



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no  
projeto por análise de vasos de pressão nucleares**

**CAROLINA DELLA RICCO FIGUEIREDO**

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

**Orientador:**

**Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo**

**2021**

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

**Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no  
projeto por análise de vasos de pressão nucleares**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

**CAROLINA DELLA RICCO FIGUEIREDO**

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

**Orientador:**

**Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

São Paulo

2021

Fonte de Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

DELLA RICCO FIGUEIREDO, C. **Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no projeto por análise de vasos de pressão nucleares**. 2021. 122 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Della Ricco Figueiredo, Carolina  
Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no  
projeto por análise de vasos de pressão nucleares / Carolina  
Della Ricco Figueiredo; orientador Miguel Mattar Neto. -- São  
Paulo, 2021.  
122 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. Projeto por análise. 2. Análise de tensões. 3. Elementos  
finitos sólidos tridimensionais. 4. Linearização de tensão. 5.  
Vasos de pressão Nucleares. I. Mattar Neto, Miguel, orient.  
II. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Carolina Della Ricco Figueiredo

Título: Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no projeto por análise de vasos de pressão nucleares.

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências. Orientado pelo Prof. Dr. Miguel Mattar Neto.

Data: 25/11/2021

### Banca Examinadora

Prof. Dr. Bruno Eizo Higaki

Instituição: Centro Universitário FEI Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

Instituição: Universidade de São Paulo Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Julgamento: Aprovado

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Dr. Miguel Mattar Neto, pela oportunidade, paciência e horas gastas em discussões que amadureceram não apenas esta dissertação, mas também a pessoa que hoje a escreve.

Expresso aqui, também, minha gratidão a todos colegas de trabalho que se fizeram, de alguma forma, presente durante estes anos. Em especial, ao Carlos Alexandre de Jesus Miranda, Altair Antônio Faloppa, Gerson Fainer, Javier Gonzáles Mantecón e Daniel Carvalho.

À minha família, pelo constante apoio.

Finalmente, o estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

“The roots of education are bitter, but the fruit is sweet.”

- Aristotle

## ABSTRACT

DELLA RICCO FIGUEIREDO, C. **Numerical methodology for the elastic stress analysis in the design by analysis of nuclear pressure vessels.** 2021. 123 p. Thesis (Master degree in Nuclear Technology) – Nuclear and Energy Research Institute – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

The code commonly used for the stress analysis of nuclear mechanical components is the ASME Code, Section III. In it, in the so-called Design by Analysis, there are guidelines on how to classify stresses and their allowable limits, but those limits are based on shell theory, in the membrane and bending stress format. The advance and easy access to computers allow the structural analysis of pressure vessels with three-dimensional solid finite elements that, although it has a higher computational cost compared to a similar shell element mesh, may allow the analysis of constructive details in the model, maintaining the accuracy of the evaluation of the stress behavior along the thickness. The issue in proceeding the stress analysis is the missing procedure in ASME code, Section III, for the compatibility of the output stresses obtained in solid element models with the allowable limits imposed by ASME, which are in the membrane and bending stresses format. As there is not any recommendation in the ASME Code, Section III for the stress analysis made with solid finite elements, the present work aims to indicate recommendations for the use of the ASME Code, Section III, in pressure vessel-nozzle intersections stress analysis using the stress linearization prescriptions presented in the ASME code, Section VIII, Division 2 which deals with non-nuclear pressure vessel designs.

