

EDUARDO TADEU PÔSSAS VAZ DE MELLO
ANTÔNIO CLÁUDIO ANDRADE BRUM
IGOR ALMEIDA FASSARELLA
EDUARDO ALMEIDA VENEROSO
ANA CLARA MARTINS SALONIKIO

**ANÁLISE TÉCNICA DA DEFORMAÇÃO EXCESSIVA DA
TUBULAÇÃO DE AÇO CORRUGADO DO SISTEMA DE DRENAGEM
DE PILHA DE ESTÉRIL, EM UMA MINERADORA SITUADA NO
ESTADO DE MINAS GERAIS**

Trabalho de Perícia

Goiânia/GO
2021

ANÁLISE TÉCNICA DA DEFORMAÇÃO EXCESSIVA DA TUBULAÇÃO DE AÇO CORRUGADO DO SISTEMA DE DRENAGEM DE PILHA DE ESTÉRIL, EM UMA MINERADORA SITUADA NO ESTADO DE MINAS GERAIS

RESUMO

Este trabalho se refere a um caso real, mais precisamente uma perícia técnica de engenharia, que teve como objetivo a determinação dos principais eventos que causaram a deformação da tubulação do sistema de drenagem de uma pilha de estéril de uma empresa de mineração situada no estado de Minas Gerais. O sistema de drenagem da pilha de estéril foi executado em duas etapas. A primeira etapa abrangia 452,10 m de tubulação. Já a segunda etapa compreendia 169,88 m de tubulação e foi executada aproximadamente dois anos após a conclusão da primeira etapa. Aproximadamente três anos após a finalização da segunda etapa, foram detectados os primeiros sinais de deformação da tubulação do sistema de drenagem da pilha de estéril. Tal deformação ultrapassou os limites toleráveis e se caracterizava pela redução da altura (diâmetro vertical) e aumento da largura (diâmetro horizontal) da tubulação em diversos trechos. Além disso, foram identificados rompimentos de costuras, cisalhamento de parafusos e infiltrações nos tubos. É importante destacar que, principalmente após o rompimento da barragem da mineradora Vale em Brumadinho-MG, no ano de 2019, especial atenção deve ser concentrada em problemas e manifestações patológicas que porventura venham a surgir em quaisquer das etapas do processo de mineração.

Palavras-chave: Drenagem; Mineração; Perícia; Pilha de estéril; Tubulação.

1. Dados Gerais sobre a Mina e o Sistema de Drenagem das Pilhas de Estéril

A mina, na qual ocorreu a deformação excessiva dos tubos do sistema de drenagem da pilha de estéril, se localiza no estado de Minas Gerais e utiliza o método de lavra a céu aberto.

Em razão da proximidade dessa mina com o perímetro urbano do município, a deformação do sistema de drenagem exigiu uma análise técnica criteriosa para se impedir a ruptura total desse sistema e, por conseguinte, evitar que os moradores do entorno da mina ficassem expostos a quaisquer situações de risco. Convém ressaltar que o sistema de drenagem é um elemento essencial para garantir a estabilidade e segurança da pilha de estéril.



Figura 1 – Imagem de satélite da mina.
Fonte: Google Earth.

O estéril do processo de mineração pode ser definido como todo material não aproveitável como minério e, por isso, descartado pela operação de lavra antes do beneficiamento. As pilhas de estéril são, portanto, aterros constituídos por estes materiais e, por conseguinte, pela sua própria natureza, são obras geotécnicas bastante complexas tanto pela heterogeneidade do material quanto pelo processo construtivo.

O sistema de drenagem da pilha de estéril era composto por um canal de escoamento com extensão total de 621,98 m formado por tubos de aço corrugado com diâmetro de 1,80 metros e espessura de chapa variável, ou seja:

- ✓ espessura de 2,70 mm para pilha de estéril com altura de 22,00 m;
- ✓ espessura de 3,40 mm para pilha de estéril com altura de 29,10 m;
- ✓ espessura de 4,70 mm para pilha de estéril com altura de 44,50 m;
- ✓ espessura de 6,30 mm para pilha de estéril com altura de 59,10 m;
- ✓ espessura de 8,00 mm para pilha de estéril com altura de 78,00 m.

2. Informações Técnicas dos Tubos de Drenagem

Desenvolvidos nos Estados Unidos com tecnologia exclusiva de projeto e produção, os sistemas construtivos MP100 / MP152 e MP152S são fabricados em aço corrugado de alta eficiência e resistência estrutural, que associam economia, versatilidade e rapidez na montagem, reduzindo custos e prazos de entrega das obras. É a solução mais rápida e econômica para obras de infraestrutura, largamente empregada em sistemas de construção viária, drenagem, saneamento e mineração. As principais aplicações são em drenagem de águas pluviais, canalização de córregos e rios, e diversas aplicações em mineração.

Em relação às normas técnicas, as tabelas e catálogos foram elaborados obedecendo às normas da AASHTO - “American Association of State Highway and Transportation Officials” (seção 12), ASTM - “American Society for Testing and Materials” (A153, A449, A761, A796), e AISI - American Iron and Steel Institute (Handbook of steel damage and construction products).

Para o cálculo das alturas de aterro da tubulação, foram considerados os procedimentos de cálculo recomendados pela AISI - American Iron and Steel Institute, e os seguintes parâmetros:

- Peso específico do terreno: 1.922 kg/m³;
- Compactação de no mínimo 85% do Proctor normal;
- Tipo de solo recomendado para o aterro: A2-4 (areia ou pedregulho siltoso ou argiloso, com o máximo de 35%, passando na peneira nº 200);
- Tensão admissível do aço adotado: 2.320kg/cm²;
- Alturas máximas de recobrimento para uso em rodovias (trem tipo H20), e para uso em ferrovias (trem tipo E80);
- Taxa de compressão admissível no solo adjacente às chapas de canto não circulares: 3kg/cm².

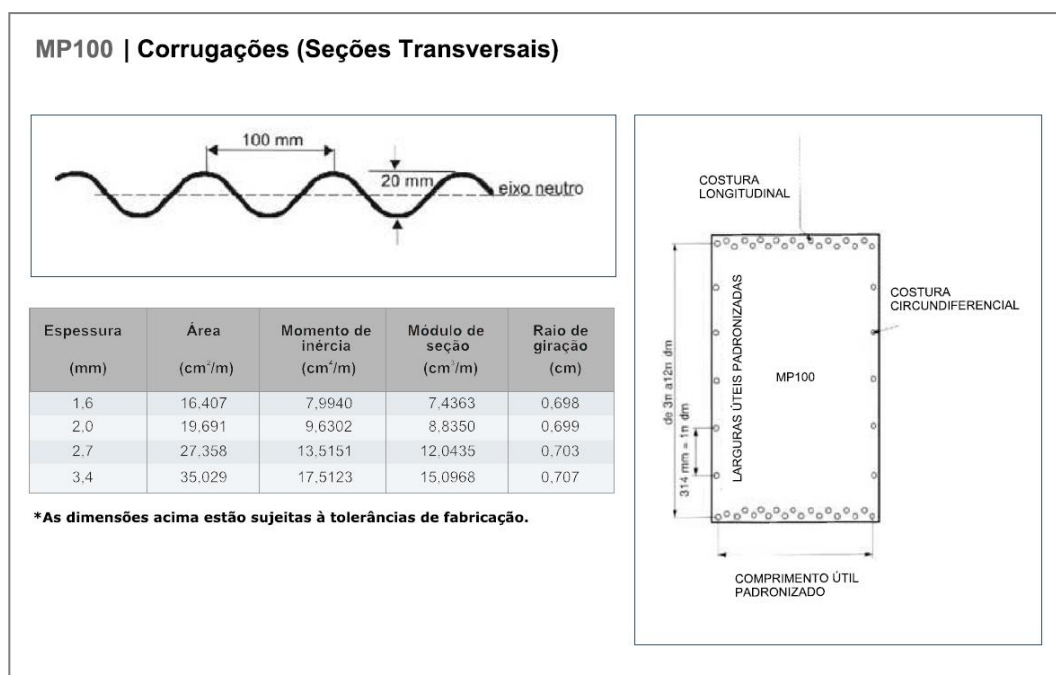


Figura 2 – Corrugações (seções transversais) da tubulação MP100.
Fonte: Catálogo do fabricante.

MP152 | Corrugações (Seções Transversais)

Espessura (mm)	Área (cm ² /m)	Momento de inércia (cm ⁴ /m)	Módulo de seção (cm ³ /m)	Raio de giro (cm)
2,7	30,996	93,0537	34,9169	1,733
3,4	39,697	119,7643	44,3572	1,737
3,9	46,541	140,9898	51,6919	1,741
4,7	55,884	170,3003	61,5914	1,746
6,5	78,358	242,5805	84,9669	1,759
7,2	87,117	271,5110	93,9484	1,765

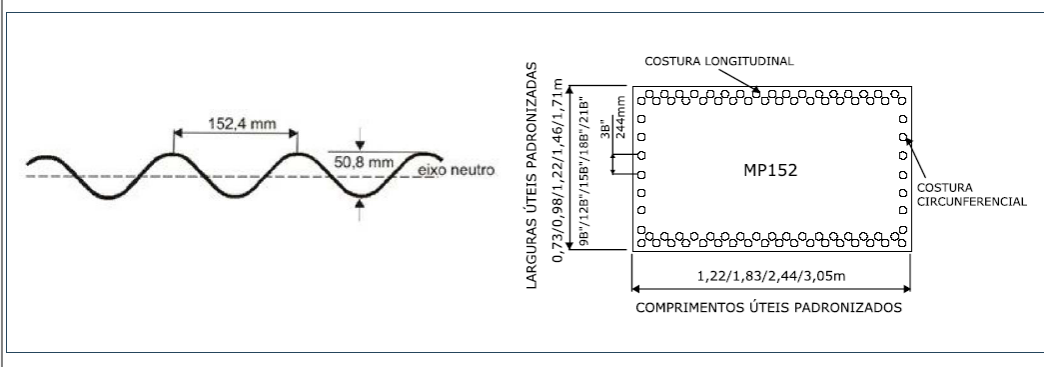


Figura 3 – Corrugações (seções transversais) da tubulação MP152.
Fonte: Catálogo do fabricante.

A durabilidade das estruturas de aço corrugado é função das condições ambientais, do tipo de revestimento e, em certos casos, da espessura de chapa.

As condições ambientais, tais como: pH e condutividade do solo e da água, temperatura, sais solúveis e grau de turbulência do fluido, bem como o grau de abrasividade do fluxo, são os fatores determinantes da durabilidade da estrutura.

Em relação à galvanização, a combinação favorável destes fatores, maioria dos casos em que não existe poluição por esgotos ou despejos industriais, implica na adoção de revestimento galvanizado. A galvanização por imersão a quente é um revestimento de zinco de 910g/m², que interage com o meio, sendo o zinco sacrificado ao longo dos anos em função da agressividade para dar proteção ao metal base.

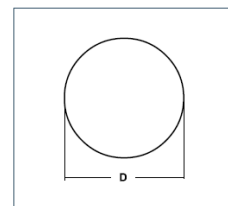
O revestimento dos tubos, em epoxy, é formado por uma película com espessura média de 150p aplicada sobre a chapa previamente fosfatizada. Esta película protege o aço contra os agentes corrosivos, isolando-o do meio agressivo.

MP100 | Circular | Dimensões

Diâmetro D(m)
0,60
0,70
0,80
0,90
1,00
1,10
1,20
1,30
1,40
1,50
1,60
1,70
1,80
1,90
2,00
2,10
2,20
2,30
2,40
2,50
2,60
2,70
2,80

Modelo	Área (m²)	Perímetro (m)
6 C	0,28	1,88

Altura de Aterro (m)												
Rodovia						Ferrovia						
Mínima	Máxima				Mínima				Máxima			
	Espessura (mm)				Espessura (mm)				Espessura (mm)			
	1,6	2,0	2,7	3,4	1,6	2,0	2,7	3,4	1,6	2,0	2,7	3,4
0,30	18,00	22,00	32,30	43,40	0,60	0,60	0,60	0,60	18,00	22,00	32,30	43,40



- O produto é fornecido em comprimentos múltiplos de 1,00m, acompanhado dos parafusos e porcas necessários à montagem.
- Outras dimensões poderão ser projetadas mediante consulta.
- Todas as dimensões estão sujeitas a tolerâncias de fabricação.
- As espessuras apresentadas nesta tabela são para aço revestido.

Parâmetros para Cálculo das Alturas de Aterro

Para o cálculo das alturas de aterro, foram considerados os procedimentos de cálculo recomendados pela AISI - American Iron and Steel Institute, e os seguintes parâmetros:

- Peso específico do terreno: 1.922 kg/m³ ;
- Compactação de no mínimo 85% do Proctor normal;
- Tipo de solo recomendado para o aterro: A2-4 (areia ou pedregulho siltoso ou argiloso, com o máximo de 35%, passando na peneira nº 200);
- Tensão admissível do aço adotado: 2.320kg/cm² ;
- Alturas máximas de recobrimento para uso em rodovias (trem tipo H2O), e para uso em ferrovias (trem tipo E80);
- Taxa de compressão admissível no solo adjacente às chapas de canto não circulares: 3kg/cm² .

Figura 4 – Dimensões da tubulação MP100.
Fonte: Catálogo do fabricante.

