

# **REPARO DE UM EMISSÁRIO SUBMARINO CORROÍDO ATRAVÉS DA INSERÇÃO DE UM DUTO DE PEAD**

**Nelson Szilard GALGOUL**

PhD, Engenheiro Civil, Professor Titular do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFF, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240 Niterói, Brasil, [nsg@cp-suporte.com.br](mailto:nsg@cp-suporte.com.br)

**Elson A. DO NASCIMENTO**

D.Sc., Engenheiro Hidráulico, Professor Titular do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFF, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240 Niterói, Brasil, [elsom@civil.uff.br](mailto:elsom@civil.uff.br)

**Maurício S. Sampaio de BARROS**

Engenheiro Naval, PETROBRAS, Estrada Sabor Orbel s/nº, Duque de Caxias, CEP 25225, Brasil, [mauriciobarros@petrobras.com.br](mailto:mauriciobarros@petrobras.com.br)

**Cláudia Albergaria CLARO**

M.Sc., Engenheira Civil, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFF, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240 Niterói, Brasil, [cac@cp-suporte.com.br](mailto:cac@cp-suporte.com.br)

## **ABSTRACT**

The Cabiunas waste water pipeline is approximately 16 km long, of which the last 4 km extend beyond the shoreline, heading into waters up to 16m deep, where dissipation of the contents is assured. The 12-inch OD (302mm ID) pipe, designed for a 200m<sup>3</sup>/hour flow, is made of carbon steel and has been in operation for the last 4 years. In spite of having been installed rather recently, its use has been condemned by environmental authorities, because of its accelerated corrosion process. Because of the fragile condition of the steel pipe it was deemed impossible to clean it making use of any of the available pigging techniques, so it would also be impossible to send a line through, which could be used to pull the PEAD pipe. The problem would, therefore, have to be solved by pushing a 4000m PEAD pipe all the way from shore to the end of the pipeline. Obviously, on one hand, the solution should meet the same hydraulic requirements as the original pipeline, while, on the other, it should have the smallest diameter possible in order to minimize the friction inside the pipe. In addition to this, the PEAD pipe should be as strong as possible, in order to resist the inevitable friction forces that will build up as the pipe is being pushed. The solution has required very close interaction of the structural and the hydraulic engineers. The object of this paper is the presentation of the design steps required to propose a solution to this challenging problem.

**Key-words:** pipe repair, hydraulic, modeling, PEAD pipe

## 1. INTRODUÇÃO

O emissário destinado ao transporte e despejo dos efluentes da Estação de Tratamento de Cabiúnas tem um trecho submarino de 4 km, cujo estado de avançada corrosão é, no momento, motivo de séria preocupação. Para a reabilitação deste trecho submarino, foi estudada a possibilidade de se inserir um duto de PEAD - polietileno de alta densidade - pelo interior da tubulação existente de aço carbono, cujo diâmetro interno é 301,6 mm.

Embora esta técnica de recuperação seja relativamente comum, o ineditismo neste caso fica por conta de vários fatores, dentre os quais cita-se:

- a fragilidade da linha tendo em vista o avançado estado de corrosão, a qual impede que a mesma seja limpa através de métodos usuais;
- a necessidade de empurrar o duto de PEAD ao invés de puxá-lo, em decorrência da impossibilidade de passar um cabo de puxamento pelo interior do mesmo;
- a dificuldade de obter-se uma solução conciliatória, ou seja, que atenda às exigências estruturais: uma parede de tubo com a maior resistência possível e às hidráulicas: um diâmetro interno maior possível, ambas limitadas pelo diâmetro interno do duto metálico.

No presente estudo, são analisadas, através de simulações realizadas com o software FLOWMASTER, o comportamento hidráulico de todo o emissário. São consideradas as novas opções de diâmetros para o trecho submarino nas condições originais de pressurização da rede, que correspondem ao ponto de operação de bomba em  $8,0 \text{ kgf/cm}^2$  para a vazão de lançamento em  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Foram realizadas simulações considerando-se alternativas de substituição do trecho submarino por tubos com diâmetros de 280 mm, 250 mm, 225 mm e 200 mm. As classes consideradas foram PE80-PN12,5 e PE80-PN16, todas superiores àquela exigida pelas condições hidráulicas, tendo em vista a necessidade de prever um tubo de parede espessa, que possa facilitar o processo de instalação pelo interior do duto existente.

Do lado estrutural foram feitas considerações no sentido de manter o peso submerso do duto de PEAD aproximadamente neutro, visando minimizar o seu atrito longitudinal no interior do tubo metálico. Não obstante essa minimização, ainda é necessário levar em conta um nível de atrito desconhecido no interior do duto metálico, associado ao acúmulo de detritos e às próprias curvas da linha.

A partir da integração do atrito unitário estimado ao longo do interior do duto, dimensionou-se um sistema de empurramento, com o qual se espera conseguir que o duto de PEAD vença os 4 km no interior da camisa metálica.

Os resultados apontam para a adoção do tubo PE80-PN12,5 de 250 mm que permite, após a reforma, o alcance das condições originais de operação do emissário, ou seja, uma vazão de lançamento de  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Em vista da folga radial pequena (26 mm) associada ao duto de 250 mm, pode-se utilizar, alternativamente, a tubulação PE80-PN16 de 225 mm, cuja vazão de lançamento prevista é reduzida em relação à original para  $165 \text{ m}^3/\text{h}$ . O emprego desta alternativa poderia caracterizar ganhos significativos no processo de instalação, visto que o nível dos esforços mecânicos resistidos é maior, mas a decisão final de aceitar ou não a redução de vazão ficará por conta da operadora da linha.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO EMISSÁRIO

O Emissário de Cabiúnas transporta efluentes da Estação de Tratamento de Cabiúnas para lançamento no mar, a uma distância de 4km da praia e a uma profundidade de 12m. A extensão total do duto é de 16,845km, sendo que 80% do trecho terrestre é representado por uma linha aérea em aço carbono com diâmetro nominal de 12". O segmento inicial tem comprimento aproximado de 2,5km e é constituído de PEAD de 12", enterrado a uma profundidade média de 1,5m até a conexão com o trecho aéreo. A figura 1 mostra a parte final do trecho terrestre, onde se vê o duto mergulhando na areia para penetrar na caixa de passagem embaixo, de onde se dirige para o mar, saindo perpendicularmente à praia. Ao fundo observa-se uma das várias alças de dilatação do duto.



