

ENGENHARIA NATURAL
PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA
DE TRAVESSIA DUTOVIÁRIA
NO ESPÍRITO SANTO
CASO 1

Rita dos Santos Sousa
Charles Rodrigo Belmonte Maffra
Fabício Jaques Sutili

Soluções de Engenharia Natural constituem alternativa técnica apropriada para manter a proteção e a estabilidade de faixas dutoviárias, além de melhorarem as condições ambientais e ecológicas locais. O projeto elaborado pelo Laboratório de Engenharia Natural (Universidade Federal de Santa Maria) e descrito nesse artigo, apresenta a execução e a evolução temporal de uma obra de Engenharia Natural em travessia de dutos no município de Cariacica, Espírito Santo. Exposição de duto e perda de estabilidade de leito e das margens foram os problemas tratados na travessia. A solução adotada consistiu de duas medidas: a estabilização hidráulica por meio de readequações no eixo, leito e margens, e o aumento da rugosidade hidráulica proporcionado principalmente pelo efeito técnico da vegetação implantada. Após um ano de implementação dessas medidas, além da efetiva proteção do duto, os resultados mais evidentes foram a redução da competência do fluxo, a perenização do canal e a deposição de sedimentos e também de propágulos da vegetação de regiões de montante.

1 Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar, por meio de um estudo de caso, os mais recentes avanços da Engenharia Natural no Brasil, no que diz respeito ao desenvolvimento de projetos e execução de obras. O estudo específico trata de uma obra executada por uma empresa de transporte de petróleo e gás, cujo gasoduto atravessa um córrego de montanha em travessia submersa, local que constitui faixa de servidão de transporte dutoviário de gás no estado do Espírito Santo, região sudeste do Brasil.

Travessias são pontos onde os dutos cruzam rios, lagos, açudes, canais e áreas permanentemente ou eventualmente alagadas ou por onde a passagem do duto é necessariamente aérea.¹ Esses locais, condicionados pela dinâmica fluvial e frequentemente modificados pela instabilidade de leitos e taludes, constituem situações de risco à integridade dos dutos e, eventualmente, dos cabos de fibra óptica que compartilham as mesmas faixas. 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 (UFSM), e a execução de obra decorreu em novembro de 2013.

A área de estudo localiza-se nas coordenadas 20°18' 13,50" Sul e 40°27' 7,80" Oeste, a altitude aproximadamente de 110 metros, no município de Cariacica, Espírito Santo (figura 1).

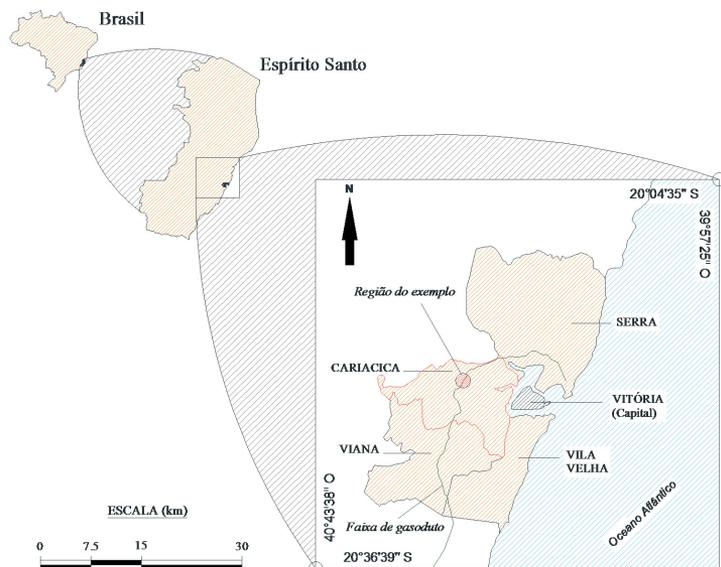


Figura 1: Localização da área de intervenção. Fonte: Adaptado de TRANSPETRO²

¹ NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. N 2726: Terminologia de dutos. Rio de Janeiro, 2012.

² PETROBRAS TRANSPORTES S. A. (TRANSPETRO). Disponível em: <http://www.transpetro.com.br>. Acesso em 15 de dezembro de 2012.

2 Caracterização do problema

2.1 Descrição do problema

O problema consiste na exposição do trecho de um duto de transporte de gás (figura 3) devido à erosão do leito e das margens em um córrego de montanha. A exposição do gasoduto ocorreu na segunda semana do mês de janeiro de 2012, após um período de chuvas intensas, como pode ser observado no hietograma da figura 2 para a estação pluviométrica mais próxima ao local de ocorrência. Registrou-se uma precipitação acumulada de 260mm na semana entre os dias 3 e 10 de janeiro, e um pico de 100mm acumulado para o dia 6 de janeiro.

