AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Avaliação das Metodologias de Análise de Sistemas de Tubulações de Vapor Sujeitas
a Carregamentos do tipo Steam Hammer**

FÁBIO CAMILO HIPÓLITO

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2016**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Avaliação das Metodologias de Análise de Sistemas de Tubulações de Vapor Sujeitas
a Carregamentos do tipo Steam Hammer**

FÁBIO CAMILO HIPÓLITO

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

Versão Original
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2016

Avaliação das Metodologias de Análise de Sistemas de Tubulações de Vapor Sujeitas a Carregamentos do tipo Steam Hammer

RESUMO

Carregamentos transientes termo hidráulicos do tipo *Steam Hammer* são eventos comuns em sistemas de tubulações de vapor com grandes potenciais de catástrofes em plantas de geração de energia. Uma vez iniciado o evento, ondas de pressões são geradas com amplitudes, geralmente, de grande magnitude ocasionando altas pressões no sistema, ruídos, deformações, fadiga, com possibilidade de danos materiais e econômicos e em casos extremos fatalidades.

Os procedimentos da indústria para análise deste tipo de sistema consistem realização de análises estáticas equivalentes ou análise de espectro de resposta com carregamentos caracterizados por meio de métodos analíticos baseados em hipóteses simplificadoras do fluido e fluxo.

Neste trabalho é proposta a análise de sistema de tubulações por meio do método de integração numérica com superposição modal e carregamento caracterizado por método numérico com base no método das características. Comparações foram efetuadas entre os resultados obtidos pela metodologia proposta e os procedimentos da indústria, demonstrando que, dado ao alto grau de conservadorismo, os procedimentos da indústria acarretam em superdimensionamento de estruturas e tubulações ocasionando custos adicionais de projeto, sendo a otimização do projeto obtida aplicando-se a metodologia proposta no trabalho.

Avaliação das Metodologias de Análise de Sistemas de Tubulações de Vapor Sujeitas a Carregamentos do tipo Steam Hammer

ABSTRACT

Steam Hammer is a common transient thermo hydraulic event in steam piping systems with potential to cause serious damages in power generation plants. It generates pressure waves, generally of great amplitude and magnitude, causing high pressures in the system, associated with noise, with possible material and economic damages and, in extreme case, even fatalities.

Industry procedures for analysis of these events consists of performing equivalent static analysis, or response spectrum analysis, with transient loadings calculated by analytical methods based on assumptions of fluid and flow.

This paper proposes a new methodology for the piping system analysis by the numerical integration method with modal superposition and transient loadings calculated by a numerical method based on the method of characteristics. Comparisons were made between the results obtained by the proposed methodology and the established industry procedures, confirming that, due to the high degree of conservatism, industry procedures can lead to additional cost to the design, with the optimization of the design being obtained by applying the methodology proposed in this paper.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS	8
LISTA DE ABREVIATURAS	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS.....	15
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1 Introdução ao Transiente Hidráulico de <i>Steam Hammer</i>	16
3.1.1 Caracterização do Transiente Hidráulico de <i>Steam Hammer</i>	21
3.2 Introdução a Análise Estrutural de Tubulações	30
3.2.1 Modelo de Elementos Finitos.....	31
3.2.2 Método da Superposição Modal.....	32
3.2.3 Método do Espectro de Resposta por meio do Método da Superposição Modal	36
3.2.4 Método da Integração Numérica por meio do Método da Superposição Modal	43
4 METODOLOGIA	48
4.1 Estudo de Caso – Unidade de Geração de Energia 170 MW.....	48
4.2 Modelo de Caracterização do Transiente Termo hidráulico de <i>Steam Hammer</i>	50
4.2.1 Método Analítico – Planilha Eletrônica	50
4.2.2 Método Numérico – Modelo Pipenet	51
4.3 Modelo de Análise Estrutural em Tubulações – CAESAR II.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5.1 Comparação Forças Desbalanceadas	57
5.2 Esforços Atuantes nos Suportes.....	61
5.3 Esforços Atuantes no Bocal da Turbina	64
5.4 Tensões Atuantes no Sistema	65
6 CONCLUSÕES.....	68
7 TRABALHOS FUTUROS.....	70
REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS.....	71
APÊNDICE B - MEMORIAL DE CÁLCULO – PERDA DE CARGA EQUIVALENTE (CALDEIRA)	76
APÊNDICE C – DADOS DE ENTRADA – MODELO PIPENET	82
APÊNDICE D – MEMORIAL DE CÁLCULO - COMPRIMENTO MÁXIMO DOS TRECHOS RETOS DE TUBULAÇÃO.....	117
APÊNDICE E – DADOS DE ENTRADA – MODELO CAESAR II.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação pressão no tempo - transiente termo hidráulico.....	16
Figura 2: Direção das Forças Desbalanceadas.....	17
Figura 3: Volume de controle em estudo.....	17
Figura 4: Equilíbrio de forças na direção x.....	18
Figura 5: Variação de pressão no sistema conforme a variação do fluxo. (Adaptado de referência: [11]).....	24
Figura 6: Variação da força desbalanceada no tempo. (Adaptado de referência [11])	26
Figura 7: Força desbalanceada atuante em um trecho reto de tubulação. (Adaptado de referência [11]).....	26
Figura 8: Output do software PIPENET - variação da força desbalanceada no tempo.....	30
Figura 9: Método de obtenção do espectro da força. (Adaptado de Referência: [23]).....	37
Figura 10: Exemplo de espectro do carregamento.....	37
Figura 11: Espectro de aceleração de um carregamento sísmico. (Adaptado de Referência [24])	39
Figura 12: Variação linear da aceleração assumida pelo método de Wilson θ . (Referencia: [22]).....	45
Figura 13: Sistema de Vapor de Alta Pressão.....	48
Figura 14: Modelo Pipenet.....	51
Figura 15: Modelo de Elemento de Viga.....	52
Figura 16: Pontos de Análise do Sistema – Força Desbalanceada.....	56
Figura 17: Comparação Forças Desbalanceadas (Método Analítico e Numérico).....	58
Figura 18: Variação do desvio das forças desbalanceadas máximas.....	59
Figura 19: Variação do desvio das forças desbalanceadas máximas para diversos valores de t_c	60
Figura 20: Espectro das Forças Desbalanceadas.....	61
Figura 21: Pontos de análise - Esforços nos Suportes.....	62
Figura 22: Esforço atuante na direção z - Nó 2510.....	63
Figura 23: Esforço atuante no bocal da turbina - Momento em torno do eixo x.....	64
Figura 24: Pontos de análise – Tensões Atuantes no Sistema.....	66
Figura 25: Tensão de Flexão – Nó 15610.....	67
Figura 26: Arranjo físico do evaporador SH-01.....	76
Figura 27: Procedimento para determinação de $fzpa$	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados geométricos do sistema	48
Tabela 2: Dados de materiais do sistema	49
Tabela 3 - Classificação de carregamento segundo ASME B31.1.....	49
Tabela 4 - Combinação de carregamentos estáticos e dinâmicos conforme ASME B31.1.....	50
Tabela 5 - Matriz de análises	56
Tabela 6: Dados - Análise Espectro de Resposta.....	57
Tabela 7: Dados - Análise - Integração Numérica	57
Tabela 8: Comparação esforços nos suportes - Nós 210 e 2510.....	62
Tabela 9: Comparação esforços nos suportes - Nós 5710 e 8210 (Fonte: Autor)	63
Tabela 10: Comparação esforços no suporte - Nó 2510 - Caso 5.	63
Tabela 11: Comparação esforços atuantes no bocal da turbina.....	64
Tabela 12: Comparação tensões atuantes no sistema.....	65
Tabela 13: Tensões atuantes – Nós 8210, 9610 e 15610.	66
Tabela 14: Condições de temperatura do vapor - interno da caldeira.).....	77
Tabela 15: Memorial de cálculo da perda de carga no evaporador SH-01.	78
Tabela 16: Memorial de cálculo da perda de carga no evaporador SH-02.	79
Tabela 17: Memorial de calculo da perda de carga da tubulação 10".....	80
Tabela 18: Memorial de calculo do fator K.	81
Tabela 19: Memorial de calculo – comprimento máximo elemento trecho reto de tubo.	119

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Denominação	Unidade
a	Velocidade da onda de pressão	m/s
A	Área de secção transversal do tubo	m ²
C_p	Calor específico molar a pressão constante	J/mol.K
C_v	Coefficiente de fluxo da válvula em questão	
D	Diâmetro externo do tubo	m
D_i	Diâmetro interno do tubo	m
D_n	Diâmetro nominal do tubo	m
DLF_n	Fator de amplificação dinâmica do modo “ n ”	
f	Fator de atrito	
f_m	frequência de vibração do modo “ m ”	Hz
f_n	frequência de vibração do modo “ n ”	Hz
f_{sp}	frequência de pico da aceleração espectral	Hz
f_{zpa}	frequência de aceleração de período zero	Hz
e	Espessura de parede do tubo	m
E	Módulo de elasticidade do material do tubo	Pa
F	Força atuante sobre alguma secção	N
F_{Aii}	Força desbalanceada axial atuante no ponto i	N
F_{ax}	Força atuante no sentido axial da tubulação	N
F_c	Força de cisalhamento em razão do atrito fluido – estrutura	N
F_{max}	Força máxima desbalanceada axial	N
$F^{(t)}$	Carregamento no instante de tempo t	N
$F^{(t+\theta\Delta t)}$	Carregamento no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$	N
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
dh	Variação de entalpia do fluido	J/mol
H	Altura piezométrica da linha de centro do tubo	m
I	Momento de Inércia do elemento de tubulação	m ⁴
j	Número de trechos retos entre o ponto i em análise e a válvula de bloqueio do sistema	

Símbolo	Denominação	Unidade
k	Razão entre os calores específicos do fluido	
$\mathbf{k}$	matriz de rigidez da estrutura	
$\mathbf{K}$	matriz de rigidez dos modos normais	
K	Rugosidade equivalente da parede da tubulação	
K_f	Módulo de Elasticidade Volumétrica (<i>Bulk Modulus of Elasticity</i>)	Pa
L_c	Comprimento crítico	m
L_j	Comprimento do trecho reto “j”	m
L_m	Comprimento do trecho reto “m”	m
L_{max}	Comprimento máximo do elemento de trecho reto de tubulação	m
m	Número de trechos retos entre o ponto i em análise e o reservatório	
$\mathbf{m}$	matriz de massa da estrutura	
M	Massa molecular do fluido	kg/mol
$\mathbf{M}$	matriz de massa dos modos normais	
p	Pressão do fluido	N/m ²
$p(t)$	vetor carregamento aplicado a estrutura	
$\mathbf{P}$	vetor carregamento dos modos normais	
q	Vazão mássica do fluido em questão	kg/s
Q	Vazão Volumétrica na tubulação	m ³ /s
R	Constante universal dos gases	J/mol.K
Re	Número de Reynolds	
ds	Variação de entropia do fluido	J/mol.K
S	Distribuição espacial do carregamento	
S_{ax}	Tensão axial atuante na tubulação	Pa
$S_{flexão}$	Tensão de flexão atuante na tubulação	Pa
S_{fl}	Tensão de flexão atuante no eixo longitudinal da tubulação	Pa
S_{fc}	Tensão de flexão atuante no eixo transversal da tubulação	Pa
S_h	Tensão admissível do material para carregamentos ocasionais conforme ASME B31.1	Pa
S_t	Tensão de torção atuante na tubulação	Pa

Símbolo	Denominação	Unidade
S_{occ}	Tensão atuante gerada por carregamentos ocasionais conforme ASME B31.1	Pa
t_c	Tempo efetivo de fechamento da válvula de bloqueio	s
t_{di}	tempo de residência da onda de pressão no ponto de análise i	s
t_r	tempo necessário para que a onda de pressão atinja o ponto de análise i	s
T	Temperatura do fluido	K
v	vetor deslocamento da estrutura	
V	Velocidade do fluido	m/s
x	Posição ao longo da direção longitudinal do tubo	m
Y	vetor deslocamento em coordenadas generalizadas	
Y_I	Deslocamento total do sistema na direção I	m
Y_{PI}	Deslocamento devido à resposta periódica do sistema na direção I	m
Y_{RI}	Deslocamento devido à resposta rígida do sistema na direção I	m
Y_{Pli}	Deslocamento devido à resposta periódica do modo i na direção I	m
Y_{Plj}	Deslocamento devido à resposta periódica do modo j na direção I	m
$Y^{(t)}$	Deslocamento em coordenadas generalizadas no instante de tempo t	m
$Y^{(t+\tau)}$	Deslocamento em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \tau)$	m
$Y^{(t+\theta\Delta t)}$	Deslocamento em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$	m
$\dot{Y}^{(t)}$	Velocidade em coordenadas generalizadas no instante de tempo t	m/s
$\dot{Y}^{(t+\tau)}$	Velocidade em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \tau)$	m/s
$\dot{Y}^{(t+\theta\Delta t)}$	Velocidade em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$	m/s
$\ddot{Y}^{(t)}$	Aceleração em coordenadas generalizadas no instante de tempo t	m/s ²
$\ddot{Y}^{(t+\tau)}$	Aceleração em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \tau)$	m/s ²

Símbolo	Denominação	Unidade
$\ddot{Y}(t+\theta\Delta t)$	Aceração em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$	m/s ²
W	Peso Próprio da tubulação por unidade de comprimento	kg/m
z	Cota de elevação da linha de centro do tubo em relação ao datum	m
Z	Diferença de Elevação entre o nó inicial e final do elemento	m
Z_c	Fator de compressibilidade	
γ	Peso específico do fluido	N/m ³
ε_{ij}	Coefficiente de correlação modal entre os modos i e j	
η	Razão de amortecimento do sistema	
ρ	Densidade do fluido	kg/m ³
ρ_o	Densidade da água nas condições normais de temperatura e pressão	kg/m ³
ρ_m	Densidade do material da tubulação	kg/m ³
τ	Incremento de tempo no qual $0 \leq \tau \leq \theta\Delta t$	
ν	Coefficiente de Poisson	
ω_n	Frequência de vibração do modo “ n ”	rad/s
Φ	Matriz modal	
ϕ_n	Modo “ n ” de vibração do sistema	

LISTA DE ABREVIATURAS

American Society of Mechanical Engineers	ASME
American Petroleum Institute	API
Institute of Electrical and Electronics Engineers	IEEE
National Electrical Manufacturers Association	NEMA
Nuclear Regulatory Guide	NUREG
United States Nuclear Regulatory Commission	USNRC

1 INTRODUÇÃO

Carregamentos transientes termo hidráulicos do tipo *Steam Hammer* são eventos comuns em sistemas de tubulações de vapor com grandes potenciais de catástrofes em plantas de geração de energia. Uma vez iniciado o evento, ondas de pressões são geradas com amplitudes, geralmente de grande magnitude, ocasionando altas pressões no sistema, ruídos, deformações, fadiga, com possibilidade de danos materiais e econômicos e em casos extremos fatalidades.

Entre fim dos anos 60 e início dos anos 80, aproximadamente 150 registros de ocorrências relacionadas a carregamentos do tipo *Steam Hammer* em sistemas de tubulações de vapor foram reportadas a *United States Nuclear Regulatory Commission* (USNRC), entidade licenciadora de centrais nucleares nos Estados Unidos da América. Com base nestes dados, a USNRC conduziu uma série de estudos que culminaram na emissão dos relatórios NUREG-0927 [1] e NUREG-1061 [2], nos quais concluiu-se que a eliminação total dos eventos de *Steam Hammer* não é possível de ser alcançada em razão de várias características inerentes das plantas de geração de energia, devendo assim, as práticas de projetos estruturais serem revisadas de modo a incluir os carregamentos do tipo *Steam Hammer* no projeto de tubulações e seus suportes.

No final da década de 80, o código da indústria ASME B31.1 [3], que prescreve os requerimentos de materiais e componentes, projeto, fabricação, montagem, inspeção e teste de sistemas de tubulações não nucleares a serem instalados em plantas de geração de energia, foi revisado incluindo o carregamento do tipo *Steam Hammer* no projeto de tubulações (item 101.5.1, capítulo II). Em 2015, LEISHEAR [4] publicou um guia com o intuito de melhorar o entendimento das causas e prevenir ou mitigar os efeitos de transientes termo hidráulicos em sistemas de tubulações. A ASME estuda a possibilidade de transformar este guia em parte integrante do código ASME B31, o que demonstra a importância dos tempos atuais do tema em questão.

Os procedimentos da indústria para projeto estrutural de tubulações de vapor sujeitas a carregamentos do tipo *Steam Hammer* consiste na realização de análises estáticas equivalentes ou análise por meio do método do espectro de resposta. Os carregamentos transientes são obtidos por meio de método analítico baseados em hipóteses simplificadoras do fluido e fluxo.

Estes procedimentos contêm várias hipóteses simplificadoras que acarretam, em muitos casos, em superdimensionamento de estruturas para suportaço de tubulaes, incluso de componentes especiais de suportao (ex.: *Snubbers/Struts*) (itens estes que requerem cuidados especiais de manuteno), revises de roteamento de tubulaes para atendimento aos critrios de carregamentos mximos impostos pelas tubulaes nos bocais da turbina, e, em alguns casos, perda de rendimento da unidade.

Todos os fatores listados acima ocasionam custos adicionais de projetos. Assim, de grande importncia ter uma metodologia de projeto estrutural de tubulaes que minimize o grau de conservadorismo aplicado ao projeto.

Neste trabalho proposta a metodologia de projeto estrutural de sistema de tubulaes de vapor sujeitas a carregamentos tipo *Steam Hammer* por meio do mtodo de integrao numrica com superposio modal e carregamento caracterizado por mtodo numrico com base no mtodo das caractersticas.

O trabalho de avaliao desta metodologia foi realizado com base no estudo de caso de um sistema de tubulaes de vapor de uma unidade de gerao de 170 MW. O carregamento de *Steam Hammer* foi simulado por meio do fechamento rpido das vlvulas de bloqueio principal do sistema em razo da ocorrncia de um desarme de sobre velocidade na turbina. Foram avaliados, os esforos atuantes nos suportes, os esforos atuantes nos bocais da turbina e as tenses atuantes nas tubulaes. Comparaes foram efetuadas entre os resultados obtidos pela metodologia proposta e os procedimentos da indstria, bem como recomendaes e guias para desenvolvimento de projetos deste tipo de sistema.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi desenvolver uma metodologia de projeto estrutural de sistemas de tubulações de vapor sujeitas a carregamentos tipo *Steam Hammer* por meio do método de integração numérica com superposição modal e carregamento caracterizado por método numérico com base no método das características.

O segundo objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de recomendações e guias para elaboração de projetos deste tipo de sistema.

Outro objetivo do trabalho foi capacitar o autor para executar análises dinâmicas de tubulações. Na análise do caso de estudo foram envolvidos conceitos de análises modais, análises pelo método de espectro de resposta, análise pelo método de integração numérica, caracterização de carregamentos do tipo *Steam Hammer* por meio de métodos numéricos. Adicionalmente, o software comercial de análise de fluxos em tubulações PIPENET foi utilizado como ferramenta de trabalho e a capacitação do autor na utilização do mesmo também fez parte do objetivo do trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Introdução ao Transiente Hidráulico de Steam Hammer

O *Steam Hammer* é um transiente oriundo de qualquer variação abrupta no fluxo de vapor. Esta variação pode ser gerada, por exemplo, pelo fechamento rápido de válvulas de bloqueio em tubulações principais ocasionados por um desarme de sobre velocidade na turbina.

Quando o fluxo de vapor é retardado, a energia cinética do fluido é convertida em energia potencial (aumento de pressão hidrostática). Esta onda de pressão viaja pela tubulação, no sentido contrário ao fluxo, a velocidade sônica ocasionando condições transientes (de pressão e velocidade) que são atenuadas por efeitos de amortecimento estabilizando o sistema em uma nova condição. Na figura 1 apresenta-se um exemplo de variação de pressão no tempo ocasionada por um transiente termo hidráulico.

Figura 1: Variação pressão no tempo - transiente termo hidráulico.

Tubulações e seus componentes atuam atenuadores do transiente termo hidráulico uma vez que, uma parcela da energia da onda de pressão é transferida as tubulações meio de atrito entre fluido e estrutura e outra parcela, proveniente da perda de energia da onda de pressão em cada mudança de direção do fluxo, são transferidas as tubulações por meio de forças transientes desbalanceadas. Essas forças transientes desbalanceadas atuam no sentido contrário a onda de pressão, conforme figura 2.

Figura 2: Direção das Forças Desbalanceadas.

As variações de pressão e velocidades no sistema ocorrem basicamente na direção axial da tubulação, uma vez que, os fluxos radiais de massa, momento linear e energia são desprezíveis em relação aos fluxos axiais. MITRA e ROULEAU [5] e VARDY e HWANG [6] estudaram a validade da aproximação unidirecional para sistema de tubulações sujeitas a eventos de *Water Hammer* obtendo resultados satisfatórios. Não foram encontrados na literatura estudos similares para eventos de *Steam Hammer*.

Assim, os campos de pressões e velocidades no sistema podem ser calculados por meio da aplicação das equações da conservação de massa e momento linear na direção axial para um volume de controle qualquer em conjunto com as leis da termodinâmica.

Figura 3: Volume de controle em estudo.

Considerando o volume de controle representado na figura 3, temos que o equilíbrio de forças atuantes no volume de controle na direção axial da tubulação (eixo x) é composto pelas forças de pressão F_1 e F_2 e pela força de cisalhamento na parede do tubo F_c ocasionada pelo atrito fluido-estrutura, conforme representado na figura 4.

Figura 4: Equilíbrio de forças na direção x.

As forças de pressão F_1 e F_2 podem ser escritas como:

$$F_1 = \gamma A(H - z) \quad (3.1)$$

$$F_2 = \gamma A \left(H - z + \frac{\partial H}{\partial x} \delta x \right) \quad (3.2)$$

Na qual:

- γ Peso específico do fluido;
- A Área de seção transversal do volume de controle;
- z Cota de elevação do volume de controle;
- H Altura piezométrica da linha de centro do tubo;
- x Posição ao longo da direção longitudinal do tubo.

A força de cisalhamento na parede do tubo em razão do atrito fluido-estrutura F_c pode ser expressa com base na equação de Darcy-Weisbach [7]:

$$F_c = \frac{\gamma A}{g} f \frac{V|V|}{2D_i} \delta x \quad (3.3)$$

Na qual:

g Aceleração da gravidade;

f Fator de atrito de Darcy-Weisbach;

D_i Diâmetro interno do tubo;

V Velocidade do fluido;

A força resultante F atuando no volume de controle é dada por:

$$F = F_1 - F_2 - F_c \quad (3.4)$$

Substituindo as equações (3.1), (3.2) e (3.3) em (3.4), obtemos:

$$F = -\frac{\gamma A}{g} \left(g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D_i} \right) \delta x \quad (3.5)$$

De acordo com a segunda lei de Newton, a força resultante pode ser escrita como:

$$F = \frac{\gamma A}{g} \frac{dV}{dt} \delta x \quad (3.6)$$

Substituindo a equação (3.6) em (3.5), obtemos:

$$\frac{dV}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - f \frac{V|V|}{2D_i} \quad (3.7)$$

Do cálculo elementar temos que:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.8)$$

Substituindo a equação (3.8) em (3.7) e utilizando a relação $V = dx/dt$, obtemos a equação de conservação de momento linear:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D_i} = 0 \quad (3.9)$$

A equação de conservação de massa aplicada ao volume de controle da figura 4 pode ser expressa por:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} = 0 \quad (3.10)$$

Os termos da equação (3.10) representam a variação local de massa no tempo ocasionados pelos efeitos combinados de compressibilidade do fluido e elasticidade do tubo e o fluxo de massa instantâneo, respectivamente.

A equação (3.10) pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{\rho A} \frac{D(\rho A)}{Dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.11)$$

Na qual:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \quad (3.12)$$

Relacionando a densidade do fluido e a área do tubo com a pressão e aplicando a regra da cadeia, obtemos:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{d\rho}{dp} + \frac{\rho}{A} \frac{dA}{dp} \quad (3.13)$$

Na qual:

a Velocidade da onda de pressão;

p Pressão do fluido.

Os termos da equação (3.13) representam o efeito da compressibilidade do fluido e o efeito da flexibilidade do tubo na velocidade da onda de pressão, respectivamente.

ALLIEVI [8] simplificou as equações (3.9) e (3.13) com base no fato de que para a maioria dos sistemas convencionais a ordem de magnitude da velocidade da onda em um evento de *Water Hammer* varia entre 100 e 1400 m/s e a velocidade do fluido é da ordem de 1 a 10 m/s. Com isso, o numero de Mach de sistemas convencionais está na faixa de $10^{-2} - 10^{-3}$ e, portanto as equações (3.9) e (3.13) podem ser reescritas como:

$$\frac{dV}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D_i} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.15)$$

3.1.1 Caracterização do Transiente Hidráulico de Steam Hammer

Conforme discutido acima, a variação de velocidades e pressão no sistema ocasionado por um evento de transiente termo hidráulico pode ser obtida por meio da solução do sistema composto pelas equações diferenciais parciais (3.13), (3.14) e (3.15). Com base nesta solução é possível também, obter as forças transientes desbalanceadas atuantes no sistema.

Neste trabalho foram utilizados dois métodos para solução do sistema. Um método analítico baseado na metodologia apresentada por GOODLING [9] e um método numérico baseado no método das características para solução do sistema.

3.1.1.1 Método Analítico

O método analítico foi desenvolvido com base na metodologia apresentada por GOODLING [9] que é comumente utilizado nos projetos de engenharia como boas práticas de engenharia. Este método tem como objetivo o cálculo da máxima pressão de onda desenvolvida em cada trecho reto de tubulação do sistema por meio da solução analítica das equações (3.13), (3.14) e (3.15). Esta metodologia considera apenas as forças desbalanceadas geradas pela primeira passagem da onda de pressão. As forças geradas pelas subseqüentes passagens da onda de pressão (Zona Transiente) são ignoradas por se tratarem de forças de menor magnitude (ver figura 1).

Para desenvolvimento do método analítico, algumas hipóteses relacionadas ao fluido e fluxo foram adotadas, sendo elas:

- Tubulação considerada rígida, portanto os efeitos de flexibilidade do tubo na velocidade da onda de pressão são desprezados;
- Atrito entre fluido e tubo é desprezado;
- As variações das propriedades do fluido ocorrem isoentropicamente;
- Fluido considerado como Gás Ideal com calor específico constante.

Com base na primeira hipótese apresentada acima, podemos simplificar a equação da velocidade da onda de pressão, uma vez que a tubulação é considerada rígida, o termo dA/dp pode ser desprezado e, portanto a equação (3.13) pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{dp}{dp} \quad (3.16)$$

Aplicando a segunda hipótese a equação (3.14), obtemos:

$$\frac{dV}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (3.17)$$

Conforme as leis da termodinâmica a variação de entropia para uma substância pura pode ser calculada por meio de equação abaixo

$$Tds = dh - \frac{dP}{\rho} \quad (3.18)$$

Na qual:

T Temperatura do fluido;

ds Variação de Entropia do fluido;

dh Variação de Entalpia do fluido.

A equação de estado e a variação de entropia de gases ideais podem ser expressas pelas equações (3.19) e (3.20), respectivamente:

$$p = \frac{\rho \cdot R \cdot Z_c \cdot T}{M} \quad (3.19)$$

$$dh = c_p \cdot dT \quad (3.20)$$

Nas quais:

R Constante universal dos gases;

M Massa Molecular do fluido em questão;

C_p Calor específico molar a pressão constante.

Z_c Fator de compressibilidade.

O fator de compressibilidade Z_c para gases ideais é igual a 1, portanto será desprezado no equacionamento abaixo.

Substituindo as equações (3.19) e (3.20) na equação (3.18) temos que:

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{c_p}{T} \cdot dT - R \int_1^2 \frac{dp}{\rho} \quad (3.21)$$

Resolvendo a equação (3.21) e considerando $S_1 = S_2$ (processo isentrópico) obtemos:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^k \quad (3.22)$$

Na qual:

k Razão entre os calores específicos do fluido.

