

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

**RAFAEL JADER FARIA
SILAS AUGUSTO DE OLIVEIRA COSTA**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS
GRÁFICOS DE ESTIMATIVA DE TENSÕES E
ESFORÇOS EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS
SUJEITAS A CARGA TÉRMICA VARIÁVEL**

Taubaté – SP

2018

**RAFAEL JADER FARIA
SILAS AUGUSTO DE OLIVEIRA COSTA**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS
GRÁFICOS DE ESTIMATIVA DE TENSÕES E
ESFORÇOS EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS
SUJEITAS A CARGA TÉRMICA VARIÁVEL**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Silva de Araújo Porto

Taubaté – SP

2018

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C837a Costa, Silas Augusto de Oliveira
Análise computacional dos métodos gráficos de estimativa de tensões e esforços em tubulações industriais sujeitas a carga térmica variável / Silas Augusto de Oliveira Costa; Rafael Jader Faria. -- 2018.
32 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Silva de Araújo Porto, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Cálculo. 2. Método. 3. Tensão. 4. Tubulação. I. Título. II. Faria, Rafael Jader. III. Graduação em Engenharia Mecânica.

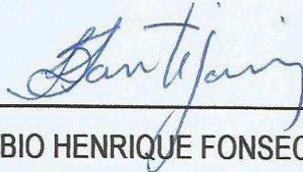
CDD – 621.8672

**RAFAEL JADER FARIA
SILAS AUGUSTO DE OLIVEIRA COSTA**

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS GRÁFICOS DE ESTIMATIVA
DE TENSÕES E ESFORÇOS EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAL SUJEITAS A
CARGA TÉRMICA VARIÁVEL**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO EM
ENGENHARIA MECANICA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Me. FÁBIO HENRIQUE FONSECA SANTEJANI
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO SILVA DE ARAÚJO PORTO
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Me. LUIZ RICARDO PRIETO HERCOS
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

07/11/2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Vicente Augusto da Costa e a minha mãe Terezinha Maria de Oliveira da Costa que sempre me apoiaram e assistiram, aos meus familiares e amigos que sempre me motivaram a permanecer firme nesta longa caminhada para alcançar meus objetivos e que souberam me confortar durante os momentos decisivos e tensos dessa etapa.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida durante essa grande caminhada, a minha esposa Cristiane Vilela, as minhas filhas Rafaela Vilela e Regiane Vilela, meu pai Valdir Faria, minha mãe Geralda Cristina Boari, meus irmãos Rennan Boari e Vinicius Boari, e todos aqueles que em mim acreditaram.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, fonte da vida e da graça, que nos iluminou e manteve nossa saúde sempre em bom estado para que pudéssemos estar presente e adquirir os conhecimentos transmitidos em aula.

À Universidade de Taubaté, que ofereceu um ambiente educacional com profissionais qualificados e recursos para adquirir o conhecimento com qualidade.

A todos os professores que nos ensinaram durante a graduação nas aulas do núcleo básico, núcleo profissionalizante e núcleo específico.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Fernando Silva de Araújo Porto, por toda seriedade, experiência e direcionamento para que fosse possível realizar este trabalho.

Aos funcionários dos demais setores da Universidade, seja da biblioteca, secretaria, segurança patrimonial ou central do aluno, que auxiliaram em momentos específicos para que pudéssemos dar os passos corretos durante nossa graduação.

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos,
não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir.”

(ALBERT EINSTEIN)

RESUMO

Tubulação é uma estrutura formada por tubos e acessórios instalada nas indústrias para conduzir fluidos que alimentam ou são despejados após o processo. Para resistir às condições de condução do fluido e de agressividade do ambiente, é necessário analisar os esforços, forças e tensões, aos quais a tubulação será submetida. Para isso, métodos gráficos ou manuais (curvas Grinnell, tabelas para liras, método Kellogg, etc.) de análise de tensão em tubulações industriais são usados devido a sua simplicidade e rapidez com que geram resultados, embora sejam considerados conservadores, ou seja, produzem resultados que fazem o projeto tender ao superdimensionamento. O trabalho consiste em comparar os resultados obtidos por dois métodos distintos em relação a um perfil de curva denominado lira simétrica: os resultados de um método gráfico (curvas Grinnell) contra resultados obtidos através de um software de última geração para análise de tensões em tubulações, o CAEPIPE™ (versão demo, com limitações somente quanto a complexidade do sistema de tubulações, sem restrições quanto ao tempo de uso ou tipo de análise), e através destas comparações verificar se os métodos manuais são realmente confiáveis, demonstrar a facilidade para se realizar cálculos, a fim de compará-los aos resultados obtidos por softwares, verificar a disparidade entre os resultados e avaliar o conservadorismo dos métodos.

Palavra Chave: Tubulação. Tensão. Grinnell. CAEPIPE.

ABSTRACT

Piping is a structure formed by pipes and fittings installed in industries to conduct fluids that feed or are dumped after the process. To withstand the conditions of fluid conduction and environmental aggressiveness, it is necessary to analyze the stresses and the forces to which the piping will be subjected. For this, graphical or manual methods (Grinnell curves, Lira tables, Kellogg method, etc.) of stress analysis in industrial pipes are used because of their simplicity and speed with which they generate results, although they are considered conservative, that is, they produce results that make the project tend to oversize. The work consists in comparing the results obtained by two distinct methods in relation to a curve profile called symmetric Lira: the results of a graphical method (Grinnell curves) against results obtained through a software of last generation for analysis of stresses in pipes, the CAEPIPE™ (demo version, with limitations only on the complexity of the piping system, without restrictions on the time of use or type of analysis), and through these comparisons verify if the manual methods are really reliable, demonstrate the facility to perform calculations, in order to compare them with the results obtained by software, verify the disparity between the results and evaluate the conservatism of the methods.

