

ENGENHARIA NATURAL
PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA
DE TRAVESSIA DUTOVIÁRIA
NO ESPÍRITO SANTO
CASO 2

Charles R. B. Maffra
Rita S. Sousa
Fabício J. Sutili

Apresenta-se aqui outra obra de Engenharia Natural realizada em travessia de dutos, também em Cariacica, Espírito Santo. O projeto e acompanhamento, antes e após execução da obra, foram realizados pelo Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria. Os principais problemas identificados na travessia envolveram a perda de estabilidade da faixa e a exposição do duto, resultantes de irregularidades no canal e de eventos pluviométricos intensos. A principal medida corretiva consistiu na construção de um cinto basal saliente com perfil de compensação de inclinação reduzida, de modo a garantir proteção imediata ao duto e diminuição na competência do fluxo. Complementarmente, para assegurar a estabilidade dos taludes, foi construída uma parede krainer na margem esquerda e realizado o plantio de mudas na margem direita. O acompanhamento da obra mostra que as soluções adotadas têm atendido às exigências técnicas, além de estarem cada vez mais inseridas na paisagem local.

1 Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar, por meio de um exemplo, o recente estágio da Engenharia Natural no Brasil, no que diz respeito ao desenvolvimento de projetos e execução de obras. O caso de estudo específico deste trabalho é uma obra executada para uma empresa de transporte de petróleo e gás, cujo gasoduto corta um córrego de montanha numa travessia submersa, local que constitui faixa de servidão de transporte dutoviário de gás no estado do Espírito Santo, região sudeste do Brasil.

O caso consiste em uma inconformidade constatada na travessia após eventos pluviométricos intensos. Nessa travessia, devido à velocidade da água, o duto foi parcialmente exposto e passou a servir como barramento, sofrendo tensões adicionais de turbilhonamento e forças de fluxo. O duto exposto, nesse caso, tem maior risco de ser danificado pela ação de terceiros e maior suscetibilidade a eventos geotécnicos típicos da região, como movimentação de tálus, queda de blocos e corridas de detritos. Buscando-se evitar a evolução dos processos erosivos, bem como a perda de estabilidade da faixa e uma provável danificação do duto, medidas baseadas em técnicas de Engenharia Natural foram utilizadas para a correção e readequação da situação problemática.

O projeto para estabilização hidráulica e recuperação da área foi elaborado no ano de 2012 pelo Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria, e a execução da obra decorreu no mês de agosto de 2014.

A área de estudo localiza-se especificamente em um trecho da faixa nas coordenadas 20°16'41,36" Sul e 40°27'37,06" Oeste, a altitude aproximada de 106 metros, no município de Cariacica, Espírito Santo (figura 1).

2 Caracterização do problema

2.1 Descrição do problema

O problema consiste na exposição da geratriz superior de um duto de transporte de gás e dos cabos de fibra óptica (figura 3) devido à erosão do leito e das margens em um córrego de montanha. A exposição do gasoduto ocorreu após eventos pluviométricos intensos no início de 2012.

Antes desses eventos pluviométricos, o duto estava enterrado numa profundidade média de 1m, em trecho de

travessia esconso ao curso de água. Em função do regime torrencial, fruto das chuvas intensas e das características da bacia, houve perda da estabilidade do eixo do curso de água, que passou a escavar o fundo do leito do rio. As alterações do fundo do leito devido à escavação do mesmo diminuiram a cobertura do duto, expondo sua geratriz superior. A escavação ocorreu de modo que o terreno passou a apresentar uma pequena elevação onde o duto se encontra, uma vez que é feito de um material resistente ao escavo, comparado com o material do leito.

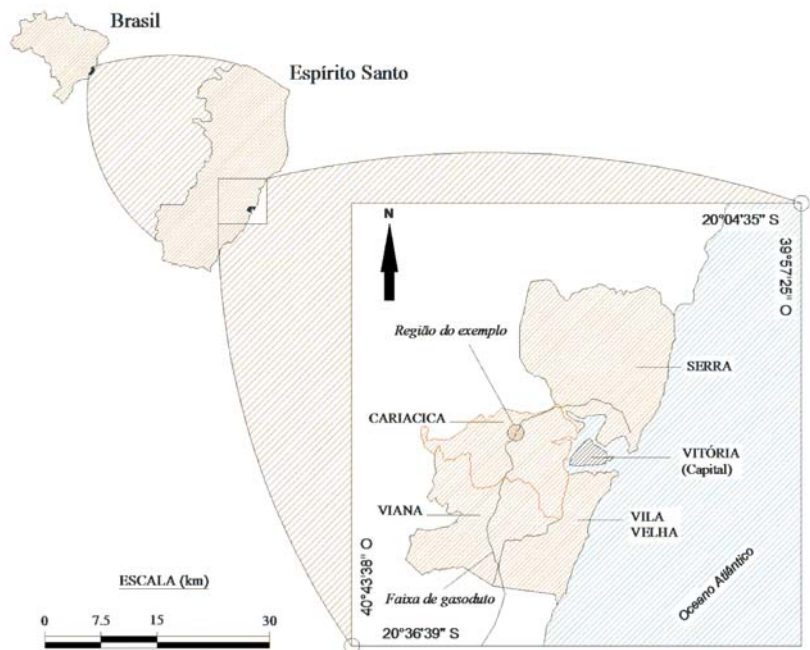


Figura 1: Localização da área de intervenção. Fonte: Adaptado de TRANSPETRO¹

¹ PETROBRAS TRANSPORTES S. A. (TRANSPETRO). Disponível em: <http://www.transpetro.com.br>. Acesso em 15 de dezembro de 2012.

Existe ainda, na margem esquerda, um deslizamento caracterizado pela queda de uma pequena massa de solo com 7,5m de comprimento e 2,25 de altura. A instabilidade se deve à confluência de alguns fatores, como o estrangulamento e o ressalto natural causados por um grupo de blocos de rocha; logo após, o fluxo sofre expansão num trecho aproximadamente retilíneo de 25m, onde escavou o terreno não consolidado, taludes íngremes de mais de 2m de altura em ambas as margens. Justamente no final desse trecho está o início do deslizamento. Ali, na margem direita, existe um grupo formado por dois blocos rochosos

de dimensões maiores, que, durante as cheias, direcionam o fluxo diretamente para a margem oposta, ocasionando a erosão e desconfinamento da base do talude e, conseqüentemente, a queda do maciço de solo. Esse fato se potencializa pela característica não consolidada do solo de tálus da região, ainda mais fragilizado pela instalação do cavalo durante a obra de implantação da travessia do duto em 2007. Além disso, os excedentes pluviiais drenados da faixa no talude, a montante da margem direita, são diretamente direcionados sobre o trecho do talude rompido (figura 2).

Num trecho mais adiante, os cabos ópticos também foram expostos devido à elevada velocidade da água e, conseqüentemente, ao alto poder erosivo do fluxo (figura 3).