**Key-words:** *Design by Analysis; Stress analysis; Three-dimensional solid finite elements; Stress linearization; Nuclear pressure vessels.*

## RESUMO

DELLA RICCO FIGUEIREDO, C. **Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no projeto por análise de vasos de pressão nucleares**. 2021. 123 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

O código comumente utilizado para a análise de componentes mecânicos nucleares é o código ASME, Seção III. Nele, no chamado Projeto por Análise, estão diretrizes sobre como classificar tensões e seus limites admissíveis, porém todos fundamentados na teoria das cascas, ou seja, em parcelas de tensão de membrana e tensão de flexão. O avanço e fácil acesso a computadores, possibilita a análise estrutural de vasos de pressão com elementos finitos sólidos tridimensionais que, embora tenha um custo computacional maior comparado com uma que utiliza malha de elementos finitos de casca semelhante, pode possibilitar a análise de detalhes construtivos no modelo mantendo a precisão da avaliação do comportamento de tensão ao longo da espessura. O problema é a falta de diretrizes no código ASME, Seção III, para a compatibilização das tensões obtidas em modelos de elementos sólidos com tensões em formato de membrana e flexão para posterior comparação dos limites admissíveis impostos pela ASME. Diante da falta de diretrizes no código ASME, Seção III para o projeto de vasos de pressão nucleares analisados com elementos finitos sólidos tridimensionais, o presente trabalho tem o objetivo de indicar recomendações para utilização do código ASME, Seção III, em análise de bocais com base nas prescrições de linearização de tensões mostradas no código ASME, Seção VIII, Divisão 2 que trata de projetos de vasos de pressão não nucleares.

**Palavras chave:** *Projeto por análise; Análise de tensões; Elementos finitos sólidos tridimensionais; Linearização de tensão; Vasos de pressão Nucleares.*



## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	17
1.2.	OBJETIVOS .....	21
1.2.1.	Objetivos Específicos.....	22
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	22
<b>2.</b>	<b>PROJETO POR ANÁLISE.....</b>	<b>24</b>
2.1.	CATEGORIZAÇÃO DE TENSÃO.....	25
2.1.1.	Tensão Primária .....	26
2.1.2.	Tensão Secundária .....	26
2.1.3.	Tensão de Pico .....	27
2.1.4.	Classificação de Tensão para Vasos .....	27
2.2.	LIMITES DE TENSÃO .....	30
2.2.1.	Limites de Tensão Primária.....	30
2.2.2.	Limite de Tensão Primária Mais Secundária.....	32
2.2.3.	Limites, Restrições e Comentários.....	34
2.3.	DERIVAÇÃO DA INTENSIDADE DE TENSÃO .....	34
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
3.1.	SELEÇÃO DE UMA LINHA DE CLASSIFICAÇÃO DE TENSÕES (SCL).....	36
3.2.	MÉTODOS DE LINEARIZAÇÃO DE TENSÃO.....	39
3.2.1.	Métodos de Integração de Tensão .....	39
3.2.2.	Métodos de Tensão Estrutural Baseado em Forças Nodais.....	40
3.2.3.	Métodos de Tensão Estrutural Baseado na Integração de Tensão .....	43
3.3.	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS .....	44
3.3.1.	Cilindro Pressurizado.....	45

3.3.2.	Placa Circular Pressurizada .....	48
3.3.3.	Conclusões e Observações .....	51
<b>4.</b>	<b>CASOS DE ESTUDO INICIAIS .....</b>	<b>53</b>
4.1.	WRC 429: GUIA PARA A APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE TENSÕES 3D .....	53
4.1.1.	Cone-cilindro com Carregamento Axial Externo .....	53
4.1.2.	Interseção Cilindro-cilindro Com Uma Razão d/d Alta.....	56
4.1.3.	Pequeno Bocal Angular ao Vaso .....	61
4.1.4.	Interseção Radial Bocal-cilindro .....	65
4.2.	CÓDIGO ASME, DIV 2, MANUAL DE EXEMPLO DE PROBLEMAS (PTB-3).....	68
4.2.1.	Junção Vaso de Pressão-Bocal .....	68
4.3.	REGRAS DE PROJETO PARA UMA ANÁLISE NÃO LINEAR. PARTE 2B: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE UM BENCHMARK NÃO LINEAR.....	71
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DE TENSÃO DOS CASOS DE ESTUDO INICIAIS .....</b>	<b>80</b>
5.1.	WRC 429: GUIA PARA A APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE TENSÕES 3D .....	80
5.1.1.	Cone-cilindro com Carregamento Axial Externo .....	80
5.1.2.	Interseção Cilindro-cilindro Com Uma Razão d/d Alta.....	83
5.1.2.1.	Categorização e classificação das Tensões .....	88
5.1.3.	Pequeno Bocal Angular ao Vaso .....	89
5.1.3.1.	Mapeamento de Tensões .....	91
5.1.3.2.	Categorização e Classificação das Tensões.....	95
5.1.4.	Interseção Radial Bocal-cilindro .....	96
5.1.4.1.	Mapeamento de Tensão .....	98
5.1.4.2.	Categorização e Classificação das Tensões.....	101
5.2.	CÓDIGO ASME, DIV 2, MANUAL DE EXEMPLO DE PROBLEMAS (PTB-3).....	101
5.2.1.	Junção Vaso de Pressão-Bocal .....	102

5.3.	REGRAS DE PROJETO PARA UMA ANÁLISE NÃO LINEAR. PARTE 2B: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE UM BENCHMARK NÃO LINEAR.....	104
5.3.1.1.	Mapeamento de Tensão .....	107
5.3.1.2.	Categorização e Classificação das Tensões.....	109
5.4.	COMENTÁRIOS FINAIS .....	110
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>112</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>116</b>
	<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>120</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Classificação de tensão para vasos.....	28
Tabela 2. 2 - Classificação e limites de tensão .....	34
Tabela 3. 1 - Tensões normais e principais linearizadas.....	47
Tabela 3. 2 - Forças e momentos resultantes.....	47
Tabela 3. 3 - Comparação das tensões linearizadas .....	48
Tabela 3. 4 - Tensões normais e principais linearizadas .....	50
Tabela 3. 5 - Forças e momentos resultantes.....	50
Tabela 3. 6 - Comparação das tensões linearizadas .....	51
Tabela 4. 1 - Diferenças no SI .....	56
Tabela 4. 2 - Cálculo dos carregamentos de fechamento .....	57
Tabela 4. 3 - Diferença de tensão .....	60
Tabela 4. 4 - Diferença de intensidade de tensão .....	60
Tabela 4. 5 - Cálculo dos carregamentos de fechamento .....	61
Tabela 4. 6 - Comparação de tensão .....	64
Tabela 4. 7 - Cálculo dos carregamentos de fechamento .....	65
Tabela 4. 8 - Comparação de tensão .....	67
Tabela 4. 9 - Diferença da tensão equivalente de membrana.....	70
Tabela 4. 10 - Categorização de tensão .....	88
Tabela 5. 1 - Comportamento de tensão (Pa) .....	82
Tabela 5. 2 - Categorização de tensão.....	83
Tabela 5. 3 - Informação de malha .....	83
Tabela 5. 4 - Diferença entre malhas.....	84
Tabela 5. 5 - Informação de malha .....	89
Tabela 5. 6 - Diferença de malhas.....	91
Tabela 5. 7 - Categorização das tensões.....	95
Tabela 5. 8 - Informação de malha .....	96
Tabela 5. 9 - Diferença de tensões.....	97
Tabela 5. 10 - Categorização das tensões .....	101
Tabela 5. 11 - Categorização de tensão .....	102
Tabela 5. 12 - Tensões Linearizadas, em MPa .....	103

Tabela 5. 13 - Cálculo do carregamento de fechamento.....	104
Tabela 5. 14 - Intensidade de tensão linearizadas .....	110

## LISTA DE FIGURAS

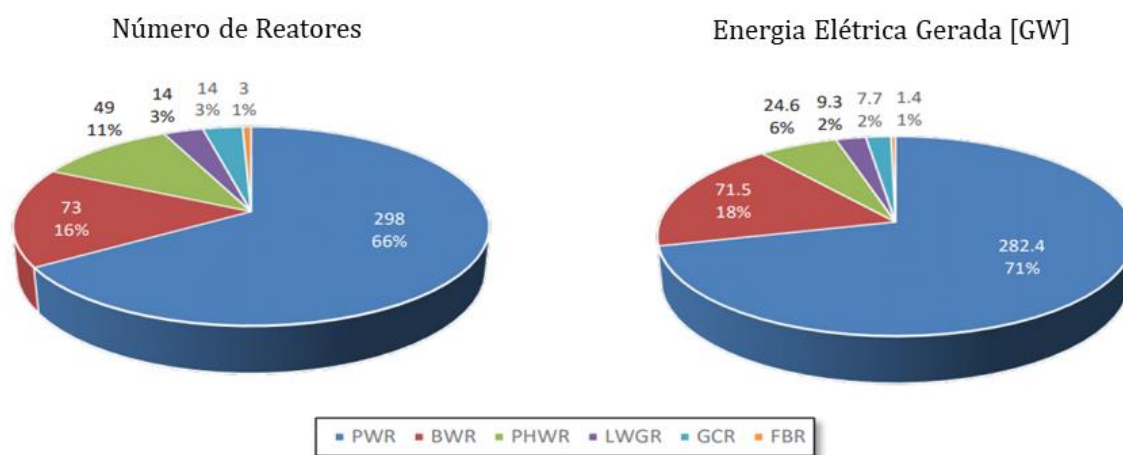
Figura 1. 1 - Numero de reatores e geração de energia elétrica por fonte nuclear [GW] .15	15
Figura 2. 1 - Limites de tensões primárias.....32	32
Figura 2. 2 - Histórico de deformações.....33	33
Figura 3. 1 - Condições de validade de uma SCL.....38	38
Figura 3. 2 - Elementos básicos estruturais e de transição .....38	38
Figura 3. 3 - Componentes linearizados.....40	40
Figura 3. 4 - Exemplo cilíndrico .....41	41
Figura 3. 5 - Possíveis faces a serem analisadas .....42	42
Figura 3. 6 - Conjunto de elementos.....44	44
Figura 3. 7 - Conjunto de elemento utilizados para simulação .....45	45
Figura 3. 8- SCL, malha e distribuição da tensão normal ao eixo x.....49	49
Figura 4. 1 - Geometria, informação e condições de simulação.....54	54
Figura 4. 2 - Malha e SCL para validação .....55	55
Figura 4. 3 - Condição de simulação .....57	57
Figura 4. 4 - Malha e SCL.....58	58
Figura 4. 5 - Geometria e condições de simulação .....61	61
Figura 4. 6 - Malha e SCL para validação .....62	62
Figura 4. 7 - Geometria e condições da simulação .....65	65
Figura 4. 8 - Malha e SCL.....66	66
Figura 4. 9 - Geometria .....69	69
Figura 4. 10 - Malhas .....69	69
Figura 4. 11 - SCLs .....70	70
Figura 4. 12 - Bocal Nuclear.....71	71
Figura 4. 13 - Geometria do bocal.....72	72
Figura 4. 14 - Malha e condições de contorno .....73	73
Figura 4. 15 - SCLs .....73	73
Figura 4. 16 - Comparação entre tensões de membrana.....74	74
Figura 4. 17 - Comparação entre tensões de flexão.....75	75
Figura 4. 18 - Comparação entre tensões de membrana mais flexão.....75	75
Figura 4. 19 - Condições de contorno da simulação.....76	76

Figura 4. 20 - Comparação de malhas.....	77
Figura 4. 21 - Comparação para tensão de membrana .....	78
Figura 4. 22 - Comparação para tensão de flexão .....	78
Figura 4. 23 - Comparação para tensão de membrana mais flexão.....	79
Figura 5. 1 - Intensidade de tensão (Pa), malha e SCL.....	81
Figura 5. 2 - Malha 1 e malha 4.....	84
Figura 5. 3 - SCLs.....	85
Figura 5. 4 - Tensão de membrana para o cilindro maior e menor .....	86
Figura 5. 5 - Tensão de membrana mais flexão interna e externa para o cilindro maior .	87
Figura 5. 6 - Tensão de membrana mais flexão para o cilindro menor .....	87
Figura 5. 7 - Intensidade de tensão para o cilindro menor.....	88
Figura 5. 8 - Malha 1 e malha 4.....	90
Figura 5. 9 - SCL e planos .....	90
Figura 5. 10 - Tensão de membrana .....	92
Figura 5. 11 - Tensão de membrana mais flexão para o vaso.....	93
Figura 5. 12 - Tensão de membrana mais flexão para o bocal .....	93
Figura 5. 13 - Intensidade de tensão para o vaso .....	94
Figura 5. 14 - Intensidade de tensão para o bocal .....	94
Figura 5. 15 - Malha 1 e malha 4 .....	96
Figura 5. 16 - SCLs .....	98
Figura 5. 17 - Tensão de membrana .....	99
Figura 5. 18 - Tensão de membrana mais flexão para o vaso.....	99
Figura 5. 19 - Tensão de membrana mais flexão para o bocal .....	100
Figura 5. 20 - Intensidade de tensão .....	100
Figura 5. 21 - Condição de contorno.....	105
Figura 5. 22 – Malha e SCLs.....	106
Figura 5. 23 - Tensão de membrana .....	107
Figura 5. 24 - Tensão de membrana mais flexão pro vaso.....	108
Figura 5. 25 - Tensão de membrana mais flexão pro bocal .....	109
Figura 5. 26 - Intensidade de tensão, em MPa .....	109

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – Sigla em inglês)[1], em 2019, há no mundo 298 reatores operantes do tipo PWR (em inglês, sigla para reatores refrigerados por água pressurizada). Juntos, geram 71% de toda geração de energia por fonte nuclear, como ilustrado na Figura 1.1.

Figura 1. 1 - Numero de reatores e geração de energia elétrica por fonte nuclear [GW]



Fonte: [1]

O vaso de pressão que contém o núcleo nas configurações de reatores PWR são pressurizados de forma a garantir o estado líquido do refrigerante/moderador (H<sub>2</sub>O). Esta configuração de reatores acarreta em singularidades no projeto que devem ser consideradas, uma vez que o projeto do vaso de pressão do reator é uma das etapas fundamentais entre aquelas que englobam a construção de uma instalação nuclear com reator a água pressurizada - PWR (Pressurized Water Reactor)[2].

Uma instalação nuclear precisa atender a diversos requisitos de segurança, definidos pela IAEA [3] com o intuito da proteção dos trabalhadores, da comunidade em geral e do meio ambiente contra a liberação de radioatividade. Para atender a estes requisitos, é exigida a garantia de que os equipamentos possam operar com segurança sob as cargas esperadas, cargas acidentais e até mesmo sob cargas postuladas.

Esta garantia é obtida com a adequação a normas específicas. Para componentes nucleares como o vaso de pressão do reator, a principal norma utilizada no mundo é o Código ASME, Seção III: Regras para a Construção de Componentes de Instalações



Nucleares [4]. A versão inicial de tal código, publicada no início da década de 60, trazia uma inovação com relação aos códigos anteriores que consistia na introdução de uma abordagem chamada de Projeto por Análise.

A abordagem anterior a esta se chamava Projeto por Norma e se valia de fórmulas para a determinação de espessuras mínimas e desenvolvimento do projeto mecânico. Um ponto importante para se ressaltar sobre essa abordagem é a ausência de critérios formais, ausência de análises de condições de acidente e o forte conservadorismo.

Assim, propôs-se o procedimento de Projeto por Análise, onde são avaliadas consequências dos possíveis modos de falha e a imposição de limites admissíveis para mitigação de cada um deles. Para tanto, esta abordagem usa uma análise de tensões mais detalhada e técnicas mais avançadas que aquelas até então usadas nas áreas de projeto e materiais. Em decorrência disto, pode-se ter um projeto de maior confiabilidade uma vez que se aumentam os níveis de segurança e se reduzem os coeficientes de segurança utilizados anteriormente (o que poderia ser traduzido como um melhor aproveitamento das características dos materiais) e, portanto, com maior racionalidade.

Entretanto, a principal ferramenta de análise estrutural elástica de vasos de pressão na época da formulação do Projeto por Análise era a teoria de cascas. Por este motivo, ele se baseia nas distribuições de tensões que aparecem em cascas (membrana e flexão), visando a prevenção de alguns dos principais modos de falha relacionados a categorias de tensões primárias, secundárias e de pico. Para tanto, são impostos limites admissíveis às diversas categorias de tensões com base na hipótese de material elástico perfeitamente plástico, onde após atingida a tensão de escoamento ocorre o colapso plástico da seção.

Todavia, a etapa de categorização (linearização, separação e classificação) das tensões é provavelmente o aspecto mais complexo do procedimento de Projeto por Análise e, paradoxalmente, o problema tornou-se mais difícil com o aperfeiçoamento das técnicas de análise. Como a categorização de tensões é feita em função dos tipos de tensões que aparecem em cascas, fica difícil determinar as categorias de tensões quando estas forem calculadas com modelos estruturais que não sejam baseados na teoria de cascas (como com análises com elementos finitos sólidos).

Com o advento e avanço acelerado dos computadores, passou a ser utilizada no projeto de vasos de pressão a análise com Método dos Elementos Finitos [5]. Vários tipos de modelos de Elementos Finitos podem ser criados, usando uma grande variedade de

elementos. Em geral, os vasos de pressão podem ser modelados usando elementos de casca, que são relativamente fáceis de gerar e que dão resultados na forma das tensões de membrana e flexão usadas no Código ASME, Seção III [4]. No entanto, estes modelos não incorporam facilmente os detalhes construtivos em transições com variações de espessura. Para incluir tais efeitos, devem ser usados elementos finitos sólidos. Entretanto, modelos de elementos finitos sólidos podem consumir mais tempo de processamento do que os modelos de casca. Porém, o problema mais crítico com os modelos de elementos finitos sólidos é a etapa de linearização e categorização das tensões calculadas, que não se apresentam no formato de tensões de membrana e flexão.

Tem sido feito um grande esforço na tentativa de formular procedimentos que auxiliem o projetista a fazer uma categorização de tensões rigorosa em modelos de elementos finitos sólidos. O método mais comum é aplicar o procedimento de linearização de tensões em regiões específicas do modelo, e calcular distribuições de tensões constantes (associadas às tensões de membrana) e lineares (associadas às tensões de flexão) que gerem as mesmas forças e momentos líquidos que as distribuições de tensões do modelo sólido [03]. Estas tensões de membrana e de flexão generalizadas são tratadas como as tensões de cascas do Código ASME, Seção III [4].

## 1.1. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Antes de iniciar a revisão bibliográfica, propriamente dita, é importante fazer alguns comentários sobre a aplicação do Projeto por Análise do código ASME [4] e a linearização e categorização de tensões na avaliação de vasos de pressão nucleares utilizando elementos finitos.

O desenvolvimento do chamado Projeto por Análise do código ASME [4] foi feito com base na Teoria das Cascas e na Teoria da Plasticidade. Ao se utilizar as análises elásticas e lineares no Projeto por Análise do código ASME [4] se objetiva limitar as tensões com margens adequadas em relação a modos de falha onde há condições plásticas não lineares.

No final da década de 1970 e na década de 1980, houve muito desenvolvimento na avaliação de vasos de pressão nucleares de acordo com o código ASME [4] com elementos finitos que acompanhou a evolução dos métodos numéricos, dos recursos computacionais e do interesse da indústria nuclear americana. Após o acidente da usina de Three Miles

Island em 1979 [6] houve uma quebra no programa nuclear americano e uma redução do interesse que havia sobre o assunto.

Assim, será apresentado a seguir um resumo das referências mais marcantes para o desenvolvimento do trabalho aqui apresentado.

Inicialmente, é importante destacar que um dos pioneiros no estudo de classificação das tensões provenientes de análises de elementos finitos foi Kroenke [7], [8] que identificou a necessidade da criação de uma plano para o cálculo das tensões em linha ao longo da seção transversal de um vaso. Chamou-se esta linha de *linha de tensões*, onde as tensões eram interpoladas em pontos ao longo do seu comprimento. As tensões nela calculadas deveriam ser separadas em parcelas de membrana, flexão e pico. Os trabalhos [7] e [8] apresentavam observações e recomendação para o melhor posicionamento das linhas de tensões, e na influência de parcelas de algumas tensões, como no cálculo da tensão radial na tensão de flexão.

Em [9], Hollinger e Hechmer dão início em 1986 ao trabalho do PVRC (Pressure Vessel Research Council, sigla em inglês para Conselho de Pesquisa de Vasos de Pressão). Discutem-se três procedimentos para a análise: análise de tensão em um ponto, em uma linha ou em um plano. A análise em um ponto, que geralmente pode ser um método conservador, consiste em comparar a tensão em um ponto com os limites. A análise em uma linha consiste em linearizar as tensões na linha e calcular as parcelas de membrana e membrana mais flexão para comparação com os limites. A análise em um plano é a extensão de uma análise em uma linha para um plano.

Em [10], se reconhece que embora pareça mais simples a análise de tensão em um ponto, pode ser um procedimento muito conservador. Dentre as possibilidades, se reconhece que analisar as tensões em uma linha é o procedimento mais vantajoso e que o uso de tensão em um plano seria um procedimento complexo e de difícil aplicação.

Após reconhecer que a análise de tensões em uma linha seria o procedimento preferível, em [11] se avalia quais tensões deveriam ser linearizadas, em uma análise axissimétrica, para o cálculo da intensidade de tensão. Conclui-se que linearizar os dois componentes normais ao plano (tensão circunferencial e longitudinal) e usar a tensão total normal radial e a tensão total de cisalhamento na superfície para cálculo da tensão pelo critério de falha escolhido seria o procedimento mais conservador e linearizar apenas as duas tensões principais que mais se aproximam das direções circunferencial e longitudinal seria o procedimento mais consistente para a análise de tensão.

Finalmente, em [11] e [12] são apresentados os resultados obtidos pelo projeto de pesquisas do PVRC, que trazem considerações para uma análise 3D. São elas as considerações de curto, médio e longo prazo.

Nas recomendações de curto prazo, chamada também de fase 1, incluem as considerações que poderiam ser implementadas imediatamente. Consistem em um conjunto de seis recomendações como quando usar a análise de elementos finitos, onde alocar uma linha (aqui são introduzidos os conceitos de elementos estruturais e de transição) e quais opções de tensões linearizar para cada categoria e parcela.

Nas recomendações de médio prazo relacionam-se mecanismos de falha com as categorias de tensão (primária e secundária), localizam-se as categorias, determinam-se os componentes de tensão adequados para cada categoria de tensão e obtém-se as tensões linearizadas.

Nas recomendações de longo prazo, encontra-se o presente trabalho, com o desenvolvimento de formas de verificação, bem como de pesquisas analíticas e experimentais.