Keyword: Piping. Stress. Grinnell. CAEPIPE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lira plana simétrica.....	24
Figura 2 - Planilha do Método Grinnell.....	24
Figura 3 - Dados de entrada no CAEPIPE™.....	26
Figura 4 - Layout da lira plana	26
Figura 5 - Análise de tensão no CAEPIPE™ à 250°C.....	27
Figura 6 - Análise de flexibilidade CAEPIPE™	27
Figura 7 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 70°C	28
Figura 8 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 150°C.....	29
Figura 9 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 200°C.....	29
Figura 10 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 300°C.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de Fx e Sb.....	25
---------------------------------------	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 TENSÕES ATUANTES	16
2.2 MÉTODOS DE CÁLCULO DE TENSÃO	17
2.2.1 Métodos Simplificados:	17
2.2.1.1 Métodos Aproximados:	17
2.2.1.1.1 Métodos de Análise por Cantiléver Guiado:	18
2.2.1.1.2 Método Analítico Geral Simplificado:.....	18
2.2.1.2 Métodos Gráficos ou Diretos:.....	19
2.2.1.2.1 Método Gráfico Kellogg:.....	19
2.2.1.2.2 Método Gráfico Grinnell:.....	20
2.2.2 MÉTODOS ASSISTIDOS POR COMPUTADORES	20
2.2.2.1 ELEMENTOS FINITOS.....	21
3 METODOLOGIA	22
4 RESULTADOS	24
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia e a crescente utilização de dispositivos e sistemas informatizados para a elaboração de um projeto, os métodos de cálculo manuais estão perdendo a preferência de utilização para ferramentas digitais, pois estas são acessadas e executam os cálculos, aparentemente, com maior precisão e velocidade.

Muitos setores de engenharia empregam e disseminam a utilização dos softwares computacionais e dos aplicativos digitais para obterem maior agilidade e segurança na troca de informações referente aos cálculos de um determinado projeto.

Porém, devido à facilidade de acesso e inclusão de dados nestes programas computacionais, não é exigido um conhecimento teórico aprofundado e uma percepção de erros apurada por parte do profissional que utiliza esta tecnologia. Assim possibilitando o aparecimento de problemas futuros no projeto.

Na engenharia de tubulações industriais não está acontecendo diferente. Devido aos diversos tipos de estrutura e componentes de uma tubulação industrial, a quantidade de informações e conhecimento a serem utilizados em um projeto é consideravelmente grande, sendo assim alguns métodos manuais e diversas fórmulas foram criadas para atender diferentes condições, que respeitem as normas nacionais e internacionais relacionados a uma determinada tubulação industrial.

Uma das etapas que a engenharia de projeto realiza, durante a elaboração dos cálculos, é a análise de tensões na tubulação industrial. Essa análise consiste em observar o comportamento da tubulação por toda a estrutura, relacionando os diversos esforços aos quais os componentes da tubulação estarão submetidos. Um dos esforços erroneamente considerado, e o projeto poderá causar uma parada no processo produtivo, ou até um acidente.

É importante aliar o conhecimento teórico do engenheiro com as ferramentas digitais para que o resultado do projeto seja alcançado com grande êxito, ou que, ao menos, se houver um contratempo ou modificação necessária após término do projeto, o profissional saberá onde atuar para regularizar a situação, seja por meio de cálculos manuais, seja utilizando métodos computacionais.

A tubulação industrial merece relevante destaque, pois é utilizada na condução de um determinado fluido entre dois reservatórios, ou entre um reservatório e o ponto de utilização, para atender diversos fins primordiais em um processo. E também, os custos do projeto e montagem da tubulação são relevantes para o início das atividades de uma indústria, atingindo valores médios de 50 a 70% dos equipamentos adquiridos, e de 15 a 20% dos valores de instalação dos equipamentos.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo, comparar os resultados obtidos no cálculo de análise de tensões em tubulações industriais entre os métodos Grinnell (método manual) e o software CAEPIPE (método computacional), para tubulações industriais com disposição no formato lira. Sendo de grande relevância para esta comparação, a precisão dos resultados obtidos por ambos os métodos e a agilidade nos cálculos, assim avaliando as respectivas confiabilidades.

Com isso, identificar as vantagens e desvantagens da utilização de cada método, demonstrar exemplos de aplicação e indicar os pontos nos quais um método sobressai o outro.

Utilizar a norma ASME B31.3 – *Process Piping Guide*, como fonte diretora dos cálculos e indicadora dos limites de tensões a serem observados pelos métodos.

Direcionar o engenheiro mecânico, que atua na engenharia de tubulações industriais, a utilizar o método mais viável para a realização de um projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tubulação industrial é caracterizada como o conjunto de tubos e seus acessórios que compõem a estrutura projetada a fim de suportar, internamente, o escoamento de um determinado fluido (TELLES, 1979).

Sabendo-se que um fluido, segundo Brunetti (2008), é toda substância que, ao sofrer ação de uma força tangencial constante de qualquer intensidade, deforma-se continuamente sem atingir equilíbrio estático novamente.

Assim sendo, a tubulação industrial deve suportar os esforços externos e internos de modo a garantir o escoamento do fluido a ser utilizado em um processo (ASME B31.3, 1976).

E no projeto de uma tubulação industrial deve-se considerar todos os esforços que agem sobre as superfícies da tubulação, para isso é necessário considerar a tubulação como sendo um elemento mecânico, que sofrem os seguintes esforços mecânicos entre outros (FRANÇA FILHO, 2013):

- a) Pressão exercida pelo fluido na superfície interna;
- b) Pressão na superfície externa da tubulação, ou seja, quando o conjunto será instalado em ambiente sob pressão ou trabalhará com vácuo.
- c) Peso total dos elementos que compõem a tubulação, peso do fluido contido na tubulação e, se houver, peso do isolamento térmico.
- d) Sobrecargas extras advindas de condições externas e pertinentes a instalação: peso de outros tubos, neve sobre a tubulação, e no caso de tubulação soterrada, considerar o peso da terra, do pavimento, de veículos e de pessoas, etc.
- e) Esforços dinâmicos decorrentes do escoamento do fluido , por exemplo, impactos, golpe de aríete, acelerações, etc;
- f) Esforços dinâmicos externos: ação do vento, ocorrência de terremoto, etc;
- g) Dilatações térmicas decorrentes do ambiente ou da temperatura do fluido.
- h) Vibrações e atritos entre a tubulação e os acessórios;

- i) Tensões residuais causadas pelo desalinhamento, desnivelamento, alinhamento forçado, uniões por soldagem, aperto excessivo ou desigual nas uniões por flanges ou roscas e erros de ajustes nos acessórios, etc;

Porém, como ressalva França Filho (2013), podem-se fazer algumas considerações com o intuito de reduzir o número de parâmetros e variáveis a serem adotados nos cálculos das tubulações. Por exemplo, em projetos no qual é previsto a instalação de válvulas de fecho rápido, os efeitos dinâmicos são desconsiderados em geral. E também, quando há a ação de muitos esforços simultâneos, para simplificar o cálculo, consideram-se apenas os esforços mais relevantes e predominantes à situação do local de instalação.