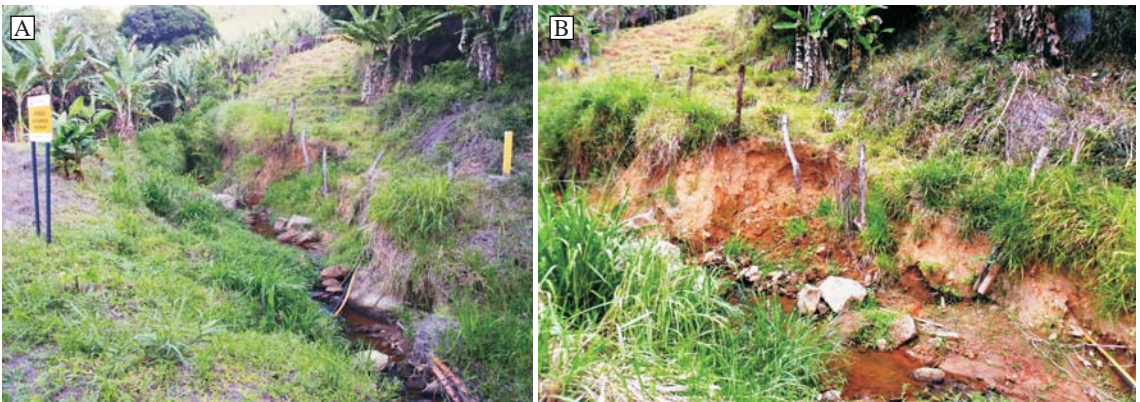


Figura 2: Aspectos gerais do canal. As imagens a e b mostram um canal alterado pela energia do fluxo da água. Leito e margens escavados, fragmentos de rochas de grandes dimensões arrastados e margens com inclinações acentuadas



Figura 3: Aspecto geral do canal a jusante do duto (a) e detalhe da exposição do cabo de fibra óptica (b)

2.2 Caracterização da área, bacia hidrográfica e curso de água

A área está localizada em região com relevo bastante acidentado, caracterizada geotecnicamente pela presença de tálus e blocos de rocha de granulometria extremamente irregular, provenientes de queda dos maciços rochosos das vertentes ou transportados pelo curso de água responsável pela drenagem da bacia.

O curso de água apresenta variação elevada da vazão, em função da rápida resposta às chuvas intensas. Em períodos de estiagem, a vazão perene se reduz a níveis que podem ser desprezados no dimensionamento hidráulico do problema. Desse modo, quanto à continuidade do fluxo, o rio é classificado como perene, apresentando, no entanto, grandes picos de cheias em épocas de altos níveis pluviométricos. Essas características configuram um comportamento torrencial de montanha.

Os leitos de inundação se apresentam com pequena largura (menores que 2 vezes a largura do curso de água), sendo que no caso dos picos de cheias as cotas de inundação são elevadas, embora efêmeras, em função da forte declividade do terreno. Pelo fato de o trecho em questão do curso de água se encontrar na zona de escavação, as características de incisão no leito são marcantes (caixa do canal bem demarcada) e os depósitos aluvionares praticamente inexistentes, com exceção de blocos de rocha de granulometria variada, sendo a maior parte transportada somente em eventos de cheias extremas.

Ao longo do curso de água, a presença de mata ciliar é descontínua, havendo trechos em que a vegetação nativa cede espaço a plantios de bananeiras e pastagens. No trecho em questão, o curso de água encontra a faixa de dutos, coberta por gramíneas, leguminosas herbáceas e plantio de feijão.

A bacia hidrográfica, delimitada pelo local de ocorrência do problema, admitida como seção de controle, apresenta uma área (A) pequena igual a $0,84\text{km}^2$, um perímetro total de $3.662,93\text{m}$, um talvegue (L) curto de $1,21\text{km}$ e uma inclinação de caráter mediano igual a $11,60\%$. A bacia possui um índice de circularidade alto ($0,78$), e um coeficiente de compacidade também alto ($1,12$), ambos caracterizando uma bacia com forma arredondada. As suas características físicas podem ser vistas na imagem de satélite da figura 4 e no perfil longitudinal do talvegue da figura 5.

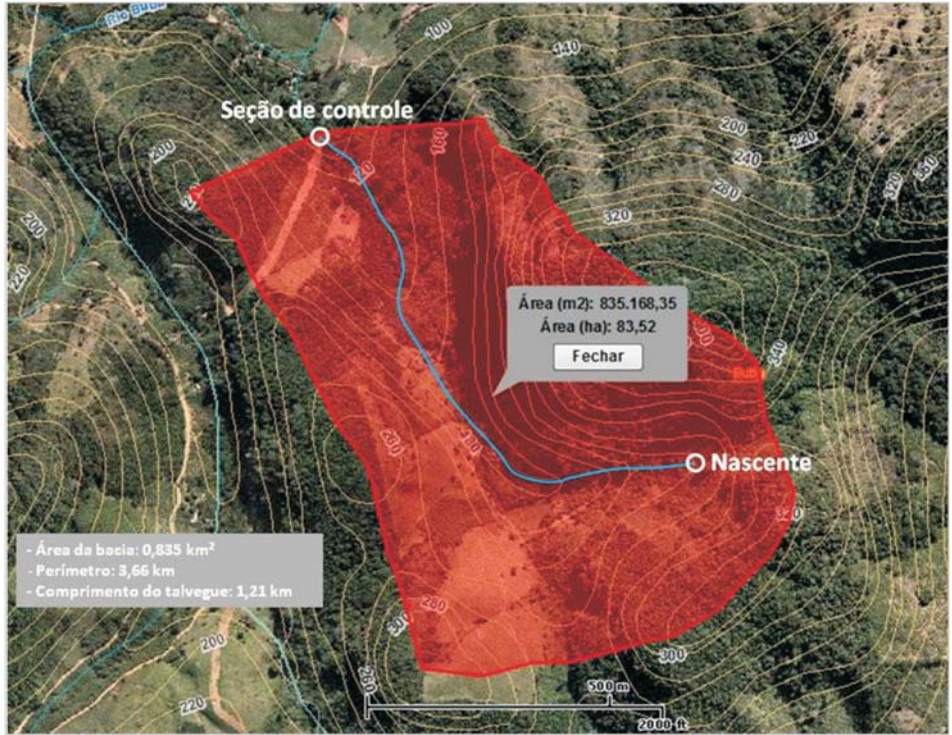


Figura 5: Perfil longitudinal do talvegue da bacia hidrográfica do ponto de ocorrência