Considerando condições de processo adiabático e isentrópico de um gás ideal (equação 3.22) e substituindo na equação (3.16), obtemos:

$$a = \left(k \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T^{1/2} = \left(\frac{k \cdot R \cdot T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.23)$$

Resolvendo o sistema composto pelas equações (3.15) e (3.17), obtém-se a relação de JOUKOWSKY [10]:

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta V \quad (3.24)$$

A equação (3.24) tem como hipótese implícita que o bloqueio do fluxo ocorre instantaneamente e, portanto a máxima pressão de onda ocorre instantaneamente após o bloqueio do fluxo. Esta hipótese não pode ser adotada para os sistemas de tubulações. Nestes sistemas, o bloqueio do fluxo é determinado pelo tempo de fechamento da válvula (t_c). Assim, para sistemas de tubulações, podemos considerar que a máxima pressão de onda ocorre depois de decorrido o tempo (t_c), ou seja, o acréscimo de pressão no sistema é composto por uma série de acréscimos instantâneos, conforme figura 5.

Figura 5: Variação de pressão no sistema conforme a variação do fluxo. (Adaptado de referência: [11])

GOODLING [9] considerou (t_c) como tempo de fechamento da válvula, entretanto a metodologia utilizada nos projetos de engenharia atualmente considera (t_c) como 75% do tempo necessário para fechamento da válvula (tempo efetivo de fechamento da válvula) [11]. O presente trabalho seguirá a metodologia atual e, portanto valendo-se deste ponto, entende-se (t_c) como o tempo efetivo de fechamento da válvula.

Substituindo a equação (3.23) em (3.24) e multiplicando a mesma pela área de seção transversal da tubulação, obtemos a Força Máxima Desbalanceada Axial (F_{Max}).

$$F_{Max} = \rho AV \left(\frac{k \cdot R \cdot T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

A força máxima desbalanceada axial (F_{Max}) pode ser entendida como a força atuante em uma determinada mudança de direção da tubulação (Curva ou Tê – ponto em análise) quando sujeita a uma onda de pressão com pico igual à máxima pressão de onda.

Para que a força máxima desbalanceada axial (F_{Max}) atue em uma determinada mudança de direção é necessário que o trecho reto de tubulação a montante tenha um comprimento mínimo, possibilitando que a onda de pressão se desenvolva totalmente antes de atingir a mudança de direção. Este comprimento mínimo é denominado comprimento crítico (L_c) e pode ser definido por:

$$L_c = a \cdot t_c \quad (3.26)$$

Nos casos, no qual o comprimento do trecho reto a montante do ponto i em análise (L_i) é menor que o comprimento crítico ($L_i < L_c$) tem-se que a força desbalanceada axial atuante no ponto i (F_{Ati}) será uma fração da força máxima (F_{Max}). Para ($L_i \geq L_c$), a força desbalanceada axial atuante no ponto i será a força máxima (F_{Max}).

$$F_{Ati} = \begin{cases} F_{Max} \cdot \frac{L_i}{L_c}, & L_i < L_c \\ F_{Max}, & L_i \geq L_c \end{cases} \quad (3.27)$$

A variação da força desbalanceada axial atuante no tempo é proporcional à variação de pressão, conforme equação (3.25). Assim sendo, a força desbalanceada axial atinge seu valor máximo depois de decorridos t_c segundos da chegada da onda de pressão no ponto em análise. Esta força permanecerá constante até que a onda de pressão percorra o trecho de tubulação entre o ponto em análise e o reservatório, que no caso de sistemas de vapor é o gerador de vapor, seja refletida no reservatório e retorne até o ponto em análise. Este tempo é definido como o tempo de residência da onda de pressão no ponto de análise (t_{di}). Podemos expressar matematicamente por:

$$t_{di} = 2 \cdot \sum_1^m L_m \cdot \frac{1}{a} \quad (3.28)$$

Na qual:

m Número de trechos retos entre o ponto i em análise e o reservatório;

L_m Comprimento do trecho reto “ m ”.

Conforme já discutido, a onda de pressão viaja pela tubulação no sentido contrário ao fluxo à velocidade a do ponto de bloqueio do fluxo até o reservatório sendo refletida em cada extremidade até que seu efeito seja atenuado. Assim sendo, os pontos de mudança de direção da tubulação não sofrem ação da onda de pressão simultaneamente. Com o intuito de contabilizarmos este efeito, denominaremos (t_r), como o tempo necessário para que a onda de pressão atinja o ponto i em estudo.

$$t_{ri} = \sum_1^j L_j \cdot \frac{1}{a} \quad (3.29)$$

Na qual:

j Número de trechos retos entre o ponto i em análise e a válvula de bloqueio do sistema;

L_j Comprimento do trecho reto " j ".

Na figura 6 é apresentada a forma geral da variação da força desbalanceada no tempo. Com base nos valores de F_{Ati} , t_c , t_r e t_d é possível construir uma curva idealizada da força desbalanceada no tempo para cada mudança de direção da tubulação (ponto i em estudo).

Figura 6: Variação da força desbalanceada no tempo. (Adaptado de referência [11])

A força desbalanceada atuante em cada **trecho reto** de tubulação pode ser definida como a diferença entre as forças desbalanceadas atuantes em suas extremidades (mudanças de direção), conforme a figura 7.

Figura 7: Força desbalanceada atuante em um trecho reto de tubulação. (Adaptado de referência [11])

Com a variação da força desbalanceada no tempo em cada trecho reto de tubulação, pode-se obter a resposta do sistema quando sujeito ao carregamento em estudo por meio de análise pelo método do espectro de resposta ou pelo método de integração numérica no tempo.

3.1.1.2 Método Numérico

O método numérico tem como objetivo o cálculo da máxima pressão de onda desenvolvida em cada trecho reto de tubulação do sistema por meio da solução numérica das equações (3.13), (3.14) e (3.15). O método numérico utilizado é o método das características com a técnica de diferenças finitas de primeira ordem. Neste trabalho utilizou-se o software específico para análise de fluxos em tubulações PIPENET, módulo Transient [12].

Conforme já discutido, tubulações e seus componentes atuam como atenuadores do transiente termo hidráulico transferindo uma parcela da energia da onda de pressão as tubulações por meio de atrito fluido-estrutura. Para consideração do efeito do atrito no transiente hidráulico, os trechos retos de tubulação horizontal serão considerados como elementos elásticos de comprimento definido e com queda de pressão ocasionada pelos efeitos de atrito fluido-estrutura, conforme modelo de Darcy-Weisbach [7].

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.30)$$

O modelo de Darcy-Weisbach (equação 3.30) assume que não há variação de densidade do fluido ao longo da tubulação (fluido incompressível). Segundo a referência [13], nos casos em que a perda de carga esperada no sistema é menor que 40% da pressão a montante do sistema, o modelo de Darcy Weisbach alcança precisão razoável quando o sistema é calculado utilizando-se a densidade média entre as condições a montante e jusante do sistema.

A determinação do fator de atrito de Darcy-Weisbach (f) será realizada por meio da equação de Colebrook-White [7]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.31)$$

Na qual:

K Rugosidade equivalente da parede da tubulação;

R_e Número de Reynolds.

Os trechos retos de tubulação vertical também serão considerados como elementos elásticos de comprimento definido e queda de pressão ocasionada pelo atrito, conforme equação (3.30). A queda de pressão em razão da mudança de elevação será considerada conforme equação abaixo:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot Z \quad (3.32)$$

Na qual:

Z Diferença de Elevação entre o nó inicial e final do elemento.

Curvas e derivações serão consideradas como acessórios de tubulação com queda de pressão ocasionada pelo atrito, conforme equação abaixo:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \rho \cdot V^2 \quad (3.33)$$

O fator de perda de carga do componente é determinado conforme especificado no apêndice A da referência [13].

Válvulas serão codificadas como componentes de tubulação com queda de pressão ocasionada pelo atrito em conforme equação abaixo:

$$\Delta p = \frac{\rho Q |Q|}{\rho_0 C_v^2} \quad (3.34)$$

Na qual:

Q Vazão Volumétrica na tubulação;

ρ_0 Densidade da água nas condições normais de temperatura e pressão;

C_v Coeficiente de fluxo da válvula em questão.

Os coeficientes de fluxo das válvulas são extraídos dos catálogos de fornecedores.

A velocidade da onda de pressão é definida pela equação (3.13), no qual o primeiro termo da equação representa o efeito da compressibilidade do fluido e o segundo termo representa o efeito da flexibilidade do tubo na celeridade da onda de pressão. No modelo numérico, os dois termos são considerados para determinação da velocidade da onda de pressão.

KORTEWEG [14] relacionou os termos da equação (3.13) com as propriedades materiais do fluido e propriedades materiais e geométricas do tubo, respectivamente. As propriedades materiais do fluido foram introduzidas por meio da equação de estado abaixo:

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{K_f}{\rho} \quad (3.35)$$

Na qual:

K_f Módulo de Elasticidade Volumétrica (*Bulk Modulus of Elasticity*).

As propriedades materiais e geométricas do tubo foram introduzidas com base na teoria da elasticidade. KORTEWEG [14] desprezou os efeitos das tensões axiais e os efeitos de inércia da tubulação. Adicionando os efeitos das tensões axiais ao resultado obtido por KORTEWEG [14] obtendo:

$$a^2 = \frac{\frac{K_f}{\rho}}{1 + c \frac{K_f D_i}{eE}} \quad (3.36)$$

Na qual:

e Espessura de parede do tubo;

E Módulo de elasticidade do material do tubo;

e a variável c pode ser definida por:

$$c = \frac{2e}{D_i} (1 - \nu) + \frac{D_i(1-\nu^2)}{D_i + e} \quad (3.37)$$

Na qual:

ν Coeficiente de *Poisson*.

O software PIPENET [12] utiliza-se do método das características com a técnica de diferenças finitas de primeira ordem para solução do sistema composto pelas equações (3.14), (3.15), (3.30) à (3.37) (de acordo com a modelagem do sistema), obtendo como resultado a variação da força desbalanceada no tempo para cada trecho de tubulação. Um exemplo da resposta obtida por meio do software PIPENET [12] é apresentado na figura 8.

Figura 8: Output do software PIPENET - variação da força desbalanceada no tempo

Com a variação da força desbalanceada no tempo em cada trecho reto de tubulação, podemos obter a resposta do sistema quando sujeito ao carregamento em estudo por meio de análise estática equivalente, espectral ou integração numérica.

3.2 Introdução a Análise Estrutural de Tubulações

A análise estrutural de tubulações tem como objetivos principais garantir a integridade estrutural e funcional do sistema de tubulações, avaliar se os carregamentos impostos pelo sistema nos equipamentos, as quais o mesmo está conectado, estão em conformidade com as normas de projetos dos equipamentos (ex.: NEMA SM23 [15], API

610 [16], API 617 [17]) e prover os carregamentos de projeto a serem considerados no projeto das estruturas de suportao do sistema.

O cdigo da indstria ASME B31.1 [3], prescreve os requerimentos de projeto de sistemas de tubulaes a serem instalados em plantas de gerao de energia. Os carregamentos a serem considerados na anlise estrutural e a metodologia de combinao dos mesmos so descritos no cdigo, bem como os critrios de aceitao para cada modo de falha associado ao carregamento.

Atualmente, a metodologia de anlise mais empregada na anlise estrutural de sistemas de tubulaes mtodo dos elementos finitos com o auxlio de softwares comerciais especializados, tais como Intergraph CAESAR II [18], Sigma ROHR2 [19] e Bentley AUTOPIPE [20]. Todos os softwares citados tem capacidade de execuo de anlises estticas de sistemas de tubulaes sujeitas a carregamentos de peso prprio, trmico, presso e vento. Adicionalmente, anlises dinmicas lineares de sistemas de tubulaes sujeitas a carregamentos diversos por meio dos mtodos de espectro de resposta e mtodo da integrao numrica com base no mtodo da superposio modal.

3.2.1 Modelo de Elementos Finitos

O mtodo dos elementos finitos uma ferramenta numrica para obteno de solues aproximadas de um sistema composto por equaes diferenciais. Este mtodo surgiu em meados dos anos 40, sendo que utilizado pela indstria em meados dos anos 50 com o proposito de resolver problemas estruturais da indstria aeronutica [21].

O mtodo dos elementos finitos tem como caracterstica principal a discretizao do sistema em um numero finito de elementos de geometria simples que agrupados representam a forma do sistema. Estes elementos esto conectados entre si por meio de ns, sendo que em cada elemento finito, as variveis envolvidas no problema so aproximadas por meio da interpolao dos seus valores conhecidos no contorno, ou nos ns. Assim, obtm-se um modelo matemtico representado por um conjunto de equaes cujas incgnitas so os valores nodais das variveis de interesse.

Um sistema de tubulaes pode ser idealizado como uma estrutura reticulada tridimensional de mltiplos graus de liberdade. A soluo deste tipo de sistema pode ser obtida por meio do mtodo dos elementos finitos.

O modelo de análise para sistemas deste tipo consiste de uma sequencia de nós conectados por elementos de viga com propriedades de rigidez representando a tubulação e seus acessórios (curvas, derivações, válvulas e etc.). Os nós são localizados de modo a definir a geometria do sistema de tubulações bem como pontos de massa concentrada, localização de suportes, localização de descontinuidades estruturais ou de carregamento ao longo da tubulação. Os suportes de tubulação são idealizados como restrições dos graus de liberdade do sistema do tipo molas com rigidezes apropriadas para sua função.

As massas distribuídas do sistema, tais quais tubulações, massa do fluido e isolamento térmico são representadas por meio da concentração das mesmas nos nós da estrutura (*Lumped Masses Method*). As massas concentradas do sistema, tais quais válvulas, flanges e instrumentos são representados por elementos “rígidos” (Rigidez do elemento >> Rigidez dos elementos de tubo) e concentração de massa nos nós (*Lumped Masses Method*).

As condições de contorno do modelo são determinadas de acordo com o objetivo da análise a ser realizada. Conexões com equipamentos são as condições mais comuns sendo idealizadas como restrições nos seis graus de liberdade da tubulação.

3.2.2 Método da Superposição Modal

A equação do movimento para um sistema de tubulações sem amortecimento pode ser escrita como:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{k}\mathbf{v}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (3.38)$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_j \end{bmatrix} \quad (3.38a)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1j} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{j1} & k_{j2} & \dots & k_{jj} \end{bmatrix} \quad (3.38b)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_j \end{bmatrix} \quad (3.38c)$$

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_j \end{bmatrix} \quad (3.38d)$$

Na qual, m , k , $v(t)$ e $p(t)$ representam as matrizes de massa, rigidez do sistema e os vetores de deslocamento e carregamento respectivamente e j representa o número de nós do sistema.

Matematicamente, a equação (3.38) representa um sistema de equações diferenciais de segunda ordem que pode ser resolvido por qualquer método de solução de equações diferenciais. Entretanto, por se tratar de um sistema com múltiplos graus de liberdade, as matrizes m e k são de ordem elevada o que dificulta a resolução do sistema dado ao grande número de operações a serem realizadas [22].

Expressando o vetor deslocamento $v(t)$ em termos de coordenadas generalizadas, obtemos:

$$v(t) = \Phi Y(t) \quad (3.39)$$

Na qual, Φ é uma matriz quadrada ($n \times n$) independente do tempo e $Y(t)$ é um vetor de ordem n . Os vetores velocidade e aceleração podem ser obtidos por meio da derivação da equação (3.39).

$$\dot{v}(t) = \Phi \dot{Y}(t) \quad (3.40)$$

$$\ddot{v}(t) = \Phi \ddot{Y}(t) \quad (3.41)$$

Substituindo as equações (3.39) e (3.41) na equação (3.38), e pré-multiplicando-a por ϕ_n^{-1} temos:

$$\phi_n^{-1} m \Phi \ddot{Y}(t) + \phi_n^{-1} k \Phi Y(t) = \phi_n^{-1} p(t) \quad (3.42)$$

Reescrevendo a equação (3.42), obtemos:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{Y}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3.43)$$

$$\mathbf{M} = \phi_n^{-1} \mathbf{m} \phi \quad (3.43a)$$

$$\mathbf{K} = \phi_n^{-1} \mathbf{k} \phi \quad (3.43b)$$

$$\mathbf{P} = \phi_n^{-1} \mathbf{p}(t) \quad (3.43c)$$

O objetivo da transformação em coordenadas generalizadas é determinar uma matriz ϕ que propicie a obtenção de uma matriz de rigidez ($\mathbf{K}$) com largura de banda menor do que a matriz de rigidez original do problema ($\mathbf{k}$). Em teoria, existem inúmeras matrizes ϕ que reduzem a largura de banda da matriz de rigidez ($\mathbf{k}$). Na prática, utiliza-se a matriz ϕ obtida por meio da solução do sistema com as condições de vibração livre (análise modal).

$$\mathbf{m}\ddot{v}(t) + \mathbf{k}v(t) = 0 \quad (3.44)$$

Dado as características das matrizes de massa e rigidez temos que o produto entre os vetores de forma modal de frequências diferentes e as matrizes de massa/rigidez são ortonormais, conforme equações abaixo:

$$\phi_m^{-1} \mathbf{m} \phi_n = 0, m \neq n \quad (3.45)$$

$$\phi_m^{-1} \mathbf{k} \phi_n = 0, m \neq n \quad (3.46)$$

$$\phi_n^{-1} \mathbf{m} \phi_n = 1 \quad (3.47)$$

$$\phi_n^{-1} \mathbf{k} \phi_n = \omega_n^2 \quad (3.48)$$

A característica de ortonormalidade descrita acima implica no desacoplamento das equações diferenciais do problema original. Isto é evidenciado substituindo as equações (3.45), (3.46), (3.47) e (3.48) na equação (3.42):

$$\ddot{Y}_n(t) + \omega_n^2 Y_n(t) = \phi_n^{-1} p(t) \quad (3.49)$$

Portanto, o sistema de equações (3.38) é representado pela equação abaixo:

$$\ddot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = \Phi^{-1} p(t) \quad (3.49a)$$

Na qual:

$$\Omega^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (3.49b)$$

$$\phi_n = \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \vdots \\ \phi_{N1} \end{bmatrix} \quad (3.49c)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} \quad (3.49d)$$

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{bmatrix} \quad (3.49e)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \dots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \quad (3.49f)$$

O sistema de equações (3.49a) expressa o sistema das equações (3.38) por meio de n equações diferenciais independentes e cada uma das n equações representam um modo de vibração ϕ_n com frequência ω_n . Assim, o sistema de equações (3.49a) pode ser resolvido independentemente obtendo-se os deslocamentos Y_n , de cada modo, nas coordenadas generalizadas.

Para obtenção da resposta do sistema nas coordenadas geométricas, faz-se uso da equação (3.39) conforme expresso abaixo:

$$v(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n Y_n(t) = \phi_1 Y_1(t) + \phi_2 Y_2(t) + \phi_3 Y_3(t) + \dots + \phi_N Y_N(t) \quad (3.50)$$

Em suma, o método da superposição modal requer, primeiramente, a solução da equação (3.44) para obtenção das frequências e modos de vibração do sistema, após a solução das n equações do sistema (3.49a) e finalmente a superposição das respostas conforme equação (3.50).

3.2.3 Método do Espectro de Resposta por meio do Método da Superposição Modal

Conforme discutido acima, o sistema de equações (3.49a) expressa o sistema das equações (3.38) por meio de n equações diferenciais independentes e cada uma das n equações representa um modo de vibração ϕ_n com frequência ω_n . Este sistema é constituído por equações diferenciais de segunda ordem não homogêneas. O método de solução deste sistema depende do tipo de carregamento (lado direito da equação) aplicado ao sistema.

Um método para solução do problema é a método da análise espectral. A análise espectral consiste no cálculo das respostas máximas do sistema para cada modo de vibração quando submetido a um determinado carregamento. As máximas respostas modais são combinadas e assim obtêm-se a resposta máxima do sistema ao carregamento aplicado.

A análise espectral é comumente utilizada em sistemas de múltiplos graus de liberdade submetidos a carregamentos no qual o comportamento da força no tempo é conhecido. Como exemplos de carregamentos desta natureza têm-se:

- Forças de reação de abertura de válvulas de segurança (PSV's);
- Forças de impacto ocasionadas pelo fluxo (golpe de aríete);

Para estes casos, a análise espectral é conhecida com análise do espectro de força (*Force Spectrum Analysis*).

Para aplicação da análise do espectro de força, primeiramente é necessário à obtenção do espectro do carregamento atuante (*Force Spectrum*). O espectro do carregamento é obtido por meio de medições dos máximos deslocamentos dinâmicos de uma série de osciladores de um grau de liberdade (SDOF – *Single Degree of Freedom*) quando submetidos ao carregamento atuante, conforme figura 9. Com base nos máximos

deslocamentos dinâmicos, obtém-se, para cada oscilador (frequência), o fator de carregamento dinâmico (DLF – *Dynamic Load Factor*) que consiste na razão entre o valor máximo de deslocamento dinâmico e estático causados pela força atuante (figura 10).

Figura 9: Método de obtenção do espectro da força. (Adaptado de Referência: [23])

Figura 10: Exemplo de espectro do carregamento.

Com as frequências do sistema em estudo conhecidas é possível obter os deslocamentos dinâmicos máximos em coordenadas generalizadas para cada modo “ n ” de vibração do sistema por meio da equação abaixo:

$$v_{max_n} = DLF_n \cdot \phi_n \cdot \frac{\phi_n^{-1} \cdot S}{\omega_n^2} \quad (3.50)$$

Na qual:

DLF_n Fator de amplificação dinâmica do modo n ;

S Distribuição espacial do carregamento

Ou seja

$$P(t) = S \cdot f(t) \quad (3.51)$$

A resposta máxima do sistema é obtida por meio da combinação dos deslocamentos dinâmicos máximos para cada modo de vibração do sistema.

Conforme exposto acima, o método do espectro de força supõe linearidade do sistema analisado, uma vez que a resposta máxima do sistema é obtida por meio da combinação das respostas de cada modo de vibração do mesmo (Método da Superposição Modal).

3.2.3.1 Combinação das respostas modais

A análise espectral consiste no cálculo das respostas máximas de cada modo de vibração de um sistema quando submetido a um carregamento conhecido e a combinação das mesmas de modo a obter uma resposta total do sistema.

Em geral, quando o sistema é submetido a um carregamento qualquer, é improvável que todas as respostas máximas modais ocorram ao mesmo tempo, assim faz-se necessário a identificação e adoção de métodos de combinação das respostas modais de modo a obter uma resposta representativa do comportamento do sistema.

3.2.3.2 Combinação das respostas modais individuais

O espectro de resposta de um sistema sujeito a um carregamento dinâmico consiste no somatório de uma resposta periódica (transiente) e uma resposta rígida. Assim, podemos escrever a resposta do sistema como:

$$v_I = [v_{P_I}^2 + v_{R_I}^2]^{1/2} \quad (3.52)$$

Na qual:

v_I Deslocamento total do sistema na direção I ;

v_{PI} Deslocamento devido a resposta periódica do sistema na direção I ;

v_{RI} Deslocamento devido a resposta rígida do sistema na direção I ;

Na figura 11 apresenta-se um espectro de aceleração de um carregamento sísmico. Segundo MORANTE et al [24], modos com frequência abaixo da frequência de pico da aceleração espectral (f_{sp}) ($f_i > f_{sp}$) tem características periódicas, ou seja, são modos com resposta defasada (*out-of-phase response*) em relação ao carregamento e geralmente não estão em fase entre si.

Figura 11: Espectro de aceleração de um carregamento sísmico. (Adaptado de Referência [24])

A combinação das respostas periódicas modais, dado as suas características de defasagem entre si, é realizada por meio do método da raiz quadrada dupla das soma dos quadrados (*DSRSS – Double Square Root of the Sum of Squares*).

$$v_{PI} = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} v_{PIi} v_{PIj} \right]^{1/2} \quad (3.53)$$

Na qual:

ε_{ij} Coeficiente de correlação modal entre os modos i e j ;

v_{Pli} Deslocamento do modo i devido a resposta periódica na direção I ;

v_{Plj} Deslocamento do modo j devido a resposta periódica na direção I ;

O coeficiente (ε_{ij}) de modos não correlatos é definido como:

Para $i = j$

$$\varepsilon_{ij} = 1,0 \quad (3.54)$$

Para $i \neq j$

$$\varepsilon_{ij} = 0.0 \quad (3.55)$$

Com isso, a equação (3.53) fica reduzida ao método da raiz quadrada das soma dos quadrados (*SRSS – Square Root of the Sum of Squares*).

$$v_{P_I} = \left[\sum_{i=1}^n v_{P_{Ii}}^2 \right]^{1/2} \quad (3.56)$$

Para modos com frequências numericamente próximas (*Closed Spaced Modes*), a característica de defasagem entre si não é totalmente verdadeira, portanto métodos de correção foram definidos para contabilizar estes efeitos. Segundo a USNRC [25], a definição de frequências modais próximas é:

- Sistemas com razão de amortecimento (η) $\leq 2\%$: Modos consecutivos (i e j , $f_i < f_j$) são considerados numericamente próximos se o espaçamento entre suas frequências for igual ou menor a razão de 10%.

$$f_i \leq 1.1 \cdot f_j \quad (3.57)$$

Na qual:

f_i frequência de vibração do modo i ;

f_j frequência de vibração do modo j ;

- Sistemas com razão de amortecimento (η) $\geq 2\%$: Modos consecutivos (i e j , $f_i < f_j$) são considerados numericamente próximos se o espaçamento entre suas frequências for igual ou menor a razão de cinco vezes a razão de amortecimento do sistema.

$$f_i \leq (1 + \eta \cdot 5) \cdot f_j \quad (3.58)$$

Na qual:

η razão de amortecimento;

Para casos em que as frequências modais sejam definidas com numericamente próximas, as correlações de ROSENBLUETH et al [26] ou WILSON et al [27] devem ser utilizadas.

Os modos com frequência na região delimitada por f_{sp} e f_{zpa} ($f_{sp} < f_i < f_{zpa}$), no qual f_{zpa} é a frequência de aceleração de período zero (*Zero Period Acceleration*), são compostos por um componente de resposta periódica e um componente de resposta rígida (*in-phase response*). Vários métodos foram desenvolvidos com o intuito de separar os componentes periódicos e rígidos. Dentre estes métodos, os mais utilizados são o método de GUPTA et al [28] e o método de LINDSEY-YOW et al [29]. Os componentes de respostas modais periódicos obtidos devem ser combinados com outros componentes de resposta modal periódicos do sistema por meio do método *SRSS*. Já os componentes de respostas modais rígidos devem ser combinados algebricamente com outros componentes de resposta modal rígidos.

Os modos com frequência maior que f_{zpa} ($f_i > f_{zpa}$) são caracterizados por resposta predominante rígida, ou seja, em fase com o carregamento. Estes modos são considerados por meio de métodos de correção estática.

3.2.3.3 Método de Correção Estática

Segundo BATHE et al. [22], uma análise por elementos finitos em certas condições pode ser entendida com uma análise de Ritz, e esta produz excelente aproximação dos primeiros modos de vibração e suas frequências associadas, entretanto a aproximação é imprecisa para altas frequências. Assim, a inclusão dos modos de vibração

com frequências acima de f_{zpa} , acarreta em imprecisão na resposta do sistema e, portanto os mesmos são truncados da análise.

Entretanto, embora os resultados de deslocamentos obtidos por meio da utilização dos primeiros modos de vibração sejam satisfatórios, esforços em restrições, forças e tensões requerem a utilização de modos de vibração de alta frequência para que uma boa precisão seja alcançada, portanto a contabilização da contribuição pseudoestática se faz necessário.

Várias metodologias foram desenvolvidas para contabilização da massa faltante (*Missing Mass Methods*) contida nos modos de frequência maior que f_{zpa} . O método mais utilizado é o Método do Modo Residual (*Residual Mode Method*).

