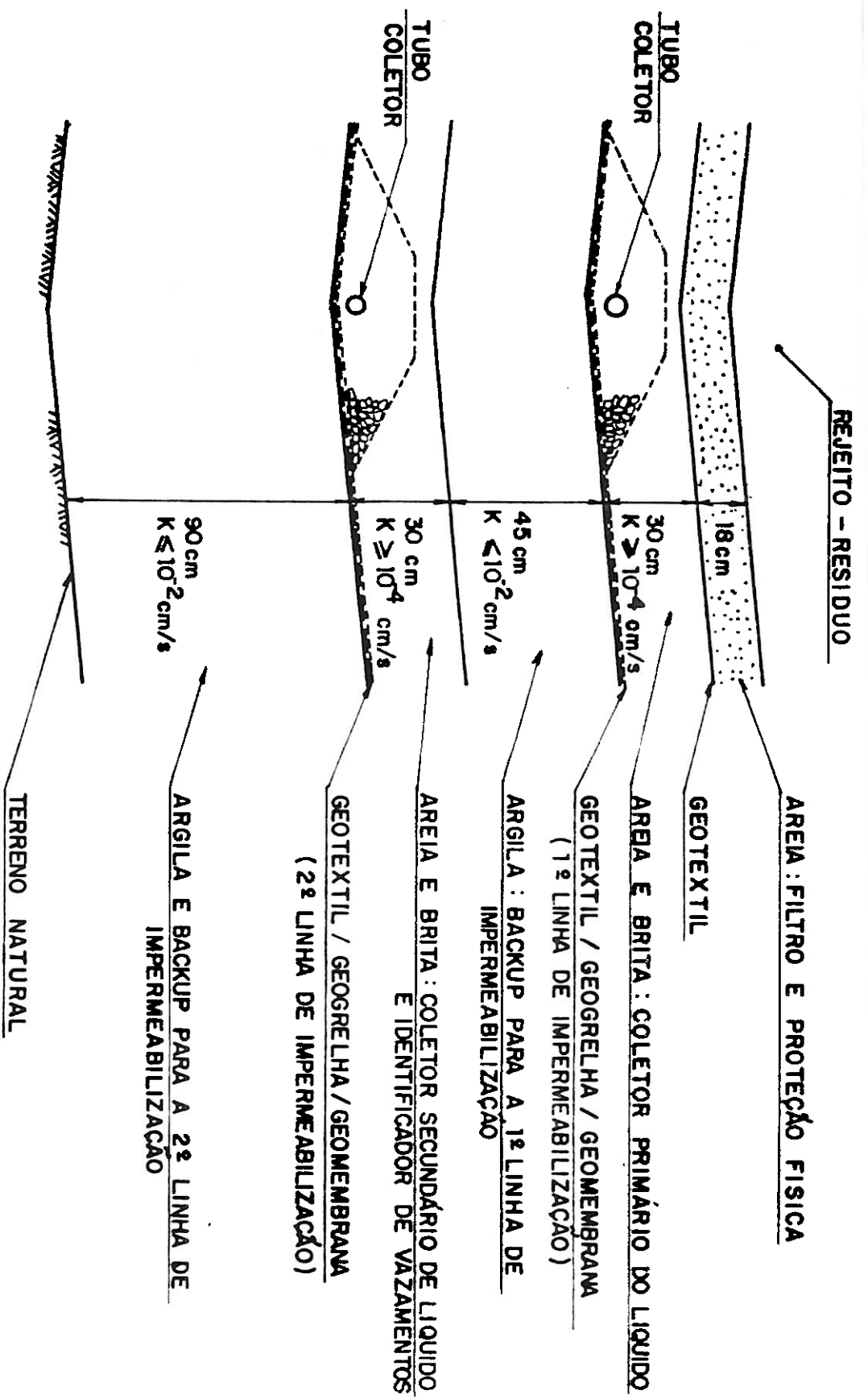
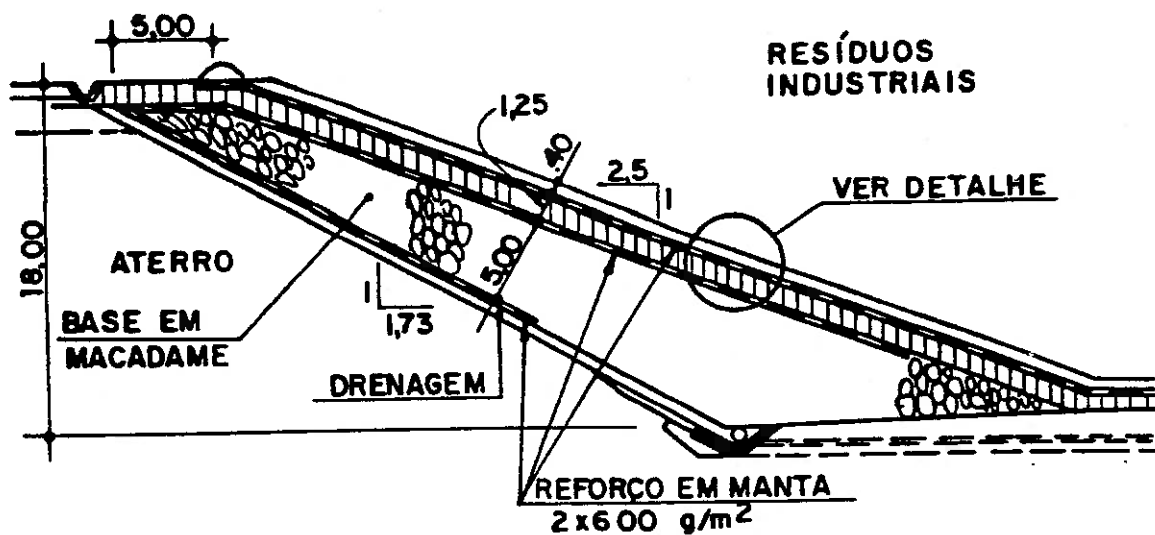
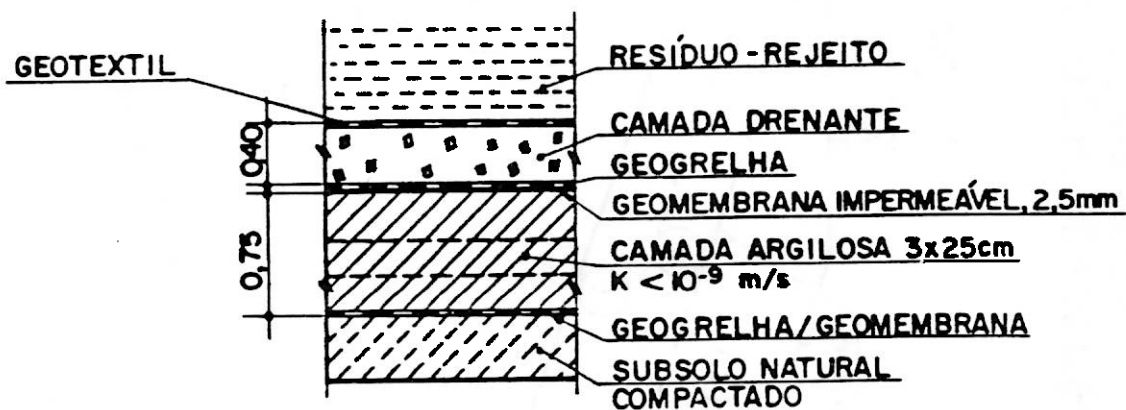