Assim, destacam-se os esforços provenientes da pressão interna e das dilatações. Entretanto, para tubulações de grande diâmetro, baixa pressão e temperatura, considera-se também o esforço referente ao peso próprio da tubulação (SHIGLEY, 1984).

2.1 TENSÕES ATUANTES

Segundo a norma ASME B31.3 (1976), os esforços que atuam sobre as superfícies da tubulação são classificados em dois grupos:

- a) Tensões Primárias:

São definidas como os esforços gerados pela pressão externa ou interna, pesos do conjunto e do fluido, sobrecargas, etc.

- b) Tensões Secundárias:

São definidas pelos esforços provenientes das dilatações do conjunto em projeto ou de outra estrutura ligada a tubulação em questão, ou também consequências dos movimentos gerados pelos extremos das tubulações devido à dilatação.

2.2 MÉTODOS DE CÁLCULO DE TENSÃO

2.2.1 Métodos Simplificados

São métodos muito úteis e versáteis para se realizar a análise estrutural. Ao utilizar esses métodos corretamente e com assertividade, respeitando os limites de aplicação, são obtidos resultados satisfatórios, confiáveis, ágeis e com baixo consumo de tempo (QUADRELLI, 1987).

As seguintes situações são indicadas para a aplicação dos métodos simplificados:

- a) Realizar previamente uma verificação rápida de todas as linhas, separadamente, que compõem a tubulação, ou verificação parcial de alguma linha específica, durante a fase de projeto.
- b) Verificar os resultados obtidos através de cálculos computacionais no projeto da tubulação.
- c) Calcular os esforços internos e externos que uma estrutura sofrerá, possibilitando uma estimativa desses valores em linha, que devido sua baixa complexidade, não exijam métodos computacionais de análise.

Os métodos de análise simplificada recebem essa denominação, pois, de certa forma, foram reduzidos a partir de métodos mais complexos, para que seja possível trabalhar com um menor número de parâmetros do que os métodos analíticos mais abrangentes. Ou seja, a partir dos métodos mais complexos, algumas variáveis e parâmetros foram desprezados ou aglutinados em coeficientes, e cada método foi designado restritamente para calcular tipos específicos de configuração, com isso buscou-se maior eficiência do cálculo e garantia da confiabilidade dos resultados (TELLES, 1979).

2.2.1.1 Métodos Aproximados:

Este método tem como propósito oferecer precisão, simplicidade e praticidade no cálculo dos esforços mecânicos atuantes em uma ampla variedade de

configurações básicas. Nestes métodos são utilizados dados observados em campo e os cálculos são realizados manualmente no local, com ou sem auxílio de réguas de cálculo, isso confere ao método eficiência e constatação rápida no local de instalação da tubulação (QUADRELLI, 1987).

2.2.1.1.1 Métodos de Análise por Cantiléver Guiado:

Segundo Quadrelli (1987), método de aplicação simples para estimar, em uma linha de tubulação, as cargas térmicas que surgem devido à dilatação da tubulação. Nesse método de análise são desprezados os momentos de torção, assim reduz-se o número de esforços considerados, e a flexibilidade da tubulação nas curvas para reduzir a quantidade de pontos analisados. Entretanto, a desconsideração dessas informações restringe a precisão dos resultados deste método consideravelmente, contudo os resultados finais são conservadores, pois indicam que valores calculados dos esforços são maiores do que os valores reais.

2.2.1.1.2 Método Analítico Geral Simplificado:

Método de análise com complexidade considerável desenvolvido pela *MW Kellogg Company*, segundo ele, para diminuir a alta complexidade do Método Analítico Geral, o qual segue os conceitos apresentados pelo teorema de Castigliano. Essa simplificação do método garantiu maior rapidez para obter os resultados e conferiu razoável precisão. Porém para ser aplicado a uma linha de tubulação, devem-se respeitar as seguintes condições (M.W. KELLOGG COMPANY, 1956):

- a) a linha de tubulação possui somente duas extremidades e estas não devem possuir ancoragem;
- b) não há restrições e ramificações ao longo da tubulação;
- c) os membros, sem exceção, são retilíneos e ortogonais entre si.

Sendo assim, é indicado para analisar efeitos da expansão térmica de tubulações bidimensionais e tridimensionais.

2.2.1.2 Métodos Gráficos ou Diretos

Na análise de flexibilidade por método gráfico, o cálculo de dimensões, temperaturas de trabalho e especificação dos materiais são realizados buscando os valores dos parâmetros e variáveis em tabelas e gráficos, assim se configuram os métodos de análise direta (FRANÇA FILHO, 2013).

Ainda conforme França Filho (2013), os métodos pertencentes a essa classificação são utilizados para analisar configurações específicas da tubulação industrial, pois em alguns casos, as tabelas foram criadas especificamente para uma determinada condição, ou seja, os valores dos esforços para uma determinada configuração, não corresponde aos esforços de outra configuração, sendo assim as tabelas e gráficos são únicos para cada condição da linha de tubulação.

Para utilizar um dos métodos gráficos, deve-se observar os dados de entrada, obter os coeficientes referente a configuração específica, substituir os valores encontrados nas fórmulas referentes, também específicas para cada condição, e assim analisar os resultados obtidos (KELLOG COMPANY, 1956).

Como exemplo, serão apresentados a seguir dois métodos diretos: o Método Gráfico de Kellogg e o Método Grinnell.

2.2.1.2.1 Método Gráfico Kellogg

De acordo com Kellogg Company (1956), o Método Gráfico de Kellogg utiliza cartas gráficas apropriadas para verificar o formato da linha de operação, ou seja, o trajeto que o fluido percorrerá pela tubulação. É um método simples para especificar a dimensão mínima necessária que o comprimento de uma linha pode ter em um determinado trecho com relação a outro. E também é um método rápido, pois a partir de figuras padronizadas são obtidas o comportamento da estrutura para um determinado parâmetro.

Criadas a partir da análise de algumas configurações básicas de tubulação e utilizando como padrão o módulo de elasticidade de 200 GPa, as cartas desenvolvidas pelo Método Kellogg permitem combinação para a resolução de configurações um pouco mais complexas, porém deve-se verificar atentamente a

tolerância para a flexibilidade e que o cálculo seja realizado com cautela (M.W. KELLOG COMPANY, 1956).

2.2.1.2.2 Método Gráfico Grinnell

Segundo Grineell Company (1951), o Método Gráfico Grinnell é indicado para calcular estimativamente os esforços gerados na tubulação devido à expansão térmica de forma rápida e sem utilizar formulários complexos. Os parâmetros e variáveis são obtidos através de tabelas que englobam 15 configurações de linhas de tubulação diferentes entre estruturas bidimensionais e estruturas tridimensionais.