MP152 | Circular | Dimensões

Diâmetro D(m)
1,50
1,80
1,90
2,15
2,30
2,65
3,05
3,20
3,40
3,65
3,80
4,20
4,60
4,80
5,00
5,35
5,70
6,10
6,50
6,85
7,25

Modelo	Área (m²)	Perímetro (m)
60 C	1,90	4,88

Altura de Aterro (m)							
Mínima		Máxima					
		Rodovia e Ferrovia					
		Espessura (mm)					
Rodovia	Ferrovia	2,7	3,4	3,9	4,7	6,5	7,2
0,30	0,60	25,40	34,20	41,50	52,20	73,30	73,40

- O produto é fornecido em comprimentos múltiplos de 0,61m, acompanhado dos parafusos e porcas necessários à montagem.
- Outras dimensões poderão ser projetadas mediante consulta.
- Todas as dimensões estão sujeitas a tolerâncias de fabricação.
- As espessuras apresentadas nesta tabela são para aço revestido.
- * Nas estruturas indicadas, usar espessura 3,4mm, sob trem tipo ferroviário.
- ** Nas estruturas indicadas, usar espessura 4,7mm, sob trem tipo ferroviário.

Parâmetros para Cálculo das Alturas de Aterro

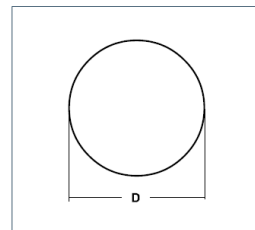


Figura 5 – Dimensões da tubulação MP152.
Fonte: Catálogo do fabricante.

MP152 | Circular | Dimensões

Parâmetros para Cálculo das Alturas de Aterro

Para o cálculo das alturas de aterro, foram considerados os procedimentos de cálculo recomendados pela AISI - American Iron and Steel Institute, e os seguintes parâmetros:

- a) Peso específico do terreno: 1.922 kg/m^3 ;
- b) Compactação de no mínimo 85% do Proctor normal;
- c) Tipo de solo recomendado para o aterro: A2-4 (areia ou pedregulho siltoso ou argiloso, com o máximo de 35%, passando na peneira nº 200);
- d) Tensão admissível do aço adotado: 2.320 kg/cm^2 ;
- e) Alturas máximas de recobrimento para uso em rodovias (trem tipo H20), e para uso em ferrovias (trem tipo E80);
- f) Taxa de compressão admissível no solo adjacente às chapas de canto não circulares: 3 kg/cm^2 .

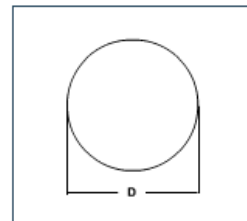


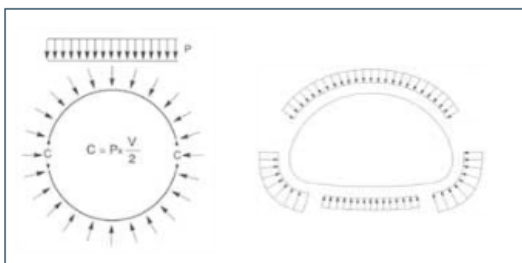
Figura 6 – Dimensões da tubulação MP152.
Fonte: Catálogo do fabricante.

MP152S | Dimensionamento Estrutural e Hidráulico

Dimensionamento Estrutural

As estruturas de aço corrugado dos sistemas construtivos MP100 e MP152 suportam aterros de pequenas e grandes alturas sob rodovias, ferrovias e aeroportos. Estas estruturas são flexíveis e suportam parte do carregamento, sendo a outra parte suportada pelo solo que as confina. O trabalho da estrutura sob carregamento tende a um aumento mínimo da sua dimensão horizontal, trazendo para si a resistência passiva do solo adjacente, que por sua vez impede maior deformação e ajuda a suportar o carregamento vertical, daí a importância do aterro bem executado.

Pesquisas norte-americanas demonstraram já na década de 50, que nas estruturas de aço corrugado, a pressão circundante e uniformemente distribuída é igual à pressão vertical atuante (carga viva + carga morta). A partir dessas pesquisas foi então formulada a "Teoria do Anel de Compressão". Desta forma, os esforços de compressão atuantes nas chapas de aço são calculados conforme indicado abaixo:



Onde:

C = Compressão Anelar
P = Pressão Atuante (CV + CM)
V = Vão da Estrutura

No dimensionamento estrutural, após a determinação da espessura necessária do aço, são verificadas a flexibilidade limite para a qual não ocorrerão deformações durante a instalação da estrutura, e também a resistência das emendas aparafusadas.

Na forma lenticular, além das verificações acima descritas, é verificada também a pressão transmitida ao solo adjacente às chapas de canto, em função da concentração de tensões nesta região.

Dimensionamento Hidráulico

Figura 7 – Dimensionamento estrutural e hidráulico dos tubos.
Fonte: Catálogo do fabricante.

MP152S | Dimensionamento Estrutural e Hidráulico

Dimensionamento Hidráulico

Os bueiros de aço corrugado empregados em drenagem, são usualmente dimensionados como canais, utilizando a equação de Manning:

O coeficiente de rugosidade é função da corrugação. Os valores médios recomendados são os da tabela abaixo:

$$Q = A \times \left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{\sqrt{i}}{n}\right)$$

Corrugação	n
MP100	0,021
MP152	0,024
Revestida com concreto	0,015

Onde:

Q= vazão (m³/s)

A= área molhada (m²)

P= perímetro molhado (m)

i= declividade (m/m)

n= coeficiente de rugosidade

Bueiros Circulares

Substituindo na equação de Manning, os valores de A e P encontrados na seção plena, isto é:

$$A=B \times \frac{D^2}{4} \quad e \quad P=B \times D$$

teremos a vazão para a seção plena, expressa em função do diâmetro:

$$Q_{plena} = 0,3117 \times D^{\frac{8}{3}} \times \frac{\sqrt{i}}{n}$$

A vazão máxima em estruturas circulares, conforme demonstrado no "Manual de Drenagem de Rodovias" do DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ocorre quando o tirante (t) se encontra a 93,8% do diâmetro:

$$Q_{max} = 0,335 \times D^{\frac{8}{3}} \times \frac{\sqrt{i}}{n}, \text{ para } t = 0,938 D.$$

Bueiros Não-Circulares

Para o cálculo da vazão plena, deve-se utilizar os valores da área e perímetro constantes nas tabelas deste catálogo. A vazão máxima é aproximadamente 8% maior que a vazão da seção plena, isto é: **Q_{máx.} = 1,08 x Q plena**

Em obras curtas, onde a geometria e as condições de entrada e represamento d'água são mais relevantes do que a rugosidade do bueiro, o dimensionamento hidráulico é usualmente efetuado por métodos de controle (entrada/saída), com auxílio dos ábacos da circular nº5 do "Bureau Of Public Roads", encontrados no "Manual de Drenagem de Rodovias" do DNIT.

Figura 8 – Dimensionamento estrutural e hidráulico dos tubos.

Fonte: Catálogo do fabricante.

Em relação à montagem e acabamento as estruturas MP100 e MP152 são despachadas para as obras em condições de serem facilmente montadas e instaladas. Por serem mais leves e flexíveis que as estruturas equivalentes compostas de outros materiais, as estruturas MP100 e MP152 são assentadas sobre fundações mais simples e de menor custo, e dispensam o uso de equipamentos pesados.

A montagem das estruturas é de progressão rápida, reduzindo assim o tempo de entrega da obra. A versatilidade do MP100 e MP152 permite a sua instalação em regiões de difícil acesso. Para a sua correta montagem e instalação é fornecido o Manual "INSTRUÇÕES DE MONTAGEM", junto com o material entregue na obra.

3. Análise Técnica da Montagem da Tubulação e da Execução do Aterro Envoltório

A tubulação de aço corrugado utilizada no sistema de drenagem da pilha de estéril caracteriza-se por ser uma estrutura enterrada flexível, ou seja, aquela em que parte da carga que é imposta ao sistema (tubulação e aterro envoltório), ou através do peso próprio do aterro ou das cargas externas (permanentes e móveis), é transmitida para o solo empregado no aterramento da tubulação.

Até 90 % da carga imposta ao sistema tubulação + aterro envoltório é repassada ao material utilizado na formação de tal aterro. Portanto, os tubos não têm a função principal de absorver e suportar as cargas provenientes das pilhas de estéril depositadas sobre o sistema de drenagem, pois esta tarefa deve ficar a cargo do solo utilizado no aterramento da tubulação.

Daí a necessidade de se executar com elevado critério todos os procedimentos técnicos necessários para a construção correta do aterro envoltório da tubulação.

O projeto de construção do sistema de drenagem da pilha de estéril definiu as seguintes premissas para execução do aterro envoltório da tubulação:

- a) envoltória com altura de 4,00 m (quatro metros) acima da geratriz superior do tubo, e largura de “dimensão praticável” nas laterais;
- b) aterro de solo compactado em camadas de 0,20 m (vinte centímetros);
- c) aterro compactado com GC > 95 PN (grau de compactação maior que 95 % Proctor Normal) até, no mínimo, uma altura de 4,00 m (quatro metros) acima da geratriz superior do tubo.

Convém ressaltar que o grau de compactação do aterro é inversamente proporcional ao coeficiente de carga “K” transmitido à tubulação de aço. Para um grau de compactação de 95% (mínimo exigido no projeto) tem-se um coeficiente de carga “K” igual a 0,65. Caso o grau de compactação não seja tão rigoroso e atinja, por exemplo, o patamar de 80 %, o valor de “K” sobe para 0,99, aproximadamente. A figura reproduzida na página seguinte apresenta o gráfico que relaciona a compactação do solo com o coeficiente “K”.

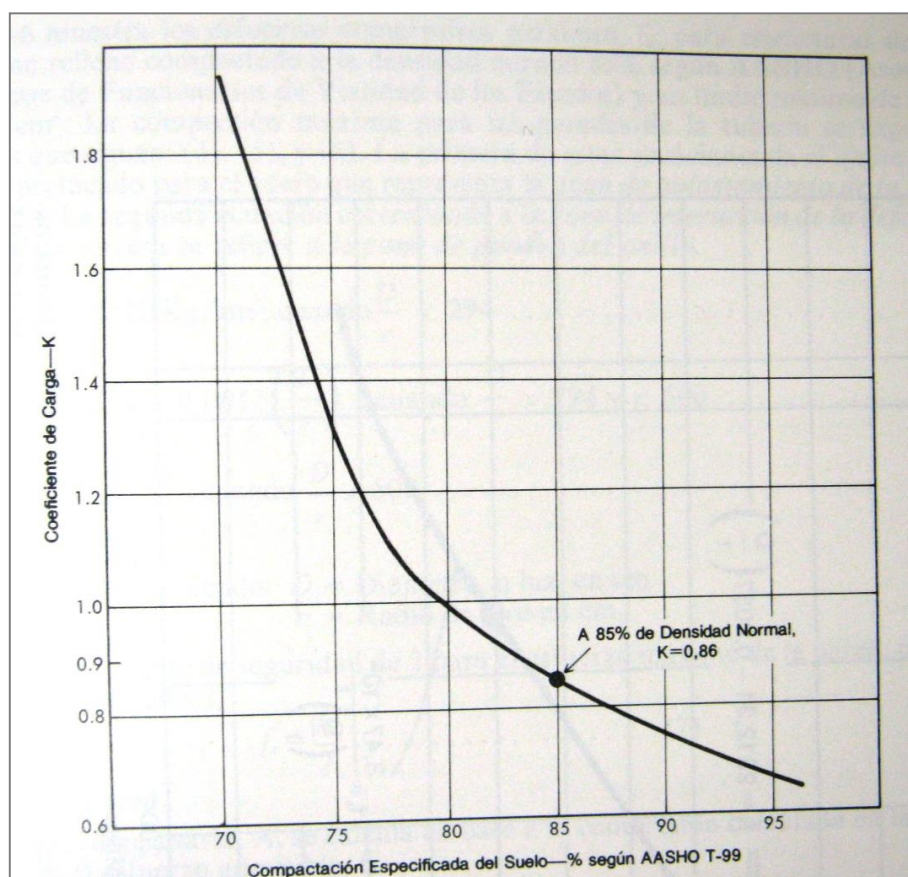


Figura 9 – Coeficientes de carga para tubos de aço para cobertura compactada até a densidade normal.

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

A performance da estrutura constituída pela tubulação e pelo aterro envoltório depende principalmente da qualidade do material empregado em tal aterro e da sua correta e criteriosa compactação. Caso não ocorra harmonia na estrutura em questão, os tubos de aço corrugado e o material utilizado no aterro não têm, isoladamente, a capacidade de desempenhar a função que o sistema estrutural composto proporcionaria. Portanto, o solo que envolve a tubulação de aço é o elemento principal para se garantir a estabilidade do conjunto estrutura flexível-solo.

Devido ao exposto, é essencial se dar ênfase à escolha do material do aterro envoltório e à necessidade de se impor um controle rigoroso do seu grau de compactação. Sem estes cuidados a estabilidade do sistema de drenagem pode ficar seriamente abalada. Na execução do aterro envoltório, para se obter o grau de compactação especificado no projeto, deve-se utilizar solo de boa qualidade estrutural, adequadamente compactado (em camadas de 20 cm de espessura), de maneira simétrica em ambos os lados do tubo até se chegar ao nível de sua geratriz superior. Os equipamentos empregados na compactação devem ser adequados às condições do local onde a tubulação está sendo instalada para se atingir o grau de compactação correto. Em trechos de difícil acesso para equipamentos mecanizados, devem ser usados equipamentos manuais de menor porte que possibilitem a obtenção de um grau de compactação uniforme em todos os pontos do maciço de solo, conforme ilustra a figura abaixo.