FIG. 12 - "ESTADO DA ARTE" DE SISTEMA DUPLA E COMPOSTO DE REVESTIMENTO DE RESERVATÓRIOS PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS/REJEITOS ATIVOS



SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM



DETALHE

FIG. 13 - CONCEPÇÃO ALEMÃ DE REVESTIMENTO DE RESERVATÓRIO PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS / RESÍDUOS ATIVOS

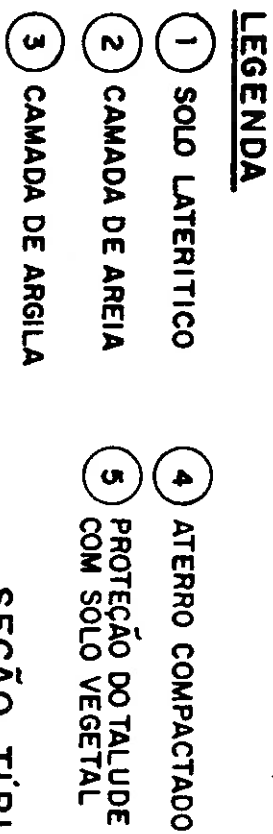


FIG. 14a-IMPERMEABILIZAÇÃO DE RESERVATÓRIO DE REJEITOS DO BENEFICIAMENTO DE BAUXITA

ÁREA DE DISPOSIÇÃO COM
DRENAGEM DE FUNDO
POR GRAVIDADE

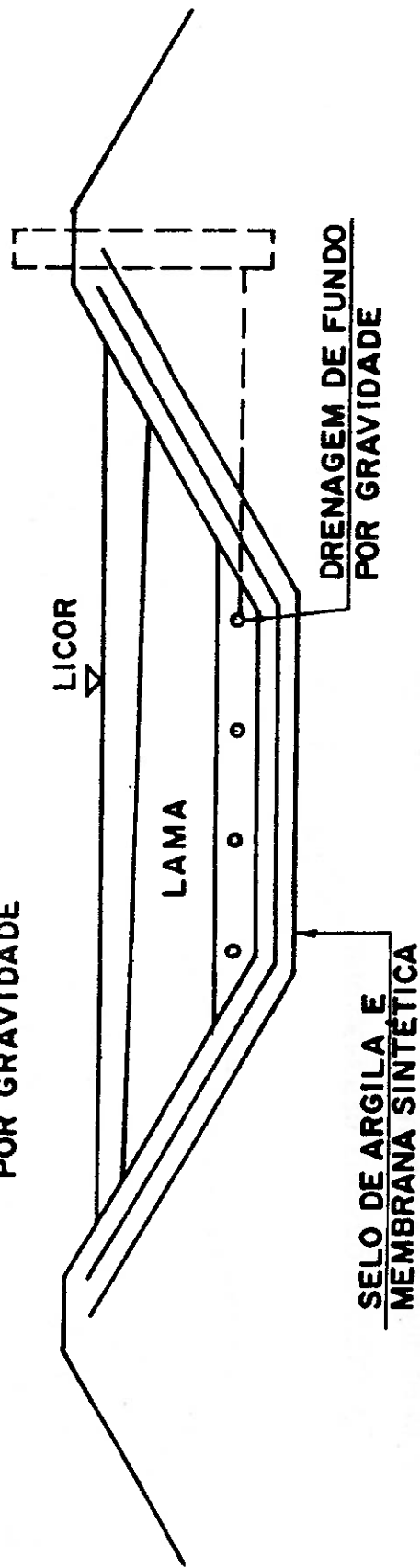


FIG. 14 b - SISTEMA DE DRENAGEM DE FUNDO DE
RESERVATÓRIO DE REJEITOS DE BAUXITA

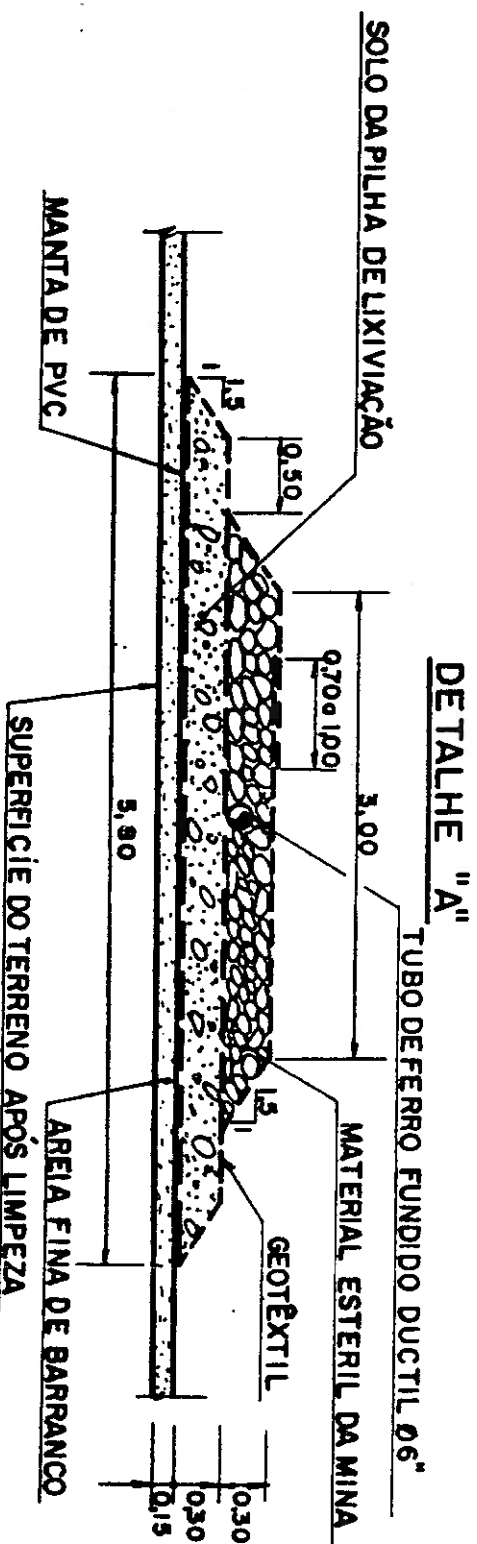
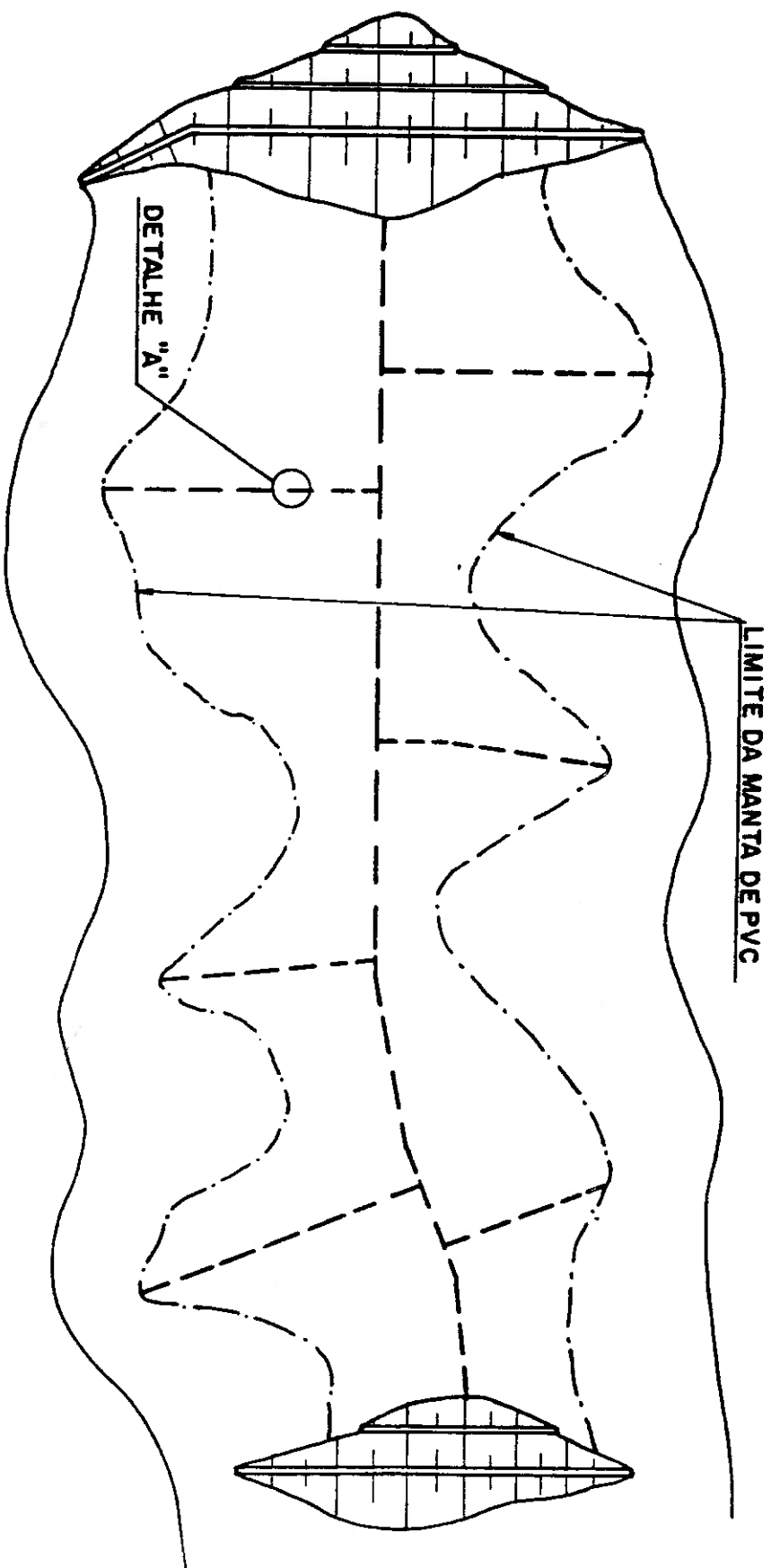
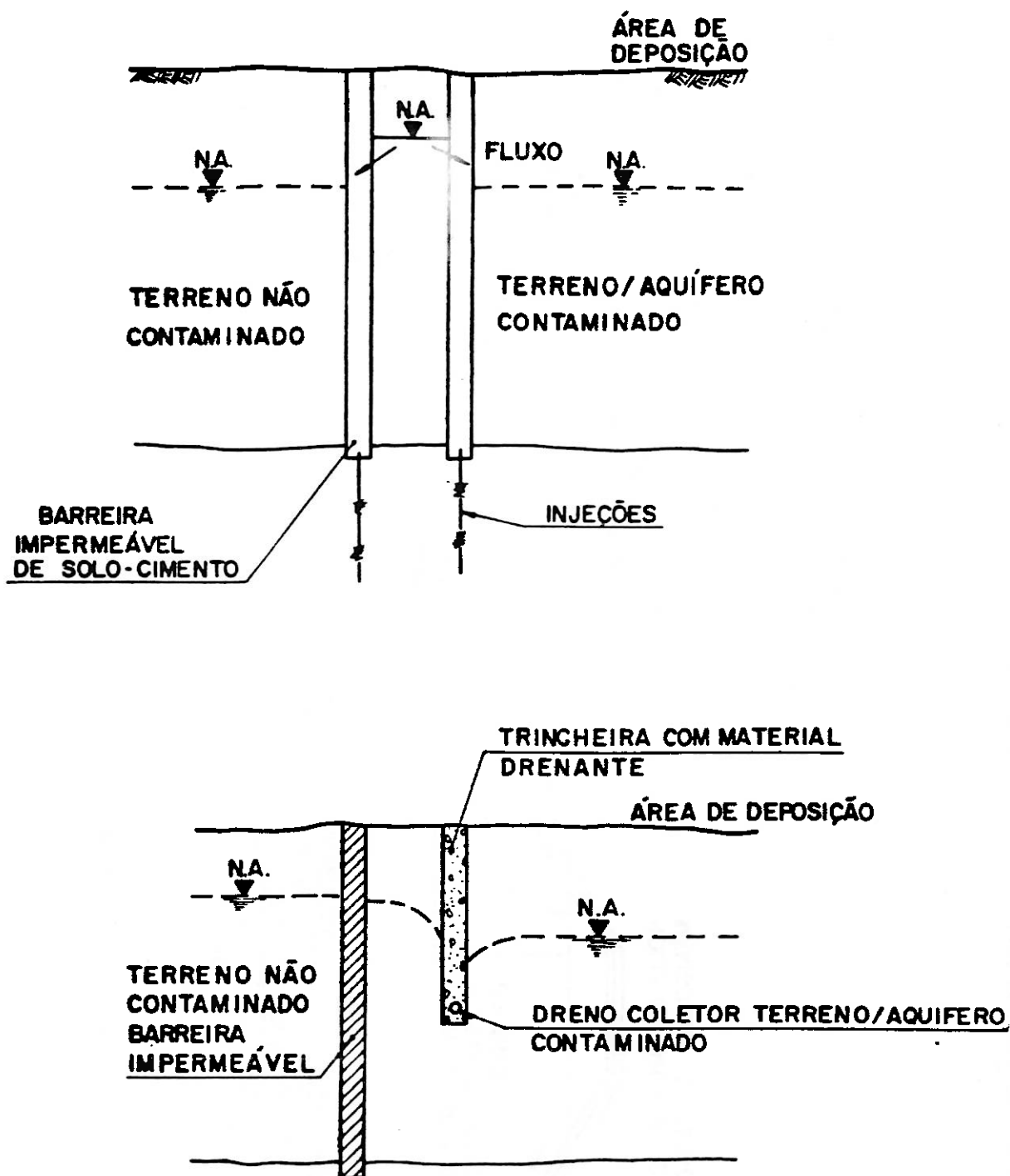