Neste método, as contribuições dos modos de frequência maior que f_{zpa} são agrupadas em um modo residual com frequência fictícia (f_{zpa}), sendo o fator de amplificação do modo residual correspondente a frequência fictícia.

Para análises sísmicas, verifica-se a precisão da resposta obtida por meio da análise do total da massa da estrutura capturada pelo número de modos considerados e caso 90% da massa seja capturada, a análise é considerada aceitável [24, 29]. Não foram encontrados na literatura estudos similares para análises de espectro de força.

3.2.3.4 Combinação dos componentes espaciais e modais

Forças de impacto ocasionadas pelo fluxo (*Steam Hammer*) constituem um tipo de carregamento que pode ser analisado por meio de uma análise espectral. Este tipo de carregamento ocorre em todas as mudanças de direção (curvas) do sistema, ocasionando solicitações em direções diversas, portanto, as componentes de respostas devem ser combinadas espacialmente.

As componentes espaciais de resposta são, normalmente, combinadas por meio do método SRSS, entretanto, a ordem de combinação de respostas Espacial – Modal ou Modal – Espacial depende do tipo de carregamento e das características geométricas do sistema em estudo.

Os carregamentos são considerados DEPENDENTES, quando uma variação no carregamento em uma direção específica ocasiona uma correspondente variação nos

carregamentos nas outras direções. Neste caso, as combinações espaciais devem preceder as modais.

Carregamentos INDEPENDENTES são carregamentos nos quais não há relação entre as componentes do carregamento, ou seja, uma variação no carregamento em uma direção específica não ocasiona variação nos carregamentos nas outras direções. Neste caso, as combinações modais devem preceder as combinações espaciais.

Em suma, temos que a ordem de combinação de respostas (Espacial – Modal) deve seguir o seguinte critério:

Combinação Espacial – Combinação Modal → Carregamentos **Dependentes**

Combinação Modal – Combinação Espacial → Carregamentos **Independentes**.

Segundo a IEEE [30], terremotos produzem movimentos de solos aleatórios que são caracterizados por simultâneos, porém estatisticamente independentes movimentos horizontais e verticais. Assim, segundo a USNRC [25], primeiramente deve ser realizada a combinação modal e, após, a combinação espacial por meio do método SRSS. Não foram encontrados na literatura estudos similares para análises de espectro de força, entretanto os procedimentos atuais da indústria sugerem a consideração do evento de *Steam Hammer* como carregamentos dependentes.

3.2.4 Método da Integração Numérica por meio do Método da Superposição Modal

Conforme discutido, a análise espectral consiste basicamente no cálculo das respostas máximas de cada modo de vibração do sistema quando submetido a um carregamento conhecido e a combinação das mesmas de modo a obter uma resposta total do sistema.

Uma alternativa menos conservadora para solução do sistema de equações (3.43) é o método da integração numérica. Este método consiste na integração numérica do sistema de equações (3.43) e, por se tratar de uma solução numérica (*Step-by-Step Approach*), este método é também conhecido como análise de histórico no tempo (*Time History Analysis*).

A essência do método da integração numérica é a solução da equação (3.43) em intervalos discretos de tempo Δt , o que representa a obtenção da condição de equilíbrio entre as forças inerciais, de rigidez em cada intervalo de tempo analisado. Para tal, faz-se necessário assumir a variação de deslocamentos, velocidades e acelerações em cada intervalo de tempo Δt e as formas assumidas de variação destas variáveis determinam a precisão, estabilidade e o custo computacional da solução do problema. A solução é obtida por meio de métodos numéricos consagrados como o método da diferença central (*Central Difference Method*), método de Newmark (*Newmark Method*) ou o método de Wilson θ (*Wilson θ Method*), sendo estes classificados como explícitos ou implícitos de acordo com suas características de discretização do tempo.

Métodos explícitos são caracterizados por definir o estado de equilíbrio de um determinado sistema em no instante futuro de tempo $(t + \Delta t)$ com base no estado de equilíbrio do sistema no instante atual (t) e anterior $(t - \Delta t)$. Estes métodos são condicionalmente estáveis, ou seja, acima de um valor crítico de passo (Δt_{cr}) a solução obtida torna-se instável. Em grande maioria dos casos, o valor crítico de passo (Δt_{cr}) é pequeno em relação ao tempo total de simulação do sistema, com isso uma grande quantidade de passos é necessária para atingir a solução, entretanto o custo computacional de cada passo é relativamente baixo. Métodos explícitos são eficientes somente para sistemas sujeitos a carregamentos transientes de curta duração (ex.: Carregamentos de Explosão ou Impacto), no qual os modos de alta frequência tem grande importância. Um exemplo de método explícito é o método da diferença central (*Central Difference Method*).

Métodos implícitos são caracterizados por definir o estado de equilíbrio de um determinado sistema em no instante futuro de tempo $(t + \Delta t)$ com base no estado de equilíbrio do sistema no instante atual (t) e do estado futuro $(t + \Delta t)$. Estes métodos são incondicionalmente estáveis, ou seja, não há limitação no valor de passo a ser adotado na solução, embora valores elevados ocasionem perda de precisão da solução. Em comparação com os métodos explícitos, o método implícito apresenta maior custo computacional de cada passo, entretanto a quantidade de passos necessária para atingir a solução é menor. Os métodos implícitos são eficientes para sistemas sujeitos a carregamentos transientes de longa duração (ex.: terremotos), no qual os modos de baixa frequência tem grande importância bem como para sistemas sujeitos a carregamentos

transientes de curta duração. Um exemplo de método implícito é o método de Wilson θ (*Wilson θ Method*).

Os softwares comerciais de análise de tensões em tubulações (ex.: CAESAR II, ROHR2, PIPESTRESS) utilizam-se de métodos implícitos para solução de sistemas por meio do método da integração numérica. O método de Wilson θ (*Wilson θ Method*), que é utilizado pelo software comercial INTERGRAPH CAESAR II [31], será descrito abaixo.

3.2.4.1 Método de Wilson θ (*Wilson θ Method*)

O método de Wilson θ assume que a aceleração varia linearmente entre o instante atual de tempo (t) e instante futuro de tempo ($t + \theta\Delta t$), conforme figura 12. O parâmetro θ deve ser sempre maior que 1 e para $\theta \geq 1,37$ o método é incondicionalmente estáveis. Segundo WEAVER JR. [32], o valor ótimo de θ é 1,420815 podendo ser arredondado para 1,42.

Figura 12: Variação linear da aceleração assumida pelo método de Wilson θ . (Referencia: [22])

Conforme o método de Wilson θ , temos que:

$$\ddot{Y}(t+\tau) = \ddot{Y}(t) + \frac{\tau}{\theta\Delta t} (\ddot{Y}(t+\theta\Delta t) - \ddot{Y}(t)) \quad (3.59)$$

Na qual:

τ Incremento de tempo no qual $0 \leq \tau \leq \theta\Delta t$

$\ddot{Y}(t+\tau)$ Aceleração em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \tau)$

$\ddot{Y}^{(t)}$ Aceleração em coordenadas generalizadas no instante de tempo t

$\ddot{Y}^{(t+\theta\Delta t)}$ Aceleração em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

Integrando a equação (3.59) obtemos:

$$\dot{Y}^{(t+\tau)} = \dot{Y}^{(t)} + \tau \ddot{Y}^{(t)} + \frac{\tau^2}{2\theta\Delta t} (\ddot{Y}^{(t+\theta\Delta t)} - \ddot{Y}^{(t)}) \quad (3.60)$$

Na qual:

$\dot{Y}^{(t+\tau)}$ Velocidade em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \tau)$

$\dot{Y}^{(t)}$ Velocidade em coordenadas generalizadas no instante de tempo t

$\dot{Y}^{(t+\theta\Delta t)}$ Velocidade em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

Integrando a equação (3.60) obtemos:

$$Y^{(t+\tau)} = Y^{(t)} + \tau \dot{Y}^{(t)} + \frac{1}{2} \tau^2 \ddot{Y}^{(t)} + \frac{\tau^3}{6\theta\Delta t} (\ddot{Y}^{(t+\theta\Delta t)} - \ddot{Y}^{(t)}) \quad (3.61)$$

Na qual:

$Y^{(t+\tau)}$ Deslocamento em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \tau)$

$Y^{(t)}$ Deslocamento em coordenadas generalizadas no instante de tempo t

$Y^{(t+\theta\Delta t)}$ Deslocamento em coordenadas generalizadas no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

Escrevendo as equações (3.60) e (3.61) para $\tau = \theta\Delta t$

$$\dot{Y}^{(t+\theta\Delta t)} = \dot{Y}^{(t)} + \frac{\theta\Delta t}{2} (\ddot{Y}^{(t+\theta\Delta t)} + \ddot{Y}^{(t)}) \quad (3.62)$$

$$Y^{(t+\theta\Delta t)} = Y^{(t)} + \theta\Delta t \cdot \dot{Y}^{(t)} + \frac{\theta^2\Delta t^2}{6} (\ddot{Y}^{(t+\theta\Delta t)} + 2 \cdot \ddot{Y}^{(t)}) \quad (3.63)$$

A solução para os deslocamentos, velocidades e acelerações no instante de tempo $(t + \Delta t)$ é obtida por meio da equação (3.43) considerada para o instante $(t + \theta\Delta t)$, conforme abaixo:

$$M\ddot{Y}^{(t+\theta\Delta t)} + KY^{(t+\theta\Delta t)} = \bar{F}^{(t+\theta\Delta t)} \quad (3.64)$$

$$\bar{F}^{(t+\theta\Delta t)} = F^{(t)} + \theta(F^{(t+\theta\Delta t)} - F^{(t)}) \quad (3.65)$$

Na qual:

$F^{(t+\theta\Delta t)}$ Carregamento no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

$F^{(t)}$ Carregamento no instante de tempo t

O apêndice A apresenta um fluxo de cálculo para aplicação do método de Wilson θ a programas computacionais. Este fluxo está baseado no trabalho de BATHE [22].

4 METODOLOGIA

4.1 Estudo de Caso – Unidade de Geração de Energia 170 MW

Neste trabalho estudaremos o comportamento dinâmico do sistema de tubulações de alta pressão de uma unidade de geração de energia. O sistema é composto por uma caldeira que fornecem vapor superaquecido a pressão de 154 bar e temperatura de 567 °C, a uma turbina com potencial nominal de 170 MW por meio de duas válvulas de bloqueio principal e um bocal de admissão, conforme figura 13.

Figura 13: Sistema de Vapor de Alta Pressão.

O comprimento total do sistema é de aproximadamente 550 m compostos por vários segmentos retos de tubulação contendo tubos com diâmetro nominal variando de 12 a 16 polegadas e transportando vapor superaquecido a uma vazão mássica de 52,5 kg/s e densidade aproximada de 43 kg/m³. A tabela 1 apresenta os dados geométricos e comprimento reto de tubulação dos trechos indicados na figura 13.

Tabela 1: Dados geométricos do sistema

Trecho	DN (mm)	e (mm)	L (m)
#1	406,4	36,53	16,3
#2	406,4	36,53	10,4
#3	406,4	36,53	14,7
#4	406,4	36,53	23,6

Trecho	DN (mm)	e (mm)	L (m)
#5	323,8	31,75	10,6
#6	323,8	31,75	20,5
#7	323,8	31,75	24,7
#8	323,8	31,75	12,9
#9	323,8	31,75	11,5

Na qual:

D_n Diâmetro nominal da tubulação

e espessura de parede da tubulação

L comprimento reto de tubulação do trecho

A tabela 2 apresenta os dados de materiais do sistema.

Tabela 2: Dados de materiais do sistema

Material Tubulação	ρ_m (kg/m ³)	E (GPa)	ν
AL ASTM A335 Gr. P91	7640	213,7	0,3

O carregamento termo hidráulico de *Steam Hammer* aplicado ao sistema é ocasionado pelo fechamento rápido (0,07 s) das válvulas de bloqueio principal do sistema em razão da ocorrência de um desarme por sobrevelocidade na turbina. A capacidade de aquecimento da caldeira não é afetada pela ocorrência do transiente, isso dado a grande inércia térmica deste tipo de equipamento. Com isso, a vazão mássica de vapor na saída da caldeira pode ser considerada como constante durante a simulação.

O código da indústria aplicável ao sistema em estudo é o ASME B31.1 [3]. As tabelas 3 e 4 definem os carregamentos considerados na simulação, a combinação de carregamentos e o modo de falha associado a cada caso de análise.

Tabela 3 - Classificação de carregamento segundo ASME B31.1.

Classificação	Característica	Carregamentos
Permanente (SUS)	Estático	Peso próprio da tubulação
	Estático	Peso do isolamento
	Estático	Peso do fluido
	Estático	Peso das válvulas e demais

Classificação	Característica	Carregamentos
		acessórios de tubulação
Expansão (EXP)	Estático	Temperatura
Ocasionais (OCC)	Dinâmico	Força de impacto ocasionada pelo fluxo (<i>Steam Hammer</i>)

Tabela 4 - Combinação de carregamentos estáticos e dinâmicos conforme ASME B31.1.

Caso de Análise	Combinação de Carregamentos	Verificação	Modo de Falha Associado
1	SUS	Deslocamentos, Tensões, Esforços em Restrições e Bocais.	Colapso Plástico
2	EXP	Deslocamentos, Tensões, Esforços em Restrições.	Fadiga de Baixo Ciclo
3	OCC	Deslocamentos, Esforços em Restrições.	-
4	SUS + OCC	Deslocamentos, Tensões, Esforços em Restrições e Bocais.	Colapso Plástico
5	SUS + EXP + OCC	Deslocamentos, Esforços em Restrições e Bocais.	-

4.2 Modelo de Caracterização do Transiente Termo hidráulico de *Steam Hammer*

Conforme discutido no item 3, neste trabalho foram utilizados um método analítico e um método numérico para caracterização do transiente termo hidráulico de *Steam Hammer*. Nas seções abaixo serão descritos os modelos utilizados em cada método.

4.2.1 Método Analítico – Planilha Eletrônica

O modelo para obtenção das forças desbalanceadas pelo método analítico foi construído em planilha eletrônica (Microsoft Excel) com base nas equações apresentadas no item 3.1.1.1.

4.2.2 Método Numérico – Modelo Pípenet

O modelo para obtenção das forças desbalanceadas pelo método numérico foi construído no software PIPENET, módulo Transient. Este modelo é composto por trechos retos de tubulação, curvas, conexões tipo Tês e válvulas, conforme figura 14.

Figura 14: Modelo Pípenet.

A simulação do trecho interno da caldeira foi realizada por meio de uma tubulação equivalente. O trecho interno compreende dois evaporadores e uma tubulação de interligação, sendo a perda de carga total no interno da caldeira expressa pelo somatório das perdas de carga nos evaporadores e tubulação de interligação. Para a tubulação equivalente, adotou-se diâmetro nominal de 10 polegadas e comprimento de 300 m e calculou-se a perda de carga desta tubulação por meio do modelo de Darcy-Weisbach. O memorial de cálculo da perda de carga equivalente é apresentado no Apêndice B.

Os valores perda de carga K das válvulas e coeficiente de fluxo C_v foram fornecidos ao programa de acordo com os catálogos de fornecedores de válvulas. Os valores de perda de carga K dos acessórios de tubulação utilizados foram extraídos da base de dados do programa.

A vazão mássica de vapor na saída da caldeira foi considerada constante durante a simulação.

O sistema foi simulado em regime permanente. O valor da pressão de entrada na turbina obtido nesta simulação foi utilizado como condição inicial do sistema para a simulação do regime transiente.

A simulação do carregamento termo hidráulico de *Steam Hammer* foi efetuada por meio do fechamento das válvulas de bloqueio. Este fechamento foi iniciado 2 segundos após o início da simulação e o tempo de fechamento das válvulas, conforme documentação do fornecedor é de 0,07 s.

O tempo total de simulação foi de 10 s e o passo (*time step*) utilizado para a simulação foi de 1,48 ms. O valor do passo foi calculado automaticamente pelo software Pipenet – Transient.

Os dados de entrada considerados na simulação do modelo numérico estão descritos no Apêndice C.

4.3 Modelo de Análise Estrutural em Tubulações – CAESAR II

O modelo de análise de tensões por elementos de vigas foi construído no software COADE CAESAR II, versão 2014 [18]. Este modelo é composto por trechos retos de tubulação, curvas, válvulas, suportes e conexões com equipamentos.

Os trechos retos de tubulação foram codificados como elementos de viga definidos por dois pontos de conexão (*node points*), um em cada extremidade, com seis graus de liberdade (três translacionais e três rotacionais) cada um, conforme descrito na figura 15.

Figura 15: Modelo de Elemento de Viga.

A matriz de rigidez do elemento de tubo reto foi determinada pelo programa por meio do método dos deslocamentos unitários [33] (*Unit-displacement Method*) com base nos parâmetros geométricos (diâmetro da tubulação, espessura de parede e etc.) fornecidos ao software, sendo estes parâmetros constantes ao longo do elemento.

Os comprimentos dos trechos retos de tubulação foram discretizados, conforme metodologia descrita por MUNSON et al [34], de modo a obter uma matriz de massa concentrada (*Lumped Masses Matrix*) representativa do comportamento do sistema. A metodologia descrita por MUNSON et al [34] estabelece que uma vez determinada a frequência de aceleração de período zero (f_{zpa}) é possível determinar a distância máxima entre pontos de massa concentrada de modo que todos os modos de vibração com frequência menor que (f_{zpa}) sejam capturados. De acordo com esta metodologia, a distância máxima entre pontos de massa concentrada, ou seja, o comprimento máximo do elemento de trecho reto de tubulação pode ser determinado por:

$$L_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{1,57}{f_{zpa}} \right)^{0,5} \left(\frac{EI}{W} \right)^{0,25} \quad (4.1)$$

Na qual:

L_{max} Comprimento máximo do elemento de tubo reto

I Momento de inércia do elemento de tubulação

W Peso próprio da tubulação por unidade de comprimento

O memorial de cálculo do comprimento máximo dos trechos retos de tubulação é apresentado no Apêndice D.

A matriz de massa do elemento de tubo reto foi determinada por meio da concentração das massas nos nós da estrutura (*Lumped Masses Method*).

As curvas da tubulação foram codificadas como elementos curvos definidos por três pontos (*node points*), sendo um em cada extremidade e um no ponto central do elemento, com seis graus de liberdade (três translacionais e três rotacionais) cada um.

A matriz de rigidez do elemento de curva foi determinada pelo programa por meio do método dos deslocamentos unitários (*Unit-displacement Method*) com base no

trabalho de CHEN [35] e nos parâmetros geométricos (diâmetro da tubulação, espessura de parede e etc.) fornecidos ao software, sendo estes parâmetros constantes ao longo do elemento.

As conexões tipo Tê foram modeladas como elementos de tubo sendo aplicados fatores de intensificação de tensões (SIF) automaticamente pelo programa, conforme estabelecido em norma da indústria ASME B31.1. Acessórios de tubulação tipo redução foram modelados como elementos de tubo reto com variação de geometria ao longo do comprimento.

As válvulas foram modeladas como elementos de viga de tubo reto com espessura de parede 10 vezes maior que a tubulação. Com isso, temos que o elemento válvula é indeformável (rigidez da válvula $\gg$ rigidez dos elementos de tubulação). Os pesos do elemento de válvula foram definidos com base em documentação dos fabricantes. A distribuição de massa foi executada com base nos desenhos dimensionais da válvula, de modo a obter uma matriz de massa compatível com a distribuição da mesma.

Os suportes foram modelados como restrições nos graus de liberdade dos elementos de tubulação (curvas e trechos retos) de acordo com sua função. A rigidez do suporte considerada foi 1×10^5 N/mm na direção de restrição de movimento.

Conexões com equipamentos foram representadas como ancoragens, ou seja, restrições nos seis graus de liberdade, com rigidez de 1×10^7 N/mm para graus de liberdade translacionais e 1×10^{12} N.mm/deg para os graus de liberdade rotacionais.

As análises dinâmicas executadas (espectro de resposta e integração numérica) baseiam-se no método da superposição modal, portanto assume-se linearidade do modelo. A linearização de contato foi garantida por meio das considerações listadas abaixo:

- A situação dos suportes unidirecionais (tipo apoio) (suporte ativo ou perda de apoio) foi avaliada previamente à análise dinâmica por meio de uma análise estática. O resultado da análise estática (suporte ativo ou perda de apoio) foi considerado na análise dinâmica, sendo esta condição constante durante a ocorrência do transiente. (linearização do suporte);

- Suportes tipo guia com folgas foram codificados como restrições sem folgas (no gaps);
- O atrito entre tubulação e suportes foi desprezado.

Os dados de entrada considerados na simulação do modelo numérico estão descritos no Apêndice E.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O caso de estudo descrito no item 4.1 foi analisado por meio da análise de espectro de resposta e método da integração numérica com superposição modal, utilizando os carregamentos obtidos por meio dos métodos analítico e numérico, conforme tabela 5. Nesta seção, os resultados das análises executadas são apresentados.

Tabela 5 - Matriz de análises

	Análise de Espectro de Resposta	Método da Integração Numérica com Superposição Modal
Carregamento - Método Analítico	X	X
Carregamento - Método Numérico	X	X

As forças desbalanceadas ocasionadas pelo transiente termo hidráulico foram calculadas por meio dos métodos analítico e numérico para os 09 trechos retos de tubulação descritos na figura 16.

Figura 16: Pontos de Análise do Sistema – Força Desbalanceada.

Tomando-se como base os dados de força desbalanceada no tempo foi criado, para cada trecho reto analisado, o espectro da força por meio do software *DLF/Spectrum Generator* que compõe o pacote da INTERGRAPH CAESAR II. Estes espectros foram

utilizados para execução da análise por meio espectro de resposta. A tabela 6 apresenta os dados de frequência de corte e combinações de respostas modais utilizados nas análises por meio do espectro de resposta. Para outros dados de entrada, ver apêndice E.

Tabela 6: Dados - Análise Espectro de Resposta

Combinação das respostas modais individuais	SRSS
Ordem de Combinação de Respostas	Espacial - Modal
f_{zpa} (Hz)	260

Para execução das análises pelo método de integração numérica, as curvas de força desbalanceada no tempo, para cada trecho reto analisado, foram carregados no software INTERGRAPH CAESAR II. A tabela 7 apresenta os dados de passo (*time step*) e frequência de corte utilizados nestas análises. Para outros dados de entrada, ver apêndice E.

Tabela 7: Dados - Análise - Integração Numérica

f_{zpa} (Hz)	time step (ms)
260	0,66

As forças desbalanceadas obtidas pelo método analítico e numérico e seus espectros foram comparadas. Foram comparadas também, as forças atuantes nos suportes e no bocal da turbina obtida por meio das quatro análises realizadas. Finalmente, foram comparadas as tensões obtidas para cada uma das análises com os valores admissíveis da norma da indústria ASME B31.1 [3].

5.1 Comparação Forças Desbalanceadas

Na figura 17 apresenta-se a comparação entre as forças obtidas pelo método analítico e numérico.

Figura 17: Comparação Forças Desbalanceadas (Método Analítico e Numérico).

Analisando a figura acima, temos que para as forças F_1 e F_3 , as forças desbalanceadas máximas calculadas pelo método numérico são conservadoras em relação ao método analítico. Este resultado pode ser explicado pelo fato de a curva obtida pelo método analítico não capturar os efeitos de inércia do fluido, conforme figura 6.

Entretanto, quando analisamos as forças F_4 e F_7 , temos que as desbalanceadas máximas calculadas pelo método analítico são conservadoras em relação ao método numérico.

Definindo o desvio das forças desbalanceadas máximas calculadas pelo método analítico em relação ao método numérico como:

$$\%_{Desvio} = \frac{F_{Max(Analítico)} - F_{Max(Num)}}{F_{Max(Num)}}$$

Na figura 18 apresenta-se a variação do desvio das forças desbalanceadas com a distância entre o ponto em análise e a válvula de bloqueio. Quanto maior a distância do ponto em análise à válvula de bloqueio, maior o desvio das forças desbalanceadas máximas. Este comportamento é explicado pelo fato de que, conforme for maior a distância entre o ponto em análise e a válvula de bloqueio, maiores serão a influência dos efeitos de perda de carga singulares e perda de carga ocasionada pelo atrito entre fluido-tubulação, efeitos

estes que foram desprezados durante o equacionamento do método analítico, conforme descrito no item 3.1.1.1.

Figura 18: Variação do desvio das forças desbalanceadas máximas.

Entretanto, na figura 18, o comportamento das forças desbalanceadas máximas F_4 e F_7 diverge do comportamento esperado. Esta divergência deve-se ao fato dos comprimentos dos trechos retos a montante dos pontos 4 e 7 serem próximos ao comprimento crítico (L_c). Conforme equação 3.26, o comprimento crítico (L_c) é diretamente proporcional ao tempo de fechamento da válvula (t_c).

Na figura 19 é apresentado o desvio das forças desbalanceadas máximas para diversos valores de (t_c). Analisando a mesma, temos que conforme maior o tempo de fechamento da válvula (t_c), menor a distorção provocada pelo comprimento crítico (L_c) e, portanto, o sistema tende ao comportamento esperado.

Figura 19: Variação do desvio das forças desbalanceadas máximas para diversos valores de t_c .

Em suma, quanto maior a distância entre o ponto em análise e a válvula de bloqueio, maiores serão a influencia dos efeitos de perda de carga singulares e perda de carga ocasionada pelo atrito entre fluido-tubulação e, portanto as forças desbalanceadas máximas obtidas pelo método analítico são conservadoras em relação ao método numérico. Quanto menor a distância entre o ponto em análise e a válvula de bloqueio, maior a influencia dos efeitos de inércia do fluido são predominantes, portanto as forças desbalanceadas máximas obtidas pelo método numérico são conservadores em relação ao método analítico.

Na figura 20 apresenta-se a comparação entre os espectros das forças F3 obtidas pelo método analítico e numérico.

Figura 20: Espectro das Forças Desbalanceadas.

O fator de amplificação máximo da força desbalanceada F3 obtido pelo método numérico é maior em comparação com o método analítico (1.95 x 1.91, respectivamente). Com isso, temos que a execução de análises estática equivalente (utilizando DLF máximo do espectro) com base nas forças obtidas pelo método analítico pode conduzir a resultados não conservadores em comparação com a análise baseada nas forças obtidas pelo método numérico. Adicionalmente, comparando os fatores de amplificação obtidos com o valor utilizado na abordagem clássica da indústria para análises estáticas equivalentes ($DLF = 2$), temos que ambos os modelos (analítico e numérico) produzem resultados conservadores em relação a abordagem clássica.

Para todas as outras forças desbalanceadas, o fator de amplificação máximo obtido pelo método analítico é maior em comparação com o método numérico.

5.2 Esforços Atuantes nos Suportes

Foram avaliados os esforços em quatro suportes do sistema (Nós 210, 2510, 5710, 8210). Estes suportes são suportes do tipo trava, ou seja, restringem o deslocamento longitudinal da tubulação. Na figura 21 estão indicadas as posições do suporte e a direção das forças desbalanceadas atuantes próximas aos mesmos.

Figura 21: Pontos de análise - Esforços nos Suportes.

As tabelas 8 e 9 apresentam a comparação entre os valores de esforços nestes suportes para o caso de análise 3 (OCC) da tabela 4 obtidos em cada análise executada. Pode-se observar que, conforme esperado, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico.

Tabela 8: Comparação esforços nos suportes - Nós 210 e 2510.

Análise	Nó 210			Nó 2510		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
Espectro de Resposta - Analítico	0	16435	5220	7200	5910	41655
Espectro de Resposta - Numérico	0	10510	3193	4853	3734	26533
Integração Direta - Analítico	0	13403	2064	1452	1413	25710
Integração Direta - Numérico	0	8694	1086	762	929	15716

Tabela 9: Comparação esforços nos suportes - Nós 5710 e 8210 (Fonte: Autor)

Análise	Nó 5710			Nó 8210		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
Espectro de Resposta - Analítico	44858	8061	0	42624	9642	0
Espectro de Resposta - Numérico	34184	6456	0	34544	8556	0
Integração Direta - Analítico	26041	2161	0	30420	2508	0
Integração Direta - Numérico	19873	1317	0	23773	2272	0

Analisando o caso do suporte 2510, temos que o desvio nos resultados obtidos para forças na direção z são da ordem de 165%, conforme figura 22.