Figura 1 – Vista do final do trecho terrestre do emissário de Cabiúnas

O tramo marítimo do emissário, de comprimento de 4km, apresenta elevado grau de corrosão generalizado, pelo que a execução de reparos não é uma solução aplicável. Em vista disso a solução proposta para a reabilitação deste trecho prevê a inserção de um duto de PEAD, passando a utilizar a tubulação existente apenas como camisa de estabilização.

Por tratar-se de uma operação de extensão incomum, admite-se que o seu sucesso possa ser apenas parcial, ou seja, admite-se que seja necessário abrir o duto e prosseguir com a instalação do restante do PEAD por um caminhamento paralelo ao do duto metálico existente. Neste caso requereria todos os cuidados usuais para a estabilização da linha no fundo.

Atualmente o sistema é pressurizado por um conjunto motobomba cujo ponto de operação ocorre na vazão de  $200\text{m}^3/\text{h}$  e altura manométrica de  $8,0\text{ kgf/cm}^2$ . A partir das alterações previstas na reforma da rede, os parâmetros hidráulicos e hidrodinâmicos do emissário deverão ser reavaliados de forma a orientar tanto as especificações dos materiais a serem

adotadas no trecho submarino, quanto os aspectos operacionais no que se refere aos novos patamares de pressão e vazão do sistema recuperado.

### 3. METODOLOGIA DAS ANÁLISES HIDRÁULICAS

O estudo foi desenvolvido com base na técnica de simulação computacional, com a utilização do software FLOWMASTER, fornecido pela FLOWMASTER USA de Chicago (MILLER, 1996)

Este procedimento apresenta, de forma esquemática, todo o caminhamento da rede, incluindo as singularidades representadas por curvas, joelhos, válvulas e outros componentes que possam caracterizar perdas de cargas localizadas.

O emprego de softwares para a representação de sistemas hidrodinâmicos constitui-se em uma tecnologia de alto nível, que garante rapidez e segurança na análise das alternativas de projeto, além de permitir o cadastramento digital de todos os componentes da rede em banco de dados.

Para a avaliação das perdas de cargas distribuídas e a análise do fluxo em regime permanente - *steady state* -, foi considerada a fórmula de Hazen-Williams (Equação 1), adotando-se os coeficientes de atrito “C” com valores de 140 e 110 para o polietileno e para o aço carbono, respectivamente. As perdas de cargas localizadas foram avaliadas com base na fórmula cinética (Equação 2) considerando-se a velocidade do fluxo e o coeficiente de atrito adotado para cada uma das singularidades (MATTOS, 1998).

$$j = 6,81 \frac{1}{D^{1,17}} \left( \frac{V}{C} \right)^{1,852} \quad (1)$$

onde,

j - perda de carga unitária (m/m)

D - diâmetro da tubulação (m)

V – velocidade do fluxo (m/m)

C - coeficiente de atrito

$$hf = K_1 \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

onde,

hf – perda de carga localizada (m.c.a.)

K<sub>1</sub> – coeficiente característico de cada peça

V – velocidade do fluxo (m/s)

g – aceleração da gravidade

$$hfT = jL + \sum hf$$

(3)

onde,

hfT – perda de carga total (m.c.a.)

j - perda de carga unitária (m/m)

L – comprimento da tubulação (m)

Hf – perda de carga localizada (m.c.a.)

Para permitir a calibração do modelo e conferir maior grau de confiabilidade aos resultados, os cálculos foram desenvolvidos, também, em planilha Excel a partir das fórmulas descritas, acima (Equações 1, 2 e 3).

Para a execução deste trabalho, foram seguidas as recomendações da norma API SPEC 15 LE – Specification for Polyethylene Line Pipe (API, 1995).

Os documentos fornecidos pela PETROBRAS e outras fontes consultadas estão citados no item 6 do presente relatório.

#### **4. CONCEPÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO**

A calibração é uma etapa fundamental no processo de modelagem e consiste no ajuste de parâmetros, visando fazer com que o modelo seja capaz de reproduzir resultados próximos ou idênticos às condições de observações locais ou de registros de séries históricas do fenômeno estudado.

No presente estudo, por estarem indisponíveis informações desta natureza, optou-se por desenvolver os cálculos hidráulicos em planilha Excel, considerando-se a metodologia descrita no item anterior, a fim de se obter os valores para comparação com os resultados do modelo (Figura 2).

