ASTHAR LUANA BARCELOS CARVALHO

INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA SOB AÇÃO DE TRANSIENTE HIDRAULICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia da Construção

Orientador: Prof. ELSON ANTÔNIO DO NASCIMENTO, D. Sc.

Niterói 2011

B 862 Carvalho, Asthar Luana Barcelos

Interação Fluido-Estrutura Sob Ação de Transiente Hidráulico / Asthar Luana Barcelos Carvalho. Niterói: [s.n.], 2011.

88 f.:ll., 30cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, 2011.

 Transiente Hidráulico. 2.Engenharia Hidráulica. 3.Golpe de aríete.
 Sobrepressão. 5.Tubulação. 6.Modelagem. Computacional.
 Universidade Federal Fluminense. 8.Departamento de Engenharia Civil – Tese I. Título

CDD 574.5222

ASTHAR LUANA BARCELOS CARVALHO

INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA SOB AÇÃO DE TRANSIENTE HIDRAULICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia da Construção

Aprovada em setembro de 2011.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Elson Antônio do Nascimento, D. Sc. (Orientador) Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Paulo Luiz da Fonseca, D. Sc. Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Luciene Pimentel da Silva, PhD. Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ

> Niterói 2011

A todos os professores que de alguma forma auxiliaram-me, aos meus familiares, e em especial a toda a família Nascimento.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Orientador Elson Antonio do Nascimento,

que dispensa qualquer comentário,

À Universidade Federal Fluminense,

Ao Professor Paulo da Fonseca que sempre esteve presente e disposto a ajudar,

Ao Professor Nelson Szilard, pelos constantes serviços

prestados a comunidade científica junto a seus alunos e funcionários,

Ao Elton Gaugoul, que é sempre uma inspiração como

ser humano e profissional,

por sua dedicação e carinho.

RESUMO

O avanço tecnológico nos sistemas de produção vem exigindo profundas alterações no modo de desenvolvimento das pesquisas, tornando-se, mais do que nunca, um processo interativo de modo a adequar-se as especificidades do problema observado. Isto significa que uma nova abordagem é necessária para a análise dos problemas de engenharia. A avaliação do transporte de fluidos através de tubulações sempre foi um tema de enorme preocupação para muitos engenheiros hidráulicos. Atualmente, com base na análise computacional, avaliações mais precisas vêm sendo possível em estudos de transportes de fluidos. O transiente hidráulico é um fenômeno que pode afetar toda a rede de escoamento forçado, por exemplo, o transporte de óleo e gás, e redes de abastecimento de água. A compreensão deste fenômeno e a constante busca de soluções para evitar seus efeitos danosos alcançaram avanços tecnológicos significativos, principalmente, através da aplicação dos métodos computacionais. A presente pesquisa promove uma revisão teórica do tema e realiza um estudo de caso, no qual desenvolve a simulação computacional de um transiente hidráulico provocado pelo confinamento do ar em tubulação de escoamento forçado. O resultado da simulação indicou uma sobrepressão de 30,6 kgf/cm². A equação de Joukowsky apresentou o valor mais próximo ao resultado simulado, alcançando 38,6 kgf/cm². Na análise de expansão avaliou-se os efeitos da sobrepressão para verificar o deslocamento da tubulação nos suportes. O deslocamento de 0,49 m desenvolvido na linha, não comprovou ser suficiente para provocar os danos observados. Por outro lado, o efeito de sobrepressões cíclicas, características do transiente hidráulico, demonstrou-se responsável pela ruptura e pelos deslocamentos dos suportes da tubulação. A sugestão apresentada como solução do problema foi a instalação de ventosas na tubulação aérea do emissário e a implementação de procedimento de partida lenta do sistema de bombeamento, a fim de eliminar o ar da tubulação e evitar a formação de bolhas que possam provocar a interrupção do fluido e o consegüente transiente hidráulico.

ABSTRACT

The technology development of the production system is requiring deep changes in the research procedure, becoming more than ever an iterative process in order to fit the specifics of the problem observed. It means that a new approach is required for the analysis of the engineering problems. The fluid mechanics evaluation has always been taking as a deep concern among hydraulic researchers and engineers. Nowadays, based on computational analysis more accurate evaluation has being possible in fluid transport studies. The surge pressure is a phenomena which can damage most of the pipeline flow as, for example, gas and oil transportation and water supply network. The understanding of that hydraulic phenomena and the searching for the problem solution in order to avoid it's the significant technological advanced achieved mainly through the application of computational methods. The actual research presents a theoretical overview on this issue and perform a case study, in which, a computational simulation was develop to represent the surge pressure related to air a in pipeline flow. The system overpressure was evaluated by applying the software Flowmaster and the comparison to results of the surge pressure consolidated formulas. In addition, It was evaluated the pipeline flexibility in order to prove that the network damage was due to hydraulic transient, only. Based on that assumption, the line expansion of 0,49 m related to a surge pressure of 30.6 bar proved that it wasn't enough to be responsible for the observed damage in the pipeline. On the other hand, the pipeline shake due to the characteristic repeated effect of the hydraulic transient seems to be the responsible of the break of the integrity of the pipeline supports. The suggested solution for the problem was to install vents along the pipeline and a soft start procedure in order to avoid air inside the pipeline.

SUMÁRIO

| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
|------|--|-----------|
| 2 | TRANSIENTE HIDRAULICO | 15 |
| 2.1 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 15 |
| 2.2 | EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS | 17 |
| 3 | ESTIMATIVA DO TRANSIENTE HIDRAULICO | 21 |
| 3.1 | PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO | 21 |
| 3.1. | 1 Evento rápido | 23 |
| 3.1. | 2 Evento lento | 23 |
| 3.1. | 3 Evento muito lento | 23 |
| 3.2 | EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DO TRANSIENTE HIDRAULICO | 23 |
| 3.2. | 1 Jouget e Michaud | 23 |
| 3.2. | 2 Equação de Joukowsky | 26 |
| 3.2. | 3 Equação de Allievi | 29 |
| 4 | ESTUDO DE CASO – DEFORMAÇÃO DOS SUPORTES | 31 |
| 4.1 | DESCRIÇÃO DO EMISSÁRIO | 31 |
| 4.2 | DADOS BÁSICOS | 33 |
| 4.3 | CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA | 34 |
| 4.4 | ANALISE DE EXPANSAO E FLEXIBILIDADE DA LINHA | 35 |
| 4.5 | CONCEPÇÃO DO MODELO DE TRANSIENTE HIDRAULICO | 41 |
| 4.5. | 1 Interrupção do escoamento | 43 |
| 4.5. | 2 Calibração do modelo | 48 |
| 4.5. | 3 SIMUIAÇÃO DO TRANSIENTE NIDRAULICO | 53 |
| 4.0 | | |
| 5 | | 61 |
| 5.1 | | 61 |
| 5.2 | INTERRUPÇÃO DO FLUXO DEVIDO A PRESENÇA DE AR | 62 |
| 5.3 | | 62 |
| 5.4 | | 62 |
| 5.5 | | 20 23 |
| 6.U | | دە |
| 0 | | 04 |
| 7 | ANEXOS | 66 |

ILUSTRAÇÕES

| Figura 2.2.1- Superfície de controle para determinação da Equação da Continuid | ade 20 |
|--|--|
| Figura 3.2.1 - Fechamento da válvula – Pressão de Trabalho (ANDRÉS, 2004) Figura 4.1.1 - Trecho aéreo do emissário – Porto de São Sebastião Figura 4.3.1 - Deslocamento do suporte Figura 4.3.2 - Contenção lateral vertical improvisada do suporte Figura 4.3.3 - chapa de reforço para movimentação longitudinal do duto Figura 4.3.4 - Posição irregular dos apoios nas chapas de reforço Figura 4.4.1 - Deformação da alça de dilatação - Pressão de Transiente Figura 4.4.2 - Deformação da alça de dilatação - Pressão de Projeto Figura 4.5.1 - Topologia da rede de escoamento Figura 4.5.2 - Classificação dos vórtices quanto à intensidade (Tsutiya, 1997) Figura 4.5.3 - Efeito da pressão e da temperatura na densidade relativa do | 25 33 35 35 35 35 40 41 42 44 o ar |
| (Mesquita, 1988) Figura 4.5.4 - Processo de interrupção do escoamento (Adaptado-KIRSNER, 200 | 46 00). |
| Figura 4.5.5 - Pressões disponíveis na rede – (ANEXO C) Figura 4.5.6 - Cota do terreno e perfil de pressão ao longo do trecho ETE Figura 4.5.7 - Ponto de trabalho de cada bomba Figura 4.5.8 - Parada de bomba - Pressão Máxima Figura 4.5.9 - Fechamento rápido de válvula - Pressão Máxima Figura 4.5.10 - Fechamento rápido de válvula - Pressões Mínimas | 48 52 52 55 56 57 58 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 3.1 - Coeficiente do material para a celeridade da água | 29 |
|---|--------|
| Tabela 4.1 - Característica da linha. | 34 |
| Tabela 4.2 - Parâmetros Operacionais do Sistema ETE | 34 |
| Tabela 4.3 – CaracterísticaS das Bombas | 34 |
| Tabela 4.4 - Carregamentos básicos – Flexibilidade | 38 |
| Tabela 4.5 - Valores aproximados de K ₁ – perdas localizadas | 50 |
| Tabela 4.6 - Resultado da variação máxima de pressão para os diferentes mo | étodos |
| de cálculo | 59 |
| Tabela 4.7 - Cálculo do transiente hidráulico pelo método de Jouget e Michaud | 59 |
| Tabela 4.8 - Cálculo do transiente hidráulico pelo método de Joukowsty | 60 |
| | |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Δ | Variação - <i>Delt</i> |
|-----------------------|---|
| $ ho$, $ ho$ $_{_0}$ | Massa especifica do fluido - Rô |
| γ | Peso específico – Gama |
| а | Velocidade da onda de pressão ou celeridade |
| <i>v</i> ,V | Velocidade do escoamento |
| β | Coeficiente de correção da quantidade de movimento |
| P, P _g ,p | Pressão |
| F | Força atuante |
| R _{solo} | Força de atrito exercida pelo solo por metro linear |
| R | Raio de curvatura |
| S | Força de atrito |
| L | Comprimento |
| k | Módulo de bulk |
| E | Módulo de Young ou de Elasticidade |
| G | Aceleração da gravidade |
| T, t | Tempo |
| \forall | Volume |
| A | Seção transversal |
| SC | Superfície de controle |
| Μ | Número de Mach |
| D | Diâmetro |
| Н | Altura manométrica |

| ΔH | Sobrepressão |
|--|---|
| Z | Altura geométrica – cota |
| ΔL | Deslocamento da extremidade da linha |
| m | Massa |
| ° M | Vazão mássica |
| е | Espessura da tubulação |
| \overline{C} | Constante de Allievi |
| | |
| j | Perda de carga unitária |
| j m.c.a. | Perda de carga unitária Metros de coluna de água |
| j m.c.a. Pa | Perda de carga unitária Metros de coluna de água Pascal |
| j m.c.a. Pa N | Perda de carga unitária Metros de coluna de água Pascal Newton |
| j m.c.a. Pa N m | Perda de carga unitária Metros de coluna de água Pascal Newton metro |
| j m.c.a. Pa N m s | Perda de carga unitária Metros de coluna de água Pascal Newton metro segundo |
| j m.c.a. Pa N m s kg | Perda de carga unitária Metros de coluna de água Pascal Newton metro segundo Quilograma |

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do conhecimento dos aspectos físicos da realidade não pode ser visto, exclusivamente, como um processo cumulativo. O processo de desenvolvimento desse conhecimento encontra-se em constante atualização. Durante o processo cumulativo os cientistas comportam-se como se a realidade fosse exatamente como eles a conhecem, esquecendo-se de detalhes não observados e da dinâmica das mudanças. Falam das leis da natureza, por exemplo, que representam simplesmente modelos que explicam as suas experiências da realidade num determinado tempo. As gerações seguintes de cientistas, ocasionalmente, descobrem que estes conceitos de realidade incorporam aspectos implícitos e hipóteses que mais tarde mostram-se incorretas (GHIDAOUI, 2005).

O escoamento transiente vem sendo estudado desde os antigos chineses, os índios Maias da América Central, as civilizações mesopotâmicas ribeirinhas do Nilo, do Tigre, do Eufrates e muitas outras sociedades que através da história desenvolveram sistemas para transporte de água, primeiramente para irrigação, e posteriormente para o consumo doméstico. Os antigos entendimentos e aplicação dos princípios do escoamento e da mecânica dos fluidos, dentro deste contexto tradicional, basearam-se na cultura e na tecnologia da época referida. Com a chegada da era científica e do desenvolvimento matemático incorporado nos princípios de Newton, o entendimento do escoamento dos fluidos tomou um grande impulso em termos da abstração teórica.

Esse impulso deu início ao desenvolvimento da engenharia hidráulica, onde se buscavam respostas, por exemplo, quanto à propagação de ondas sonoras no ar, propagação de ondas sonoras em águas rasas, e o fluxo do sangue nas artérias. Entretanto, nenhum desses problemas pôde ser resolvido integralmente até o desenvolvimento da teoria da elasticidade e das soluções das Equações Diferenciais Parciais.

Newton apresentou o resultado de suas investigações com respeito à propagação de ondas sonoras no ar e o escoamento de água em canais. Newton e Lagrange chegaram à teoria da velocidade do som no ar. Euler descreveu a teoria da propagação da onda elástica aplicando Equações Diferenciais Parciais (CHAUDHRY, 1979).

Hoje em dia, na hidráulica, assim como, em outras áreas do conhecimento científico, engenheiros têm descoberto que seus entendimentos têm tomado grande fôlego com o apoio da tecnologia e, assim alcançado aprofundamento sem precedentes no estágio do conhecimento e da informação acumulada.

Análise computacional, modelos computacionais e simulação computacional de certa forma são termos equivalentes. Todos descrevendo tecnologias direcionadas para o entendimento dos fenômenos físicos, e traduzindo a habilidade humana em sua previsão e controle.

Através da combinação das leis físicas, da abstração matemática, dos procedimentos numéricos, das construções lógicas e do processamento de dados eletrônicos, atualmente, tem sido possível solucionar problemas de enorme complexidade, ou seja, a partir das equações de Navier-Stokes e da aplicação de métodos computacionais é possível a análise mais realística dos fenômenos de escoamento em regime transiente, evitando-se os métodos tradicionais de análise hidráulica que, por simplificação, assume o escoamento em regime permanente (ANEXO L).

O transiente hidráulico é um fenômeno que pode afetar basicamente toda a rede de transporte de fluido. Seu entendimento e a constante busca de soluções para evitar os seus efeitos danosos, alcançaram avanços tecnológicos significativos, sobretudo, através dos métodos computacionais dedicados ao assunto.

A presente pesquisa promove uma revisão teórica sobre o tema e apresenta um estudo de caso onde foi desenvolvida a simulação computacional de um transiente hidráulico ocorrido pela presença de ar no trecho aéreo da tubulação de um emissário submarino. Foi também desenvolvida uma análise de flexibilidade da linha com o objetivo de comprovar que os danos provocados nos suportes da tubulação foram devidos, exclusivamente, aos efeitos do transiente hidráulico.

2 TRANSIENTE HIDRAULICO

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Antes de considerar o desenvolvimento matemático relacionado ao transiente hidráulico é interessante uma rápida revisão sobre o contexto social que inspirou o interesse inicial por este assunto.

No final do século XIX, a Europa estava no auge da revolução industrial com crescimento urbano populacional e industrial necessitando de energia elétrica para as novas máquinas e equipamentos de produção. Considerando-se que o combustível fóssil ainda não tinha iniciado a dar resultados, a geração hidroelétrica era a principal fonte de suprimento de energia. Embora a hidrogeração, hoje em dia, represente uma proporção muito menor na matriz energética, os problemas associados ao controle do fluxo de água através de *penstoks* e turbinas permanecem uma importante aplicação da análise de transiente.

As companhias de hidrogeração contribuíram significativamente para o desenvolvimento dos laboratórios de fluidos e turbomáquinas, destacando-se o fenômeno de transiente hidráulico e seu controle. Algumas experiências iniciais de Allievi (GHIDAOUI, 1979) foram conduzidas como resultado direto de incidentes e falhas causadas por transientes, devido ao rápido fechamento de válvulas em hidroelétricas no Norte da Itália.

O conceito de atrito no fenômeno de transiente foi consolidado nesse período inicial do desenvolvimento, porque os transientes ocorriam principalmente devido ao rápido fechamento ou abertura de válvulas, gerando a maior parte das perdas de energia nesses sistemas. Isto resultou na alteração e na concepção dos projetos de tubulações, verificando-se um aumento significativo dos diâmetros e conseqüente alteração nas velocidades de escoamento que tenderam a diminuir.

Ainda no final do século XIX, o óleo combustível superou a hidrogeração como a principal fonte de energia elétrica para atender as necessidades da sociedade e a demanda de potência, entretanto, a fascinação por esse tema e em especial pelo transiente hidráulico continuou inabalado.

Hoje em dia, tendo em vista que a maior disponibilidade de energia conduz a uma rápida industrialização e a um intenso desenvolvimento urbano, o transiente hidráulico é um item crítico de projeto para maioria dos sistemas de condução de fluidos, que vão desde a injeção de combustíveis em motores de automóveis, até aos sistemas de suprimento, transmissão e distribuição de água.