FIG. 15 - SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE RESERVATÓRIO COM USO DE DRENOS DE FUNDO



OBS: 1-BARREIRA IMPERMEÁVEL EXECUTADA COM EQUIPAMENTO DE PAREDES DIAFRAGMA.
 2-IMPERMEABILIZAÇÃO DA ROCHA DE BASE ATRAVÉZ DE INJEÇÕES DE CIMENTO.
 3-NÍVEL DE ÁGUA E FLUXO MANTIDO ARTIFICIALMENTE.

FIG. 16 - BARREIRAS VERTICAIS IMPERMEÁVEIS

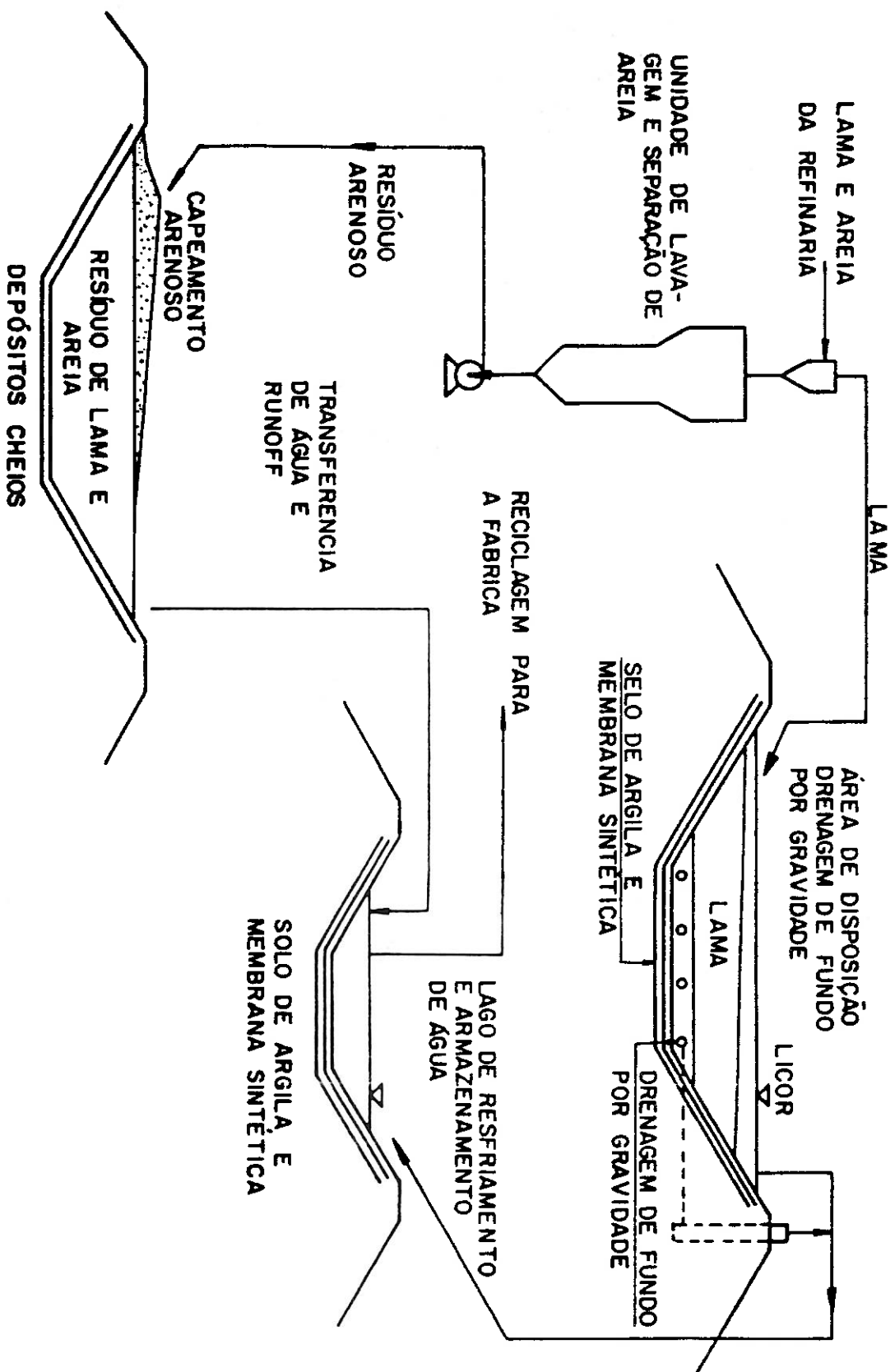


FIG. 17 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE OPERAÇÃO DE BENEFICIAMENTO COM RETORNO DO LICOR POR DRENAGEM DE FUNDO