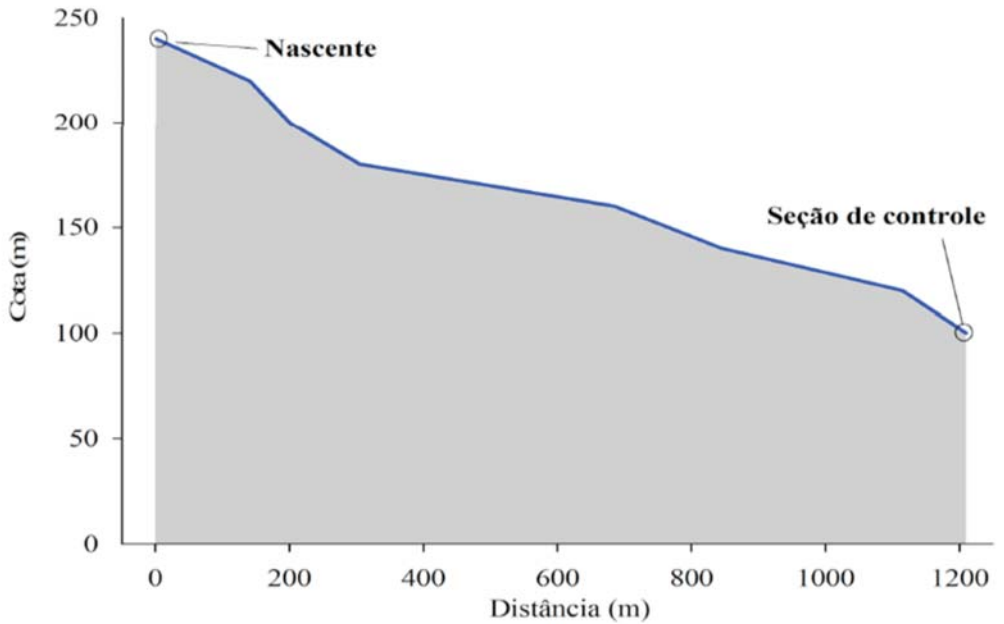


Figura 4: Bacia hidrográfica do ponto de ocorrência. (Fonte: Navegador Geobases)²

² NAVEGADOR DATA GEO-BASES. Disponível em <http://www.geobases.es.gov.br/>. Acesso em 5 de outubro de 2013.

³ RUSSO Jr., W. *Hidrologia aplicada e projeto de drenagem para faixas de dutos*. Rio de Janeiro, 2011.

⁴ DNIT – IPR-724 – *Manual de Drenagem de Rodovias*, Brasília, 2006.

⁵ PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4^a ed., São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 519 p., 2004.

⁶ PORTO, R. M. *Op. cit.*

O fator de forma e a densidade de drenagem, associados ao formato arredondado da bacia, indicam uma área excepcionalmente bem drenada, com tempo de concentração pequeno, podendo apresentar grandes picos de cheias em resposta a eventos pluviométricos mais intensos. O tempo de resposta, adotado como tempo de duração para determinação da chuva de projeto, pode ser estimado de acordo com o método Califórnia Culvert Practice.³ A resposta da bacia a um evento pluviométrico é bastante rápida; adota-se, portanto, nos cálculos da chuva de projeto, uma duração igual a 11 minutos.

A vegetação na área da bacia caracteriza-se por zonas de mata e algumas áreas de plantação de bananeiras e pastagens. Com base nessas características, o coeficiente de deflúvio adotado para o cálculo da chuva efetiva foi igual a 0,4.⁴

A vazão de projeto foi determinada pelo método racional, considerando uma chuva com período de retorno de 25 anos. A vazão de projeto calculada foi igual a $Q=15,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

As características das seções foram obtidas por meio de levantamento topográfico na área de interesse, com seções distribuídas a cada 5m ao longo do eixo do curso de água. O coeficiente de Manning adotado foi típico para os casos de córregos e rios com bancos e poços poucos profundos, presença de blocos de rochas e margens em más condições, assumindo-se o valor de 0,04 para o fundo do leito e porção inicial do talude e 0,075 para as margens com ocorrência de vegetação gramínea e herbácea.⁵

Foi calculado o coeficiente de Manning equivalente, e também foram estimadas as condições de transporte do fluxo, por meio do cálculo das dimensões máximas do material transportado durante uma cheia com a vazão de projeto no caso das características atuais do curso de água. Os resultados obtidos revelam altas velocidades de escoamento ($v_{\text{média}} = 3,34\text{m/s}$), em função principalmente de uma inclinação elevada (9,1%) e também de valores altos de raios hidráulicos. O curso de água apresenta competência para deslocar rochas de grandes dimensões (média de 0,73m). De acordo com Porto⁶, a velocidade média no fundo e margens para se evitar erosão do material das paredes e do fundo, deve ser inferior a 1,83m/s no caso de material cascalhado.

Através do número de Reynolds, o escoamento foi classificado quanto à rugosidade, sendo válida a equação de Manning, quando $Re_r > 70$. O escoamento também foi classificado em relação à velocidade crítica através do número

de Froude. Observou-se que o escoamento atende à condição de rugosidade para todas as seções, e é fluvial em seis delas. Contudo, o regime é torrencial em quatro seções, sendo duas na região do duto (estacas 4 e 3+15). Desse modo, algumas seções têm velocidade de escoamento, para a vazão de projeto, maiores que a velocidade crítica, mostrando que o fluxo terá grande quantidade de energia cinética, podendo deslocar materiais sólidos de grandes proporções e também de alto poder erosivo.

3 Soluções construtivas

São apresentadas as tipologias construtivas adotadas para solucionar o problema existente no local, bem como as condições hidráulicas para o novo perfil do curso de água (figura 6).

3.1 Medidas de tratamento

A seleção das medidas de tratamento foi apoiada pelo estudo do comportamento dinâmico dos processos erosivos, nas características da torrente, dos critérios de integridade do duto e da faixa e da sua posição em relação à bacia hidrográfica. Foram consideradas as alterações no regime fluvial a montante e a jusante do trecho de intervenção. Diante dessas questões, optou-se por uma solução que empregasse métodos e conceitos da Engenharia Natural. Tal abordagem utiliza-se de elementos naturais (vegetação) selecionados de tal modo que possuam características biológicas que se traduzam em efeitos técnicos responsáveis pela eliminação ou redução dos resultados adversos provenientes dos processos erosivos deflagrados nas margens e leito do curso de água.

Para a estabilização e controle do alargamento provocado pela erosão da margem esquerda, recomendou-se a utilização de obras longitudinais ao curso de água. Foi adotada a solução de parede kramer dupla vegetada (figura 12), uma vez que se trata de uma estrutura com maior capacidade de suporte. Para garantir a estabilidade da estrutura face ao escoamento superficial, projeto-se um sistema de drenagem na encosta com a função de redirecionar os excedentes pluviais.

Quanto à margem direita, o talude é pequeno (altura inferior a 1,0m) e com menor inclinação (em média 45°), o que faz sobrar mais espaço para a água se deslocar e distribuir a perda de energia cinética ao invés de concentrá-la em um único ponto. Assim, optou-se por um plantio de mudas em grande densidade a partir de sua base até a cota máxima que

a água pode alcançar. Depois de estabelecidas, as plantas atuam no aumento das condições de rugosidade e na redução da energia cinética do fluxo de água. Associadas ao reforço do solo proporcionado pelas raízes, tendem a aumentar as condições de estabilidade da margem.