Atualmente, extensas tubulações de transporte de fluidos a grandes distâncias tornaram-se comuns, assim como, o desenvolvimento quase universal de redes de pequenos diâmetros e altas velocidades para a distribuição de água. Isto tudo, tem aumentado a importância do efeito transiente e da parcela do atrito nas paredes das tubulações, resultando na inclusão do atrito nas equações governantes.

Sofisticados dispositivos mecânicos de controle de fluidos e equipamentos, incluindo vários tipos de bombas e válvulas acoplados com sensores eletrônicos e controladores que promovem as condições para se trabalhar o comportamento de sistemas complexos, vem exigindo conceitos teóricos avançados para sua representação.

O recente conhecimento da fase negativa das pressões nos transientes chama a atenção para o que pode resultar em contaminação dos sistemas de água potável, que significa a necessidade do entendimento da maneira efetiva de como lidar com o fenômeno, requerendo técnicas mais precisas de serem abordadas do que antes.

Alem disso, como se sabe, o transiente hidráulico é uma carga dinâmica e, portando, varia no tempo, seja em magnitude, direção ou posição. Esta variação introduz na estrutura acelerações e velocidades, além de deslocamentos, gerando como conseqüência forças de inércia e de amortecimento (LIMA, 2008). Freqüentemente, esse efeito não é abordado, devido à questão da dificuldade de se representar o fenômeno.

A grande maioria das cargas possíveis de serem consideradas em estruturas de obras civis tem natureza dinâmica. Para efeitos práticos, aquelas que apresentam pequenas variações no tempo, conseqüentemente gerando pequenas forças de inércia e amortecimento, por simplificação são tratadas como estáticas, ou quase estáticas, sendo as forças de inércia e de amortecimento desprezadas (LIMA, 2008).

Até pouco tempo os efeitos cíclicos do transiente também não faziam parte do escopo dos projetos de engenharia, mas com a popularização dos softwares tornouse uma análise rotineira e de grande importância na concepção de qualquer estudo de escoamento, principalmente, aqueles destinados ao transporte de fluidos de valor econômico significativo, como: oleodutos, adutoras e emissários submarinos, por exemplo.

Com o desenvolvimento do conhecimento e com o advento dos computadores, o que se observa é que estudos que tinham apenas importância teórica passam a ganhar importância prática na resolução dos problemas de engenharia.

2.2 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

As equações que estabelecem o transitório hidráulico são a da Conservação da Massa (Equação 2.2.1) e a da Quantidade de Movimento (Equação 2.2.2), (CHAUDHRY, 1979 e WYLIE, 1978). A solução dessas equações permite a determinação das pressões (cargas piezométricas) e vazões em função do tempo.

$$\frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial g} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$
 2.2.1

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4}{\rho D} \tau_w = 0$$
 2.2.2

Onde:

- τ_{w} tensão de cisalhamento na parede do duto;
- ρ massa específica;
- D diâmetro do duto;
- x coordenada espacial ao longo do duto;
- t coordenada temporal.

As Equações 2.2.1 e 2.2.2 constituem as equações fundamentais para representação do transiente (1D) e, permitem modelar a propagação da onda de pressão (MELIANDE, 2010).

Alterações rápidas no escoamento, planejada ou acidental, resultam em mudanças espaciais e temporais na velocidade e nos campos de pressão. A interpretação física do fenômeno que relaciona a causa "manobra" ao efeito "transiente hidráulico" fornece subsídios para otimização de projetos.

O fluxo transitório nas tubulações é essencialmente unidirecional, i.e., axial ao duto, uma vez que o fluxo de massa, o momento, e a energia, são muito maiores axialmente do que seus componentes radiais.

A concepção unidirecional (1D) das equações clássicas do transiente hidráulico, que regem as variações axiais e temporais das variáveis de campo no fluxo transiente ao longo do tubo, são obtidas pela aplicação dos princípios da conservação da massa (Equação 2.2.3.) e da quantidade de movimento para um elemento de controle (CHAUDHRY, 1979 e WYLIE, 1978).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{sc} \rho d \nabla + \int_{sc} \rho(v.n) dA = 0$$
2.2.3

Onde:

- *sc* superfície de controle;
- *n* vetor unitário normal exterior à superfície de controle;
- v vetor velocidade;
- \forall Volume de controle.

O primeiro termo da Equação da Conservação da Massa (Equação 2.2.3) representa a taxa de variação de massa dentro da superfície de controle; o segundo termo representa a taxa líquida de fluxo de massa através da superfície de controle. A equação da conservação de massa é também chamada de equação da continuidade ou teorema do transporte de Reynold (CHAUDHRY, 1979 e WYLIE, 1978). Em outras palavras, pode-se dizer que a taxa de aumento da massa na superfície de controle é devida ao fluxo líquido de massa.

A forma da Equação 2.2.4 é obtida fazendo o limite do comprimento longitudinal δ_x tender a zero.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x}^{x+\delta x} \rho(x,n) dA = 0$$
 2.2.4

A Equação 2.2.5 demonstra a forma conservativa do balanço de massa para uma área variável (1D), considerando o escoamento não permanente, o fluido compressível e o duto flexível.

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} = 0$$
 2.2.5



Figura 2.2.1- Superfície de controle para determinação da Equação da Continuidade

Adotando-se procedimento semelhante para o desenvolvimento da equação da quantidade de movimento com base na superfície de controle e fazendo as representações e simplificações referentes ao do transiente hidráulico (CHAUDHRY, 1979 e WYLIE, 1978), encontra-se a expressão básica do fenômeno (Equação 2.2.6).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0$$
 2.2.6

- V velocidade unidirecional e axila ao duto;
- g aceleração da gravidade;
- H pressão ou cargas piezométricas;
- x coordenada espacial na direção longitudinal ao duto;
- t coordenada temporal.

A partir das equações básicas do fenômeno, várias fórmulas foram desenvolvidas para avaliação da magnitude do transiente hidráulico.

3 ESTIMATIVA DO TRANSIENTE HIDRAULICO

No escoamento permanente, onde se considera a vazão e a velocidade como invariáveis no tempo ao longo do conduto, aplica-se ao estudo do escoamento o teorema de Bernoulli. Porém, se o escoamento for considerado transiente esse teorema não pode mais ser aplicável, pois a vazão e a velocidade do escoamento não são mais consideradas constantes.

O escoamento transiente caracteriza o comportamento mais realístico do fluxo, pois a consideração "permanente" do escoamento é extremamente artificial, no entanto, de fácil dedução e na grande maioria dos casos viabiliza a solução dos problemas.

Com raras exceções o escoamento deixa de ser transiente. No entanto, seja pela facilidade, seja pelos resultados aproximados consistentes, a análise baseada em uma quantidade menor de dimensões, é com freqüência significativa.

Hoje, com os novos desafios que a indústria está vivenciando, a consideração simplificada não atende mais a demanda das soluções almejadas pelos engenheiros. Portanto, torna-se necessário prever com maior precisão os eventos extremos provenientes da consideração do escoamento transiente, que são as sobrepressões e subpressões nos condutos hidráulicos.

As sobrepressões têm grande importância, por serem capazes de assumir valores extremamente baixos, podendo provocar o colapso da tubulação ou determina a ruptura da coluna de fluido que perde, assim, sua continuidade.

3.1 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO

O transiente hidráulico ocorre devido a uma mudança abrupta na vazão e

conseqüentemente na velocidade, onde são geradas ondas de pressão que se propagam através do conduto, transformando a energia cinética do fluido em ruído, calor, deformações elásticas, alem de trepidações na estrutura.

O golpe de aríete se repete em múltiplos ciclos ao longo da tubulação através da propagação de ondas de pressão sobrenormais e subnormais, tal como ocorre com as ondas sonoras, até cessar por completo devido ao atrito.

A variação brusca na velocidade ocorre quando há, por exemplo, a interrupção do escoamento, tendo como parâmetro principal o tempo em que ocorre a abertura ou o fechamento do dispositivo de regulagem de vazão, que pode ser, por exemplo, uma válvula do tipo *on/off*.

O tempo de regulagem desse dispositivo é importante, pois determina quão grande pode ser a magnitude do transiente para um determinado conduto.

A onda de pressão leva um determinado tempo para ir do ponto onde se deu o estrangulamento ou o alargamento da seção, percorrer toda a tubulação, e retornar ao ponto de partida, sendo este tempo chamado de ciclo completo ou período da linha (Equação 3.1.1).

Quando esse tempo de propagação da onda de pressão é menor, igual ou maior que o tempo que o dispositivo de regulagem gasta para promover o estrangulamento total, ou o oposto, o alargamento total da seção do conduto, espera-se do transiente maior ou menor magnitude.

A denominação do tempo de regulagem da passagem do fluxo é por isso classificada distintamente, em rápida, lenta e muito lenta, e está intimamente relacionada às características físicas do conduto, mais propriamente dita com o comprimento disponibilizado para propagação da onda de pressão.

$$\Gamma = \frac{2.L}{a}$$
 3.1.1

onde:

 Γ - período da linha (s);

L - comprimento total do conduto (m);

a - celeridade (m/s), isto é, a velocidade de propagação das ondas de pressão na tubulação.

3.1.1 Evento rápido

Um evento é dito rápido quando ocorre num intervalo de tempo menor que um período da linha. É deste evento que são obtidas as maiores magnitudes de sobrepressão e subpressão para os transientes hidráulicos, dentro obviamente, de um range que é função do sistema considerado.

3.1.2 Evento lento

Um evento é dito lento quando ocorre num intervalo de tempo que pode variar entre 1 a 500 vezes o período da linha. Deste evento são esperadas magnitudes moderadas para os transientes hidráulicos de um determinado sistema.

3.1.3 Evento muito lento

Para eventos muito lentos a variação da velocidade do escoamento excede 500 vezes o período da linha. Para eventos desse tipo, a pressão máxima observada é proporcional a razão da variação da velocidade do fluxo, independe da velocidade da onda de pressão e é por isso desprezível.

Como pode ser observado, variando o tempo do início ao fim da manobra do dispositivo de regulagem de controle de vazão é possível estimar a magnitude do transiente que o sistema estará sujeito. Desta forma sempre que possível, deve-se optar pelo fechamento lento da válvula para evitar o risco de ocorrência de transiente hidráulico.

3.2 EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DO TRANSIENTE HIDRAULICO

3.2.1 Jouget e Michaud

Para calcular o golpe de aríete, Jouget e Michaud, numa primeira aproximação, não consideram a elasticidade do tubo e nem a compressibilidade do líquido, assumindo, portanto, a teoria da coluna rígida.

Eles aplicaram o princípio da transformação do impulso mecânico na variação da quantidade de movimento (Equação 3.2.1).

$$\begin{pmatrix} impulso \ mec\hat{a}nico \\ F \times T \\ força \times tempo \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} var \ iação \ da \ quantidade \ de \ movimento \\ m \times \Delta V \\ massa \times var \ iação \ da \ velocidade \end{pmatrix} 3.2.1$$

Ao interromper o fluxo, e supondo que a variação da velocidade tenha sido originada devido a uma manobra lenta, ou seja, o tempo de interrupção é maior que *2L/a* de uma válvula localizada à jusante do sistema (Equação 3.2.2), a energia cinética do líquido contido na tubulação se transforma em trabalho elástico e em energia vibratória, ondulatória e térmica (Figura 3.2.1). As oscilações de pressão decrescem até se anularem pela ação da viscosidade do fluido (ANDRÉS, 2004).

$$P.A.T = m(V_o - V_f) = m.\Delta V$$
 3.2.2

Onde:

P - sobrepressão originada no local onde se encerrar o fluxo (Pa);

A - seção transversal da tubulação (m^2) ;

m - massa (m);

 V_0 - velocidade inicial do escoamento considerando a válvula aberta (*m/s*);

V_f - velocidade do fluxo imediatamente após o fechamento da válvula (*m/s*).



Figura 3.2.1 - Fechamento da válvula – Pressão de Trabalho (ANDRÉS, 2004)

A massa pode ser descrita conforme a Equação 3.2.3.

$$m = \frac{Peso}{g} = \frac{\gamma.A.L}{g}$$
 3.2.3

Substituindo a Equação 3.2.3 na Equação 3.2.2 se obtém a sobrepressão *P* (Jouguet), observada no local da interrupção, (Equação 3.2.4).

$$P = \frac{\gamma . L \Delta V}{g.T}$$
 3.2.4

Onde,

P - sobrepressão gerada no golpe de aríete (Kg/m^2) ;

 γ - peso específico do líquido (*Kgf/m³*);

L - comprimento do tubo (m);

T - tempo de acionamento da válvula desde a velocidade inicial até a velocidade final (*s*);

 ΔV - diferença da velocidade antes e depois do acionamento da válvula (*m/s*);

Analisando a Equação 3.2.4, observa-se que *P* - sobrepressão durante o escoamento uniforme é considerada zero, pois $\Delta V = 0$.

Considerando-se o fechamento da válvula instantâneo, os efeitos do transiente se verificam imediatamente em toda a tubulação com intensidade constante, o que não é possível.

A lei de crescimento do golpe de aríete era desconhecida, mas Michaud adaptou uma variação linear que deve satisfazer áreas iguais (igualdade de impulsos mecânicos) no tempo de fechamento *T*, de valor de $\int_{0}^{T} P(t)dt$, entre uma forma triangular e uma retangular, (Equação 3.2.6) e (Equação 3.2.5):

$$P(Michaud) = 2P_g(Jouguet)$$
 3.2.5

Em conseqüência, a fórmula de Michaud expressa o golpe de aríete máximo junto à válvula, em metros de coluna de líquido (Equação 3.2.6):

$$P = 2\frac{\gamma . L. V}{g. T}$$
 3.2.6

Analisando a Equação 3.2.4 e a Equação 3.2.6 verifica-se que a sobrepressão é diretamente proporcional ao comprimento da tubulação. Quanto maior o comprimento da tubulação, maior será a quantidade de movimento e maior será a sobrepressão gerada.

A equação de Jouget e a equação de Michaud fornecem valores médios fictícios que são inferiores ao máximo real, porém são equações de simples dedução, que oferecem em termos práticos a ordem de grandeza do golpe de aríete.

3.2.2 Equação de Joukowsky

Um dos precursores da introdução da influência da compressibilidade da água e elasticidade dos tubos no cálculo do golpe de aríete foi o professor N. Joukowsky, da Universidade de Moscou e do Instituto Imperial Técnico também de Moscou, que desenvolveu a lei que permite calcular a pressão máxima provocada pelo fechamento súbito de uma válvula instalada a jusante de um conduto forçado (SILVESTRE, 1979).

Joukowsky em 1897 conduziu vários experimentos com dutos em Moscou. Baseado em seus experimentos e estudos teóricos, ele publicou seu clássico artigo sobre a teoria básica do transiente hidráulico. Ele desenvolveu uma fórmula para velocidade da onda, tendo considerado a elasticidade do conduto e a compressibilidade da água. Desenvolveu a relação entre a redução da velocidade tendo como resultado a sobrepressão, utilizando dois princípios da mecânica dos fluidos: a variação quantidade de movimento e a equação da continuidade. Discutiu a propagação da onda de pressão ao longo do duto e sua reflexão no local de interrupção do fluxo. Estudou os efeitos da taxa de fechamento de uma válvula e obteve a sobrepressão máxima devido à interrupção do escoamento para uma variação no tempo inferior ao período da linha *2L/a* (CHAUDHRY, 1979).

Utilizando um modelo empírico para suas considerações, Joukowsky baseouse fisicamente em uma tubulação horizontal com diâmetro único ao longo dela, pela qual circulava água com velocidade média em movimento permanente. A redução brusca da velocidade em condutos forçados originou uma onda de pressão junto ao registro, (Equação 3.2.7) (SILVESTRE, 1979).

$$\Delta H = \frac{a.v_0}{g} \qquad \qquad 3.2.7$$

Onde

Δ*H* - sobrepressão (m.c.a.);

 v_0 - velocidade inicial (*m/s*).

A teoria da coluna rígida poderia conduzir à conclusão de que, pela segunda lei Newton, que surgiriam pressões de valor infinitamente grandes quando o escoamento fosse interrompido de modo repentino. Joukowsky mostrou que, sendo a água compressível e os tubos elásticos, a variação de pressão é sensivelmente abrandada, e que as ondas de pressão anormais transmitem-se ao longo dos condutos de maneira semelhante à do som, desde as válvulas onde se deram o início do fenômeno, aos reservatórios de origem, onde se refletem e retornam às válvulas de controle, restabelecendo a pressão e o diâmetro normal da tubulação. Aplicando a equação de Kortweg à água (Equação 3.2.8).

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot (\frac{1}{E} + \frac{D.\phi}{E.e})}}$$
3.2.8

Onde:

- a velocidade da onda ou celeridade (*m/s*);
- ρ massa específica do líquido (kg/m³);
- E` módulo de bulk do líquido (N/m^2) ;
- E módulo de elasticidade do material do duto (Pa);
- D diâmetro interno da tubulação (m);
- e espessura da tubulação (m);
- ϕ fator de abertura da tubulação onde ocorre a interrupção do escoamento.