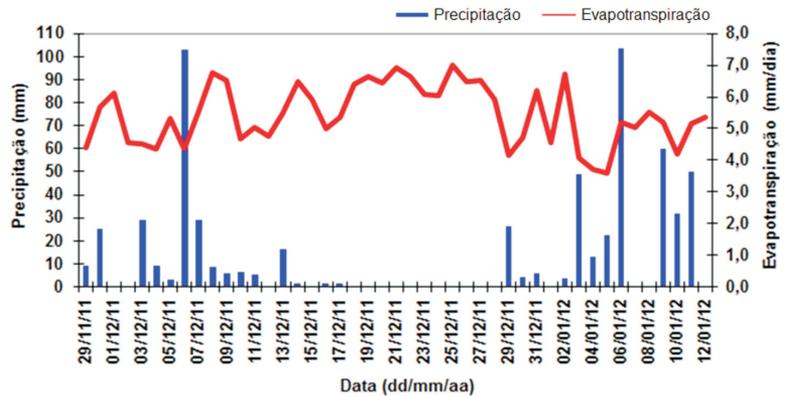


Figura 2: Hietograma para a estação pluviométrica de Viana para o período de 29/11/11 a 12/01/12. (Fonte: Incaper³)

³ INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br>. Acesso em 2012.

A estabilidade do fluxo do curso de água foi afetada diretamente por fatores hidrológicos e locais. No caso dos fatores hidrológicos, destaca-se o regime torrencial provocado principalmente pelas condições climáticas tropicais com verões chuvosos e pelas características físicas da bacia hidrográfica. Os eventos pluviométricos mais intensos do verão associados às características montanhosas da bacia hidrográfica induzem fluxos torrenciais cuja instabilidade pode levar à erosão das margens e do fundo do leito. Entre os fatores locais, merecem referência as obstruções do talvegue provocadas pela queda de blocos das vertentes do vale. Esse material causa instabilidade no eixo da torrente, que, por estrangulamento, pode sofrer alterações, levando à ocorrência de problemas de corrosão e desconfinamento de margens (figura 4).



Figura 3: Aspectos do canal junto ao duto. 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. A estabilidade da faixa foi prejudicada e a segurança do duto, exposto juntamente com a fibra óptica, poderia ser comprometida se o processo persistisse.



Figura 4: Aspectos do canal a jusante do duto. As imagens A e B mostram um canal relativamente estreito e bem demarcado, taludes com inclinação acentuada e rochas de grandes dimensões. Essas características são típicas em torrentes de montanha.

O eixo da torrente normalmente ocorria entre as rochas 6 e 8, sendo que, logo após as precipitações que expuseram o duto, este eixo passou a desenvolver-se entre as rochas 8 e 9 atingindo diretamente o duto (figura 5).

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 da 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. Tais características configuram um comportamento torrencial de montanha (figura 4). Ao longo do curso de água, a presença de mata ciliar é descontínua, havendo trechos em que a vegetação nativa cede espaço a plantações de bananeiras e pastagens. No trecho em questão, o curso de água encontra a faixa de dutos, coberta por gramíneas e leguminosas herbáceas.

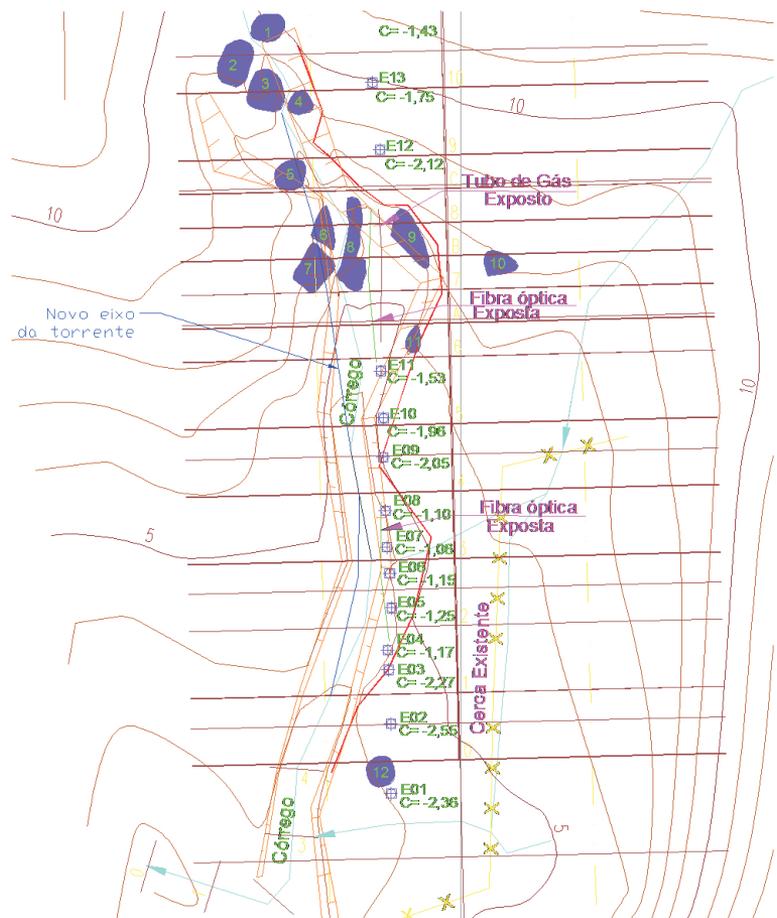


Figura 5: Levantamento topográfico do local de intervenção, com localização das respectivas seções e das rochas.