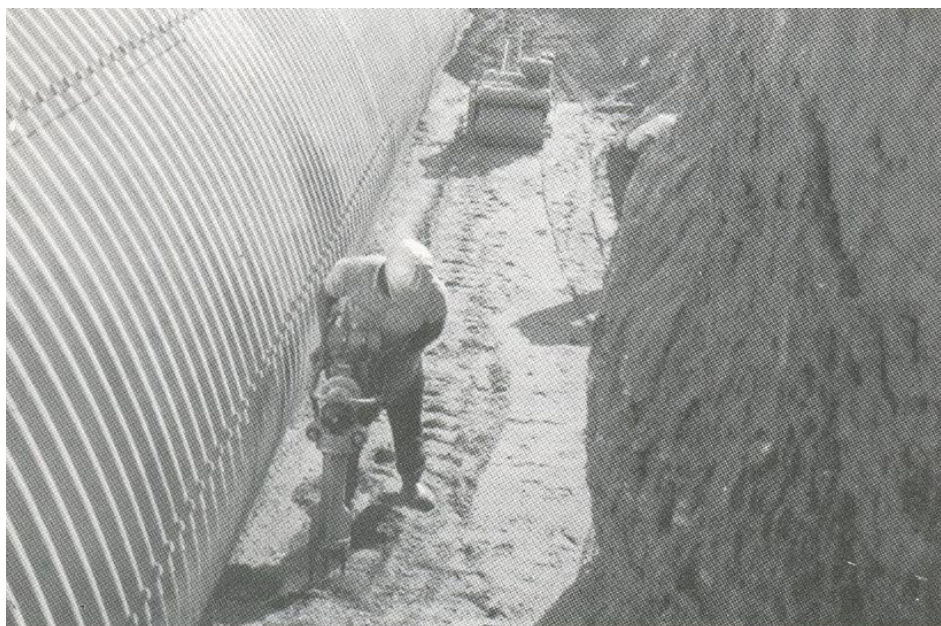


Figura 10 – Compactação do aterro envoltório

Fonte: AISI: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products.

O início do processo de compactação do aterro envoltório deve ser executado com bastante critério e de maneira simétrica em relação ao eixo diametral vertical do tubo de aço. A pressão do solo lateral, durante a compactação, tende a causar deformações que deslocam as paredes laterais do tubo de aço para dentro e o seu teto para cima, deixando o tubo com um formato levemente ovalado. Quando o aterro atinge o nível do teto do tubo as pressões das camadas subsequentes invertem essa tendência de deformação, deslocando o teto para baixo e as paredes laterais para fora, garantindo, dessa forma, o equilíbrio da estrutura. Portanto, a

compactação correta e criteriosa do aterro envoltório desde o seu início cria uma pré-compressão no tubo de aço e mobiliza a resistência passiva do solo. Logo, a compactação controlada do aterro envoltório é fundamental para a sua interação com o tubo de aço, garantindo estabilidade e capacidade de suporte de carga à estrutura composta. A figura abaixo reproduzida mostra a distribuição de tensões no tubo de aço durante a execução do aterro envoltório.

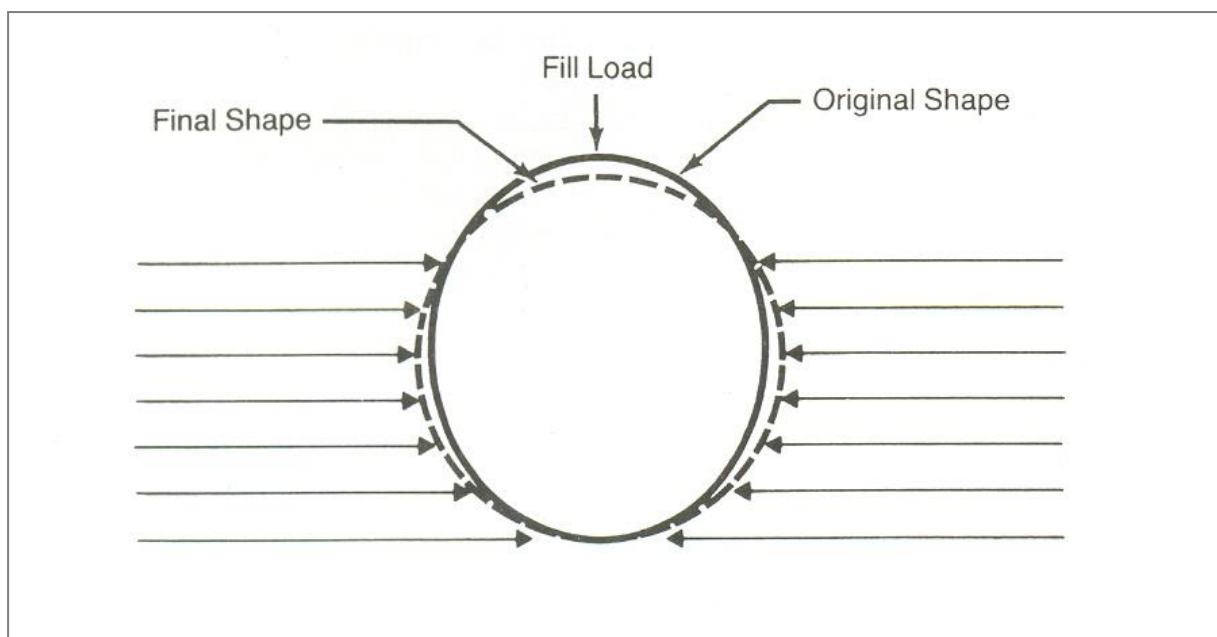


Figura 11 – Deformação inicial do tubo devido à compactação do aterro envoltório

Fonte: AISI: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products.

Segundo o Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products (1994) do AISI (Apêndice A), a partir dos resultados e conclusões do Programa de Testes de Utah, desenvolvido nos Estados Unidos no período de 1967 a 1970, observa-se a existência de uma densidade crítica, situada no intervalo entre 70% e 80% do padrão de compactação especificado pela AASHTO. Nos ensaios realizados, acima dessa densidade crítica o colapso observado ocorre por escoamento do aço do tubo devido à compressão circunferencial ou por deformação radial excessiva da ordem de 20 a 25%. Caso a densidade do aterro envoltório fique abaixo da densidade crítica não há a interação adequada do solo envoltório com o tubo de aço, não sendo mais garantido o princípio fundamental de funcionamento do sistema estrutural composto. No caso de não se ter garantida a interação do tubo corrugado de aço com o aterro envoltório, ocorre um esquema de carregamento não uniforme no tubo de aço induzindo a solicitação por flexo-compressão.

A figura reproduzida a seguir apresenta o esquema de transmissão de carga para o sistema composto pelo tubo de aço e pelo aterro envoltório em condições ideais, ou seja, aquelas em que o mencionado aterro tenha sido executado de forma criteriosa e correta. A carga vertical aplicada sobre o sistema (no caso em estudo provocada pela pilha de estéril) é absorvida, em parte, pelo maciço de solo que envolve o tubo e em parte (carga dissipada) pelo próprio tubo, no qual são gerados esforços de compressão circunferencial.

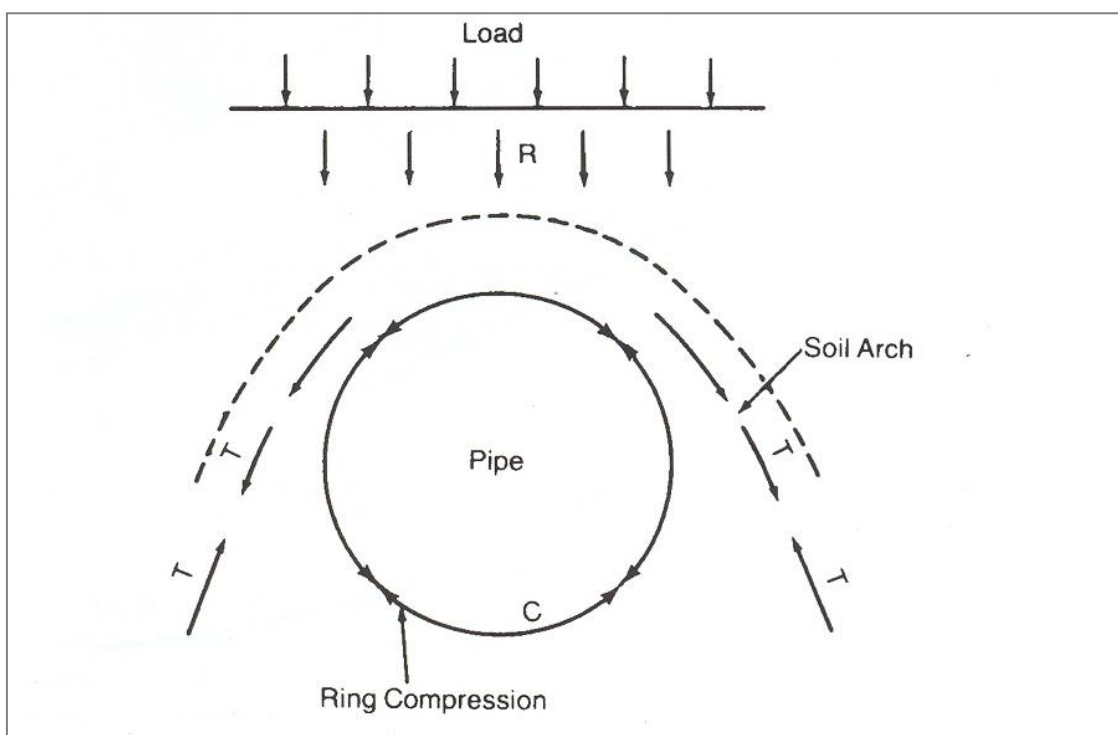


Figura 12 – Esquema de transmissão de forças do aterro envoltório para o tubo
Fonte: AISI: Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products.

As análises técnicas realizadas in loco indicaram que o aterro envoltório da tubulação de drenagem não atendeu as condições de projeto, ou seja, o aterro não foi executado em camadas intermediárias de 20 cm, de forma simétrica em relação às laterais do tudo até se atingir a sua geratriz superior. A partir deste ponto o aterro deveria ser executado ainda em camadas intermediárias também de 20 cm até uma altura de 4,00 m acima da mencionada geratriz, o que, aparentemente, também não ocorreu. Além disso, não houve comprovação de que o grau de compactação 95 % Proctor Normal tenha sido alcançado e da realização de controle tecnológico do aterro.

A seguir são destacadas, de maneira resumida, as etapas corretas para a execução do aterro envoltório dos tubos do sistema de drenagem da pilha de estéril.

O primeiro passo é a abertura de vala para acomodação dos tubos. A base desta vala deveria ser recoberta por uma camada de itabirito chapinha devidamente compactada.

Em seguida, os tubos deveriam ser assentados de forma que ficassem equidistantes em relação às laterais da vala. No início da execução do aterro envoltório os tubos deveriam ser recobertos por uma camada de itabirito chapinha, com 20 centímetros de espessura, devidamente compactada. Esta camada protetora agiria como um filtro, impedindo que as águas armazenadas no aterro envoltório atingissem os tubos.

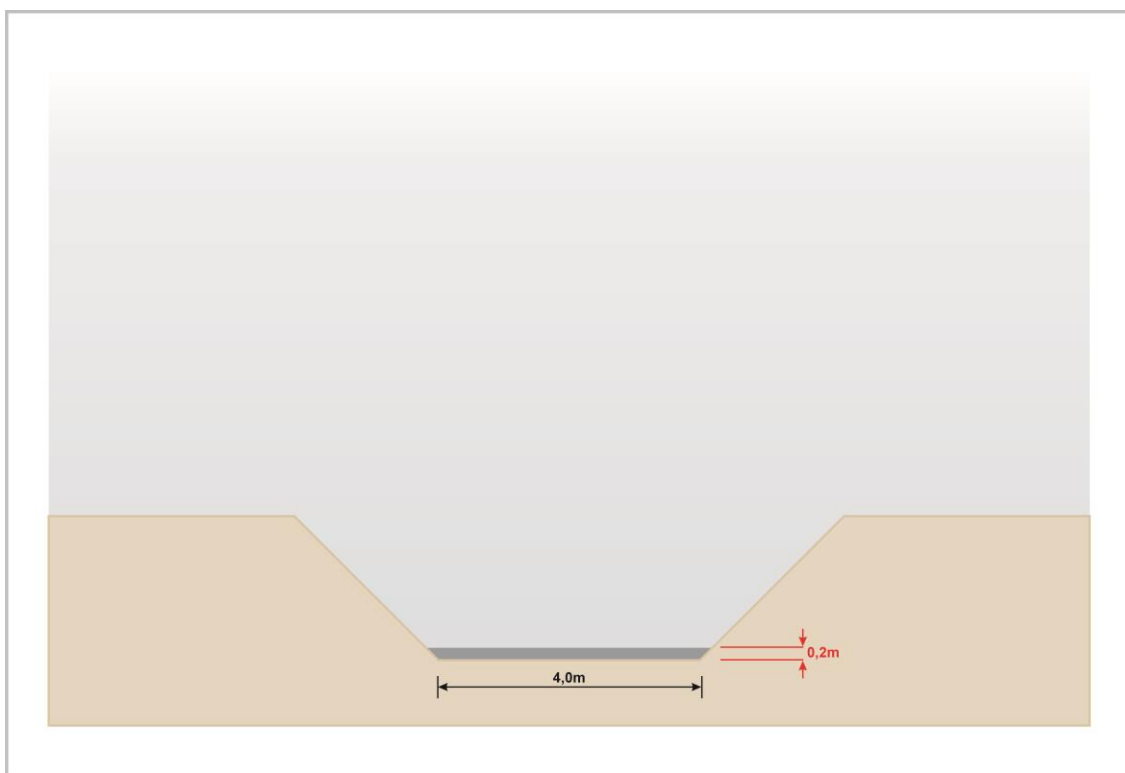


Figura 13 – 1º Passo: Abertura de vala para acomodação dos tubos.
Fonte: Elaborada pelos autores.