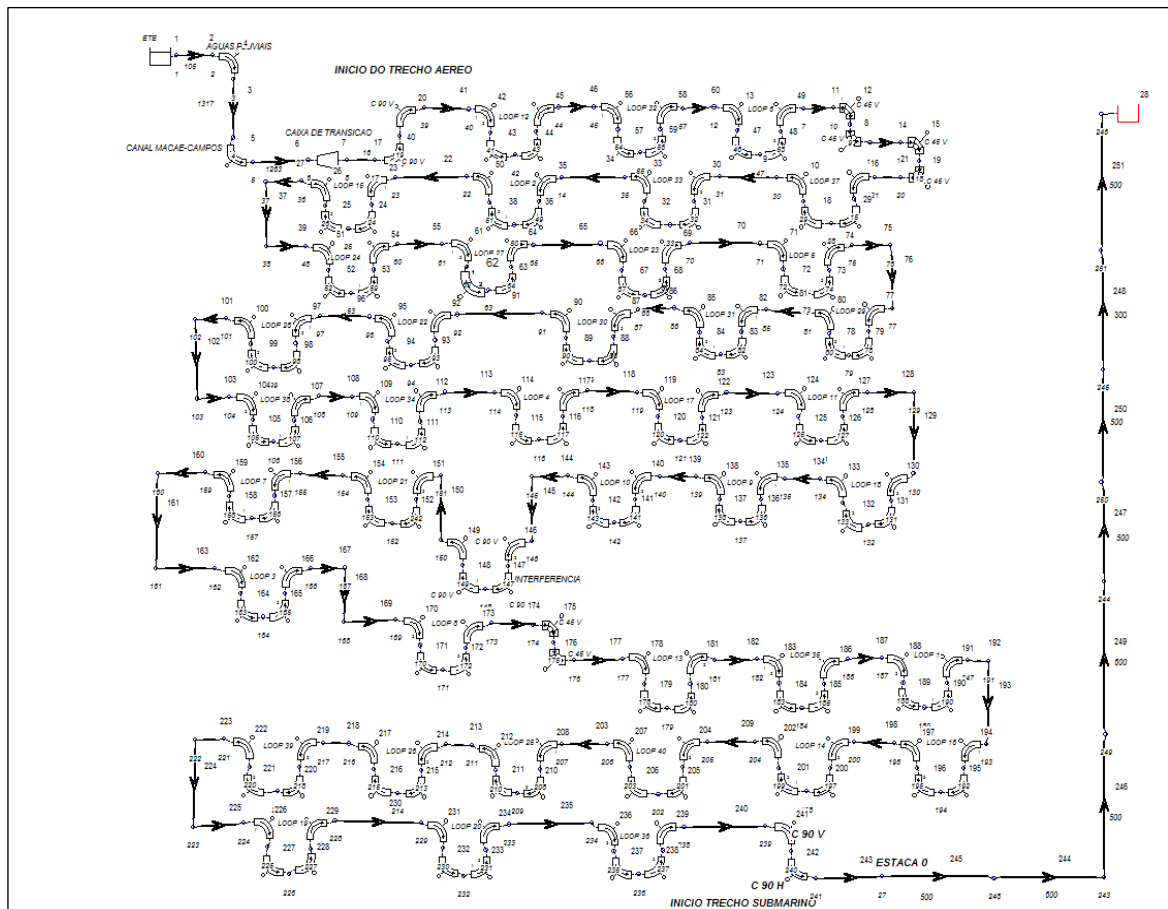


Figura 2 – Emissário de Cabiúnas/Modelo computacional contendo todas as alças de dilatação

Todos os parâmetros e dados de entrada foram mantidos idênticos na Planilha e no Modelo. O coeficiente “C” de Hazen-Williams foi considerado 110 no trecho de ferro fundido e 140 no trecho submarino de PEAD. A vazão considerada de 195,7m<sup>3</sup>/s resultou em alturas manométricas de 78,45m.c.a na simulação e de 73,32m.c.a. no cálculo na Planilha (Quadro 1). As duas curvas piezométricas mostraram-se compatíveis com as informações fornecidas sobre as condições de operação da bomba. As diferença em torno de 6,7% entre os valores das alturas manométricas totais pode ser explicada pelo fato de não terem sido consideradas as perdas de cargas localizadas no cálculo desenvolvido na Planilha, a fim de facilitar o processamento.

A convergência das curvas piezométricas, evidenciada na Figura 3, valida a metodologia adotada no presente estudo e confere confiabilidade aos resultados da modelagem.

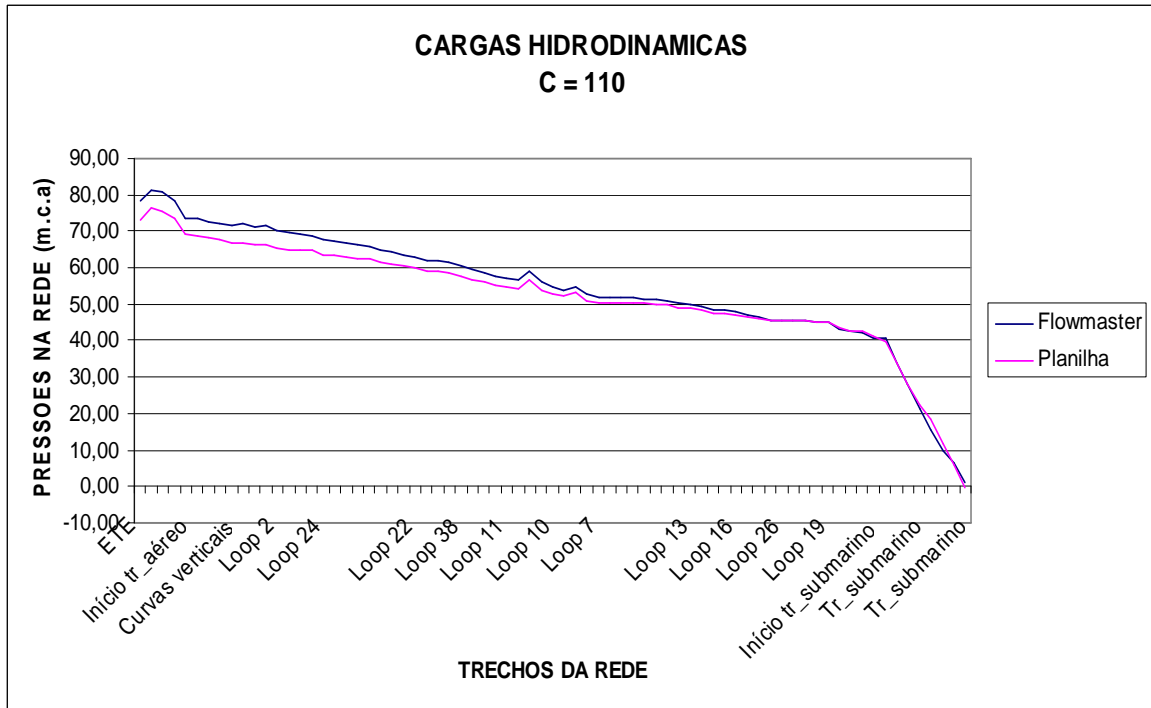


Figura 3 – Comparação das curvas piezométricas (Flowmaster x Excel)

## 5. CONSIDERACOES SOBRE A CLASSE DO TUBO

Tomando-se por base a ABPE/E001 – Tubos de polietileno PE (BRASIL,1998), obtém-se a máxima pressão de operação – MPO (Equação 4).

$$MPO = PN \times Ft \times Ff \times Fo \times Fv$$

(4)

onde,

PN = pressão nominal

Ft = 0,92 - fator de resistência em função da temperatura, conforme curva de regressão da norma ISO TR 9080 (ISO, 1995), para composto tipo A e temperatura média de 25°;

Ff = 0,63 – fator de redução de pressão em função do fluido – fluido corrosivo ao qual o PEAD é resistente;

Fo = 1,0 – fator de resistência em função das condições de operação – condição de operação normal;

Fv = 1,12 – fator de resistência em função da vida útil (2 anos);

Admitindo-se uma tubulação PE80 com PN = 8, tem-se:

$$MPO = 8 \times 0,92 \times 0,63 \times 1,0 \times 1,12 = 5 \text{ kgf/cm}^2$$

Considerando-se os esforços a que estará sujeita a tubulação durante o processo de instalação, foram definidos os diâmetros de tubulação de polietileno das classes PE80-PN12,5 e PE80-PN16 (Quadros 1 e 2), para análise do comportamento hidráulico, tendo em vista a substituição do trecho submarino do emissário.

Quadro 1 – Tubos de PEAD PE80 – PN12,5 – Opções válidas para o presente estudo

Tubos PE80 (ISO 4427) – PN12,5 – SDR 11		
DE (mm)	e (mm)	DI (mm)
280	25,5	229
250	22,8	204,4
225	20,5	184,0
200	18,2	163,6

Quadro 2 – Tubos de PEAD PE80 – PN16 – opções válidas para o presente estudo

Tubos PE80 (ISO 4427) – PN16 – SDR 9		
DE (mm)	e (mm)	DI (mm)
250	27,8	194,4
225	25,0	175,0
200	22,3	155,4

## 6. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS

### 6.1 Cargas piezométricas ao longo do duto

As pressões observadas no trecho submarino do emissário, são inferiores a  $8,0\text{kgf/cm}^2$ , para todos os diâmetros considerados. Entretanto, conforme comentado no item anterior, foram adotadas as classes de tubo de PE80-PN12,5 e PE80-PN16, que são muito superiores às requeridas para as condições hidráulicas, visando a busca por tubulações de paredes espessas que apresentem melhor desempenho frente à solicitação de esforços mecânicos previstos para o processo de instalação.

Considerando-se, ainda, que a tubulação de aço carbono existente no trecho submarino possui diâmetro interno de 301,6mm, foram adotados, para a análise hidráulica, inicialmente os tubos com especificação PE80 PN 12.5 com diâmetros externos de 280mm, de 250mm, de 225mm e de 200mm que apresentaram vazões de  $217,9\text{m}^3/\text{h}$ ,  $199,3\text{m}^3/\text{h}$ ,  $179,7\text{m}^3/\text{h}$  e  $148,3\text{m}^3/\text{h}$ , respectivamente (Figura 4).



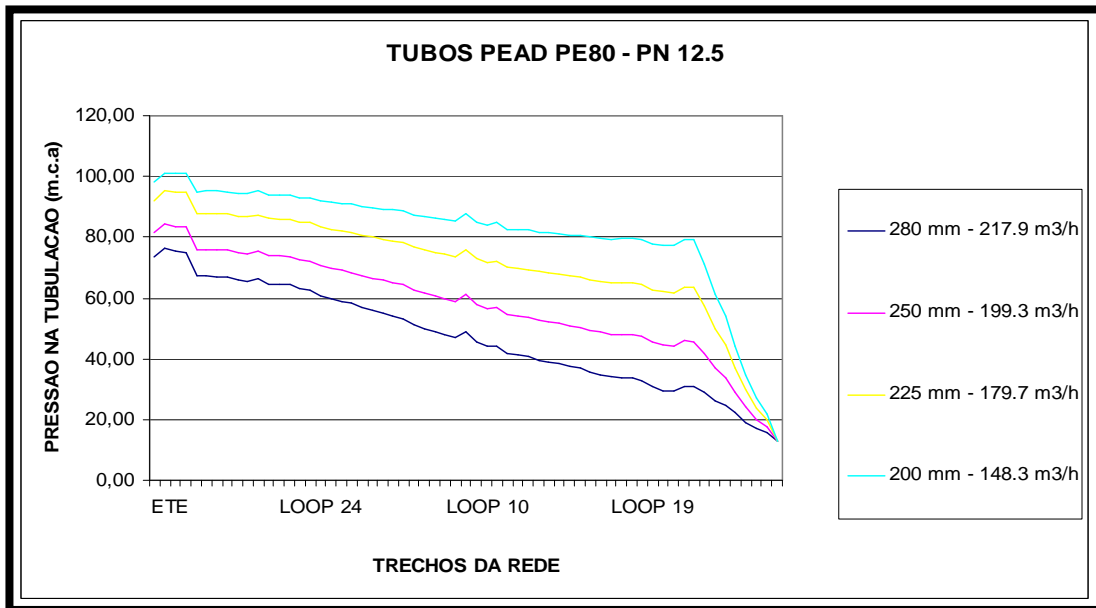


Figura 4 – Pressão disponível na tubulação ao longo do emissário – Tubos PN12.5

Com a finalidade de avaliar possíveis opções de tubos com paredes ainda mais espessas foram desenvolvidas, também, simulações hidrodinâmicas para os tubos com especificações PE80 PN 16. Os diâmetros considerados para esta classe foram de 250mm, de 225mm e de 200mm, tendo as vazões resultantes alcançado valores de 193,7 m<sup>3</sup>/h, de 165,0 m<sup>3</sup>/h e de 139,9 m<sup>3</sup>/h, respectivamente (Figura 5).

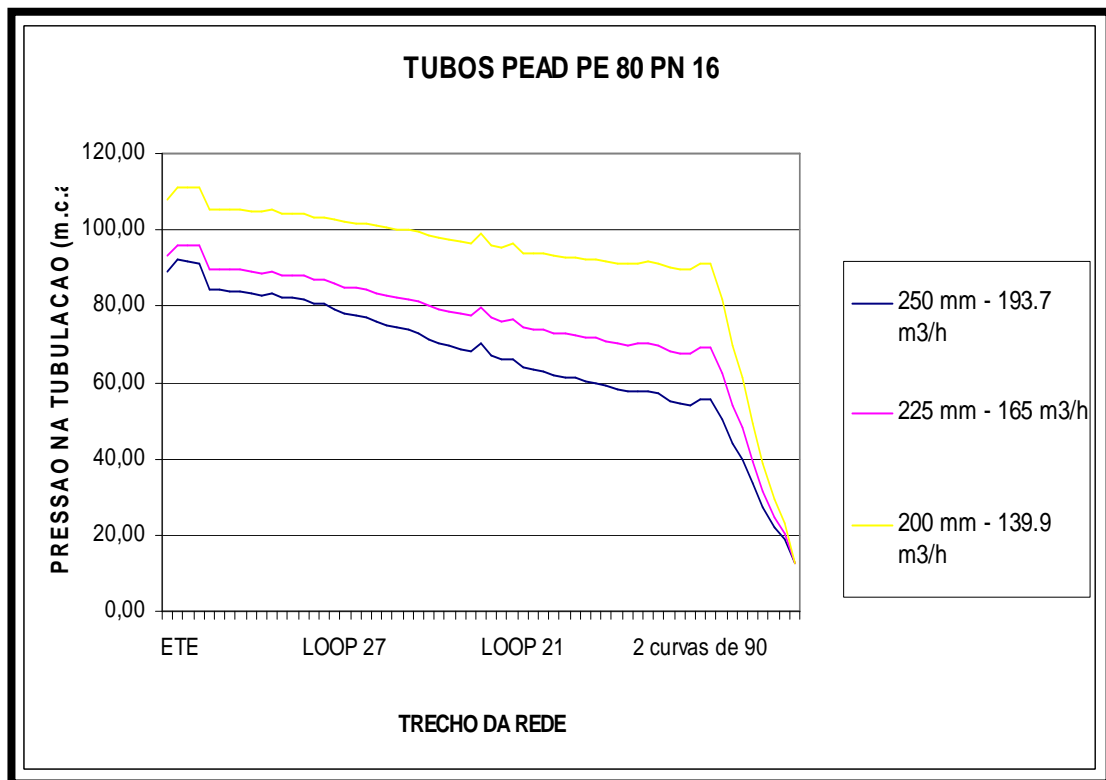


Figura 5 – Pressão disponível na tubulação ao longo do emissário – Tubos PN16

## 6.2 Análise das vazões de lançamento

A vazão mínima obtida foi de 139,9m<sup>3</sup>/h para o tubo PN16 de 200mm de diâmetro externo. A vazão máxima alcançada foi de 217,9m<sup>3</sup>/h para a tubulação PN12,5 de 280mm de diâmetro externo. As tubulações de 225mm de diâmetro das classes PN12,5 e PN16 apresentaram vazões de 179,7m<sup>3</sup>/h e 165m<sup>3</sup>/h, respectivamente. Embora estes dois lançamentos sejam inferiores aos da condição original de operação, que é de 200m<sup>3</sup>/h, estas alternativas foram consideradas por representarem o menor diâmetro e, no caso do PN16, a parede mais espessa, conforme o desejado para o processo de reforma. A tubulação de diâmetro externo de 250mm e espessura de 22,8mm, correspondendo, portanto, a um diâmetro interno de 204,4mm reproduziu a vazão de lançamento das condições originais de operação do emissário (Figura 6).

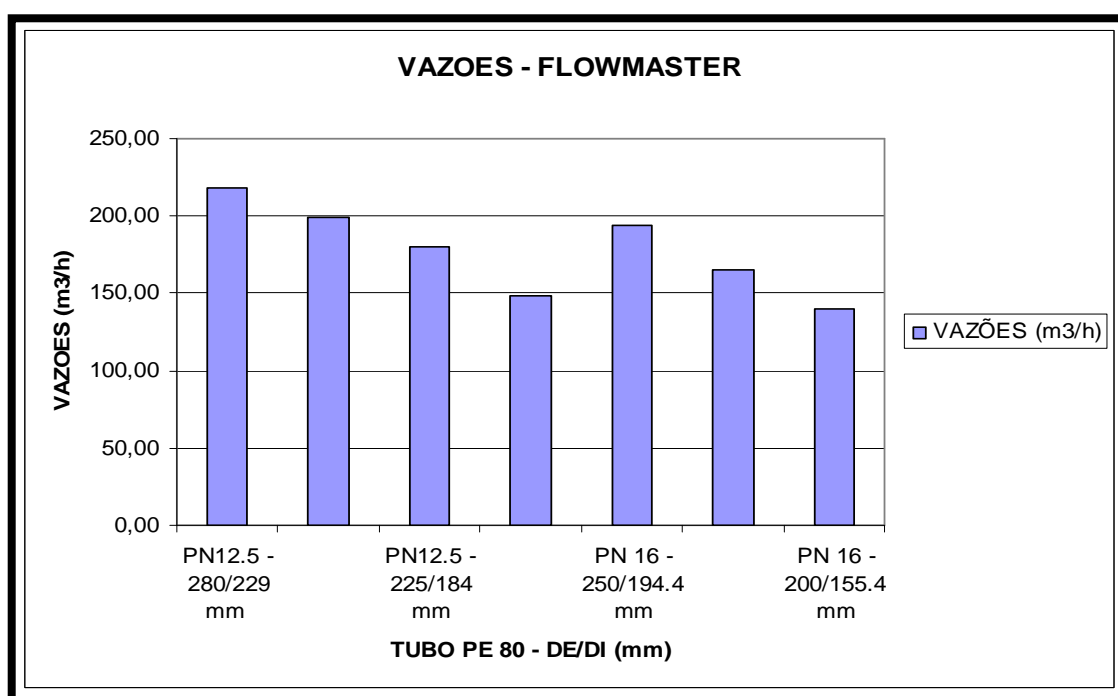


Figura 6 - Vazões de lançamento

## 7. CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS

É do ponto de vista estrutural que o presente projeto apresenta as maiores incertezas. Isso decorre do fato de não ter sido possível realizar o primeiro passo de toda e qualquer instalação dessa natureza, qual seja, limpar o interior da linha.

Essa limpeza é feita, usualmente, através de “pigs”. Os “pigs” são elementos lançados no interior do duto e que são impulsionados por pressão. Estes raspam todos os detritos que se acumularam ao longo dos anos. Infelizmente, a corrosão avançada, levando à fragilização da parede do tubo, impede a pressurização da linha e, conseqüentemente, a limpeza da mesma. Investigou-se outras alternativas de limpeza, mas concluiu-se pela inviabilidade de todas elas. Tal fato lança uma enorme incerteza sobre o sucesso dessa operação, principalmente tendo em vista o ineditismo de aplicação dessa técnica, por empurramento no interior de um duto de 4km de extensão.

Foram tomados todos os cuidados possíveis para a minimização do atrito, quais sejam, manter o peso submerso do duto de PEAD aproximadamente neutro e minimizar o diâmetro externo do duto de PEAD, mas, mesmo assim, é necessário reconhecer que há incerteza com relação a pontos de obstrução no interior da camisa metálica.

Outro aspecto que preocupa é o comportamento à fluência do PEAD na compressão. Sua resistência à compressão e sua deformabilidade para cargas de curta duração são razoavelmente bem conhecidas. Sabe-se, ainda, que para elevadas cargas de compressão de longa duração, o material sofre deformação lenta acentuada, mas a quantificação desse comportamento é ainda pouco confiável. Embora os tramos sejam comprimidos por pouco tempo, ao serem inseridos na camisa metálica, é possível e provável que o duto de PEAD fique comprimido, por todo o tempo, em função do atrito.

## **8. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EMPURRAMENTO**

Ressalvadas as principais preocupações do item anterior, admitiu-se que o presente projeto tem um risco de insucesso associado e dimensionou-se o sistema de empurramento descrito a seguir, consciente desse risco e tentando minimizá-lo.

Para o dimensionamento deste sistema foi imposta, ainda, uma outra restrição, qual seja limitar toda a área de trabalho para a operação de empurramento aos 20m correspondentes da a faixa de praia, visto haver uma área de proteção ambiental logo a seguir, que não poderá ser invadida (Figura 7). Como o duto está cerca de 3m abaixo do presente nível da praia, isso significa que deve haver um constante rebaixamento de água, para a realização do trabalho, não estando excluída a possibilidade de ondas virem a invadir o canteiro em dias de ressaca.



Figura 7 – Faixa de praia na qual devem ser desenvolvidas as operações de empurramento

Essa limitação impõe que o sistema seja simples, evitando engrenagens que possam ser emperradas pela areia da praia. As Figuras 8 e 9 apresentam uma vista geral e uma ampliação da estrutura concebida, respectivamente.

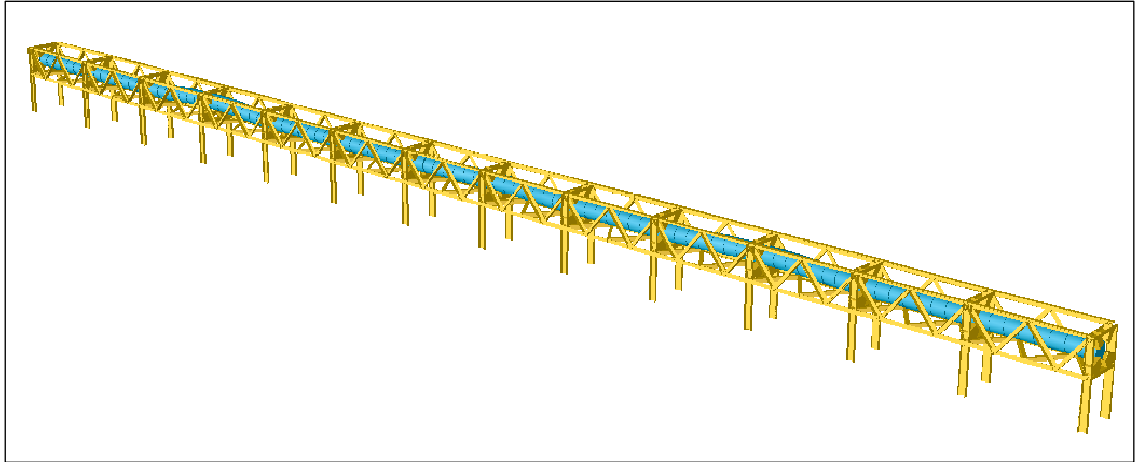


Figura 8 – Vista geral do modelo

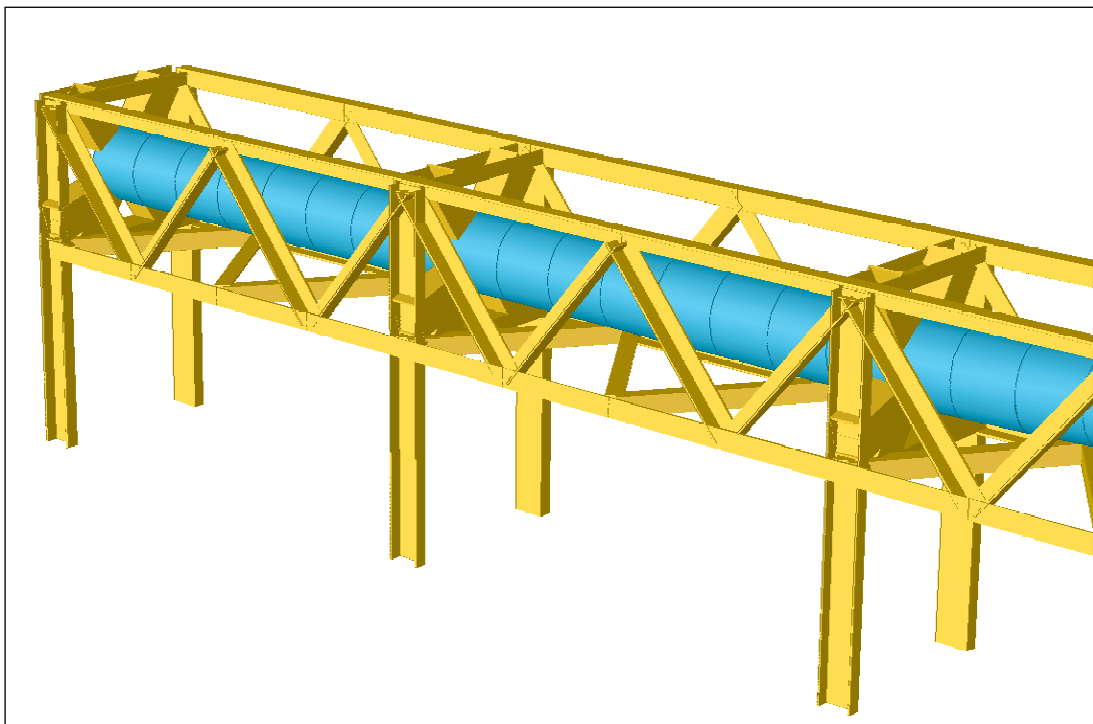


Figura 9 – Detalhe do modelo

Basicamente o pórtico destina-se apenas ao papel de guia e suporte do duto, alinhando-o com a entrada da camisa metálica, que será aberta na praia para permitir a inserção do duto de PEAD.

O empurramento, propriamente dito, será feito por cabos ligando uma cabeça metálica, inserida na extremidade mais afastada do duto de PEAD, a polias soldadas ao lado externo do duto metálico e depois a um guincho com capacidade mínima de 100kN, conforme indicado na Figura 10. São empurrados segmentos de 20m de cada vez.