⁴ GOOGLE. *Google Earth*. (Roça Velha/Espírito Santo). Acesso em 2012.

Figura 6: Bacia hidrográfica do ponto de ocorrência. (Fonte: Google⁴)

A bacia hidrográfica, delimitada pelo local de exposição do duto, admitido como seção de controle, apresenta uma área (A) pequena igual a $0,460\text{km}^2$, um talvegue (L) curto de 900m e uma inclinação média de comportamento acentuado igual a $17,4\%$. A bacia possui um índice de circularidade alto ($0,65$), caracterizando uma unidade com forma arredondada. As suas características físicas podem ser vistas na imagem de satélite da figura 6 e no perfil longitudinal do talvegue da figura 7.

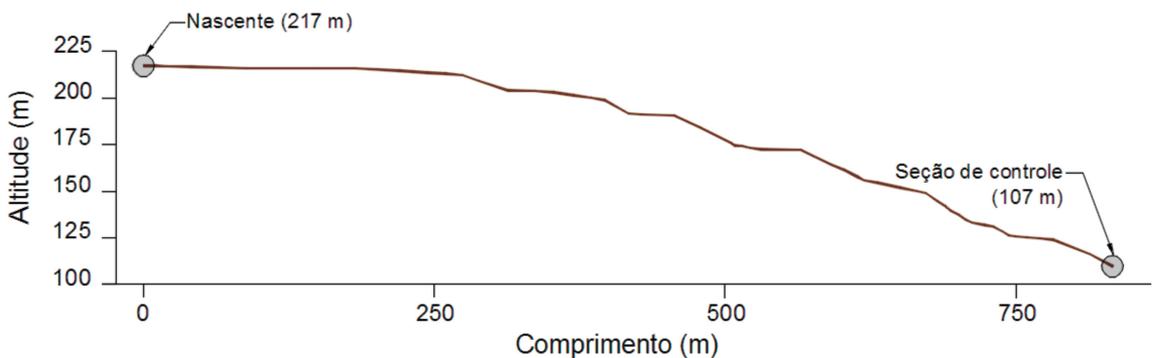


Figura 7: Perfil longitudinal do curso de água, da nascente até a seção estudada.

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 concentração, adotado como tempo de duração para determinação da chuva de projeto, pode ser estimado de acordo com o método Califórnia Culvert Practice⁵:

⁵ RUSSO Jr., W. *Hidrologia aplicada e projeto de drenagem para faixas de dutos*. Rio de Janeiro, 2011.

$$t = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} = 57 \left(\frac{0,9^3}{110} \right)^{0,385} = 8 \text{ min} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Δh é o desnível do talvegue em metros.

Como se observa no resultado da equação 1, a resposta da bacia a um evento pluviométrico é bastante rápida, adotando-se, portanto, nos cálculos da chuva de projeto, uma duração igual a 8 minutos.

A vegetação na área da bacia se caracteriza 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 será igual a 0,4.⁶

⁶ DNIT – IPR-724 – *Manual de Drenagem de Rodovias*. Brasília, 2006.

A fórmula de Manning é um desenvolvimento empírico para determinação do coeficiente de rugosidade da equação de escoamento analítica de Chézy, e pode ser escrita como:

$$Q = vA_m = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} R_h^{\frac{2}{3}} A_m \quad \text{Equação 2}$$

Onde: v é a velocidade do escoamento, A_m é a área molhada da seção transversal, n é o coeficiente de rugosidade de Manning, I é a inclinação do fundo do leito e R_h é o raio hidráulico da seção transversal, calculado como:

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: P_m é o perímetro molhado da seção transversal.

A verificação hidráulica utiliza o princípio de canais siameses, uma vez que, durante a vazão de projeto, o canal natural pode extravasar em certas seções e o escoamento se comporta como um fluxo em canais de diferentes características.

Com base nas características da bacia hidrográfica e do curso de água, pode-se estimar a vazão utilizando-se o método racional (válido para $A < 5 \text{ Km}^2$) matematicamente expresso por:

$$Q = ciA \quad \text{Equação 4}$$

Onde: Q é a vazão, c o coeficiente de deflúvio, i a intensidade da chuva de projeto e A é a área da bacia.

A intensidade de chuva em mm/h pode ser estimada com a curva IDF da região⁷:

$$i = \frac{4003,611T^{0,203}}{(t + 49,997)^{0,931}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: t é o tempo de concentração e T o período de retorno da chuva para a qual se calcula a intensidade.