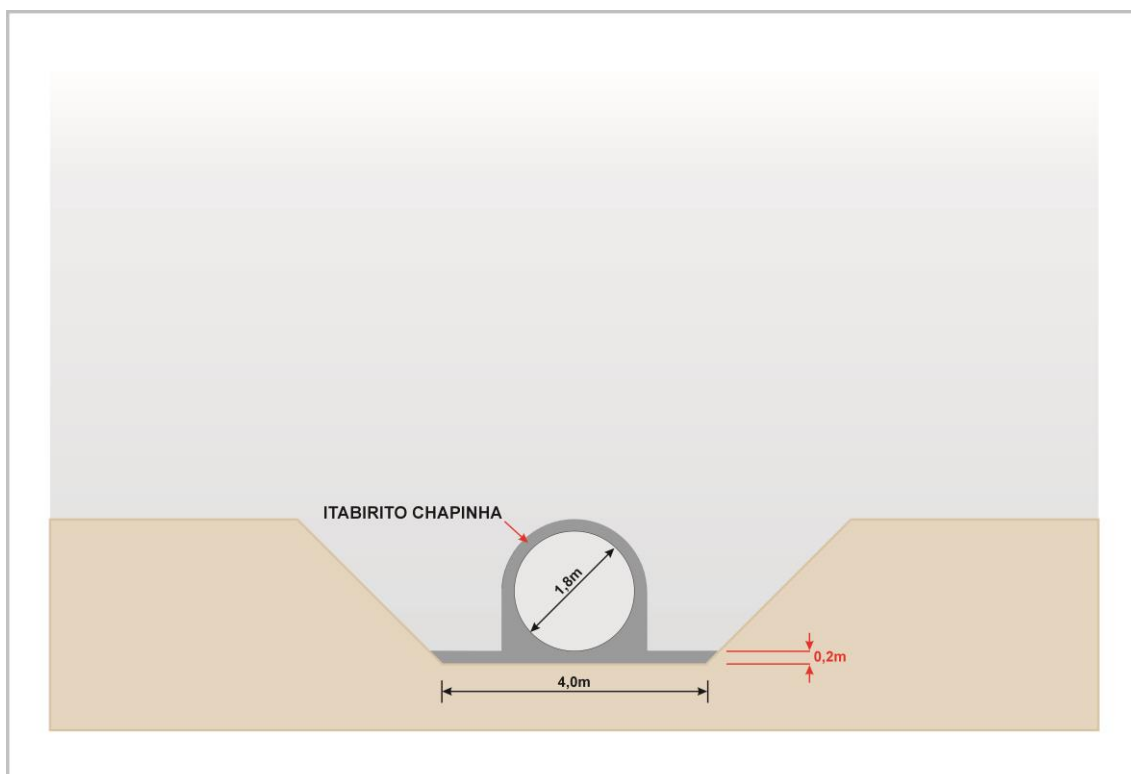


Figura 14 – 2º Passo: Assentamento dos tubos equidistantes em relação às laterais da vala.
Fonte: Elaborada pelos autores.

O 3º passo é a execução do aterro envoltório dos tubos. Este aterro deveria ser executado de maneira simétrica (em ambas as laterais dos tubos) e compactado em camadas intermediárias de 20 centímetros, com grau de compactação mínimo de 95 % Proctor Normal, até atingir a geratriz superior dos tubos.

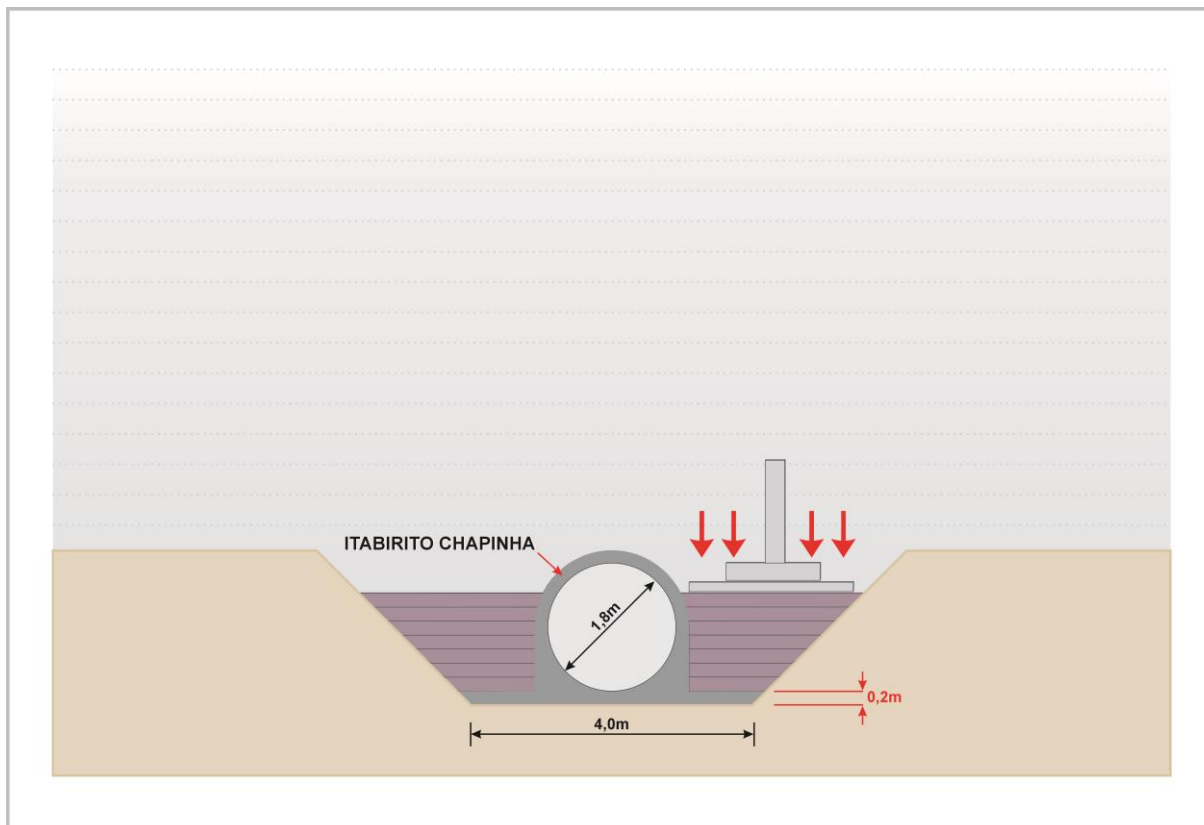


Figura 15 – 3º Passo: Execução do aterro envoltório dos tubos.
Fonte: Elaborada pelos autores.

O procedimento seguinte é a compactação final do aterro envoltório, dentro dos critérios descritos anteriormente. Conforme já mencionado, este aterro iria exercer pressões nas laterais dos tubos, os quais ficariam com o formato ligeiramente ovalado (em relação ao diâmetro horizontal). Posteriormente, com a execução do aterro sobre os tubos, as pressões verticais que incidiriam sobre os mesmos iriam combater as pressões laterais e fazer com que os tubos voltassem ao seu formato original.

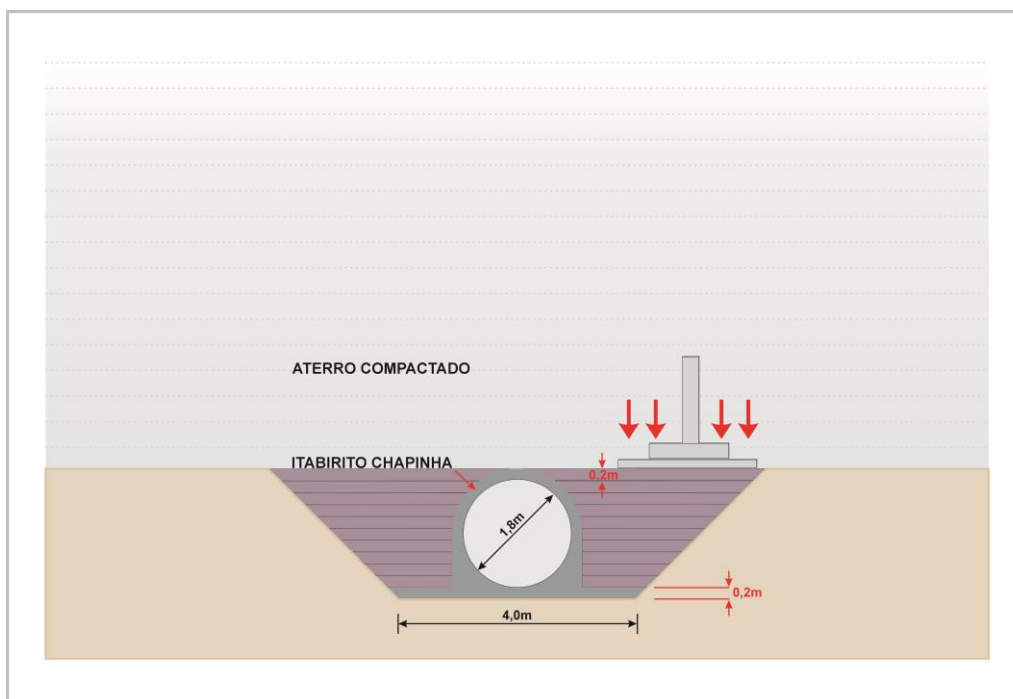


Figura 16 – 4º Passo: Compactação final do aterro envoltório.
Fonte: Elaborada pelos autores.

O 5º passo é a execução de aterro sobre os tubos até uma altura de 4 metros acima da geratriz superior de tais tubos. Este aterro também deveria ser compactado em camadas intermediárias de 20 centímetros, com grau de compactação mínimo de 95 % Proctor Normal.

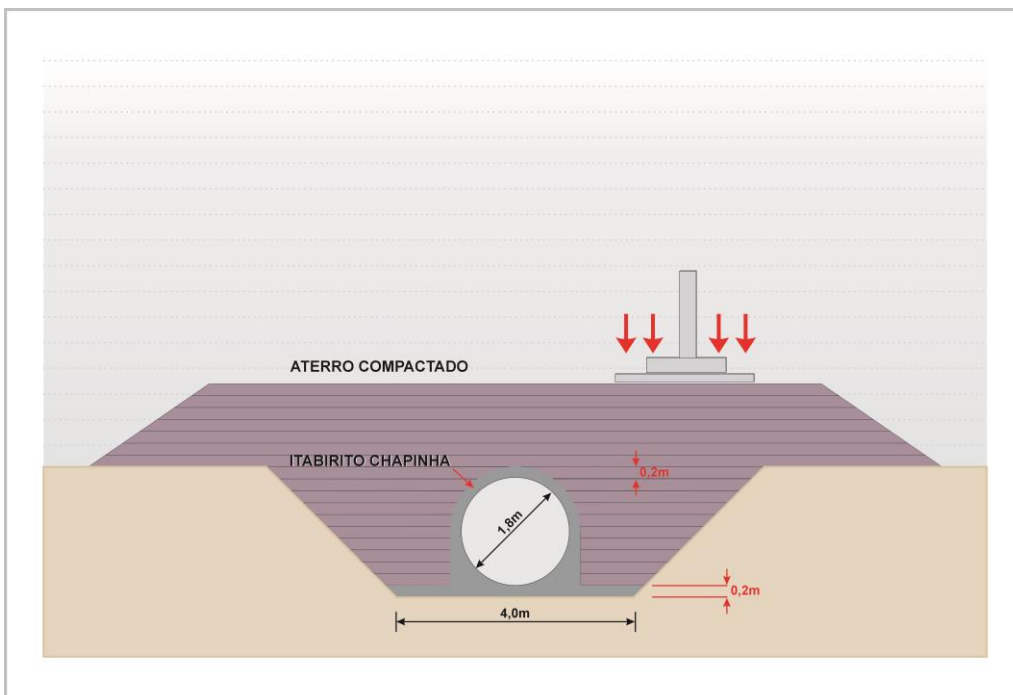


Figura 17 – 5º Passo: execução de aterro sobre os tubos até uma altura de 4 metros acima da geratriz superior.
Fonte: Elaborada pelos autores.

O procedimento final é a conclusão do aterro envoltório dentro dos critérios anteriormente descritos. Após esta conclusão o sistema de drenagem (tubos + aterro envoltório) estaria pronto e em condições de receber e suportar a pilha de estéril.

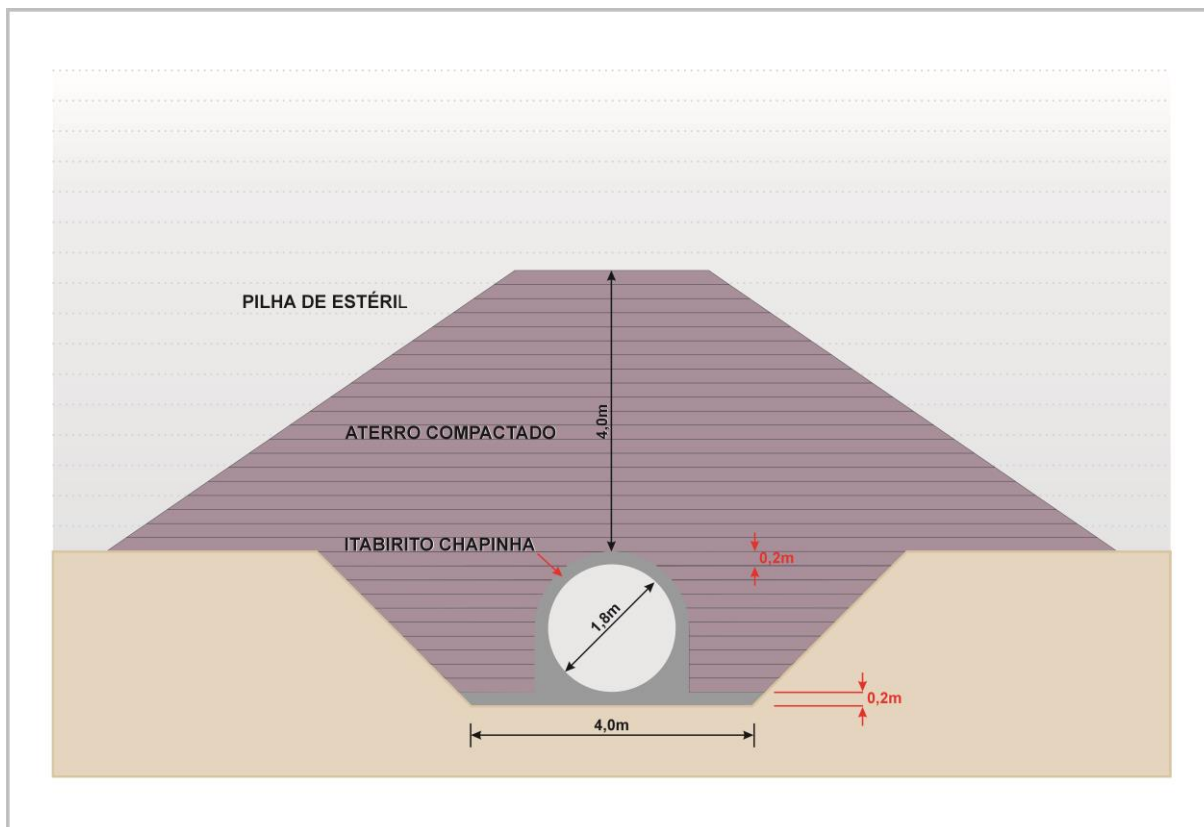


Figura 18 – 5º Passo: conclusão do aterro envoltório.
Fonte: Elaborada pelos autores.