Tomando os valores ρ = 1000 kg/m³ e E` = 2,067 x 10⁸ Kgf/m², na equação (Equação 3.2.8) obtém-se a (Equação 3.2.9):

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3+k.\frac{D}{e}}}$$
 3.2.9

Onde:

 $k = \frac{10^{10}}{E}$ - Coeficiente que considera o módulo de elasticidade, conforme Tabela 3.1;

| Material | k |
|-------------------|------|
| Aço | 0,5 |
| Ferro Fundido | 1,0 |
| Cimento Amianto | 4,0 |
| Concreto e Chumbo | 5,0 |
| PVC (rígido) | 18,0 |

TABELA 3.1 - COEFICIENTE DO MATERIAL PARA A CELERIDADE DA ÁGUA

A velocidade do som depende de como a pressão e a massa específica do meio estão relacionadas. Para meios "incompressíveis" não ocorre variação da massa específica em função da pressão, logo a Equação 3.2.10 mostra que a velocidade tende ao infinito, (FOX, 2010).

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}$$
 3.2.10

Sólidos e líquidos possuem massas específicas difíceis de variarem, demandando pressões muito elevadas para ocorrerem e, conseqüentemente apresentam valores para a celeridade "*a*" também elevados (Equação 3.2.10).

A Equação 3.2.10 possui sua equivalente utilizando o módulo de compressibilidade "K" que é uma medida de como a variação da pressão afeta a variação relativa da massa específica, (Equação 3.2.11).

Se a tubulação pudesse ser fabricada com material completamente rígido, ou seja, com módulo de elasticidade infinito, a celeridade teria a mesma ordem de grandeza da velocidade de propagação do som quando o fluido considerado é a água (Equação 3.2.11).

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 1400 \ m \,/\,s \tag{3.2.11}$$

3.2.3 Equação de Allievi

O engenheiro italiano Lorenzo Allievi (1902) estabeleceu a equação diferencial do golpe de aríete para tubulações de característica única, aquelas cujos

diâmetros, espessuras e materiais de que são feitas conservam-se os mesmos ao longo dos condutos (SILVESTRE, 1979).

Allievi estabeleceu uma relação onde avaliou um elemento de controle lançando mão das equações de Euler e da equação da Continuidade. Nesse experimento, considerou um reservatório conectado a um duto, de abscissa *x* ao longo da seção onde se inicia na válvula e se finaliza no reservatório.

Allievi estendeu as formulações de Joukouwsky incluindo a variação da pressão devido ao fechamento lento de uma válvula de retenção. A constante *C* na equação de Allievi mostra a proporcionalidade entre a coluna de fluido, tempo de fechamento de válvula, velocidade do fluxo e o comprimento do conduto, (Equação 3.2.12) e (Equação 3.2.13).

$$C = \frac{L.v}{g.H.T}$$
 3.2.12

A sobrepressão devido ao transiente e dada por:

$$h_a = \frac{H}{2} \cdot (C^2 + C \cdot \sqrt{4 + C^2})$$
 3.2.13

v - velocidade do fluxo;

C - constante de Allievi.

As fórmulas apresentadas serão empregadas para avaliar o transiente hidráulico no estudo de caso no capítulo seguinte.

4 ESTUDO DE CASO – DEFORMAÇÃO DOS SUPORTES

4.1 DESCRIÇÃO DO EMISSÁRIO

O porto de São Sebastião que está localizado na costa Norte do Estado de São Paulo, distante cerca de 200 km da cidade de São Paulo é especializado na carga e descarga de granéis líquidos - petróleo e derivados.

Os efluentes provenientes dos derivados de petróleo, após passarem por um tratamento com base em um reator biológico para retirada dos resíduos sólidos (GUERRA, 2009), são descartados no mar através de dois emissários submarinos.

A estratégia adotada para coleta, transporte e descarte dos efluentes provenientes da estação de tratamento de efluentes (ETE) e dos Separadores de Água e Óleo, consiste na instalação de um emissário constituído de um trecho terrestre e um submarino.

Emissário Submarino ou Sistema de disposição oceânica são estruturas compostas basicamente, quando completo, por cinco unidades: I - estação de condicionamento prévio dos efluentes, II - emissário terrestre, III - câmara ou chaminé de equilíbrio, IV - emissário submarino e V - tubulação difusora, situada a uma distância e profundidade tal que venha a proporcionar a formação de um adequado campo de mistura de efluentes pré-condicionados / águas marinhas.

O campo de mistura deve ser capaz de conduzir as concentrações poluidoras de forma que, sob as condições de deslocamento mais adversas, possam ocorrer em uma determinada área de uso compatível com as concentrações de poluentes dentro dos padrões admissíveis pela legislação ambiental vigente (GONÇALVES, 1997).

Com o objetivo de descartar água de formação (oleosa) no mar, em condições toleráveis de diluição, foi estabelecida uma vazão máxima de descarga de 340 m³/h, segundo o estudo de diluição desenvolvido para a região (FORTIS, 2005).

O estudo de diluição de pluma estabeleceu que a vazão de 340m³/h em cada uma das linhas é a máxima tolerável pelo sistema de disposição oceânica para redução das concentrações de poluentes a níveis admissíveis, antes que o campo de misturação/ águas marinhas possa, nas condições mais adversas de deslocamento, atingir áreas de usos benéficos, especialmente aquelas relacionadas ao banho e esportes aquáticos ou aqüicultura.

O efluente tratado na ETE seguirá por gravidade, através de um duto existente de 12" de aço carbono para um reservatório de acúmulo, localizado na gleba A.

Na gleba A encontra-se a estação elevatória, que opera por batelada, ou seja, o processo de bombeamento da água tratada para seu descarte é um processo intermitente, que ocasiona a paralisação do sistema de bombeamento.

O efluente acumulado no reservatório será bombeado através de duas linhas paralelas em aço carbono de 8" de diâmetro que ligam o reservatório localizado na gleba A a ponte de acesso ao píer, com 469,5 m de comprimento. O restante do caminhamento aéreo sobre a tubovia do píer até o ponto de lançamento, posse diâmetro de 10" com extensão de 1572,3 m.

Ao final do píer, as duas tubulações de 10" em aço carbono se conectam com tubulações de polietileno 4", que descem na vertical fixadas nas colunas do píer conectadas em sua extremidade aos difusores com 4" de diâmetro, que proporcionam a dispersão do efluente no mar (Figura 4.4.1).

O caminhamento da tubulação, entre o reservatório e os difusores, encontrase instalado em terreno eminentemente plano, tanto no trecho terrestre quanto no trecho sobre o píer.



Figura 4.1.1 - Trecho aéreo do emissário – Porto de São Sebastião

4.2 DADOS BÁSICOS

O Emissário é composto de duas linhas em paralelo destinadas ao lançamento no mar dos efluentes oriundos da ETE (Estação de Tratamento de Efluentes). Cada uma das duas linhas está conectada a uma bomba que promove o escoamento do efluente acumulado no poço, que se encontra na gleba A.

A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 mostram as principais características dos trechos do duto de efluentes e parâmetros operacionais do sistema.

| Descrição | 1º trecho | 2º trecho | Trecho Submarino |
|------------------------|-------------|-------------|---------------------|
| Diâmetro Nominal (pol) | 8 | 10 | 4 |
| Comprimento (m) | 469,5 | 1572,3 | 17 |
| Material | Aço carbono | Aço carbono | Polietileno |

TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICA DA LINHA

TABELA 4.2 - PARÂMETROS OPERACIONAIS DO SISTEMA ETE

| Parâmetro Operacional | Valor | Unidade |
|--------------------------------|-------|---------------------|
| Vazão Máxima de Operação | 340 | m³/h |
| Pressão de Operação /3/ | 6,02 | kgf/cm ² |
| Temperatura de Operação | 33 | °C |
| Temperatura Ambiente | 30 | °C |
| Massa Específica (água oleosa) | 1000 | kg/m³ |

As bombas estão conectadas individualmente a cada uma das duas linhas e apresentam a relação "vazão x pressão" de referência de 340 m³/h e 6,02 kgf/cm². As curvas detalhadas das bombas encontram-se no ANEXO B.

Os principais dados das bombas utilizadas estão resumidos na Tabela 4.3.

| Produto | Bomba | Pressão de Referência | | Vazão de Referência |
|----------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| FIOUULO | | bar | kgf/cm ² | m³/h |
| Água Oleosa | Bomba Vertical B 12 D/4 | 5,9 | 6,02 | 340 |

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Foram observadas trepidações em toda a linha quando o sistema de bombeamento era acionado. Observa-se também o deslocamento dos suportes nas regiões das alças de dilatação do emissário (Figura 4.3.1 a Figura 4.3.4).





Figura 4.3.1 - Deslocamento do suporte



Figura 4.3.2 - Contenção lateral vertical improvisada do suporte



Figura 4.3.3 - chapa de reforço para movimentação longitudinal do duto



Figura 4.3.4 - Posição irregular dos apoios nas chapas de reforço

Com a constatação da ocorrência dos deslocamentos dos suportes nas alças de dilatação, foram propostas duas hipóteses para o entendimento do problema:

- Transiente hidráulico (Trepidações);
- Expansão / Flexibilidade da linha (Variações operacionais).

Cada uma das propostas foi analisada para investigação das reais causas das deformações dos suportes.

4.4 ANÁLISE DE EXPANSÃO E FLEXIBILIDADE DA LINHA

O objetivo da análise de flexibilidade é verificar se a expansão desenvolvida na tubulação, devido às condições ambientais e parâmetros operacionais como a
temperatura e a pressão podem justificar o deslocamento dos suportes da linha do emissário.

A expansão ou a contração da tubulação ocorre quando há variação de temperatura e pressão. As tensões internas se desenvolvem a partir do momento em que são impostas restrições a expansão ou contração da tubulação.

O cálculo de flexibilidade de uma tubulação contempla o desenvolvimento dos cálculos das tensões internas e, das reações sobre os pontos extremos, e outros pontos de restrições de movimento, devido às dilatações e/ou dos movimentos dos pontos extremos da tubulação.

Avaliações devem ser feitas obrigatoriamente para todas as tubulações, mesmo quando operando em temperatura ambiente. Poucos são os casos que são possíveis dispensar os cálculos de flexibilidade (TELLES, 1999), que são eles:

- 1. Quando a tubulação for uma duplicata exata de outra já calculada, ou trabalhando com sucesso há longo tempo e nas mesmas condições.
- 2. Quando a tubulação for semelhante e em condições certamente mais favoráveis, quanto à flexibilidade, do que a outra para a qual tenha sido calculada a flexibilidade. É o caso, por exemplo, de uma tubulação de mesmo traçado geométrico e com os mesmos pontos extremos de restrição de outra de maior diâmetro e de mesma temperatura, ou de outra de mesmo diâmetro e com temperatura mais elevada; ou ainda, o caso de uma tubulação de mesma temperatura e com os mesmos pontos extremos e de restrição de uma outra, com traçado menos favorável.
- Tubulações trabalhando em temperatura ambiente, não-expostas ao sol e não sujeitas a lavagem com vapor;
- 4. Tubulações enterradas;

Nos cálculos de flexibilidade calculam-se, independentemente, cada trecho de tubulação entre dois pontos de ancoragem. Todas as restrições de movimento (ancoragens, guias e batentes) são sempre supostas como tendo eficiência total,

isto é, impedindo totalmente os movimentos que devam impedir, conduzindo a resultados conservadores quanto às reações nos pontos de fixação (TELLES, 1999) (Equação 4.4.1).

$$\Delta L = \frac{F_{effect} \cdot L_{anchor}}{E \cdot A} - \frac{R_{solo} \cdot L_{anchor}^2}{2 \cdot E \cdot A}$$
 4.4.1

onde:

 ΔL – Deslocamento da extremidade da linha (m);

 F_{effect} – Força resultante da ação da pressão interna e temperatura do fluido no duto, com a redução da pressão externa devido à coluna d'água (N);

 R_{solo} – Força de atrito exercida pelo solo por metro linear (N);

 L_{anchor} – comprimento de ancoragem - comprimento de duto necessário para garantir que o solo impeça o deslocamento da extremidade devido às cargas de operação (*m*);

E – Módulo de Elasticidade do aço (Módulo de Young) (Pa);

A – Área da seção da tubulação (m^2) .

A força equivalente na curva (Equação 4.4.2, GALGOUL, 2004):

$$F = \frac{\Delta p.A_i}{R}.L$$
 4.4.2

onde:

- *F* Força concentrada na curva (N);
- Δp Pressão de projeto (*Pa*);
- A_i Área da seção transversal do duto (m^2) ;
- L Comprimento da curva (m);
- R Raio da curva (m).

Além dos condutos de água em questão, no caminhamento sobre a tubovia encontram-se também condutos de óleo, que trabalham com vazões e temperaturas elevadas. As linhas de óleo estão dispostas em paralelo às linhas de água analisadas, e não foram observadas trepidações nas linhas de óleo, conforme constatado para as linhas de água.

Foram elaborados, um modelo computacional de flexibilidade e outro de expansão. O modelo desenvolvido para avaliação da expansão avaliou as condições de pressão, comparando o máximo deslocamento desenvolvido na alça de dilatação devido ao carregamento máximo de pressão, e outro avaliando os parâmetros operacionais da linha.

A concepção do modelo para a análise da flexibilidade baseou-se na representação da alça de dilatação, submetida aos carregamentos máximos resultantes da expansão e da pressão interna sobre a tubulação. Para isto foi desenvolvido um modelo computacional, em elemento finito com auxilio do software SACS (5.2 SP3) do EDI.

O sistema de representação utilizado na análise de expansão foi baseado em elementos de pórtico espacial, que representam adequadamente as condições de contorno com as quais a tubulação vem sendo submetida.

Os carregamentos analisados na flexibilidade da linha foram o peso próprio da tubulação, o peso do fluido, a expansão da linha devido à pressão interna, a temperatura de operação, e a temperatura ambiente (Tabela 4.4).

| Caso de Carga | Descrição |
|---------------|---|
| 1 | Peso Próprio da tubulação |
| 2 | Peso do conteúdo (água de formação) |
| 3 | Expansão da Linha (pressão e temperatura) |
| 4 | Variação de Temperatura (entre o ambiente e o fluido) |

TABELA 4.4 - CARREGAMENTOS BÁSICOS – FLEXIBILIDADE

Para o cálculo da expansão foi assumida a temperatura de operação de 33 ^oC, e a temperatura ambiente de 30 ^oC. Logo, foi considerada uma variação de 3 ^oC.

Na avaliação da expansão da linha tomaram-se os dados de pressão como o parâmetro de referência. A pressão máxima obtida na análise do transiente hidráulico foi de 30,6 kgf/cm² (Seção 4.5) e a pressão de projeto de 6,02 kgf/cm².

Considerando a pressão do transiente hidráulico, 30,6 kgf/cm², no trecho reto

de 458m, a montante da alça de dilatação, a expansão desenvolvida foi de 0,016m, e para o trecho reto de 410m, a jusante da alça de dilatação, a expansão desenvolvida foi de 0,014m (ANEXO D).

Considerando a pressão de operação, 6,02 kgf/cm², na análise de expansão do trecho reto de 458m, a montante da alça de dilatação, a expansão desenvolvida foi de 0,007m, e para o trecho reto de 410m, a jusante da alça de dilatação a expansão desenvolvida foi de 0,007m (ANEXO E).

A expansão total dos dois trechos retos, a montante e a jusante da alça de dilatação, considerando a pressão máxima do transiente, somam 0,03m. Já a expansão total quando considerada a pressão de projetos, soma-se 0,014m.

Com os resultados obtidos na análise de expansão (ANEXO D ao ANEXO E) conservadoramente, aplicou-se o somatório da expansão dos trechos retos de jusante e de montante na mesma extremidade da alça de dilatação, para cada uma das situações, contemplando assim em apenas uma das extremidades da alça toda a expansão desenvolvida na linha, ocasionado deslocamento acentuado nos suportes de sustentação da alça (Figura 4.4.1 e Figura 4.4.2).

A análise de flexibilidade consiste na avaliação das tensões desenvolvidas devido aos deslocamentos ocasionados nos suportes da tubulação em função dos parâmetros operacionais e ambientais considerados.

A expansão individual obtida para cada um dos trechos da alça de dilatação foram somadas e aplicadas integralmente na extremidade à jusante do trecho reto da alça.

O deslocamento máximo obtido nos suportes da alça de expansão resultante da análise de flexibilidade foi de 0,49m (Figura 4.4.1), resultante da expansão aplicada de 0,03m quando se considerou a pressão transiente.

O deslocamento desenvolvido ocasionou acumulo de tensões ao longo de todo o emissário, essas tensões foram comparadas com a máxima admitida pelo material, onde obteve-se resultado satisfatório quanto a razão máxima de tensões (Uniy Check) encontrada, que deve ser menor ou igual a 1 (um), para estar dentro dos limites admissíveis de tensões desenvolvidas. A razão máxima de tensões (Uniy Check) foi calculado com base na norma API RP2A-WSD, e apresentou o resultado de 0,7. Portanto, não caracterizando condição de provocar as deformações observadas nos suportes em campo (Anexo G).



Figura 4.4.1 - Deformação da alça de dilatação - Pressão de Transiente

Considerando a pressão de projeto 6,02 kgf/cm² e o deslocamento obtido para os trechos de montante e jusante da alça de expansão foram iguais e totalizaram 0,014m (ANEXO E). A expansão assim obtida foi aplicada integralmente à extremidade à jusante da rede para se analisar a flexibilidade da linha.

O resultado da flexibilidade da linha demonstrou um deslocamento máximo na rede de 0,032m localizado na alça de expansão, e 0,17 para razão máxima de tensão (Figura 4.4.2), retirada do modelo estrutural. Portanto, não caracterizando condições de provocar as deformações em campo observadas nos suportes (ANEXO H).



Figura 4.4.2 - Deformação da alça de dilatação - Pressão de Projeto

4.5 CONCEPÇÃO DO MODELO DE TRANSIENTE HIDRÁULICO

Para concepção do modelo foi adotada a representação de todos os componentes hidráulicos e eletro-eletrônicos do emissário através de ferramentas disponíveis no software Flowmaster (Figura 4.5.1), sendo uma representação topológica. Portanto, embora permita uma caracterização detalhada da rede, não obedece os aspectos de caminhamento e de escala.



Figura 4.5.1 - Topologia da rede de escoamento

4.5.1 Interrupção do escoamento

O sistema de bombeamento do reservatório, localizado na gleba A, promove o escoamento dos efluentes tratados da estação de tratamento ETE, e faz a descarga através de difusores submarinos no mar, localizados no final do Píer. O sistema opera por batelada, e de tempos em tempos é interrompido para que o reservatório restabeleça a lâmina do efluente a ser descartado.

A bomba de recalque, localizada na gleba A, quando em operação, deve estar totalmente submersa, até que, dentro do reservatório, a lâmina d`água atinja um determinado nível, fazendo a bomba desligar, interrompendo o escoamento de forma brusca.

Em sistemas que operam por batelada é comum a formação de vórtices, onde pode ocorre a aspiração de ar emulsionado no líquido para o interior da tubulação (Figura 4.5.2 - TSUTIYA, 1997), através da bomba, quando o nível de fluido no reservatório está baixo.



Figura 4.5.2 - Classificação dos vórtices quanto à intensidade (Tsutiya, 1997)

Assim durante o período estático do sistema, a tubulação pode conter ar e água em seu interior.

Quando ocorre a interrupção do escoamento, os fluidos por inércia permanecem escoando através da rede com descarga pelos difusores, até que o sistema alcance um equilíbrio estático dentro da tubulação e o movimento cesse por completo.

Para que seja Alcançado o equilíbrio estático, considera-se entre outras coisas, a topografia do terreno e a cota de lançamento. Uma vez em o equilíbrio, o sistema permanece nestas condições até que o bombeamento volte a ser acionado.

Com o sistema interrompido, e já em equilíbrio, o ar no interior da tubulação, acomoda-se junto à geratriz superior, ao longo do caminhamento predominantemente plano da tubulação sobre o Píer (Figura 4.5.6), e o líquido remanescente, acomoda-se junto à geratriz inferior.

O ar quando pressurizado aumenta sua densidade e consequentemente sua

viscosidade (Figura 4.5.3). Já a água possui comportamento inverso, a elevação da pressão promove a redução de sua viscosidade, considerando para ambos os casos a temperatura constante. Dessa maneira, observa-se o comportamento diferenciado entre o ar e a água.

A viscosidade do ar a 20 $^{\circ}$ C é 1,81x10⁻⁵ Pa.s, e é bem menor que a da água a 20 $^{\circ}$ C de 1,01x10⁻³Pa.s.

Com o restabelecimento do bombeamento, o líquido é novamente succionado para dentro da tubulação, deslocando o ar ali estacionado.

Dentro da tubulação, o sistema ar-líquido começa a comprimir as lâminas subsequentes para a jusante da tubulação, e a pressão, gradualmente alcança seu valor de operação, até que as condições normais de escoamento sejam atingidas, e o líquido recupere, assim, o perímetro molhado e toda seção transversal esteja preenchida novamente com líquido.

Com o aumento de pressão o ar tem sua viscosidade aumentada (Figura 4.5.3), e este passa a ter mais dificuldade de escoar, já a água possui comportamento inverso e flui com maior facilidade.

Como se sabe, as tensões em um fluido são majoritariamente geradas pelo movimento entre as partículas. As partículas fluidas do ar em contato com as partículas fluidas da água geram forças de contato normais e cisalhantes, que durante o escoamento formam ondulações na interface do sistema bifásico.



Figura 4.5.3 - Efeito da pressão e da temperatura na densidade relativa do ar (Mesquita, 1988)

O comportamento diferenciado e as ondulações formadas entre as interfaces dos fluidos geram as condições necessárias para a formação de bolsões de ar.

O processo de formação dos bolsões de ar se dá com o aumento da pressão interna, onde o ar, devido a sua característica viscosa, em resposta ao aumento de pressão, escoa progressivamente com maior dificuldade e, ao encontrar condições favoráveis, vêm a estacionar num ponto da rede, iniciando um processo de estanqueamento do fluxo na tubulação, mesmo que momentaneamente (BERGANT, 2009).

Se ocorrer a evolução desses bolsões de ar a tal ponto de interromper o escoamento de forma brusca (Figura 4.5.4), ondas de pressão irão se seguir, caracterizando o transiente através de ruídos, trepidações e alteração na vazão, como por exemplo.

As trepidações na rede, devido ao transiente, podem vir a deslocar os suportes localizados nas curvas, que não foram dimensionados para os efeitos de uma sobrepressão instantânea, provocada por um transientes hidráulico, que pode atingir incontáveis vezes o valor da pressão de operação da rede de forma cíclica.

Interrupções provocadas pelo acumulo local de ar em condutos forçados, pode vir a ser momentânea ou permanente.

Na interrupção permanente, pode ocorrer o gasto excessivo de energia, quando a bomba responsável pelo escoamento não possui capacidade motora, ou seja, *head* para ultrapassar os obstáculos, como por exemplo, para vencer a diferença de cota do terreno, e a bomba continua trabalhando, mesmo sem que o escoamento seja estabelecido. Alem disso, o processo de interrupção permanente é um processo lento, que não ocasiona os efeitos desagradáveis de uma interrupção rápida, como os de um efeito transiente.

Já a interrupção momentânea ocorre de forma rápida, e a bomba hidráulica tem a capacidade *head* para manter o escoamento mesmo após a interrupção, seguindo-se, instantaneamente, os efeitos danosos do transiente, que podem ocasionar o rompimento da tubulação.

Se a interrupção do escoamento, devido à formação de bolsões de ar momentâneo ocorrer de forma brusca, imediatamente após a interrupção do escoamento, se verifica a propagação de ondas de pressão ao longo da tubulação (Figura 4.5.4).

A cavitação é um processo bem conhecido, que ocorre quando microbolhas dispersas no fluido mudam de estado físico, retornando ao estado líquido, devido a elevação da pressão à pressão igual ou maior que a pressão de vapor do líquido considerado, ocasionando o que se chama de colapso da bolha. O efeito do colapso da bolha gera ondas de pressão, e seu processo contínuo, provoca a danificação do material adjacente à zona de colapso das bolhas.

O processo discutido no presente trabalho se diferencia do processo de cavitação por, ocorrer com um volume grande de ar em comparação ao promovido pelo processo de cavitação. O ar é adicionado ao sistema, pelo efeito de vórtice, chamado aqui de ar livre, ou seja, aquele não dissolvido no líquido, assim como pelo ar dissolvido no líquido.

Devido à partida no sistema de bombeamento, o ar livre é bruscamente

comprimido, perdendo assim, parte da capacidade de escoar. Com a evolução desse processo, pode-se provocar os bolsões de ar localizados, e, consequentemente, o estanqueamento do escoamento e o transiente hidráulico.





Para comprovação das hipóteses levantadas foi desenvolvida no capítulo seguinte, a análise de Transiente Hidráulico.

4.5.2 Calibração do modelo

A simulação do comportamento do escoamento se inicia com a representação dos objetos de estudo. O modelo é uma abstração da realidade compilada segundo a linguagem de seu código de programação, formado por variáveis. Cada variável quantifica e caracteriza uma característica, desde propriedades do material empregado na sua construção, à forma de operação do sistema.

A calibração é uma etapa fundamental e importante no processo de

modelagem, pois consiste em comparar dados de desempenho real a partir do registro de séries históricas do fenômeno, com os da simulação, tendo como objetivo corrigir parâmetros e coeficientes para melhorar a fidelidade do modelo.

Devido à falta de registros históricos e de séries históricas para elaboração da calibração, foi adotada a comparação dos resultados do modelo com os da fórmula de Hazen-Williams (Equação 4.5.1) para análise das perdas de carga no mesmo trecho de rede.

O Coeficiente "C" da fórmula de Hazen-Williams (Equação 4.5.1) foi adotado igual a 110, correspondendo ao do tubo de aço velho (NETTO, 1996). Para estas condições, a comparação entre a curva piezométrica gerada pelo modelo e a obtida pela aplicação da referia fórmula apresentou afastamentos mínimos (Figura 4.5.5). Isto garante a fidelidade do modelo a respeito de não ter sido realizada a calibração tradicional, ou seja, a comparação com série histórica.

$$j = 6.81 \frac{1}{D^{1.17}} \left(\frac{V}{C}\right)^{1.852}$$
 4.5.1

onde,

- *j* perda de carga unitária (m/m);
- D diâmetro da tubulação (m);
- V velocidade do fluxo (m/s);
- C coeficiente de atrito.

As perdas localizadas, quando consideradas nos cálculos, foram avaliadas com base na fórmula cinética a partir da velocidade do fluxo e do coeficiente de atrito adotado para cada uma das singularidades (Equação 4.5.2) (MILLER, 1996).

$$hf = K_1 \frac{V^2}{2g} \tag{4.5.2}$$

- h_f perda de carga localizada (m.c.a.);
- K_1 coeficiente característico de perda de carga em singularidades;
- V velocidade do fluxo (m/s);

g – aceleração da gravidade (m/s²);

O valor de K₁ é praticamente constante para valores do número de Reynolds superiores a 50.000. Constitui-se, portanto, que para fins de aplicação prática, podese considerar a constante K_1 , no regime turbulento, independente do diâmetro da tubulação e da velocidade e natureza do fluido (Tabela 4.5), (NETTO, 1977).

| Peça | K ₁ | Peça | K ₁ |
|--|----------------|-----------------------------|----------------|
| Ampliação gradual | 0,30* | Junção | 0,40 |
| Bocais | 2,75 | Medir de Venturi | 2,50** |
| Comporta aberta | 1,00 | Redução gradual | 0,15* |
| Controlador de vazão | 2,50 | Registro de ângulo aberto | 5,00 |
| Cotovelo de 90º | 0,90 | Registro de gaveta aberto | 0,20 |
| Cotovelo de 40º | 0,40 | Registro de globo aberto | 10,0 |
| Crivo | 0,75 | Saída de canalização | 1,00 |
| Curva de 90º | 0,40 | Tê, passagem direta | 0,60 |
| Curva de 45º | 0,20 | Tê, saída de lado bilateral | 1,30 |
| Curva de 22 ¹ /2 ⁰ | 0,10 | Tê, saída bilateral | 1,80 |
| Entrada normal em canalização | 0,50 | Válvula-de-pé | 1,75 |
| Entrada de borda | 1,00 | Válvula de retenção | 2,50 |
| Existência de pequena derivação | 0,03 | Velocidade | 1,00 |

TABELA 4.5 - VALORES APROXIMADOS DE K1 – PERDAS LOCALIZADAS

* Com base na velocidade maior (seção menor)

** Relativo à velocidade na canalização

No modelo computacional, buscou-se representar todas as peças e com isso todas as perdas de carga nas singularidades, como curvas e reduções, levando em conta o tipo de escoamento com base no Número de Reynolds (laminar, crítico ou turbulento) e, dados da geometria e da conformação da peça, garantido maior precisão nos resultados.

O número de Reynolds calculado para as condições de fluxo analisado foi de 482.290, caracterizando escoamento em regime turbulento.

Para calibração, do modelo adotado, a vazão e a pressão de referência para a bomba foram 340 m³/h e 6,02 kgf/cm², respectivamente. O resultado da simulação

apontou para o equilíbrio da rede no ponto de operação da bomba de 348 m³/h e 5,67 kgf/cm², ou seja, aproximadamente 56,7 m.c.a.

Adotando esta vazão, a altura manométrica calculada para a rede foi de 5,5 kgf/cm² (55 m.c.a) no início do trecho, ou seja, no conjunto motobomba (Equação 4.5.3).

$$hfT = jL + \sum hf \tag{4.5.3}$$

onde,

 h_{fT} - perda de carga total (m.c.a.);

j - perda de carga unitária (m/m);

L - comprimento da tubulação (m);

 h_f - perda de carga localizada (m.c.a.).

Para efeito de calibração considerou-se as cotas nulas ao longo de todo trecho, com a finalidade de facilitar os cálculos e viabilizar a comparação dos dados.

Traçando as curvas piezométricas ao longo do trecho para cada um dos métodos aplicados, fica evidente a convergência dos resultados obtidos pelo "software" e pelo procedimento manual (Figura 4.5.5).

A diferença entre as cargas piezométricas totais ficou inferior a 3%, ou seja, 0,29 kgf/cm² (2,9m.c.a.), observada no início da rede, representando conforme já destacado, as cargas de 5,67 kgf/cm² (56,7 m.c.a.) e 5,5 kgf/cm² (55m.c.a.), resultante da simulação com os cálculos manuais com os obtidos com a simulação.

As diferenças nos valores das cargas piezométricas podem ser explicadas pelo fato do software apresentar maior precisão na representação da rede, incluindo a disposição e as características das singularidades. Entretanto, a evidenciada convergência das curvas piezométricas, ao longo da rede, valida a metodologia adotada e assegura a confiabilidade nos resultados da modelagem.



Figura 4.5.5 - Pressões disponíveis na rede - (ANEXOC)

A linha piezométrica ao longo da rede obtida no modelo incluine as respectivas cotas são apresentadas na Figura 4.5.6.



Figura 4.5.6 - Cota do terreno e perfil de pressão ao longo do trecho ETE

A altura manométrica máxima encontra-se no início da rede, imediatamente

após as bombas, apresenta magnitude de 5,78 kgf/cm². A pressão mínima ocorre no ponto de descida do emissário, no Dolfim 01, com cota geométrica de 8,75 m, pressão disponível em torno da pressão atmosférica, 0 kgf/cm² (0,0067 bar).

No final da rede, a pressão de lançamento obtida na simulação foi de 1,3 kgf/cm² (≈ 13 m.c.a). A pressão de lançamento do sistema é superior a pressão hidrostática, aproximadamente 1,0kgf/cm² (10 m.c.a) representada pela lâmina d'água acima dos emissores.

O perfil de pressão é igual ou superior à linha de cotas em todo o caminhamento do sistema, o que caracteriza boas condições de escoamento (Figura 4.5.6).

4.5.3 Simulação do transiente hidraulico

Dentro do escopo do presente estudo a análise hidrodinâmica foi desenvolvida com base no comportamento do fluxo - steady state. Já para a análise das sobrepressões máximas que eventualmente a linha está sujeita, o estudo se desenvolveu em regime transiente, utilizando o software Flowmaster-V7 para a modelagem computacional, os resultados obtidos foram comparados com os valores encontrados com a aplicação das equações algébricas.

Para a concepção do modelo de escoamento desenvolvido, adotou-se fazer a representação dos componentes da rede incluindo tubulação, bomba, conexões, emissores, as características dos materiais de sua constituição, cotas dos trechos terrestres e submarinos. Buscou-se representar com exatidão os componentes instalados da rede, contemplando casos críticos de perdas de cargas em pontos localizados.

O desenho da rede é um esquema topológico, portanto, obedeceu à seqüência e às distâncias de cada componente em relação ao ponto inicial com suas respectivas cotas discretizadas nos nós, sem a preocupação de se manter a escala e o caminhamento real.

O ensaio foi concebido em dois formatos: O primeiro admitiu-se uma parada de bomba repentina, localizada a montante da rede. No segundo momento, um fechamento brusco da válvula de retenção localizada a jusante da rede, mantendo a bomba ligada antes, durante, e depois do fechamento da válvula.

Complementam a concepção do modelo os dados referentes às curvas de bomba utilizada.

A curva do sistema, curva ascendente, foi desenvolvida utilizando a fórmula de Hazen-Williams em regime permanente. A altura manométrica correspondente à vazão nula é de 0,20kgf/cm² (2 m.c.a.), corresponde a expressão resultante da cota do reservatório de lançamento, menos a cota do reservatório de captação, mais a diferença entre a cota do ponto mais elevado da rede e a cota de lançamento (Figura 4.5.7).

O ponto de operação de um sistema hidráulico pressurizado é o resultado do equilíbrio entre as condições hidrodinâmicas da rede e as do conjunto motobomba. Ou seja, é representado pelo ponto comum entre a curva piezométrica da rede e a curva piezométrica da bomba, significando a respectiva relação "pressão x vazão" (Figura 4.5.7).

A simulação com o Flowmaster (Flowmaster-V7) em regime permanente indicou uma pressão de 5,78 kgf/cm² no início da rede com vazão de 342 m³/h para o trecho entre a estação de bombeamento e o ponto de lançamento (Figura 4.5.7).

O ponto de trabalho encontrado situa-se nas proximidades do ponto ótimo de operação da bomba, ou seja, eficiência de 79 % correspondente a vazão de 342 m³/h e pressão de 5,78 kgf/cm², sendo o rendimento máximo da bomba de 81%.



Figura 4.5.7 - Ponto de trabalho de cada bomba

Para avaliação do risco de ocorrência de sobrepressões na rede, foi realizada a análise de transiente hidráulico, considerando parada de bomba e o fechamento rápido de registro no final da linha.

Os "inputs" ou dados de entrada considerados na modelagem em regime transiente, foram herdados da análise de escoamento em regime permanente, onde consta toda a topologia utilizada, cotas dos dutos e vazão do sistema, etc..

Para a avaliação do sistema transiente, foram definidas como condições de contorno, a parada rápida da bomba localizada a montante da rede e o fechamento rápido de uma válvula de controle localizada a jusante da rede.

Como resposta a parada de bomba localizada a montante da rede (Figura 4.5.8), foram medidos três pontos distintos ao longo da rede, a saber: linha verde – N210 Node – resposta do sistema imediatamente após a bomba; linha vermelha – N145 Node – ponto imediatamente antes da alça de dilatação da rede; linha azul – N3 Node - jusante da rede.

Observa-se que todos os três pontos medidos apresentam variações de pressão muito suave, não se configurando o transiente, mesmo após a parada rápida da bomba, provocada no tempo de simulação de 10s.

A amplitude máxima e a mínima encontrada ao longo da rede variaram entre 5,6 kgf/cm² no inicio da rede, e -1,6 kgf/cm² no final da rede (Figura 4.5.8).



Figura 4.5.8 - Parada de bomba - Pressão Máxima

A válvula localizada a jusante da rede no final da ponte de acesso (ANEXO A), foi considerada aberta nos 5s anteriores ao início do fechamento gradual. O tempo de fechamento rápido da válvula, considerado na simulação foi de 10s. Configurou-se uma sobrepressão de magnitude 30kgf/cm², já a pressão negativa máxima ficou em -1.2 kgf/cm². (Figura 4.5.8).

A resposta ao fechamento rápido da válvula localizada a jusante da rede, para três pontos distintos medidos (Figura 4.5.9), a saber: a linha mais suave (linha verde – N210 Node), corresponde a resposta do sistema imediatamente após a bomba, apresenta magnitude de pressão um pouco acima da pressão de projeto dessa rede que é de 6kgf/cm²; a linha intermediária (linha vermelha – N145 Node), corresponde a medição num ponto imediatamente antes da alça de dilatação da rede, nesta posição o transiente se faz sentir e encontra-se na ordem de 28kgf/cm², bem acima

da pressão de projeto que é de 6 kgf/cm²; a linha referente ao pico de pressão (linha azul – N3 Node) corresponde a medição feita junto a válvula de controle posicionada no final da linha, com magnitude \approx 40 kgf/cm². Observa-se que o pico de pressão de 40 kgf/cm² não apresenta consistência física, apenas gráfica devido às interações matemáticas abordadas pelo software, admitindo-se que a sobrepressão máxima do transiente, neste ponto, é de 30 kgf/cm² e que corresponde ao valor máximo do transiente para essa posição de medição.

Observa-se nos três casos que o transiente hidráulico fica bem caracterizado.



Figura 4.5.9 - Fechamento rápido de válvula - Pressão Máxima



Figura 4.5.10 - Fechamento rápido de válvula - Pressões Mínimas

A condição de parada de bomba demonstrou-se satisfatória do ponto de vista das pressões alcançadas com a interrupção do fluxo, uma vez que a linha não apresenta grande variação de pressão, demonstrando assim a baixa propensão a configurações de transientes devido à parada de bombas.

A análise transiente para fechamento rápido de válvula a jusante da rede, apresentou sobrepressão elevada, na ordem de 28 kgf/cm², acima da capacidade da linha, para a medição num ponto imediatamente antes da alça de dilatação da rede, e magnitude de aproximadamente 30 kgf/cm² para medição feita junto à válvula de controle posicionada no final da linha. Portanto, ficou configurada a necessidade de medidas de proteção contra transientes hidráulicos.

Recomenda-se a instalação de ventosas para a eventual expulsão de ar da tubulação e sistemas de partida lenta da bomba "soft start".

4.6 COMPARAÇÃO DA SOBREPRESSÃO

O resultado da sobrepressão decorrente do transiente hidráulico foi avaliado através do procedimento computacional e comparando com as diferentes equações algébricas desenvolvidas por Jouget, Michaud, Joukowsky e Allievi (Tabela 4.6):

TABELA 4.6 - RESULTADO DA VARIAÇÃO MÁXIMA DE PRESSÃO PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO

| Posultados | Sobrepressão Máxima e Mínima | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|---------|--------|-------|-------|--|
| | bar | kgf/cm2 | kgf/m2 | MPa | m.c.a | |
| Modelo Computacional (Flowmaster) | 30 | 30,6 | 305915 | 3,000 | 306 | |
| Equação de Jouget | 1,37 | 1,40 | 13970 | 0,014 | 14 | |
| Equação de Michaud | 2,74 | 2,79 | 27940 | 2,274 | 27,9 | |
| Equação de Joukowsky | 37,85 | 38,6 | 385963 | 3,785 | 386 | |
| Equação de Allievi | 1,53 | 1,56 | 15602 | 0,153 | 15,6 | |

Aplicando as equações de Jouget e Michaud ao estudo de caso do transiente hidráulico, foram obtidos os resultados de 1,40 kgf/cm² para o método de Jouget, e para o método de Michaud, 2,79 kgf/cm² (Tabela 4.7).

TABELA 4.7 - CÁLCULO DO TRANSIENTE HIDRÁULICO PELO MÉTODO DE JOUGET E MICHAUD

| Descrição das Variávois | Dados de Entrada | | | |
|---|------------------|-----------|--------------------|--|
| | Variáveis | Valores | Unidade | |
| Peso específico do fluido | γ | 1000 | kgf/m ³ | |
| Comprimento da tubulação | L | 469,5 | m | |
| Variação da velocidade desde o início até o fechamento total da válvula | ΔV | 2,91 | m/s | |
| Aceleração da gravidade | g | 9,8 | m/s ² | |
| Tempo de fechamento da válvula | Т | 10 | S | |
| | | Resultado | | |
| Golpe de ariete - louget | Pa | 13941 | kgf/m ² | |
| Golpe de anere - bouger | ' ' y | 13,9 | m.c.a | |
| Golpo do arioto Michaud | Pa | 27883 | kgf/m ² | |
| Golpe de allete - Michadd | ry | 27,9 | m.c.a | |

O cálculo do transiente hidráulico, aplicando a equação de Joukowsky, obteve-se como resultado da sobrepressão 38,6 kgf/cm² (Tabela 4.8).

TABELA 4.8 - CÁLCULO DO TRANSIENTE HIDRÁULICO PELO MÉTODO DE JOUKOWSTY

| Doscrição das Variávois | Dados de Entrada | | | |
|-------------------------|------------------|-----------|---------------------|--|
| Descrição das variaveis | Variáveis | Valores | Unidade | |
| Velocidade do Fluxo | V | 2,91 | m/s | |
| Aceleração da Gravidade | g | 9,81 | m/s ² | |
| | | Resultado | | |
| Magnitude do Transiente | ΔH | 38,6 | kgf/cm ² | |

A magnitude máxima resultante da pressão pode ser dada pela equação de Joukowky (Equação 3.2.7.), que leva em consideração a elasticidade do conduto e a compressibilidade do fluido.

Para eventos lentos que ocorram na ordem de 2 a 3 períodos do duto, a redução da pressão é desprezível e o duto pode ser considerado como elástico. Para eventos maiores que 10 vezes o período da linha, é conveniente que se assuma o conduto como rígido e, as equações de Jouget e Michaud são mais apropriadas para o cálculo da pressão máxima.

5 CONCLUSÃO

5.1 EXPANSÃO MÁXIMA DA LINHA

A expansão máxima da linha, devido às variações dos parâmetros relacionados aos aspectos operacionais e ambientais, apresentou o valor total de 0,03m, correspondente a soma da expansão dos trechos de montante 0,014m e jusante 0,016m.

A expansão total de 0,03m teve como variável significativa, o carregamento de pressão, obtido na análise de transiente hidráulico, devido a interrupção rápida do escoamento no final da rede.

Na análise de flexibilidade, foi imposta a expansão total de 0,03m, apenas em um dos lados da alça de dilatação, promovendo assim, a deformação inicial na alça.

Nesta análise, além da deformação devido à expansão inicial imposta, que no presente trabalho é de 0,03m, é feita a combinação de todos os carregamentos segundo a norma API RP 2A-WSD, e como resultado obteve-se deslocamento máximo em um dos suportes de 0,49m, com *unit checks* (U.C.) mais crítico dentre todas as combinações de 0.7.

No entanto, o deslocamento de 0,49, se mostrou insuficiente para justificar qualquer dos danos observados em campo nos suportes da tubulação sobre o Píer, uma vez que o U.C. não se igualou nem superou a unidade.

Portanto, com base nas hipóteses apresentadas, conclui-se que as deformações nas estruturas não foram causadas pela expansão da linha, mesmo quando analisada sob as condições mais severas de carregamento. Sendo assim, buscou-se analisar a influencia da interrupção do fluxo devido à presença de ar.

5.2 INTERRUPÇÃO DO FLUXO DEVIDO A PRESENÇA DE AR

O processo de interrupção do escoamento em função do acumulo de ar junto à geratriz superior do duto apresentou-se como a causa da ocorrência do transiente hidráulico, considerando-se a ausência de cotas elevadas a jusante da casa de bombas, inexistência de válvulas on-off na rede, e bocal de sucção no recalque, passivo de estar trabalhando sob efeito de vórtice, introduzindo assim ar na tubulação.

Ficou evidenciado que os suportes da linha estão corretamente dimensionados para expansão máxima sofrida pela linha, obtendo-se como resultado da capacidade de absorção da expansão pela alça, resultado satisfatório.

Considerando-se que a magnitude da sobrepressão promovida pelo transiente hidráulico pode ser absorvida pela alça de dilatação, conclui-se que o efeito cíclico do transiente seja o fator responsável pelos danos causados nos suportes da tubulação.

5.3 FECHAMENTO RÁPIDO DA VÁLVULA

A análise do fechamento rápido de válvula para representar a interrupção do fluxo pela bolsa de ar mostrou-se adequada, tendo em vista que os parâmetros básicos para o cálculo do transiente são representados pela quantidade de movimento adquirido pela massa fluida, no momento da interrupção.

5.4 RESULTADO DO TRANSIENTE HIDRÁULICO

O valor do transiente hidráulico obtido pela equação de Joukowsky 38,6 kgf/cm², situou-se próximo ao obtido pela simulação computacional 30,6 kgf/cm². Este resultado mostrou-se consistente considerando-se que tanto o modelo computacional quanto a referida fórmula baseiam-se na quantidade de movimento e na equação da continuidade.

5.5 SOLUÇÃO ADOTADA

A solução adotada no estudo de caso, foi a instalação de ventosas e adoção de sistema de partida lenta da bomba, que se mostra suficiente para resolver o

problema, uma vez que elimina todo o ar que por ventura pode ter sido admitido no recalque da bomba e pode vir a ficar estacionado no interior da tubulação, ocasionando o estrangulamento da passagem e ocasionando sobrepressões danosas devido ao transiente hidráulico.

O procedimento tradicional para evitar a formação de vórtices, consiste em se considerar uma submergência mínima do bocal de sucção. Entretanto, há uma grande divergência entre os diversos autores com relação aos valores a serem adotados, pois apesar de várias pesquisas a respeito de vórtices, ainda não é um assunto completamente esclarecido, dada a natureza complexa do fenômeno. Com as soluções adotadas, qualquer ar admitido será posteriormente eliminado, sem maiores transtornos para a rede.

5.6 OBERVAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Os softwares disponíveis para a modelagem hidráulica apresentam custos elevados e nem sempre são acessíveis para a utilização com fins acadêmicos. Foi utilizado o software Flowmaster que mantém uma parceria com a Universidade Federal Fluminense, para o desenvolvimento de pesquisas com fins acadêmicos na área de escoamento.

No Rio de Janeiro existe um núcleo de Simulação Termo-Hidráulica de Dutos do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) formado em 2002 com a parceria da TRANSPETRO – SIMDUT é um laboratório com o objetivo de atuar nas atividades voltadas para o desenvolvimento de programas de simulação na área de escoamento de líquidos e gás em dutos através da aplicação e do desenvolvimento de softwares.

Para se fazer um estudo detalhado das causas e dos efeitos de transientes hidráulicos, recomenda-se o trabalho de simulação computacional integrado com o desenvolvimento de modelos reduzidos através de parceria com o referido laboratório.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALLIEVI, Lorenzo. *General Theory of the Variable Flow of Water in Pressure Conduits*. (English translation by Halmos EE 1925). 1902, 119p.

ANDRÉS, Lázaro López. *Manual de Hidráulica*. Universidad de Alicante: San Vicente Del Raspeig, 2004, 414p.

API RP-1111 – Design, construction, operation, and Maintenance of offshore hydrocarbon pipelines (Limit State Design), 3th Edition, Jul 1999;

API RP2A-WSD – Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing of Fixed Offshore Platforms, December 2000;

BERGANT, Anton, IL KIM, Young, TIJSSELING, S. Arris, LAMBERT F. Martin, SIMPSON R. Angus, *Analysis of Beat Phenomena During Transients in Pipelines With a Trapped Air Pocket*, 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. Brno, Czech Republic, October 14-16, 2009, 10p.

CHAUDHRY, M. H. Apllied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold Company, New York. 1979.

FORTIS, R. de Mattos, Modelagem Computacional da Dispersão de Pluma do Efluente dos Emissário Submarinos do TEBAR - PETROBRÁS, São Paulo; Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2005, 181p.

GALGOUL, N. Szilard, MASSA, A. L. Lupinacci, CLARO, C. Albergaria. *A Discussion on How Internal Pressure is Treated in Offshore Pipeline Design*. IPC04-0337. Calgary, Alberta, Canada. October 4-8, 2004.

GHIDAOUI, Mohamed S. ZHAO, Ming. MCLNNIS, Duncan A. AXWORTHY, David H. *A Review of Water Hammer Theory and Practice*. Separata de: *Applied Mechanics Reviews:* HJS Fernando. ASME. 2005, p. 49-76. v. 58, HKUST6179/02E.

GONÇALVES, Fernando Botafogo. SOUZA, Amarilio Pereira. *Disposição de Esgotos Sanitários história teórica e prática*. Rio de Janeiro: ABES,1997, 348p.

GUERRA, R. Consigliero, Estudo do lodo gerado em reator biológico, pelo tratamento da água de produção do petróleo, no terminal marítimo Almirante Barroso, município de São Sebastião SP,visando sua disposição final. Monografia (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, 2009.

KIRSNER, Wayne. *Steam Condensation Induced Waterhammer*. Proceedings from the Twenty-second National Industrial Energy Technology Conference, Houston, TX, Aplril 5-6 2000.

LIMA, Silvio; S. Santos; HAMPSHIRE, Sergio C. *Análise Dinâmica das Estruturas*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2008, 171p.

MELIANDE, Patricia. CARVALHO, Asthar. Luana. Barcelos. NASCIMENTO, Elson. Antônio. LACERDA, Rogério. Fernandes. *Waterhammer evaluation for LPG and oil pipelines*. IMECE2010 Proceedings of the Asme 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Canadar. 2010, 10p.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, Nelson. *Engenharia de ventilação industrial*. SÃO PAULO: CETESB, 1988, 442p.

MILLER, Donald Stuart. Internal flow system. Flowmaster. BHR Group Ltda. UK. 1996.

NETTO, J. M. de Azevedo. Manual de Hidráulica. Editora Edgard Blücher Ltda, 1966.

PIMENTA, Carlito Flavio. *Curso de Hidráulica Geral*, Editora Guanabara Dois, 4.ed, Rio de Janeiro. 1981.

SACS. Structural Analysis Computer System, 5.2 SP3 - 2006.

SILVESTRE, Paschoal. Golpe de Aríete (método gráfico). Belo Horizonte: UFMG, 1989, 144p.

SILVESTRE, Paschoal. *Hidráulica Geral*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científico, 1979, 316p.

SOUZA, Edson Victor. *Uma contribuição para o Pré-dimensionamento de Reservatórios Hidropneumáticos para Atenuação de Transitórios Hidráulicos*. Campinas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2008, 128p.

TELLES, Pedro C. Silva. Tubulações Industriais: Cálculo 9ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1999, 163p.

TSUTIYA, Milton. *Reservatório de Distribuição de Água: Principais Aspectos Hidráulicos Relacionados com a Saída de Água.* ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçú, set. 1997, 12p.

WYLIE, E. B. Streeter, V. L. Fluid Transients: Fluid dynamics, Transients acci (Dynamics). United States of America: McGraw-Hill, 1978.