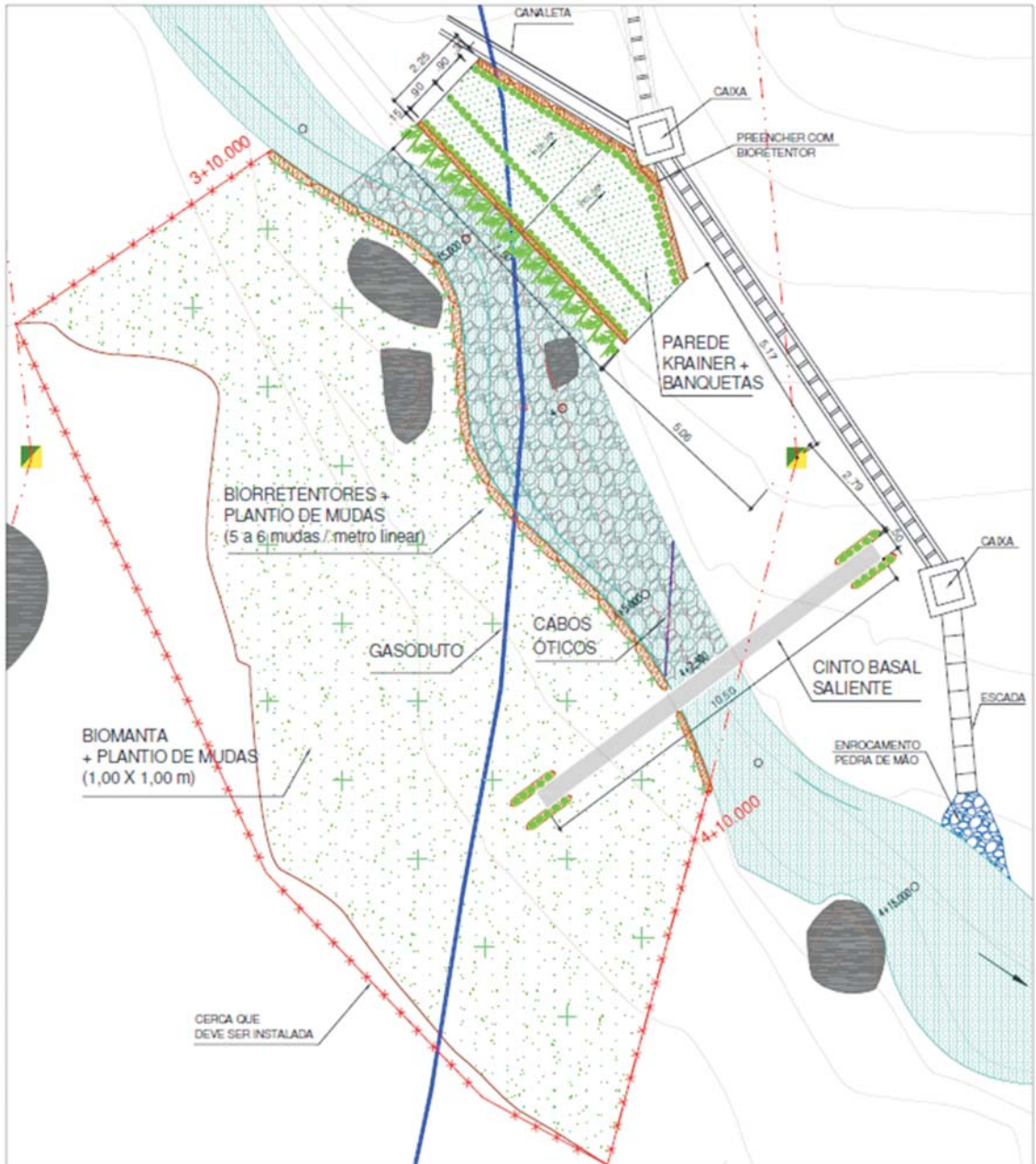


Figura 6: Levantamento topográfico com localização das intervenções executadas

Para a correção do problema de instabilidade do leito e para proporcionar proteção ao duto e aos cabos ópticos, foi indicada a implantação de um cinto basal saliente (figura 9). Isso se justifica uma vez que o uso da estrutura transversal pode, com facilidade, corrigir a inclinação do leito e diminuir as velocidades críticas e de alto potencial erosivo apresentado pelo curso de água no ponto de exposição. A altura do cinto é de 1,25m e foi calculada em função da inclinação do perfil de compensação formado e da necessidade de proteger e aumentar a cobertura atual do duto. O cinto basal saliente será instalado na altura da estaca 4 posicionada perpendicularmente ao fluxo do eixo da torrente e mostrada na figura 6.

A inclinação do perfil de compensação resultante é um fator importante para o projeto de obras transversais, uma vez que, se for subestimada, a altura da obra será maior que o necessário, levando a um superdimensionamento da estrutura. Já no caso oposto, o de uma inclinação superestimada, as instalações e obras que tenham sua estabilidade dependente do perfil a montante ficam sob risco. De acordo com Ferro & Porto⁷, a inclinação resultante do perfil de compensação é conhecida por inclinação de equilíbrio de leito (I_e) e depende das características geométricas do fluxo, do tamanho característico do material de leito (D_s) e das condições hidráulicas da seção do curso de água, podendo ser estimada pela seguinte equação empírica:

$$I_e = \frac{0,056(\gamma_1 - \gamma)D_s}{\gamma R_h} \quad \text{Equação 1}$$

$$b = \frac{v^2 \mu \gamma}{2gf(\gamma_1 - \gamma) \cos \alpha} \quad \text{Equação 2}$$

A dimensão mínima do material depositado a montante do cinto basal foi calculada utilizando-se a equação 2 e resultou num valor de 0,23m. Como não se tinham informações de hidrossedimentologia, nem do tempo necessário para formação desse perfil, o perfil foi construído imediatamente após a instalação do cinto basal saliente pela colocação de uma camada de material pelo menos até a estaca a montante do duto. Assim, a inclinação resultante, utilizando-se a equação 1, é igual a 4%.

A seção de vazão do vertedouro foi dimensionada utilizando-se a equação de Cipoletti:

$$Q_d = 1,861L_v h_v^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 3}$$

⁷ FERRO, V. & PORTO, P. *Predicting the equilibrium bed slope in natural streams using a stochastic model for incipient sediment motion*. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 36, issue 8, p. 1.007-1.022, 2011.

Onde L_v é a largura e h_v a altura da lâmina de água sobre o vertedouro.

Foi adotada uma largura do vertedouro de 5,0m, o que resultou numa altura de lâmina de água 1,40m, contudo o vertedouro foi dimensionado com uma altura de 1,0m, sendo o excedente entendido como cota de inundação. Essa altura de lâmina de água foi utilizada como condição de contorno para avaliação da curva de remanso provocada a montante do cinto basal saliente, conforme a equação diferencial que rege o escoamento gradualmente variado em canais livres:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1 - \frac{n^2 Q_d^2}{A_m^2 R_h^3}}{1 - \frac{b_c Q_d^2}{A_m^3 g}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde b_c é a largura do canal.

Como o regime descrito pela equação 4 existe apenas entre a implantação da obra transversal e a formação do perfil, uma vez que o perfil será construído logo após a execução do cinto basal saliente, o regime de fluxo volta a ser descrito pela equação de Manning e resulta nos dados da tabela 1, onde se pode ver que houve redução da velocidade média, o que leva ao surgimento de escoamento do tipo fluvial em todas as seções. O coeficiente de rugosidade de Manning para a intervenção adotada foi igual a 0,075.

A comparação das características hidráulicas entre o perfil novo e o antigo pode ser obtida por meio de seus valores médios, listados resumidamente na tabela 1. Observou-se uma redução nos valores médios de velocidade do escoamento. Houve um pequeno aumento nas cotas de inundação e um aumento moderado no raio hidráulico, em função da inundação da seção. A inundação pode ser permitida, uma vez que é efêmera por causa da forte declividade natural do terreno. Além disso, não há benfeitorias dentro do raio previsto de inundação.

As condições de escoamento para o novo regime foram calculadas e mostraram que todas as seções têm regime de escoamento rugoso e fluvial, ou seja, o excesso de vazão durante as cheias causará aumento de energia de pressão hidrostática pelo aumento da lâmina de água e não o aumento de energia cinética pela aceleração do fluxo.

Tabela 1: Comparação das condições hidráulicas médias para o perfil antigo e novo

Parâmetros	Perfil antigo	Perfil novo	Variação (%)
Inclinação	0,091	0,04	-56
Raio Hidráulico (m)	0,80	0,83	3,8
Velocidade (m/s)	3,34	2,36	-29,3
Rocha deslocada (m)	0,73	0,32	-56,2
Cota de inundação (m)	198,88	199,71	0,42

Por fim, deve-se garantir a estabilidade das obras transversais, admitindo-se que a erosão de fundo não deva escavar além da base dessas fundações. A profundidade de escavo pode ser calculada pela seguinte fórmula⁸:

⁸ JULIEN, P. Y. *River mechanics*. Reino Unido: Cambridge University Press, 2002.

$$d_s = \left\{ 1,80 \left[\frac{\text{sen}\phi}{\text{sen}(\phi + \theta_j)} \right]^{0,8} \frac{q^{0,6} V_1 \text{sen}\theta_j}{[(G-1)g]^{0,8} D_s^{0,4}} \right\} - h_d \quad \text{Equação 5}$$

Onde f é o ângulo de repouso do material (adotou-se 40°), q_j é o ângulo de inclinação da face de jusante do cinto basal, q é a vazão unitária (vazão de afogamento da seção 9,31m³/s do vertedouro dividida pela largura do escoamento), V_1 é a velocidade sobre a soleira, admitida igual a crítica, G é o peso específico do material do leito e D_s o seu diâmetro (adotado 50cm) e h_d é a altura de queda da lâmina vertente.

A profundidade de escavo resultante é de 0,15m; assim será adotada para o cinto basal uma sapata de 0,70m de profundidade por segurança, com colocação de blocos de rocha maiores que 0,50m numa profundidade de 0,20m e numa distância avaliada do seguinte modo⁹:

⁹ PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 2ª ed., São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 519 p., 1999.

$$L_1 = 3,55 \left(\frac{q^2}{g} \right)^{\frac{3}{2}} + 0,34h_d \quad \text{Equação 6}$$

O cálculo da distância resultou num L_1 de 0,70m. Essa distância corresponde ao alcance horizontal do escavo.

O cinto basal saliente teve sua estabilidade verificada quanto ao deslizamento, tombamento e tensão admissível com coeficiente de segurança mínimo de 1,5.

A parede krainer também foi dimensionada quanto ao tombamento, deslizamento e tensão admissível, enquanto as peças de madeira tiveram sua resistência à flexão verificada conforme métodos estabelecidos de geotecnia e de mecânica estrutural. Todas as verificações resultaram em fatores de segurança maiores que 1,5.