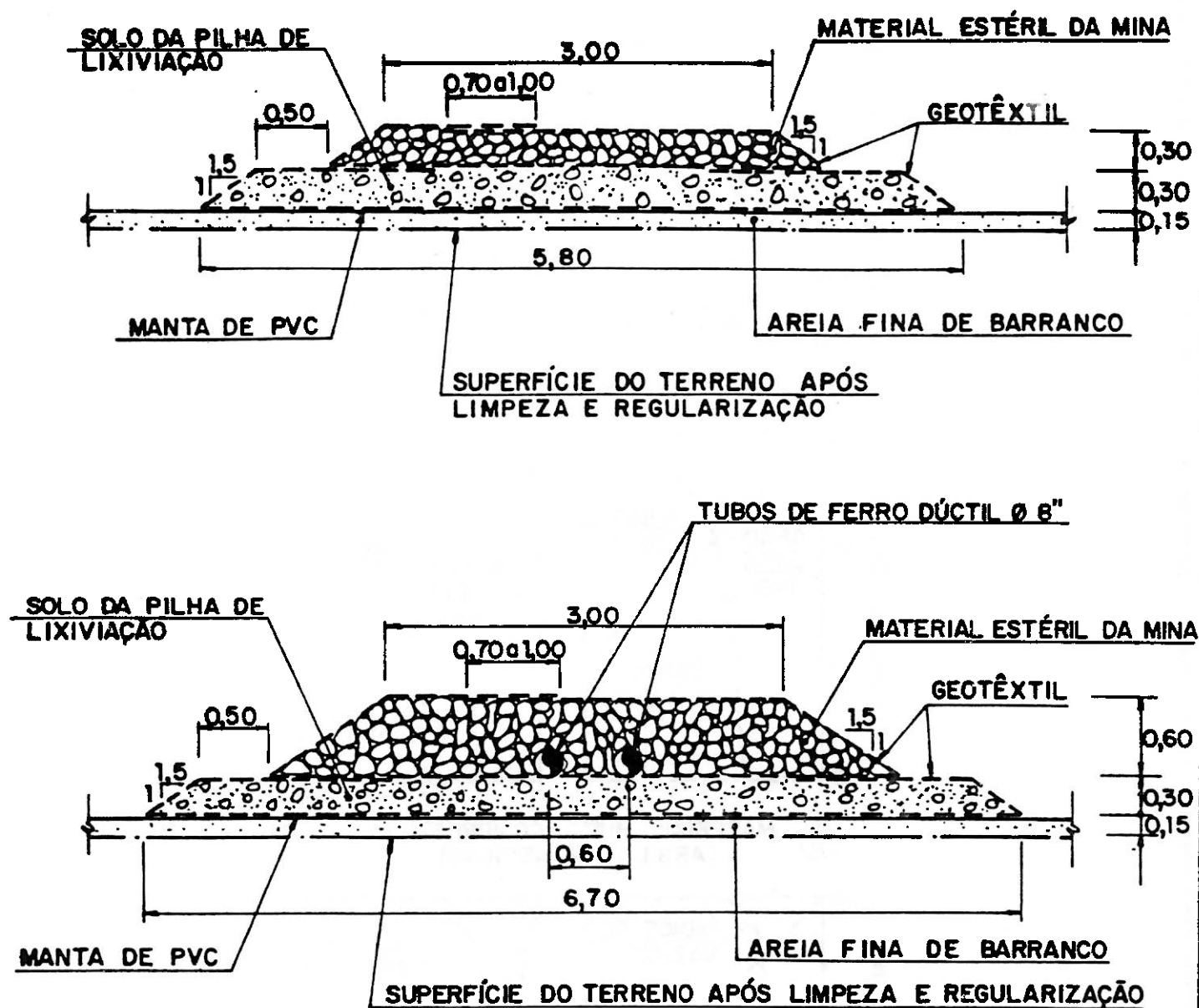


FIG. 18 - DETALHES DE DRENAGEM DE FUNDO DE RESERVATÓRIO

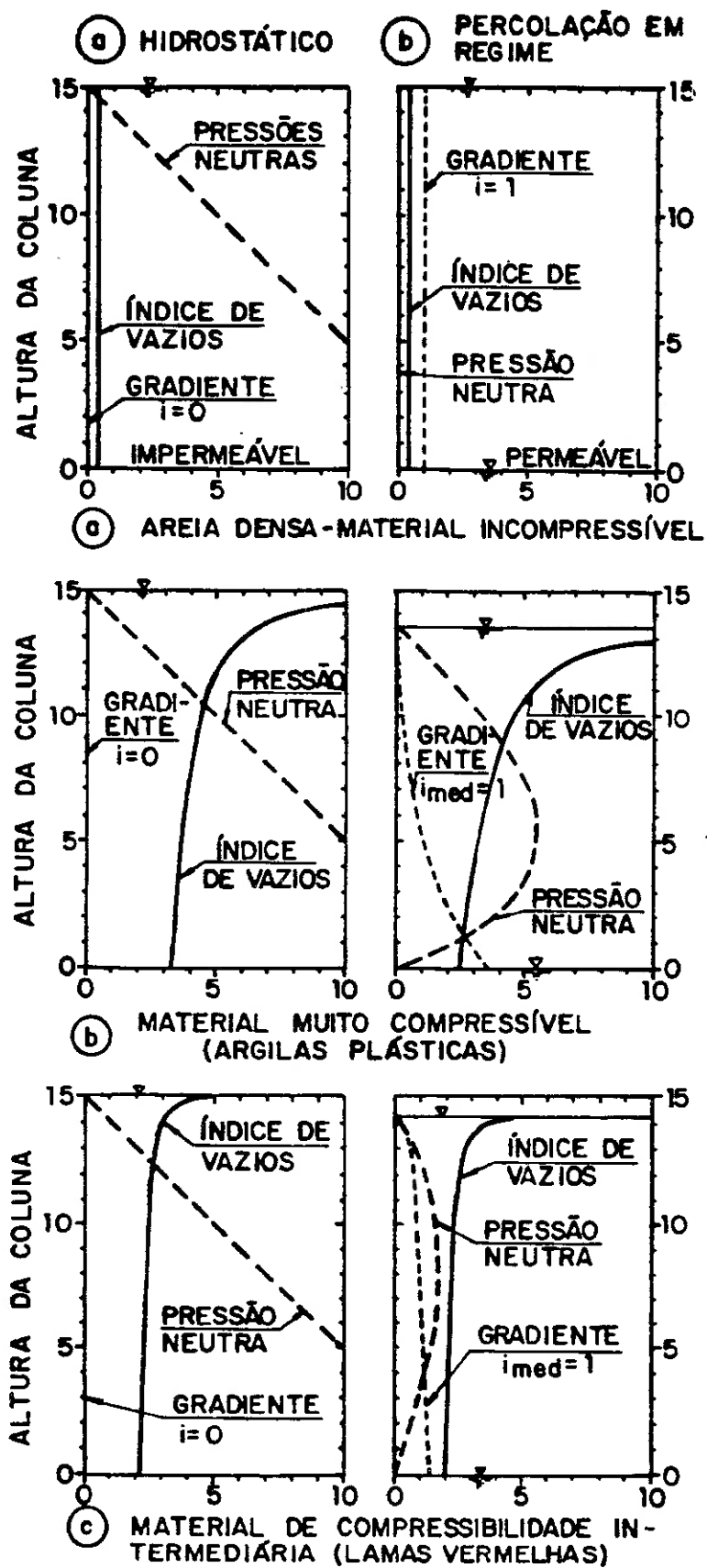
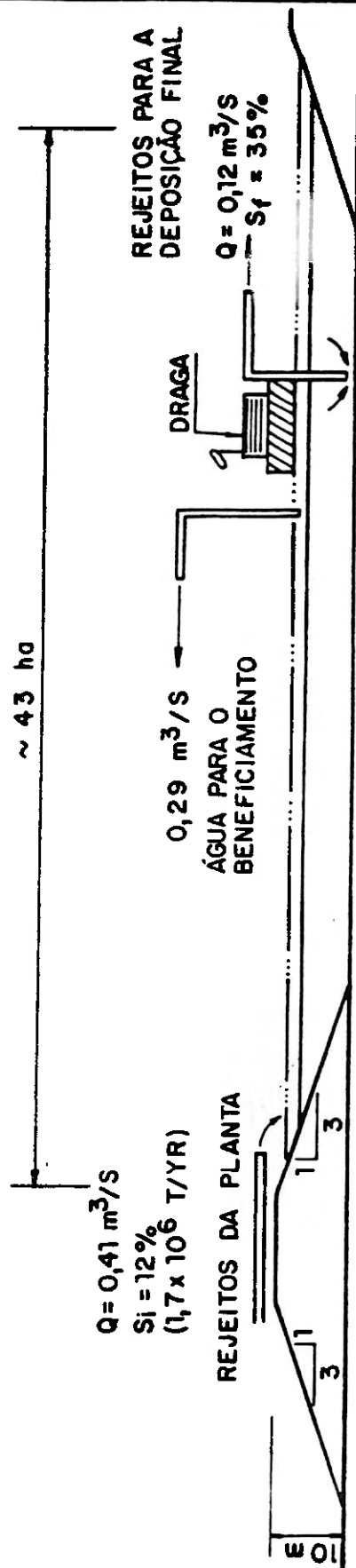


FIG. 19 - DRENAGEM DE FUNDO DE RESERVATÓRIOS

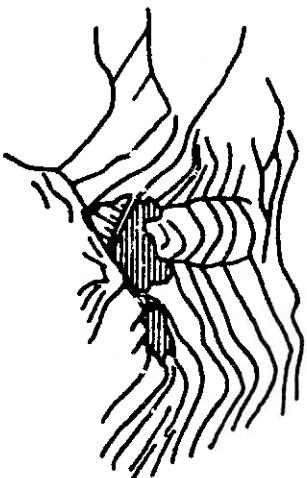
RESERVATÓRIO DE REJEITOS DILUÍDOS



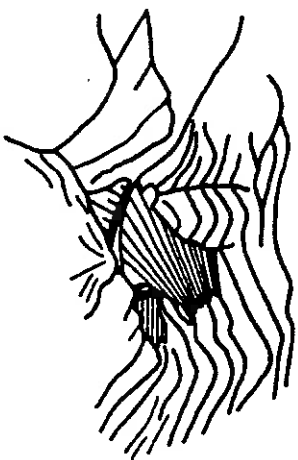
OBS.

- 1) OS REJEITOS DILUÍDOS SÃO LANÇADOS NO RRD.
- 2) APÓS PERMANÊNCIA DE TEMPO DE 6 MESES O ADENSAMENTO NATURAL SOB PESO PRÓPRIO JÁ ATINGE UM ALTO TEOR DE SÓLIDOS, COM O REJEITO AINDA BOMBEÁVEL.
- 3) A ÁGUA LIBERADA PELO ADENSAMENTO RETORNA À PLANTA DE BENEFICIAMENTO E OS REJEITOS ESPESADOS SÃO BOMBEADOS PARA A ÁREA DE DEPOSIÇÃO DEFINITIVA.
- 4) O DIMENSIONAMENTO ADEQUADO DO RRD (ÁREA E PROFUNDIDADE) PERMITE QUE O SISTEMA TRABALHE EM EQUILÍBRIO.