Os valores obtidos nos Método Grinnell apresentam considerável precisão e confiabilidade quando respeitados limites de aplicação das tabelas criadas para que se tornasse possível à utilização deste método de análise simplificada (GRINEELL COMPANY, 1951).

2.2.2 MÉTODOS ASSISTIDOS POR COMPUTADORES

Para atender a necessidade de trabalhar-se com linhas de tubulação complexas, seja no tamanho, na disposição da tubulação, no formato dos componentes ou no número de restrições e suportes da tubulação, de forma que toda a instalação seja analisada por completo para reduzir o número de cálculos ou que não seja necessário refazer os cálculos novamente após uma determinada modificação realizada, foram desenvolvidos programas computacionais para a realização das análises de tensões e flexibilidade de uma tubulação industrial (SST SYSTEMS, 2017).

Estes programas computacionais têm como base o conceito de elementos finitos, ou seja, um modelamento matemático que permiti a análise estrutural das mais variadas configurações de linha de tubulação, sem a necessidade de seccioná-las para realizar a análise (FRANÇA FILHO, 2013).

2.2.2.1 ELEMENTOS FINITOS

Segundo Smith e Van Laan (1987), após criar um modelo computacional da tubulação que indique o layout, a sustentação e fixação da configuração real, divide-se toda a linha em segmentos ou pequenas frações, denominados elementos. A localização desses elementos é feita através da distribuição de pontos dos nós ou juntas nos locais mais críticos ou interessantes para a análise, por exemplo, locais de ramificação da tubulação, pontos de concentração de tensão, etc.

Como cada elemento, indicado por um nó, representa a rigidez de um local específico da tubulação e toda a linha é dividida em subconjuntos dos elementos que conectam-se entre si, dá-se o nome de modelagem por elementos finitos a esse método de cálculo. Esse conceito proporciona ao método computacional o cálculo de tubulações industriais que possuem materiais diferentes em alguma parte da linha de tubos, inúmeras conexões, elementos de geometria complexas e condições ambientais internas e externas diferentes para um mesmo ponto da tubulação (SMITH e VAN LAAM, 1987).

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem por finalidade uma pesquisa básica, pois o principal objetivo da pesquisa é adquirir conhecimento sobre o tema e explorar os métodos de análises de tensão em tubulação industriais apresentados na bibliografia. O caráter desta pesquisa básica é descritivo, pois apresenta as informações coletadas por métodos simplificados e métodos computacionais a fim de comparar os resultados.

A abordagem desta pesquisa é qualitativa, por que os resultados posteriormente obtidos serão analisados com base nos conceitos e informações estudados que compõem este trabalho. Por fim, a pesquisa é classificada, referente ao procedimento, como bibliográfica, cujo estudo reuniu conceitos e informações dos métodos de análise de flexibilidade para servirem de conhecimento teórico e possibilitar a análise dos resultados.

Para obter os dados necessários que possibilitassem a comparação de um método simplificado com um método computacional, primeiramente, foram definidos quais métodos seriam utilizados. Assim sendo, definiu-se o Método gráfico Grinnell para representar o método simplificado, em contrapartida, o programa de computador CAEPIPETM foi designado para ser utilizado como Método assistido por computador.

Em seguida, escolheu-se o perfil de configuração da linha de tubulação a ser dimensionada e estudada neste trabalho. Entre as várias configurações possíveis de serem calculadas pelo Método gráfico Grinnell apresentadas pelas bibliografias utilizadas, definiu-se que o Perfil U com braços iguais, ou Lira plana simétrica, seria o objeto de análise.

Para limitar e concentrar os estudos em uma única condição, os valores de algumas variáveis foram especificados, tais especificações são:

- a) Norma ASME B31.3
- b) Diâmetro da tubulação: 12" (323,85mm)
- c) Schedule (Sch): Standard (STD)
- d) Material ad tubulação: Aço carbono ASTM A-106 Grau A
- e) Comprimento da extremidade de um braço ao outro da lira (L): 24 pés (7,32m)
- f) Altura da lira (h): 12 pés (3,65m)

- g) Comprimento de abertura (a): 12 pés (3,65m)
- h) Comprimento entre as extremidades da linha de tubulação (L'): 120 pés (36,58m)
- i) Fixação e suportes: Uma extremidade ancorada, uma guia em cada extremidade da lira para unir à tubulação e uma extremidade com válvula globo flangeada.

Sendo assim, foi utilizado essas informações em ambos métodos escolhidos. Para o Método gráfico Grinnell, utilizamos um programa de planilhas eletrônicas para auxiliar nos cálculos, onde editamos uma planilha e fixamos os dados de entrada.

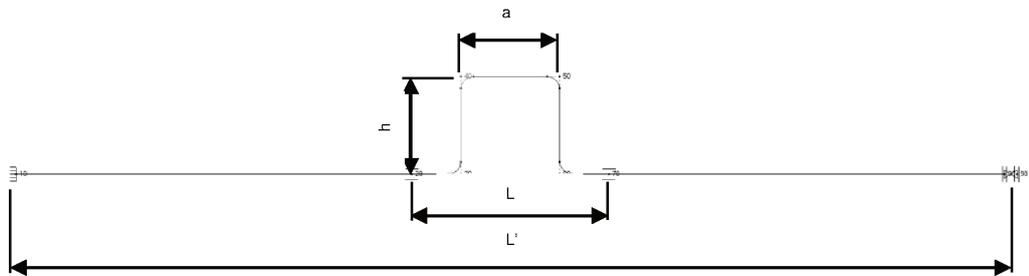
Para o CAEPIPETM, conforme necessidade, inserimos as informações no programa para que fosse possível analisar o esquema projetado.

Após definir e fixar todas as condições básicas necessárias para realizar o estudo, foi realizado a variação do valor da temperatura e dos valores pertinentes a essa alteração. Isso se deve ao fato da necessidade de analisar a variação dos valores das cargas e o comportamento da flexibilidade da tubulação com relação à variação da temperatura na qual a linha de tubulação estará exposta.