As ilustrações reproduzidas a seguir mostram como foi executado o aterro envoltório dos tubos do sistema de drenagem da pilha de estéril. Tais ilustrações, principalmente as fotografias obtidas em campo, permitem a comparação com as corretas técnicas de construção do mencionado aterro.

A primeira fotografia e sua figura esquemática mostram que o aterro envoltório foi executado em desacordo com as premissas definidas em projeto. Não há indícios de compactação do aterro em camadas intermediárias de 20 centímetros e de controle tecnológico para se atingir o grau de compactação 95 % Proctor Normal.



Figura 19 – Execução do aterro envoltório em desacordo com o projeto.
Fonte: Elaborada pelos autores.

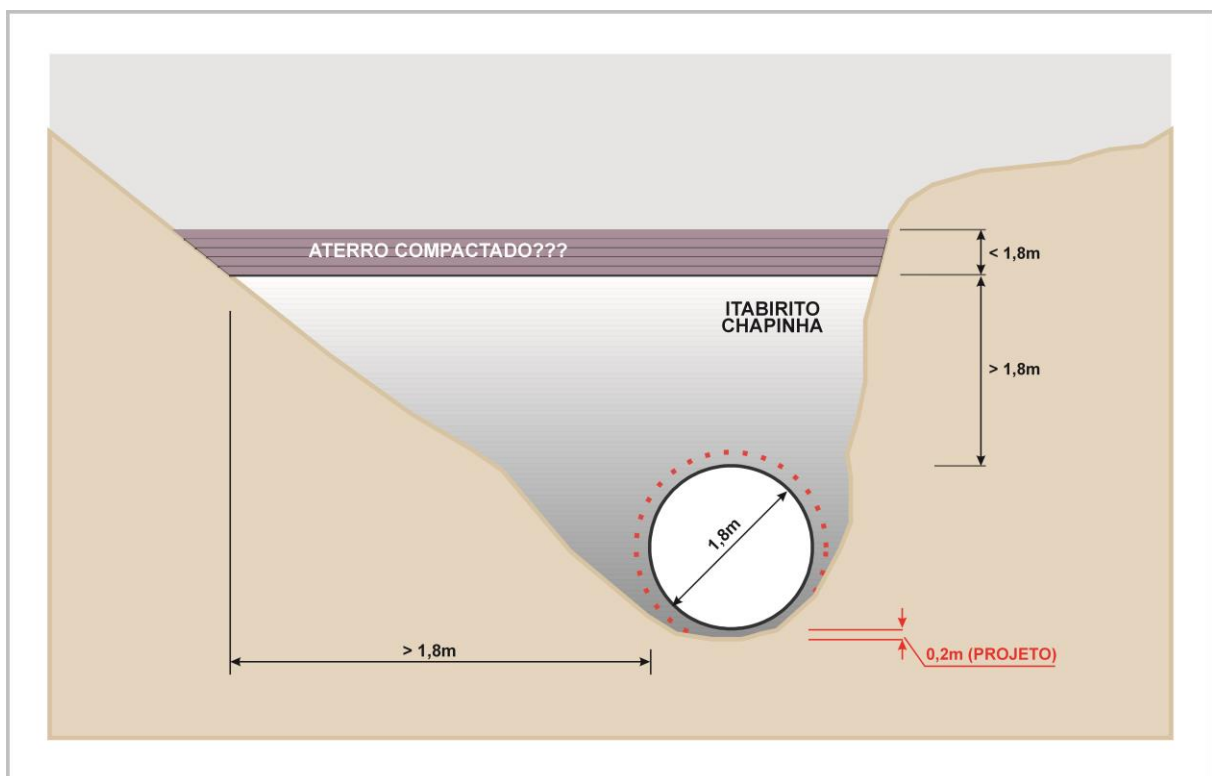


Figura 20 – Representação da fotografia 1, comprovando que o aterro envoltório foi executado em desacordo com o projeto.
Fonte: Elaborada pelos autores.

A segunda fotografia e sua figura esquemática também mostram que o aterro envoltório foi executado em desacordo com as premissas definidas em projeto. Não há indícios de compactação do aterro em camadas intermediárias de 20 centímetros e de controle tecnológico para se atingir o grau de compactação 95 % Proctor Normal. Além disso, os tubos não foram centralizados na vala e o aterro acima da geratriz superior do tubo não atingiu a altura de 4 metros.



Figura 21 – Execução do aterro envoltório em desacordo com o projeto.
Fonte: Elaborada pelos autores.

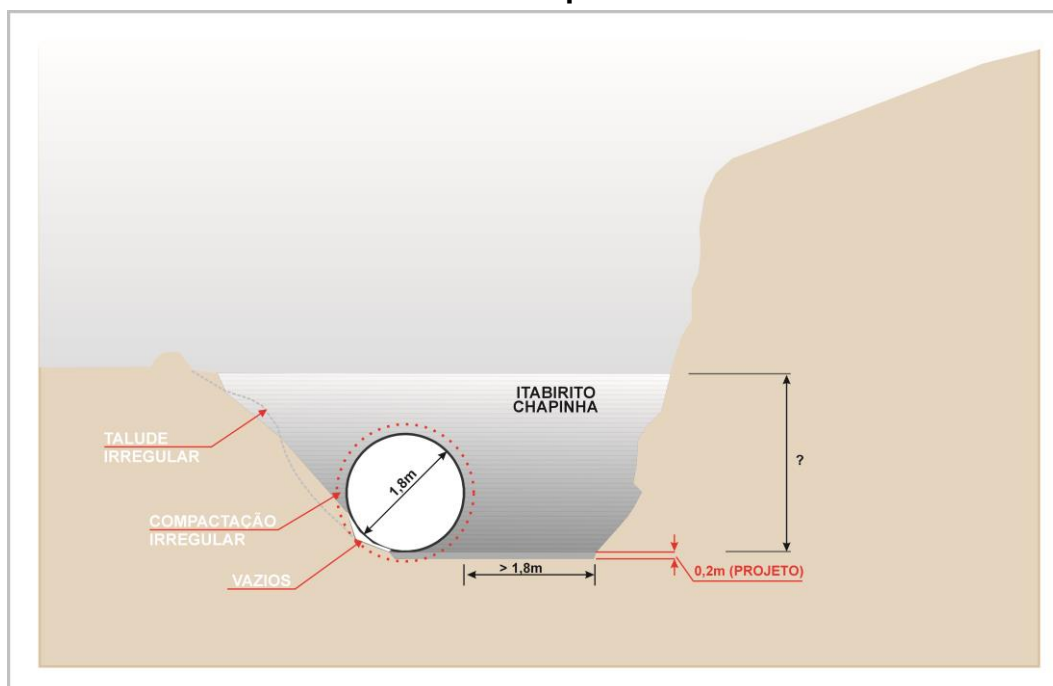


Figura 22 – Representação da fotografia 2, comprovando que o aterro envoltório foi executado em desacordo com o projeto.
Fonte: Elaborada pelos autores.

A terceira fotografia e a sua figura esquemática também comprovam que o aterro envoltório foi executado em desacordo com as premissas definidas em projeto. Não há indícios de compactação do aterro em camadas intermediárias de 20 centímetros e de controle tecnológico para se atingir o grau de compactação 95 % Proctor Normal. Além disso, os tubos não foram centralizados na vala e o aterro acima da geratriz superior do tubo não atingiu a altura de 4 metros.

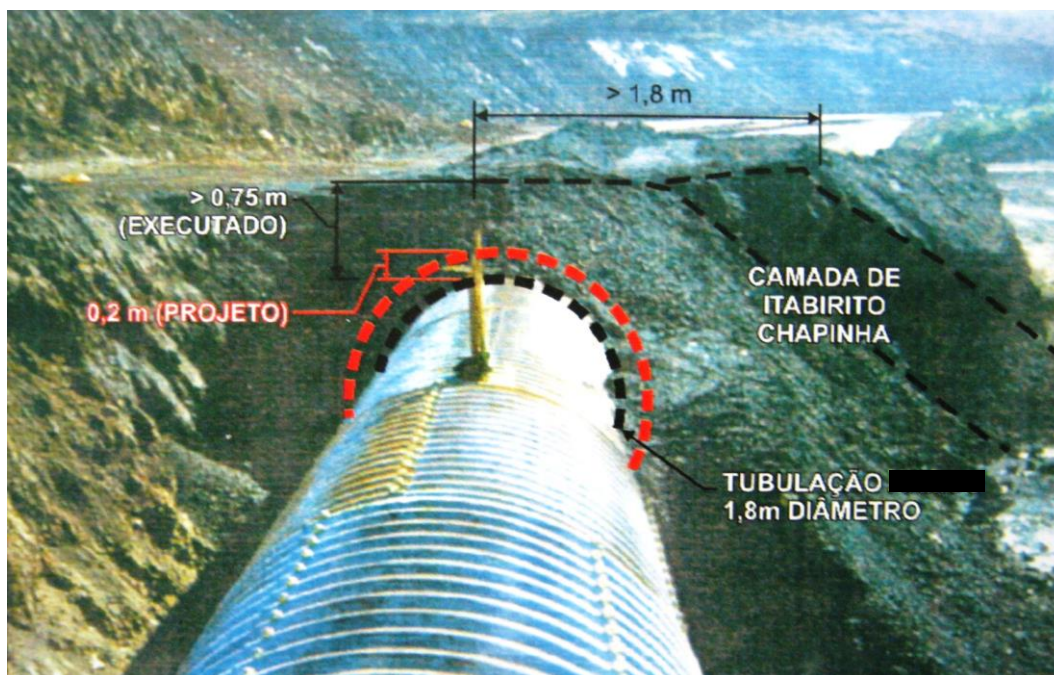


Figura 23 – Execução do aterro envoltório em desacordo com o projeto.
Fonte: Elaborada pelos autores.

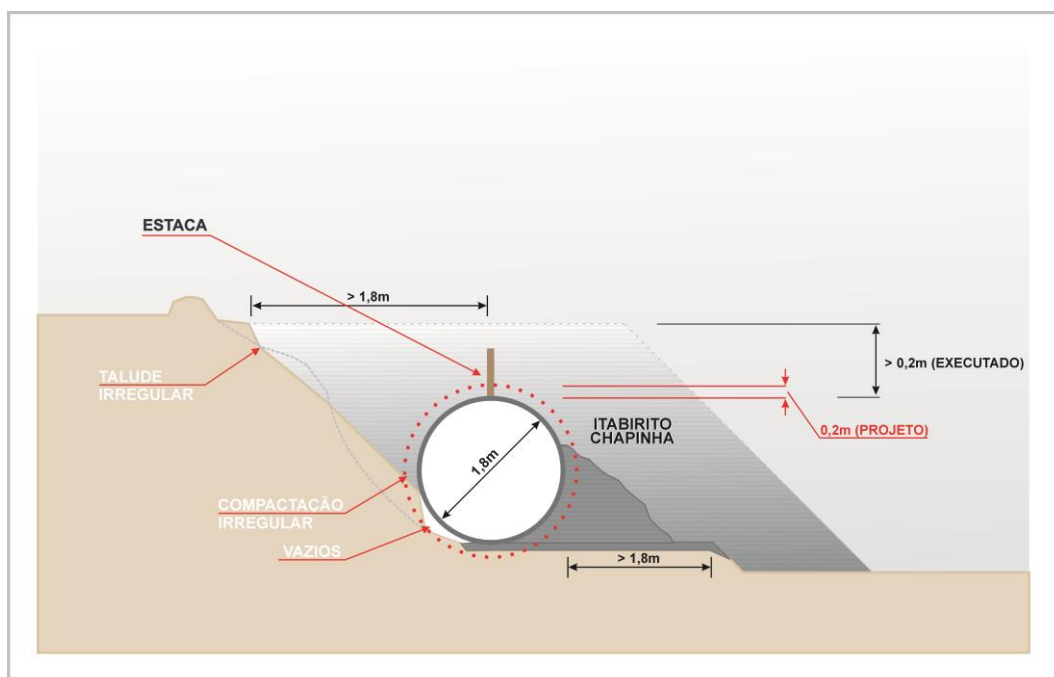


Figura 24 – Representação da fotografia 3, comprovando que o aterro envoltório foi executado em desacordo com o projeto.
Fonte: Elaborada pelos autores.

As fotografias destacadas a seguir, obtidas na fase de análise pericial, mostram o interior da tubulação de drenagem, notando-se claramente a sua excessiva deformação diametral (ovalização).



Figura 25 – Deformação diametral excessiva da tubulação de drenagem.
Fonte: Elaborada pelos autores.



Figura 26 – Deformação diametral excessiva da tubulação de drenagem.
Fonte: Elaborada pelos autores.

A ocorrência generalizada de colapso por plastificação das chapas de aço ao longo de uma geratriz da superfície do tubo, causado pela solicitação de flexo-compressão, pode ser claramente observada na figura 26. Na Figura 27, além dessa plastificação das chapas, nota-se o assoreamento do tubo detectado em determinado trecho.



Figura 27 – Plastificação generalizada da chapa do tubo ao longo da geratriz por flexo-compressão.

Fonte: Elaborada pelos autores.



Figura 28 – Plastificação generalizada da chapa do tubo ao longo da geratriz por flexo-compressão e assoreamento da tubulação de aço.

Fonte: Elaborada pelos autores.

4. Definição do Peso Específico do Material Depositado na Pilha de Estéril

Os ensaios realizados in loco, antes da montagem do sistema de drenagem, indicaram densidade aparente "in situ" de 1,754 tf / m³ e 1,782 tf/m³. Para fins de cálculo estrutural da tubulação, a empresa responsável por tal cálculo adotou uma densidade de 1,9 tf / m³ com o intuito de trabalhar com uma margem de segurança.

DENSIDADE "IN SITU"										FOLHA Nº	
CONTROLE DE COMPACTAÇÃO - MÉTODO DA AREIA											
ESTACA / POSIÇÃO		SUBTRECHO				FASE DO SERVIÇO		OPERADOR			
		PILHA DE ESTÉRIL SUL				POCO 01		ITELVINDO			
ENSAIO 01		ENSAIO 02									
PESO DO FRASCO ANTES		7130				7020					
PESO DO FRASCO DEPOIS		4160				4050					
PESO DA AREIA DESLOCADA		2970				2970					
PESO DA AREIA NO CONE		659,97				659,97					
PESO DA AREIA NO FURO		2310,03				2310,03					
DENSIDADE DA AREIA		1,305				1,303					
VOLUME DO FURO		1773				1773					
UNIDADE DE CAMPO - Nº DA LATA											
Nº DA CÁPSULA		300 146 175				120 137 194					
CÁPSULA + SOLO + ÁGUA		591,48 573,67 631,96				555,81 631,09 547,84					
CÁPSULA + SOLO		513,32 504,19 543,67				482,72 546,37 477,73					
A - ÁGUA		78,16 75,28 88,29				73,09 84,72 70,11					
C - CÁPSULA		95,35 93,06 103,53				96,34 93,42 96,99					
SOLO SECO		412,97 406,13 445,14				387,45 452,95 370,74					
UMIDADE		18,7 18,5 18,7				18,6 18,7 18,4					
UMIDADE MÉDIA		18,6				18,6					
PESO MATERIAL DO FURO - TOTAL		3110				3160					
PESO MATERIAL RETIDO PEN Nº 04											
PESO MATERIAL PASS. PEN Nº 04											
% MATERIAL RETIDO PEN Nº 04											
DENSIDADE ÚMIDA		1,754				1,782					
DENSIDADE APARENTE DO SOLO SECO		1,479				1,503					
DENSIDADE APARENTE MÁXIMA											
GRAU DE COMPACTAÇÃO											
PROFUNDIDADE DO FURO		20 cm				20 cm					
DATA		09/04/92				09/04/92					
OBM 329											
DENSIDADE ÚMIDA		1,754				1,782					

Figura 29 – Ficha de ensaio para determinação da densidade "in situ".
Fonte: Empresa responsável pelos ensaios.

Na fase pericial, ou seja, após o surgimento das deformações na tubulação do sistema de drenagem, foram realizados novos ensaios geotécnicos para a determinação da densidade média da pilha de estéril. Os resultados obtidos são apresentados a seguir. Convém ressaltar que foi encontrada uma densidade média de 2,405 tf / m³, superior à densidade adotada no dimensionamento do referido sistema (1,9 tf / m³).

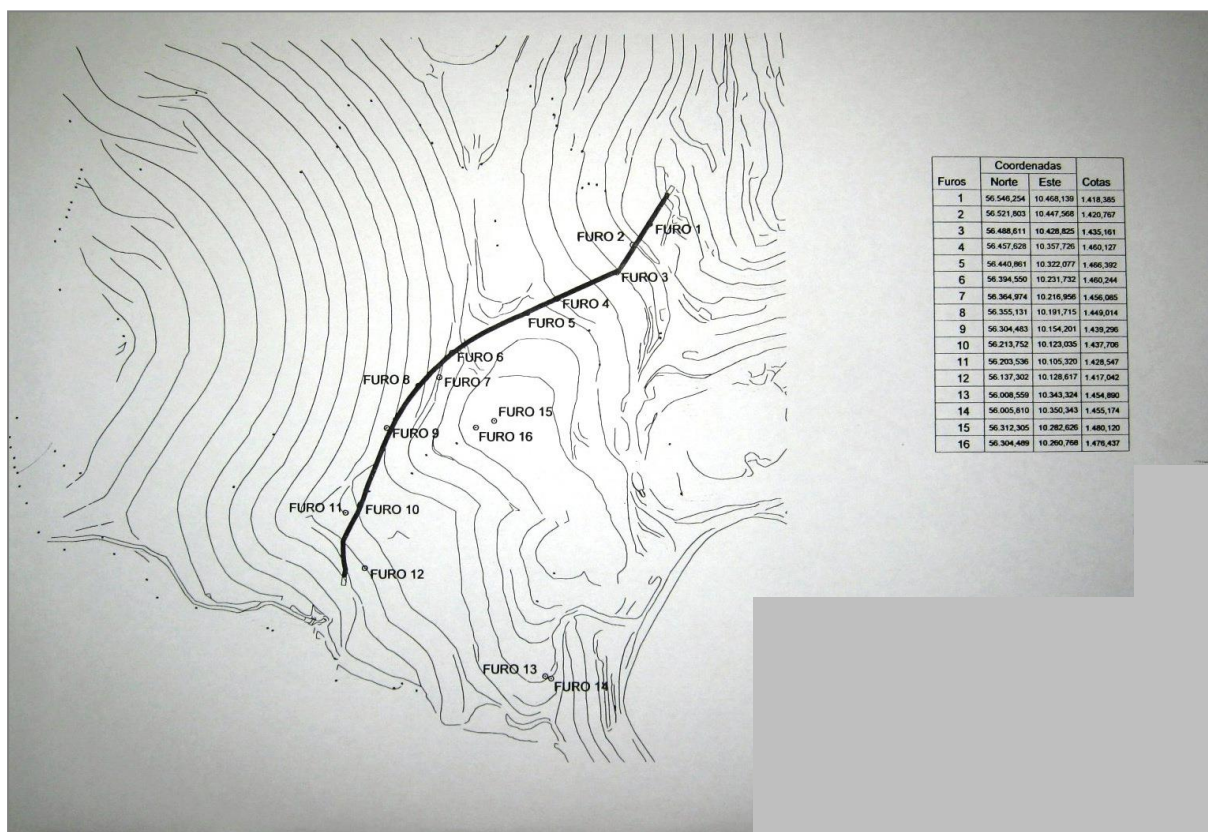


Figura 30 – Planta com a posição dos furos para coleta de amostras.
Fonte: Empresa responsável pelos ensaios.

DENSIDADE IN-SITU MÉTODO FRASCO DE AREIA									
CLIENTE:						SUB-TRECHO:			
OBRA:						FASE DO SERVIÇO:			
TRECHO:						RESPONSÁVEL:			
FURO N°	01	02	03	04	05	06	07	08	09
CAMADA N°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESTACA / POSIÇÃO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PESO DO FRASCO ANTES	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
PESO DO FRASCO DEPOIS	4,472	4,603	4,776	4,579	4,964	4,671	4,797	4,792	4,578
PESO DA AREIA DESLOCADA	2,528	2,397	2,224	2,421	2,036	2,329	2,203	2,208	2,422
PESO DA AREIA NO CONE	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530
PESO DA AREIA NO FURO	1,998	1,867	1,694	1,891	1,506	1,799	1,673	1,678	1,892
DENSIDADE DA AREIA	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367
VOLUME DO FURO	1,462	1,366	1,239	1,383	1,102	1,316	1,224	1,228	1,384
UNIDADE DE CAMPO - N° DA LATA									
CÁPSULA N°									
CÁPSULA SOLO ÁGUA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
CÁPSULA SOLO									
A - ÁGUA	15,5	14,0	12,7	18,0	14,1	16,1	23,3	24,0	15,4
C - CÁPSULA									
SOLO SECO	84,5	86,0	87,3	82,0	85,9	83,9	76,7	76,0	84,6
UMIDADE	18,3	16,3	14,5	22,0	16,4	19,2	30,4	31,6	18,2
UMIDADE MÉDIA									
UMIDADE ÓTIMA									
DESVIO DE UMIDADE									
PESO DO MATERIAL DO FURO TOTAL	3,801	4,397	3,674	2,507	2,787	3,159	2,530	2,393	2,798
PESO DO MATERIAL RETIDO PEN. N° 4									
PESO DO MATERIAL PASSANDO PEN. N° 4									
% DE MATERIAL RETIDO PEN. N° 4									
DENSIDADE ÚMIDA	2,601	3,219	2,965	1,812	2,530	2,400	2,067	1,949	2,022
DENSIDADE APARENTE DO SOLO SECO	2,197	2,769	2,588	1,486	2,173	2,014	1,586	1,482	1,710
DENSIDADE APARENTE MÁXIMA									
GRAU DE COMPACTAÇÃO									
PROFUNDIDADE DO FURO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
ESPESSURA DA CAMADA (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DATA	29/03/05	29/03/05	29/03/05	29/03/05	29/03/05	29/03/05	29/03/05	29/03/05	29/03/05

Figura 31 – Ficha de ensaio para determinação da densidade “in situ”, furos 01 a 09.
Fonte: Empresa responsável pelos ensaios.

DENSIDADE IN-SITU MÉTODO FRASCO DE AREIA									
CLIENTE:	E					SUB-TRECHO:			
OBRA:						FASE DO SERVIÇO:			
TRECHO:	B					RESPONSÁVEL:			
FURO N°	10	11	12	13	14	15	16		
CAMADA N°	-	-	-	-	-	-	-		
ESTACA / POSIÇÃO	-	-	-	-	-	-	-		
PESO DO FRASCO ANTES	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000		
PESO DO FRASCO DEPOIS	4,410	4,623	4,630	4,795	4,464	4,723	4,955		
PESO DA AREIA DESLOCADA	2,59	2,377	2,37	2,205	2,536	2,277	2,045		
PESO DA AREIA NO CONE	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530	0,530		
PESO DA AREIA NO FURO	2,06	1,847	1,84	1,675	2,006	1,747	1,515		
DENSIDADE DA AREIA	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367	1,367		
VOLUME DO FURO	1,507	1,351	1,346	1,225	1,467	1,278	1,108		
UNIDADE DE CAMPO - N° DA LATA									
CÁPSULA N°		59	38	01	02A	95	105	24A	24B
CÁPSULA SOLO ÁGUA	100,0	83,2	84,3	139,1	120,9	122,1	130,5	98,5	121,6
CÁPSULA SOLO		67,0	67,2	123,5	108,0	111,8	119,2	91,1	112,5
A - ÁGUA	13,0	16,2	17,1	15,6	12,9	10,3	11,3	7,4	9,1
C - CÁPSULA		16,8	14,6	12,2	16,5	15,0	17,0	15,8	16,1
SOLO SECO	87,0	50,2	52,6	111,3	91,5	96,8	102,2	75,3	96,4
UMIDADE	14,9	32,3	32,5	14,0	14,1	10,6	11,1	9,8	9,4
UMIDADE MÉDIA		32,4		14,1		10,8		9,6	
UMIDADE ÓTIMA									
DESVIO DE UMIDADE									
PESO DO MATERIAL DO FURO TOTAL	3,767	2,333	4,142	3,091	3,587	2,867	2,657		
PESO DO MATERIAL RETIDO PEN. N° 4									
PESO DO MATERIAL PASSANDO PEN. N° 4									
% DE MATERIAL RETIDO PEN. N° 4									
DENSIDADE ÚMIDA	2,500	1,727	3,077	2,523	2,444	2,243	2,397		
DENSIDADE APARENTE DO SOLO SECO	2,175	1,304	2,698	2,276	2,230	1,907	1,938		
DENSIDADE APARENTE MÁXIMA									
GRAU DE COMPACTAÇÃO									
PROFUNDIDADE DO FURO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15		
ESPESSURA DA CAMADA (cm)	-	-	-	-	-	-	-		
DATA	29/03/05	30/03/05	30/03/05	30/03/05	30/03/05	30/03/05	30/03/05		

Figura 32 – Ficha de ensaio para determinação da densidade “in situ”, furos 10 a 20.
Fonte: Empresa responsável pelos ensaios.

Tabela 1 – Quadro resumo dos ensaios de densidade realizados na fase pericial.

QUADRO RESUMIDO DO ENSAIO	
FURO	DENSIDADE ÚMIDA (kg / m³)
1	2.600
2	3.219
3	2.965
4	1.813
5	2.529
6	2.400
7	2.067
8	1.949
9	2.022
10	2.500
11	1.727
12	3.077
13	2.523
14	2,445
15	2.243
16	2.398

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 2 – Intervalo de confiança dos ensaios de densidade realizados na fase pericial.

INTERVALO DE CONIANÇA	
VALORES	DENSIDADE ÚMIDA (k / m³)
MÍNIMO	2.264
MÉDIO	2.405
MÁXIMO	2.551

Fonte: Elaborada pelos autores.

5. Análise do Dimensionamento da Tubulação Utilizada na Montagem do Sistema de Drenagem

Com o intuito confirmar a instalação incorreta dos tubos de drenagem e de verificar se estes tubos foram dimensionados de forma adequada, foi verificado o comportamento dos mesmos em três cenários de compactação do solo:

- ✓ aterro compactado de acordo com especificação de projeto;
- ✓ aterro executado com grau de compactação inferior ao especificado em projeto;
- ✓ aterro compactado de acordo com o especificado em projeto, considerando a densidade média do solo obtida nos ensaios geotécnicos realizados na pilha de estéril durante a inspeção pericial.

As tubulações utilizadas no sistema de drenagem da pilha de estéril tinham espessura de 2,7 mm, 3,4 mm, 4,7 mm, 6,3 mm e 8,0 mm. Convém ressaltar que quanto maior a espessura da tubulação, maior a altura de pilha de minério. A tubulação com chapa de 8,00 mm de espessura, por exemplo, estava sob pilha de 78 m de altura.

Para não deixar o trabalho prolixo, são apresentados a seguir os resultados obtidos para a tubulação de 2,7 mm de espessura e altura da pilha de 22 metros.

5.1. Tubulação com chapa de 2,7 mm de espessura e altura da pilha de 22 metros

Primeiro cenário: aterro compactado de acordo com o especificado em projeto.

Dados básicos:

- ✓ diâmetro: 1,80 m;
- ✓ cobertura: 22,00 m;
- ✓ densidade do solo: 1.900 kg/m³;
- ✓ tipo de tubulação: MP-100 ou MP-152.

Cálculo da “Carga Morta”:

CM = Densidade do Solo x Cobertura

CM = 1.900 kg / m³ x 22,00 m

CM = 41.800 kg / m²

Cálculo da “Carga Viva” (tráfego de veículos):

CV = 0 (ver tabela seguinte)

Tabela 3 – Cargas de acordo com a altura de aterro

ALTURA DE ATERRO (m)	CARGAS (kg / m²)	
	Rodoviário	Ferrovário
0,3	8.788,00	
0,6	4.395,00	18.553,00
0,9	2.929,00	
1,2	1.953,00	
1,5	1.221,00	11.718,00
1,8	976,00	
2,1	854,00	
2,4	488,00	7.812,00
3,0	0,00	5.371,00
3,6	0,00	2.929,00
6,0	0,00	1.465,00
9,0	0,00	488,00

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

Cálculo da Pressão de Projeto:

$$Pd = Cd \times (CM + CV)$$

$$Pd = 0,65 \times (41.800 + 0)$$

$$Pd = 27.170 \text{ kg / m}^2$$

Convém ressaltar que Cd é diretamente relacionado com o grau de compactação do solo e foi extraído da tabela abaixo.

Tabela 4 – Valor de Cd em função do grau de compactação

GRAU DE COMPACTAÇÃO (%PN)	Cd
80	0,99
85	0,86
90	0,75
95	0,65

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

Cálculo do Esforço de Compressão:

$$C = Pd \times D / 2$$

$$C = 27.170 \times 1,80 / 2 \Rightarrow C = 27.170 \times 0,90$$

$$C = 24.453 \text{ kg / m}$$

Cálculo do Esforço Admissível na Chapa:

$$\text{Relação } D/r = 180 / 1,734 = 103,81$$

sendo r = raio de giração, em cm (ver tabela abaixo)

Tabela 5 – Espessura da chapa em função do raio

ESPESSURA DA CHAPA (mm)	RAIO	
	MP-100	MP-152
1,5	0,698	
2,0	0,700	
2,7	0,704	1,734
3,4	0,708	1,738
4,7		1,747
6,3		1,759
8,0		1,774

Fonte: Catálogo do fabricante.

Se $D/r < 294$ (situação usual), calcula-se o esforço F_c :

$F_c = F_b / F.S.$, onde:

$F_b = 2.320 \text{ kg} / \text{cm}^2$;

$F.S. = 2,00$ (mínimo recomendado)

$F_c = 2.320 / 2$

$F_c = 1.160 \text{ kg} / \text{cm}^2$

Cálculo da Espessura Necessária da Chapa:

$A_n (\text{cm}^2 / \text{cm}) = C (\text{kg/m}) / F_c (\text{kg/cm}^2)$

$A_n = 24.453 / 1.160$

$A_n = 21,08 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Tabela 6 – Área da chapa em função da espessura

CHAPA (mm)	MP-100	MP-152
	ÁREA (cm²)	ÁREA (cm²)
2,7	16,41	32,86
3,4	21,88	41,56
4,7	29,00	58,38
6,3	36,67	78,36
8,0		90,03

Fonte: Catálogo do fabricante.

Portanto, $21,08 \text{ cm}^2/\text{m} < 32,86 \text{ cm}^2$ (a área da chapa de 2,7 mm é aproximadamente 55 % maior do que a área obtida através do cálculo anteriormente apresentado). Logo, a chapa de 2,7 mm empregada na confecção da tubulação de aço corrugado seria mais que suficiente para suportar as cargas provenientes do aterro envoltório e da pilha de estéril depositada sobre tal aterro, desde que as condições de projeto tivessem sido seguidas à risca, mais especificamente no que se refere à execução do aterro anteriormente citado.

Verificação de Flexibilidade (CF):
 Fator de Flexibilidade (CF) = $D^2/E \times I$, sendo:
 $E = 2.110.000,00 \text{ kg / cm}^2$;
 $I = 100,652 \text{ cm}^4/\text{cm}$ (ver tabela abaixo)

Tabela 7 – Valor de I em função da espessura da chapa

CHAPA (mm)	MP-100	MP-152
	I (cm ⁴ / cm)	I (cm ⁴ / cm)
2,7	7,994	100,652
3,4	10,73	127,457
4,7	14,362	178,192
6,3	18,386	242,581
8,0		

Fonte: Catálogo do fabricante.

CF deve ser menor que $CF_{lim}(0,1120 \text{ cm/kg})$

$$CF = (180)^2 / 2.110.000 \times 100,652$$

$$CF = 1,53 \times 10^{-4} \text{ cm / kg}$$

Portanto, a chapa de 2,7 mm empregada na confecção da tubulação de aço corrugado também atenderia ao requisito fator de flexibilidade, desde que as condições de projeto tivessem sido seguidas à risca.

Verificação das Costuras:

F.S. = Resistência Última na Costura / C, sendo:

Resistência Última na Costura = 67.704 (ver tabela abaixo)

F.S. deve ser maior que 2,00 (mínimo exigido)

$$F.S. = 67.704 / 24.453$$

$$F.S. = 2,77$$

Portanto, o requisito de verificação das costuras também foi atendido.

Tabela 8 – Resistência na costura em função da espessura da chapa

Resistência Última na Costura (kg / m) – MP-152	
Chapa (mm)	Única
2,7	67.704
3,4	89.683
4,7	138.775
6,3	182.061
8,0	240.000

Fonte: Catálogo do fabricante.

Segundo cenário: aterro executado com grau de compactação inferior ao especificado em projeto.

Dados básicos:

- ✓ diâmetro: 1,80 m;
- ✓ cobertura: 22,00 m;
- ✓ densidade do solo: 1.900 kg/m³;
- ✓ tipo de tubulação: MP-100 ou MP-152.

Cálculo da “Carga Morta”:

CM = Densidade do Solo x Cobertura

CM = 1.900 kg / m³ x 22,00 m

CM = 41.800 kg / m²

Cálculo da “Carga Viva” (tráfego de veículos):

CV = 0 (ver tabela abaixo)

Tabela 9 – Cargas de acordo com a altura de aterro

ALTURA DE ATERRO (m)	CARGAS (kg / m ²)	
	Rodoviário	Ferrovário
0,3	8.788,00	
0,6	4.395,00	18.553,00
0,9	2.929,00	
1,2	1.953,00	
1,5	1.221,00	11.718,00
1,8	976,00	
2,1	854,00	
2,4	488,00	7.812,00
3,0	0,00	5.371,00
3,6	0,00	2.929,00
6,0	0,00	1.465,00
9,0	0,00	488,00

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

Cálculo da Pressão de Projeto (considerando um grau de compactação de 80% Proctor Normal):

$P_d = C_d \times (CM + CV)$

$P_d = 0,99 \times (41.800 + 0)$

$P_d = 41.382 \text{ kg / m}^2$

Convém ressaltar que C_d é diretamente relacionado com o grau de compactação do solo e foi extraído da tabela seguinte.

Tabela 10 – Valor de Cd em função do grau de compactação

GRAU DE COMPACTAÇÃO (%PN)	Cd
80	0,99
85	0,86
90	0,75
95	0,65
Cobertura inferior ao diâmetro	1

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

Cálculo do Esforço de Compressão

$$C = P_d \times D / 2$$

$$C = 41.382 \times 1,80 / 2 \Rightarrow C = 41.382 \times 0,90$$

$$C = 37.244 \text{ kg / m}$$

Cálculo do Esforço Admissível na Chapa:

$$\text{Relação } D/r = 180 / 1,734 = 103,81$$

sendo r = raio de giração, em cm (ver tabela abaixo)

Tabela 11 – Espessura da chapa em função do raio

ESPESSURA DA CHAPA (mm)	RAIO (cm)	
	MP-100	MP-152
1,5	0,698	
2,0	0,700	
2,7	0,704	1,734
3,4	0,708	1,738
4,7		1,747
6,3		1,759
8,0		1,774

Fonte: Catálogo do fabricante.

Se $D/r < 294$ (situação usual), calcula-se o esforço F_c :

$$F_c = F_b / F.S., \text{ onde:}$$

$$F_b = 2.320 \text{ kg / cm}^2;$$

$$F.S. = 2,00 \text{ (mínimo recomendado)}$$

$$F_c = 2.320 / 2$$

$$F_c = 1.160 \text{ kg / cm}^2$$

Cálculo da Espessura Necessária da Chapa:

$$A_n \text{ (cm}^2 \text{ / cm)} = C \text{ (kg/m)} / F_c \text{ (kg/cm}^2)$$

$$A_n = 37.244 / 1.160$$

$$A_n = 32,11 \text{ cm}^2 \text{ / m}$$

Tabela 12 – Área da chapa em função da espessura

CHAPA (mm)	MP-100	MP-152
	ÁREA (cm²)	ÁREA (cm²)
2,7	16,41	32,86
3,4	21,88	41,56
4,7	29,00	58,38
6,3	36,67	78,36
8,0		90,03

Fonte: Catálogo do fabricante.

Portanto, $32,11 \text{ cm}^2/\text{m} \approx 32,86 \text{ cm}^2$. A chapa de 2,7 mm empregada na confecção da tubulação de aço corrugado suportaria, no limite, as cargas provenientes do aterro envoltório e da pilha de estéril depositada sobre tal aterro, considerando-se que o grau de compactação atingido fosse de 80 % PN. Entretanto, por medida de segurança, deveria ser adotada uma tubulação com espessura superior (3,4 mm).

Verificação de Flexibilidade (CF):

Fator de Flexibilidade (CF) = $D^2/E \times I$, sendo:

$E = 2.110.000,00 \text{ kg / cm}^2$;

$I = 100,652 \text{ cm}^4/\text{cm}$ (ver tabela abaixo)

Tabela 13 – Valor de I em função da espessura da chapa

CHAPA (mm)	MP-100	MP-152
	I (cm ⁴ / cm)	I (cm ⁴ / cm)
2,7	7,994	100,652
3,4	10,73	127,457
4,7	14,362	178,192
6,3	18,386	242,581
8,0		

Fonte: Catálogo do fabricante.

CF deve ser menor que $CF_{lim}(0,1120 \text{ cm/kg})$

$CF = (180)^2 / 2.110.000 \times 100,652$

$CF = 1,53 \times 10^{-4} \text{ cm / kg}$

Portanto, a chapa de 2,7 mm empregada na confecção da tubulação de aço corrugado também atenderia ao requisito fator de flexibilidade, desde que as condições de projeto tivessem sido seguidas à risca.

Verificação das Costuras:

F.S. = Resistência Última na Costura / C, sendo:

Resistência Última na Costura = 67.704 (ver tabela abaixo)

F.S. deve ser maior que 2,00 (mínimo exigido)

F.S. = 67.704 / 37.244

F.S. = 1,82

Portanto, o requisito de verificação das costuras também não foi atendido.

Tabela 14 – Resistência na costura em função da espessura da chapa

Resistência Última na Costura (kg / m) – MP-152	
Chapa (mm)	Única
2,7	67.704
3,4	89.683
4,7	138.775
6,3	182.061
8,0	240.000

Fonte: Catálogo do fabricante.

Terceiro cenário: aterro compactado de acordo com o especificado em projeto (considerando-se a densidade média obtida nos ensaios geotécnicos realizados na pilha de estéril durante a perícia).

Dados básicos:

- ✓ diâmetro: 1,80 m;
- ✓ cobertura: 22,00 m;
- ✓ densidade do solo: 2.405 kg/m³;
- ✓ tipo de tubulação: MP-100 ou MP-152.

Cálculo da “Carga Morta”:

CM = Densidade do Solo x Cobertura

CM = 2.405 kg / m³ x 22,00 m

CM = 52.910 kg / m²

Cálculo da “Carga Viva” (tráfego de veículos):

CV = 0 (ver tabela 13)

Tabela 15 – Cargas de acordo com a altura de aterro

ALTURA DE ATERRO (m)	CARGAS (kg / m²)	
	Rodoviário	Ferrovário
0,3	8.788,00	
0,6	4.395,00	18.553,00
0,9	2.929,00	
1,2	1.953,00	
1,5	1.221,00	11.718,00
1,8	976,00	
2,1	854,00	
2,4	488,00	7.812,00
3,0	0,00	5.371,00
3,6	0,00	2.929,00
6,0	0,00	1.465,00
9,0	0,00	488,00

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

Cálculo da Pressão de Projeto (considerando um grau de compactação de 80% Proctor Normal):

$$P_d = C_d \times (C_M + C_V)$$

$$P_d = 0,65 \times (52.910 + 0)$$

$$P_d = 34.392 \text{ kg / m}^2$$

Convém ressaltar que C_d é diretamente relacionado com o grau de compactação do solo e foi extraído da tabela seguinte.

Tabela 16 – Valor de C_d em função do grau de compactação

GRAU DE COMPACTAÇÃO (%PN)	C_d
80	0,99
85	0,86
90	0,75
95	0,65

Fonte: ASHO (Associação de Engenheiros Viários dos Estados Unidos).

Cálculo do Esforço de Compressão

$$C = P_d \times D / 2$$

$$C = 34.392 \times 1,80 / 2 \Rightarrow C = 34.392 \times 0,90$$

$$C = 30.953 \text{ kg / m}$$

Cálculo do Esforço Admissível na Chapa:

$$\text{Relação } D/r = 180 / 1,734 = 103,81$$

sendo r = raio de giração, em cm (ver tabela 15)

Tabela 17 – Espessura da chapa em função do raio

ESPESSURA DA CHAPA (mm)	RAIO (cm)	
	MP-100	MP-152
1,5	0,698	
2,0	0,700	
2,7	0,704	1,734
3,4	0,708	1,738
4,7		1,747
6,3		1,759
8,0		1,774

Fonte: Catálogo do fabricante.

Se $D/r < 294$ (situação usual), calcula-se o esforço F_c :

$F_c = F_b / F.S.$, onde:

$F_b = 2.320 \text{ kg} / \text{cm}^2$;

$F.S. = 2,00$ (mínimo recomendado)

$F_c = 2.320 / 2$

$F_c = 1.160 \text{ kg} / \text{cm}^2$

Cálculo da Espessura Necessária da Chapa:

$A_n (\text{cm}^2 / \text{cm}) = C (\text{kg/m}) / F_c (\text{kg/cm}^2)$

$A_n = 30.953 / 1.160$

$A_n = 26,68 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Tabela 18 – Área da chapa em função da espessura

CHAPA (mm)	MP-100	MP-152
	ÁREA (cm²)	ÁREA (cm²)
2,7	16,41	32,86
3,4	21,88	41,56
4,7	29,00	58,38
6,3	36,67	78,36
8,0		90,03

Fonte: Catálogo do fabricante.

Portanto, $26,68 \text{ cm}^2/\text{m} < 32,86 \text{ cm}^2$ (a área da chapa de 2,7 mm é aproximadamente 23 % maior do que a área obtida através do cálculo anteriormente apresentado). Logo, a chapa de 2,7 mm empregada na confecção da tubulação de aço corrugado seria suficiente para suportar as cargas provenientes do aterro envoltório e da pilha de estéril depositada sobre tal aterro, mesmo considerando-se uma densidade maior do que aquela definida em projeto. Convém ressaltar que para isso as condições de projeto deveriam ter sido seguidas à risca, mais especificamente no que se refere à execução do aterro anteriormente citado.

Verificação de Flexibilidade (CF):
 Fator de Flexibilidade (CF) = $D^2/E \times I$, sendo:
 $E = 2.110.000,00 \text{ kg / cm}^2$;
 $I = 100,652 \text{ cm}^4/\text{cm}$ (ver tabela abaixo)

Tabela 19 – Valor de I em função da espessura da chapa

CHAPA (mm)	MP-100	MP-152
	I (cm ⁴ / cm)	I (cm ⁴ / cm)
2,7	7,994	100,652
3,4	10,73	127,457
4,7	14,362	178,192
6,3	18,386	242,581
8,0		

Fonte: Catálogo do fabricante.

CF deve ser menor que $CF_{lim}(0,1120 \text{ cm/kg})$

$$CF = (180)^2 / 2.110.000 \times 100,652$$

$$CF = 1,53 \times 10^{-4} \text{ cm / kg}$$

Portanto, a chapa de 2,7 mm empregada na confecção da tubulação de aço corrugado também atenderia ao requisito fator de flexibilidade, desde que as condições de projeto tivessem sido seguidas à risca.

Verificação das Costuras:

F.S. = Resistência Última na Costura / C, sendo:

Resistência Última na Costura = 67.704 (ver tabela abaixo)

F.S. deve ser maior que 2,00 (mínimo exigido)

$$F.S. = 67.704 / 30.953$$

$$F.S. = 2,19$$

Portanto, o requisito de verificação das costuras também foi atendido.

Tabela 20 – Resistência na costura em função da espessura da chapa

Resistência Última na Costura (kg / m) – MP-152	
Chapa (mm)	Única
2,7	67.704
3,4	89.683
4,7	138.775
6,3	182.061
8,0	240.000

Fonte: Catálogo do fabricante.

A tabela seguinte destaca, de forma resumida, a análise do dimensionamento dos tubos de aço corrugado utilizados no sistema de drenagem da pilha de estéril.

Tabela 21 – Resumo da análise do dimensionamento dos tubos

ESPESSURA DA CHAPA (mm)	ALTURA DA PILHA (m)	ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO (EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA) DOS TUBOS		
		PRIMEIRO CENÁRIO	SEGUNDO CENÁRIO	TERCEIRO CENÁRIO
2,7	22,00	ACEITA	REPROVADA	ACEITA
3,4	29,10	ACEITA	REPROVADA	ACEITA
4,7	44,50	ACEITA	REPROVADA	ACEITA
6,3	59,10	ACEITA	REPROVADA	ACEITA
8,0	78,00	ACEITA	REPROVADA	REPROVADA
Primeiro Cenário: Grau de Compactação 95 % Proctor Normal; Densidade = 1.900 kg / m³ (conforme definido em projeto)				
Segundo Cenário: Grau de Compactação 80 % Proctor Normal; Densidade = 1.900 kg / m³ (compactação executada em desacordo com o projeto)				
Terceiro Cenário: Grau de Compactação 95 % Proctor Normal; Densidade = 2.405 kg / m³ (compactação conforme projeto; densidade obtida em ensaio geotécnico)				

Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise do primeiro cenário comprova que a tubulação suportaria as cargas provenientes do aterro envoltório e da pilha de estéril depositada sobre tal aterro, desde que a compactação do solo fosse executada de acordo com o projeto (GC = 95 % PN).

O segundo cenário analisado comprova que a execução da compactação em desacordo com o projeto (GC sem controle tecnológico e inferior a 95 % PN) faria com que os tubos não resistissem às cargas transmitidas pelo aterro envoltório e pela pilha de estéril. Convém ressaltar que a pressão aplicada sobre os tubos é calculada em função do coeficiente de carga K (ou Cd). Quanto menor é o grau de compactação, maior será o coeficiente de carga.

O terceiro cenário analisado mostra que, mesmo considerando-se uma densidade superior àquela definida no projeto, a tubulação resistiria aos esforços transmitidos, desde que a compactação do aterro envoltório tivesse sido realizada de forma correta e seguindo à risca o projeto (compactação em camadas de 20 cm, GC = 95 % PN).

6. Conclusões

O estéril do processo de mineração pode ser definido como todo material não aproveitável como minério e, por isso, descartado pela operação de lavra antes do beneficiamento. As pilhas de estéril são, portanto, aterros constituídos por estes materiais e, por conseguinte, pela sua própria natureza, são obras geotécnicas bastante complexas tanto pela heterogeneidade do material quanto pelo processo construtivo.

O sistema de drenagem da pilha de estéril era composto por um canal de escoamento com extensão total de 621,98 m formado por tubos de aço corrugado com diâmetro de 1,80 metros e espessura de chapa variável (2,7 mm, 3,40 mm, 4,70 mm, 6,30 mm e 8,00 mm), dependendo da altura das pilhas de estéril depositadas sobre tais tubos.

Os tubos, analisados isoladamente, não tinham a mínima condição de suportar as cargas provenientes das pilhas de estéril. A sua função principal era atuar como canal de escoamento do sistema de drenagem. Por isso, o aterro envoltório destes tubos deveria ser executado de forma criteriosa, seguindo à risca as seguintes premissas, as quais foram definidas em projeto:

- ✓ aterro compactado em camadas intermediárias de 20 centímetros;
- ✓ aterro envoltório com altura de 4 metros acima da geratriz superior dos tubos e largura de “dimensões praticáveis” nas laterais (que permitissem a compactação junto às paredes laterais dos tubos);
- ✓ aterro compactado com GC > 95 PN (grau de compactação maior que 95 % Proctor Normal) até, no mínimo, uma altura de 4 metros acima da geratriz superior do tubo.

A função principal do aterro envoltório era absorver e dissipar as cargas e pressões provenientes das pilhas de estéril (segundo alguns autores e publicações técnicas, o aterro absorve até 90 % da carga), de forma a preservar a estabilidade dos tubos. Estes tubos geralmente sofrem tensões em suas laterais, provocadas pelo aterro envoltório devidamente compactado, as quais têm a tendência de deixar os tubos com o formato ovalado em relação ao seu diâmetro vertical. Estas tensões são combatidas pelas pressões verticais provenientes das cargas das pilhas de

estéril, já dissipadas pelo aterro envoltório, que chegam aos tubos. Quando o aterro envoltório não é executado dentro dos critérios técnicos e as cargas verticais que atingem os tubos são maiores que aquelas admissíveis, os tubos tendem a se ovalizar e deformar (em relação ao seu diâmetro horizontal) acima dos limites aceitáveis. Convém ressaltar que foi justamente o que ocorreu no caso em estudo.

A importância da execução de um aterro envoltório dentro das corretas técnicas de engenharia e em consonância com as premissas definidas em projeto pode ser constatada através da fórmula de cálculo da pressão que incide sobre os tubos:

$P_d = C_d \times (C_M + C_V)$, sendo:

P_d = pressão de projeto;

C_d (ou K) = coeficiente de carga;

C_M = carga morta (carga da pilha de estéril);

C_V = carga viva.

Como no caso em estudo a carga viva era nula, a fórmula acima apresentada pode ser reduzida da seguinte forma: $P_d = C_d \times C_M$

Conforme demonstrado, o grau de compactação do solo é inversamente proporcional ao coeficiente de carga, ou seja, quanto maior o grau de compactação menor é o valor de K .

No caso em estudo foi definido um grau de compactação mínimo de 95 % Proctor Normal, para o qual se tem um coeficiente de carga de 0,65. Portanto, a pressão de projeto seria igual a 65 % da carga morta, ou $P_d = 0,65C_M$.

Considerando-se um grau de compactação inferior, por exemplo, 80 % Proctor Normal, K assumiria o valor de 0,99. Logo, a pressão sobre os tubos seria bem maior, ou seja, 99 % da carga morta ($P_d = 0,99C_M$).

A razão entre os dois valores de P_d acima obtidos mostra que a pressão sobre os tubos, caso o grau de compactação fosse de 80 % PN, seria mais de uma vez e meia maior do que se o grau de compactação fosse de 95 % PN, conforme demonstrado abaixo:

$$P_{d80\%} / P_{d95\%} = 0,99C_M / 0,65C_M = 1,52.$$

O aterro envoltório da tubulação de drenagem não atendeu as condições de projeto, ou seja, o aterro não foi executado em camadas intermediárias de 20 centímetros, de forma simétrica em relação às laterais do tudo até se atingir a sua geratriz superior. A partir deste ponto o aterro deveria ser executado ainda em camadas intermediárias de 20 centímetros até uma altura de 4 metros acima da mencionada geratriz, o que, aparentemente, também não ocorreu. Além disso, não foi comprovado que o grau de compactação 95 % Proctor Normal tenha sido alcançado e que ocorreu o controle tecnológico do aterro.

A execução do aterro envoltório de forma incorreta (em desacordo com as especificações anteriormente descritas) foi, portanto, a principal causa das deformações excessivas dos tubos.

Os cálculos de dimensionamento dos tubos mostraram que, mesmo para uma densidade da pilha de estéril superior àquela definida em projeto, os mencionados tubos não sofreriam deformações excessivas (acima do tolerável). Convém ressaltar que a densidade usada no dimensionamento dos tubos foi de 1.900 kg / m³, ao passo que a densidade média obtida em ensaios realizados foi de 2.405 kg / m³.

O rompimento da barragem da mineradora Vale em Brumadinho-MG, no ano de 2019, mostra o grande risco ao qual a sociedade e o meio ambiente estão expostos quando ocorre um desastre de tamanha magnitude. Portanto, todos os critérios técnicos devem ser levados em consideração nas etapas que envolvem o processo de mineração e, ainda, no caso do surgimento de inconsistências técnicas e manifestações patológicas. Logo, fica clara a importância da atuação de profissionais habilitados e qualificados em ambos os casos.

7. Referências

ABNT (2016): Solo – Ensaio de compactação – NBR 7182 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 2016d.

ABNT (2016): Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio – NBR 9895 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 2016e.

AISI (1994): Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products, Fifth Edition: American Iron and Steel Institute.

ANSI/AISC 360-05 (2005): Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, AISC, INC.

ARAGÃO, G. A. S. (2008) Classificação de Pilhas de Estéril na Mineração de Ferro, Dissertação de Mestrado do PPGEM, UFOP, 117p.

DNPM - NRM 19 (2001) Disposição de Estéril, Rejeito e Produtos, Normas Reguladoras de Mineração, Departamento Nacional de Produção Mineral Rio de Janeiro, p. 74 – 82.

MULTIQUIP (2004): Manual Básico de Compactação do Solo.

OMRACI, K., SOUKATCHOFF, V.M., Tisot, J.P., Piguet, J.P., Le Nickel-SLN. (2002). Stability analysis of lateritic waste deposits. Elsevier Science, Engineering Geology, 68, pp 189-199.

QUEIROZ, G. (1993): Elementos das Estruturas de Aço. 4ª Edição, Belo Horizonte, p.455.

SALMON, C. G. and JOHNSON, J. E. (1996): Steel Structures – Design and Behavior. 4th Edition, Harper Collins Publishers Inc.

TEIXEIRA, M.B. (2011) - Estudo numérico do comportamento mecânico de pilhas de estéril de mineração, Dissertação de Mestrado do PPGEM, UFOP, 109p.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1977.