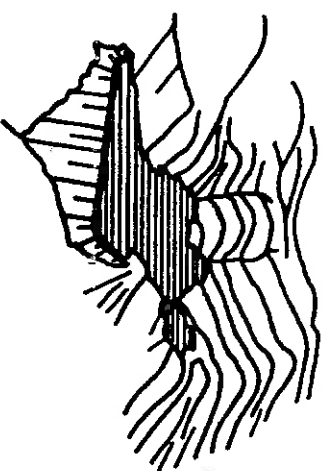
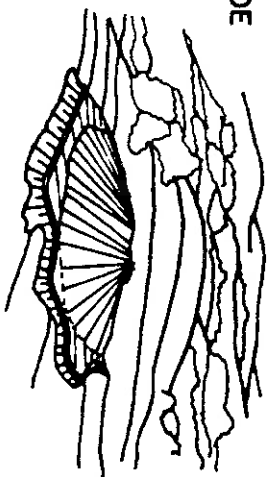
FIG. 20 - BALANÇO LÍDRICO DO RESERVATÓRIO DE REJEITOS DILUÍDOS DE POSTO TROMBETAS - MRN



RESERVATÓRIO EXISTENTE,
CAPACIDADE DE ESTOCAGEM
LIMITADA PELA ALTURA
DA BARRAGEM



SISTEMA DE DESCARGA DE
REJEITOS ESPESSADOS;
VIDA ÚTIL AUMENTADA,
TALUDES INCLINADOS
~6%, RECUPERAÇÃO DE
LICORES NA BASE
(é a função da vazão
de deposição e do
tipo de material)



SISTEMA CONVENCIONAL DE
ALTEAMENTO DA BARRAGEM
PARA AUMENTAR A
VIDA ÚTIL

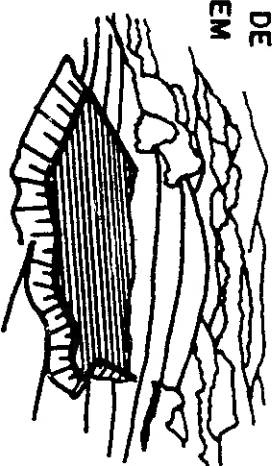
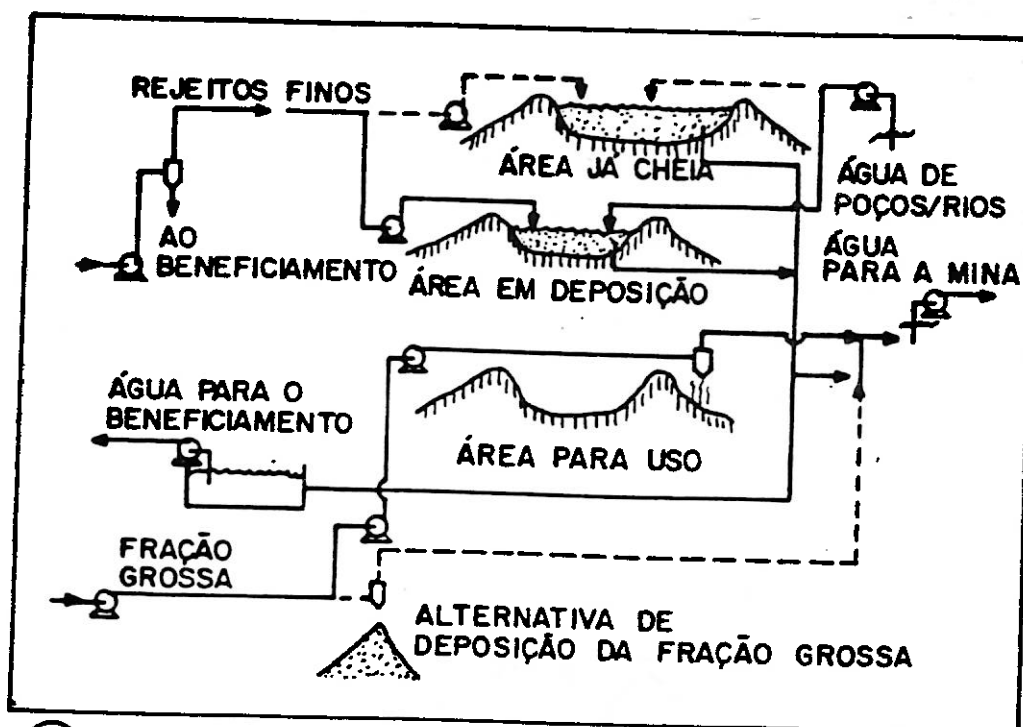
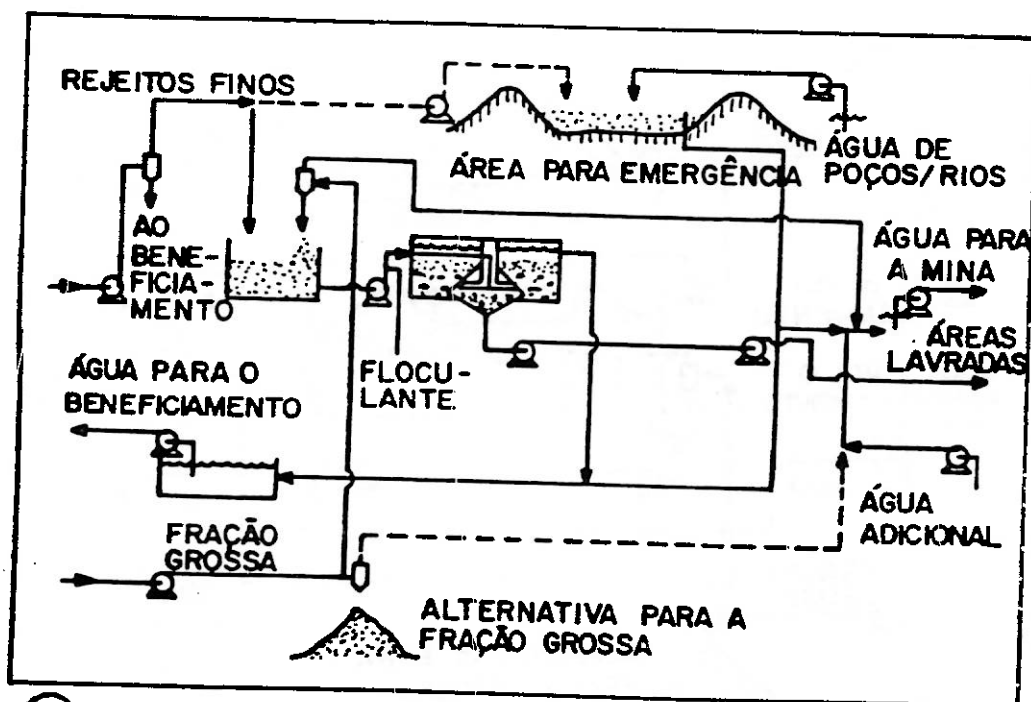