A vazão de projeto foi determinada utilizando-se as equações apresentadas para uma chuva com período de retorno de 25 anos, resultando numa vazão de projeto igual a Q=10,1 m³/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 (igual a 0,05⁸) é típico para os casos de arroios e rios com bancos e poços pouco profundos, presença de blocos de rochas e margens em más condições; para o caso de margens vegetadas, foi utilizado o valor 0,10 equivalente a vegetação herbácea e gramínea. O coeficiente de Manning equivalente foi calculado assumindo-se que a força total de resistência ao escoamento, originada pelo efeito de cisalhamento junto ao perímetro Pm, é igual à soma de todas as forças de resistência em cada subárea de perímetro Pmi; desse modo, a rugosidade equivalente é dada por:

$$n_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{mi} n_i^2)}{P}} \quad \text{Equação 6}$$

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. Para esse fim, utilizou-se a seguinte equação:⁹

$$b = \frac{v^2 \mu \gamma}{2gf(\gamma_1 - \gamma) \cos \alpha} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: b – dimensão dos blocos transportados no sentido do fluxo; v – velocidade do fluxo de água; μ – fator de forma – 1,46; g – aceleração da gravidade (m/s²); f – coeficiente de atrito entre o sólido e o leito – 0,76; γ – peso específico da água – 10 kN/m³; γ₁ – peso específico da rocha – 26,75 kN/m³; α – ângulo de inclinação do terreno.

⁷ SILVA, D. D.; PINTO, F. R. L. P.; PRUSKI, F. F. & PINTO, F. A. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 18, p. 11-21, 1999.

⁸ PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4^a ed., São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2004. 519 p.

⁹ DURLO, M. & SUTILI, F. J. *Bioengenharia: Manejo Biotécnico de cursos de água*. Porto Alegre: EST, 2005.

Os resultados obtidos revelam altas velocidades de escoamento ($v_{\text{média}} = 4,10 \text{ m/s}$), em função principalmente de uma inclinação elevada e também de valores altos de raios hidráulicos. O curso de água apresenta competência para deslocar uma rocha de 0,99m (valor médio). De acordo com Porto¹⁰, a velocidade média no fundo e margens para se evitar a erosão do material das paredes e do fundo, deve ser inferior a 1,83m/s, no caso de material cascalhado.

O escoamento pode ser classificado quanto à rugosidade, em função dos parâmetros geométricos e de velocidade do escoamento. O número de Reynolds da rugosidade é um parâmetro pelo qual se verifica a confiabilidade da aplicação da equação de Manning ao problema, e calculado pela seguinte expressão:

$$Re_r = \left(\frac{n}{0,039} \right)^6 \frac{v_a}{10^{-3}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: v_a é a velocidade de atrito dada por:

$$v_a = \sqrt{gR_h I} \quad \text{Equação 9}$$

Através do valor obtido, o escoamento é rugoso, sendo válida a equação de Manning, quando $Re_r > 70$. O escoamento também pode ser classificado em relação à velocidade crítica. Quando a velocidade de escoamento for maior que a crítica, é classificado como rápido, torrencial ou supercrítico; quando menor, é chamado fluvial, lento ou subcrítico. Essa verificação pode ser feita indiretamente por meio do Número de Froude, dado pela expressão:

$$Fr = \frac{v}{v_{cr}} = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: v_{cr} é a velocidade crítica e y é a altura da lâmina de água.

O escoamento é torrencial quando $Fr > 1$ e fluvial quando $Fr < 1$. Os resultados mostram que o escoamento atende à condição de rugosidade para todas as seções, e é torrencial em todas, sendo menor na seção 6, onde o número de Froude é ligeiramente superior a 1; isso se deve ao ressalto e ao poço formado pela erosão logo a montante desse trecho. Deste modo, todas as seções têm velocidade de escoamento, para a vazão de projeto, maiores que a velocidade crítica, indicando que o fluxo tem grande quantidade de energia cinética, podendo deslocar materiais sólidos de grandes proporções e também de alto poder erosivo. Por

¹⁰ PORTO, R. M. *Hidráulica básica. Op. cit.*

esse fato, a descarga durante as cheias tende a se transformar em energia cinética através do aumento da velocidade.

3 Soluções construtivas

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

3.1 Medidas de tratamento

A seleção das medidas de tratamento baseou-se no estudo do comportamento dinâmico dos processos erosivos, nas características da torrente, nos critérios de integridade do duto e da faixa e na 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. Essa abordagem utiliza-se de materiais construtivos vivos (plantas), selecionados de tal modo que possuam características morfológicas e mecânicas capazes de se traduzir em efeitos técnicos responsáveis pela eliminação ou pela redução dos resultados adversos provenientes dos processos erosivos deflagrados nas margens e leito do curso de água. Desse modo, as plantas com potencial biotécnico prestam-se como material construtivo vivo, no sentido de que atuam tanto nas causas dos processos como também, de modo sintomático, na redução da susceptibilidade aos seus efeitos.

Para estabilização do eixo da torrente em geral, recomendaram-se estruturas de controle de fluxo, que atuam diretamente nos parâmetros de velocidade, direção e profundidade da lâmina de água.

Para o controle do alargamento provocado pela erosão das margens, recomendou-se a utilização de obras longitudinais ao curso de água. Foi adotada a técnica de enrocamento vegetado no trecho entre as estacas 3 e 8, em ambas as margens, bem como na margem esquerda, entre as estacas 9 e 11, para proteção dos locais onde os cabos ópticos foram expostos (figura 8).

Para o controle da erosão de fundo, recomendaram-se obras transversais ao fluxo de água, reduzindo ou controlando o perfil de escoamento, por meio da redução de sua inclinação. Nesse sentido, foi executada a escavação de dois ressaltos, o primeiro de 1,75m de altura, localizado entre as estacas 3 e 4 (figura 9), e o segundo de 1,0m entre as

estacas 5 e 6 (figura 10). No final do trecho de intervenção, foi colocada uma barragem de 0,75m de altura localizada na estaca 8. Como medida de proteção a essas estruturas foram colocadas soleiras a jusante das mesmas (figura 11). Tais medidas visaram a redução da inclinação longitudinal para valores máximos iguais a 2%, de modo que as velocidades de escoamento sejam inferiores aos valores recomendados para o material local.

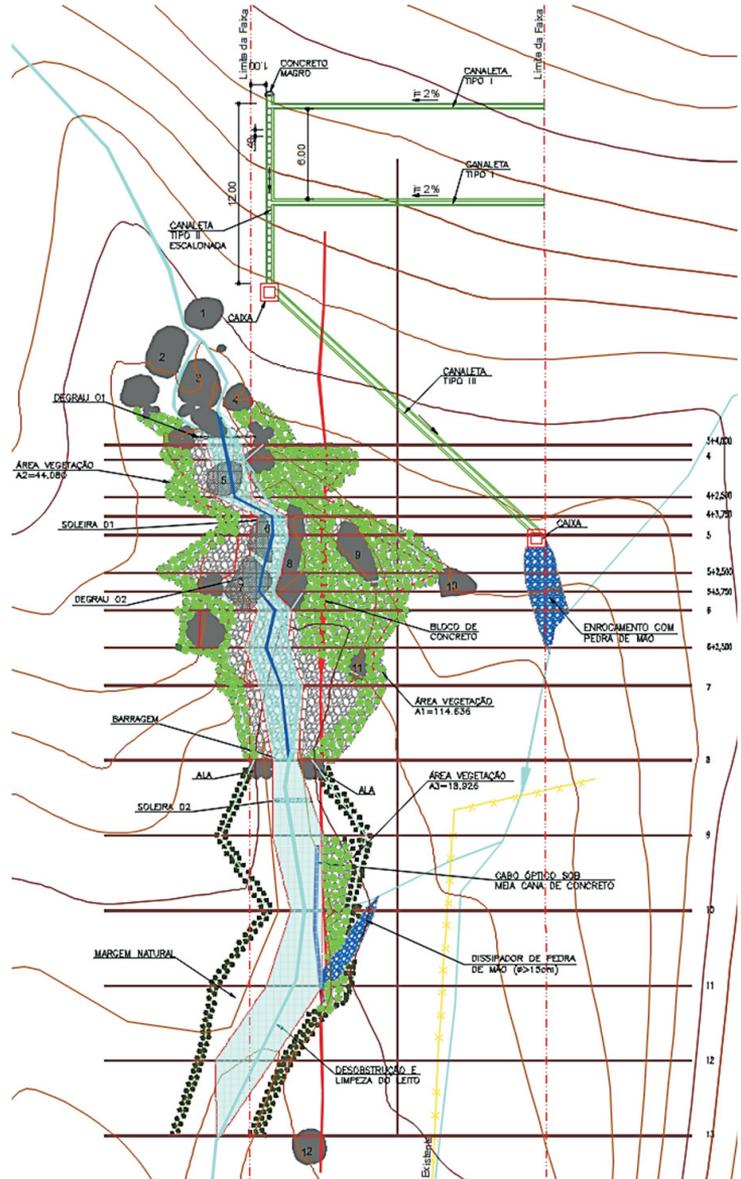


Figura 8: Levantamento topográfico com localização das rochas e intervenções executadas.

Em função da proximidade entre os eixos do duto e da torrente, foi necessário o desvio do eixo da torrente num trecho de aproximadamente 25m de extensão. Como resultado, o duto estará sob uma das margens do curso de água, protegido pelo enrocamento vegetado. A diretriz do novo perfil do curso de água passa por um local onde se encontravam três blocos de rochas (números 5, 6 e 7) que foram desmontados (figura 8). O material do desmonte foi utilizado na execução do enrocamento.

A estabilidade hidráulica do novo perfil do curso de água pode ser verificada aplicando-se os mesmos cálculos empregados no capítulo anterior, agora com as novas seções do perfil e novos coeficientes de rugosidade do material, desconsiderando-se, no entanto, o efeito da vegetação no enrocamento, ou seja, o coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,060. A inclinação das paredes transversais no novo trecho do canal foram dimensionadas levando-se em conta os valores limites recomendados por Porto¹¹ para o material das margens: até 60° para enrocamento e 90° no caso de paredes escavadas em blocos rochosos. Foram desprezados os efeitos das raízes nos blocos rochosos.

Observou-se uma redução nos valores de velocidade do escoamento e um consequente aumento na cota de inundação. Como resultado, o diâmetro do material sólido transportado foi reduzido; com isso, o enrocamento foi dimensionado com matacões com dimensões maiores ou iguais a 0,26m.

A comparação das características hidráulicas entre o novo perfil e o antigo pode ser obtida por meio de seus valores médios, listados resumidamente na tabela 1. Eles revelam grandes reduções nos valores de inclinação, de velocidade e de dimensão do material transportado. Houve pequeno aumento nas cotas de inundação e aumento moderado no raio hidráulico, em função da inundação da seção. A inundação pode ser permitida neste caso, uma vez que é efêmera devido à 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 da energia cinética pela aceleração do fluxo.

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.

¹¹ PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. Op. cit.

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

Parâmetros	Perfil antigo	Perfil novo	Variação(%)
Inclinação	0,16	0,02	-87,85
Raio Hidráulico (m)	0,40	0,73	82,50
Velocidade (m/s)	4,10	1,77	-56,83
Rocha deslocada (m)	0,99	0,18	-81,82
Nível de inundação (m)	5,21	6,16	18,23

As estruturas tiveram sua estabilidade verificada e foram apoiadas em pilotos de madeira (ou metal) e pinos metálicos de encaixe. No trecho não tratado, o leito foi limpo, com as rochas retiradas sendo apoiadas nas margens para melhoria das condições de escoamento.

3.2 Descrição das intervenções e técnicas executadas

3.2.1 Desmonte de rochas

Em decorrência da necessidade da mudança do eixo da torrente, uma quantidade aproximada de três blocos de rochas com um volume final de 50m³ foi desmontado. O material do desmonte produziu matacões um pouco maiores que 0,26m, em função das novas condições de transporte hidráulico estabelecidas para a obra, a fim de se produzir material suficiente para utilização na área projetada com enrocamento vegetado.

O processo foi executado a frio com argamassa expansiva para desmonte dos blocos de rochas na diretriz do novo eixo. As fotografias do desmonte de rocha e produção do enrocamento para reformulação das margens e eixo da torrente estão representadas na figura 13.

3.2.2 Proteção mecânica do gasoduto e cabos ópticos

Em função da necessidade do desmonte de blocos de rochas para modificação do leito do curso de água, procedeu-se à proteção mecânica do duto quanto a possíveis quedas de blocos sobre o mesmo, bem como das cargas estáticas durante a conformação da nova margem sobre o duto. Com esse propósito, foi projetado um bloco de concreto armado envolvendo o duto conforme projeto específico. A fim de não funcionar como uma estrutura de contenção, transferindo esforços de possíveis movimentos de tálus para a tubulação, o bloco de concreto teve sua rigidez diminuída por ser dimensionado em seções de comprimento médio de 2m e juntas de dilatação entre as mesmas.

Além disso, as alturas foram decrescidas à medida que a inclinação do duto foi reduzindo a porção exposta de sua seção transversal. Os cabos ópticos expostos no mesmo trecho foram concretados junto ao duto, utilizando-se uma proteção de EPS para o caso de eventuais deformações excessivas provocadas durante a concretagem dos blocos.

No trecho onde somente o cabo óptico se encontrava exposto, os mesmos foram reenterrados sob a proteção de uma meia-cana de 20cm de diâmetro de concreto.

3.2.3 Enrocamento vegetado

Foram enrocados 300m² de área (250m² vegetados e 50m² não vegetados). Considerando a dimensão mínima das rochas do cálculo hidráulico igual a 0,26m, foram empregados 62,5m³ de rochas no enrocamento. Utilizou-se uma densidade de 6 plantas por metro quadrado de enrocamento, resultando em um total de 1.500 mudas. A alta densidade de plantas busca uma colonização vegetal rápida do ambiente em tratamento e considera a possível mortalidade de parte delas. A reposição da vegetação foi considerada somente para as áreas onde a mortalidade ultrapassar os 50%, após 6 meses a partir da data de plantio.

A alta densidade de plantio inicial e os cuidados contínuos com adubação, irrigação, combate às formigas (somente em caso de provável comprometimento do plantio), justificam-se também pela dificuldade de realização de replantios posteriores.

O plantio foi executado concomitantemente à execução do enrocamento, visando facilitar o plantio e a acomodação das mudas entre os blocos de rocha. À medida que os blocos foram sendo dispostos, as mudas foram aplicadas entre estes, revegetando-se integralmente as margens até o limite apresentado em projeto (figura 8). O fundo do curso de água teve o enrocamento lançado sem vegetação.

Durante o plantio, cada muda foi acomodada com seu sistema radicular em contato com o solo e adubada no momento do plantio com uma dose única de 50g de NPK (10-20-20). Juntamente com a adubação, foi realizada a aplicação de polímero hidroretentor (hidrogel), em uma dose de 300ml de solução preparada, por muda. Após o término do plantio, as mudas foram irrigadas, dando-se preferência para horários durante o início da manhã ou no fim da tarde com aplicação de aproximadamente 1 litro de água por planta. Sempre que a precipitação pluviométrica ficou abaixo de 10mm acumulados no período de 30 dias, realizou-se nova irrigação.

No plantio, todas as mudas foram inclinadas entre 30 e 45° no sentido da correnteza (figura 12).

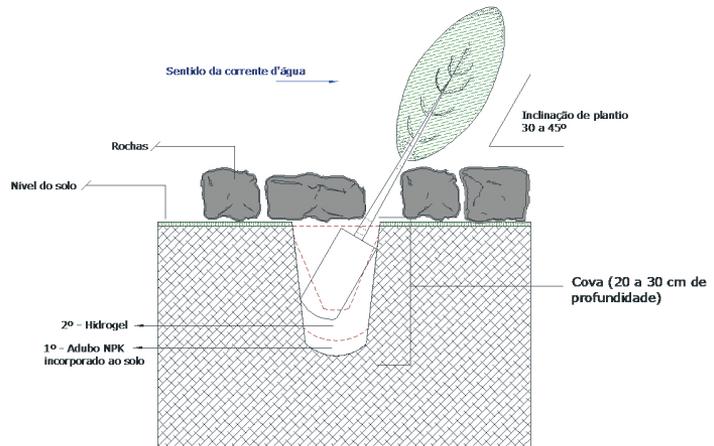


Figura 12: Aspectos da cova para o plantio das mudas.¹²

¹² Os detalhes referentes à construção do novo leito do curso de água, execução dos degraus, soleiras, enrocamento e plantio podem ser observados nas figuras 14, 15, 16 e 17. O enrocamento finalizado já com as plantas pode ser observado na figura 18.

3.2.4 Drenagem

Um sistema de drenagem foi executado nas proximidades da ocorrência do duto exposto, visando a redução dos volumes excedentes da precipitação sobre os taludes em contato com o duto enterrado. Assim foram construídos 40m de canaleta tipo I com seção retangular de 0,20 x 0,10m e 45m de canaletas tipo II, com seção 0,25 x 0,15m, sendo 12m escalonados com barreiras de concreto a cada 0,40m de comprimento. Também foram montadas duas caixas de passagem em alvenaria de 0,72 x 0,72 e profundidade de 0,95m. Por fim, foram feitos dois trechos de enrocamento com 0,25m de profundidade e 18m² de área, resultando num total de 4,5m³ de pedra de mão com diâmetro maior ou igual a 15cm. A implantação do sistema de drenagem está representada na figura 8.

3.2.5 Recomposição da faixa e serviços finais

Um trecho de aproximadamente 100m 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. A semeadura foi seguida de colocação de biomanta antierosiva de palha bidimensional. No final, foram retirados todos os materiais não pertencentes à obra, tais como restos de madeira, formas, barreiras de sedimentos, geossintéticos e outros. As cercas foram refeitas e depressões nas vias de acesso provocadas por trânsito de veículos e equipamentos da obra foram recuperadas.



Figura 13: Processo de desmonte e retirada de rochas para reformulação das margens e eixo da torrente.



Figura 14: Reconformação do novo leito e margens após desmonte de rochas.



Figura 15: Detalhes executivos dos degraus e soleiras.



Figura 16: Execução do enrocamento do leito do curso de água.



Figura 17: Execução do enrocamento vivo nas margens do curso de água.



Figura 18: Enrocamento vivo finalizado.



Figura 19: Evolução da obra de Engenharia Natural.

3.3 Vegetação utilizada

As espécies vegetais utilizadas para execução da obra estão reunidas na tabela 2 e foram plantadas segundo a distribuição do seu grupo específico. As espécies identificadas com a letra A foram plantadas em ambas as margens, na faixa mais próxima ao curso de água. As do grupo B foram plantadas em qualquer posição da área em tratamento e as do grupo C foram plantadas exclusivamente na margem direita do curso de água numa posição mais distante da linha d'água. Respeitando-se o plantio em faixas, dentro destas a distribuição das espécies foi aleatória, evitando-se a concentração (número excessivo) de uma mesma espécie em núcleos ou linhas de plantio.

Tabela 2: Lista de espécies utilizadas e respectivas quantidades.

Grupo	Espécies	Nome comum	Quantidade
A	<i>Sebastiania schottiana</i>	Sarandi-vermelho	400
A	<i>Chloroleucon tortum</i>	Jurema	300
A	<i>Calliandra haematocephala</i>	Caliandra	48
Subtotal			748
B	<i>Bauhinia forficata</i>	Pata-de-vaca	40
B	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Aroeira-vermelha	300
B	<i>Inga</i> sp.	Ingá	300
Subtotal			640
C	<i>Protium heptaphyllum</i>	Amescla	40
C	<i>Salix humboldtiana</i>	Salgueiro	100
C	<i>Genipa americana</i>	Jenipapo	20
C	<i>Gallesia integrifolia</i>	Pau-d'alho	20
C	<i>Parapiptadenia</i> sp.	Angico-vermelho	20
C	<i>Anadenanthera peregrina</i>	Angico-curtidor	20
C	<i>Ficus gameleira</i>	Gameleira	20
Subtotal			240
Total geral			1.628

4 Resultados

A evolução da obra ao longo do período de um ano pode ser observada na figura 19: na fotografia (A) vê-se o local antes da implantação da obra, com o gasoduto e cabos de fibra ótica expostos; a fotografia (B) mostra o detalhe do degrau e enrocamento no leito durante a sua execução; na

fotografia (C) observa-se o local 8 meses depois, onde se pode constatar a deposição de material fino, que ocorre devido à redução da velocidade do fluxo de água; na fotografia (D), 1 ano após a execução da obra, verifica-se o desenvolvimento da vegetação implantada, bem como dos propágulos depositados com o material fino. Esses efeitos são proporcionados pela formação de um novo perfil de



Figura 20: Detalhe do desenvolvimento das plantas no enrocamento.

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

ritasousa.ufsm@gmail.com

Charles Rodrigo Belmonte Maffra é graduado em Engenharia Florestal, mestre em Engenharia Florestal e doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria.

charles.maffra@gmail.com

compensação originaldo após implantação da obra, devido à redução da inclinação.

Na figura 20 é apresentado detalhe do desenvolvimento das mudas aplicadas no enrocamento vivo após 1 ano. O desenvolvimento da vegetação proporciona o aumento da rugosidade hidráulica, diminuindo a velocidade da água junto ao enrocamento, aumentando ainda mais a estabilidade da pedra dimensionada.

Nas figuras 21 e 22 vêem-se esquemas de evolução geral da área de intervenção durante a implantação da obra (A) e um ano após sua execução (B).

5 Considerações finais

A implantação de obras baseadas em técnicas de Engenharia Natural é fundamental para a adequada proteção, estabilização e renaturalização de cursos de água. As principais funções técnicas obtidas com essas intervenções foram: a proteção do gasoduto e cabos de fibra óptica; a estabilização em profundidade através do sistema radicular das plantas; a proteção superficial do solo (precipitação e água proveniente do escoamento superficial); a redução da velocidade da água ao longo das margens e fundo do curso de água devido à formação de um novo perfil de compensação e aumento da rugosidade hidráulica; e o aumento da coesão superficial e profunda do solo.



Figura 21: Vista geral da área de intervenção (fotografias de jusante para montante).

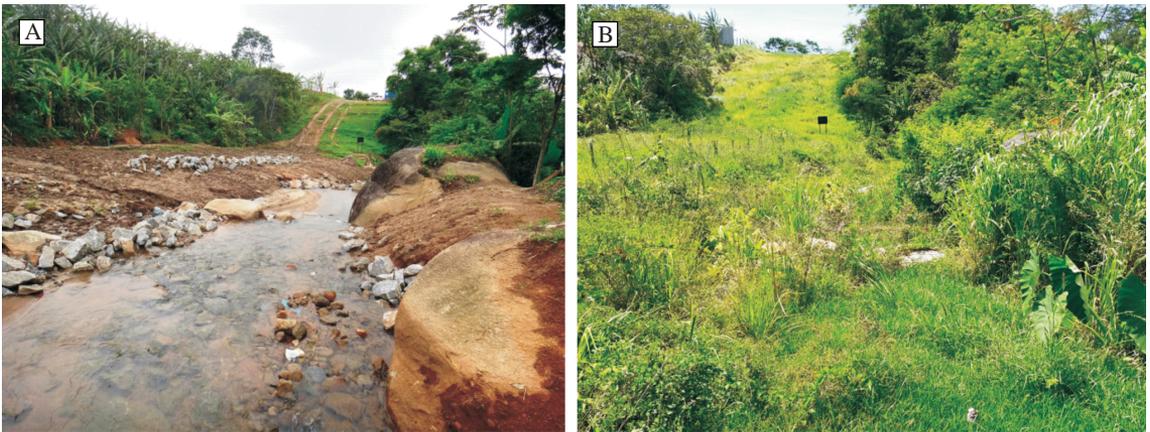


Figura 22: Vista geral da área de intervenção (fotografias de montante para jusante).

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

O recurso à utilização de técnicas de Engenharia Natural, além dos benefícios técnicos, proporciona várias melhorias nas funções ecológicas, como o restabelecimento da vegetação nativa e o aumento da biodiversidade florística e faunística; quanto às funções estéticas, induz à melhoria da paisagem danificada, pela intervenção dutoviária.

Uma vez que as obras de Engenharia Natural caracterizam-se por uma eficiência técnica crescente, espera-se, com o passar do tempo, que continuem a atender aos critérios para as quais foram projetadas.