4 RESULTADOS

Tendo como referência a Lira plana simétrica da Figura 1, logo abaixo, iniciaram-se os estudos:

Figura 1 - Lira plana simétrica



Fonte: Grineell Company (1951)

Primeiramente, a planilha eletrônica foi criada, como podemos observar na Figura 2 abaixo:

Figura 2 - Planilha do Método Grinnell

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
41												
42												
43												
44												
45												
46												
47												
14												
Pronto												

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018)

Com a planilha eletrônica pronta, criou-se uma tabela de esforços mecânicos referentes à força de reação (F_x) e a Tensão máxima de Flexão (S_b), como apresentado na Tabela 1. Essa tabela foi preenchida a partir do momento que os dados eram calculados ao realizar a alteração da temperatura da tubulação. Para cada nova temperatura que era inserida na planilha, havia necessidade de também alterar o valor do Módulo de elasticidade a quente (E_h) e o valor de Tensão admissível a quente (S_h). A modificação desses valores alteravam os demais cálculos e geravam novos valores para F_x , conforme Equação 1, e S_b , conforme Equação 2.

$$F_x = k_x \cdot c \cdot \frac{I_p}{L^2} \cdot \left(\frac{L'}{L}\right) \quad (1)$$

$$S_b = k_b \cdot c \cdot \frac{D}{L} \cdot \left(\frac{L'}{L}\right) \quad (2)$$

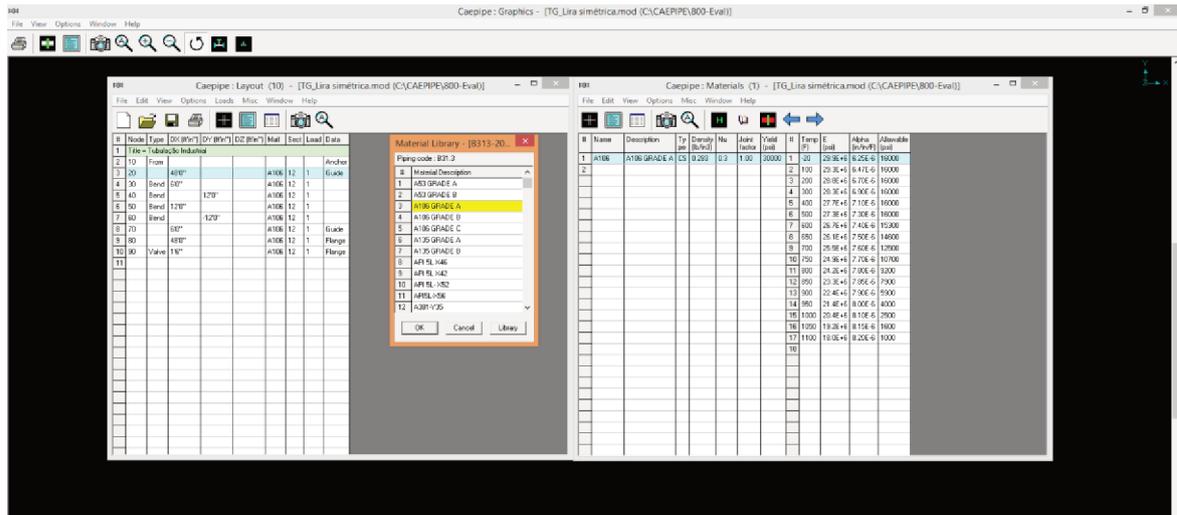
Tabela 1 - Resultados de F_x e S_b

Temperatura	F_x [kN]	S_b [MPa]
70	14,40	36,66
100	22,93	58,41
150	38,72	98,61
200	53,95	137,41
250	69,75	177,64
300	84,84	216,08
400	114,48	291,57
500	107,19	273,01
600	101,42	258,32

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

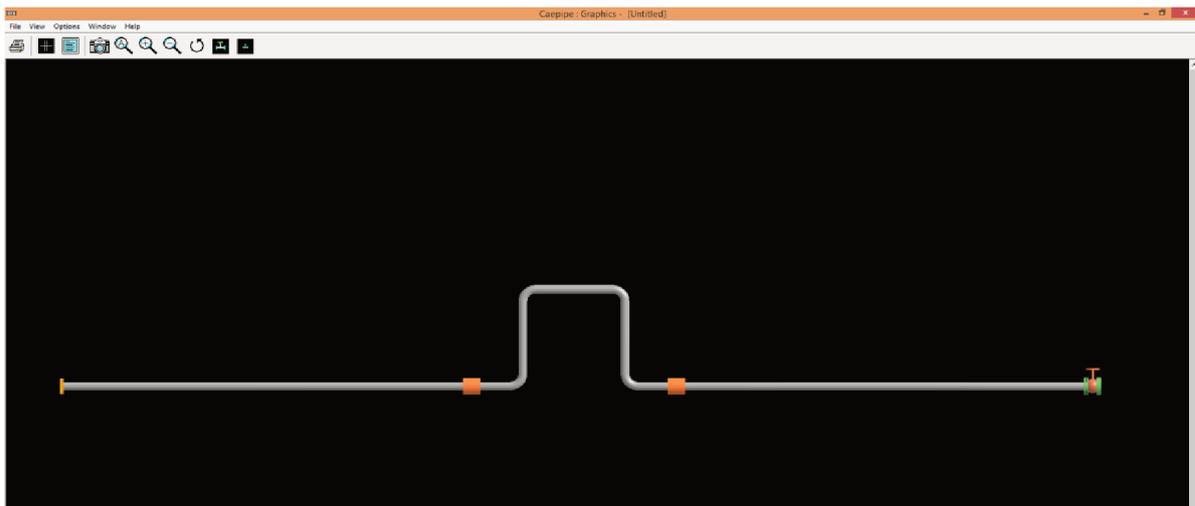
Após utilização do Método simplificado, iniciou-se o processo com o CAEPIPE™ para verificar quais resultados o programa demonstraria. Primeiramente, fez-se a inserção dos dados de entrada e em seguida o desenho do perfil especificado nesse trabalho, como pode-se observar na Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

Figura 3 - Dados de entrada no CAEPIPE™



Fonte: CAEPIPE™ (2018)

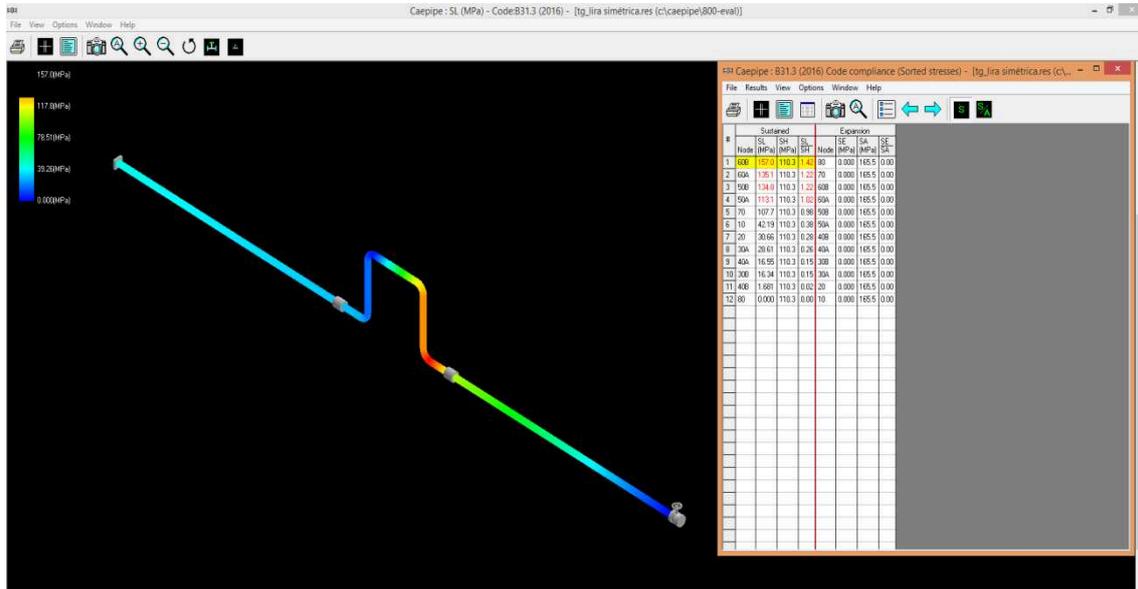
Figura 4 - Layout da lira plana



Fonte: CAEPIPE™ (2018)

Após finalizar preparação, com inserção de dados e desenho do esquema, foi solicitado ao programa que realizasse a análise das tensões, assim o resultado gerado para o estado de tensão foi apresentado conforme Figura 5:

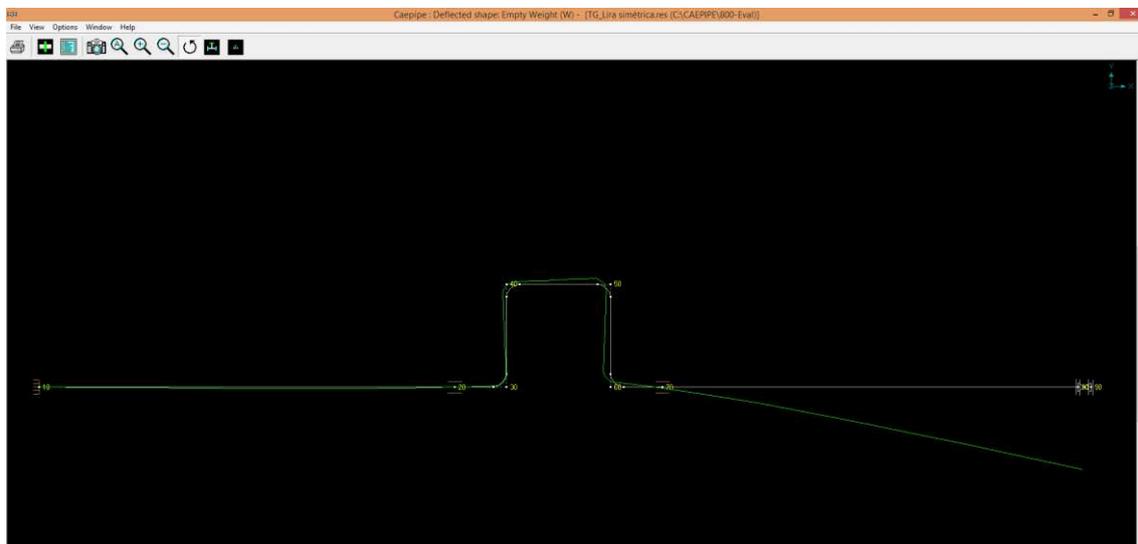
Figura 5 - Análise de tensão no CAEPIPE™ à 250°C



Fonte: CAEPIPE™ (2018)

E o resultado da flexibilidade foi apresentado conforme Figura 6 abaixo:

Figura 6 - Análise de flexibilidade CAEPIPE™

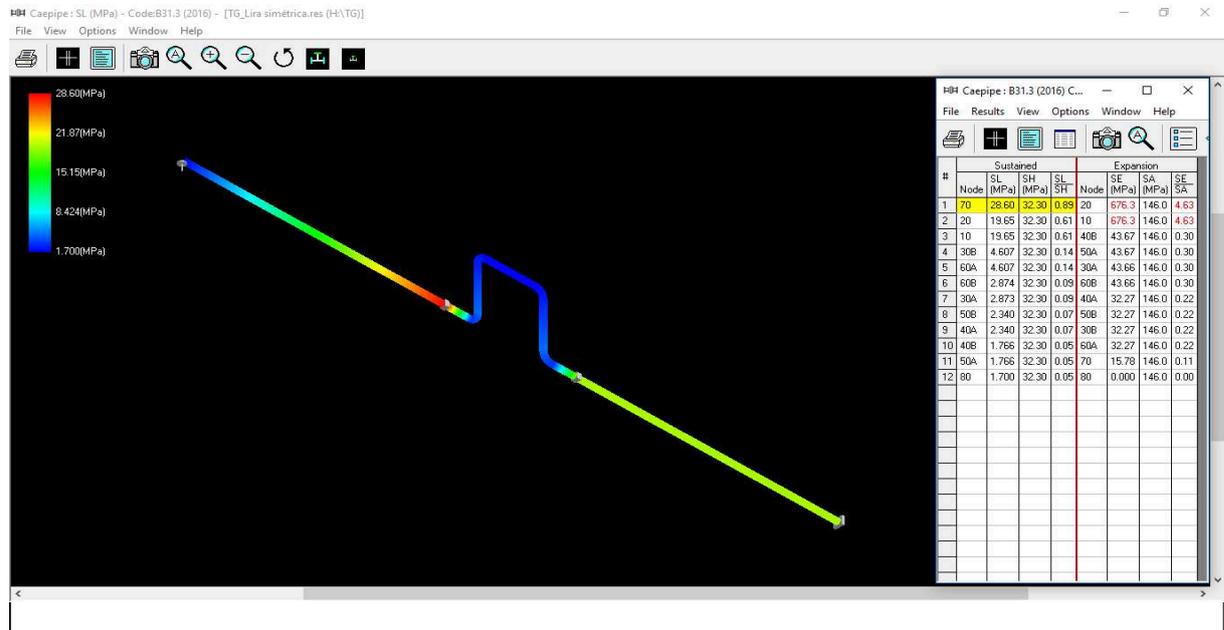


Fonte: CAEPIPE™ (2018)

Esses foram os resultados apresentados por ambos os métodos indicados para a realização deste trabalho, sendo que a tensão máxima de flexão da análise de tensão do método computacional mostrado na figura 6, anteriormente, foi de 157,00

MPa, para uma temperatura de 250 °C, enquanto o método gráfico apresentou para esta temperatura uma tensão máxima de flexão de 177,64 MPa, conforme Tabela 1.

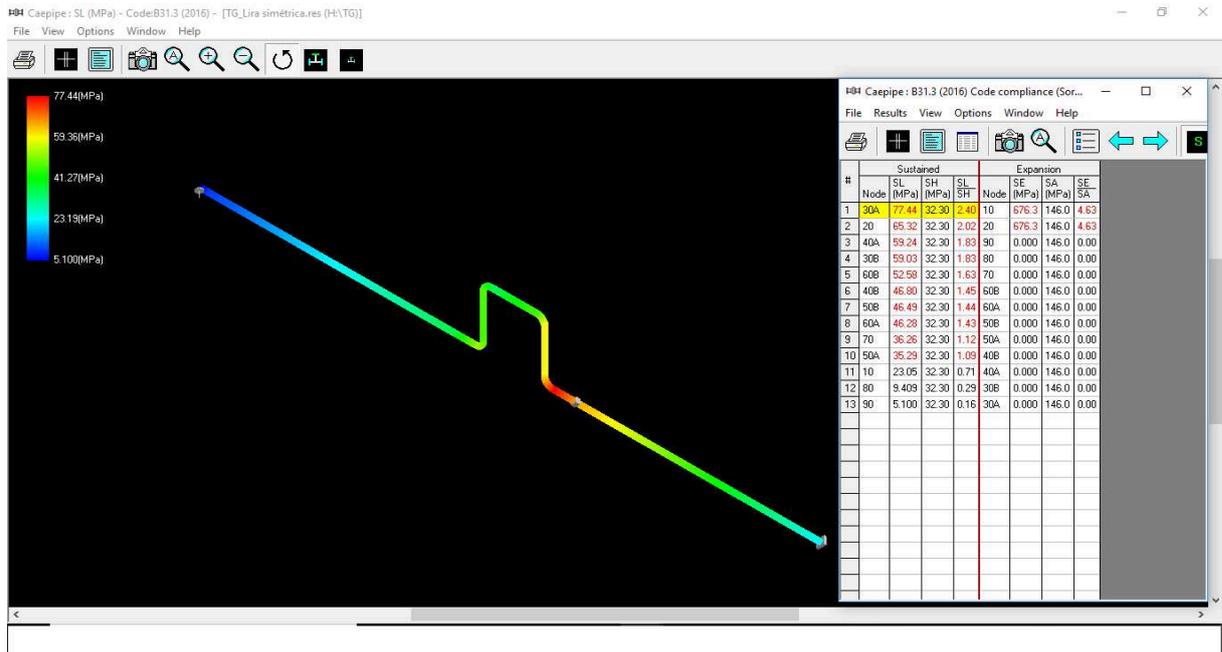
Figura 7 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 70°C



Fonte: CAEPIPE™(2018)

Esses foram os resultados apresentados por ambos os métodos indicados para a realização deste trabalho, sendo que a tensão máxima de flexão da análise de tensão do método computacional mostrado na figura 7, anteriormente, foi de 28,60 MPa, para uma temperatura de 70 °C, enquanto o método gráfico apresentou para esta temperatura uma tensão máxima de flexão de 36,66 MPa, conforme Tabela 1.

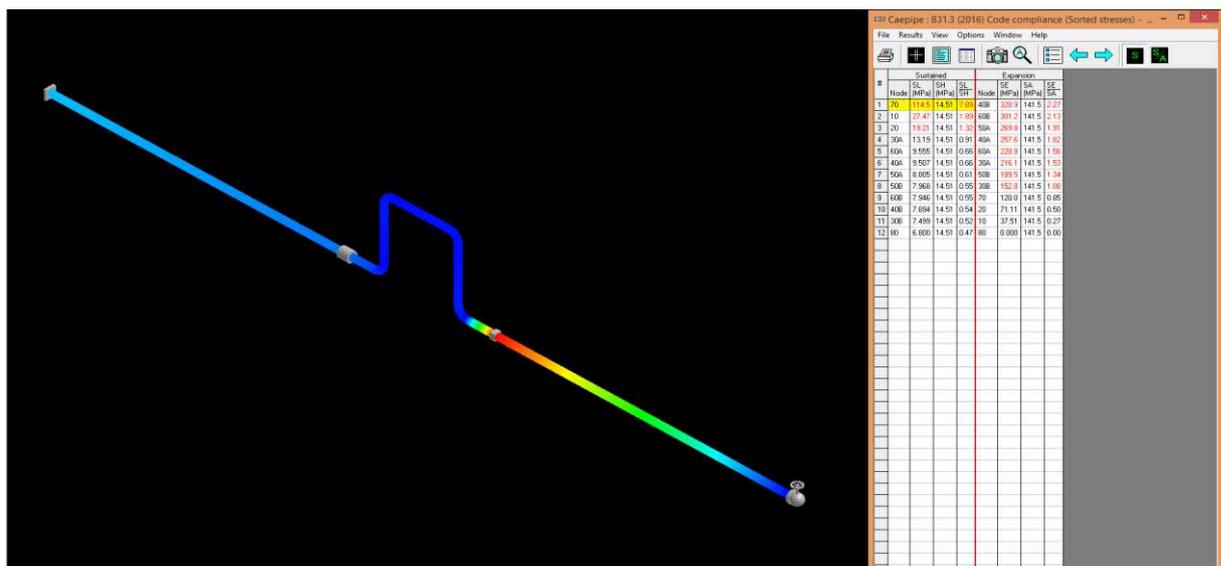
Figura 8 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 150°C



Fonte: CAEPIPE™ (2018)

Esses foram os resultados apresentados por ambos os métodos indicados para a realização deste trabalho, sendo que a tensão máxima de flexão da análise de tensão do método computacional mostrado na figura 8, anteriormente, foi de 77,44 MPa, para uma temperatura de 150°C, enquanto o método gráfico apresentou para esta temperatura uma tensão máxima de flexão de 98,64 MPa, conforme Tabela 1.

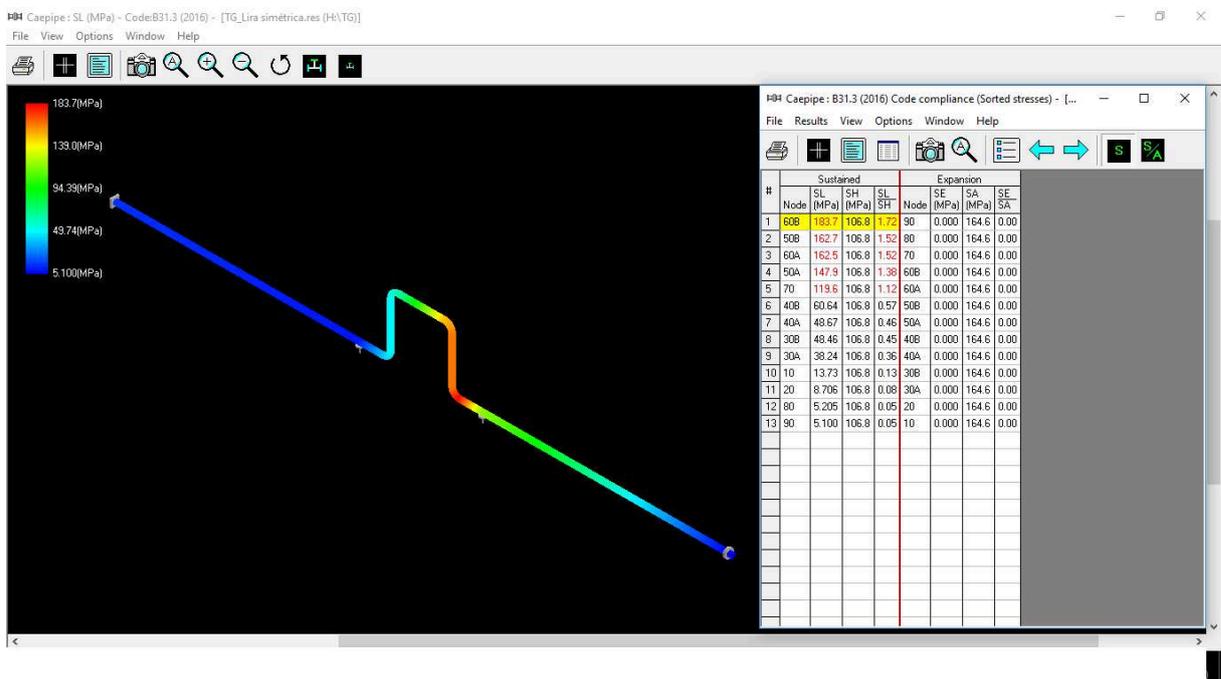
Figura 9 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 200°C



Fonte: CAEPIPE™ (2018)

Esses foram os resultados apresentados por ambos os métodos indicados para a realização deste trabalho, sendo que a tensão máxima de flexão da análise de tensão do método computacional mostrado na figura 9, anteriormente, foi de 114,50 MPa, para uma temperatura de 200 °C, enquanto o método gráfico apresentou para esta temperatura uma tensão máxima de flexão de 137,41 MPa, conforme Tabela 1.

Figura 10 - Análise de tensão CAEPIPE™ à 300 °C



Fonte: CAEPIPE™(2018)

Esses foram os resultados apresentados por ambos os métodos indicados para a realização deste trabalho, sendo que a tensão máxima de flexão da análise de tensão do método computacional mostrado na figura 10, anteriormente, foi de 183,70 MPa, para uma temperatura de 300 °C, enquanto o método gráfico apresentou para esta temperatura uma tensão máxima de flexão de 216,08 MPa, conforme Tabela 1.

5 CONCLUSÃO

Após obter os resultados do método simplificado Grinnell, através dos cálculos realizados com os dados retirados das tabelas e com auxílio de planilhas eletrônicas, iniciamos a aprendizagem e utilização do software CAEPIPE™ para obtermos os resultados de método de análise computacional.

Com as informações analisadas, foi verificado que o método simplificado Grinnell apresentou resultados conservadores para as tensões nas devias temperaturas analisadas, isso confere ao método maior segurança e maior custo de projeto. Enquanto os valores do software CAEPIPE™ apresentaram maior confiabilidade devido ao software apresentar imagens com escala de tensão pontual e simulação de flexibilidade, que para este perfil apresentou deslocamento idêntico para todas as temperaturas analisadas.

Entretanto, para pequenos trechos e utilização como pré-projeto o método manual apresenta relevante confiabilidade devido a sua praticidade de utilização com auxílio de planilha eletrônica, enquanto para trechos mais complexos, por exemplo, com ramificações, os métodos computacionais apresentam ferramentas que tornam a manipulação e análise do projeto mais ágil e exata.

Por fim, observamos a importante aprendizagem que adquirimos ao desenvolver este trabalho referente ao conhecimento dos métodos de análise e ao tema abordado. Com isso, sugere-se que outros trabalhos sejam realizados abordando diferentes métodos para uma determinada configuração de tubulação, seja um trabalho que aborde dois métodos computacionais ou outros métodos simplificados, procurando absorver o conhecimento da análise de tensões em tubulação industrial.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **American National Standard Code For Pressure Piping, Chemical Plant and Refinery Piping**: ANSI B31.3 – 1976. New York, 1977.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- BAILONA, B. A. et al. **Análise de tensões em tubulações industriais para engenheiros e projetistas**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- FRANÇA FILHO, J. L. DE. **Manual para análise de tensões em tubulações industriais – Flexibilidade**. 1ed. São Paulo: LTC, 2013.
- GRINNELL COMPANY, INC. **Piping Design and Engineering**. 1.ed. Providence, Rhode Island, new York, EUA, 1951.
- KELLOG COMPANY, M.W. **Design of Piping Systems**. 2.ed. New York, EUA: John Wiley & Sons, Inc, 1956.
- QUADRELLI, J. C. **Curso de Análise de Tensões e Flexibilidade das Tubulações: Notas de Aula**. 1.ed. São Paulo: FDTE, 1987.
- SMITH, P. R.; VAN LAAN, T. J. **Piping and Pipe Support Systems: Design and Engineering**. 1.ed. New York, EUA: McGraw-Hill Book Co., 1987.
- SST SYSTEMS. **CAEPIPE™ User's Manual**. San Jose, California, EUA: SST Systems Inc, 2017.
- SHIGLEY, J. E. **Elementos de Máquinas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984, v.1.
- TELLES, P. C. DA S. **Tubulações Industriais**. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979.