FIG. 21- VANTAGEM DO USO DE DESCARGA DE REJEITOS ESPESSADOS

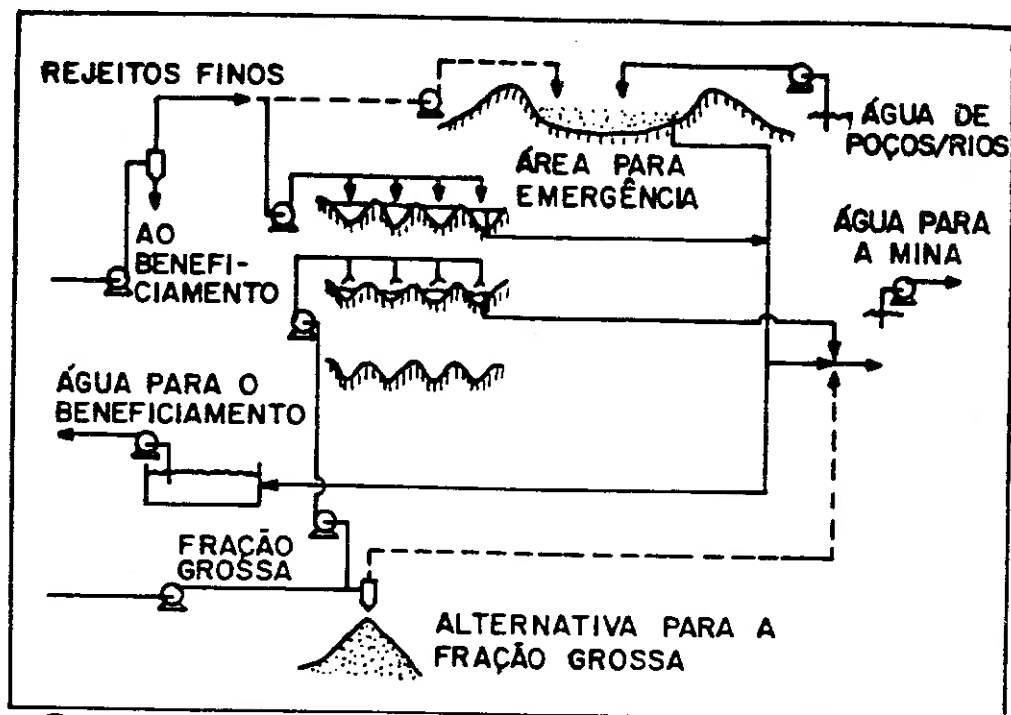


(a) SISTEMA CONVENCIONAL

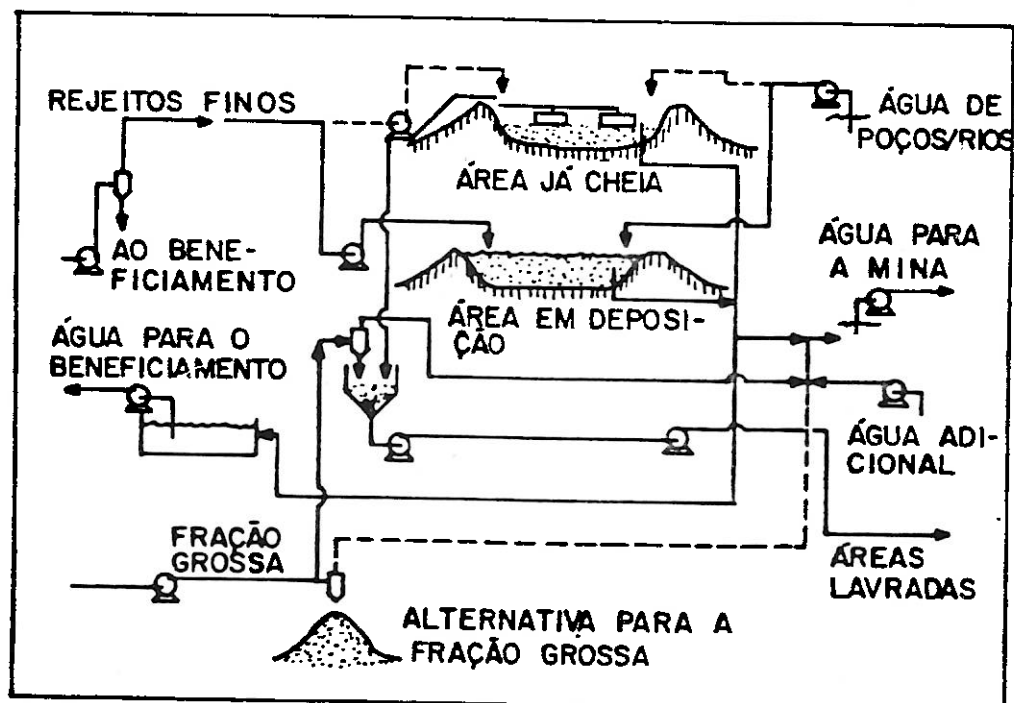


(b) SISTEMA DE ESPESSADORES COM FLOCULANTES

FIG. 22 - FLUXOGRAMAS DE ALTERNATIVAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS



(a) JATEAMENTO COM A FRAÇÃO GROSSA (AREIAS)



(b) PRE-ESPESSAMENTO E MISTURA COM A FRAÇÃO GROSSA

FIG. 23 - FLUXOGRAMAS DE ALTERNATIVAS DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS