



CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS
ÂNIMA EDUCAÇÃO
VINICIUS DOMINGOS FAGUNDES CANTÚ

ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE COMPUTACIONAL:
Análise de tensões em tubulações industriais

Canoas
2023

VINICIUS DOMINGOS FAGUNDES CANTÚ

**ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE COMPUTACIONAL:
Análise de tensões em tubulações industriais**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Universitário Uniritter, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Sérgio Luiz Telles Bartex, Dr.

Canoas
2023

VINICIUS DOMINGOS FAGUNDES CANTÚ

**ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE COMPUTACIONAL:
Análise de tensões em tubulações industriais**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis.

Canoas, RS, 16 de junho de 2023.

Professor e Orientador Sérgio Luiz Telles Bartex, Dr
Centro Universitário Ritter dos Reis

Agradeço aos meus familiares, amigos, colegas, professores e orientador para a realização desse título que a mim há de ser confiado. Agradeço a Deus por ter dado forças nas horas difíceis e pela provisão financeira para a realização desse sonho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Paulo Cesar Cantú e Meide Leda Fagundes pelo apoio e incentivo ao estudo em todos seus níveis.

A minha esposa Glauciane Da Silva Cantú pela compreensão das minhas ausências em prol da rotina acadêmica.

Aos colegas de curso que apoiavam e incentivavam ao longo de toda a trajetória acadêmica até esse presente momento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Luiz Telles Bartex que apesar de toda a sua labuta diária sempre me auxiliou para a realização desse trabalho.

RESUMO

O presente trabalho visa simular através de métodos computacionais a distribuição da flexibilidade de uma tubulação para outros equipamentos e/ou tubulação na qual a mesma possa estar unida, seja ela feita com conexões (flanges, luvas, curvas) ou soldada. A análise da flexibilidade foi realizada através de softwares e normas específicas. Para o desenvolvimento desse projeto utilizou-se como modelo a simulação de uma tubulação em alta temperatura saindo de um digestor até um tanque de armazenamento, o software CAESAR II, normas ASME B31.3 (Code for Pressure Piping), PETROBRÁS N-57 (Projeto Mecânico de Tubulações Industriais) e PETROBRÁS N-1673 (Critérios de Cálculo Mecânico de tubulação). Demonstrou-se um problema e a solução através da simulação, para que se possam evitar tensões excessivas decorrentes do processo, chamadas de tensões secundárias. Viu-se, que, as tensões na tubulação Verde Claro (com suporte) manteve-se abaixo das mínimas aceitáveis para a operação e as tensões na Tubulação Verde Oliva (sem suporte) ultrapassaram os valores admissíveis pela norma. Com isso pode-se concluir que, a análise dá uma alta segurança de operacional de qual elemento suportante deverá ser utilizado na tubulação, que o dimensionamento de uma tubulação não se restringe somente em velocidades do fluido, velocidades de escoamento e na compatibilização de materiais, mas também em seus esforços oriundos de comportamento estrutural, sendo eles tensões primárias e tensões secundárias.

Palavras-chave: Análise de flexibilidade. ASME B31.3. CAESAR II. Tubulação. Tensões secundárias.

ABSTRACT

The present work aims to simulate, through computational methods, the distribution of flexibility from a pipe to other equipment and/or pipes in which it can be joined, whether made with connections (flanges, coupling, curves) or welded. Flexibility analysis is performed through specific software and norms. For the development of this project, we will use as a model the simulation of a pipe at high temperature leaving a digester up to a storage tank, the CAESAR II software, ASME B31.3 (Code for Pressure Piping), PETROBRÁS N-57 (Mechanical Design of Industrial Pipes) and PETROBRÁS N-1673 (Criteria of Mechanical Calculation of Piping). A problem and its solution were demonstrated through simulation to avoid the tensions resulting from the process, known as secondary stresses. It was observed that the tensions in the Light Green pipe (with support) remained below the minimum acceptable levels for operation, while the tensions in the Olive Green pipe (without support) exceeded the values allowed by the standard, that the design of a pipe is not restricted only to fluid velocities, flow velocities and material compatibilization, but also to its efforts arising from structural behavior, which are primary estresses and secondary stresses.

Keywords: Flexibility analysis. ASME B31.3. CAESAR II. Piping. Secondary estresses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Gráfico Tensão Primária X Tensão Secundária.....	24
FIGURA 2 – Software CAESAR II.....	28
FIGURA 3 – Digestor de papel e celulose (esquemático).....	29
FIGURA 4 – Barrilete de vapor.....	29
FIGURA 5 – Categorização Vaso de Pressão.....	30
FIGURA 6 – Lavador de gases.....	32
FIGURA 7 – Tubulação analisada sem suporte.....	33
FIGURA 8 – Digestor de cozimento.....	34
FIGURA 9 – Esforços e dilatações no bocal 1 sem suporte.....	37
FIGURA 10 – Esforços e dilatações no bocal 2 sem suporte.....	38
FIGURA 11 – Esforços e dilatações no bocal 1 com suporte.....	39
FIGURA 12 – Esforços e dilatações no bocal 2 com suporte.....	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dados de processo do fluido e condições de temperatura e pressão de operação e projeto.....	36
TABELA 2 – Tensões admissíveis, espessura, materiais, diâmetros.....	36
TABELA 3 – Forças e Momentos permitidos nos bocais.....	36
TABELA 4 – Forças e Momentos gerados nos bocais.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS

H.H – Hora Homem

M.P – Matéria Prima

E.T.A – Estação de Tratamento de Água

T.H – Teste Hidrostático

HYD – *Hydrostatic*, caso de carga durante teste hidrostático

OPE – *Operation*, caso de carga nas condições de operação ou projeto

SUS – *Sustained*, caso de carga de peso próprio

LISTA DE SIGLAS

ASME – *The American Society of Mechanical Engineers*

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A

CAD – *Computer Aided Design*

GNH – Gás não condensável alta concentração

ATM – Atmosférico

CFD – *Computacional Fluid Dynamics*

API – *American Petroleum Institute*

Sa – Tensão admissível devido a dilatação

Sc – Tensão admissível a frio

Sh – Tensão admissível do material na temperatura de projeto

Sy – Tensão admissível em teste hidrostático

H.H – Hora Homem

NR – Norma Regulamentadora

LISTA DE SÍMBOLOS

°C - Celsius

≤ - Menor ou igual

≥ - Maior ou igual

bar - Bar

” - Polegada

% - Porcentagem

+ - Positivo

- - Negativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	16
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	16
1.3.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.4	JUSTIFICATIVA.....	17
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	ESTADO DA ARTE.....	18
2.2	TIPOS DE TUBULAÇÕES.....	19
2.3	TIPOS DE CONEXÕES EM TUBULAÇÕES.....	20
2.4	CONSDIREÇÕES GERAIS.....	22
2.5	TENSÕES PRIMÁRIAS X TENSÕES SECUNDÁRIAS.....	23
2.6	TENSÕES ADMINISSÍVIES.....	24
2.7	ESTRESSE TÉRMICO, FADIGA TÉRMICA E FLUÊNCIA.....	26
2.8	CAESAR II.....	27
2.9	DIGESTOR DE COZIMENTO.....	28
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	31
3.2	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS.....	34
3.2.1	DEFINIÇÃO OPERACIONAL DAS VARIÁVEIS.....	34
3.2.2	CONDIÇÕES DA TUBULAÇÃO.....	36
4	RESULTADOS.....	37
4.1	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	37
4.2	DISCUSÃO.....	38
4.2.1	SUPORTAÇÃO APLICADA.....	38
4.2.2	ESFORÇOS NOS BOCAIS.....	40
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41
5.1	CONCLUSÃO.....	41
5.2	CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS E ACADÊMICA.....	42
	REFERÊNCIAS.....	43
	ANEXOS.....	45

1 INTRODUÇÃO

Tem-se como tubulação um conjunto de tubos, podendo ser eles de várias formas geométricas, quadrada, circular, retangular, oval, vários fins, podendo ser plástico, cerâmico, metais nobres entre outros, outra característica a ser pontuada, é suas dimensões, variando desde poucos milímetros até metros. Suas finalidades também são de largas aplicações, desde o uso de transportes de fluidos, e suportação em tubos (TELLES, 2012b).

A utilização de tubos e/ou tubulação antecede a história escrita, desde a era neolítica, a civilização mesopotâmica, esses povos criaram grandes obras, como sistemas de drenagem das cheias dos rios e tubos de irrigação para as plantações em outros locais. Com a evolução da era moderna, as melhorias na forma de se fazer, e do que se fazer, do que fazer, deram início aos primeiros tubos metálicos, feito de chumbo, utilizado principalmente em Roma (TELLES, 2012b).

Muito embora a engenharia de tubulações industriais seja de grande tradição, com seu aparecimento associado aos primórdios da Revolução Industrial, foi somente nestas últimas décadas que um significativo aperfeiçoamento ocorreu. Crescentes exigências de segurança e considerações econômicas, assim a introdução de novas tecnologias, impeliram estas mudanças (BAILONA; PORTO; CAMARGO, 2007)

Após a desaceleração da indústria petroquímica no Brasil as indústrias de papel e celulose vêm recebendo cada vez mais investimentos técnicos e econômicos muito significativos, para atendimento da demanda da matéria prima. Para o processo de papel e sua distribuição, são necessários equipamentos específicos e sistemas de transmissão seguros, sendo os realizados por tubulações mais eficientes e comuns (MOURA, 2015).

Em uma planta de papel e celulose arranjos de tubulações podem ser vistos em várias direções e elevações. Constituem de 25% a 35% dos materiais de uma planta, 30% a 40% do tempo de montagem e cerca de 50% do tempo de projeto. Sistemas esses, que envolve diversos componentes, onde falhas dos mesmos podem destruir em sua totalidade plantas e complexos de fabricação (PENG; PENG, 2009).

Para o escoamento da matéria prima até o produto final, utilizasse diversos de quilômetros de tubos/tubulações. Desse modo fazem-se necessários estudos para contribuir com o desenvolvimento de tubulações industriais e conseqüentemente mitigar falhas ao longo dos processos (TELLES, 2012b).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Sabe-se que para a execução de um projeto dentro da indústria de papel & celulose se faz necessário o uso de muitos cálculos para o dimensionamento dos equipamentos, tubulações, suportes e etc. A função do suporte é sustentar os pesos e esforços exercidos pelos tubos ou sobre eles e podem ser classificados em:

1- Suportes destinados a limitar os movimentos dos tubos (“*restraints*”)

- Fixação total – Ancoragens
- Liberdade de movimento em uma direção (geralmente axial) – Guias
- Impeditivos de movimento em uma direção – Batentes
- Impeditivos de movimento laterais – Contraventos

2- Suportes destinados a sustentar os pesos

- Fixos
- Semimóveis
- Móveis

3- Absorvedores de vibrações

- Amortecedores

Sendo assim, será que pode-se usar qualquer tipo de suporte para o travamento das linhas de um projeto ou se faz necessário um dimensionamento mais técnico?

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A análise de flexibilidade deve ser utilizada, quando uma tubulação é submetida a variação de temperatura e quando ocorre um aumento de pressão interna gerada pela expansão do fluido. Sendo assim consegue-se analisar os estresses gerados na tubulação através de métodos computacionais.

Essa análise é muito usual em plantas petroquímicas, refinarias, indústria de papel & celulose, pois as condições de operações dessas tubulações se enquadram nos requisitos onde deve-se ter um olhar mais técnico.

A pesquisa tem como parâmetro uma planta de celulose (proibido divulgação da empresa) onde a aplicação do caso se dará em uma tubulação de diâmetro de 6", com a variação de temperatura, de temperatura ambiente a 180 °C e sua pressão interna é de atmosférica a 30bar. O tempo de execução do caso, desde a modelagem do arranjo da tubulação no software CAESAR, interpretação dos "reports", e ajustes dos suportes, foi de aproximadamente 32h H.H.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é simular através de método computacional os estresses gerados em uma tubulação de grandes diâmetros $\geq 2"$, de acordo com a norma PETROBRAS - 57, quando ocorre uma variação de temperatura em sua condição de operação e encontrar a melhor solução de engenharia para a suportação dessa estrutura.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar o dimensionamento em tubulações industriais, utilizando metodologias utilizadas por empresas de engenharia e normas recomendadas;
- Estudar a classificação e os tipos de suportes mais utilizados;
- Simular a estrutura no software CAESAR II utilizando o método de “NÓS” como elemento;
- Mostrar as vantagens de se realizar cálculos de flexibilidade, utilizando ferramentas (*softwares*) específicos para a análise de forma coesa.

1.4 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho visa simular que, para cada projeto e/ou para cada situação da tubulação na qual ela se encontra, ou, o estado em que ela está, seja fria, quente, suportada, livre, precisa ser feito um estudo mais criterioso, e com avanço da tecnologia muitas empresas tem se prevalecido disso.

Pelo lado empresarial, por ser um estudo muito confiável onde está imputada mais de 100 normas, tais como PETROBAS N-1673 e ASME B31.3, essas empresas acabam adotando os métodos computacional de análise de flexibilidade onde há uma diminuição de hora-homem (H.H) na execução dos projetos e no desperdício de matéria prima (M.P) em um superdimensionamento na tubulação e na suportação da mesma.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo se apresentara as principais normas, estado da arte, aspectos e conceitos utilizados para uma análise de flexibilidade em tubulações.

2.1 ESTADO DA ARTE

Quando olha-se para o lado científico, acadêmico, viu-se que as conclusões são variadas:

Pauletto (2012) estudou a distribuição de flexibilidade de tubulações conectada há equipamentos que produzem grandes esforços, usando métodos computacionais através do software (CAESAR). Suas conclusões mostram que, usar loops atenuaria as tensões secundárias e o uso de ancoragem limitaria os esforços gerados da mesma (PAULETTO, 2012).

Frichenbruder (2015), apresenta o desenvolvimento de uma tubulação de processos em alta temperatura e alta pressão, usando o software CAESAR de modo analítico. Em suas conclusões mostra, que o fator intensificador de tensão (SIF) ao ser aplicado a uma análise de tensões simplificada como uma viga não é capaz de simular o efeito do aumento da tensão devido a alteração da geometria da tubulação quando está se encontra em regime elástico (FRICHENBRUDER, 2015).

Renato (2017), dimensionou uma tubulação industrial, seguindo as devidas análises de flexibilidade atendendo aos requisitos das normas vigentes, utilizando como o software CAESAR para realização dos cálculos estruturais. Sua conclusão fala que o arranjo da tubulação interfere diretamente na flexibilidade da tubulação (RENATO, 2017).

Santório (2021), realizou a análise de flexibilidade de uma tubulação de processo, que conecta o bocal de saída de gás de um vaso separado bifásico a um lançador de PIG, presentes uma planta de processamento primário de gás natural, empregando o CAESAR como software para validar os esforços simultâneos presente na tubulação (SANTÓRIO, 2021).

Com tantos resultados diferentes evidenciado, pode-se concluir que, para cada parâmetro do projeto (TEMPERATURA X DIÂMETRO) deve-se fazer uma análise individual para cada situação, podendo usar livros, teses, artigos para

FUNDAMENTAÇÃO, mas, para uma avaliação coesa, somente o estudo do caso dirá a melhor maneira de suportar um tubo ou conjunto de tubos (tubulações).

2.2 TIPOS DE TUBULAÇÕES

As tubulações industriais são utilizadas em diversos setores da indústria, como petroquímico, químico, alimentício, farmacêutico entre outros. A escolha do tipo de tubulação adequada depende do tipo de fluido que será transportado, da temperatura e pressão de trabalho, da corrosividade do fluido, dentre outros fatores.

Sendo os principais:

- **Tubulações de aço carbono:** São as tubulações mais comuns na indústria. São utilizadas em sistemas de ar comprimido, água, vapor, gases dentre outros, utilizasse em altas pressões e altas temperaturas, sua menor relação custo/resistência mecânica o torna mais usado, mesmo sendo um material de baixa resistência a corrosão (TELLES, 2012b);
- **Tubulações de aço inoxidável:** São resistentes à corrosão sendo indicadas para fluidos corrosivos, como ácidos e soluções salinas, altas temperatura, baixas temperaturas, exigência de não contaminação do fluido circulante, segurança, porém seus consumíveis e conexões são mais caros que os aços carbono (TELLES, 2012b);
- **Tubulações de PVC:** São leves e resistente à corrosão, sendo indicadas para sistemas de água e esgoto, além de outros fluidos não corrosivos, muito usado em irrigações, possui alta resistência a corrosão, alto coeficiente de dilatação e opera em baixas pressões devido a sua baixa resistência comparada a outros materiais (TESTEZLAF; MATSURA, 2015);
- **Tubulações de PEAD:** São tubulações de polietileno de alta densidade, resistente à corrosão e indicados para sistemas de água e gás, o uso desses tubos justifica pelo seu alto tempo de durabilidade, chegando a mais de 50 anos quando enterrados e por serem mais leves que os aços além de ser extremamente lisos diminuído a perda de carga (TESTEZLAF; MATSURA, 2015);

- **Tubulações de Fibra de Vidro:** São resistentes à corrosão e indicadas para sistemas que transportam fluidos altamente corrosivos, como ácidos, possui alta resistência mecânica, boa resistência química, baixo custo e em alguns casos boas propriedades dielétricas, além de ter uma baixa rugosidade interna, diminuindo a perda de carga e facilitando o transporte do fluido de interesse, porém seu módulo de elasticidade é muito inferior ao dos aços (OTTOLINI, 2019);
- **Tubulações de Cobre:** São utilizadas em sistemas de refrigeração, ar condicionado e sistemas de gás, muito utilizado em projetos de troca de calor devido à sua excelente condutividade térmica, além de ser um material 100% reciclável, possui uma boa resistência à oxidação e à intempéries (COOPERMETAL, 2023);
- **Tubulações de Ferro Fundido:** Utilizados em sistemas de água e esgoto, sendo resistentes à corrosão e ao desgaste causado pelo solo, visto que esses tubos normalmente ficam enterrados no solo, suportam pressões internas altas, porém sua oxidação interna e a baixa resistência na parede externa é uma das preocupações na sua utilização (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

Não se limitando apenas nos exemplificados acima, porém, cada tipo de tubulação tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha deve ser feita de acordo com a sua utilização e limitações de uso, levando em consideração as normas de fabricação e utilização da mesma (TESTEZLAF; MATSURA, 2015).

2.3 TIPOS DE CONEXÕES EM TUBULAÇÕES

As tubulações são usadas em uma ampla variedade de indústrias para transportar fluidos ou gases de um lugar para outro. Para que esses sistemas funcionem corretamente, é essencial que as conexões nas tubulações sejam confiáveis e duráveis. Algumas das conexões mais comuns incluem (TELLES, 2012b):

- **Conexão por Rosca:** São empregadas principalmente em tubulações prediais em serviços de baixa responsabilidade (água, ar, condensado de baixa pressão etc.), sempre até o diâmetro nominal de 4". Ressalta-se que,

qualquer ligação rosqueada é um ponto fraco na tubulação, devida a perda da espessura da parede ao fazer os fios de rosca, sujeitos a possíveis vazamentos que não vedado e diminuindo a resistência no tubo, nos pontos rosqueados (SENAI; ARCELOR BRASIL, 2011)

- **Conexão por Encaixe e Solda:** São conexões que suas extremidades possuem encaixe para a soldagem nos tubos, devendo sempre ser do mesmo material do tubo. São conexões aplicada de maneira corrente e seu diâmetro vão de 3/8" a 4", entretanto, de acordo com as boas práticas de construção o uso das conexões restringe de 3/8" a 1.1/2" admitindo o uso em toda faixa usual de pressões e temperaturas. As varas de tubos são ligadas umas às outras por meio de luvas ou de uniões semelhantes às peças usadas nas ligações rosqueadas (FERRAZ; GOMES; ANDRADE, 2018);
- **Conexão por Flange:** Ligações composta por flanges, seu método fixação é feito por jogos de parafusos ou estojos com porcas e uma junta de vedação. Emprega-se principalmente em tubos de 2" ou maiores, e em casos específicos, ligações de tubos em válvulas e em equipamentos. As ligações flangeadas, são ligações facilmente desmontáveis e como regra geral, as ligações flangeadas devem ser usados da menor maneira possível, pois são pontos de possíveis vazamentos (FERRAZ; GOMES; ANDRADE, 2018);
- **Conexão por Solda de Topo:** São peças tendo um chanfro apropriado nas extremidades, para a soldagem direta nos tubos, ou peças entre si. Aplica-se em tubulações de 1/2" a 42, é o sistema mais usado para as ligações entre tubos acima de 1.1/2" de aços de qualquer tipo. Pode ser aplicada em toda a faixa usual de pressões e temperaturas, inclusive para serviços severo (SENAI; ARCELOR BRASIL, 2011);
- **Conexão por Ponta e Bolsa:** A ligação de ponta e bolsa é um sistema antigo, usado em situações específicas, tubulações de ferro fundido, barro vidrado, cimento-amianto, concreto simples e armado. A ponta lisa do tubo encaixa-se sobre a conexão colocando um elemento de vedação para se obter estanqueidade do fluido (TELLES, 2012b)

Cada tipo de conexão é adequado para diferentes aplicações, e a escolha dependerá das necessidades específicas de tubulação.

2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Cada trecho de uma tubulação pode ser considerado um elemento estrutural, submetido a uma série de cargas e transmitindo a outras e ao sistema de suportes e equipamentos ligados ao arranjo (PETROBRAS, 2006). As principais cargas nas tubulações são: peso próprio da tubulação, pressão externa (sob efeito do ambiente com pressão e operando com vácuo), fluido contido em seu interior e exterior, acessórios, válvulas, pressão interna exercida pelo fluido, plataformas e estruturas apoiadas nos tubos, isolamentos entre outros (W.E. MCALLISTER, 2022):

- Dilatações térmicas (ou contrações) da própria tubulação ou do equipamento (forno, reator, permutador, caldeira, bomba, turbinas, digestores entre outros) na qual esteja interligado;

- Ações dinâmicas derivadas do movimento do fluido contido no seu interior (impactos na parede, golpes de aríete, acelerações);

- Ações dinâmicas externas (ventos, terremotos, granizo);

- Vibrações.

O arranjo de tubulação deve ter uma configuração que distribua os carregamentos ao longo dos componentes sem concentrar esforços em pontos de menor resistência, além de poder se deformar por conta das diferenças de temperatura, pressão e o movimento dos outros equipamentos na qual está interligada, a mesma deve ter uma flexibilidade para que possa vir atenuar os esforços nesses pontos críticos (MOHINDER L. NAYYAR, 1999).

Os projetos de suportes em tubulações têm evoluído com o passar do tempo, as diversas configurações e formato nos deixa livre para escolher qual o melhor a ser usado e qual atendera o seu propósito. No mercado encontra-se vários modelos tais como: guias, travas, ancoragens, apoios em diversas direções, suportes de mola com cargas constantes ou variáveis, pendurais, fixos em estruturas metálicas, também pode-se utilizar diferentes materiais no contato com a tubulação, manipulando assim os esforços decorrentes do atrito, corrosões galvânicas, que podem ser de auxílio ou dificuldade em conter deformações excessivas (GEORGE A. ANTAKI, 2003) .

2.5 TENSÕES PRIMÁRIAS X TENSÕES SECUNDÁRIAS

Para fins de análise estruturais em tubulações é conveniente subdividir os esforços atuantes em dois grupos: esforços que provocam tensões primárias e os que provocam tensões secundárias. Devido ao comportamento estrutural diferente entre eles, a norma estabelece critérios e tensões admissíveis diferentes para cada caso.

Algumas normas como ASME B31.3 e PETROBRAS N-1673, as tensões atuantes em tubulações são divididas basicamente em dois grupos:

- Tensões primárias: A tensão primaria é oriunda de cargas mecânicas como peso, pressão, pressão internas, escoamento de fluxo, compressão, flexão, torção.

Exemplos de tensões primarias:

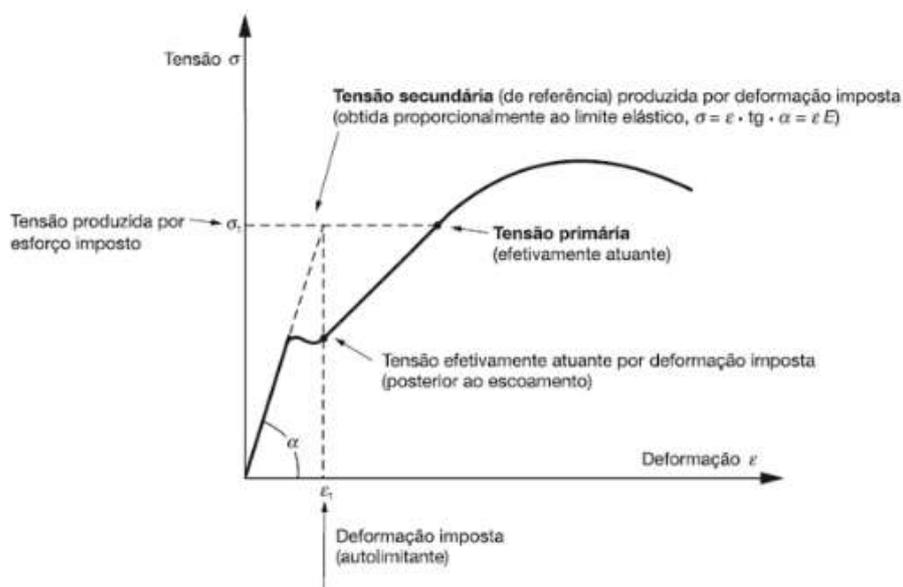
- A) Tensões de flexão num tampo plano devido à pressão interna;
- B) Tensões longitudinais devidas ao peso próprio da tubulação, peso próprio de seus componentes, vento, sobrecargas e quaisquer esforços que estejam sendo impostos à tubulação.
- Tensões secundárias: São as tensões resultantes (auto equilibrada) necessárias para satisfazer a continuidade, restrições geométricas dos sistemas que impedem ou limitam a livre dilatação, como, transições geométricas, materiais diferentes, espessuras diferentes, expansão térmica. Quando a tensão atinge o escoamento ainda está longe de ocorrerem falhas.

Esse tipo de tensão é compensado pela flexibilização das linhas, de modo compensar os efeitos térmicos dos equipamentos oriundos dos mesmos.

Exemplos de tensões secundarias:

- A) Tensões térmicas;
- B) Tensões de flexão nas transições geométricas (p.ex. cilindro x cone).

Figura 1 - Gráfico Tensão Primária X Tensão Secundária.



Fonte: (FRANÇA FILHO, 2013).

2.6 TENSÕES ADMISSÍVEIS

De acordo com a ASME B31.3, no item 302.3.5 estabelece tensões admissíveis da seguinte forma:

- Para tensões primárias:

A contribuição dos esforços atuantes decorrentes da pressão interna ou externa, seguindo essas definições tem-se como esforços, ventos, peso do tubo, peso do fluido, peso do isolamento térmico, traços de vapor/gás, fatores esses que permitam calcular a tensão equivalente a equação (1) de tresca (S1 tensão máxima principal e S3 a mínima), esse valor deve ser comparado com a tensão admissível a quente (Sh), de acordo com tabela A-1 ilustrada no ANEXO I, da mesma norma, bem como material utilizado na tubulação e a temperatura de projeto.

$$ST_p = S1 - S3 \quad (1)$$

Desta forma a verificação a ser realizada para as tensões primárias será pela equação (2).

$$ST_P \leq Sh \quad (2)$$

- Para tensões secundárias:

Tensões secundárias são oriundas do deslocamento da tubulação. Esforços gerado pelo deslocamento térmico de um equipamento (bocal na qual esteja interligado), ou devido a restrição de movimento na tubulação. Esses esforços são, esforços normais, fletores, torsões e permitem calcular a tensão de tresca STs. O nível de tensão deve ser inferior a admissível decorrente do caso de tensões secundárias (S_a).

A verificação a ser realizada será pela equação (3).

$$ST_s \leq Sa \quad (3)$$

Define-se S_a de acordo com a equação (4) como.

$$Sa = f(1,25Sc + 0,25Sh) \quad (4)$$

Tem-se que S_c a tensão admissível em temperatura ambiente, S_h tensão admissível em temperaturas quente e f apresenta um fator de redução de tensão para um número total N de ciclos de temperatura ilustrada no ANEXO I, encontrada na ASME B31.3.

Nas tubulações o valor de S_a é superior S_h (PENG; PENG, 2009), sendo correspondente à tensão admissível primária, e tensão secundária oriundas dos esforços gerados pelo deslocamento térmico da própria tubulação ou de quaisquer equipamentos nas qual possa estar interligada, com o passar do tempo perde sua intensidade através do relaxamento espontâneo ou fenômeno de fluência. Conforme Dominguez O efeito de relaxamento espontâneo (“*self-springing*”) que reduz com o tempo ou ciclos o nível das tensões secundárias.

Em alguns casos específicos como ação sísmica, ventos, cargas especiais ter-se-á outras expressões para determinar tais tensões admissíveis, para eficiência de solda, espessura de tubulação que se deve ser levada em considerações também, podem ser localizadas nas normas ASME B31.1 e PETROBRAS N-1673.

2.7 ESTRESSE TÉRMICO, FADIGA TÉRMICA, FLUÊNCIA

O estresse térmico, a fadiga térmica e a fluência são conceitos importantes a serem considerados ao avaliar a integridade estrutural de tubulações sujeitas a altas temperaturas.

O estresse térmico é um fenômeno causado por variações de temperatura que podem levar a deformações e tensões excessivas nas tubulações. Isso pode levar a problemas como fadiga térmica e fluência, que afetam a integridade estrutural das tubulações ao longo do tempo. Para evitar esses problemas, é importante projetar e construir tubulações com materiais adequados e dimensioná-las corretamente para suportar as tensões esperadas. Além disso, a manutenção adequada e o monitoramento regular são essenciais para garantir a segurança e a confiabilidade das tubulações em operação (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 579, 2016).

A fadiga térmica é a falha de um material sob cargas cíclicas geradas por variações de temperatura. Ela ocorre quando um material é exposto a ciclos repetidos de aquecimento e resfriamento, o que pode levar a fissuras no material e eventual falha.

O limite de estresse permitido S_a na equação (5) de projeto de flexibilidade e tem como objetivo evitar a falha por fadiga do sistema de tubulação à medida que passa por ciclos de temperatura frio-quente ao longo de sua vida útil (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), 2015).

$$\frac{iMc}{Z} < S_a = f(1,25Sc + 0,25Sh) \quad (5)$$

Onde:

i = Fator de intensificação de estresse

Mc = Momento Intervalo

Z = Seção transversal do tubo em módulos

A fadiga de um componente metálico pode ocorrer em cinco estágios distintos. No estágio 1, bandas de deslizamento microscópicas ocorrem na superfície do metal. No estágio 2, fissuras microscópicas se formam ao longo de um plano de deslizamento nas fronteiras dos grãos. No estágio 3, as microfissuras crescem em fissuras pequenas, visíveis com penetrante de corante, e começam a se estender através do grão. No estágio 4, a fissura se torna visível sem a ajuda de corante, progredindo da superfície externa do componente em direção ao centro, e pode resultar em vazamento. Por fim, no estágio 5, o restante ligamento de metal torna-se muito pequeno para resistir à carga de tração aplicada e ocorre a fratura. É importante detectar a fadiga em estágios iniciais para evitar a falha do componente (GEORGE A. ANTAKI, 2003).

A fluência é o processo de deformação permanente em um material sob carga constante em altas temperaturas. Ocorre devido ao movimento lento de átomos em um material sob estresse, o que pode levar a deformações graduais do material ao longo do tempo. A fluência pode levar a falhas em componentes de alta temperatura que estão sujeitos a altos níveis de estresse (GEORGE A. ANTAKI, 2003).

A fluência se manifesta de duas formas: por meio de mudanças metalúrgicas e por meio de mudanças mecânicas. A primeira mudança mecânica é a clássica redução da resistência à medida que a temperatura aumenta. A segunda mudança mecânica é a redução da resistência à ruptura com o tempo e a temperatura. Em temperaturas elevadas, se o metal estiver sujeito a uma tensão elástica constante, ele se esticará continuamente com o tempo, o material sofrerá fluência até que eventualmente ocorra a ruptura (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 579, 2016, p. 579).

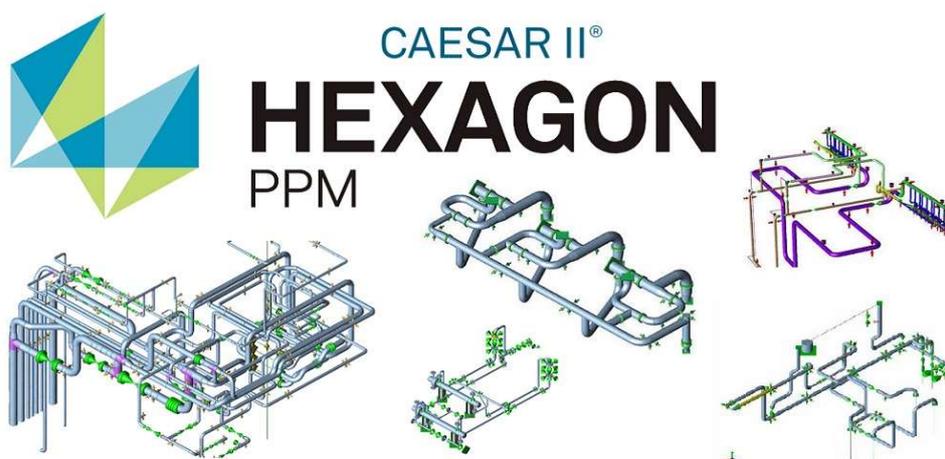
2.8 CAESAR II

O CAESAR II (figura 2) é um software criado pela COADE e comercializado pela hexagom PPM na qual permite uma análise rápida e precisa de tensões nos sistemas de tubulações, sujeito a uma ampla variedade de cargas que levam em consideração as condições de peso, de pressão, térmicas, sísmicas e outras condições estáticas e dinâmicas, pois se encontra em conformidade com mais de 35

normas internacionais. Ele pode analisar sistemas de tubulações virtualmente de qualquer dimensão ou complexidade além de sua integração com os softwares devido ao seu pacote de design CAD (HEXAGON, 2022).

Sua interface de trabalho modela a tubulação como uma viga e fornece as respostas como nós de elemento.

Figura 2 – Software CAESAR II.

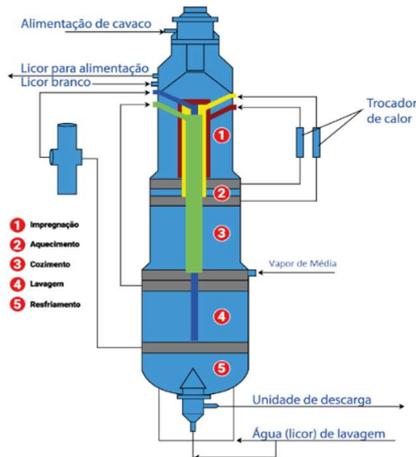


Fonte: (HEXAGON, 2022) .

2.9 DIGESTOR DE COZIMENTO

O processo de cozimento é um dos processos mais importante na área de papel & celulose, é onde ocorre a transformação de madeira nos materiais a ser utilizado. O digestor (figura 3) é um equipamento na qual é utilizado para cozer a mistura de cavaco + licor branco, digestores são comparados com vasos de pressão, pois sua pressão interna em condições operacionais trabalha entre 8,0 e 10,0 kgf/cm² e com temperaturas que na casa de 150 °C. Para que sua pressão e temperatura suba, é necessária uma injeção de vapor de média pressão dentro do equipamento (INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2022).

Figura 3 – Digestor (esquemático).



Fonte: (INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE, 2022).

Com a injeção de vapor, advinda através de uma tubulação que esta interligada ao digestor e ao tubo coletor de vapor da saída da caldeira ((barrilete) figura 4), faz com que, se mantenha a temperatura “setada” na operação, mantendo o cozimento constante da M.P.

Figura 4 – Barrilete de vapor.



Fonte: (COOPERMETAL, 2023).

De acordo com a Norma Regulamentadora “NR” de número 13, que tem como objetivo estabelecer requisitos mínimos da gestão de integridade estrutural de caldeiras, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de

armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando a segurança e saúde dos trabalhadores, enquadra esse equipamento como um vaso de pressão e sua categorização é feita conforme 13.5.1.1.3 e tabela 1 (figura 5) da mesma norma (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO DO BRASIL, 2022).

Figura 5 – Categorização Vaso de pressão.

13.5.1.1.3 O grupo de potencial de risco do vaso de pressão deve ser estabelecido a partir do produto P.V, onde P é a pressão máxima de operação em MPa, em módulo, e V o seu volume em m³ (metro cúbico), conforme segue:

- a) Grupo 1 - P.V > 100; *(Retificado em 20/10/2022)*
- b) Grupo 2 - P.V < 100 e P.V > 30; *(Retificado em 20/10/2022)*
- c) Grupo 3 - P.V < 30 e P.V > 2,5; *(Retificado em 20/10/2022)*
- d) Grupo 4 - P.V < 2,5 e P.V > 1; ou *(Retificado em 20/10/2022)*
- e) Grupo 5 - P.V < 1.

Tabela 1 - Categorização de vasos de pressão

Classe do Fluido	Grupo de Potencial de Risco				
	1	2	3	4	5
A	I	I	II	III	III
B	I	II	III	IV	IV
C	I	II	III	IV	V
D	II	III	IV	V	V

Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO DO BRASIL, 2022).

Conforme descrito na norma, aplica-se a equação (6) onde o produto da multiplicação é enquadrado na tabela 1 acima. A Pressão (P) e o Volume (V) são informados pelo fabricante normalmente encontrada na folha de dados do equipamento.

$$PxV = \text{Grupo de potencial de risco} \quad (6)$$

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho é de cunho exploratório, onde tem como objetivo proporcionar maiores finalidades com o tema, com um olhar mais explicativo (GIL, 2002).

Delimitando de forma qualitativa, com análises e “reports” do software CAESAR II.

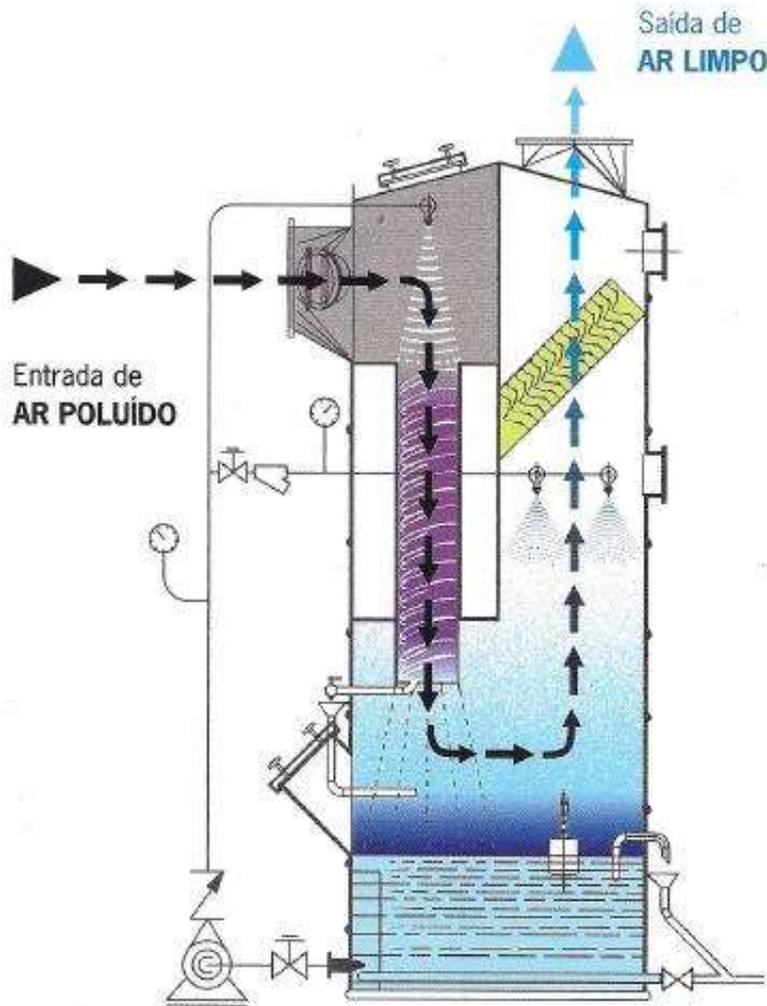
Realizar-se-á o uso do software CAESAR II 6.8 desenvolvido pela COADE. O presente software tem como sua principal função a análise estrutural de tubulações pois utiliza a forma matricial de pórticos espaciais. Esse programa obedece a normas fundamentais para cálculos, como ASME B31 e PETROBRAS, além da sua fácil inserção de dados, carregamentos, pressões, temperaturas, material, além de simulações estáticas e dinâmicas.

O fluido utilizado é gás GNH em alta temperatura, onde não haverá variações excessivas de pressão e terá uma densidade baixa no fluido, sendo assim não haverá necessidade de ser feita uma segunda análise através de CFD, que consideram tais efeitos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Para este trabalho foi utilizado o estudo de uma tubulação de Gás não condensável de alta concentração (GNH) de 6”, aço inox, com costura, *schedule* 10s que está conectada no topo do digestor, e a sua outra extremidade, possui as mesmas características, porém com um diâmetro de 12”. Esta tubulação tem como finalidade recolher ou canalizar os gases com hidrocarboneto oriundos do processo e da troca de calor que ocorre no interior do equipamento até um tanque (*digester degassing*) onde ocorre a lavagem do gás conforme (figura 6), pois o mesmo não pode ser lançado para a atmosfera devido há contaminação dos gases.

Figura 6 – Lavador de gases.



Fonte: (COOPERMETAL, 2023).

Após a lavagem dos gases com água desmineralizada, os gases são destinados às caldeiras, trocadores de calores ou qualquer outro equipamento que utilize esses gases, e dependendo da pureza do gás, é descartado para ETA, onde ocorre o descarte correto. Este estudo trata-se de um estudo de caso, de natureza aplicada.

Na (figura 7) observa-se a que não foi inserido nenhum suporte ao longo da tubulação que faz a interligação entre os equipamentos, dessa forma será feita a análise no software (CAESAR II) para suportar a tubulação de melhor maneira, para que não haja transferência ou que seja tolerável o deslocamento conforme normas seguidas.

A tubulação analisada na figura 7 possui aproximadamente 45 metros de extensão na direção Z, ilustrada em escala 0.015:1.

Figura 7 – Tubulação analisada sem suporte.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Devido às altas temperaturas do equipamento, que podem chegar a 210 °C e 12 bar(g) de pressão no seu interior, é normal que tenha um deslocamento inicial nos bocais onde essas tubulações estão interligadas, sendo assim se faz necessário restringir as tubulações de modo que, quando ocorra essa expansão ou dilatação térmica, as tubulações absorvam esse deslocamento que geram tensões ao longo dos tubos.

A figura 8 representa o equipamento (circulado em vermelho) real, digestor de cozimento, na qual a tubulação (indicada por setas) a ser analisada estará conectada, esse tipo de equipamento é muito utilizado em plantas de papel & celulose.

Figura 8 – Digestor de cozimento.



Fonte: Próprio Autor, 2023.

3.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS

Para o caso a ser estudado, buscar-se-á informações do sistema através dos documentos dos fornecedores, dos equipamentos, das folhas de dados, relatórios técnicos e dados extraído do software CAESAR II, sendo essas variáveis:

3.2.1 Definição operacional das variáveis

Bar (bar) – É uma unidade métrica de pressão e não faz parte do sistema internacional (SI) de medida é utilizado para medir a pressão absoluta, $1\text{bar} = 1,01\text{kgf/cm}^2$;

Celsius ($^{\circ}\text{C}$) – Trata-se de uma escala termométrica centígrada, ou seja, apresenta uma divisão entre os pontos de fusão da água = 0°C , e o ponto de ebulição da água = 100°C , não fazendo parte do sistema SI de medida, $0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{k}$;

Polegada (In) – Unidade de medida de comprimento usado no sistema imperial de medidas, não fazendo parte do sistema SI de medida, $1 \text{ In} = 0,0254$;

Força Radial (F_x) – é a força que se estende ou se move de um ponto central para fora;

- $F_x (+)$ – Forças atuantes para a direita;
- $F_x (-)$ – Forças atuantes para a esquerda;

Força Tangencial (F_y) – Tem a mesma direção da velocidade de um corpo (podendo ter sentido contrário);

- $F_y (+)$ – Forças atuantes para cima;
- $F_y (-)$ – Forças atuantes para baixo;

Força Longitudinal (F_z) – Forças atuantes no centroide de cada seção transversal;

- $F_z (+)$ – Carga para baixo;
- $F_z (-)$ – Carga para cima.

Momento Torsor (M_x) – O componente paralelo ao eixo longitudinal atuante ao do momento de força;

- $M_x (+)$ – Sentido Horário;
- $M_x (-)$ – Sentido Anti-horário.

Momento Tangencial (M_y) – Momento na mesma direção do componente;

- $M_y (+)$ – Sentido Horário;
- $M_y (-)$ – Sentido Anti-horário.

Momento Longitudinal (M_z) – Momento atuando na direção longitudinal do eixo do elemento;

- $M_z (+)$ – Sentido Horário;
- $M_z (-)$ – Sentido Anti-horário.

3.2.2 Condições da tubulação

- Condições de processo

Tabela 1: Dados de processo do fluido e condições de temperatura e pressão de operação.

TAG da linha	Temperatura (°C)		Pressão (bar)		
	Operação	Projeto	Operação	Projeto	T.H.
3123-GNH-0006-T-6-30H40-CC	150	180	12	20	30

Fonte: Próprio autor, 2023.

- Tensões admissíveis e espessuras

Tabela 2: Tensões admissíveis, espessura, materiais, Diâmetros.

Material	Diâmetro (In)	Espessura de parede (mm)	Sobre espessura De corrosão (mm)	S _c (Mpa)	S _n (Mpa)
ASTM A312 Gr TP316L, CC	6	3,4	1,2	115	110

Fonte: Adaptado de ASME, 2023.

- Esforços admissíveis nos bocais de ligação

Os esforços considerados admissíveis nos bocais, será seguido as especificações da norma (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 560, 2016).Esse esforços é de suma importância na determinação da configuração da tubulação e na sua flexibilidade.

Tabela 3: Forças e Momentos permitidos nos bocais.

Bocais	Diâmetro (In)	Classe de Pressão (lbs)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	M _x (N.m)	M _y (N.m)	M _z (N.m)
BOCAL 1	6"	#300	7980	5985	5985	3591	2394	2394
BOCAL 2	12"	#300	15960	11970	11970	14364	9576	9576

Fonte: (J. L . MERSHON et al., 1984).

4 RESULTADOS

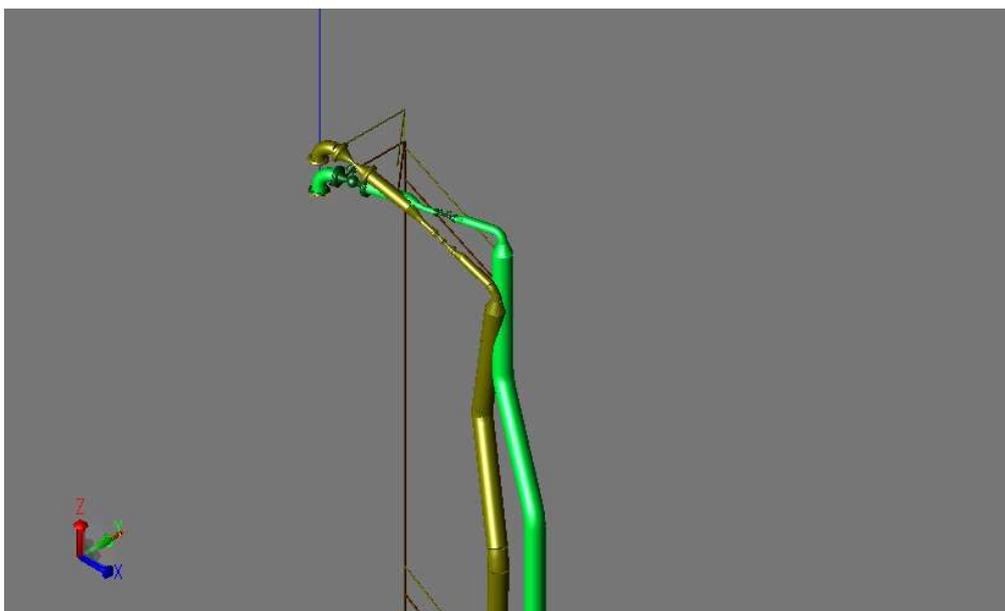
4.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Para projetar o suporte da tubulação, foi analisada as deformações na tubulação, de modo a averiguar os deslocamentos excessivos e angulações exageradas na tubulação perto do bocal. O caso foi analisado em modo de operação no software afim de envolver os esforços devido a expansão térmica, peso próprio, pressão interna e deslocamentos nos bocais.

Após realizar as simulações no software, foi possível observar que a tubulação em estado de inércia (representada pela cor verde) apresenta deslocamentos mínimos ou nulos quando não está sujeita a forças externas. Isso ocorre porque a tubulação está em equilíbrio, e as forças internas se compensam.

Porém, quando a tubulação não possui suporte adequado (representada pela cor verde oliva), os resultados das simulações nas figuras 9 (bocal 1) e 10 (bocal 2) revelam deslocamentos e esforços significativos. Esses deslocamentos indicam que a integridade da tubulação é comprometida quando não há restrições fixadas.

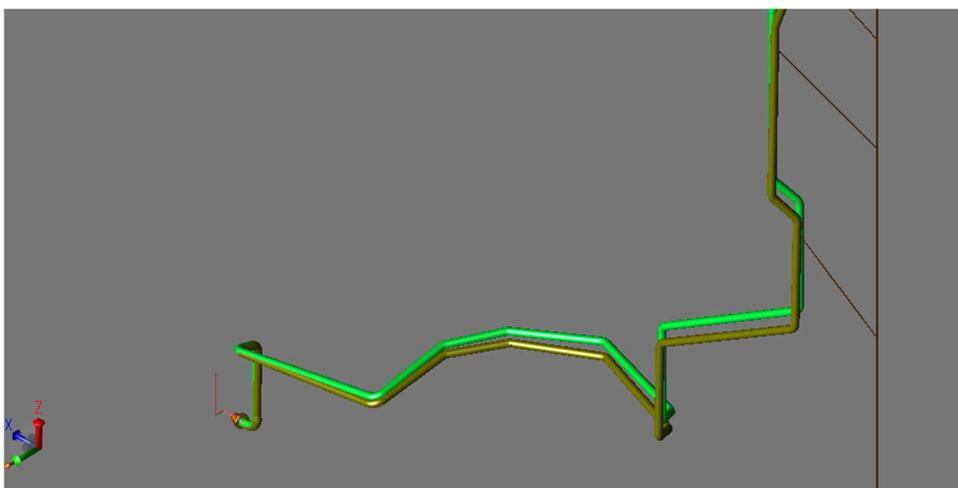
Figura 9 – Esforços e dilatações no bocal 1 sem suporte (verde claro - tubulação em inércia. Verde oliva – projeção da tubulação simulada).



Fonte: Próprio Autor, 2023.

Essas evidências ressaltam a importância dos suportes na tubulação. A ausência desses suportes resulta em deslocamentos indesejados, restrições inadequadas e esforços excessivos, que podem causar danos estruturais. Essa falta de suporte coloca em risco a estabilidade e a funcionalidade da tubulação, aumentando a possibilidade de falhas e rupturas.

Figura 10 – Esforços e dilatações no bocal 2 sem suporte (verde claro - tubulação em inércia. Verde oliva – projeção da tubulação simulada).



Fonte: Próprio Autor, 2023.

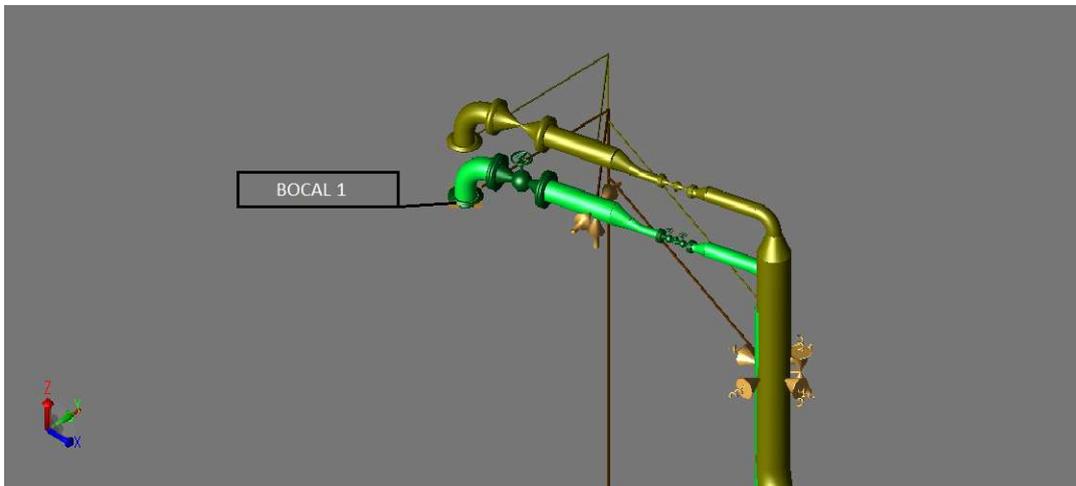
4.2 DISCUSSÃO

Como foi abordado ao longo da monografia a falta de suportação e/ou suportação incorreta ao longo da tubulação pode levar a falha da mesma.

4.2.1 SUPORTAÇÃO APLICADA

Quando aplica-se corretamente a suportação (demonstradas em setas direcionais de cor clara ao longo das figuras 11 e 12), pode-se garantir a integridade da tubulação, quanto aos esforç os e dilatações decorrentes da operação de trabalho. Na figura 11 e figura 12 pode-se ver que a tubulação (verde oliva) ainda se deforma, porém, essas deformações garantem que não haja nenhum deslocamento excessivo nos bocais dos equipamentos, podendo vir ocasionar alguma falha grave nos mesmos.

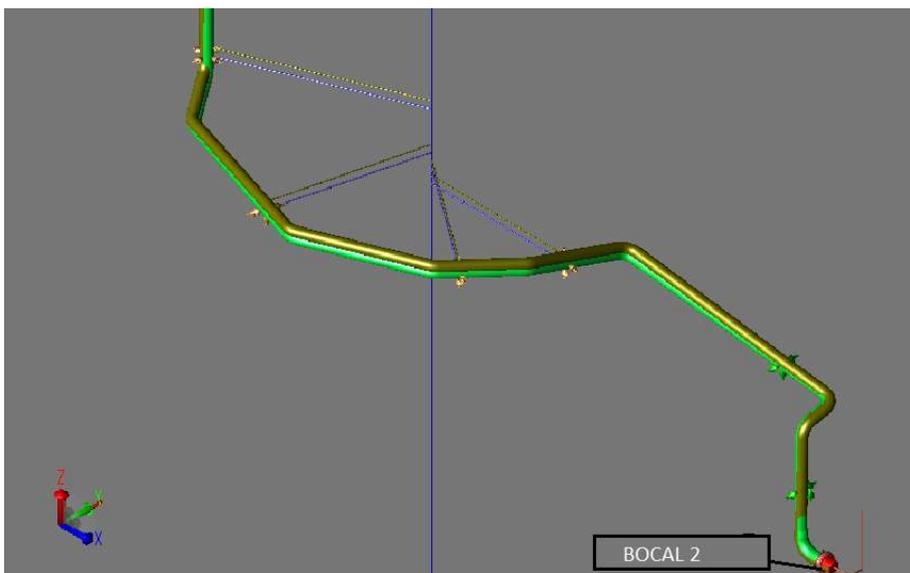
Figura 11– Esforços e dilatações no bocal 1 com suportes (verde claro - tubulação em inércia. Verde oliva – projeção da tubulação simulada).



Fonte: Próprio Autor, 2023.

A figura 12 reforça a ideia, destacando a projeção simulada (verde oliva) e evidenciando a eficácia dos suportes na contenção dos esforços e dilatações. Portanto, ao aplicar corretamente a suportação,   possível garantir a integridade da tubula o e minimizar potenciais problemas nos bocais dos equipamentos.

Figura 12 – Esforços e dilata es no bocal 2 com suporte (Verde claro - tubula o em inércia. Verde oliva – proje o da tubula o simulada).



Fonte: Próprio Autor, 2023.

4.2.2 ESFORÇOS NOS BOCAIS

Comparando as figuras 9 com a 11, e a figura 10 com a 12, pode-se notar que haverá uma redução nos esforços dos bocais. A tabela 4 apresentara os valores analisados em cada bocal, onde estará desatacado em vermelho os valores que ultrapassaram os valores admissíveis e em verde os aceitáveis conforme a WRC Bulletin 1984.

Tabela 4: Forças e Momentos gerados nos bocais.

Bocais	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	M _x (N.m)	M _y (N.m)	M _z (N.m)
Admissível	7980	5985	5985	3591	2394	2394
BOCAL 1 (Tubulação Verde Oliva sem suporte)	2301	-314	-17065	-5808	32453	-3579
Porcentagem (%)	29%	5%	285%	162%	1356%	149%
BOCAL 1 (Tubulação Verde Claro com suporte)	-3658	-1052	-1311	182	-766	-5
Porcentagem (%)	46%	18%	22%	5%	32%	0%
Admissível	15960	11970	11970	14364	9576	9576
BOCAL 2 (Tubulação Verde Oliva sem suporte)	-2301	314	-5085	2101	-26382	-11841
Porcentagem (%)	14%	3%	42%	15%	276%	124%
BOCAL 2 (Tubulação Verde Claro com suporte)	-235	5441	-4453	-1863	2181	-4309
Porcentagem (%)	1%	45%	37%	13%	23%	45%

Fonte: Próprio Autor, 2023.

A partir desta tabela, é possível determinar a porcentagem entre tensão e momentos admitidos pela norma (valor admissível = 100%) versus as tensões e os momentos atuantes nas tubulações (Verde claro - tubulação em inércia. Verde oliva – projeção da tubulação simulada).

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi simulado através de método computacional os estresses gerados em uma tubulação de grande diâmetro $\geq 2''$, de acordo com a norma PETROBRAS – 57, e os resultados mostraram através de relatórios extraídos do software e das projeções apresentadas no mesmo, que, para todo e qualquer projeto de tubulação a suportação deve ser analisada caso a caso, de tal modo que, não se deve restringir os deslocamentos ao longo dos eixos Y, X e Z nem o deixar livre ao ponto de levar a fadiga da mesma aos equipamentos conectados, podendo colocar em risco o processo, a planta de operação e até mesmo vidas de pessoas.

Falou-se sobre dimensionamento em tubulações indústrias e os resultados mostraram que é crucial utilizar metodologias e normas recomendadas. Os resultados destacaram a importância de um dimensionamento correto para garantir o desempenho eficiente e seguro das tubulações, evitando problemas como perdas de carga excessivas e riscos de falhas estruturais. Além disso, o dimensionamento adequado contribui para o cumprimento de regulamentos de segurança e padronização dos projetos, trazendo benefícios operacionais e econ micos.

Estudou-se a classificação e os tipos de suportes mais utilizados em tubulações. Foram identificados três grupos principais: suportes para limitar movimentos, suportes para sustentar pesos e absorvedores de vibrações. Os suportes para limitar movimentos incluem fixa o total, liberdade de movimento em uma direção, impeditivos de movimento em uma direção e impeditivos de movimento laterais. Já os suportes para sustentar pesos são classificados como fixos, semim veis e móveis. Os absorvedores de vibrações são representados pelos amortecedores. A escolha adequada dos suportes é fundamental para garantir a estabilidade, a sustenta o correta e o controle de vibrações nas tubulações, promovendo a segurança e o bom funcionamento dos sistemas industriais.

Demonstrou-se as vantagens significativas, quando realizado c culos de flexibilidade em tubulações industriais com softwares específicos, vantagens como, análises detalhadas do comportamento estrutural, simulações precisas de diferentes cenários operacionais e maior eficiência no processo de projeto. Essas ferramentas permitem identificar pontos críticos, projetar tubulações mais seguras e confiáveis, além de agilizar o trabalho ao automatizar c culos complexos. Com o uso desses

softwares, é possível garantir a integridade estrutural das tubulações, reduzir riscos operacionais e alcançar resultados mais precisos e eficientes.

Apresentou-se o software CAESAR II, amplamente utilizado para simulação de estruturas em tubulações industriais. Ele utiliza método de "NÓS" como elemento, baseado na análise de elementos finitos, onde a tubulação é dividida em elementos discretos conectados por nós.

Evidenciou-se na tabela 4, através da simulação, nos pontos mais críticos na tubulação (bocais de interligação), que as forças atuantes no bocal 1 e bocal 2, exercidas pela tubulação Verde Claro (que se encontra em equilíbrio) satisfazem aos valores admissíveis pela norma, onde as forças máximas chegaram a 46% do valor máximo admissível (100%), tal condição só é encontrada quando realizada uma suportação adequada. Viu-se também, de acordo a mesma tabela, que, a falta de suportes na tubulação (Verde Oliva) compromete sua integridade estrutural tendo as forças ultrapassado ao valor máximo admissível (100%) no mínimo 49% e a máxima em 135,6%.

5.2 CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS E ACADÊMICAS

Para a realização dessa análise foi colocado em pratica aquilo que foi visto em sala de aula em matérias como, mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, fenômenos de transporte, mecânica vibratória, sistemas térmicos, termodinâmica, materiais para mecânica e resistência dos materiais.

Para futuros alunos que queiram adentrar nesse assunto, é importante ressaltar que a análise não foi baseada apenas com os conhecimentos acadêmicos, se torna fundamental também conhecer normas que regem esses assuntos, tais como API 560, ASME B31.1, ASME B31.3, PETROBRAS N-57/ N-1673.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 560. **Fired heaters for general refinery service**. 50. ed. New York: API, 2016.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API) 579. **Fitness For Service**. 1. ed. New York: API, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Process Piping, ASME Code for Pressure Piping, B31.3**. New York: ASME, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Process Piping, ASME Code for Pressure Piping, B31.3**. New York: ASME, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME Boiler & Pressure Vessel Code VIII**. 1. ed. New York: ASME, 2015.

BAILONA, B.; PORTO, F.; CAMARGO, J. **Análises De Tensões Em Tubulações Industriais Para Engenheiros E Projetistas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

COOPERMETAL. **2023**. Disponível em: <<https://www.coppermetal.com.br/blog/cobre/tubulacao-de-cobre/>>. Acesso em: 28 mar. 2023.

FERRAZ, F.; GOMES, M.; ANDRADE, M. **MEIOS DE LIGAÇÃO DE TUBOS CONEXÕES DE TUBULAÇÃO VÁLVULAS INDUSTRIAIS**. Bahia: [s.n.].

FRANÇA FILHO, J. L. DE. **Manual para Análise de Tensões de Tubulações Industriais-Flexibilidade**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FRICHENBRUDER, M. K. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE TENSÕES DE TUBULAÇÃO NORMALIZADA E ESTUDO DOS FATORES INTENSIFICADORES DE TENSÃO. p. 26, 2015.

GEORGE A. ANTAKI. **Piping and Pipeline Engineering Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair**. 1ª ed. Aiken: CRC Press, 2003.

GIL, A. C. ET AL. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HEXAGON. **2022**. Disponível em: <<https://hexagon.com/pt/products/caesar-ii>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE. **2022**. Disponível em: <<https://instrumentacaoecontrole.com.br/medicao-de-nivel-no-digestor-na-industria-de-papel-e-celulose/>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

J. L . MERSHON et al. **Welding Research council bulletin**. Shaker Heights: WRC, 1984.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO DO BRASIL. **NR 13 - CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO**. 1ª ed. Rio de Janeiro: MTP, 2022.

MOHINDER L. NAYYAR. **PIPING HANDBOOK**. 7ª ed. Brookeville: McGraw-hill Education, 1999.

MOURA, GUILHERME B. Polpa Celulósica e papel de Eucalyptus dunnii maiden com 4, 6 e 7 anos. p. 75, 2015.

OTTOLINI, L. M. Comportamento Mecânico de uma Tubulação Compósita Reforçada com Fibra de Vidro e Carbono sob Efeito de Envelhecimento Térmico. p. 141, 2019.

PAULETTO, R. Dimensionamento mecânico de tubulações: Projeto normatizado, análise de flexibilidade e esforços atuantes. p. 29, 2012.

PENG, L.-C.; PENG, T.-L. **Pipe Stress Engineering**. Houston: ASME Press, 2009.

PETROBRAS NORMAS TÉCNICAS. **N-1673, Critérios de Cálculo Mecânico de Tubulação**. E ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2006.

RENATO, L. DA S. DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS - ANÁLISE DE FLEXIBILIDADE E ATENDIMENTO À NORMA ASME B31.3. p. 42, 2017.

SANTÓRIO, C. C. Análise de flexibilidade de uma tubulação de processo de uma estação de produção de gás natura. p. 86, 2021.

SENAI; ARCELOR BRASIL. **PCO PROGRAMA DE CERTIFICAÇÃO OPERACIONAL CST TUBULAÇÃO INDUSTRIAL E ESTRUTURA METÁLICA**. Belo Horizonte: SENAI, 2011.

TELLES, P. C. DA S. **Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012b.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Engenharia de Irrigação: TUBOS E ACESSÓRIOS**. São Paulo: FEAGRI, 2015.

W.E. MCALLISTER. **Pipeline Rules of Thumb Handbook: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problems**. 9ª ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2022.

ANEXO I

FATOR DE REDUÇÃO PARA FAIXA DE ESTRESSES

ASME B31.3-1999 Edition

TABLE 302.3.5
STRESS-RANGE REDUCTION FACTORS, f

Cycles, N	Factor, f
7,000 and less	1.0
Over 7,000 to 14,000	0.9
Over 14,000 to 22,000	0.8
Over 22,000 to 45,000	0.7
Over 45,000 to 100,000	0.6
Over 100,000 to 200,000	0.5
Over 200,000 to 700,000	0.4
Over 700,000 to 2,000,000	0.3

Fonte: (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), 1999)

ANEXO II

ESFORÇOS DA TUBULAÇÃO SEM SUPORTE

(2)Restraints

CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: NOV 19, 2022 Time: 16:24

Job Name: OS2121_S121A_R0

Licensed To: Licensed To: Edit name in <system>\company.txt

RESTRAINTS REPORT: Loads On Restraints

CASE 2 (OPE) W+I1+P1

Node	FX N	FY N	FZ N	MX N.m	MY N.m	MZ N.m	Restraint Type/Tag
10	2301	-314	-17065	-5808	32453	-3579	TYPE=Rigid ANC;
1000	-2301	314	-5085	2101	-26382	-11841	TYPE=Rigid ANC;
1010	-2301	314	-5822	5003	-27364	-13045	TYPE=Rigid ANC;
1070	-0	-0	-0	0	-0	-0	TYPE=Rigid ANC;
1200	2301	-314	-17065	44614	198215	164	TYPE=Rigid ANC;

Relatório extraído do software

ANEXO III

ESFORÇOS DA TUBULAÇÃO COM SUPORTE

(2) Restraints							
CAESAR II 2019 Ver.11.00.00.4800, (Build 190424) Date: NOV 19, 2022 Time: 15:55							
Job Name: OS2121_S121A_R0							
Licensed To: Licensed To: Edit name in <system>\company.txt							
RESTRAINTS REPORT: Loads On Restraints							
CASE 2 (OPE) W+T1+P1							
Node	FX N	FY N	FZ N	MX N.m	MY N.m	MZ N.m	Restraint Type/Tag
10	-3658	-1052	-1311	182	-766	-5	TYPE=Rigid ANC;
130 - SUP.0732/1	4	1	-15	0	-0	0	TYPE=Rigid +Z;
130 - SUP.0732/1	2	62	-0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
310 - SUP.0961/1	0	1883	0	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
310 - SUP.0961/1	3105	-0	0	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
310 - SUP.0961/1	0	-0	4572	0	-0	0	TYPE=Flex Z;
380 - SUP.0481/1	0	-770	0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
380 - SUP.0481/1	-2281	-0	0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
380 - SUP.0481/1	0	-0	0	0	-0	0	TYPE=Rigid +Z;
450 - SUP.0137/4	0	150	0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
490 - SUP.0138/4	6966	60	-5424	-514	-13021	2103	TYPE=Rigid ANC;
560 - SUP.0299/3	-0	-0	-3049	0	-0	0	TYPE=Rigid +Z;
560 - SUP.0299/3	0	-709	0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
560 - SUP.0299/3	-12004	-0	0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
600 - SUP.1447/1	52	270	-41	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
600 - SUP.1447/1	-785	228	-3210	0	-0	0	TYPE=Flex Z;
600 - SUP.1447/1	7643	473	-4421	0	-0	0	TYPE=Flex LIM;
640 - SUP.1472/1	0	762	0	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
640 - SUP.1472/1	-1809	-0	0	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
710 - SUP.1469/1	315	-101	-3712	0	-0	0	TYPE=Rigid +Z;
710 - SUP.1469/1	-217	-1761	-0	0	-0	0	TYPE=Rigid GUI;
780 - SUP.1471/1	4665	-1930	7	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
780 - SUP.1471/1	0	-0	1083	0	-0	0	TYPE=Flex Z;
820 - SUP.1470/1	-5966	651	-7	0	-0	0	TYPE=Flex GUI;
820 - SUP.1470/1	0	-0	-4078	0	-0	0	TYPE=Flex Z;
860 - SUP.1396/5	0	-0	0	0	-0	0	TYPE=Rigid +Z;
860 - SUP.1396/5	1350	6897	1568	0	-0	0	TYPE=Rigid Y;
930 - SUP.1468/1	0	-0	0	0	-0	0	TYPE=Rigid +Z;
930 - SUP.1468/1	3107	-10553	606	0	-0	0	TYPE=Rigid Y;
1000	-235	5441	-4453	-1863	2181	-4309	TYPE=Rigid ANC;
1010	-235	5441	-5189	10133	-1999	-9301	TYPE=Rigid ANC;
1070	3894	-1410	-14478	72101	131426	11454	TYPE=Rigid ANC;
1200	-7867	-375	-5227	22289	-326722	-22930	TYPE=Rigid ANC;

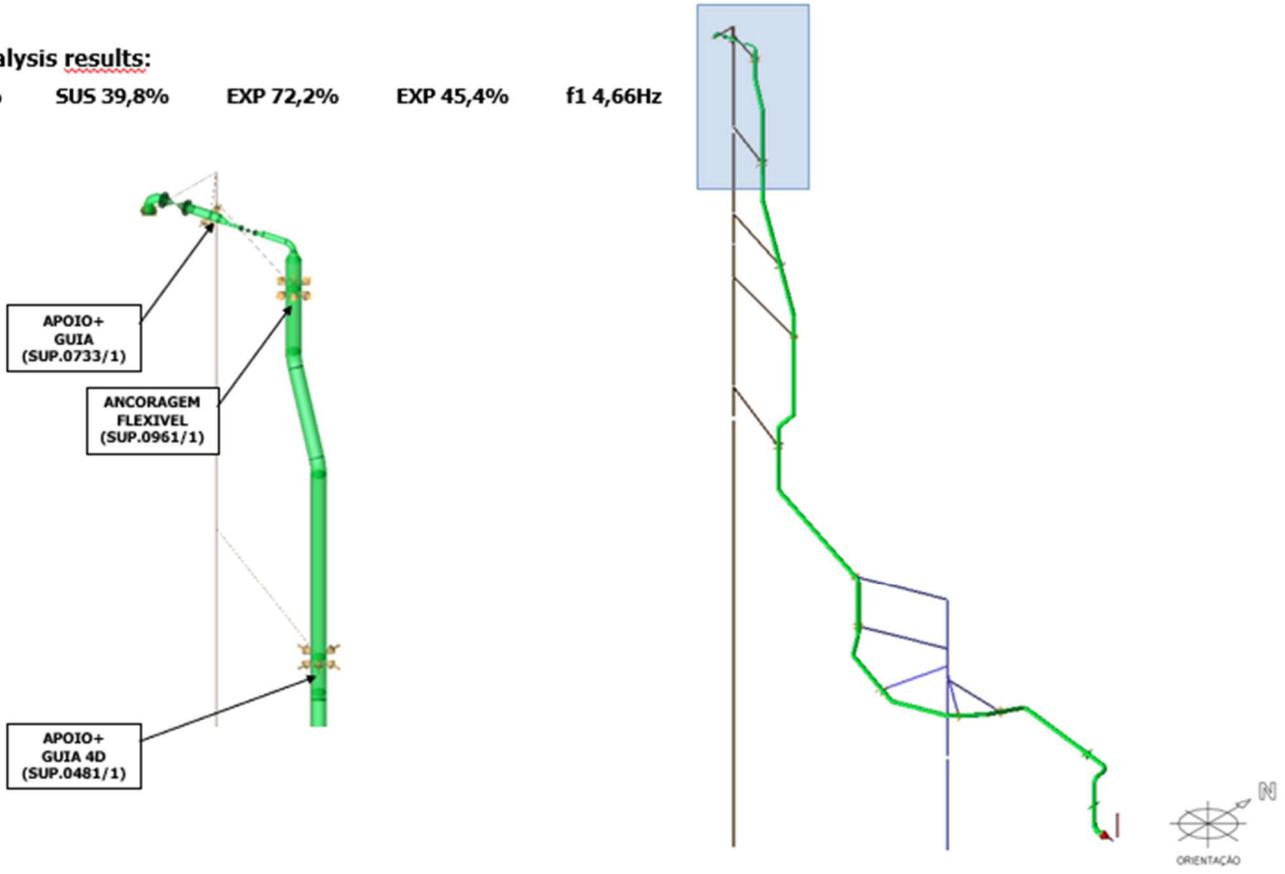
Relatório extraído do software

ANEXO IV

ISÓMETRICO COM SUPORTES

Stress analysis results:

HYD 50,2% SUS 39,8% EXP 72,2% EXP 45,4% f1 4,66Hz

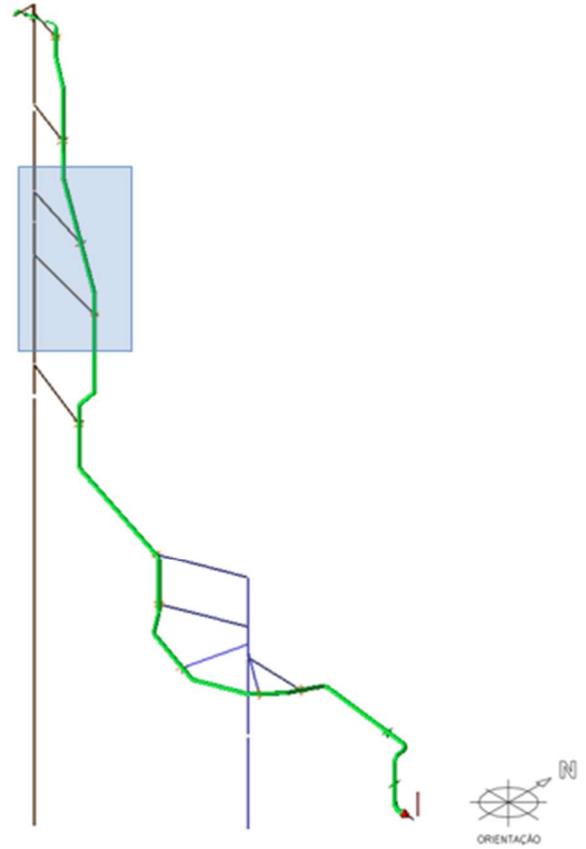
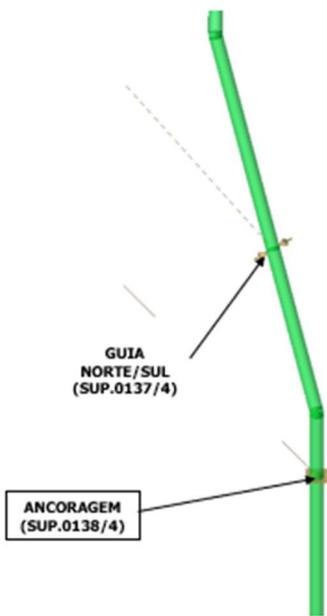


ANEXO V

ISÓMETRICO COM SUPORTES

Stress analysis results:

HYD 50,2% SUS 39,8% EXP 72,2% EXP 45,4% f1 4,66Hz

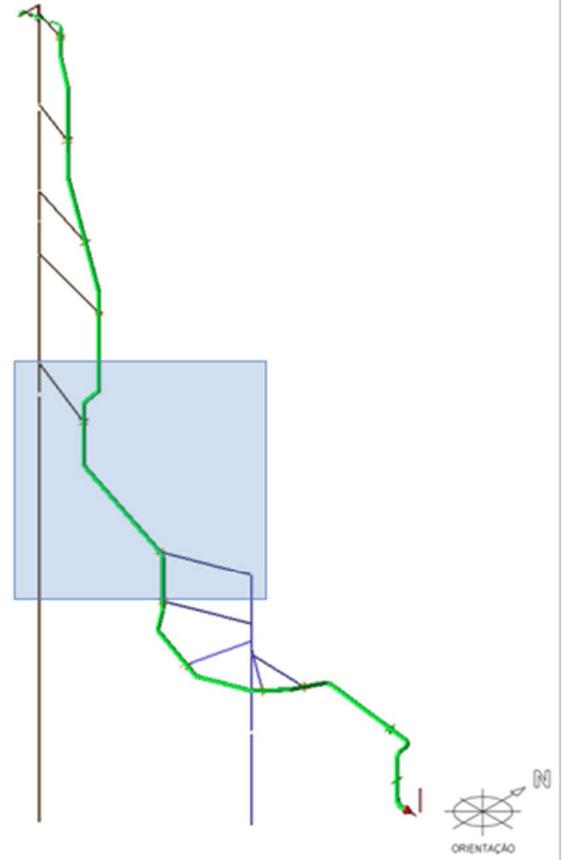
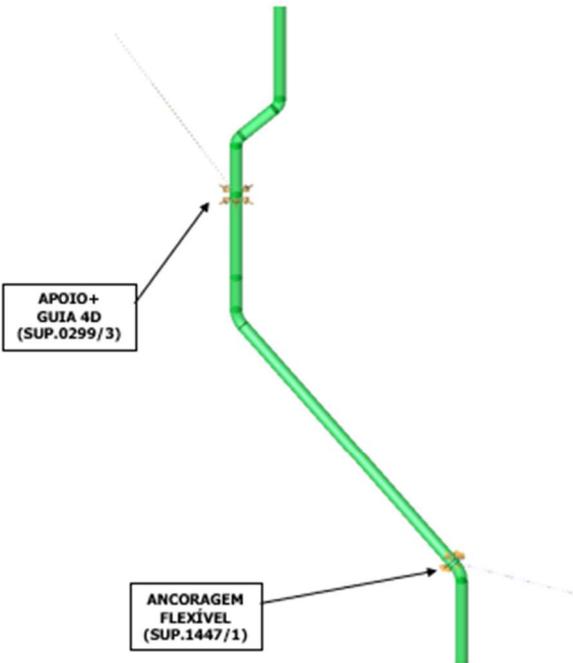


ANEXO V

ISÓMETRICO COM SUPORTES

Stress analysis results:

HYD 50,2% SUS 39,8% EXP 72,2% EXP 45,4% f1 4,66Hz



ANEXO VI

ISÓMETRICO COM SUPORTES

Stress analysis results:

HYD 50,2% SUS 39,8% EXP 72,2% EXP 45,4% f1 4,66Hz