7 ANEXOS

- ANEXO A Pressão disponível, Curva do sistema, Curva normalizada do sistema
- ANEXO B Curva característica da bomba e dados operacionais da bomba
- ANEXO C Planilha de calibração
- ANEXO D Planilhas para cálculo da expansão (Pressão Transiente)
- ANEXO E Planilha para cálculo de expansão (Pressão de Projeto)
- ANEXO F Deslocamento dos suportes de sustentação do emissário
- ANEXO G Saída do Sacs (Pressão de Transiente)
- ANEXO H Saída do Sacs (Pressão de Projeto)
- ANEXO I Flowmaster
- ANEXO J Energia disponível na entrada da bomba
- ANEXO K Variação da celeridade com a rugosidade da parede da tubulação.
- ANEXO L Fluxograma das formulações das equações do escoamento permanente e transiente

| Pressões em todo a rede hidráulica ETE - Dolfim- 01 | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------------|--|--|--|--|
| Nós | Carga Piezométrica [mca] | Presão Dispónível [mca] | Cota [m] | Caracterização | | | | |
| 1 | 6,749756401 | 0 | 6,75 | | | | | |
| 2 | 64,60198237 | 57,852226 | 6,75 | | | | | |
| 3 | 63,94223854 | 57,1924821 | 6,75 | | | | | |
| 4 | 63,82153933 | 57,0717829 | 6,75 | | | | | |
| 5 | 63,77431559 | 57,0245592 | 6,75 | | | | | |
| 6 | 63,5171738 | 56,7674174 | 6,75 | 1 | | | | |
| 7 | 63,46995006 | 56,7201937 | 6,75 | 1 | | | | |
| 8 | 63,40697656 | 56,6572202 | 6,75 | 1 | | | | |
| 9 | 63,37548981 | 56,6257334 | 6,75 | - | | | | |
| 10 | 63,32826607 | 56,5785097 | 6,75 | 4 | | | | |
| 14 | 63,13934557 | 56,3895892 | 6,75 | 4 | | | | |
| 15 | 62,47960173 | 55,7298453 | 6,75 | | | | | |
| 16 | 62,1227519 | 55,3729955 | 6,75 | Estação de Bombeamento | | | | |
| 17 | 62,07552816 | 55,3257718 | 6,75 | 4 | | | | |
| 18 | 61,96007674 | 55,2103203 | 6,75 | 4 | | | | |
| 19 | 61,91285301 | 55,1630966 | 6,75 | 4 | | | | |
| 20 | 60,47495808 | 53,7252017 | 6,75 | 4 | | | | |
| 21 | 60,42773434 | 53,6779779 | 6,75 | 4 | | | | |
| 22 | 60,2650528 | 53,5152964 | 6,75 | 4 | | | | |
| 23 | 60,21782906 | 53,4680727 | 0,75 | + | | | | |
| 24 | 50,5776357 | 43,8278793 | 6,75 6,75 | + | | | | |
| 20 | 50,30302907 | 43,0100733 | 0,75 | 4 | | | | |
| 20 | 50,42413949 | 43,0743031 | 6.75 | + | | | | |
| 27 | 18 66/81001 | 43,0023773 | 6.75 | 4 | | | | |
| 20 | 48,65301318 | 41,9130020 | 6 75 | | | | | |
| 30 | 48.07575609 | 41,3259997 | 6 75 | 4 | | | | |
| 31 | 48.06395025 | 41 3141939 | 6 75 | + | | | | |
| 32 | 47,98523338 | 41,235477 | 6,75 | 1 | | | | |
| 33 | 47,97342754 | 41,2236711 | 6.75 | 1 | | | | |
| 34 | 38.88425231 | 32.1344959 | 6.75 | 1 | | | | |
| 35 | 38.87244647 | 32,1226901 | 6.75 | 1 | | | | |
| 36 | 38,76749064 | 32,0177342 | 6,75 | 1 | | | | |
| 37 | 38,7202669 | 31,9705105 | 6,75 | 1 | | | | |
| 38 | 38,19548773 | 29,448762 | 8,75 | 1 | | | | |
| 39 | 38,14587962 | 29,3991539 | 8,75 | 1 | | | | |
| 40 | 38,0874679 | 29,3407422 | 8,75 |] | | | | |
| 41 | 38,04024417 | 29,2935184 | 8,75 | Transição do duto de 8 pol | | | | |
| 42 | 38,01546337 | 29,2687376 | 8,75 | | | | | |
| 43 | 37,96823963 | 29,2215139 | 8,75 | para o de 10 pol | | | | |
| 44 | 26,63990589 | 17,8931801 | 8,75 | | | | | |
| 45 | 26,62810005 | 17,8813743 | 8,75 | | | | | |
| 46 | 26,56083789 | 17,8141121 | 8,75 | | | | | |
| 47 | 26,54903206 | 17,8023063 | 8,75 | 1 | | | | |
| 48 | 25,49947372 | 16,752748 | 8,75 | 4 | | | | |
| 49 | 25,45224998 | 16,7055242 | 8,75 | 4 | | | | |
| 50 | 25,23984316 | 16,4931174 | 8,75 | 4 | | | | |
| 51 | 25,19261943 | 16,4458937 | 8,75 | 4 | | | | |
| 52 | 24,83860807 | 16,0918823 | 8,75 | 4 | | | | |
| 53 | 24,82680223 | 16,0800765 | 8,75 | 4 | | | | |
| 54 | 24,75954007 | 16,0128143 | 8,75 | 4 | | | | |
| 55 | 24,74773423 | 16.0010085 | 8,75 | | | | | |

ANEXO A – Pressão Disponível, Curva do Sistema, Curva Normalizada do Sistema

| | 8.75 | 10.1421205 | 18.88884622 | 56 |
|---------------------|-------|------------|-------------|-----|
| | 8,75 | 10,0948967 | 18,84162248 | 57 |
| | 8,75 | 9,87186957 | 18,61859532 | 58 |
| | 8,75 | 9,82464583 | 18,57137158 | 59 |
| | 8,75 | 9,44585368 | 18,19257943 | 60 |
| Domto do Acoco | 8,75 | 9,39862994 | 18,14535569 | 61 |
| Ponte de Acesso | 8,75 | 8,95257563 | 17,69930138 | 62 |
| | 8,75 | 8,90535189 | 17,65207764 | 63 |
| | 8,75 | 3,24117012 | 11,98789587 | 64 |
| | 8,75 | 3,22936428 | 11,97609003 | 65 |
| | 8,75 | 2,62754497 | 11,37427072 | 66 |
| | 8,75 | 2,61573913 | 11,36246488 | 67 |
| | 8,75 | 1,7731921 | 10,51991785 | 68 |
| | 8,75 | 1,76138626 | 10,50811201 | 69 |
| | 8,75 | 0,41260298 | 9,159328726 | 70 |
| | 8,75 | 0,27716596 | 9,023891705 | 72 |
| | 8,75 | 0,22885959 | 8,975585338 | 73 |
| | 3,29 | 4,81673556 | 8,111734989 | 74 |
| | 3,29 | 4,81090927 | 8,105908701 | 75 |
| | 3,29 | 4,33784713 | 7,632846552 | 76 |
| Ponto de Bifurcação | 3,29 | 4,33202084 | 7,627020263 | 77 |
| | -7,79 | 13,3172729 | 5,529092471 | 78 |
| | -7,79 | 13,3157113 | 5,527530869 | 79 |
| | -7,79 | 13,1717359 | 5,383555432 | 80 |
| | -7,79 | 13,0132376 | 5,225057167 | 82 |
| | 8,75 | 0,41736941 | 9,164095165 | 71 |
| | 8,75 | 0,18636623 | 8,933091981 | 83 |
| | 8,75 | 0,18419314 | 8,930918893 | 84 |
| | 8,75 | 0,11544149 | 8,862167243 | 85 |
| | 8,75 | 0,06931006 | 8,816035805 | 86 |
| | 3,29 | 4,69325961 | 7,988259035 | 87 |
| | 3,29 | 4,68767322 | 7,982672642 | 88 |
| | 3,29 | 4,23436689 | 7,529366315 | 89 |
| | 3,29 | 4,22878049 | 7,523779921 | 90 |
| | -7,79 | 13,3016454 | 5,513464908 | 91 |
| | -7,79 | 13,300144 | 5,511963492 | 92 |
| | -7,79 | 13,1621812 | 5,374000697 | 93 |
| | -7,79 | 13,1565948 | 5,368414303 | 94 |
| | -7,79 | 13,0107966 | 5,222616178 | 95 |
| | 8,75 | 0,11984758 | 8,866573326 | 96 |
| Dolfim 01 | 8,75 | 0,1141997 | 8,860925447 | 97 |
| | 8,75 | 0,06751171 | 8,814237457 | 98 |
| | 3,29 | 4,68221595 | 7,977215378 | 99 |
| | 3,29 | 4,67656807 | 7,971567498 | 100 |
| | 3,29 | 4,21819884 | 7,513198264 | 101 |
| | 3,29 | 4,21255096 | 7,507550385 | 102 |
| | -7,79 | 13,2629629 | 5,474782477 | 103 |
| | -7,79 | 13,2614461 | 5,473265608 | 104 |
| | -7,79 | 13,1219424 | 5,333761928 | 105 |
| | -7,79 | 13,1162945 | 5,328114049 | 106 |
| | -7,79 | 12,9687374 | 5,180556947 | 107 |
| | -7,82 | 12,9847416 | 5,166606579 | 209 |

CONSTRUÇÃO DA CURVA DO SISTEMA

| Vazão [m³/h] | Cota [m] | Perda de Carga [m.c.a.] | Vazão [m³/h] | Cota [m] | Perda de Carga [m.c.a.] | | Vazão [m³/h] |
|-----------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|--|---------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | | 0 |
| 100 | 0 | 2,566402 | 100 | 2 | 4,896577 | | 100 |
| 200 | 0 | 9,264718 | 200 | 2 | 12,45665 | | 200 |
| 300 | 0 | 19,63149 | 300 | 2 | 24,15714 | | 300 |
| 400 | 0 | 33,44566 | 400 | 2 | 39,74854 | | 400 |
| 500 | 0 | 50,56117 | 500 | 2 | 59,06601 | | 500 |
| 600 | 0 | 70,86973 | 600 | 2 | 81,98732 | | 600 |
| 700 | 0 | 94,28578 | 700 | 2 | 108,4159 | | 700 |
| 800 | 0 | 120,7389 | 800 | 2 | 138,2723 | | 800 |
| 900 | 0 | 150,1695 | 900 | 2 | 171,4893 | | 900 |
| 1000 | 0 | 182,526 | 1000 | 2 | 208,0085 | | 1000 |
| 1100 | 0 | 217,7629 | 1100 | 2 | 247,7787 | | 1100 |
| 1200 | 0 | 255,8399 | 1200 | 2 | 290,7545 | | 1200 |
| 364,5 | 0 | 28,15713 | 364,5 | 2 | 33,77963 | | 1201 |
| Tre | echo de 8 | pol | Tre | Trecho de 10 pol | | | Per |
| 364,5 Tro | 0 echo de 8 0.032429 | 23,339 28,15713 pol | 364,5 Tro | 2 echo de 10 | 33,77963 pol | | 1200 1201 Per |
| V = | 2.98084 | 5 m/s | V = | 1.90774 | 1 m/s | | |
| D - | 0 202 | 2 m | - · | 0.25 | 1 m | | |

| Curva Norm | nalizada_B | omba ETE | - DOLFIM01 | |
|------------|------------|----------|-------------------|------------------|
| Vazão | Head | | Vazão Normalizada | Head Normalizado |
| [m³/h] | [m] | | [m³/h] | [m] |
| 190 | 72 | | 0,558823529 | 1,196013289 |
| 220 | 70,75 | | 0,647058824 | 1,175249169 |
| 260 | 67,9 | | 0,764705882 | 1,127906977 |
| 280 | 66,5 | | 0,823529412 | 1,104651163 |
| 300 | 64,8 | | 0,882352941 | 1,07641196 |
| 320 | 62,5 | | 0,941176471 | 1,03820598 |
| 340 | 60,2 | | 1 | 1 |
| 400 | 52,5 | | 1,176470588 | 0,872093023 |
| 460 | 42,2 | | 1,352941176 | 0,700996678 |
| 500 | 34,2 | | 1,470588235 | 0,568106312 |

CONSTRUÇÃO DA CURVA NPSH_d

| Construg | Construção da Curva de NPSH _d | | | | | | | |
|----------------------|--|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|--|--|--|--|
| К = | 0,5 | Valor adot | ado para o | tipo de orifi | cio de saída do reservatório | | | |
| | Vazão | NPSH _d Estático | NPSH _d Total | NPSH _r Total | $NPSH_{DVED} = \frac{P_S}{P_S} + \left(\frac{P_{ATM} - P_{VAPOR}}{P_{VAPOR}}\right) + Z_S - h_S$ | | | |
| | [m²/n] | [m.c.a.] | [m.c.a.] | [m.c.a.] | γ | | | |
| | 240 | 9,12 | 9,01 | 5,75 | | | | |
| | 260 | 9,12 | 8,99 | 5,85 | ν^2 | | | |
| | 280 | 9,12 | 8,97 | 6,00 | $h_{fs} = K \frac{v}{2}$ | | | |
| | 300 | 9,12 | 8,95 | 6,15 | 2 g | | | |
| | 320 | 9,12 | 8,93 | 6,25 | | | | |
| | 340 | 9,12 | 8,90 | 6,50 | | | | |
| | 360 | 9,12 | 8,88 | 6,75 | | | | |
| | 380 | 9,12 | 8,85 | 7,00 | | | | |
| | 400 | 9,12 | 8,82 | 7,30 | | | | |
| | 420 | 9,12 | 8,79 | 7,70 | | | | |
| | 440 | 9,12 | 8,76 | 8,10 | | | | |
| | 460 | 9,12 | 8,72 | 8,60 | | | | |
| | 480 | 9,12 | 8,69 | 9,20 | | | | |
| | 500 | 9,12 | 8,65 | 9,90 | | | | |
| D. | | 1 | | | | | | |
| P _{atm} = | 10,3323 | m | | Q _{MÁX} ae u | peração = 462 [m²/n] | | | |
| P _{vapor} = | 0,213325 | m | | Correspor | idendo a um NPSH disponível de 1,9 m | | | |
| Z _s = | -1 | m | | | | | | |
ANEXO B – Curva Característica da Bomba e Dados Operacionais da bomba

| F | OLHA D | E DAD | OS - E | BOMBA VE | RTICAL | K | SB 6. |
|---|------------------------|----------------------|--------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------|
| CLIENTE TRANSPETR | O - TERMIN | AL DE ÃO | SEBAS | STIÃO | | | |
| REFERÊNCIA E-MAIL DIA 2 | 4.04.06 | | | | | | |
| ITEM 1 | | | | TAG | MB-4250.0 | 1-002 C | |
| QTDE 1 | | | | PROPOSTA | N° 604CE031 | 03 | |
| Μ | ODELO D | A BOM | ва: в | | 12 D / | 4 | |
| 1- Dados Operacionais | <u>:</u> | | | | | | |
| Líquido Bombeado | ÁGUA S | ALGADA | | | | | |
| Sólidos em Suspensão | 156.000 | ppm | | NPSH Dispor | nível | 9,93 | m |
| Temperatura | AMB | °C | | Rotação Nom | ninal | 1740 | rpm |
| Densidade | 1,1 | kgf/d | lm3 | Rendimento 8 | Bombeador | 76,5 | % |
| Viscosidade | 1,0 | Cst | | Pot. Absorvid | a no Bombeador | 109,0 | HP |
| Vazão Nominal | 340 | m3/h | า | Pot. Dissip. N | lancais/Gaxetas | 1,3 | HP |
| Altura Manômétrica Nominal | 58,7 | m | | Potência Abs | orvida Total | 110,3 | HP |
| Perda de Carga, Coluna, Cri | vo 1,300 | m | | Motor Recom | endado | 125 | CV |
| NPSH Requerido | 60,2 7,0 | m m | | Submergênci | r a Mínima | 88 1876 | m mm |
| 2- Dados Construtivos: | | | | | | | |
| Diam rotor projeto | 227/19/ | mm I | Número | de Estágios | 1 | | |
| Bocal de Succão | 200mm | 1 | Norma/C | classe/Posicão | | VE | RTICAL |
| Bocal de Descarga | 200mm | 1 | Norma/C | lasse/Posição | ANSI B16.5 150 | #RF H0 | |
| Diâmetro Tubos Coluna | 200 | mm (| Comprin | nento do Bombe | ador 1320 | m | m |
| No Mancais Coluna | 3 | (| Comprin | nento Tubo Supe | erior 1200 | m | m |
| Comprimento Crivo Sucção | 350 | mm (| Comprin | nento Total da H | aste 7370 | m | m |
| Peso Total da Bomba | | Kg (| GD² da E | Bomba (c/água) | 0,75 | Kg | gfm² |
| Comprimento Tubos Coluna | 1500 | mm | | | | | |
| 3- Características Con | strutivas: | | | | | | |
| Tipo de Bomba Tur | bina | | | | | | |
| Acionamento Mot | or elétrico v | vertical co | om eixo | sólido | | | |
| Rotor Tipo | Fechado | 1.10 | Fluxo | Radial | | | |
| Mancais Coluna - Tipo Desila Mancais Escora - Tipo Polar | antes L | Lubrificaçã | Oleo | Lubrificante | Câmara de | Dofrigora | cão Sam |
| Fixos | n luvas rose | uuniicaça nueadas | Graxa | I | Tubo Prote | e Reingera stor | çao sem |
| Bocal de Descarga Aci | ma da placa | a hase | | | 100011016 | .01 | |
| Vedação do Eixo Gax | eta de Anel | l de Feltro | , | | | | |
| Conexões Auxiliares Águ | a: Não | Dreno: Sir | n Lu | ubrificação: Não | Manômetro: | Sim | |
| Sentido Rotação AN | FI-HORÁRIC | 0 | | - | | | |
| Materiais Cor Rote | po A995CD or A890CD |)4MCuN)4MCu | Eixo Luva | DIN 1.4462 DIN 1.4462 | Anel Desg Cor Anel Desg Rot | po DIN 1 or | .4462 |
| 4. Acessórios: | | | | | | | |
| Placa de Anoio | Dee | conhoc | | | | | |
| Pintura Especial | Des | tetor do or | conlamo | nto - Latão | | | |
| Crivo de Succão | F10 | netor do al | copianie | nio - Latao | | | |
| Jogo de Desenhos | | | | | | | |
| Lanterna de Acionamento | | | | | | | |
| Luva Elástica - Powerflex ou | Flexibox | | | | | | |
| Motor Elétrico - WEG | | | | | | | |
| Testes | | | | | | | |