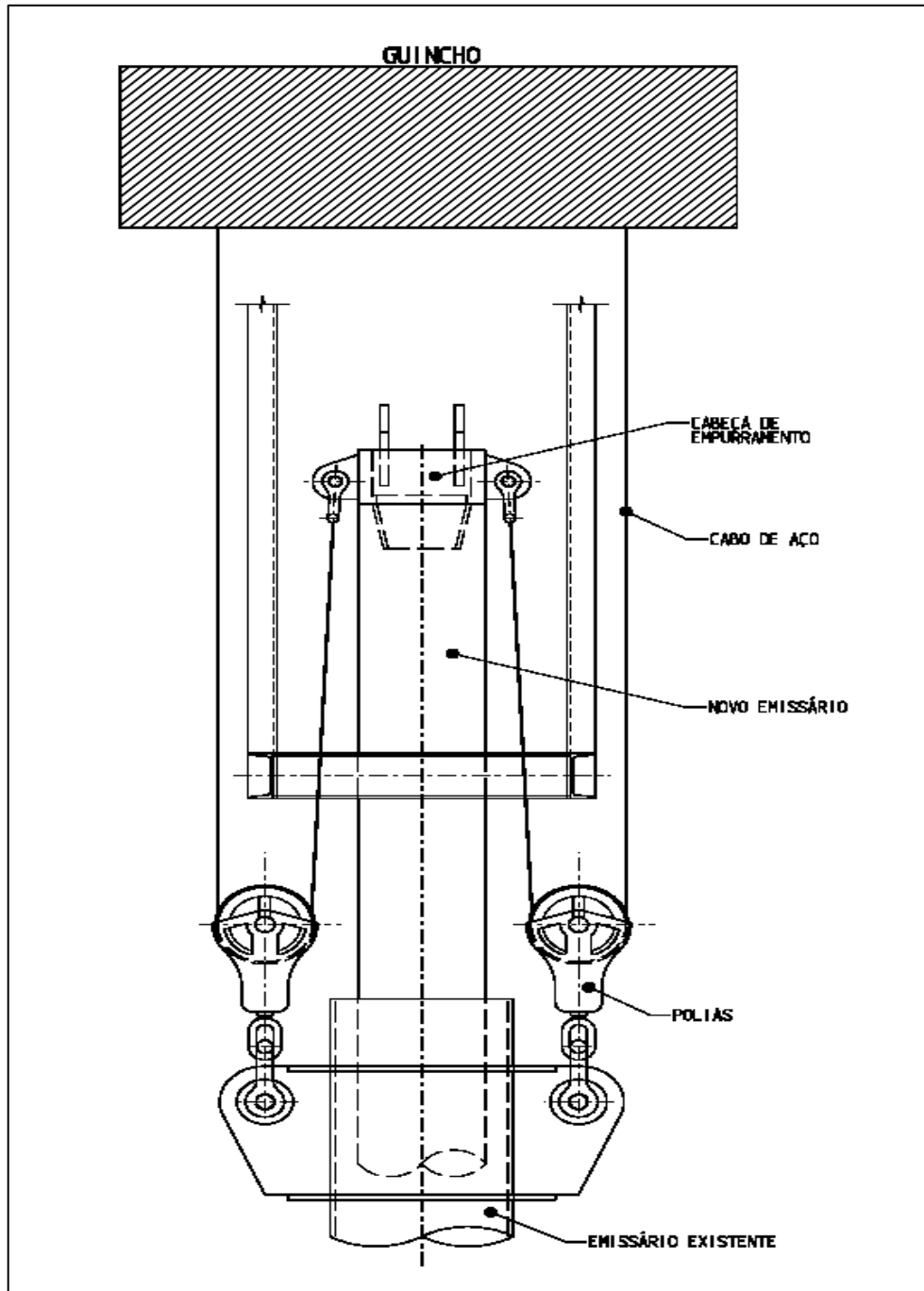


Figura 10 – Sistema de empurramento

Embora o atrito calculado para condições ideais seja aproximadamente nulo, admite-se que a força correspondente possa crescer até metade da capacidade do guincho, em função dos detritos no interior do mesmo, bem como das pequenas curvas ao longo da linha.

Além da resistência mínima do duto de PEAD – 24MPa para tensões axiais e 32MPa para tensões de flexão -, há ainda uma preocupação com a flambagem do duto entre apoios no interior da treliça metálica de suporte do mesmo. Admitiu-se nessa verificação, uma análise não linear de flambagem, que o duto já tivesse uma imperfeição, conforme indicado na Figura 11.

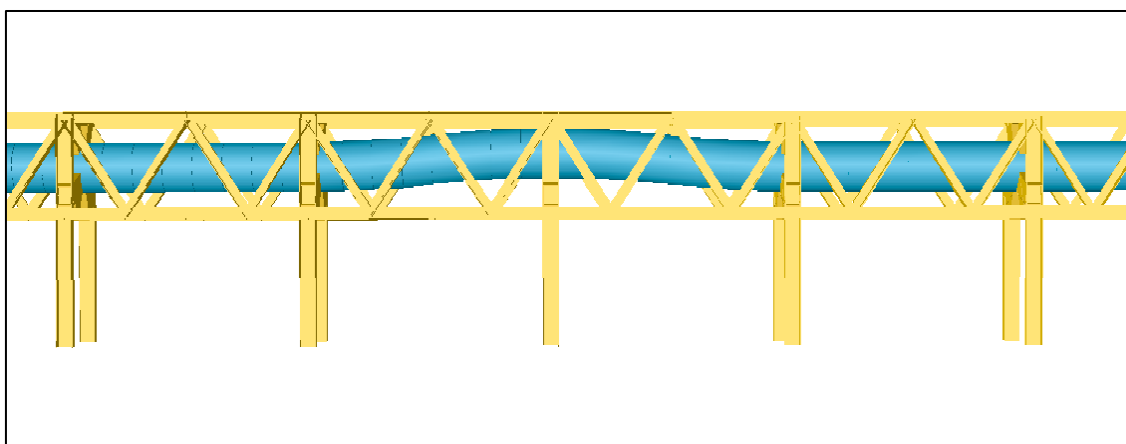


Figura 11 – Condição inicial de duto imperfeito para a verificação à flambagem

Com base nas análises realizadas com o sistema SACS, desenvolvido pela EDI de Nova Orleans, constatou-se que duas alternativas mostraram-se adequadas. A primeira considerou um tubo PE 80-PN 12,5 de 250mm de diâmetro externo. Esta atende a todos os critérios, mas tem como principal deficiência uma folga radial de apenas 26mm. A outra de PE 80-PN 16 com diâmetro externo de 225mm tem uma folga radial bem mais confortável de 38mm em relação ao duto metálico, mas não mais atende ao critério hidráulico de 200m<sup>3</sup>/h. A opção deve ser feita pela operadora do sistema.

## 9. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados apontam para a escolha do tubo PE 80-PN 12,5 de 250mm que permite, após a reforma, o alcance das condições originais de operação do emissário, ou seja, uma vazão de lançamento de 200m<sup>3</sup>/h, atendendo, ainda, às condições estruturais consideradas. Outra alternativa viável seria a opção pela tubulação PE 80-PN 16 de 225mm, cuja vazão de lançamento prevista é reduzida em relação à original para 165 m<sup>3</sup>/h, porém devido ao menor diâmetro poderá caracterizar ganhos significativos no processo de instalação. Essa segunda opção faz diminuir o risco do sistema de empurramento não mais ser capaz de vencer o atrito longitudinal dos 4km de linha.

Não obstante todos os cuidados, ressalta-se que a operação proposta não tem sucesso garantido, podendo haver a necessidade de interromper o duto metálico e instalar o restante da linha em PEAD externamente ao duto metálico. Neste caso, teria que receber os pesos usuais necessários à sua estabilidade no fundo.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

API Spec 15 LE – *Specification for polyethylene line pip2*. 3<sup>rd</sup> Edition, Apr 1995;

BRASIL, abpe/E001. *Tubos de Polietileno PE (Especificação)*. Associação Brasileira de Tubos Poliolefinicos e Sistemas. 07/04/1998. 1-32p

ISO/TR 9080.1992/Cor 1:1995. *Thermoplastics pipes for the transport of fluids - Methods of extrapolation of hydrostatic stress rupture data to determine the long-term hydrostatic strength of thermoplastics pipe materials*. 16/07/1992

MATTOS, Edson Ezequiel de; FALCO, Reinaldo de. *Bombas industriais*. Editora Interciência. 2<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro, 1998. 474 p

MILLER, Donald Stuart. *Internal flow systems*. Flowmaster International LTD. BHR Group Limited. Cranfield. UK. 1996. 396 p