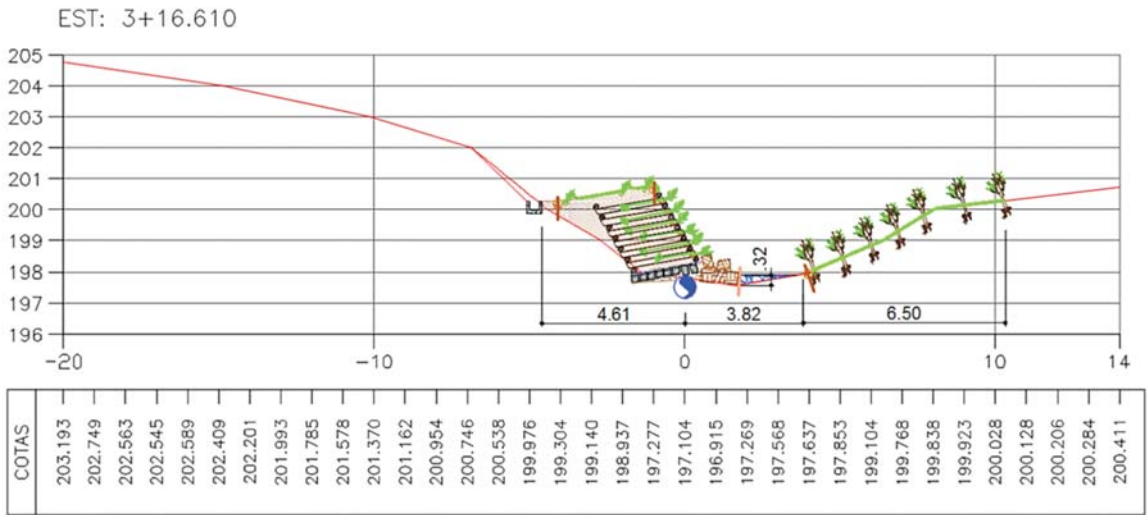


Figura 7: Exemplo de uma seção transversal localizada na estaca 3+16.610

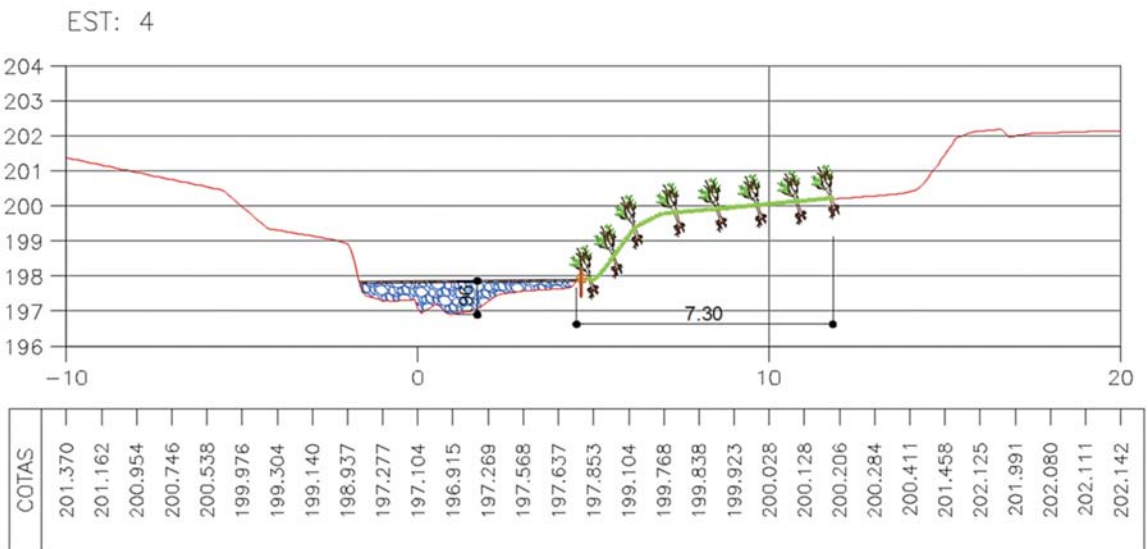


Figura 8: Exemplo de uma seção transversal localizada na estaca 4

3.2 Descrição das intervenções e técnicas executadas

3.2.1 Terraplanagem

A terraplanagem foi necessária para conformação dos taludes de margens, suavizando quinas mais protuberantes. Executou-se o corte do tardoz para que a inclinação do mesmo fosse igual a 60 graus, o que resultou num volume de corte de 1,20m³.

Todo material retirado foi utilizado para enchimento da parede krainer. Também foi preparada a base da parede krainer conforme o detalhado em projeto. As rochas maiores entre as seções 3+10 e 4+00 foram retiradas para liberação do eixo da torrente.

3.2.2 Cinto basal saliente

A obra transversal consistiu na execução de um cinto basal saliente em concreto simples localizado na altura da estaca 4+7,30. A locação do cinto basal nessa posição se deve ao objetivo de proteção tanto do duto quanto do cabo óptico (totalmente exposto), bem como do limite da faixa (de modo que fique posicionado dentro da faixa). A jusante o efeito da estrutura fica limitado pelo poço formado naturalmente por blocos rochosos existentes no talvegue.

O cinto basal terá altura de 1,25m em relação ao leito do curso de água e uma soleira de 0,50m. A estrutura possui formato trapezoidal com largura de 1,10m na altura do terreno. A base é retangular com largura de 1,10m e profundidade de 0,70m. As alas apresentam largura constante de 0,50m. O vertedouro tem seção trapezoidal com base menor de largura igual a 5m, base maior de 10,5m e altura igual a 1,10m (figura 10). As alas devem ser aterradas e compactadas, sendo a superfície de contato do solo com as mesmas coberta com geossintético e biorretentores de sedimento a montante e jusante. As alas, em ambos os lados, foram protegidas com a instalação de biorretentores e plantio de mudas. (figura 17a).

Considerando também a área de escavo a jusante do cinto basal, foi utilizado enrocamento lançado em uma extensão de 0,7m, com rochas de 0,50m de diâmetro no mínimo, resultando numa camada colocada sob base escavada a 10cm de profundidade, o que correspondeu a um volume de rocha de 0,5m³.

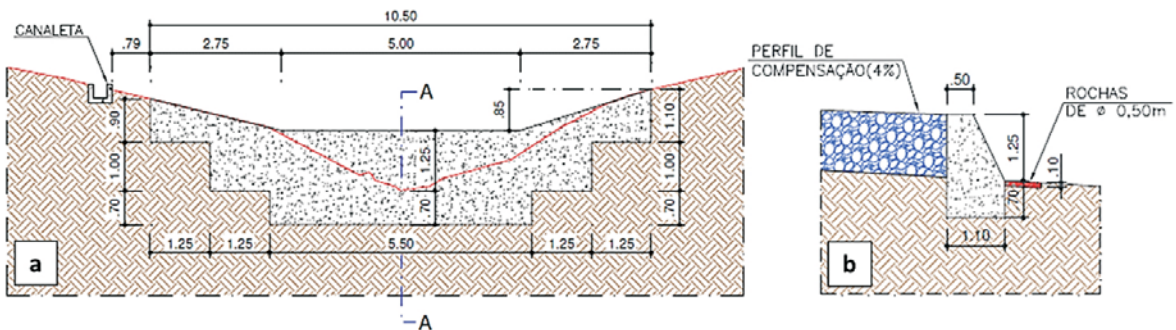


Figura 9: Aspectos construtivos do cinto basal saliente. Vista frontal (a) e corte transversal (b)

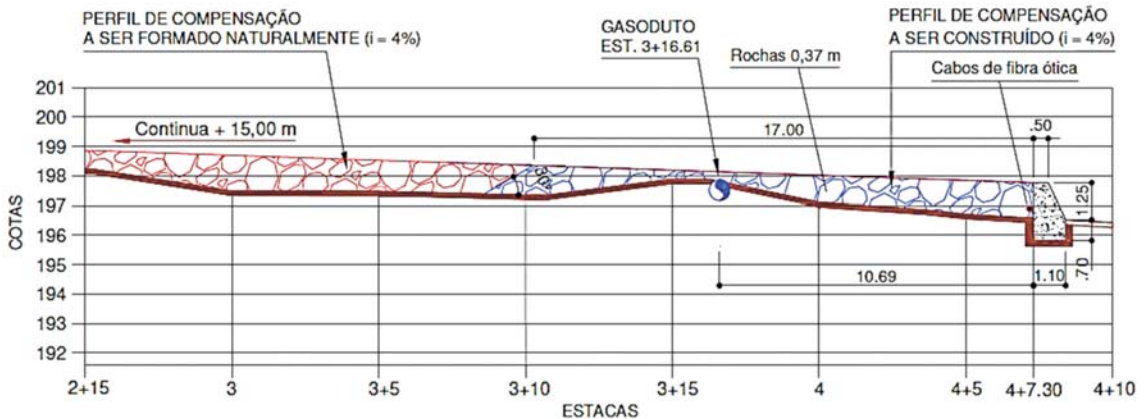


Figura 10: Aspectos executivos do perfil de compensação construído a montante do cinto basal saliente

No final da execução do cinto basal, foi construído o perfil de compensação com inclinação nula para proteção imediata do duto e do cabo óptico até a estaca 3+10 (figura 10 e figura 16), utilizando-se, para isso, rochas de dimensão 0,32m (corresponde à velocidade limite de transporte) ou maior.

O cabo óptico exposto ficou localizado abaixo do enrocamento do perfil de compensação implantado, inserido num tubo corrugado de aproximadamente 4m de comprimento e 15cm de diâmetro.

3.2.3 Parede krainer

A parede krainer dupla implantada na margem esquerda do curso de água foi constituída por dois módulos. Essa configuração em módulos procurou tornar a estrutura mais flexível, de modo a mitigar os efeitos deletérios à estrutura no caso de ocorrência de recalques diferenciais do terreno. Assim, cada módulo foi executado com 3,75m de comprimento (perfazendo o total de 7,50m), largura de 2,25m e alturas de 2,60m e 1,80m. Essa diferença de alturas corresponde às medidas do talude onde a parede foi implantada. O ângulo de inclinação da face da parede e consequentemente do tardoiz foi de 60°, enquanto que a base de assentamento da estrutura teve inclinação de 10° com acomodação de rochas de dimensão superior à velocidade limite de transporte (0,32m). A madeira utilizada tinha 20cm de diâmetro e o sistema de fixação foi executado com vergalhões de aço (figura 15), dimensionados conforme a NBR 7190 – 1997 (Projeto de Estruturas de Madeira). Nos espaços formados pelo cruzamento dos troncos transversais com

longitudinais, foram inseridas estacas e mudas das espécies selecionadas (15 unidades por espaço), bem como biorretentores de palha. Tais especificações podem ser observadas na figura 11 e na figura 12 e o procedimento construtivo nas figuras 13, 14 e 16.

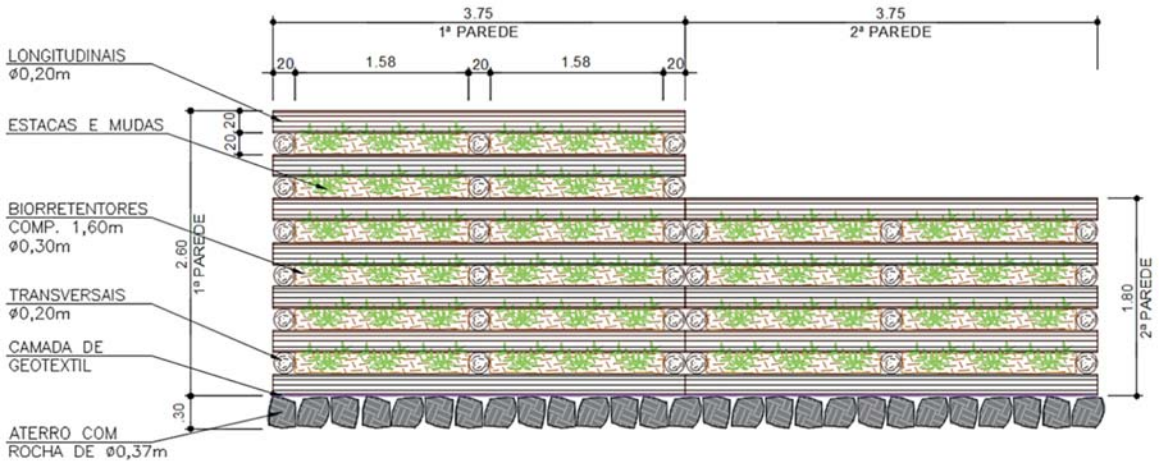


Figura 11: Parede krainer (vista frontal)

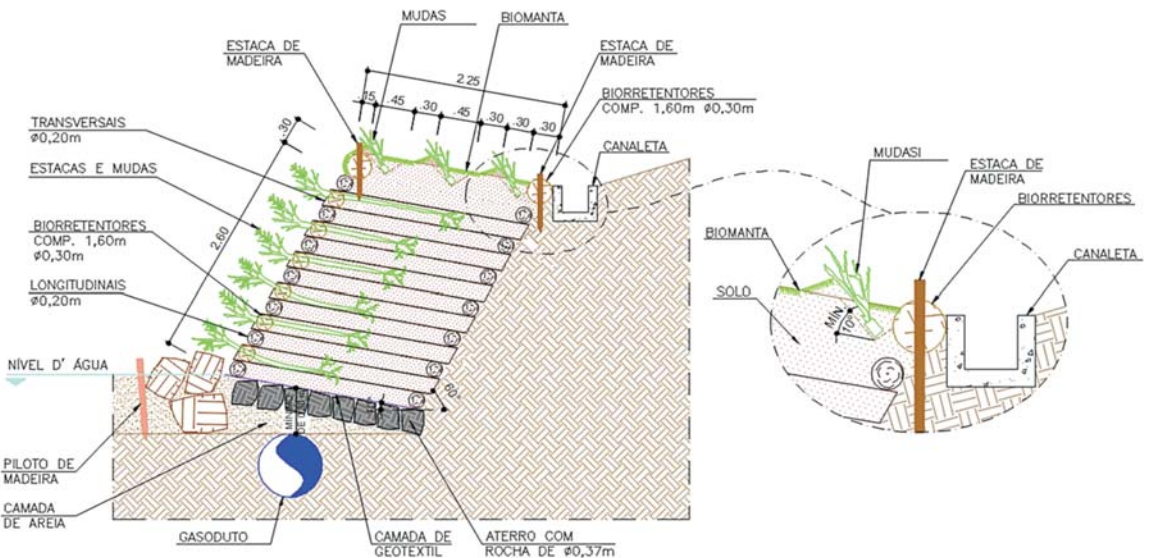


Figura 12. Parede krainer (corte transversal) e detalhe das banquetas

No topo da parede krainer foram implantadas banquetas vegetadas com mudas (figura 12). Busca-se com isso a retenção de sedimentos e a redução do escoamento superficial sobre a estrutura de contenção. As banquetas foram escavadas no solo com inclinação mínima da base de 10°, a uma profundidade de 0,60m e distanciadas entre si por aproximadamente 0,90m. No total foram executadas três banquetas com acomodação das mudas das espécies selecionadas na base das mesmas.



Figura 13: Preparação da base para a parede krainer. Processo de escavação (a, b) e preparação da base em enrocamento para assentamento da parede krainer (c, d)

3.2.4 Biorretentores e plantio de mudas

Na margem direita do curso de água, foram executados dois tipos de plantios de mudas (figura 17c e figura 17d). A escolha foi definida pela necessidade de proteção superficial e estabilização do solo em um tempo relativamente curto. Na altura do nível médio da água foi implantada uma linha de biorretentores combinados com o plantio de 5 mudas por metro até a proximidade com o cinto basal

(extensão aproximada de 20m). Onde a máquina danificou o talude foram plantadas mudas (1 un/m²) com altura mínima de 0,50m sobre uma camada de biomanta de palha grampeada ao solo numa área aproximada de 250m².