Figura 22: Esforço atuante na direção z - Nó 2510.

Na tabela 10 são apresentados os resultados de esforços atuantes no suporte (Nó 2510) para o caso 5 (SUS + EXP + OCC) da tabela 4.

Tabela 10: Comparação esforços no suporte - Nó 2510 - Caso 5.

Análise	Nó 2510		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
Espectro de Resposta - Analítico	8552	17967	65779
Espectro de Resposta - Numérico	6206	15791	50656
Integração Direta - Analítico	-1782	-13235	39868
Integração Direta - Numérico	-1836	-12986	31958

Analisando a força na direção z temos que o desvio é da ordem de 105%.

O comportamento dos demais suportes do sistema é igual ao apresentado, ou seja, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico.

5.3 Esforços Atuantes no Bocal da Turbina

Na tabela 11 apresenta-se a comparação entre os valores de esforços atuantes no bocal da turbina para o caso 3 (OCC) da tabela 4.

Tabela 11: Comparação esforços atuantes no bocal da turbina.

Análise	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_x (N.m)	M_y (N.m)	M_z (N.m)
Espectro de Resposta - Analítico	15955	7076	20064	74411	13881	77923
Espectro de Resposta - Numérico	12990	6446	17987	66789	12287	63128
Integração Direta - Analítico	1135	4518	12344	45343	1483	3357
Integração Direta - Numérico	1041	4395	11766	43229	1394	3001

Novamente, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico e o desvio nos resultados obtidos para momentos em torno do eixo x são da ordem de 72%, conforme figura 23.

Figura 23: Esforço atuante no bocal da turbina - Momento em torno do eixo x.

5.4 Tensões Atuantes no Sistema

Foram avaliadas, para cada análise realizada, as tensões atuantes axiais (S_{ax}), de flexão ($S_{flexão}$), torção (S_t), tensão atuante gerada por carregamentos ocasionais conforme ASME B31.1 [3] (S_{occ}), sendo esta ultima comparada com a tensão admissível do material para carregamentos ocasionais (S_h) conforme ASME B31.1[3]. A tensão de flexão ($S_{flexão}$) é definida por:

$$S_{flexão} = (S_{fl}^2 + S_{fc}^2)^{0,5} \quad (5.1)$$

Na qual:

S_{fl} Tensão de flexão atuante no eixo longitudinal da tubulação

S_{fc} Tensão de flexão atuante no eixo transversal da tubulação

Na tabela 12 são apresentados os resultados obtidos de tensão no bocal da turbina (nó 15610) para cada análise realizada. Analisando a mesma, temos que, conforme esperado, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico.

Tabela 12: Comparação tensões atuantes no sistema.

Análise	Nó	S_{ax} (MPa)	S_{fl} (MPa)	S_t (MPa)	S_{occ} (MPa)	S_h (MPa)	S_{occ}/S_h
Espectro de Resposta - Analítico	15610	32,85	34,24	1,92	66,65	102,09	65,3%
Espectro de Resposta - Numérico	15610	32,83	29,37	1,70	61,76	102,09	60,5%
Integração Direta - Analítico	15610	32,79	15,07	0,21	47,15	102,09	46,2%
Integração Direta - Numérico	15610	32,79	14,48	0,19	46,56	102,09	45,6%

Adicionalmente, foram avaliadas as tensões atuantes axiais (S_{ax}), de flexão ($S_{flexão}$), torção (S_t) em três pontos do sistema (nós 8210, 9610 e 15610). Na figura 24 estão indicadas às posições dos nós avaliados e a direção das forças desbalanceadas atuantes próximas aos mesmos.

Figura 24: Pontos de análise – Tensões Atuantes no Sistema.

Na tabela 13 é apresentada a comparação entre os valores de tensões atuantes obtidos em cada análise executada. Pode-se observar que, conforme esperado, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico.

Tabela 13: Tensões atuantes – Nós 8210, 9610 e 15610.

Análise	Nó 8210	Nó 15610	Nó 9610
	S_{ax} (MPa)	S_{fl} (MPa)	S_t (MPa)
Espectro de Resposta - Analítico	32,734	32,240	6,689
Espectro de Resposta - Numérico	32,561	29,374	6,039
Integração Direta - Analítico	32,488	15,066	3,449
Integração Direta - Numérico	32,332	14,479	3,306

Analisando a tensão de flexão atuante no ponto 15610, temos que os desvios nos resultados obtidos são da ordem de 120%, ver figura 25.

Figura 25: Tensão de Flexão – Nó 15610.

Para o caso da tensão axial atuante no ponto 8210, temos que os desvios nos resultados obtidos são da ordem de 1%. Este resultado demonstra que a componente da tensão axial ocasionada pela força desbalanceada é desprezível em relação às outras componentes (ex.: pressão longitudinal). Este resultado era esperado, uma vez que o código ASME B31.1 [3] despreza as componentes de tensões axiais ocasionadas por forças estruturais.

O comportamento dos demais pontos do sistema é igual ao apresentado, ou seja, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o comportamento de um sistema de tubulações de vapor sujeito a um carregamento transiente do tipo *Steam Hammer*. O sistema foi analisado por meio do método da análise espectral e pelo método da integração numérica com superposição modal. O carregamento transiente foi caracterizado por meio de um método analítico, baseado em hipóteses simplificadoras do fluido e fluxo e por meio de método numérico, baseado na solução numérica das equações de momento e de conservação de massa pelo método das características.

Os resultados obtidos foram comparados chegando-se as seguintes conclusões:

- Quanto maior a distância entre o ponto em análise e a válvula de bloqueio, maiores serão a influencia dos efeitos de perda de carga singulares e perda de carga ocasionada pelo atrito e, portanto as forças máximas desbalanceadas calculadas pelo método analítico são conservadoras em relação às calculadas pelo método numérico;
- A precisão do modelo analítico é afetada pela relação entre o comprimento do trecho reto a montante do ponto a ser analisado e o comprimento critico (L_c). Quanto maior o tempo de fechamento de tempo de fechamento da válvula (t_c), menor a distorção provocada pelo comprimento crítico (L_c) e, portanto, maior a precisão do modelo;
- Com relação a esforços atuantes nos suportes, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico, chegando-se a desvios da ordem de 165% quando comparados ao método da integração numérica com carregamento numérico.
- Com relação a esforços atuantes no bocal da turbina, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico, chegando-se a desvios da ordem de 72% quando comparados ao método da integração numérica com carregamento numérico.

- Com relação a tensões atuantes no sistema, os resultados mais conservadores são os obtidos por meio da análise de espectro de resposta com o carregamento obtido pelo método analítico, chegando-se a desvios de 120% para tensões de flexão. Para o caso da tensão axial, temos que os desvios nos resultados obtidos são da ordem de 1%. Este resultado demonstra que a componente da tensão axial ocasionada pela força desbalanceada é desprezível em relação às outras componentes (ex.: pressão longitudinal), sendo o mesmo esperado, uma vez que o código ASME B31.1 despreza as componentes de tensões axiais ocasionadas por forças estruturais.

Em termos gerais a análise por meio do método de espectro de resposta com carregamento obtido pelo método analítico produz resultados conservadores em relação às outras análises realizadas, principalmente em relação a metodologia proposta no trabalho (método da integração numérica com carregamento numérico).

Estes resultados demonstram o grau de conservadorismo aplicado a projetos deste tipo de sistemas quando utilizado os procedimentos da indústria.

A otimização do projeto é obtida por meio da aplicação da metodologia proposta no trabalho, minimizando o grau de conservadorismo em projetos de sistemas deste tipo, evitando-se assim custos adicionais de projeto.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros deixamos as seguintes recomendações:

- Avaliação do efeito da compressibilidade do fluido no método de obtenção das forças desbalanceadas;
- Avaliação do sistema utilizando um método de integração numérica explícito (ex.: Método da Diferença Central)
- Avaliação do efeito das não linearidades de contato (tubulação–suportes) na análise de tensões de sistemas de tubulações sujeitos a carregamentos de *Steam Hammer*.

REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Evaluation of Water Hammer Occurrence in Nuclear Power Plants. NUREG-0927. rev.1. mar. 1984.
- [2] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee. NUREG-1061. v. 4. dez. 1984.
- [3] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Power Piping, 2012. (ASME B31.1).
- [4] LEISHEAR, R. A. Supplement to Fluid Mechanics, Water Hammer, Dynamic Stresses, and Piping Design. ASME Press. 2015;
- [5] MITRA, A. K., ROULEAU, W. T. Radial and Axial Variations in Transient Pressure Waves Transmitted Through Liquid Transmission Lines. ASME Journal of Fluids Engineering. v. 107. p. 105-111, 1985.
- [6] VARDY, A. E., HWANG, K. L. A Characteristic Model of Transient Friction in Pipes. ASCE Journal Hydraulic Research. v. 29. p. 669-685. 1991.
- [7] STREETER, V. L., WYLIE, E. B. Hydraulic Transients. McGraw-Hill. EUA. 1983.
- [8] ALLIEVI, L., Teoria del colpo d'ariete. Atti Collegio Ing. Arch. (Tradução para o Inglês por Halmos, EE 1929). The Theory of Water Hammer. Trans. ASME. 1903 apud GHIDAOU, M. S., ZHAO, M., McINNIS, D. A, AXWORTHY, D. H. A Review of Water Hammer Theory and Practice. ASME Applied Mechanics Reviews. v. 58. P. 49-76. jan. 2005.
- [9] GOODLING, E. C. Simplified Analysis of *Steam Hammer* Pipe Support Loads. ASME Pressure Vessels and Piping. v. 149–157, 1989.
- [10] JOUKOWSKI, N. E., Memoirs of the imperial academy society of St. Petersburg, Proc. Amer. Water Works Association, v. 24, p. 341-424, 1898. apud GHIDAOU, M. S., ZHAO, M., McINNIS, D. A, AXWORTHY, D. H. A Review of Water

- Hammer Theory and Practice. ASME Applied Mechanics Reviews. v. 58. P. 49-76. jan. 2005.
- [11] PENG, L.C, PENG, T.L., Pipe Stress Engineering. ASME PRESS. 2009.
 - [12] SUNRISE Pipenet. versão 1.6.0.509. Sunrise-sys. 2011.
 - [13] CRANE Co., Flow of Fluids – Technical Paper N°410. 1999.
 - [14] KORTEWEG, D. J., Über die fortpflanzungsgeschwindigkeit des schalles in elastischen rohren. Ann. Phys. Chemie. v. 5, p. 525–542, 1878. apud GHIDAOUI, M. S., ZHAO, M., McINNIS, D. A, AXWORTHY, D. H. A Review of Water Hammer Theory and Practice. ASME Applied Mechanics Reviews. v. 58. P. 49-76. jan. 2005.
 - [15] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. Steam Turbines for Mechanical Drive Service. 2002. (NEMA SM 23).
 - [16] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical, and Gas Industry Services. 11ª ed. set. 2010. (API 610).
 - [17] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Centrifugal Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Services Industries. 8ª ed. set. 2014. (API 617).
 - [18] INTERGRAPH Caesar II, versão 2014. Intergraph. 2014.
 - [19] SIGMA Rohr 2, versão 32.0. Sigma. 2015.
 - [20] BENTLEY Autopipe V8i, 09.06.00.19. Bentley 2014.
 - [21] MOAVENI, S., Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS, Prentice-Hall. EUA. 1999;
 - [22] BATHE, K. J., WILSON, E. L., Finite Element Procedures. Prentice-Hall. EUA. 1996.
 - [23] COADE. Pipe Stress Seminar Notes. Coade. 1998.
 - [24] MORANTE, R. WANG, Y., CHOKSHI, N., KENNEALLY, R., NORRIS, W. Evaluation of Modal Combination Methods for Seismic Response Spectrum

Analysis. NUREG/CR-6645. United States Nuclear Regulatory Commission. EUA. dez. 1999.

- [25] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis. NUREG 1.92. rev. 2. jul. 2006.
- [26] ROSENBLUETH, E., ELORDUY, J. Responses of Linear Systems to Certain Transients Disturbances. Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. vol. 1. p. 185-196. Chile. jan. 1969.
- [27] WILSON, E. L., DER KIUREGHIAN, A., BAYO, E. P. A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. John Wiley & Sons. v. 9. n° 2. p.187-192. EUA. abr. 1981.
- [28] GUPTA, A. K., CHEN, D. C. Comparison of Modal Combination Methods. Nuclear Engineering and Design. v. 78. n° 1. p. 53-68. Reed Elsevier Group. EUA. mar. 1984.
- [29] LINDLEY, D.W., YOW, T. R. Modal Response Summation for Seismic Qualification. Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power. v. 6, EUA. set. 1980.
- [30] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations. EUA. 2004. (IEEE Std. 344).
- [31] INTERGRAPH. CAESAR II version 2014 - User Guide. INTERGRAPH. 2012.
- [32] WEAVER Jr., W., JOHNSTON, P. R. Structural Dynamics by Finite Elements. Prentice-Hall. EUA. 1987.
- [33] PRZEMIENIECKI, J. S. Theory of Matrix Structural Analysis. McGraw-Hill. EUA. 1968.
- [34] MUNSON, D. P., KEEVER, L.C., PENG, L.C, BROMAN, R. Computer Application to the Piping Analysis Requirements of ASME Section III - Sub article NB-3600. Nuclear Services Corporation.

- [35] CHEN, L. H. Piping Flexibility Analysis by Stiffness Matrix. ASME Journal of Applied Mechanics. 1959.

APÊNDICE A - Fluxo de cálculo para aplicação do método de Wilson θ

1. Cálculos Iniciais

- a. Cálculo das matrizes de Massa (**M**) e Rigidez (**K**);
- b. Cálculo das condições iniciais do problema $\mathbf{Y}^0, \dot{\mathbf{Y}}^0$ e $\ddot{\mathbf{Y}}^0$
- c. Seleção do passo Δt e cálculo das constantes de integração

$$a_0 = \frac{6}{(\theta\Delta t)^2}; a_1 = \frac{3}{\theta\Delta t}; a_2 = 2a_1; a_3 = \frac{\theta\Delta t}{2}; a_4 = \frac{a_0}{\theta} \quad (\text{AA.1})$$

$$a_5 = \frac{-a_2}{\theta}; a_6 = 1 - \frac{3}{\theta}; a_7 = \frac{\Delta t}{2}; a_8 = \frac{\Delta t^2}{6} \quad (\text{AA.2})$$

- d. Cálculo da matriz de rigidez efetiva

$$\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + a_0\mathbf{M} \quad (\text{AA.3})$$

- e. Aplicar a Decomposição LDL a matriz $\hat{\mathbf{K}}_{LDL}$

2. Cálculos em cada passo (time step)

- a. Cálculo da matriz de carregamento efetiva no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

$$\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{F}^t + \theta(\mathbf{F}^{(t+\Delta t)} - \mathbf{F}^t) + \mathbf{M}(a_0\mathbf{Y}^t + a_2\dot{\mathbf{Y}}^t + 2\ddot{\mathbf{Y}}^t) \quad (\text{AA.4})$$

- b. Cálculo dos deslocamentos no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

$$\hat{\mathbf{K}}_{LDL}\mathbf{U}^{(t+\Delta t)} = \hat{\mathbf{F}} \quad (\text{AA.5})$$

- c. Cálculo dos deslocamentos, velocidades e acelerações no instante de tempo $(t + \theta\Delta t)$

$$\ddot{\mathbf{Y}}^{(t+\Delta t)} = a_4(\mathbf{Y}^{(t+\Delta t)} - \mathbf{F}^t) + a_5\dot{\mathbf{Y}}^t + a_6\ddot{\mathbf{Y}}^t \quad (\text{AA.6})$$

$$\dot{\mathbf{Y}}^{(t+\Delta t)} = \dot{\mathbf{Y}}^t + a_7(\ddot{\mathbf{Y}}^{(t+\Delta t)} - \ddot{\mathbf{F}}^t) \quad (\text{AA.7})$$

$$\mathbf{Y}^{(t+\Delta t)} = \mathbf{Y}^t + \Delta t\dot{\mathbf{Y}}^t + a_8(\ddot{\mathbf{Y}}^{(t+\Delta t)} + 2\ddot{\mathbf{Y}}^t) \quad (\text{AA.8})$$

APÊNDICE B - Memorial de Cálculo – Perda de Carga Equivalente (Caldeira)

O presente memorial tem como objetivo o cálculo de uma tubulação equivalente com o intuito de simular a perda de carga no trecho interno da caldeira do sistema até o reservatório (vaso de alta pressão). O trecho interno da caldeira é composto por dois evaporadores, denominados SH-01 e SH-02 e por um trecho de tubulação de interligação.

O evaporador SH-01 é composto por 74 tubos com diâmetro externo de 37,6 (mm) e espessura de parede de 3,43 (mm). O comprimento de cada tubo é 207,12 (m), sendo este comprimento dividido em 08 passes. O arranjo físico do evaporador SH-01 está descrito na figura 26.

Figura 26: Arranjo físico do evaporador SH-01.

O evaporador SH-02 é composto por 74 tubos com diâmetro externo de 38,6 (mm) e espessura de parede de 4,83 (mm). O comprimento de cada tubo é 26,54 (m), sendo este comprimento dividido em 01 passe.

A conexão entre o evaporador SH-01 e SH-02 é realizada por meio de uma tubulação com comprimento aproximado de 40 metros.

Na tabela 14 são descritas as condições de temperatura do vapor em diversos pontos internos da caldeira. A pressão no vaso de alta pressão é de 15400 kPa e a vazão

mássica de vapor é de 52,5 kg/s, sendo a mesma considerada constante no interno da caldeira. Essas condições estão de acordo com o balanço de massa/energia da caldeira, desenvolvido pelo fornecedor do equipamento.

Tabela 14: Condições de temperatura do vapor - interno da caldeira.)

	Vaso de Alta Pressão	Entrada SH-01	Saída SH-01	Entrada SH-02	Saída SH-02
T (K)	622	622	816	816	847

Reescrevendo a equação (3.19) em função da densidade temos que:

$$\rho = \frac{p M}{Z_c \cdot R \cdot T} \quad (\text{AB.01})$$

A velocidade do vapor pode ser calculada por meio da expressão abaixo:

$$V = \frac{q}{\rho \cdot A} \quad (\text{AB.02})$$

Na qual:

q Vazão mássica do fluido em questão

Para o cálculo da perda de carga nos evaporadores foi utilizado o modelo de Darcy para fluidos compressíveis [13], uma vez que no evaporador ocorre variação de temperatura do vapor e, portanto os efeitos de compressibilidade do fluido não podem ser desprezados. Para o evaporador SH-01, os cálculos foram realizados com a média das densidades do fluido na entrada e saída do evaporador. Para efeito de simplificação de cálculo, considerou-se densidade constante ao longo evaporador SH-02. Essa simplificação não acarreta grandes erros na perda de carga, uma vez que o comprimento do evaporador é pequeno em relação ao comprimento total do interno da caldeira. O modelo de Darcy para fluidos compressíveis é descrito pela equação abaixo:

$$\Delta p = 62530 \cdot f \cdot \frac{q^2}{D^5 \cdot V} \quad (\text{AB.03})$$

Na qual, para o cálculo da perda de carga em kPa, a vazão mássica do fluido deve ser expressa em kg/h, o diâmetro em mm e a velocidade do fluido em m/s.

Nas tabelas 15 e 16 são apresentados os memoriais de cálculo da perda de carga nos evaporadores SH-01 e SH-02, respectivamente:

Tabela 15: Memorial de cálculo da perda de carga no evaporador SH-01.

Volume total (m ³)	14,8		
Número de tubos	74		
Comprimento (m)	207,12		
Número de passes	8		
Diâmetro tubos (m)	0,03759		
espessura parede (m)	0,00343		
Área (m ²)	0,001109774		
f	0,021		
q (kg/h)	189020		
		Condições Entrada	Condições Saída
q por tubo (kg/h)		2554	2554
Z _c		0,73	0,899
k		1,268	1,23
p (Pa)		15400000	15400000
T (K)		622	816
M (kg/mol)		0,018	0,018
R (J/mol.K)		8,314	8,314
ρ (kg/m ³)		73,43	45,45
ρ media (kg/m ³)	59,44		
Q (m ³ /s)	0,88		
V (m/s)	11,39		
Δp _{SH-01} (kPa)	2198,2		

Tabela 16: Memorial de cálculo da perda de carga no evaporador SH-02.

Volume total (m³)	2,49
Número de tubos	74
Comprimento (m)	26,54
Número de passes	1
Diâmetro tubos (m)	0,03864
espessura parede (m)	0,00483
Área (m²)	0,001173
f	0,021
q (kg/h)	189020
q por tubo (kg/h)	2554
Z _c	0,899
k	1,23
p (Pa)	13181849
T (K)	816
M (kg/mol)	0,018
R (J/mol.K)	8,314
ρ (kg/m³)	73,43
Q (m³/s)	38,90
V (m/s)	15,55
Δp _{SH-02} (kPa)	169,7

A perda de carga na tubulação de interligação entre os evaporadores SH-01 e SH-02 foi estimada com base no parâmetro utilizado na indústria como boa prática de engenharia (0,5 kPa/metro de tubulação). Com isso, a perda de carga da tubulação de interligação Δp_{tub} é de 20 kPa.

A perda de carga total no interno da caldeira pode ser expressa pelo somatório das perdas de carga nos evaporadores e tubulação de interligação, conforme equação AB-04. Com isso, temos que a perda de carga do trecho interno da caldeira $\Delta p_{caldeira}$ é igual a 2388 kPa.

$$\Delta p_{caldeira} = \Delta p_{SH-01} + \Delta p_{SH-02} + \Delta p_{tub} \quad (AB.04)$$

Para a tubulação equivalente, adotou-se um tubo de diâmetro nominal 10 polegadas e comprimento 300 m. Calculou-se a perda de carga desta tubulação $\Delta p_{tub\ 10''}$ por meio do modelo de Darcy-Weisbach [7] (equação 3.30), considerando pressão do vapor igual à pressão do vaso de alta pressão e temperatura igual a temperatura de saída do

evaporador SH-02. Na tabela 17 é apresentado o memorial de cálculo da perda de carga desta tubulação $\Delta p_{tub\ 10''}$.

Tabela 17: Memorial de calculo da perda de carga da tubulação 10".

q (kg/h)	189020
Z_c	0,897
p (Pa)	15400000
T (K)	847
M (kg/mol)	0,018
R (J/mol.K)	8,314
ρ (kg/m³)	43,87
Q (m³/s)	1,20
V (m/s)	23,53
D (m)	0,25446
A (m²)	0,050854
Q (m³/s)	1,20
V (m/s)	23,53
L (m)	300
f	0,000457
$\Delta p_{tub10''}$ (kPa)	149,3

A perda de carga adicional a ser incluída na tubulação equivalente é igual à diferença da perda de carga do trecho interno da caldeira $\Delta p_{caldeira}$ e perda de carga da tubulação $\Delta p_{tub\ 10''}$, conforme equação AB.05.

$$\Delta p_{adicional} = \Delta p_{caldeira} - \Delta p_{tub10''} \quad (\text{AB.05})$$

A perda de carga adicional foi calculada por meio da equação 3.33 escrita em função do fator K , conforme equação AB.06. O fator de perda de carga singular K foi determinado de modo a satisfazer a equação AB.05. O valor de fator de perda de carga singular K obtido foi 184,3, conforme tabela 18.

$$K = \frac{2\Delta p}{\rho \cdot V^2} \quad (\text{AB.06})$$

Tabela 18: Memorial de calculo do fator K.

$\Delta p_{\text{caldeira}}$ (kPa)	2388
Δp_{tub10} (kPa)	149,3
$\Delta p_{\text{adicional}}$ (kPa)	2238,6
ρ (kg/m ³)	43,87
V (m/s)	23,53
K	184,3

APÊNDICE C – Dados de Entrada – Modelo Pípenet

INDEX

Comments from Checking and Calculation Phases	1
Summary of input	2
Summary of input: controls and starting point	3
Summary of input: units	4
Summary of input: fluid and pipe properties	5
Summary of input: specifications	6
Summary of input: pipes	7
Summary of input: valves	11
Summary of input: check valves	12
Summary of input: control & safety valves	13
Summary of input: forces	14

```
*****
1          2          3          4          5          6          7          8          9          0          1          2
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
FREE,TRANS,STAND,55,0.001,50,0.5,0,1,1e-012,32
TITL,Análise de Steam Hammer - Carregamento Numerico
TITL,
TITL,
TITL,
CCCC
CCCC-----
CCCC CONTROLS
CCCC-----
NUMB,A1,7,A2,96,B1,90,0,9739,B4,2,D1,2,E2,2,F1,2,K1,1,K2,15,K4,4,K5,23,K6,2,K8,1
5,36,K9,0
UNIT,U,1,2,8,1,7,1,1,1,2,1,1,1,1,2,1,1,3
TIME,0,10,1,6722,,0
AMBI,101325,24.85
FLUI,43.8788,3.21489e-005,567,1.98474e+007,-1.01325
FRIC,0
DATA,0,C:\Users\ZETONI~1\AppData\Local\Temp\temp.pdf
WASP,1260,0
FDYN,2
ZERO,,2.5,Y,N
GRPH,0.1,C:\Users\Ze Tonio\Desktop\Carregamento Numerico\Caso de Análise.res,2,
3
DFLT,,0,0,0,
ATOL,0.0001,0.001,1,1,1e-005,1e-006,4.38788e-005,0.001,0.001,0.001,1e-006\
1e-006,1e-006,1e-006,0.001
RTOL,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001,0.001\
0.001,0.001,0.001
OUTF,C:\Users\Ze Tonio\Desktop\Carregamento Numerico\Caso de Análise.out,0
FOPT,0.001,C:\Users\Ze Tonio\Desktop\Carregamento Numerico\Caso de Análise.frc,
1
FITT,C:\Users\ZETONI~1\AppData\Local\Temp\temp.ufl
CCCC
CCCC-----
CCCC NETWORK
```

```
CCCC-----  
TYPE,33  
PIPE,1,2,1,400,4.4,4.4,0.0457,0,0  
PIPF,1,BRA  
PIPE,2,3,2,300,2.532,0,0.0457,0,0  
PIPF,1,ELBOW  
PIPE,4,7,5,300,0.2,0,0.0457,0,0  
PIPE,5,8,7,300,1.4,0,0.0457,0,0  
PIPF,1,ELB45  
PIPE,6,9,8,300,5.8,0,0.0457,0,0
```

```
-----  
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

```
*****
      1      2      3      4      5      6      7      8      9      0      1      2
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
PIPF,1,ELB45
PIPE,7,10,9,300,1.039,0.7,0.0457,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,8,11,10,300,0.4,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,9,12,11,300,1.503,0,0.0457,0,0
PIPF,1,BRA,1,ELB45
PIPE,10,13,15,300,0.9,0,0.045699934,0,0
PIPE,12,15,2,300,2.5,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,13,17,18,300,0.2,0,0.045699934,0,0
PIPE,14,12,22,300,1.5,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,BRA,1,ELB45
PIPE,16,20,19,300,5.8,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,17,21,20,300,1,0.7,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,15,19,17,300,1.4,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,3,4,3,300,0.9,0,0.0457,0,0
PIPE,11,22,21,300,0.4,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,18,14,12,400,2.5,0,0.0457,0,0
PIPF,1,BRA
PIPE,19,23,14,400,2.68,-2.68,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,20,24,23,400,16.251,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,21,25,24,400,5.16,-5.16,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,22,26,25,400,8.8,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,23,27,26,400,1.82,-1.8,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
```

PIPE,24,28,27,400,10.43,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,25,29,28,400,1.478,1.45,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,26,30,29,400,6.343,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,27,31,30,400,14.675,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,28,32,31,400,6.343,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW

123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```
*****
      1      2      3      4      5      6      7      8      9      0      1      2
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
PIPE,29,33,32,400,1.5,-1.5,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,30,34,33,400,11.225,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,31,35,34,400,0.632,0,0.0457,0,0
PIPF,1,TEE,1,RE02
PIPE,32,36,35,300,11.7,0,0.0457,0,0
PIPE,33,37,36,300,1.5,1.5,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,34,38,37,300,6.193,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,35,39,38,300,10.6,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,36,40,39,300,6.193,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,37,41,40,300,1.5,-1.5,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,38,42,41,300,20.541,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,39,43,42,300,1.477,-1.045,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,40,44,43,300,1.887,-1.887,0.0457,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,41,59,44,300,1.478,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,42,47,46,300,3.625,0,0.0457,0,0
PIPF,1,GATE,1,GLOST
PIPE,43,48,47,300,1.825,1.825,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,44,49,48,300,3.614,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,45,50,49,300,2.95,2.95,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,46,51,50,300,24.762,0,0.0457,0,0
```

PIPF,1,ELBOW
PIPE,47,52,51,300,3.056,-3.056,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,48,53,52,300,12.978,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,49,54,53,300,2.12,-2.12,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,50,55,54,300,6.465,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,51,56,55,300,11.508,-11.508,0.0457,0,0

123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890


```
*****
      1      2      3      4      5      6      7      8      9      0      1      2
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
PIPF,1,ELBOW
PIPE,52,57,56,300,5.229,0,0.0457,0,0
PIPF,1,ELBOW,2,GATE
PIPE,53,84,57,300,2,0,0.0457,0,0
PIPF,1,TEE
PIPE,55,60,57,200,2.395,2.395,0.0457,0,0
PIPF,1,BRA
PIPE,56,61,60,200,2.045,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,57,62,61,200,0.7,0.7,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,58,63,58,200,2.395,2.395,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,59,64,63,200,2.045,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,60,65,64,200,0.7,0.7,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,61,66,62,200,0.1,0,0.0457000102,0,0
PIPE,62,66,65,200,0.1,0,0.0457000102,0,0
PIPE,63,67,66,250,300,0,0.0457000102,183.8,0
PIPE,64,68,34,300,1.443,-1.443,0.0457000102,0,0
PIPF,1,BRA
PIPE,65,69,68,300,1.712,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,66,70,69,300,1.863,-1.863,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,67,45,70,300,1.054,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,68,73,71,300,3.115,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,GATE,1,GLOST
PIPE,69,74,73,300,1.825,1.825,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,70,75,74,300,1.667,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
```

PIPE,71,76,75,300,2.437,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELB45
PIPE,72,77,76,300,2.95,2.95,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,73,78,77,300,25.44,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW,1,ELB45
PIPE,74,79,78,300,3.036,-3.036,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,75,80,79,300,12.978,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW

123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```
*****
1      2      3      4      5      6      7      8      9      0      1      2
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
PIPE,76,81,80,300,2.12,-2.12,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,77,82,81,300,6.467,0,0.0457000102,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,79,86,82,300,11.5,-11.5,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,80,85,86,300,5.2,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW,2,GATE
PIPE,81,72,85,300,1.975,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,TEE
PIPE,83,89,85,200,2.4,2.4,0.045699934,0,0
PIPF,1,BRA
PIPE,84,90,89,200,2,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,85,91,90,200,0.7,0.7,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,86,92,87,200,2.4,2.4,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,87,93,92,200,2,0,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,88,94,93,200,0.7,0.7,0.045699934,0,0
PIPF,1,ELBOW
PIPE,89,95,91,200,0.1,0,0.045699934,0,0
PIPE,90,95,94,200,0.1,0,0.045699934,0,0
PIPE,91,96,95,250,300,0,0.045699934,183.8,0
PIPE,54,87,72,300,1.625,0,0.0457000102,0,0
PIPE,78,58,84,300,1.6,0,0.0457000102,0,0
VALV,1,5,4,6,N,,25.8301
VALV,2,18,13,16,N,,25.8301
CHCK,1,71,45,0.007,1,,0.1,N,,25.8311
CHCK,2,46,59,0.007,1,,0.1,N,,25.8301
LSRV,1,72,83,1144.4,1147.1,H,1142.8,N,,2.66929
LSRV,2,84,88,1144.4,1147.07,H,1142.8,N,,2.66929
CCCC
```

```
CCCC-----  
CCCC SPECIFICATIONS  
CCCC-----  
SPEC,1,P,1,0,1,126  
SPEC,67,F,67,0,1,52.5  
SPEC,96,F,96,0,1,52.5  
SPEC,83,P,83,0,1,0  
SPEC,88,P,88,0,1,0  
SPEC,6,I,6,0,2,2,1,2.07,0,1  
SPEC,16,I,16,0,2,2,1,2.07,0,1
```

```
-----  
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

```
*****
      1      2      3      4      5      6      7      8      9      0      1      2
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
CCCC
CCCC-----
CCCC FORCES
CCCC-----
FORC,F1,,0,0,0
DFRC,20,0,16.251,1,1
FORC,F2,,0,0,0
DFRC,24,0,10.43,1,1
FORC,F3,,0,0,0
DFRC,27,0,14.675,1,1
FORC,F4,,0,0,0
DFRC,30,11.225,0,1,1
DFRC,31,0.632,0,1,1
DFRC,32,11.7,0,1,1
FORC,F5,,0,0,0
DFRC,35,0,10.6,1,1
FORC,F6,,0,0,0
DFRC,38,20.541,0,1,1
DFRC,39,1.477,0,1,1
FORC,F7,,0,0,0
DFRC,46,0,24.762,1,1
FORC,F8,,0,0,0
DFRC,48,0,12.978,1,1
FORC,F9,,0,0,0
DFRC,51,0,11.508,1,1
FORC,F10,,0,0,0
DFRC,73,0,25.44,1,1
FORC,F11,,0,0,0
DFRC,75,0,12.978,1,1
FORC,F12,,0,0,0
DFRC,79,0,11.5,1,1
FORC,F13,,0,0,0
DFRC,32,0,11.7,1,1
FORC,F14,,0,0,0
```

```
DFRC,39,0,1.477,1,1
FORC,F15,,0,0,0
DFRC,21,0,5.16,1,1
CCCC
CCCC-----
CCCC OUTPUT TABLES
CCCC-----
TBLT,No Table Title
TBLV,FORC,F1,FX,,F2,FX,,F3,FX,,F4,FX,,F5,FX,,F6,FX,,F7,FX,,F8,FX
CCCC
```

```
-----
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
```

```
*****
1      2      3      4      5      6      7      8      9      0      1      2
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
-----
```

```
CCCC-----
CCCC OUTPUT GRAPHS
CCCC-----
DROI,PIPE,1,
DROI,PIPE,20,
DROI,PIPE,24,
DROI,PIPE,63,
DROI,PIPE,91,
DROI,VALV,1,
DROI,VALV,2,
DROI,CHCK,1,
DROI,LSRV,1,
DROI,FORC,F1,
DROI,FORC,F2,
DROI,FORC,F3,
DROI,FORC,F4,
DROI,FORC,F5,
DROI,FORC,F6,
DROI,FORC,F7,
DROI,FORC,F8,
DROI,FORC,F9,
DROI,FORC,F10,
DROI,FORC,F11,
DROI,FORC,F12,
DROI,FORC,F13,
DROI,FORC,F14,
XROI,4,P
XROI,20
```

****END OF VALIDATION: 0 ERROR(S), 0 WARNING(S)****

1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

COMMENTS

CHECKING PHASE

Checking nodes.
No node errors.

Checking specifications.
No specification errors.

Checking pipes.
No pipe errors.

Checking node elevations.

Checking force definitions.
No force definition errors.

CALCULATION PHASE

Stabilising initial conditions with a pseudo-transient (run-in) simulation.
Calculation successful.
Pseudo-transient run (run-in) completed.
Attempting calculation of an initial steady state
Calculation successful.

Starting the transient simulation.
Successful completion of the simulation.

SUMMARY OF NETWORK ELEMENTS

Total number of components is 103

- 7 specifications
- 90 pipes
- 2 valves
- 2 check valves
- 2 liquid surge relief valves

Total number of nodes including information nodes is 96

Total number of forces defined is 15

CALCULATION CONTROLS

The program-determined time step is 0.1488E-03 seconds.
Time step for output is 1.000 seconds.
The program-determined, ie, fixed time step (FTS) is used.
Equation type is Bernouilli.
Friction equation is Coulson-Richardson.
Vapour cavitation effects not included.
Channel cavitation effects not included.
Forces calculated.
Force output file generated.

CALCULATION TOLERANCES

Variable Type	Absolute Tolerance	Relative Tolerance
Dimensionless Variables	0.1000E-03	0.1000E-02
Length Variables	0.1000E-02 metres	0.1000E-02
Diameter Variables	0.1000E+01 milli.m.	0.1000E-02
Area Variables	0.1000E+01 sq.mm.	0.1000E-02
Pressure Variables	0.1000E-04 bar	0.1000E-02
Velocity Variables	0.1000E-05 m/sec	0.1000E-02
Flowrate Variables	0.4388E-04 kg/sec	0.1000E-02
Density Variables	0.1000E-02 kg/cu.m	0.1000E-02
Viscosity Variables	0.1000E-02 Pa.s	0.1000E-02
Modulus Variables	0.1000E-02 Pa	0.1000E-02
Volume Variables	0.1000E-05 cu.m	0.1000E-02
Time Variables	0.1000E-05 seconds	0.1000E-02
Force Variables	0.1000E-05 Newtons	0.1000E-02
Mass Variables	0.1000E-05 kg	0.1000E-02
Temperature Variables	0.1000E-02 degree C	0.1000E-02

Pivot threshold parameter is 0.100000E-11

STARTING POINT

Initial values are default suggestions.

Simulation of 2.500 seconds was performed on initial values under fixed specifications.

Steady-state calculation requested.

UNITS

Length unit is	metres
Diameter unit is	milli.m.
Area unit is	sq.mm.
Pressure unit is	bar G
Temperature unit is	degree C
Velocity unit is	m/sec
Flowrate unit is	kg/sec
Density unit is	kg/cu.m
Viscosity unit is	Pa.s
Volume unit is	cu.m
Youngs modulus unit is	Pa
Time unit is	seconds
Force unit is	Newtons
Mass unit is	kg
Torque unit is	N.m
Inertia unit is	kg.m2

FLUID

Fluid density is 43.879 kg/cu.m
Fluid viscosity is 0.000 Pa.s
Temperature is 567.000 degree C
Vapour pressure is -1.013 bar G
Bulk modulus is 19847400.000 Pa

PIPE PROPERTIES

Pipe type name is 1.Pipes
Roughness is 0.457000E-01 milli.m.
Youngs modulus is 0.148500E+12 Pa
Poissons ratio is 0.292000

SPECIFICATIONS

Label	Node	Type	Envir.	Function	Parameters
1	1	P	---	Constant A=	126.
67	67	Q	---	Constant A=	52.5
96	96	Q	---	Constant A=	52.5
83	83	P	---	Constant A=	0.00
88	88	P	---	Constant A=	0.00
6	6	I	---	Power ramp A=	2.00, B= 1.00, C= 2.07, D= 0.00, E= 1.00
16	16	I	---	Power ramp A=	2.00, B= 1.00, C= 2.07, D= 0.00, E= 1.00

PIPES

Label	Pipe Type	Input Node	Output Node	Length metres	Elevation metres	Diameter milli.m.	Wavespeed m/sec	Roughness milli.m.	Fittings Headloss
1	1.Pipes	2	1	4.40	4.40	333.30	672.096	0.046	0.776
2	1.Pipes	3	2	2.53	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
4	1.Pipes	7	5	0.20	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000
5	1.Pipes	8	7	1.40	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
6	1.Pipes	9	8	5.80	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
7	1.Pipes	10	9	1.04	0.70	260.30	672.134	0.046	0.217
8	1.Pipes	11	10	0.40	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
9	1.Pipes	12	11	1.50	0.00	260.30	672.134	0.046	1.033
10	1.Pipes	13	15	0.90	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000
12	1.Pipes	15	2	2.50	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
13	1.Pipes	17	18	0.20	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000
14	1.Pipes	12	22	1.50	0.00	260.30	672.134	0.046	1.033
16	1.Pipes	20	19	5.80	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
17	1.Pipes	21	20	1.00	0.70	260.30	672.134	0.046	0.217
15	1.Pipes	19	17	1.40	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
3	1.Pipes	4	3	0.90	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000
11	1.Pipes	22	21	0.40	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
18	1.Pipes	14	12	2.50	0.00	333.30	672.096	0.046	0.776
19	1.Pipes	23	14	2.68	-2.68	333.30	672.096	0.046	0.388
20	1.Pipes	24	23	16.25	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388
21	1.Pipes	25	24	5.16	-5.16	333.30	672.096	0.046	0.388
22	1.Pipes	26	25	8.80	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388
23	1.Pipes	27	26	1.82	-1.80	333.30	672.096	0.046	0.388
24	1.Pipes	28	27	10.43	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388
25	1.Pipes	29	28	1.48	1.45	333.30	672.096	0.046	0.388
26	1.Pipes	30	29	6.34	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388
27	1.Pipes	31	30	14.68	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388
28	1.Pipes	32	31	6.34	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388
29	1.Pipes	33	32	1.50	-1.50	333.30	672.096	0.046	0.388
30	1.Pipes	34	33	11.22	0.00	333.30	672.096	0.046	0.388

31	1.Pipes	35	34	0.63	0.00	333.30	672.096	0.046	0.359
32	1.Pipes	36	35	11.70	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000
33	1.Pipes	37	36	1.50	1.50	260.30	672.134	0.046	0.408
34	1.Pipes	38	37	6.19	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
35	1.Pipes	39	38	10.60	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
36	1.Pipes	40	39	6.19	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
37	1.Pipes	41	40	1.50	-1.50	260.30	672.134	0.046	0.408
38	1.Pipes	42	41	20.54	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
39	1.Pipes	43	42	1.48	-1.04	260.30	672.134	0.046	0.408
40	1.Pipes	44	43	1.89	-1.89	260.30	672.134	0.046	0.217

41	1.Pipes	59	44	1.48	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
42	1.Pipes	47	46	3.62	0.00	260.30	672.134	0.046	5.543
43	1.Pipes	48	47	1.82	1.82	260.30	672.134	0.046	0.408
44	1.Pipes	49	48	3.61	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
45	1.Pipes	50	49	2.95	2.95	260.30	672.134	0.046	0.408
46	1.Pipes	51	50	24.76	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
47	1.Pipes	52	51	3.06	-3.06	260.30	672.134	0.046	0.408
48	1.Pipes	53	52	12.98	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
49	1.Pipes	54	53	2.12	-2.12	260.30	672.134	0.046	0.408
50	1.Pipes	55	54	6.46	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
51	1.Pipes	56	55	11.51	-11.51	260.30	672.134	0.046	0.408
52	1.Pipes	57	56	5.23	0.00	260.30	672.134	0.046	0.625
53	1.Pipes	84	57	2.00	0.00	260.30	672.134	0.046	0.272
55	1.Pipes	60	57	2.40	2.40	172.72	672.160	0.046	0.888
56	1.Pipes	61	60	2.04	0.00	172.72	672.160	0.046	0.444
57	1.Pipes	62	61	0.70	0.70	172.72	672.160	0.046	0.444
58	1.Pipes	63	58	2.40	2.40	172.72	672.160	0.046	0.444
59	1.Pipes	64	63	2.04	0.00	172.72	672.160	0.046	0.444
60	1.Pipes	65	64	0.70	0.70	172.72	672.160	0.046	0.444
61	1.Pipes	66	62	0.10	0.00	172.72	672.160	0.046	0.000
62	1.Pipes	66	65	0.10	0.00	172.72	672.160	0.046	0.000
63	1.Pipes	67	66	300.00	0.00	254.51	671.348	0.046	183.800
64	1.Pipes	68	34	1.44	-1.44	260.30	672.134	0.046	0.815
65	1.Pipes	69	68	1.71	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
66	1.Pipes	70	69	1.86	-1.86	260.30	672.134	0.046	0.408
67	1.Pipes	45	70	1.05	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
68	1.Pipes	73	71	3.12	0.00	260.30	672.134	0.046	5.543
69	1.Pipes	74	73	1.82	1.82	260.30	672.134	0.046	0.408
70	1.Pipes	75	74	1.67	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
71	1.Pipes	76	75	2.44	0.00	260.30	672.134	0.046	0.217
72	1.Pipes	77	76	2.95	2.95	260.30	672.134	0.046	0.408
73	1.Pipes	78	77	25.44	0.00	260.30	672.134	0.046	0.625
74	1.Pipes	79	78	3.04	-3.04	260.30	672.134	0.046	0.408
75	1.Pipes	80	79	12.98	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
76	1.Pipes	81	80	2.12	-2.12	260.30	672.134	0.046	0.408
77	1.Pipes	82	81	6.47	0.00	260.30	672.134	0.046	0.408
79	1.Pipes	86	82	11.50	-11.50	260.30	672.134	0.046	0.408

80	1.Pipes	85	86	5.20	0.00	260.30	672.134	0.046	0.625
81	1.Pipes	72	85	1.98	0.00	260.30	672.134	0.046	0.272
83	1.Pipes	89	85	2.40	2.40	172.72	672.160	0.046	0.888
84	1.Pipes	90	89	2.00	0.00	172.72	672.160	0.046	0.444
85	1.Pipes	91	90	0.70	0.70	172.72	672.160	0.046	0.444
86	1.Pipes	92	87	2.40	2.40	172.72	672.160	0.046	0.444
87	1.Pipes	93	92	2.00	0.00	172.72	672.160	0.046	0.444
88	1.Pipes	94	93	0.70	0.70	172.72	672.160	0.046	0.444
89	1.Pipes	95	91	0.10	0.00	172.72	672.160	0.046	0.000
90	1.Pipes	95	94	0.10	0.00	172.72	672.160	0.046	0.000

91	1.Pipes	96	95	300.00	0.00	254.51	671.348	0.046	183.800
54	1.Pipes	87	72	1.62	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000
78	1.Pipes	58	84	1.60	0.00	260.30	672.134	0.046	0.000

FITTINGS

Name	Param1	Param2	Param3

RE01	0.356	406.400	304.800
RE02	0.356	304.800	406.400

OPERATING VALVES

Label	Input Flow Node	Output Flow Node	Input Info Node	K-factor or Flow Coeff.	Area sq.mm.	Valve Description
1	5	4	6	25.830	N/A	Non-library
2	18	13	16	25.830	N/A	Non-library

CHECK VALVES

Label	Input Flow Node	Output Flow Node	Response time seconds	Ref. Set.	F-Trigger kg/sec	P-Trigger bar	K-factor or Flow Coeff.	Area sq.mm.	Check valve Description
1	71	45	0.700E-02	1.000	39.0	0.100	25.831	N/A	Non-library
2	46	59	0.700E-02	1.000	39.0	0.100	25.830	N/A	Non-library

LIQUID SURGE RELIEF VALVES

Label	Input Node	Output Node	Set Pres. bar G	Wide Pres. bar G	Hyst.	Close P. bar G	K or Cv	Area sq.mm.	Relief valve Description
1	72	83	1144.400	1147.100	Yes	1142.800	2.669	N/A	Non-library
2	84	88	1144.400	1147.070	Yes	1142.800	2.669	N/A	Non-library

FORCES CONTROL VOLUMES

Label	Restrains (external force) Newtons			Control areas					
F1	0.000	0.000	0.000	1	2				
F2	0.000	0.000	0.000	3	4				
F3	0.000	0.000	0.000	5	6				
F4	0.000	0.000	0.000	7	8	9	10	11	12
F5	0.000	0.000	0.000	13	14				
F6	0.000	0.000	0.000	15	16	17	18		
F7	0.000	0.000	0.000	19	20				
F8	0.000	0.000	0.000	21	22				
F9	0.000	0.000	0.000	23	24				
F10	0.000	0.000	0.000	25	26				
F11	0.000	0.000	0.000	27	28				
F12	0.000	0.000	0.000	29	30				
F13	0.000	0.000	0.000	31	32				
F14	0.000	0.000	0.000	33	34				
F15	0.000	0.000	0.000	35	36				

FORCES CONTROL AREAS

Label	Component Type	Component Name	Position	Area sq.mm.	Distance metres	Normal vector
1	PIPE	20	Inlet		0.000	N/A
2	PIPE	20	Outlet		16.251	N/A
3	PIPE	24	Inlet		0.000	N/A
4	PIPE	24	Outlet		10.430	N/A
5	PIPE	27	Inlet		0.000	N/A
6	PIPE	27	Outlet		14.675	N/A

7	PIPE	30	Inlet	0.000	N/A
8	PIPE	30	Outlet	11.225	N/A
9	PIPE	31	Inlet	0.000	N/A
10	PIPE	31	Outlet	0.632	N/A
11	PIPE	32	Inlet	0.000	N/A
12	PIPE	32	Outlet	11.700	N/A
13	PIPE	35	Inlet	0.000	N/A
14	PIPE	35	Outlet	10.600	N/A
15	PIPE	38	Inlet	0.000	N/A
16	PIPE	38	Outlet	20.541	N/A

17	PIPE	39	Inlet	0.000	N/A
18	PIPE	39	Outlet	1.477	N/A
19	PIPE	46	Inlet	0.000	N/A
20	PIPE	46	Outlet	24.762	N/A
21	PIPE	48	Inlet	0.000	N/A
22	PIPE	48	Outlet	12.978	N/A
23	PIPE	51	Inlet	0.000	N/A
24	PIPE	51	Outlet	11.508	N/A
25	PIPE	73	Inlet	0.000	N/A
26	PIPE	73	Outlet	25.440	N/A
27	PIPE	75	Inlet	0.000	N/A
28	PIPE	75	Outlet	12.978	N/A
29	PIPE	79	Inlet	0.000	N/A
30	PIPE	79	Outlet	11.500	N/A
31	PIPE	32	Inlet	0.000	N/A
32	PIPE	32	Outlet	11.700	N/A
33	PIPE	39	Inlet	0.000	N/A
34	PIPE	39	Outlet	1.477	N/A
35	PIPE	21	Inlet	0.000	N/A
36	PIPE	21	Outlet	5.160	N/A

APÊNDICE D – Memorial de Cálculo - Comprimento máximo dos trechos retos de tubulação.

O presente memorial tem como objetivo o cálculo do comprimento máximo dos elementos de trecho reto de tubulação de modo a obter uma matriz de massa concentrada (*Lumped Masses Matrix*) representativa do comportamento do sistema. Este memorial baseia-se na metodologia descrita por MUNSON et al [34].

A metodologia descrita por MUNSON et al [34] estabelece que uma vez determinada a frequência de aceleração de período zero (f_{zpa}) é possível determinar a distância máxima entre pontos de massa concentrada de modo que todos os modos de vibração com frequência menor que (f_{zpa}) sejam capturados. De acordo com esta metodologia, a distância máxima entre pontos de massa concentrada pode ser calculada por meio da equação (4.1), reescrita abaixo:

$$L_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{1,57}{f_{zpa}} \right)^{0,5} \left(\frac{EI}{W} \right)^{0,25} \quad (AD.01)$$

A frequência de aceleração de período zero (f_{zpa}) é determinada com base nos espectros das forças desbalanceadas atuantes no sistema. Avaliando os espectros das forças atuantes no caso de estudo, temos que as forças F_4 , F_6 , F_7 e F_9 , (ver figura 16) por se tratarem de forças atuantes em trechos retos de tubulação contendo restrições axiais (suportes tipo trava), a contribuição dos modos de alta frequência são de extrema importância na determinação das tensões atuantes na tubulação e esforços em restrições e bocais. A frequência de aceleração de período zero (f_{zpa}) adotada para os espectro destas forças foi de 260 Hz. Para as demais forças, frequência de aceleração de período zero (f_{zpa}) adotada foi de 150 Hz.

A determinação das frequências de aceleração de período zero (f_{zpa}) de cada espectro de força seguiu o procedimento descrito na figura 27.

Figura 27: Procedimento para determinação de f_{zpa} .

O cálculo do peso próprio da tubulação (W) por unidade de comprimento é composto conforme equação AD.02.

$$W = W_{tubo} + W_{isolamento} + W_{fluido} \quad (AD.02)$$

O momento de inércia do tubo (I) é definido conforme equação AD.03:

$$I = \frac{\pi(D^4 - D_i^4)}{64} \quad (AD.03)$$

O comprimento máximo do elemento de trecho reto de tubulação calculado conforme equação AD.01 para o caso de estudo é de 836 mm, conforme tabela 19.

Tabela 19: Memorial de calculo – comprimento máximo elemento trecho reto de tubo.

D (m)	0,3048
e (m)	0,037
D _i (m)	0,232
e _{iso} (m)	0,14
ρ _{metal} (kg/m ³)	7640
ρ _{isolamento} (kg/m ³)	220
ρ _{fluido} (kg/m ³)	40
A _{metal} (m ²)	0,0308
W _{metal} (kg/m)	235,19
A _{isolamento} (m ²)	0,1956
W _{isolamento} (kg/m)	43,04
A _{fluido} (m ²)	0,0422
W _{fluido} (kg/m)	1,69
W (kg/m)	279,91
f _{zpa} (Hz)	260
E (Pa)	2,E+11
I (mm ⁴)	0,282
L _{max} (mm)	836

APÊNDICE E – Dados de Entrada – Modelo CAESAR II

1. Dados de Entrada – Geometria do Modelo

LISTING OF STATIC LOAD CASES FOR THIS ANALYSIS

1 (HYD) WW+HP+H
2 (OPE) W+D1+T1+P1+H
3 (OPE) W+D1+T2+P2+H
4 (OPE) W+D1+T3+P3+H
5 (SUS) W+P1+H
6 (SUS) W+P2+H
7 (SUS) W+P3+H
8 (EXP) L8=L2-L5
9 (EXP) L9=L3-L6
10 (EXP) L10=L4-L7
11 (EXP) L11=L2-L4
12 (EXP) L12=L3-L4
13 (EXP) L13=L2-L3

From 10 To 20 DX= 833.333 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 167,543 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
Dia= 323.850 mm. Wall= 31.750 mm. Cor= 1.3000 mm.

GENERAL

T1= 574 C T2= 574 C T3= 21 C P1=15,599.9922 KPa P2=15,599.9922 KPa
P3= .0000 KPa PHyd=21,479.9902 KPa Mat= (191)A335 P91
E= 213,737,456 KPa EH1= 170,631,504 KPa EH2= 170,631,504 KPa
EH3= 213,738,240 KPa EH4= 213,737,456 KPa EH5= 213,737,456 KPa
EH6= 213,737,456 KPa EH7= 213,737,456 KPa EH8= 213,737,456 KPa
EH9= 213,737,456 KPa v = .300 Pipe Den= .0076397 kg./cu.cm.
Fluid Den= .0000400 kg./cu.cm. Insul Thk= 100.000 mm.
Insul Den= .0002200 kg./cu.cm.

RESTRAINTS

Node 10 ANC

ALLOWABLE STRESSES

From 20 To 30 DX= 833.333 mm.

From 30 To 40 DX= 833.333 mm.

From 40 To 50 DX= 833.333 mm.

From 50 To 60 DX= 833.333 mm.

From 60 To 110 DX= 833.333 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 167,543 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

BEND at "TO" end

Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 109
Angle/Node @2= .00 108

ALLOWABLE STRESSES

From 110 To 120 DY= -720.000 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 167,543 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

From 120 To 130 DY= -720.000 mm.

From 130 To 140 DY= -720.000 mm.


```

-----
From 140 To 210 DY= -720.000 mm.
RESTRAINTS
  Node 210 Y
  Node 210 Z
-----
From 210 To 220 DY= -685.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 220 To 230 DY= -685.000 mm.
-----
From 230 To 240 DY= -685.000 mm.
-----
From 240 To 310 DY= -685.000 mm.
-----
From 310 To 320 DY= -685.000 mm.
-----
From 320 To 330 DY= -685.000 mm.
-----
From 330 To 340 DY= -685.000 mm.
-----
From 340 To 410 DY= -685.000 mm.
RESTRAINTS
  Node 410 X
-----
From 410 To 420 DY= -787.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 420 To 430 DY= -787.000 mm.
-----
From 430 To 440 DY= -787.000 mm.
-----
From 440 To 510 DY= -787.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.00 509
  Angle/Node @2= .00 508
-----
From 510 To 513 DX= 814.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
  Dia= 323.850 mm.   Wall= 31.750 mm.
GENERAL
  P1=15,599.9922 KPa   P2=15,599.9922 KPa   P3= .0000 KPa
  Fluid Den= .0000373 kg./cu.cm.   Insul Thk= 140.000 mm.
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 513 To 516 DX= 814.000 mm.
-----
From 516 To 519 DX= 814.000 mm.
-----
From 519 To 522 DX= 814.000 mm.
-----
From 522 To 520 DX= 814.000 mm.
RESTRAINTS
  Node 520 +Y   Mu = .30
-----
From 520 To 620 DX= 799.333 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES

```

```

-----
From 620 To 630 DX= 799.333 mm.
-----
From 630 To 710 DX= 799.333 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 90.000    Angle/Node @1= 45.00 709
    Angle/Node @2= .00 708
-----
From 710 To 720 DY= -706.667 mm.
    B31.1 (2012)    Sc= 167,543 KPa    Sh1= 88,772 KPa    Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa    Sh4= 167,543 KPa    Sh5= 167,543 KPa    Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa    Sh8= 167,543 KPa    Sh9= 167,543 KPa    Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 720 To 730 DY= -706.667 mm.
-----
From 730 To 810 DY= -706.667 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 90.000    Angle/Node @1= 45.00 809
    Angle/Node @2= .00 808
-----
From 810 To 820 DZ= 686.667 mm.
    B31.1 (2012)    Sc= 167,543 KPa    Sh1= 88,772 KPa    Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa    Sh4= 167,543 KPa    Sh5= 167,543 KPa    Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa    Sh8= 167,543 KPa    Sh9= 167,543 KPa    Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 820 To 830 DZ= 686.667 mm.
-----
From 830 To 1010 DZ= 686.667 mm.
RESTRAINTS
    Node 1010 +Y    Mu = .30
-----
From 1010 To 1020 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1020 To 1030 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1030 To 1040 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1040 To 1050 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1050 To 1060 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1060 To 1070 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1070 To 1080 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1080 To 1310 DZ= 740.375 mm.
-----
From 1310 To 1320 DZ= 714.286 mm.
    B31.1 (2012)    Sc= 167,543 KPa    Sh1= 88,772 KPa    Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 167,543 KPa    Sh4= 167,543 KPa    Sh5= 167,543 KPa    Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa    Sh8= 167,543 KPa    Sh9= 167,543 KPa    Sy= 413,685 KPa
RESTRAINTS
    Node 1310 +Y    Mu = .30
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 1320 To 1330 DZ= 714.286 mm.
-----
From 1330 To 1340 DZ= 714.286 mm.
-----
From 1340 To 1350 DZ= 714.286 mm.
-----
From 1350 To 1360 DZ= 714.286 mm.
-----
From 1360 To 1370 DZ= 714.286 mm.
-----
From 1370 To 1610 DZ= 714.286 mm.

```

```

BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.00 1609
  Angle/Node @2= .00 1608
-----
From 1610 To 1620 DY= -764.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 1620 To 1630 DY= -764.000 mm.
-----
From 1630 To 1640 DY= -764.000 mm.
-----
From 1640 To 1910 DY= -764.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.00 1909
  Angle/Node @2= .00 1908
-----
From 1910 To 2010 DZ= -763.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
RESTRAINTS
  Node 2010 +Y   Mu = .30
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 2010 To 2020 DZ= -701.833 mm.
-----
From 2020 To 2030 DZ= -701.833 mm.
-----
From 2030 To 2040 DZ= -701.833 mm.
-----
From 2040 To 2050 DZ= -701.833 mm.
-----
From 2050 To 2060 DZ= -701.833 mm.
-----
From 2060 To 2210 DZ= -701.833 mm.
RESTRAINTS
  Node 2210 +Y   Mu = .30
  Node 2210 X
-----
From 2210 To 2220 DZ= -772.727 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 2220 To 2230 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2230 To 2240 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2240 To 2250 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2250 To 2260 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2260 To 2270 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2270 To 2280 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2280 To 2290 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2290 To 2300 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2300 To 2310 DZ= -772.727 mm.
-----
From 2310 To 2510 DZ= -772.727 mm.
RESTRAINTS

```

```

Node 2510 +Y Mu = .30
Node 2510 X
Node 2510 Z
-----
From 2510 To 2520 DZ= -752.500 mm.
      B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa      Sh1= 88,772 KPa      Sh2= 88,772 KPa
      Sh3= 167,543 KPa      Sh4= 167,543 KPa      Sh5= 167,543 KPa      Sh6= 167,543 KPa
      Sh7= 167,543 KPa      Sh8= 167,543 KPa      Sh9= 167,543 KPa      Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 2520 To 2530 DZ= -752.500 mm.
-----
From 2530 To 2540 DZ= -752.500 mm.
-----
From 2540 To 2550 DZ= -752.500 mm.
-----
From 2550 To 2560 DZ= -752.500 mm.
-----
From 2560 To 2710 DZ= -752.500 mm.
RESTRAINTS
      Node 2710 Y Mu = .30
-----
From 2710 To 2720 DZ= -719.556 mm.
      B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa      Sh1= 88,772 KPa      Sh2= 88,772 KPa
      Sh3= 167,543 KPa      Sh4= 167,543 KPa      Sh5= 167,543 KPa      Sh6= 167,543 KPa
      Sh7= 167,543 KPa      Sh8= 167,543 KPa      Sh9= 167,543 KPa      Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 2720 To 2730 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2730 To 2740 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2740 To 2750 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2750 To 2760 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2760 To 2770 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2770 To 2780 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2780 To 2790 DZ= -719.556 mm.
-----
From 2790 To 2910 DZ= -719.556 mm.
RESTRAINTS
      Node 2910 Y Mu = .30
-----
From 2910 To 2920 DZ= -587.333 mm.
      B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa      Sh1= 88,772 KPa      Sh2= 88,772 KPa
      Sh3= 167,543 KPa      Sh4= 167,543 KPa      Sh5= 167,543 KPa      Sh6= 167,543 KPa
      Sh7= 167,543 KPa      Sh8= 167,543 KPa      Sh9= 167,543 KPa      Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 2920 To 2930 DZ= -587.333 mm.
-----
From 2930 To 3010 DZ= -587.333 mm.
BEND at "TO" end
      Radius= 457.200 mm. (LONG)      Bend Angle= 90.000      Angle/Node @1= 45.00 3009
      Angle/Node @2= .00 3008
-----
From 3010 To 3020 DY= 737.500 mm.
      B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa      Sh1= 88,772 KPa      Sh2= 88,772 KPa
      Sh3= 167,543 KPa      Sh4= 167,543 KPa      Sh5= 167,543 KPa      Sh6= 167,543 KPa
      Sh7= 167,543 KPa      Sh8= 167,543 KPa      Sh9= 167,543 KPa      Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 3020 To 3030 DY= 737.500 mm.
-----
From 3030 To 3040 DY= 737.500 mm.

```

```

-----
From 3040 To 3110 DY= 737.500 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.00 3109
  Angle/Node @2= .00 3108
-----
From 3110 To 3120 DZ= 722.800 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 3120 To 3130 DZ= 722.800 mm.
-----
From 3130 To 3140 DZ= 722.800 mm.
-----
From 3140 To 3150 DZ= 722.800 mm.
-----
From 3150 To 3310 DZ= 722.800 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.00 3309
  Angle/Node @2= .00 3308
-----
From 3310 To 3320 DY= 608.333 mm.
-----
From 3320 To 3330 DY= 608.333 mm.
-----
From 3330 To 3410 DY= 608.333 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.00 3409
  Angle/Node @2= .00 3408
-----
From 3410 To 3510 DX= -757.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
RESTRAINTS
  Node 3510 +Y
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 3510 To 3610 DX= -300.000 mm.
-----
From 3610 To 3710 DX= -520.500 mm.
RIGID Weight= 9,000.00 N.
-----
From 3710 To 3810 DY= 536.694 mm. DZ= 536.694 mm.
RIGID Weight= 5,400.00 N.
-----
From 3810 To 3910 DY= 536.694 mm. DZ= 536.694 mm.
RIGID Weight= 3,600.00 N.
-----
From 3710 To 4010 DX= -520.500 mm.
RIGID Weight= 9,000.00 N.
-----
From 4010 To 4110 DX= -763.500 mm.
-----
From 4110 To 4210 DX= -763.500 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 167,543 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 4210 To 4310 DX= -400.000 mm.
RIGID Weight= 5,616.00 N.
-----
From 4310 To 4410 DX= -775.000 mm. DY= 775.000 mm.
RIGID Weight= 3,370.00 N.
-----

```

```

From 4410 To 4510 DX= -775.000 mm. DY= 775.000 mm.
RIGID Weight= 2,250.00 N.
-----
From 4310 To 4610 DX= -400.000 mm.
RIGID Weight= 5,616.00 N.
-----
From 4610 To 4710 DX= -721.000 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa  Sh1= 88,772 KPa  Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa  Sh4= 167,543 KPa  Sh5= 167,543 KPa  Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa  Sh8= 167,543 KPa  Sh9= 167,543 KPa  Sy= 413,685 KPa
GENERAL
  T1= 574 C  T3= 574 C  P3=15,599.9922 KPa
RESTRAINTS
  Node 4710 +Y
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 4710 To 4810 DX= -205.000 mm.
-----
From 4810 To 4910 DX= -552.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)  Bend Angle= 90.000  Angle/Node @1= 45.00 4909
  Angle/Node @2= .00 4908
-----
From 4910 To 4920 DY= -629.000 mm.
-----
From 4920 To 4930 DY= -629.000 mm.
-----
From 4930 To 5110 DY= -629.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)  Bend Angle= 45.000  Angle/Node @1= 22.50 5109
  Angle/Node @2= .00 5108
-----
From 5110 To 5120 DY= -522.500 mm. DZ= -522.500 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa  Sh1= 88,772 KPa  Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa  Sh4= 167,543 KPa  Sh5= 167,543 KPa  Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa  Sh8= 167,543 KPa  Sh9= 167,543 KPa  Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 5120 To 5210 DY= -522.500 mm. DZ= -522.500 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)  Bend Angle= 90.000  Angle/Node @1= 45.00 5209
  Angle/Node @2= .00 5208
RESTRAINTS
  Node 5210 +Y
-----
From 5210 To 5220 DX= 678.600 mm.
-----
From 5220 To 5230 DX= 678.600 mm.
-----
From 5230 To 5240 DX= 678.600 mm.
-----
From 5240 To 5250 DX= 678.600 mm.
-----
From 5250 To 5510 DX= 678.600 mm.
RESTRAINTS
  Node 5510 +Y  Mu = .30
  Node 5510 Z
-----
From 5510 To 5520 DX= 750.000 mm.
-----
From 5520 To 5530 DX= 750.000 mm.
-----
From 5530 To 5540 DX= 750.000 mm.
-----
From 5540 To 5550 DX= 750.000 mm.
-----
From 5550 To 5560 DX= 750.000 mm.
-----

```

```

From 5560 To 5570 DX= 750.000 mm.
-----
From 5570 To 5580 DX= 750.000 mm.
-----
From 5580 To 5590 DX= 750.000 mm.
-----
From 5590 To 5600 DX= 750.000 mm.
-----
From 5600 To 5610 DX= 750.000 mm.
-----
From 5610 To 5620 DX= 750.000 mm.
-----
From 5620 To 5710 DX= 750.000 mm.
RESTRAINTS
  Node 5710 +Y Mu = .30
  Node 5710 X
-----
From 5710 To 5720 DX= 750.000 mm.
  B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 5720 To 5730 DX= 750.000 mm.
-----
From 5730 To 5740 DX= 750.000 mm.
-----
From 5740 To 5750 DX= 750.000 mm.
-----
From 5750 To 5760 DX= 750.000 mm.
-----
From 5760 To 5770 DX= 750.000 mm.
-----
From 5770 To 5780 DX= 750.000 mm.
-----
From 5780 To 5910 DX= 750.000 mm.
RESTRAINTS
  Node 5910 +Y Mu = .30
  Node 5910 Z
-----
From 5910 To 5920 DX= 716.000 mm.
  B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 5920 To 5930 DX= 716.000 mm.
-----
From 5930 To 6110 DX= 716.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6109
  Angle/Node @2= .00 6108
-----
From 6110 To 6120 DY= -739.000 mm.
  B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 6120 To 6210 DY= -739.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6209
  Angle/Node @2= .00 6208
-----
From 6210 To 6220 DZ= -721.800 mm.
  B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
  Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
  Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

```

ALLOWABLE STRESSES

 From 6220 To 6230 DZ= -721.800 mm.

From 6230 To 6240 DZ= -721.800 mm.

From 6240 To 6250 DZ= -721.800 mm.

From 6250 To 6410 DZ= -721.800 mm.

RESTRAINTS

Node 6410 +Y Mu = .30

From 6410 To 6420 DZ= -646.000 mm.

From 6420 To 6430 DZ= -646.000 mm.

From 6430 To 6440 DZ= -646.000 mm.

From 6440 To 6510 DZ= -646.000 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6509
 Angle/Node @2= .00 6508

From 6510 To 6520 DX= 764.125 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

 From 6520 To 6530 DX= 764.125 mm.

From 6530 To 6540 DX= 764.125 mm.

From 6540 To 6550 DX= 764.125 mm.

From 6550 To 6560 DX= 764.125 mm.

From 6560 To 6570 DX= 764.125 mm.

From 6570 To 6580 DX= 764.125 mm.

From 6580 To 6710 DX= 764.125 mm.

RESTRAINTS

Node 6710 Y Mu = .30

From 6710 To 6720 DX= 747.833 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

 From 6720 To 6730 DX= 747.833 mm.

From 6730 To 6740 DX= 747.833 mm.

From 6740 To 6750 DX= 747.833 mm.

From 6750 To 6760 DX= 747.833 mm.

From 6760 To 6810 DX= 747.833 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6809
 Angle/Node @2= .00 6808

From 6810 To 6820 DZ= 646.000 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

 From 6820 To 6830 DZ= 646.000 mm.

From 6830 To 6840 DZ= 646.000 mm.

From 6840 To 7010 DZ= 646.000 mm.

RESTRAINTS

Node 7010 +Y Mu = .30

From 7010 To 7020 DZ= 721.800 mm.

From 7020 To 7030 DZ= 721.800 mm.

From 7030 To 7040 DZ= 721.800 mm.

From 7040 To 7050 DZ= 721.800 mm.

From 7050 To 7210 DZ= 721.800 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 7109
 Angle/Node @2= .00 7108

From 7210 To 7220 DY= 739.000 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

 From 7220 To 7310 DY= 739.000 mm.

BEND at "TO" end

Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 7309
 Angle/Node @2= .00 7308

From 7310 To 7320 DX= 585.333 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

 From 7320 To 7330 DX= 585.333 mm.

From 7330 To 7410 DX= 585.333 mm.

RESTRAINTS

Node 7410 +Y Mu = .30
 Node 7410 Z

From 7410 To 7420 DX= 785.714 mm.

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

ALLOWABLE STRESSES

 From 7420 To 7430 DX= 785.714 mm.

From 7430 To 7440 DX= 785.714 mm.

From 7440 To 7450 DX= 785.714 mm.

From 7450 To 7460 DX= 785.714 mm.

From 7460 To 7470 DX= 785.714 mm.

From 7470 To 7610 DX= 785.714 mm.

RESTRAINTS

Node 7610 +Y Mu = .30

From 7610 To 7620 DX= 753.000 mm.

```

-----
From 7620 To 7630 DX= 753.000 mm.
-----
From 7630 To 7640 DX= 753.000 mm.
-----
From 7640 To 7650 DX= 753.000 mm.
-----
From 7650 To 7660 DX= 753.000 mm.
-----
From 7660 To 7810 DX= 753.000 mm.
-----
From 7810 To 7910 DX= 356.000 mm. DY= 41.000 mm.
-----
From 7910 To 8010 DX= 305.000 mm.
      B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa      Sh1= 88,772 KPa      Sh2= 88,772 KPa
      Sh3= 88,772 KPa      Sh4= 167,543 KPa      Sh5= 167,543 KPa      Sh6= 167,543 KPa
      Sh7= 167,543 KPa      Sh8= 167,543 KPa      Sh9= 167,543 KPa      Sy= 413,685 KPa
      Dia= 406.400 mm.      Wall= 36.525 mm.
      Insul Thk= 140.000 mm.
SIF's & TEE's
      Node 8010      Welding Tee      Meets D1, Notes 10a,c,d,e,f =ON
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 8010 To 8110 DX= 305.000 mm.
-----
From 8110 To 8210 DX= 500.000 mm.
RESTRAINTS
      Node 8210 +Y      Mu = .30
      Node 8210 X
-----
From 8210 To 8220 DX= 753.273 mm.
      B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa      Sh1= 88,772 KPa      Sh2= 88,772 KPa
      Sh3= 88,772 KPa      Sh4= 167,543 KPa      Sh5= 167,543 KPa      Sh6= 167,543 KPa
      Sh7= 167,543 KPa      Sh8= 167,543 KPa      Sh9= 167,543 KPa      Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 8220 To 8230 DX= 753.273 mm.
-----
From 8230 To 8240 DX= 753.273 mm.
-----
From 8240 To 8250 DX= 753.273 mm.
-----
From 8250 To 8260 DX= 753.273 mm.
-----
From 8260 To 8270 DX= 753.273 mm.
-----
From 8270 To 8280 DX= 753.273 mm.
-----
From 8280 To 8290 DX= 753.273 mm.
-----
From 8290 To 8300 DX= 753.273 mm.
-----
From 8300 To 8310 DX= 753.273 mm.
-----
From 8310 To 8410 DX= 753.273 mm.
RESTRAINTS
      Node 8410 +Y      Mu = .30
      Node 8410 Z
-----
From 8410 To 8420 DX= 711.333 mm.
-----
From 8420 To 8430 DX= 711.333 mm.
-----
From 8430 To 8510 DX= 711.333 mm.
BEND at "TO" end
      Radius= 609.600 mm. (LONG)      Bend Angle= 90.000      Angle/Node @1= 45.00 8509
      Angle/Node @2= .00 8508
-----

```

```

From 8510 To 8520 DY= -739.000 mm.
-----
From 8520 To 8610 DY= -739.000 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 609.600 mm. (LONG)    Bend Angle= 90.000    Angle/Node @1= 45.00 8609
    Angle/Node @2= .00 8608
-----
From 8610 To 8710 DZ= -794.000 mm.
    B31.1 (2012)    Sc= 167,543 KPa    Sh1= 88,772 KPa    Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa    Sh4= 167,543 KPa    Sh5= 167,543 KPa    Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa    Sh8= 167,543 KPa    Sh9= 167,543 KPa    Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 8710 To 8720 DZ= -792.286 mm.
    B31.1 (2012)    Sc= 167,543 KPa    Sh1= 88,772 KPa    Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa    Sh4= 167,543 KPa    Sh5= 167,543 KPa    Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa    Sh8= 167,543 KPa    Sh9= 167,543 KPa    Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 8720 To 8730 DZ= -792.286 mm.
-----
From 8730 To 8740 DZ= -792.286 mm.
-----
From 8740 To 8750 DZ= -792.286 mm.
-----
From 8750 To 8760 DZ= -792.286 mm.
-----
From 8760 To 8770 DZ= -792.286 mm.
-----
From 8770 To 8910 DZ= -792.286 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 609.600 mm. (LONG)    Bend Angle= 90.000    Angle/Node @1= 45.00 8909
    Angle/Node @2= .00 8908
-----
From 8910 To 8920 DX= 719.600 mm.
    B31.1 (2012)    Sc= 167,543 KPa    Sh1= 88,772 KPa    Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa    Sh4= 167,543 KPa    Sh5= 167,543 KPa    Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa    Sh8= 167,543 KPa    Sh9= 167,543 KPa    Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 8920 To 8930 DX= 719.600 mm.
-----
From 8930 To 8940 DX= 719.600 mm.
-----
From 8940 To 8950 DX= 719.600 mm.
-----
From 8950 To 9010 DX= 719.600 mm.
RESTRAINTS
    Node 9010 Y    Mu = .30
-----
From 9010 To 9020 DX= 774.000 mm.
-----
From 9020 To 9030 DX= 774.000 mm.
-----
From 9030 To 9040 DX= 774.000 mm.
-----
From 9040 To 9050 DX= 774.000 mm.
-----
From 9050 To 9060 DX= 774.000 mm.
-----
From 9060 To 9070 DX= 774.000 mm.
-----
From 9070 To 9080 DX= 774.000 mm.
-----
From 9080 To 9090 DX= 774.000 mm.
-----
From 9090 To 9100 DX= 774.000 mm.
-----

```

```

From 9100 To 9210 DX= 774.000 mm.
RESTRAINTS
Node 9210 Y Mu = .30
-----
From 9210 To 9220 DX= 667.400 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 9220 To 9230 DX= 667.400 mm.
-----
From 9230 To 9240 DX= 667.400 mm.
-----
From 9240 To 9250 DX= 667.400 mm.
-----
From 9250 To 9310 DX= 667.400 mm.
BEND at "TO" end
Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 9309
Angle/Node @2= .00 9308
-----
From 9310 To 9320 DZ= 792.875 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 9320 To 9330 DZ= 792.875 mm.
-----
From 9330 To 9340 DZ= 792.875 mm.
-----
From 9340 To 9350 DZ= 792.875 mm.
-----
From 9350 To 9360 DZ= 792.875 mm.
-----
From 9360 To 9370 DZ= 792.875 mm.
-----
From 9370 To 9380 DZ= 792.875 mm.
-----
From 9380 To 9610 DZ= 792.875 mm.
BEND at "TO" end
Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 9609
Angle/Node @2= .00 9608
-----
From 9610 To 9620 DY= 739.000 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 9620 To 9710 DY= 739.000 mm.
BEND at "TO" end
Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 9709
Angle/Node @2= .00 9708
-----
From 9710 To 9810 DX= 920.000 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
RESTRAINTS
Node 9810 +Y Mu = .30
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 9810 To 9820 DX= 750.000 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES

```

```

-----
From 9820 To 9830 DX= 750.000 mm.
-----
From 9830 To 9840 DX= 750.000 mm.
-----
From 9840 To 9850 DX= 750.000 mm.
-----
From 9850 To 9860 DX= 750.000 mm.
-----
From 9860 To 9870 DX= 750.000 mm.
-----
From 9870 To 9880 DX= 750.000 mm.
-----
From 9880 To 10010 DX= 750.000 mm.
RESTRAINTS
Node 10010 +Y Mu = .30
-----
From 10010 To 10020 DX= 702.000 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 10020 To 10030 DX= 702.000 mm.
-----
From 10030 To 10040 DX= 702.000 mm.
-----
From 10040 To 10050 DX= 702.000 mm.
-----
From 10050 To 10110 DX= 702.000 mm.
BEND at "TO" end
Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.0010109
Angle/Node @2= .0010108
-----
From 10110 To 10120 DY= -606.667 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 10120 To 10130 DY= -606.667 mm.
-----
From 10130 To 10210 DY= -606.667 mm.
BEND at "TO" end
Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.0010209
-----
From 10210 To 10220 DZ= 711.500 mm.
B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 10220 To 10230 DZ= 711.500 mm.
-----
From 10230 To 10240 DZ= 711.500 mm.
-----
From 10240 To 10250 DZ= 711.500 mm.
-----
From 10250 To 10260 DZ= 711.500 mm.
-----
From 10260 To 10270 DZ= 711.500 mm.
-----
From 10270 To 10280 DZ= 711.500 mm.
-----
From 10280 To 10310 DZ= 711.500 mm.
RESTRAINTS
Node 10310 +Y Mu = .30
-----

```

```

From 10310 To 10320 DZ= 777.250 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 10320 To 10330 DZ= 777.250 mm.
-----
From 10330 To 10340 DZ= 777.250 mm.
-----
From 10340 To 10410 DZ= 777.250 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 609.600 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.0010409
  Angle/Node @2= .0010408
-----
From 10410 To 10420 DY= -737.143 mm.
-----
From 10420 To 10430 DY= -737.143 mm.
-----
From 10430 To 10440 DY= -737.143 mm.
-----
From 10440 To 10450 DY= -737.143 mm.
-----
From 10450 To 10460 DY= -737.143 mm.
-----
From 10460 To 10470 DY= -737.143 mm.
-----
From 10470 To 10610 DY= -737.143 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 609.600 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.0010609
  Angle/Node @2= .0010608
-----
From 10610 To 10620 DZ= -773.250 mm.
-----
From 10620 To 10630 DZ= -773.250 mm.
-----
From 10630 To 10640 DZ= -773.250 mm.
-----
From 10640 To 10710 DZ= -773.250 mm.
RESTRAINTS
  Node 10710 +Y   Mu = .30
  Node 10710 X
-----
From 10710 To 10720 DZ= -722.222 mm.
  B31.1 (2012)      Sc= 167,543 KPa   Sh1= 88,772 KPa   Sh2= 88,772 KPa
    Sh3= 88,772 KPa   Sh4= 167,543 KPa   Sh5= 167,543 KPa   Sh6= 167,543 KPa
    Sh7= 167,543 KPa   Sh8= 167,543 KPa   Sh9= 167,543 KPa   Sy= 413,685 KPa
ALLOWABLE STRESSES
-----
From 10720 To 10730 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10730 To 10740 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10740 To 10750 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10750 To 10760 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10760 To 10770 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10770 To 10780 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10780 To 10790 DZ= -722.222 mm.
-----
From 10790 To 10910 DZ= -722.222 mm.
RESTRAINTS
  Node 10910 +Y   Mu = .30
-----
From 10910 To 10920 DZ= -739.778 mm.

```

B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
 ALLOWABLE STRESSES

From 10920 To 10930 DZ= -739.778 mm.

From 10930 To 10940 DZ= -739.778 mm.

From 10940 To 10950 DZ= -739.778 mm.

From 10950 To 10960 DZ= -739.778 mm.

From 10960 To 10970 DZ= -739.778 mm.

From 10970 To 10980 DZ= -739.778 mm.

From 10980 To 10990 DZ= -739.778 mm.

From 10990 To 11210 DZ= -739.778 mm.
 BEND at "TO" end
 Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.0011209
 Angle/Node @2= .0011208

From 11210 To 11220 DY= -670.000 mm.
 B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
 ALLOWABLE STRESSES

From 11220 To 11230 DY= -670.000 mm.

From 11230 To 11240 DY= -670.000 mm.

From 11240 To 11410 DY= -670.000 mm.
 BEND at "TO" end
 Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.0011409
 Angle/Node @2= .0011408

From 11410 To 11420 DZ= -775.500 mm.

From 11420 To 11510 DZ= -375.500 mm.

RESTRAINTS
 Node 11510 +Y Mu = .30

From 11510 To 11610 DZ= -713.000 mm.

From 11610 To 11710 DZ= -605.000 mm.
 Dia= 406.400 mm. Wall= 36.525 mm.
 Insul Thk= 140.000 mm.

SIF's & TEE's
 Node 11710 Unreinforced Tee Meets D1, Notes 10a,c,d,e,f =ON

From 11710 To 11810 DX= -140.007 mm. DZ= -140.007 mm.
 Dia= 323.850 mm. Wall= 36.525 mm.
 Insul Thk= 140.000 mm.

From 11810 To 11820 DX= -469.330 mm. DZ= -469.330 mm.
 Dia= 323.850 mm. Wall= 31.750 mm.
 Insul Thk= 140.000 mm.

From 11820 To 11830 DX= -469.330 mm. DZ= -469.330 mm.

From 11830 To 11910 DX= -469.330 mm. DZ= -469.330 mm.
 BEND at "TO" end
 Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.5011909
 Angle/Node @2= .0011908

```

From 11910 To 12010 DZ= -381.000 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 45.000    Angle/Node @1= 22.5012009
-----
From 12010 To 12110 DY= 721.000 mm.    DZ= -721.000 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 45.000    Angle/Node @1= 22.5012109
-----
From 12110 To 12120 DZ= -679.333 mm.
-----
From 12120 To 12130 DZ= -679.333 mm.
-----
From 12130 To 12210 DZ= -679.333 mm.
RESTRAINTS
    Node 12210 +Y    Mu = .30
-----
From 12210 To 12220 DZ= -750.600 mm.
-----
From 12220 To 12230 DZ= -750.600 mm.
-----
From 12230 To 12240 DZ= -750.600 mm.
-----
From 12240 To 12250 DZ= -750.600 mm.
-----
From 12250 To 12410 DZ= -750.600 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 45.000    Angle/Node @1= 22.5012409
    Angle/Node @2= .0012408
-----
From 12410 To 12420 DX= -491.000 mm.    DZ= -491.000 mm.
-----
From 12420 To 12510 DX= -491.000 mm.    DZ= -491.000 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 45.000    Angle/Node @1= 22.5012509
    Angle/Node @2= .0012508
-----
From 12510 To 12610 DZ= -190.000 mm.
-----
From 12710 To 12720 DZ= -457.500 mm.
-----
From 12720 To 12810 DZ= -457.500 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 90.000    Angle/Node @1= 45.0012809
-----
From 12810 To 12820 DX= 800.000 mm.
-----
From 12820 To 12910 DX= 800.000 mm.
-----
From 12910 To 13010 DX= 400.000 mm.
BEND at "TO" end
    Radius= 457.200 mm. (LONG)    Bend Angle= 45.108    Angle/Node @1= 22.5513009
    Angle/Node @2= .0013008
HANGERS
    Hanger Node =12910    Available Space = .0000 mm.
    Allowed Load Variation = 20.0000    No. Hangers = 1    Short Range Flag = -1
    User Operating Load = .00 N.    Free Node = 0    Free Node = 0
    Free Code = 0.0    Spring Rate = 333.00 N./cm.
    Theoretical Cold Load = 8,000.00 N.
-----
From 13010 To 13110 DX= 531.000 mm.    DY= 533.000 mm.    DZ= -1.000 mm.
-----
From 11710 To 13210 DX= 140.007 mm.    DZ= -140.007 mm.
    Dia= 323.850 mm.    Wall= 36.525 mm.
    Insul Thk= 140.000 mm.
-----
From 13210 To 13220 DX= 467.663 mm.    DZ= -467.663 mm.
    Dia= 323.850 mm.    Wall= 31.750 mm.
    Insul Thk= 140.000 mm.

```



```

-----
From 13220 To 13230 DX= 467.663 mm. DZ= -467.663 mm.
-----
From 13230 To 13310 DX= 467.663 mm. DZ= -467.663 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.5013309
  Angle/Node @2= .0013308
-----
From 13310 To 13410 DZ= -381.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.5013409
-----
From 13410 To 13510 DY= 721.000 mm. DZ= -721.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.5013509
-----
From 13510 To 13520 DZ= -681.333 mm.
-----
From 13520 To 13530 DZ= -681.333 mm.
-----
From 13530 To 13610 DZ= -681.333 mm.
RESTRAINTS
  Node 13610 +Y Mu = .30
-----
From 13610 To 13620 DZ= -749.000 mm.
-----
From 13620 To 13630 DZ= -749.000 mm.
-----
From 13630 To 13640 DZ= -749.000 mm.
-----
From 13640 To 13650 DZ= -749.000 mm.
-----
From 13650 To 13810 DZ= -749.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.5013809
  Angle/Node @2= .0013808
-----
From 13810 To 13820 DX= 495.000 mm. DZ= -495.000 mm.
-----
From 13820 To 13910 DX= 495.000 mm. DZ= -495.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.5013909
  Angle/Node @2= .0013908
-----
From 13910 To 14010 DZ= -190.000 mm.
-----
From 14010 To 14110 DZ= -610.000 mm.
RIGID Weight= 1.00 N.
-----
From 14210 To 14310 DY= -672.000 mm.
RIGID Weight= 5,443.00 N.
-----
From 14310 To 14410 DY= -530.700 mm.
RIGID Weight= 8,165.00 N.
-----
From 14410 To 14510 DY= -237.500 mm.
RIGID Weight= 5,076.00 N.
-----
From 14510 To 14610 DX= 674.000 mm.
RIGID Weight= .00 N.
HANGERS
  Hanger Node =14610 Available Space = .0000 mm.
  Allowed Load Variation = 20.0000 No. Hangers = 1 Short Range Flag = -1
  User Operating Load = .00 N. Free Node = 0 Free Node = 0
  Free Code = 0.0 Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
  Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.
-----
From 14510 To 14710 DX= -674.000 mm.

```

```

RIGID Weight= .00 N.
HANGERS
  Hanger Node =14710   Available Space = .0000 mm.
  Allowed Load Variation = 20.0000   No. Hangers = 1   Short Range Flag = -1
  User Operating Load = .00 N.   Free Node = 0   Free Node = 0
  Free Code = 0.0   Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
  Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.
-----
From 14510 To 14110 DY= -267.400 mm.
RIGID Weight= 5,715.00 N.
-----
From 14110 To 14810 DY= -561.300 mm.
RIGID Weight=11,997.01 N.
-----
From 14810 To 14910 DY= -207.100 mm.
RIGID Weight= 4,426.00 N.
-----
From 14910 To 15010 DY= -514.200 mm.
RIGID Weight= 8,165.00 N.
-----
From 15010 To 15110 DY= -672.000 mm.
RIGID Weight= 5,443.00 N.
-----
From 14810 To 15210 DZ= -508.000 mm.
RIGID Weight= 1.00 N.
-----
From 15210 To 15220 DZ= -457.500 mm.
-----
From 15220 To 15310 DZ= -457.500 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 90.000   Angle/Node @1= 45.0015309
-----
From 15310 To 15320 DX= -800.000 mm.
-----
From 15320 To 15410 DX= -800.000 mm.
-----
From 15410 To 15510 DX= -400.000 mm.
BEND at "TO" end
  Radius= 457.200 mm. (LONG)   Bend Angle= 45.000   Angle/Node @1= 22.5015509
  Angle/Node @2= .0015508
HANGERS
  Hanger Node =15410   Available Space = .0000 mm.
  Allowed Load Variation = 20.0000   No. Hangers = 1   Short Range Flag = 1
  User Operating Load = .00 N.   Free Node = 0   Free Node = 0
  Free Code = 0.0   Spring Rate = 333.00 N./cm.
  Theoretical Cold Load = 8,000.00 N.
-----
From 15510 To 13110 DX= -532.000 mm.   DY= 532.000 mm.
SIF's & TEE's
  Node 13110   Welding Tee   Meets D1, Notes 10a,c,d,e,f =ON
-----
From 13110 To 13120 DY= 733.333 mm.
  Dia= 406.400 mm.   Wall= 36.525 mm.
  Insul Thk= 140.000 mm.
-----
From 13120 To 13130 DY= 733.333 mm.
-----
From 13130 To 13140 DY= 733.333 mm.
-----
From 13140 To 13150 DY= 733.333 mm.
-----
From 13150 To 13160 DY= 733.333 mm.
-----
From 13160 To 15610 DY= 733.333 mm.
RESTRAINTS
  Node 15610 ANC   Cnode 15611
DISPLACEMENTS
  Node 15611   DX1= .000 mm.   DY1= -11.380 mm.   DZ1= 19.220 mm.   RX1= .500

```

RY1= .000 RZ1= .000

From 12610 To 20910 DZ= -610.000 mm.
 B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa
 Dia= 323.850 mm. Wall= 31.750 mm.

GENERAL
 T1= 574 C T2= 574 C T3= 574 C P1=15,599.9922 KPa P2=15,599.9922 KPa
 P3=15,599.9922 KPa Insul Thk= 140.000 mm. Insul Den= .0002200 kg./cu.cm.

RIGID Weight= 1.00 N.
 ALLOWABLE STRESSES

From 21010 To 21110 DY= -672.000 mm.
 B31.1 (2012) Sc= 167,543 KPa Sh1= 88,772 KPa Sh2= 88,772 KPa
 Sh3= 88,772 KPa Sh4= 167,543 KPa Sh5= 167,543 KPa Sh6= 167,543 KPa
 Sh7= 167,543 KPa Sh8= 167,543 KPa Sh9= 167,543 KPa Sy= 413,685 KPa

GENERAL
 T1= 574 C T2= 574 C P2=15,599.9922 KPa

RIGID Weight= 5,443.00 N.
 ALLOWABLE STRESSES

From 21110 To 21210 DY= -530.700 mm.
 RIGID Weight= 8,165.00 N.

From 21210 To 21310 DY= -237.500 mm.
 RIGID Weight= 5,076.00 N.

From 21310 To 21410 DX= 674.000 mm.
 RIGID Weight= .00 N.
 HANGERS
 Hanger Node =21410 Available Space = .0000 mm.
 Allowed Load Variation = 20.0000 No. Hangers = 1 Short Range Flag = -1
 User Operating Load = .00 N. Free Node = 0 Free Node = 0
 Free Code = 0.0 Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
 Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.

From 21310 To 21510 DX= -674.000 mm.
 RIGID Weight= .00 N.
 HANGERS
 Hanger Node =21510 Available Space = .0000 mm.
 Allowed Load Variation = 20.0000 No. Hangers = 1 Short Range Flag = -1
 User Operating Load = .00 N. Free Node = 0 Free Node = 0
 Free Code = 0.0 Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
 Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.

From 21310 To 20910 DY= -267.400 mm.
 RIGID Weight= 5,715.00 N.

From 20910 To 21610 DY= -561.300 mm.
 RIGID Weight=11,997.01 N.

From 21610 To 21710 DY= -207.100 mm.
 RIGID Weight= 4,426.00 N.

From 21710 To 21810 DY= -514.200 mm.
 RIGID Weight= 8,165.00 N.

From 21810 To 21910 DY= -672.000 mm.
 RIGID Weight= 5,443.00 N.

From 21610 To 12710 DZ= -508.000 mm.
 RIGID Weight= 1.00 N.

MATERIAL Changes:

10

20

Mat= (191)A335 P91 E= 213,737,456 KPa

v = .300 Density= .0076 kg./cu.cm.

BEND ELEMENTS

60	110	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 109 Angle/Node @2= .00 108
440	510	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 509 Angle/Node @2= .00 508
630	710	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 709 Angle/Node @2= .00 708
730	810	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 809 Angle/Node @2= .00 808
1370	1610	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 1609 Angle/Node @2= .00 1608
1640	1910	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 1909 Angle/Node @2= .00 1908
2930	3010	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 3009 Angle/Node @2= .00 3008
3040	3110	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 3109 Angle/Node @2= .00 3108
3150	3310	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 3309 Angle/Node @2= .00 3308
3330	3410	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 3409 Angle/Node @2= .00 3408
4810	4910	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 4909 Angle/Node @2= .00 4908
4930	5110	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50 5109 Angle/Node @2= .00 5108
5120	5210	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 5209 Angle/Node @2= .00 5208
5930	6110	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6109 Angle/Node @2= .00 6108
6120	6210	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6209 Angle/Node @2= .00 6208
6440	6510	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6509 Angle/Node @2= .00 6508
6760	6810	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 6809 Angle/Node @2= .00 6808
7050	7210	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 7109 Angle/Node @2= .00 7108
7220	7310	Radius= 457.200 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 7309 Angle/Node @2= .00 7308
8430	8510	Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 8509 Angle/Node @2= .00 8508
8520	8610	Radius= 609.600 mm. (LONG) Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00 8609 Angle/Node @2= .00 8608

8770	8910	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		8909 Angle/Node @2= .00 8908
9250	9310	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		9309 Angle/Node @2= .00 9308
9380	9610	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		9609 Angle/Node @2= .00 9608
9620	9710	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		9709 Angle/Node @2= .00 9708
10050	10110	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		10109 Angle/Node @2= .0010108
10130	10210	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		10209
10340	10410	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		10409 Angle/Node @2= .0010408
10470	10610	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		10609 Angle/Node @2= .0010608
10990	11210	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		11209 Angle/Node @2= .0011208
11240	11410	Radius= 609.600 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		11409 Angle/Node @2= .0011408
11830	11910	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		11909 Angle/Node @2= .0011908
11910	12010	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		12009
12010	12110	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		12109
12250	12410	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		12409 Angle/Node @2= .0012408
12420	12510	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		12509 Angle/Node @2= .0012508
12720	12810	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00
		12809
12910	13010	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.108 Angle/Node @1= 22.55
		13009 Angle/Node @2= .0013008
13230	13310	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		13309 Angle/Node @2= .0013308
13310	13410	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		13409
13410	13510	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		13509
13650	13810	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		13809 Angle/Node @2= .0013808
13820	13910	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 45.000 Angle/Node @1= 22.50
		13909 Angle/Node @2= .0013908
15220	15310	Radius= 457.200 mm. (LONG)
		Bend Angle= 90.000 Angle/Node @1= 45.00

2210	+Y		.30	.000	1.000	.000
2210	X			1.000	.000	.000
2510	+Y		.30	.000	1.000	.000
2510	X			1.000	.000	.000
2510	Z			.000	.000	1.000
2710	Y		.30	.000	1.000	.000
2910	Y		.30	.000	1.000	.000
3510	+Y			.000	1.000	.000
4710	+Y			.000	1.000	.000
5210	+Y			.000	1.000	.000
5510	+Y		.30	.000	1.000	.000
5510	Z			.000	.000	1.000
5710	+Y		.30	.000	1.000	.000
5710	X			1.000	.000	.000
5910	+Y		.30	.000	1.000	.000
5910	Z			.000	.000	1.000
6410	+Y		.30	.000	1.000	.000
6710	Y		.30	.000	1.000	.000
7010	+Y		.30	.000	1.000	.000
7410	+Y		.30	.000	1.000	.000
7410	Z			.000	.000	1.000
7610	+Y		.30	.000	1.000	.000
8210	+Y		.30	.000	1.000	.000
8210	X			1.000	.000	.000
8410	+Y		.30	.000	1.000	.000
8410	Z			.000	.000	1.000
9010	Y		.30	.000	1.000	.000
9210	Y		.30	.000	1.000	.000
9810	+Y		.30	.000	1.000	.000
10010	+Y		.30	.000	1.000	.000
10310	+Y		.30	.000	1.000	.000
10710	+Y		.30	.000	1.000	.000
10710	X			1.000	.000	.000
10910	+Y		.30	.000	1.000	.000
11510	+Y		.30	.000	1.000	.000
12210	+Y		.30	.000	1.000	.000
13610	+Y		.30	.000	1.000	.000
15610	ANC	15611		.000	.000	.000

DISPLACEMENTS

13160	15610	Node 15611 DX1= .000 mm. DY1= -11.380 mm. DZ1= 19.220 mm. RX1= .500 RY1= .000 RZ1= .000
-------	-------	---

HANGER CONTROL AND LOCATION DATA

		No. of Hanger Design Load Cases = 1 Actual Cold Load Flag = 0.0 Short Range Spring Flag = 1 Allowed Load Variation (%) = 20.0000 Default Hanger Table = 5
12910	13010	Hanger Node =12910 Available Space = .0000 mm. Allowed Load Variation = 20.0000 No. Hangers = 1 Short Range Flag = -1 User Operating Load = .00 N. Free Node = 0 Free Node = 0 Free Code = 0.0 Spring Rate = 333.00 N./cm. Theoretical Cold Load = 8,000.00 N.
14510	14610	Hanger Node =14610 Available Space = .0000 mm. Allowed Load Variation = 20.0000 No. Hangers = 1 Short Range Flag = -1 User Operating Load = .00 N. Free Node = 0

```

Free Node = 0    Free Code = 0.0
Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.

14510          14710          Hanger Node =14710
Available Space = .0000 mm.
Allowed Load Variation = 20.0000
No. Hangers = 1    Short Range Flag = -1
User Operating Load = .00 N.    Free Node = 0
Free Node = 0    Free Code = 0.0
Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.

15410          15510          Hanger Node =15410
Available Space = .0000 mm.
Allowed Load Variation = 20.0000
No. Hangers = 1    Short Range Flag = 1
User Operating Load = .00 N.    Free Node = 0
Free Node = 0    Free Code = 0.0
Spring Rate = 333.00 N./cm.
Theoretical Cold Load = 8,000.00 N.

21310          21410          Hanger Node =21410
Available Space = .0000 mm.
Allowed Load Variation = 20.0000
No. Hangers = 1    Short Range Flag = -1
User Operating Load = .00 N.    Free Node = 0
Free Node = 0    Free Code = 0.0
Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.

21310          21510          Hanger Node =21510
Available Space = .0000 mm.
Allowed Load Variation = 20.0000
No. Hangers = 1    Short Range Flag = -1
User Operating Load = .00 N.    Free Node = 0
Free Node = 0    Free Code = 0.0
Spring Rate = 1,333.34 N./cm.
Theoretical Cold Load = 28,500.02 N.

```

INPUT UNITS USED...

```

UNITS=      SI (m NOM/SCH INPUT= ON
LENGTH      inches      x    25.400  =   mm.
FORCE       pounds      x    4.448  =   N.
MASS (dynamics) pounds    x    0.454  =   Kg.
MOMENTS (INPUT) inch-pounds x    0.113 =   N.m.
MOMENTS (OUTPUT) inch-pounds x    0.113 =   N.m.
STRESS      lbs./sq.in.  x    6.895  =   KPa
TEMP. SCALE degrees F.   x    0.556  =   C
PRESSURE    psig        x    6.895  =   KPa
ELASTIC MODULUS lbs./sq.in. x    6.895 =   KPa
PIPE DENSITY lbs./cu.in.  x    0.028  =   kg./cu.cm.
INSULATION DENS. lbs./cu.in. x    0.028 =   kg./cu.cm.
FLUID DENSITY lbs./cu.in.  x    0.028 =   kg./cu.cm.
TRANSL. STIF lbs./in.    x    1.751  =   N./cm.
ROTATIONAL STIF in.lb./deg. x    0.113 =   N.m./deg
UNIFORM LOAD lb./in.     x    1.751  =   N./cm.
G LOAD      g's         x    1.000  =   g's
WIND LOAD   lbs./sq.in.  x    6.895  =   KPa
ELEVATION   inches      x    0.025  =   m.
COMPOUND LENGTH inches    x    25.400 =   mm.
DIAMETER    inches      x    25.400 =   mm.
WALL THICKNESS inches    x    25.400 =   mm.

```

SETUP FILE PARAMETERS

CONNECT GEOMETRY THRU CNODES = YES
MIN ALLOWED BEND ANGLE = 5.00000
MAX ALLOWED BEND ANGLE = 95.0000
BEND LENGTH ATTACHMENT PERCENT = 1.00000
MIN ANGLE TO ADJACENT BEND PT = 5.00000
LOOP CLOSURE TOLERANCE = 25.4000 mm.
THERMAL BOWING HORZ TOLERANCE = 0.100000E-03
AUTO NODE NUMBER INCREMENT= 10.0000
Z AXIS UP= NO
USE PRESSURE STIFFENING = DEFAULT
ALPHA TOLERANCE = 0.500000E-01
RESLD-FORCE = NO
HGR DEF RESWGT STIF = 0.175127E+13 N./cm.
DECOMP SNG TOL = 0.100000E+11
BEND AXIAL SHAPE = YES
FRICT STIF = 0.175127E+07 N./cm.
FRICT NORM FORCE VAR = 0.150000
FRICT ANGLE VAR = 15.0000
FRICT SLIDE MULT = 1.00000
ROD TOLERANCE = 1.00000
ROD INC = 2.00000
INCORE NUMERICAL CHECK = NO
OUTCORE NUMERICAL CHECK = NO
DEFAULT TRANS RESTRAINT STIFF= 0.175127E+13 N./cm.
DEFAULT ROT RESTRAINT STIFF= 0.112985E+12 N.m./deg
IGNORE SPRING HANGER STIFFNESS = NO
MISSING MASS ZPA = EXTRACTED
MIN WALL MILL TOLERANCE = 12.5000
WRC-107 VERSION = MAR 79 1B1/2B1
WRC-107 INTERPOLATION = LAST VALUE
DEFAULT AMBIENT TEMPERATURE= 21.1111 C
BOURDON PRESSURE= NONE
COEFFICIENT OF FRICTION (MU) = 0.000000
INCLUDE SPRG STIF IN HGR OPE = NO
INCLUDE INSULATION IN HYDROTEST = NO
REDUCED INTERSECTION = B31.1 (POST1980)
USE WRC329 NO
NO REDUCED SIF FOR RFT AND WLT NO
B31.1 REDUCED Z FIX = YES
CLASS 1 BRANCH FLEX NO
ALL STRESS CASES CORRODED = NO
ADD TORSION IN SL STRESS = DEFAULT
ADD F/A IN STRESS = DEFAULT
OCCASIONAL LOAD FACTOR = 0.000000
DEFAULT CODE = B31.3
B31.3 SUS CASE SIF FACTOR = 1.00000
ALLOW USERS BEND SIF = NO
USE SCHNEIDER NO
YIELD CRITERION STRESS = MAX 3D SHEAR
USE PD/4T NO
BASE HOOP STRESS ON ? = ID
EN13480 USE IN OUTPLANE SIFS= NO
LIBERAL EXPANSION ALLOWABLE= YES
B31.3 SEC 319.2.3C SAXIAL= Default
B31.3 WELDING/CONTOUR TEE ISB16.9 FALSE
PRESSURE VARIATION IN EXP CASE= DEFAULT
IMPLEMENT B313 APP-P NO
IMPLEMENT B313 CODE CASE 178 YES
IGNORE B31.1/B31.3 Wc FACTOR= YES
USE FRP SIF = YES
USE FRP FLEX = YES
BS 7159 Pressure Stiffening= Design Strain
FRP Property Data File= CAESAR.FRP
FRP Emod (axial) = 0.220632E+08 KPa
FRP Ratio Gmod/Emod (axial) = 0.250000
FRP Ea/Eh*Vh/a = 0.152730
FRP Laminate Type = THREE
FRP Alpha = 21.6000 C

FRP Density = 0.166079E-02 kg./cu.cm.
 EXCLUDE f2 FROM UKOOA BENDING = NO

EXECUTION CONTROL PARAMETERS

Rigid/ExpJt Print Flag 1.000
 Bourdon Option 1.000
 Loop Closure Flag 2.000
 Thermal Bowing Delta Temp .. .000 C
 Liberal Allowable Flag000
 Uniform Load Option000

 Ambient Temperature 21.111 C
 Plastic (FRP) Alpha 21.600
 Plastic (FRP) GMOD/EMODa250
 Plastic (FRP) Laminate Type. 3.000
 Eqn Optimizer000
 Node Selection000
 Eqn Ordering000
 Collins000
 Degree Determination000
 User Eqn Control000

COORDINATE REPORT

/----- (mm.) -----/			
NODE	X	Y	Z
10	.000	.000	.000
20	833.333	.000	.000
30	1666.667	.000	.000
40	2500.000	.000	.000
50	3333.333	.000	.000
60	4166.667	.000	.000
110	5000.000	.000	.000
120	5000.000	-720.000	.000
130	5000.000	-1440.000	.000
140	5000.000	-2160.000	.000
210	5000.000	-2880.000	.000
220	5000.000	-3565.000	.000
230	5000.000	-4250.000	.000
240	5000.000	-4935.000	.000
310	5000.000	-5620.000	.000
320	5000.000	-6305.000	.000
330	5000.000	-6990.000	.000
340	5000.000	-7675.000	.000
410	5000.000	-8360.000	.000
420	5000.000	-9147.000	.000
430	5000.000	-9934.000	.000
440	5000.000	-10721.000	.000
510	5000.000	-11508.000	.000
513	5814.000	-11508.000	.000
516	6628.000	-11508.000	.000
519	7442.000	-11508.000	.000
522	8256.000	-11508.000	.000
520	9070.000	-11508.000	.000
620	9869.333	-11508.000	.000
630	10668.666	-11508.000	.000
710	11467.999	-11508.000	.000
720	11467.999	-12214.667	.000
730	11467.999	-12921.334	.000
810	11467.999	-13628.001	.000
820	11467.999	-13628.001	686.667
830	11467.999	-13628.001	1373.333
1010	11467.999	-13628.001	2060.000
1020	11467.999	-13628.001	2800.375
1030	11467.999	-13628.001	3540.750
1040	11467.999	-13628.001	4281.125

1050	11467.999	-13628.001	5021.500
1060	11467.999	-13628.001	5761.875
1070	11467.999	-13628.001	6502.250
1080	11467.999	-13628.001	7242.625
1310	11467.999	-13628.001	7983.000
1320	11467.999	-13628.001	8697.286
1330	11467.999	-13628.001	9411.572
1340	11467.999	-13628.001	10125.858
1350	11467.999	-13628.001	10840.145
1360	11467.999	-13628.001	11554.431
1370	11467.999	-13628.001	12268.717
1610	11467.999	-13628.001	12983.003
1620	11467.999	-14392.001	12983.003
1630	11467.999	-15156.001	12983.003
1640	11467.999	-15920.001	12983.003
1910	11467.999	-16684.000	12983.003
2010	11467.999	-16684.000	12220.003
2020	11467.999	-16684.000	11518.170
2030	11467.999	-16684.000	10816.337
2040	11467.999	-16684.000	10114.504
2050	11467.999	-16684.000	9412.671
2060	11467.999	-16684.000	8710.838
2210	11467.999	-16684.000	8009.004
2220	11467.999	-16684.000	7236.277
2230	11467.999	-16684.000	6463.550
2240	11467.999	-16684.000	5690.822
2250	11467.999	-16684.000	4918.095
2260	11467.999	-16684.000	4145.367
2270	11467.999	-16684.000	3372.640
2280	11467.999	-16684.000	2599.913
2290	11467.999	-16684.000	1827.185
2300	11467.999	-16684.000	1054.458
2310	11467.999	-16684.000	281.731
2510	11467.999	-16684.000	-490.997
2520	11467.999	-16684.000	-1243.497
2530	11467.999	-16684.000	-1995.997
2540	11467.999	-16684.000	-2748.497
2550	11467.999	-16684.000	-3500.997
2560	11467.999	-16684.000	-4253.497
2710	11467.999	-16684.000	-5005.997
2720	11467.999	-16684.000	-5725.552
2730	11467.999	-16684.000	-6445.108
2740	11467.999	-16684.000	-7164.664
2750	11467.999	-16684.000	-7884.219
2760	11467.999	-16684.000	-8603.774
2770	11467.999	-16684.000	-9323.330
2780	11467.999	-16684.000	-10042.886
2790	11467.999	-16684.000	-10762.441
2910	11467.999	-16684.000	-11481.997
2920	11467.999	-16684.000	-12069.330
2930	11467.999	-16684.000	-12656.663
3010	11467.999	-16684.000	-13243.996
3020	11467.999	-15946.500	-13243.996
3030	11467.999	-15209.000	-13243.996
3040	11467.999	-14471.500	-13243.996
3110	11467.999	-13734.000	-13243.996
3120	11467.999	-13734.000	-12521.196
3130	11467.999	-13734.000	-11798.396
3140	11467.999	-13734.000	-11075.597
3150	11467.999	-13734.000	-10352.797
3310	11467.999	-13734.000	-9629.997
3320	11467.999	-13125.667	-9629.997
3330	11467.999	-12517.334	-9629.997
3410	11467.999	-11909.001	-9629.997
3510	10710.999	-11909.001	-9629.997
3610	10410.999	-11909.001	-9629.997
3710	9890.499	-11909.001	-9629.997
3810	9890.499	-11372.307	-9093.303

3910	9890.499	-10835.612	-8556.608
3710	9890.499	-11909.001	-9629.997
4010	9369.999	-11909.001	-9629.997
4110	8606.499	-11909.001	-9629.997
4210	7842.999	-11909.001	-9629.997
4310	7442.999	-11909.001	-9629.997
4410	6667.999	-11134.001	-9629.997
4510	5892.999	-10359.001	-9629.997
4310	7442.999	-11909.001	-9629.997
4610	7042.999	-11909.001	-9629.997
4710	6321.999	-11909.001	-9629.997
4810	6116.999	-11909.001	-9629.997
4910	5564.999	-11909.001	-9629.997
4920	5564.999	-12538.001	-9629.997
4930	5564.999	-13167.001	-9629.997
5110	5564.999	-13796.001	-9629.997
5120	5564.999	-14318.501	-10152.497
5210	5564.999	-14841.001	-10674.997
5220	6243.599	-14841.001	-10674.997
5230	6922.199	-14841.001	-10674.997
5240	7600.799	-14841.001	-10674.997
5250	8279.399	-14841.001	-10674.997
5510	8957.999	-14841.001	-10674.997
5520	9707.999	-14841.001	-10674.997
5530	10457.999	-14841.001	-10674.997
5540	11207.999	-14841.001	-10674.997
5550	11957.999	-14841.001	-10674.997
5560	12707.999	-14841.001	-10674.997
5570	13457.999	-14841.001	-10674.997
5580	14207.999	-14841.001	-10674.997
5590	14957.999	-14841.001	-10674.997
5600	15707.999	-14841.001	-10674.997
5610	16458.000	-14841.001	-10674.997
5620	17208.000	-14841.001	-10674.997
5710	17958.000	-14841.001	-10674.997
5720	18708.000	-14841.001	-10674.997
5730	19458.000	-14841.001	-10674.997
5740	20208.000	-14841.001	-10674.997
5750	20958.000	-14841.001	-10674.997
5760	21708.000	-14841.001	-10674.997
5770	22458.000	-14841.001	-10674.997
5780	23208.000	-14841.001	-10674.997
5910	23958.000	-14841.001	-10674.997
5920	24674.000	-14841.001	-10674.997
5930	25390.000	-14841.001	-10674.997
6110	26106.000	-14841.001	-10674.997
6120	26106.000	-15580.001	-10674.997
6210	26106.000	-16319.001	-10674.997
6220	26106.000	-16319.001	-11396.797
6230	26106.000	-16319.001	-12118.597
6240	26106.000	-16319.001	-12840.396
6250	26106.000	-16319.001	-13562.196
6410	26106.000	-16319.001	-14283.996
6420	26106.000	-16319.001	-14929.996
6430	26106.000	-16319.001	-15575.996
6440	26106.000	-16319.001	-16221.996
6510	26106.000	-16319.001	-16867.996
6520	26870.125	-16319.001	-16867.996
6530	27634.250	-16319.001	-16867.996
6540	28398.375	-16319.001	-16867.996
6550	29162.500	-16319.001	-16867.996
6560	29926.625	-16319.001	-16867.996
6570	30690.750	-16319.001	-16867.996
6580	31454.875	-16319.001	-16867.996
6710	32219.000	-16319.001	-16867.996
6720	32966.832	-16319.001	-16867.996
6730	33714.664	-16319.001	-16867.996
6740	34462.496	-16319.001	-16867.996

6750	35210.328	-16319.001	-16867.996
6760	35958.160	-16319.001	-16867.996
6810	36705.992	-16319.001	-16867.996
6820	36705.992	-16319.001	-16221.996
6830	36705.992	-16319.001	-15575.996
6840	36705.992	-16319.001	-14929.996
7010	36705.992	-16319.001	-14283.996
7020	36705.992	-16319.001	-13562.196
7030	36705.992	-16319.001	-12840.396
7040	36705.992	-16319.001	-12118.597
7050	36705.992	-16319.001	-11396.797
7210	36705.992	-16319.001	-10674.997
7220	36705.992	-15580.001	-10674.997
7310	36705.992	-14841.001	-10674.997
7320	37291.324	-14841.001	-10674.997
7330	37876.656	-14841.001	-10674.997
7410	38461.988	-14841.001	-10674.997
7420	39247.703	-14841.001	-10674.997
7430	40033.418	-14841.001	-10674.997
7440	40819.133	-14841.001	-10674.997
7450	41604.848	-14841.001	-10674.997
7460	42390.563	-14841.001	-10674.997
7470	43176.277	-14841.001	-10674.997
7610	43961.992	-14841.001	-10674.997
7620	44714.992	-14841.001	-10674.997
7630	45467.992	-14841.001	-10674.997
7640	46220.992	-14841.001	-10674.997
7650	46973.992	-14841.001	-10674.997
7660	47726.992	-14841.001	-10674.997
7810	48479.992	-14841.001	-10674.997
7910	48835.992	-14800.001	-10674.997
8010	49140.992	-14800.001	-10674.997
8110	49445.992	-14800.001	-10674.997
8210	49945.992	-14800.001	-10674.997
8220	50699.266	-14800.001	-10674.997
8230	51452.539	-14800.001	-10674.997
8240	52205.813	-14800.001	-10674.997
8250	52959.086	-14800.001	-10674.997
8260	53712.359	-14800.001	-10674.997
8270	54465.633	-14800.001	-10674.997
8280	55218.906	-14800.001	-10674.997
8290	55972.180	-14800.001	-10674.997
8300	56725.453	-14800.001	-10674.997
8310	57478.727	-14800.001	-10674.997
8410	58232.000	-14800.001	-10674.997
8420	58943.332	-14800.001	-10674.997
8430	59654.664	-14800.001	-10674.997
8510	60365.996	-14800.001	-10674.997
8520	60365.996	-15539.001	-10674.997
8610	60365.996	-16278.001	-10674.997
8710	60365.996	-16278.001	-11468.997
8720	60365.996	-16278.001	-12261.283
8730	60365.996	-16278.001	-13053.569
8740	60365.996	-16278.001	-13845.855
8750	60365.996	-16278.001	-14638.142
8760	60365.996	-16278.001	-15430.428
8770	60365.996	-16278.001	-16222.714
8910	60365.996	-16278.001	-17015.000
8920	61085.598	-16278.001	-17015.000
8930	61805.199	-16278.001	-17015.000
8940	62524.801	-16278.001	-17015.000
8950	63244.402	-16278.001	-17015.000
9010	63964.004	-16278.001	-17015.000
9020	64738.004	-16278.001	-17015.000
9030	65512.004	-16278.001	-17015.000
9040	66286.000	-16278.001	-17015.000
9050	67060.000	-16278.001	-17015.000
9060	67834.000	-16278.001	-17015.000

9070	68608.000	-16278.001	-17015.000
9080	69382.000	-16278.001	-17015.000
9090	70156.000	-16278.001	-17015.000
9100	70930.000	-16278.001	-17015.000
9210	71704.000	-16278.001	-17015.000
9220	72371.398	-16278.001	-17015.000
9230	73038.797	-16278.001	-17015.000
9240	73706.195	-16278.001	-17015.000
9250	74373.594	-16278.001	-17015.000
9310	75040.992	-16278.001	-17015.000
9320	75040.992	-16278.001	-16222.125
9330	75040.992	-16278.001	-15429.250
9340	75040.992	-16278.001	-14636.375
9350	75040.992	-16278.001	-13843.500
9360	75040.992	-16278.001	-13050.625
9370	75040.992	-16278.001	-12257.750
9380	75040.992	-16278.001	-11464.875
9610	75040.992	-16278.001	-10672.000
9620	75040.992	-15539.001	-10672.000
9710	75040.992	-14800.001	-10672.000
9810	75960.992	-14800.001	-10672.000
9820	76710.992	-14800.001	-10672.000
9830	77460.992	-14800.001	-10672.000
9840	78210.992	-14800.001	-10672.000
9850	78960.992	-14800.001	-10672.000
9860	79710.992	-14800.001	-10672.000
9870	80460.992	-14800.001	-10672.000
9880	81210.992	-14800.001	-10672.000
10010	81960.992	-14800.001	-10672.000
10020	82662.992	-14800.001	-10672.000
10030	83364.992	-14800.001	-10672.000
10040	84066.992	-14800.001	-10672.000
10050	84768.992	-14800.001	-10672.000
10110	85470.992	-14800.001	-10672.000
10120	85470.992	-15406.668	-10672.000
10130	85470.992	-16013.335	-10672.000
10210	85470.992	-16620.002	-10672.000
10220	85470.992	-16620.002	-9960.500
10230	85470.992	-16620.002	-9249.000
10240	85470.992	-16620.002	-8537.500
10250	85470.992	-16620.002	-7826.000
10260	85470.992	-16620.002	-7114.500
10270	85470.992	-16620.002	-6403.000
10280	85470.992	-16620.002	-5691.500
10310	85470.992	-16620.002	-4980.000
10320	85470.992	-16620.002	-4202.750
10330	85470.992	-16620.002	-3425.500
10340	85470.992	-16620.002	-2648.250
10410	85470.992	-16620.002	-1871.000
10420	85470.992	-17357.145	-1871.000
10430	85470.992	-18094.287	-1871.000
10440	85470.992	-18831.430	-1871.000
10450	85470.992	-19568.572	-1871.000
10460	85470.992	-20305.715	-1871.000
10470	85470.992	-21042.857	-1871.000
10610	85470.992	-21780.000	-1871.000
10620	85470.992	-21780.000	-2644.250
10630	85470.992	-21780.000	-3417.500
10640	85470.992	-21780.000	-4190.750
10710	85470.992	-21780.000	-4964.000
10720	85470.992	-21780.000	-5686.222
10730	85470.992	-21780.000	-6408.444
10740	85470.992	-21780.000	-7130.667
10750	85470.992	-21780.000	-7852.889
10760	85470.992	-21780.000	-8575.111
10770	85470.992	-21780.000	-9297.334
10780	85470.992	-21780.000	-10019.557
10790	85470.992	-21780.000	-10741.779

10910	85470.992	-21780.000	-11464.002
10920	85470.992	-21780.000	-12203.779
10930	85470.992	-21780.000	-12943.557
10940	85470.992	-21780.000	-13683.334
10950	85470.992	-21780.000	-14423.111
10960	85470.992	-21780.000	-15162.889
10970	85470.992	-21780.000	-15902.666
10980	85470.992	-21780.000	-16642.443
10990	85470.992	-21780.000	-17382.221
11210	85470.992	-21780.000	-18121.998
11220	85470.992	-22450.000	-18121.998
11230	85470.992	-23120.000	-18121.998
11240	85470.992	-23790.000	-18121.998
11410	85470.992	-24460.000	-18121.998
11420	85470.992	-24460.000	-18897.498
11510	85470.992	-24460.000	-19272.998
11610	85470.992	-24460.000	-19985.998
11710	85470.992	-24460.000	-20590.998
11810	85330.984	-24460.000	-20731.006
11820	84861.656	-24460.000	-21200.336
11830	84392.328	-24460.000	-21669.666
11910	83923.000	-24460.000	-22138.996
12010	83923.000	-24460.000	-22519.996
12110	83923.000	-23739.000	-23240.996
12120	83923.000	-23739.000	-23920.330
12130	83923.000	-23739.000	-24599.664
12210	83923.000	-23739.000	-25278.998
12220	83923.000	-23739.000	-26029.598
12230	83923.000	-23739.000	-26780.197
12240	83923.000	-23739.000	-27530.797
12250	83923.000	-23739.000	-28281.396
12410	83923.000	-23739.000	-29031.996
12420	83432.000	-23739.000	-29522.996
12510	82941.000	-23739.000	-30013.996
12610	82941.000	-23739.000	-30203.996
12710	82940.992	-24301.301	-31322.000
12720	82940.992	-24301.301	-31779.500
12810	82940.992	-24301.301	-32237.000
12820	83740.992	-24301.301	-32237.000
12910	84540.992	-24301.301	-32237.000
13010	84940.992	-24301.301	-32237.000
13110	85471.992	-23768.301	-32238.000
11710	85470.992	-24460.000	-20590.998
13210	85611.000	-24460.000	-20731.006
13220	86078.664	-24460.000	-21198.670
13230	86546.328	-24460.000	-21666.334
13310	87013.992	-24460.000	-22133.998
13410	87013.992	-24460.000	-22514.998
13510	87013.992	-23739.000	-23235.998
13520	87013.992	-23739.000	-23917.332
13530	87013.992	-23739.000	-24598.666
13610	87013.992	-23739.000	-25280.000
13620	87013.992	-23739.000	-26029.000
13630	87013.992	-23739.000	-26778.000
13640	87013.992	-23739.000	-27527.000
13650	87013.992	-23739.000	-28276.000
13810	87013.992	-23739.000	-29025.000
13820	87508.992	-23739.000	-29520.000
13910	88003.992	-23739.000	-30015.000
14010	88003.992	-23739.000	-30205.000
14110	88003.992	-23739.000	-30815.000
14210	88003.992	-22031.400	-30815.000
14310	88003.992	-22703.400	-30815.000
14410	88003.992	-23234.100	-30815.000
14510	88003.992	-23471.600	-30815.000
14610	88677.992	-23471.600	-30815.000
14510	88003.992	-23471.600	-30815.000
14710	87329.992	-23471.600	-30815.000

14510	88003.992	-23471.600	-30815.000
14110	88003.992	-23739.000	-30815.000
14810	88003.992	-24300.301	-30815.000
14910	88003.992	-24507.400	-30815.000
15010	88003.992	-25021.600	-30815.000
15110	88003.992	-25693.600	-30815.000
14810	88003.992	-24300.301	-30815.000
15210	88003.992	-24300.301	-31323.000
15220	88003.992	-24300.301	-31780.500
15310	88003.992	-24300.301	-32238.000
15320	87203.992	-24300.301	-32238.000
15410	86403.992	-24300.301	-32238.000
15510	86003.992	-24300.301	-32238.000
13110	85471.992	-23768.301	-32238.000
13120	85471.992	-23034.967	-32238.000
13130	85471.992	-22301.633	-32238.000
13140	85471.992	-21568.299	-32238.000
13150	85471.992	-20834.965	-32238.000
13160	85471.992	-20101.631	-32238.000
15610	85471.992	-19368.297	-32238.000
12610	82941.000	-23739.000	-30203.996
20910	82941.000	-23739.000	-30813.996
21010	82941.000	-22031.400	-30813.996
21110	82941.000	-22703.400	-30813.996
21210	82941.000	-23234.100	-30813.996
21310	82941.000	-23471.600	-30813.996
21410	83615.000	-23471.600	-30813.996
21310	82941.000	-23471.600	-30813.996
21510	82267.000	-23471.600	-30813.996
21310	82941.000	-23471.600	-30813.996
20910	82941.000	-23739.000	-30813.996
21610	82941.000	-24300.301	-30813.996
21710	82941.000	-24507.400	-30813.996
21810	82941.000	-25021.600	-30813.996
21910	82941.000	-25693.600	-30813.996
21610	82940.992	-24301.301	-30814.000
12710	82940.992	-24301.301	-31322.000

2. Dados de Entrada – Modelo – Análise Espectro de Resposta – Método Analítico

S3	<----- Analysis Type (HARMONIC/SPECTRUM/MODES/TIMEHISTORY)
2	<----- Static Load Case for Nonlinear Restraint Status
0	<----- Stiffness Factor for Friction (0.0-Not Used)
0	<----- Max. No. of Eigenvalues Calculated (0 - Not Used)
260	<----- Frequency Cutoff (Hz)
0.1	<----- Closely Spaced Mode Criteria
N	<----- Re-use Last Eigensolution (Frequencies and Mode Shapes)
SPATIAL	<----- Spatial or Modal Combination First
SRSS	<----- Spatial Combination Method (SRSS/ABS)
GROUP	<----- Modal Combination Method (Group/10%/DSRSS/ABS/SRSS)
Y	<----- Include Missing Mass Components (Y/N)
SRSS	<----- Missing Mass Combination Method (SRSS/ABS)
SRSS	<----- Directional Combination Method (SRSS/ABS)


```

LUMPED      <----- Mass Model (LUMPED/CONSISTENT)

Y           <----- Sturm Sequence Check on Computed Eigenvalues (Y/N)

6           <----- Estimated No. of Significant Figures in Eigenvalues

1E-12       <----- Jacobi Sweep Tolerance

1E10        <----- Decomposition Singularity Tolerance

0           <----- Subspace Size (0 - Not Used)

2           <----- No. to Converge Before Shift Allowed (0 - Not Used)

0           <----- No. of Iterations per Shift (0 - Pgm Computed)

0           <----- % of Iterations per Shift Before Orthogonalization

N           <----- Force Orthogonalization After Convergence (Y/N)

N           <----- Use Out-of-Core Eigensolver (Y/N)

400         <----- Frequency Array Spaces

LUMPED MASSES

SNUBBERS

EXCITATION FREQUENCIES FOR HARMONIC ANALYSIS

HARMONIC FORCES

HARMONIC DISPLACEMENTS

FORCE SPECTRUM EDITING

16251 , (0,0,-1) , 11208 , 1

10431 , X , 10108 , 2

14676 , X , 9308 , 3

23660 , X , 8508 , 4

10600 , X , 6808 , 5

20541 , X , 6108 , 6

24762 , (0,0,-1) , 3008 , 7

12978 , Z , 1608 , 8

11508 , (0,-1,0) , 508 , 9

DYNAMIC LOAD CASE DATA

DYNAMIC LOAD CASE # 1

STRESSTYPE(OCC)

SPEC_F1_ANAL , 1 , Z , 1

DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS

```

```

DYNAMIC LOAD CASE # 2

    SPEC_F2_ANAL , 1 , X , 2

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 3

    SPEC_F3_ANAL , 1 , X , 3

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 4

    SPEC_F4_ANAL , 1 , X , 4

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 5

    SPEC_F5_ANAL , 1 , X , 5

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 6

    SPEC_F6_ANAL , 1 , X , 6

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 7

    SPEC_F7_ANAL , 1.000000 , Z , 7

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 8

    SPEC_F8_ANAL , 1 , Z , 8

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS
DYNAMIC LOAD CASE # 9

    SPEC_F9_ANAL , 1.000000 , Y , 9

    STRESSTYPE(OCC)

    DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS

```

STATIC/DYNAMIC COMBINATION CASES

COMBINATION CASE # 1

COMBINATION (ABS)

S5 (W+P1+H (SUS)) , 1

D1 , 1

D2 , 1

D3 , 1

D4 , 1

D5 , 1

D6 , 1

D7 , 1

D8 , 1

D9 , 1

STRESSTYPE (OCC)

COMBINATION CASE # 2

S2 (W+D1+T1+P1+H (OPE)) , 1

D1 , 1

D2 , 1

D3 , 1

D4 , 1

D5 , 1

D6 , 1

D7 , 1

D8 , 1

D9 , 1

STRESSTYPE (OPE)

COMBINATION (ABS)

COMBINATION CASE # 3

D1 , 1

D2 , 1

D3 , 1

D4 , 1

D5 , 1
D6 , 1
D7 , 1
D8 , 1
D9 , 1
STRESSTYPE (OCC)
COMBINATION (ABS)

3. Dados de Entrada – Modelo – Análise Espectro de Resposta – Método Numérico

S3 <----- Analysis Type (HARMONIC/SPECTRUM/MODES/TIMEHISTORY)
2 <----- Static Load Case for Nonlinear Restraint Status
0 <----- Stiffness Factor for Friction (0.0-Not Used)
0 <----- Max. No. of Eigenvalues Calculated (0 - Not Used)
260 <----- Frequency Cutoff (Hz)
0.1 <----- Closely Spaced Mode Criteria
N <----- Re-use Last Eigensolution (Frequencies and Mode Shapes)
SPATIAL <----- Spatial or Modal Combination First
SRSS <----- Spatial Combination Method (SRSS/ABS)
GROUP <----- Modal Combination Method (Group/10%/DSRSS/ABS/SRSS)
Y <----- Include Missing Mass Components (Y/N)
SRSS <----- Missing Mass Combination Method (SRSS/ABS)
SRSS <----- Directional Combination Method (SRSS/ABS)
LUMPED <----- Mass Model (LUMPED/CONSISTENT)
Y <----- Sturm Sequence Check on Computed Eigenvalues (Y/N)
6 <----- Estimated No. of Significant Figures in Eigenvalues
1E-12 <----- Jacobi Sweep Tolerance
1E10 <----- Decomposition Singularity Tolerance
0 <----- Subspace Size (0 - Not Used)
2 <----- No. to Converge Before Shift Allowed (0 - Not Used)
0 <----- No. of Iterations per Shift (0 - Pgm Computed)
0 <----- % of Iterations per Shift Before Orthogonalization
N <----- Force Orthogonalization After Convergence (Y/N)
N <----- Use Out-of-Core Eigensolver (Y/N)

```

400          <----- Frequency Array Spaces

LUMPED MASSES

SNUBBERS

EXCITATION FREQUENCIES FOR HARMONIC ANALYSIS

HARMONIC FORCES

HARMONIC DISPLACEMENTS

FORCE SPECTRUM EDITING

    18931 , (0,0,-1) , 11208 , 1

    12459 , X , 10108 , 2

    16929 , X , 9308 , 3

    18486 , X , 8508 , 4

    8900 , X , 6808 , 5

    16249 , X , 6108 , 6

    15642 , (0,0,-1) , 3008 , 7

    9081 , Z , 1608 , 8

    8094 , (0,-1,0) , 508 , 9

DYNAMIC LOAD CASE DATA

DYNAMIC LOAD CASE #  1

    STRESSTYPE(OCC)

DYNAMIC LOAD CASE #  2

    SPEC_F2_DET , 1 , X , 2

DYNAMIC LOAD CASE #  3

    SPEC_F3_DET , 1 , X , 3

DYNAMIC LOAD CASE #  4

    SPEC_F4_DET , 1 , X , 4

DYNAMIC LOAD CASE #  5

    SPEC_F5_DET , 1 , X , 5

DYNAMIC LOAD CASE #  6

    SPEC_F6_DET , 1 , X , 6

DYNAMIC LOAD CASE #  7

    SPEC_F7_DET , 1 , Z , 7

DYNAMIC LOAD CASE #  8

```

```

SPEC_F8_DET , 1 , Z , 8
DYNAMIC LOAD CASE # 9
SPEC_F9_DET , 1 , Y , 9
STATIC/DYNAMIC COMBINATION CASES
COMBINATION CASE # 1
COMBINATION (ABS)
COMBINATION CASE # 2
S2 (W+D1+T1+P1+H (OPE)) , 1
COMBINATION CASE # 3
D1 , 1

```

4. Dados de Entrada – Modelo – Análise Integração Numérica – Método Analítico

```

T          <----- Analysis Type (HARMONIC/SPECTRUM/MODES/TIMEHISTORY)
2          <----- Static Load Case for Nonlinear Restraint Status
0          <----- Stiffness Factor for Friction (0.0-Not Used)
0          <----- Max. No. of Eigenvalues Calculated (0 - Not Used)
260        <----- Frequency Cutoff (Hz)
0.66       <----- Time History Time Step (ms)
2.5        <----- Load Duration (DSRSS) (sec)
0          <----- Damping (DSRSS) (ratio of critical)
0.5        <----- # Time History Load Cases
N          <----- Re-use Last Eigensolution (Frequencies and Mode Shapes)
Y          <----- Include Missing Mass Components (Y/N)
LUMPED     <----- Mass Model (LUMPED/CONSISTENT)
Y          <----- Sturm Sequence Check on Computed Eigenvalues (Y/N)
6          <----- Estimated No. of Significant Figures in Eigenvalues
1E-12      <----- Jacobi Sweep Tolerance
1E10       <----- Decomposition Singularity Tolerance
0          <----- Subspace Size (0 - Not Used)
2          <----- No. to Converge Before Shift Allowed (0 - Not Used)
0          <----- No. of Iterations per Shift (0 - Pgm Computed)
0          <----- % of Iterations per Shift Before Orthogonalization
N          <----- Force Orthogonalization After Convergence (Y/N)

```

```

N          <----- Use Out-of-Core Eigensolver (Y/N)

400        <----- Frequency Array Spaces

LUMPED MASSES

SNUBBERS

EXCITATION FREQUENCIES FOR HARMONIC ANALYSIS

HARMONIC FORCES

HARMONIC DISPLACEMENTS

FORCE SPECTRUM EDITING

  1 , (0,0,-1) , 11208 , 1

  1 , X , 10108 , 2

  1 , X , 9308 , 3

  1 , X , 8508 , 4

  1 , X , 6808 , 5

  1 , X , 6108 , 6

  1 , (0,0,-1) , 3008 , 7

  1 , Z , 1608 , 8

  1 , (0,-1,0) , 508 , 9

DYNAMIC LOAD CASE DATA

DYNAMIC LOAD CASE # 1

  FXT_F1_ANAL , 1 , Z , 1

  FXT_F2_ANAL , 1 , X , 2

  FXT_F3_ANAL , 1 , X , 3

  FXT_F4_ANAL , 1 , X , 4

  FXT_F5_ANAL , 1 , X , 5

  FXT_F6_ANAL , 1 , X , 6

  FXT_F7_ANAL , 1 , Z , 7

  FXT_F8_ANAL , 1 , Z , 8

  FXT_F9_ANAL , 1 , Y , 9

STRESSTYPE(OCC)

DIRECTIONAL(SRSS) SPATIAL(SRSS) MODAL(GROUP) PSEUDOSTATIC(ABS) MISSINGMASS(SRS

STATIC/DYNAMIC COMBINATION CASES

COMBINATION CASE # 1

```

```

S5 (W+P1+H (SUS)) , 1

D1 , 1

STRESSTYPE (OCC)

COMBINATION (ABS)

COMBINATION CASE # 2

S2 (W+D1+T1+P1+H (OPE)) , 1

D1 , 1

STRESSTYPE (OCC)

COMBINATION (ABS)

```

5. Dados de Entrada – Modelo – Análise Integração Numérica – Método Numérico

```

T          <----- Analysis Type (HARMONIC/SPECTRUM/MODES/TIMEHISTORY)

2          <----- Static Load Case for Nonlinear Restraint Status

0          <----- Stiffness Factor for Friction (0.0-Not Used)

0          <----- Max. No. of Eigenvalues Calculated (0 - Not Used)

260        <----- Frequency Cutoff (Hz)

0.66       <----- Time History Time Step (ms)

2.5        <----- Load Duration (DSRSS) (sec)

0          <----- Damping (DSRSS) (ratio of critical)

0.5        <----- # Time History Load Cases

N          <----- Re-use Last Eigensolution (Frequencies and Mode Shapes)

Y          <----- Include Missing Mass Components (Y/N)

LUMPED     <----- Mass Model (LUMPED/CONSISTENT)

Y          <----- Sturm Sequence Check on Computed Eigenvalues (Y/N)

6          <----- Estimated No. of Significant Figures in Eigenvalues

1E-12      <----- Jacobi Sweep Tolerance

1E10       <----- Decomposition Singularity Tolerance

0          <----- Subspace Size (0 - Not Used)

2          <----- No. to Converge Before Shift Allowed (0 - Not Used)

0          <----- No. of Iterations per Shift (0 - Pgm Computed)

0          <----- % of Iterations per Shift Before Orthogonalization

N          <----- Force Orthogonalization After Convergence (Y/N)

N          <----- Use Out-of-Core Eigensolver (Y/N)

```



```

400          <----- Frequency Array Spaces

LUMPED MASSES

SNUBBERS

EXCITATION FREQUENCIES FOR HARMONIC ANALYSIS

HARMONIC FORCES

HARMONIC DISPLACEMENTS

FORCE SPECTRUM EDITING

    1 , (0,0,-1) , 11208 , 1

    1 , X , 10108 , 2

    1 , X , 9308 , 3

    1 , X , 8508 , 4

    1 , X , 6808 , 5

    1 , X , 6108 , 6

    1 , (0,0,-1) , 3008 , 7

    1 , Z , 1608 , 8

    1 , (0,-1,0) , 508 , 9

DYNAMIC LOAD CASE DATA

DYNAMIC LOAD CASE # 1

    FXT_F1_NUM , 1 , Z , 1

STATIC/DYNAMIC COMBINATION CASES

COMBINATION CASE # 1

    S5(W+P1+H(SUS)) , 1

COMBINATION CASE # 2

    S2(W+D1+T1+P1+H(OPE)) , 1

STRESSTYPE(OCC)

COMBINATION(ABS)

```