Curva Característica da Bomba: HEAD, POTÊNCIA E NPSH X VAZÃO

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES – DOLFIM 01

| ados de | entrada: | Diâmetro externo |) (1º Trecho) [D ₁] = | : | 8 | pol | | |
|---------|----------|------------------|-----------------------------------|-------------|------------|-------------------|-------------------|------------|
| | | Esnessura de na | rede [t] – | | 0 | nol | | |
| | | Diâmetro do cont | finodo [d] = | | Ő | m | | |
| | | Vazão adotada (| | | 348 | m ³ /h | | |
| | | Castisianta da U | | | 110 | | | |
| | | | | = | 110 | | | |
| | | Diametro externo | | | 10 | рог | | |
| | | | | | | Perda | | |
| | | Comprimento | Comprimento | Área | Velocidade | Distribuída | Perda | Perda |
| | (ID) | unitário | acumulado | A | v | unitária | Distribuída no | Acumulada |
| | () | L | [m] | [m²] | [m/s] | i | trecho hft | no trecho |
| | | [m] | | | | [m/m] | [m.c.a] | [m.c.a] |
| | 1 | 2,3 | 2,3 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,12659648 | 0,12659648 |
| | 2 | 4,9 | 7,2 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,269705545 | 0,39630202 |
| | 9 | 1,2 | 8,4 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,066050338 | 0,46235236 |
| | 3 | 0,6 | 9 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,033025169 | 0,49537753 |
| as | 6 | 3,6 | 12,6 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,198151013 | 0,69352854 |
| ad | 7 | 6,8 | 19,4 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,374285246 | 1,06781379 |
| leg | 10 | 2,2 | 21,6 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,121092286 | 1,18890607 |
| ро | 11 | 27,4 | 49 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 1,508149375 | 2,69705545 |
| 8 | 13 | 3,1 | 52,1 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,170630039 | 2,86768549 |
| de | 14 | 183,7 | 235,8 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 10,11120585 | 12,9788913 |
| ho | 16 | 2,7 | 238,5 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,14861326 | 13,1275046 |
| ec | 18 | 33,3 | 271,8 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 1,832896868 | 14,9604014 |
| Ē | 20 | 11 | 282,8 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,605461428 | 15,5658628 |
| | 22 | 1,5 | 284,3 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,082562922 | 15,6484258 |
| | 24 | 173,2 | 457,5 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 9,533265393 | 25,1816912 |
| | 24 | 2 | 459,5 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,110083896 | 25,2917751 |
| | 24 | 10 | 469,5 | 0,032429279 | 2,98084542 | 0,0550419 | 0,55041948 | 25,8421945 |
| | 24 | 3,3 | 3,3 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,061216477 | 0,06121647 |
| | 24 | 1,4 | 4,7 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,025970627 | 0,08718710 |
| | 24 | 640 | 644,7 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 11,87228644 | 11,9594735 |
| SE | 24 | 3,8 | 648,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,070491701 | 12,0299652 |
| ada | 24 | 20 | 668,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,371008951 | 12,4009742 |
| eg | 24 | 12 | 680,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,222605371 | 12,6235795 |
| loc | 24 | 20 | 700,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,371008951 | 12,9945885 |
| 0 | 24 | 3,8 | 704,3 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,070491701 | 13,0650802 |
| e 1 | 24 | 331 | 1035,3 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 6,140198144 | 19,2052783 |
| po | 24 | 12,6 | 1047,9 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,233735639 | 19,439014 |
| che | 24 | 21,4 | 1069,3 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,396979578 | 19,8359935 |
| rei | 24 | 25,2 | 1094,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,467471279 | 20,3034648 |
| F | 24 | 320 | 1414,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 5,936143221 | 26,2396080 |
| | 24 | 34 | 1448,5 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,630715217 | 26,870323 |
| | 24 | 47,6 | 1496,1 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 0,883001304 | 27,753324 |
| | 24 | 76.2 | 1572,3 | 0,050670748 | 1,90774107 | 0,0185504 | 1,413544104 | 29,1668687 |

Perda de Carga 55,00906329 m



Fórmulas utilizadas e desenho esquemático das seções dos tubos.

ANEXO D – Planilhas para Cálculo da Expansão (Pressão Transiente)

TRECHO DE MONTANTE A ALÇA DE EXPANSÃO DA LINHA

| GENERAL DATA INPUT | | | | | | | EXPANSION A | NALYSIS RESULTS | |
|--|---|-----------------------|---|--|------------------------|---------|----------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Line: | TEBAR - D | UTO 10pol | | | | | | | |
| | Pij | peline and C | oatir | ng Material Data | | | Pipeline G | eneral Results | |
| API 5L Gr = | Cold End | Hot End | | API Material Type | ID = | 254,46 | Hot End 254,46 mm | Internal Pipeline D | Diameter |
| OD= | 2/3 | 2/3 ff 9 27 m | m | Pipeline Outside Diameter | A = | 273.00 | 76,80 Cm | Total External Pip | e Diameter (with coate) |
| Coat1 = | 0,27 | 0 m | m | Corrosion Coating | Weaute = | 0 591 | 0.591 kN/m | Pipeline Submerg | ed Weight (Empty) |
| Coat2 = | 0 | 0 m | m | Concrete Coating | W four = | 1 090 | 1.090 kN/m | Pipeline Submerg | ed Weight (Eilled) |
| Coat3 = | 0 | 0 m | m | Other Coatings | Po= | 0.10 | 0.10 MPa | External Pressure | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |
| WD = | 0 | 0 m | | Water Depth | G | •,•• | -, | | |
| L = | | 458 m | | Total Pipe Length | | | Soil Prin | cipal Results | |
| E = | | 207000 N | Pa | Elasticity Modulus of Steel | CM = | Exposed | Exposed | Cover Material | |
| fy = | | 241 N | Pa | Yeld Strength | R _{Paxial} = | 0,11 | 0,11 kN/m | Axial Soil Pipe Re | sistance |
| v = | | 0,3 | | Poisson's Coefficient | R _{PTaxial} = | 25,0 | 25,0 kN | Total Soil Pipe Re | sistance at Anchor Point |
| α = | | 1,16E-05 1 | °⁰C | Thermal Expansion Coefficient | | · 1 | | | |
| $\rho_{steel} =$ | | 7850 k | g/m³ | Mass Density opf Steel | | | <u>Fina</u> | Results | |
| $\rho_{coat1} =$ | | 0 k | g/m³ | Mass Density of Corrosion Coating | F _{cap} = | 192,0 | 192,0 kN | Force at End Cap |) |
| $\rho_{coat2} =$ | | 0 k | g/m³ | Mass Density of Concrete Coating | F _{Poisson} = | -124,2 | -124,2 kN | Force due to Pois | son's Effect |
| $\rho_{coat3} =$ | | 0 k | g/m³ | Mass Density of Other Coatings | F _{temp} = | 55,3 | 55,3 kN | Force due to Tem | perature |
| $\rho_{sea} =$ | | 0 k | g/m³ | Seawater Density | F _{effect} = | 123,1 | 123,1 kN | Effective Axial For | rce |
| | | | | - | L _{Anchor} = | 229,0 | 229,0 m | Virtual Anchor Ler | ngth |
| | | Opera | ation | al Data | $\Delta L =$ | 0,016 | 0,016 m | Displacement | - |
| Pd = | 3,89 | MPa Ir | terna | al Pressure | | | | | Calculate Displacements |
| $\rho_{dens} =$ | 1000 | kg/m ³ C | ontei | nts Density | | | | | |
| T _{inlet} = | 33 | °C T | empe | erature at Hot End | | | | | |
| T _{outlet} = | 33 | °C T | empe | erature at Cold End | | | | | |
| T _{ambient} = | 30 | °C A | mbie | nt Temperature | | | | | |
| T _{decay} = | 0,000 | Т | empe | erature Decay Constant | | | | | |
| | | | | - | | | | | |
| | | <u>S</u> | oil D | ata | | | | | |
| <u>Co</u> | old End | | | | | | | | |
| Cover = | 0 | 0 | - Exp | oosed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | А | xiai F | riction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| He | ot End | 0 | _ | | | | | | |
| Cover = | 01 | 0 | -⊏Xµ vial P | Dosed; I - Backilli; 2 - Glay | | | | | |
| rx = | 0,1 | ~ | Alal I | netion obenicient | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| T _{decay} = Cover = K = Cover = K = | 0,000 <u>old End</u> 0 0,1 0 0,1 | T 0 A 0 A | empe oil D - Exp xial F - Exp xial F | ata ata posed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay riction Coefficient posed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay riction Coefficient | | | | | |

TRECHO DE JUSANTE A ALÇA DE EXPANSÃO DA LINHA

| | | GENE | RAL D | ATA INPUT | | | EXPANSION AN | NALYSIS RESULTS | <u>.</u> |
|-----------------------|------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|----------|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| Line: | TEBAR - DU | JTO 10po | | | | | | | |
| | <u>Pip</u> | eline and | Coati | ADI Material Data | | Cold End | Pipeline G | eneral Results | |
| API 5L Gr = | Cold End | Hot End | | APT Material Type | ID - | 254.46 | 254.46 mm | Internal Pineline [| Jiamotor |
| 00- | 272 | 272 | mm | Pipeline Outside Diameter | | 234,40 | 76.90 cm ² | Stool Pipolino Cro | |
| th - | 9.273 | 9.273 | mm | Pipeline Wall Thickness | | 273.00 | 273.00 mm | Total External Pin | e Diameter (with coats) |
| Coat1 = | 0,27 | 0,27 | mm | Corrosion Coating | We _{sub} = | 0.591 | 0.591 kN/m | Pipeline Submerg | ed Weight (Empty) |
| Coat2 - | 0 | 0 | mm | Concrete Coating | Wf | 1 110 | 1 110 kN/m | Pipeline Submerg | ed Weight (Eilled) |
| Coat3 - | 0 | 0 | mm | Other Coating | P - | 0 10 | 0.10 MPa | External Pressure | |
| WD - | 0 | 0 | m | Water Denth | · e – | 0,10 | 0,10 101 a | External Tressure | |
| = | Ŭ | 410 | m | Total Pipe Length | 1 | | Soil Prin | cinal Results | |
| E = | | 207000 | MPa | Elasticity Modulus of Steel | CM = | Exposed | Exposed | Cover Material | |
| fv = | | 241 | MPa | Yeld Strength | R _{Paxial} = | 0.11 | 0.11 kN/m | Axial Soil Pipe Re | sistance |
| V = | | 0.3 | | Poisson's Coefficient | Retaxial = | 22.8 | 22.8 kN | Total Soil Pipe Be | esistance at Anchor Point |
| α = | | 1.16E-05 | 1/ºC | Thermal Expansion Coefficient | | ,0 | 22,0 111 | | |
| ρ _{steel} = | | 7850 | kg/m³ | Mass Density opf Steel | | | Final | Results | |
| $\rho_{coat1} =$ | | 0 | kg/m ³ | Mass Density of Corrosion Coating | F _{cap} = | 192,5 | 192,5 kN | Force at End Car |) |
| $\rho_{coat2} =$ | | 0 | kg/m³ | Mass Density of Concrete Coating | F _{Poisson} = | -124.6 | -124.6 kN | Force due to Pois | son's Effect |
| Depart2 = | | 0 | ka/m ³ | Mass Density of Other Coatings | Ftemp = | 55.3 | 55.3 kN | Force due to Tem | perature |
| 0 | | 0 | ka/m ³ | Segwater Density | E-main F | 123.3 | 123.3 kN | Effective Axial En | rco |
| Psea - | | 0 | | Seawater Density | | 205.0 | 205.0 m | Virtual Apphar Lo | acth |
| | | On | oration | al Data | Anchor – | 205,0 | 205,0 m | Displacement | igin |
| Pd - | 391 | /Pa | Intern | al Pressure | ΔL - | 0,014 | 0,014 | Displacement | Calculate Displacements |
| 0 | 1040 k | a/m ³ | Conto | nts Donsity | | | | | |
| Paens - | 22.04 | .g | Tomp | | | | | | |
| inlet = | 00.00 | C | Temp | | | | | | |
| r _{outlet} = | 33 - | | remp | | | | | | |
| I ambient = | 30 × | C | Ambie | ent l'emperature | | | | | |
| I _{decay} = | 0,000 | | l emp | erature Decay Constant | | | | | |
| | | | Soil D | ata | | | | | |
| <u>Co</u> | ld End | | | | | | | | |
| Cover = | 0 | | 0 - Ex | posed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | | Axial I | Friction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| He | ot End | | | | | | | | |
| Cover = | 0 | | 0 - Ex | posed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | | Axial I | -riction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

ANEXO E – Planilha para Cálculo de Expansão (Pressão de Projeto)

TRECHO DE MONTANTE A ALÇA DE EXPANSÃO DA LINHA

| | | GENER/ | | | | EXPANSION AN | ALYSIS RESULTS | |
|-------------------------|-----------|--------------|--|------------------------|----------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Line: | TEBAR - D | UTO 10pol | | | | | | - |
| | Pi | peline and C | Coating Material Data | | | Pipeline G | eneral Results | |
| API 5L Gr = | | В | API Material Type | | Cold End | Hot End | | |
| | Cold End | Hot End | | ID = | 254,46 | 254,46 mm | Internal Pipeline D | Diameter |
| OD= | 2/3 | 273 n | nm Pipeline Outside Diameter | A = | 76,80 | 76,80 cm ⁻ | Steel Pipeline Cro | ss Section |
| = IIJ | 9,27 | 9,27 1 | In Pipeline Wall Thickness | | 273,00 | 2/3,00 mm | Dinalina Culturar | e Diameter (with coats) |
| Coall = | 0 | 0 11 | IIII Corrosion Coating | VV esub = | 0,591 | 0,591 KN/m | Pipeline Submerg | ed weight (Empty) |
| Coat2 = | 0 | Un | Im Concrete Coating | VVI _{sub} = | 1,090 | 1,090 kin/m | Pipeline Submerg | ea weight (Fillea) |
| Coat3 = | 0 | 0 n | 1m Other Coatings | P _e = | 0,10 | 0,10 MPa | External Pressure | |
| VVD = | 0 | U N 459 p | 1 Water Depth | | | Coil Prin | inal Booulto | |
| L = F - | | 207000 N | I Total Fipe Length IPa Elasticity Modulus of Steel | CM - | Exposed | Exposed | Cover Material | |
| L - fv - | | 207000 N | IPa Vold Strongth | Bo= | 0.11 | 0.11 kN/m | Avial Soil Pipo Po | sistanco |
| 1y = V = | | 0.2 | Poisson's Coofficient | B | 25.0 | 25.0 kN | Total Soil Pipe Re | sistance at Anchor Point |
| α = | | 1 16E-05 1 | /ºC Thermal Expansion Coefficient | TupTaxial = | 25,0 | 23,0 KIN | TULAI SUII FIPE NE | SISTANCE AT ANCHOL FUIL |
| 0 | | 7950 k | g/m ³ Mass Density opf Steel | | | Final | Poculte | |
| Psteel - | | 7000 | g/m ³ Mass Density of Osmasian Osation | - | 04.0 | | Famo at Fad Oar | |
| $\rho_{\text{coat1}} =$ | | 0 K | 9/11 Mass Density of Corrosion Coating | F _{cap} = | 24,0 | 24,0 KN | Force at End Cap |) |
| $\rho_{coat2} =$ | | 0 K | 9/m Mass Density of Concrete Coating | ⊢ _{Poisson} = | -16,0 | -16,0 kN | Force due to Pois | son's Effect |
| $\rho_{coat3} =$ | | 0 K | g/m Mass Density of Other Coatings | F _{temp} = | 55,3 | 55,3 kN | Force due to Tem | perature |
| ρ _{sea} = | | 0 k | g/m [°] Seawater Density | F _{effect} = | 63,4 | 63,4 kN | Effective Axial For | rce |
| | | | | L _{Anchor} = | 229,0 | 229,0 m | Virtual Anchor Ler | ngth |
| | | <u>Oper</u> | ational Data | $\Delta L =$ | 0,007 | 0,007 m | Displacement | Calculate Displacements |
| Pd = | 0,588 | MPa li | nternal Pressure | | | | | |
| $\rho_{dens} =$ | 1000 | kg/m° C | Contents Density | | | | | |
| T _{inlet} = | 33 | °C T | emperature at Hot End | | | | | |
| T _{outlet} = | 33 | °C T | emperature at Cold End | | | | | |
| T _{ambient} = | 30 | °C A | mbient Temperature | | | | | |
| T _{decay} = | 0,000 | Т | emperature Decay Constant | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | 5 | ioil Data | | | | | |
| <u>Co</u> | old End | | | | | | | |
| Cover = | 0 | 0 | - Exposed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | P | Ixial Friction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| He | ot End | | | | | | | |
| Cover = | 0 | 0 | - Exposed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | A | xial Friction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