Figura 14: Execução da parede krainer

De modo geral, para ambos os plantios, durante a execução, realizou-se uma fertilização com adubo NPK (10:20:10) e aplicação de hidrogel, que teve como função manter as plantas hidratadas. Após o término dos trabalhos, as mudas foram irrigadas, dando-se preferência para horá-

rios durante o início da manhã ou no fim da tarde. A irrigação consistiu na aplicação de aproximadamente 1 litro de água por planta. Sempre que a precipitação pluviométrica ficou abaixo de 10mm no período de 30 dias, realizou-se nova irrigação.



Figura 15: Detalhes da fixação dos troncos da parede krainer

3.2.5 Drenagem

A drenagem foi executada na crista do atual talude, formado devido ao deslizamento de solo, logo após a construção da parede krainer para redução dos volumes excedentes da precipitação sobre a estrutura de contenção (figura 17b). Além disso, foram executadas 25m de canaletas com seção 0,30 x 0,30m e 0,10m de espessura, sendo 19,5m escalonadas com barreiras de concreto a cada 0,40m de comprimento. As barreiras de concreto têm altura de 15cm e espessura igual a 7cm. No trecho final foi implantada uma canaleta com 4,5m de comprimento, feita com enrocamento. Junto das canaletas foram instalados biorretentores de sedimento com 30cm de diâmetro e leiras construídas com solo da escavação das canaletas, sendo que entre esses e as leiras foram plantadas estacas e mudas. O plantio foi executado linearmente com densidade de 10 plantas por metro, numa extensão de 13m, somente no entorno da parede krainer.

3.2.6 Recomposição da faixa e serviços finais

Um trecho de aproximadamente 132m de comprimento e 4m de largura, utilizado para acesso, foi recuperado após a implantação da obra, através da execução de trabalhos de escarificação, semeadura, recomposição de leiras e canaletas em todo o trecho. No final foram retirados todos os materiais não pertencentes à obra, tais como res-

tos de madeira, formas, barreiras de sedimentos, geossintéticos e outros. As cercas foram refeitas; depressões nas vias de acesso provocadas por trânsito de veículos e equipamentos da obra foram recuperadas.

3.3 Vegetação utilizada

As espécies utilizadas para execução da obra estão listadas na tabela 2 e foram plantadas segundo a distribuição explicada para cada técnica.

Tabela 2: Lista de espécies utilizadas e respectivas quantidades.

Tipo	Espécies	Nome comum	Quantidade
Muda	Sebastiania schottiana	sarandi-vermelho	185
Muda	Astronium comuna	jurema	195
Muda	Calliandra haematocephala	caliandra	195
Estaca	Senna reticulata	falso-fedegoso	100
Total geral			675



Figura 16: Execução da parede krainer e do perfil de compensação.



Figura 17: Aplicação de biorretentores e mudas nas alas do cinto basal saliente (a). Vista geral do sistema de drenagem no talude (b). Aplicação de biorretentor, biomanta e mudas na margem direita (c, d).

Literatura consultada:

DURLO, M. & SUTILI, F. J. *Bioengenharia, Manejo Biotécnico de cursos de água*, Porto Alegre, 2005.

NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. N 2726: Terminologia de dutos. Rio de Janeiro, 2012.

SUTILI, F.; GAVASSONI, E. & MAFFRA, C. *Projeto Conceitual de RAD - Km 284,900*. Relatório. Santa Maria, Brasil: Fatec - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

SUTILI, F.; GAVASSONI, E. & MAFFRA, C. *Projeto Básico de RAD - Km 284,900*. Memorial de Cálculo. Santa Maria, Brasil: Fatec - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

SUTILI, F.; GAVASSONI, E. & MAFFRA, C. *Projeto Executivo de RAD - Km 284,900*. Memorial Descritivo. Santa Maria, Brasil: Fatec - Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

4 Resultados

A figura 18 permite observar a evolução da obra ao longo de 4 meses. Na fotografia (a) vemos o local antes da implantação da obra com a diretriz superior do gasoduto e os cabos de fibra óptica expostos. A fotografia (b) apresenta o local imediatamente após a execução da obra, e a fotografia (c), o local 4 meses depois. Na fotografia (d), 16 meses após a execução da obra observa-se o desenvolvimento da vegetação implantada.

Na figura 19 são apresentados detalhes das mudas e estacas vivas aplicadas na parede krainer imediatamente após a execução (a), e do desenvolvimento das plantas após 2 meses (b). A figura 20 mostra o desenvolvimento da vegetação 4 meses após a execução da obra. Na fotografia (a), uma vista geral da face da parede krainer e na (b), um detalhe do desenvolvimento das mudas e das estacas vivas.

O desenvolvimento da parte aérea da vegetação proporciona o aumento da rugosidade hidráulica, diminuindo a velocidade da água junto à parede krainer, enquanto o desenvolvimento do sistema radicular aumenta o efeito estabilizante da técnica em profundidade.



Figura 18: Evolução da obra de Engenharia Natural



Figura 19: Detalhe do desenvolvimento da vegetação

Na figura 21, vêem-se a margem direita imediatamente após a execução (a), e o desenvolvimento das plantas após 4 meses (b). A biomanta aplicada na margem, bem como os biorretentores junto à linha de água, já não são visíveis devido ao desenvolvimento das plantas, que cumprem a função de revestimento do solo impedindo processos erosivos superficiais.



Figura 20:
Evolução da vegetação na
margem esquerda



Figura 21:
Evolução da vegetação
na margem direita

5 Considerações finais

Foram apresentados os principais mecanismos de avaliação e dimensionamento das soluções adotadas para tratamento de trecho de gasoduto exposto em decorrência de erosão fluvial.

Técnicas de Engenharia Natural serviram para evitar a evolução de processos erosivos e readequar os problemas instaurados, buscando principalmente proteger o duto e cabos de fibra óptica, bem como estabilizar e renaturalizar o curso de água.

Decorrido um ano após a implantação da obra, as principais funções técnicas obtidas com as intervenções projetadas foram a proteção do duto e dos cabos de fibra óptica, a estabilização em profundidade pelo sistema radicial das plantas, a proteção superficial do solo devido à parte aérea, a redução da velocidade da água ao longo das margens e fundo do canal devido à formação de um novo perfil de compensação e aumento da rugosidade hidráulica. Além dos benefícios técnicos, o recurso à utilização de técnicas de Engenharia Natural possibilitam várias melhorias das funções ecológicas, como o restabelecimento de vegetação nativa (propiciando melhorias para que isso ocorra espontaneamente), aumento da diversidade de fauna e flora, bem como melhorias nos danos causados à paisagem pela intervenção dutoviária.

Charles Rodrigo Belmonte Maffra é Engenheiro Florestal, mestre em Ciências Florestais, doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria e sócio da empresa Salix Engenharia Natural.

charles.maffra@gmail.com

Rita dos Santos Sousa é graduada em Engenharia Biofísica, mestre em Ciências Florestais e doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

ritasousa.ufsm@gmail.com

Fabrcio Jaques Sutili é graduado em Engenharia Florestal, doutor em Engenharia Natural e professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

fjsutili@gmail.com