TRECHO DE JUSANTE A ALÇA DE EXPANSÃO DA LINHA

| Lines | GENERAL DATA INPUT | | | | | | EXPANSION A | ALYSIS RESULTS | <u>3</u> |
|------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
| Line: | TEBAR - D | neline and | Coati | ng Material Data | Pipeline General Results | | | | |
| API 5L Gr = | | B | ooan | API Material Type | | Cold End | Hot End | eneral nesans | |
| | Cold End | Hot End | | | ID = | 254,46 | 254,46 mm | Internal Pipeline | Diameter |
| OD= | 273 | 273 | mm | Pipeline Outside Diameter | A = | 76,80 | 76,80 cm ² | Steel Pipeline Cro | oss Section |
| th = | 9,27 | 9,27 | mm | Pipeline Wall Thickness | ODT = | 273,00 | 273,00 mm | Total External Pip | e Diameter (with coats) |
| Coat1 = | 0 | 0 | mm | Corrosion Coating | We _{sub} = | 0,591 | 0,591 kN/m | Pipeline Submerg | ed Weight (Empty) |
| Coat2 = | 0 | 0 | mm | Concrete Coating | $Wf_{sub} =$ | 1,090 | 1,090 kN/m | Pipeline Submerg | ed Weight (Filled) |
| Coat3 = | 0 | 0 | mm | Other Coatings | P _e = | 0,10 | 0,10 MPa | External Pressure |) |
| WD = | 0 | 0 | m | Water Depth | | | | | |
| L = | | 410 | m | Total Pipe Length | | | Soil Prine | cipal Results | |
| E = | | 207000 | MPa | Elasticity Modulus of Steel | CM = | Exposed | Exposed | Cover Material | |
| fy = | | 241 | MPa | Yeld Strength | R _{Paxial} = | 0,11 | 0,11 kN/m | Axial Soil Pipe Re | esistance |
| V = | | 0,3 | | Poisson's Coefficient | R _{PTaxial} = | 22,4 | 22,4 kN | Total Soil Pipe Re | esistance at Anchor Point |
| α = | | 1,16E-05 | 1/ºC | Thermal Expansion Coefficient | | | | | |
| $\rho_{steel} =$ | | 7850 | kg/m° | Mass Density opf Steel | | | Final | Results | |
| $\rho_{coat1} =$ | | 0 | kg/m ³ | Mass Density of Corrosion Coating | F _{cap} = | 24,0 | 24,0 kN | Force at End Cap | 0 |
| $\rho_{coat2} =$ | | 0 | kg/m ³ | Mass Density of Concrete Coating | F _{Poisson} = | -16,0 | -16,0 kN | Force due to Pois | son's Effect |
| $\rho_{coat3} =$ | | 0 | kg/m ³ | Mass Density of Other Coatings | F _{temp} = | 55,3 | 55,3 kN | Force due to Tem | perature |
| ρ _{sea} = | | 0 | kg/m ³ | Seawater Density | F _{effect} = | 63,4 | 63,4 kN | Effective Axial Fo | rce |
| | | | | | L _{Anchor} = | 205,0 | 205,0 m | Virtual Anchor Le | ngth |
| | | Op | eratior | nal Data | ΔL = | 0,007 | 0,007 m | Displacement | • |
| Pd = | 0,588 | MPa | Intern | al Pressure | | | | | Calculate Displacements |
| $\rho_{dens} =$ | 1000 | kg/m ³ | Conte | nts Density | | | | | |
| T _{inlet} = | 33 | °C | Temp | erature at Hot End | | | | | |
| T _{outlet} = | 33 | °C | Temp | erature at Cold End | | | | | |
| T _{ambient} = | 30 | °C | Ambie | ent Temperature | | | | | |
| T _{decay} = | 0.000 | | Temp | erature Decay Constant | | | | | |
| doddy | | | - 1 | ····· | | | | | |
| | | | Soil D | ata | | | | | |
| Co | ld End | | | | | | | | |
| Cover = | 0 | | 0 - Ex | posed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | | Axial | Friction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Ho | ot End | | | | | | | | |
| Cover = | 0 | | 0 - Ex | posed ; 1 - Backfill ; 2 - Clay | | | | | |
| K = | 0,1 | | Axial | Friction Coefficient | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |









| SACS-IV SYSTEM ELEMENT STRESS REPORT AT MAXIMUM UNITY CHECK MAXIMUM CRITICAL LOAD DIST ********* APPLIED STRESSES ********* * CM VALUES * * NEXT TWO HIGHEST CASES * |
|---|
| CHECK NO. END Y-Y Z-Z Y Z Y Z CHECK COND CHECK COND |
| m N/mm2_ <u>N/mm2 N/mm2 N/mm2</u> |
| 1-53C 10A_0.451 TN+BN 200 0.00 41.06 0.61 30.11 0.23 -0.31 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 2-53B 10A_0.543 TN+BN 200 0.00 58.38 2.31 25.14 0.32 -1.59 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 3- 53A 10A_0.38/ TN+BN 200 5.3/ 41.30 -17.95 4.12 1.11 0.99 0.85 0.85 0.00 0.00 4- 52A 10A_0.439 TN+BN 200 4.16 58.39 -6.13 -1.50 0.55 0.34 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 5-51D 10A 0.382 TN+BN 200 2.91 41.25 -14.32 -10.17 0.86 -0.28 0.85 0.85 0.00 0.00 6-51C 10A 0.566 TN+BN 200 6.16 58 31 -14.34 -25.61 0.99 1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 7-G58G 10A 0.494 TN+BN 200 0.52 41.35 5.78 -37.24 0.25 -1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 48-48A 10A 0.62/ IN+BN 200 0.00 58.38 -3.62 -54.12 0.66 0.15 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 49-49A 10A 0.498 TN+BN 200 0.00 58.40 -3.61 -16.66 0.55 0.15 0.85 0.85 0.00 0.00 50.00 50.41 -4.26 22.20 0.54 0.15 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 51-50A 10A 0.588 TN+BN 200 0.00 58.41 -4.04 -33.08 0.62 0.15 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 55-54A 10A 0.489 TN+BN 200 6.00 57.80 -4.72 15.47 0.60 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 56-55A 10A 0.441 IN+BN 200 0.00 57.68 -4.56 -6.07 0.60 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 57-56A 10A 0.433 TN+BN 200 6.00 57.49 -4.56 -4.44 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 58- 57A 10A 0.423 TN+BN 200 0.00 57.36 -4.54 1.60 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 59- 58A 10A 0.422 TN+BN 200 6.00 57.17 -4.65 1.34 0.59 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 48A- 49 10A 0.582 TN+BN 200 0.00 58.40 -3.63 -31.92 0.56 0.15 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 51A- 51 10A 0.626 TN+BN 200 0.00 58.41 -6.99 -39.58 0.66 0.15 0.85 0.85 0.00 0.00 |

| SACS-IV SYSTEM ELEMENT STRESS REPORT AT MAXIMUM UNITY CHECK |
|---|
| MAXIMUM CRITICAL LOAD DIST ******** APPLIED STRESSES ********* * CM VALUES * * NEXT TWO HIGHEST CASES MEMBER GRP UNITY COND. CASE FROM AXIAL ** BENDING ** *** SHEAR *** UNITY LOAD UNITY LOAD |
| CHECK NO. END Y-Y Z-Z Y Z Y Z CHECK COND CHECK COND |
| m N/mm2_ <u>N/mm2_N/mm2_N/mm2_N/mm2</u> |
| 51C- 7 10A 0.610 TN+BN 200 5.82 58.36 6.42 -36.71 0.27 1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 51D- 610A 0.383 TN+BN 200 0.00 41.31 -14.32 -10.17 1.00 -0.28 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 52A- 510A 0.439 TN+BN 200 0.00 58.40 -6.13 -1.50 0.57 0.34 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 53A- 410A 0.388 TN+BN 200 0.00 41.35 -17.95 4.12 0.96 0.99 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 53B- 3 10A 0.513 TN+BN 200 0.00 58.42 -15.16 12.54 1.02 -1.59 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 53C- 210A 0.441 TN+BN 200 0.00 41.18 0.69 28.15 0.50 -0.31 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 54A- 5410A 0.522 TN+BN 200 6.00 57.86 -3.98 21.67 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 55A- 5510A 0.454 TN+BN 200 6.00 57.74 -4.52 8.77 0.60 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 56A- 5610A 0.440 TN+BN 200 6.00 57.55 -4.56 -6.07 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 57A- 5710A 0.426 TN+BN 200 6.00 57.42 -4.56 -2.62 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 58A- 5810A 0.423 TN+BN 200 0.00 57.23 -4.65 1.34 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 59A- 5910A 0.427 TN+BN 200 0.00 57.10 -5.77 0.54 0.61 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| BC02-59A10A_0.423 TN+BN 200 6.00 56.59 -5.77 0.54 0.70 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| G58G-G58H10A_0.503 TN+BN 200 1.99 41.35 -0.51 -39.29 0.61 -1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| G58H8 10A 0.507 TN+BN 200 0.52 41.35 -3.08 -39.81 0.69 -1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |

| SACS-IV SYSTEM ELEMENT STRES: MAXIMUM CRITICAL LOAD DIST ** MEMBER GRP UNITY COND. CAS CHECK NO. END | S REPORT AT MAXIMUM UNITY CHECK ******** APPLIED STRESSES ********** * CM VALUES * * NEXT TWO HIGHEST CASES * SE FROM AXIAL ** BENDING ** *** SHEAR *** UNITY LOAD UNITY LOAD Y-Y Z-Z Y Z Y Z CHECK COND CHECK COND m N/mm2 N/mm2 N/mm2 N/mm2 N/mm2 |
|---|---|
| 1-53C 10A 0.056 TN+BN 200 1.44 1-53D 10A 0.072 TN+BN 200 0.0 2-53B 10A 0.147 TN+BN 200 5.5 3-53A 10A 0.147 TN+BN 200 5.3 4-52A 10A 0.147 TN+BN 200 4.14 5-51D 10A 0.145 TN+BN 200 2.9 6-51C 10A 0.165 TN+BN 200 0.5 48-51A 10A 0.106 TN+BN 200 0.5 48-48A 10A 0.131 TN+BN 200 0.5 48-48A 10A 0.094 TN+BN 200 6.0 50-50A 10A 0.094 TN+BN 200 6.0 51-50A 10A 0.094 TN+BN 200 6.0 51-50A 10A 0.094 TN+BN 200 6.0 51-50A 10A 0.094 TN+BN 200 6.0 55-54A 10A 0.093 TN+BN 200 6.0 56-55A 10A 0.084 TN+BN 200 6.0 57-56A 10A 0.081 TN+BN 200 6.0 58-57A 10A 0.081 TN+BN 200 6.0 59-58A 10A 0.083 TN+BN 200 6.0 51A-51 10A 0.107 TN+BN 200 0.0 | $ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ |

| DATE 30-NOV-2010 TIME 19:40:15 |
|--|
| SACS-IV SYSTEM ELEMENT STRESS REPORT AT MAXIMUM UNITY CHECK MAXIMUM CRITICAL LOAD DIST ********* APPLIED STRESSES ********* * CM VALUES * * NEXT TWO HIGHEST CASES * <u>MEMBER GRP</u> UNITY COND. CASE FROM AXIAL ** BENDING ** *** SHEAR *** UNITY LOAD UNITY LOAD CHECK NO. END Y-Y Z-Z Y Z Y Z CHECK COND CHECK COND m N/mm2_N/mm2_N/mm2_N/mm2_N/mm2 |
| 51C-710A 0.165 TN+BN 200 0.00 8.70 -14.34 12.30 1.02 1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 51D- 610A 0.144 TN+BN 200 0.00 6.05 -14.32 -11.78 1.00 -0.28 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 52A- 510A 0.128 TN+BN 200 4.29 8.74 -1.49 -12.15 0.35 0.34 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 53A- 4 10A 0.147 TN+BN 200 0.00 6.27 -17.95 5.57 0.98 0.99 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 53B- 3 10A 0.148 TN+BN 200 0.00 8.85 -15.16 4.16 1.02 -1.59 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 53C- 2 10A 0.076 TN+BN 200 1.44 6.15 3.87 4.66 0.24 -0.31 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 54A- 54 10A 0.098 TN+BN 200 6.00 8.53 -3.98 -5.72 0.57 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 55A- 55 10A 0.086 TN+BN 200 6.00 8.41 -4.52 -2.24 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 56A- 56 10A 0.084 TN+BN 200 6.00 8.25 -4.56 1.50 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 57A- 57 10A 0.082 TN+BN 200 6.00 8.12 -4.56 0.74 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 58A- 58 10A 0.081 TN+BN 200 0.00 7.97 -4.65 -0.40 0.58 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| 59A- 59 10A 0.086 TN+BN 200 0.00 7.85 -5.77 -0.20 0.61 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| BC02-59A 10A 0.084 TN+BN 200 6.00 7.58 -5.77 -0.20 0.70 0.00 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| G58G-G58H 10A 0.109 TN+BN 200 0.00 6.16 5.78 10.58 0.31 -1.33 0.85 0.85 0.00 0.00 |
| G58H810A 0.081 TN+BN 200 0.00 6.16 -0.51 6.9 |

ANEXO I – Flowmaster

Dentre os "*softwares*" disponíveis para a simulação do transiente o *Flowmaster* foi o "*software*" adotado, fornecido pela *FLOWMASTER USA* de Chicago, devido sua disponibilidade, pois mantém com a Universidade Federal Fluminense junto ao curso de pós-graduação em engenharia civil da UFF, uma parceria de pesquisa onde oferece a licença "*Full*" do programa para desenvolvimento de pesquisas correlatas.

O software *Flowmaster* é composto por um pacote de softwares interativos e iterativos que simulam fluxos internos, permitindo modelar graficamente redes hidráulicas pressurizadas, visando prever as pressões, vazões e temperatura do sistema.

O software é capaz de representar e analisar fluidos compressíveis e incompressíveis em regime transiente e permanente. Devido aos recursos gráficos e a facilidade de alteração de dados, permite a avaliação rápida de diversas alternativas de projeto, viabilizando a identificação da solução ótima, o que é mais difícil de ser alcançado com utilização dos procedimentos manuais e quase sempre exaustivos do desenvolvimento de cálculos hidráulicos. Propicia o cadastramento de todos os componentes da rede em banco de dados digital.

Embora ainda pouco utilizados no Brasil, o emprego de softwares para a representação de sistemas hidrodinâmicos constitui uma tecnologia de alto nível que garante rapidez e segurança na análise das alternativas de projeto além de permitir otimização durante o processo de operação.

Ressalta-se que o uso de modelos computacionais vem tendo uma imensa aplicação na simulação de projetos nos países de primeiro mundo. No Brasil, em função dos elevados custos "software" e pela dificuldade de domínio destes recursos, esta metodologia ainda é pouco usada. Exceção é encontrada para os "softwares" utilizados na área de estruturas, onde a simulação computacional é largamente utilizada na avaliação de projetos.

ANEXO J – Energia Disponível na Entrada da Bomba

Sempre que a pressão em algum ponto da bomba (geralmente no olho do

impelidor) atingir o limite crítico (quando a pressão absoluta é igual a pressão de vapor do líquido), as condições de operação e funcionamento da bomba se tornam precárias, em conseqüência do fenômeno da cavitação. Os efeitos de cavitação (vibrações, choques, ruídos) transmitem-se para as estruturas próximas, reduzindo rendimento e podendo causar danos ou até mesmo perdas de material às instalações próximas e à própria bomba.

Para verificação da possível ocorrência de cavitação, calculou-se o NPSH (*Net Positive Suction Head*) disponível no flange de sucção da bomba, a fim de comparar com o NPSH requerido pela mesma. O NPSH disponível e o requerido são interpretados fisicamente como sendo a energia absoluta por unidade de peso existente no flange de sucção, acima da pressão de vapor, e a quantidade mínima de energia absoluta por unidade de peso acima da pressão de vapor, que deve existir no flange de sucção para que não haja risco de cavitação, respectivamente.

$$NPSH_{DISP} = \frac{P_s}{\gamma} + \left(\frac{P_{ATM} - P_{VAPOR}}{\gamma}\right) + Z_s - h_{fs}$$
 5.6.1

onde,

Ps pressão manométrica no reservatório.; _ Ратм pressão atmosférica; _ pressão de vapor, característica de cada líquido; PVAPOR γ peso específico; _ Zs altura estática de sucção; _ perda de carga na linha de sucção (m.c.a.); h_{fs} NPSH_{DISP} - Energia absoluta, acima da pressão de vapor, existente no flange de sucção da bomba (m.c.a.).

Para a construção da curva de NPSH disponível, considerou-se, conservadoramente, a pressão manométrica no reservatório de sucção nula, visto que a pressão atuante no reservatório de sucção é a atmosférica; e a altura estática de sucção equivalente a 1m abaixo do nível das bombas. A curva característica de

NPSH pode ser observada na, abaixo:



Curvas Características de NPSH

Como pode ser observado acima, o NPSH disponível de 8,9 m correspondente a vazão de operação da rede é maior do que o NPSH requerido de 7 m para a mesma vazão. Como a margem de segurança de 0,6 m, garantindo a condição de operação sem risco de cavitação na bomba, considerando que da diferença entre o NPSH disponível e o NPSH requerido da rede é de 1,9 m.

A máxima vazão de operação da rede sem o risco de ocorrência de cavitação na bomba é de aproximadamente 462 m³/h, considerando a metodologia adotada.

ANEXO K - Variação da celeridade com a rugosidade da parede da tubulação.

No escoamento forçado a celeridade "a" varia com o tipo de material da tubulação, com o Módulo de Young e com a razão entre a espessura de parede e o diâmetro interno.



(FLOWMASTER-V7, 2007)

ANEXO L - Fluxograma das formulações das equações do escoamento permanente e transiente