Foram produzidos vários trabalhos visando eliminar paulatinamente as dificuldades encontradas. De 1998 até o momento houve vários estudos com propostas tanto em questões conceituais bem como nos procedimentos de avaliação pelo Projeto por Análise.

Em [2], foram realizadas comparações de casos de vasos de pressão axissimétricos e tridimensionais, com análises com fórmulas, e análises lineares, análises limite e análises elasto-plásticas com elementos finitos sólidos. Verificou-se que os resultados obtidos da linearização de tensões em uma linha em análises lineares com elementos finitos apresenta um conservadorismo em relação às análises com fórmulas e às análises limite e elasto-plásticas com elementos finitos sólidos.

Em 1999 a Comissão Europeia publicou o relatório EUR 19020 EN [13], intitulado "The Design by Analysis Manual". Nele conta uma introdução de método dos elementos finitos aplicado a vasos de pressão, abordando implicações para a interpretação do código ASME VIII [14] que trata de um código para vasos de pressão não nucleares. Destaca-se os dois maiores problemas na realização de uma análise elástica: a linearização e a categorização. O relatório tem o intuito de fornecer ao leitor uma visão sobre as dificuldades de aplicação de uma análise que pode ser classificada erroneamente como direta e simples.

Em [15], uma comparação entre métodos de projeto por análise utilizando o método dos elementos finitos é realizada. Foram consideradas análises elásticas utilizando o método de categorização de tensão presente no Código ASME, Seção VIII [14] e análises elasto-plásticas presentes na norma europeia EM 13445-3, Anexo B [16]. Dois casos de estudo foram modelados com elementos de casca e, embora não tenham sido modelados com elementos finitos sólidos e não tenha ocorrido a complexidade na transformação das tensões para a comparação com os limites admissíveis, conclui-se que o método de categorização de tensão em modelos de elementos finitos de casca é um método barato e simples de ser implementado. Entretanto, para algumas geometrias mais complexas e certas condições pode-se ser difícil de se implementar o método de categorização de tensão presente no Código ASME [14], sendo suscetível, também, uma má interpretação de resultados.

[17] discute critérios para se determinar a carga plástica máxima (em termos de pressão interna e momentos aplicados) em uma intersecção de cilindros em análises plásticas, utilizando conceitos de Projeto por Análise.

Quanto a análises elásticas, em [18] e [19] surgem pesquisas para a implementação de planos de classificação de tensão que teriam basicamente a função de uma linha traçada ao longo da espessura que deve ser analisada e suas tensões traduzidas em tensões de membrana e flexão para a comparação dos limites do código ASME. Entretanto, os valores das tensões obtidas dependem diretamente da área deste plano escolhido, o que impacta nas tensões finais, podendo levar a resultados subestimados. De um modo geral, são cálculos complexos que exigem do calculista um pós processamento de dados mais complexo, uma vez que a definição do plano de avaliação e da área de influência exige uma categorização manual e subjetiva.

Os métodos de análise do Projeto por Análise são comparados em [20], para vasos de pressão, porém para a situação de transporte do componente. O componente é simulado com cargas de suportes horizontais e análises elásticas, limites e elasto-plásticas são realizadas. Diferentemente do esperado, que seriam resultados mais conservadores na análise elástica, a resposta elasto-plástica resultou em valores mais conservadores quando comparados com as análises elástica e limite.

[21] faz uma revisão e compara pontos em métodos de análise de deformações plástica excessivas. Em uma análise elástica, atribui-se as tensões um limite de três vezes o valor de tensão limite de projeto  $S_m$ . Embora a análise seja computacionalmente menos

custosa, há a dificuldade em classificar as tensões primárias e secundárias. A análise realizada com o comportamento elasto-plástico do material embora seja mais custosa, tem uma resposta direta e apresenta um menor conservadorismo.

Em [22] mostra-se que a análise não elástica também pode ser utilizada de forma a prever onde a peça pode falhar. Testes com um modelo reduzido de um vaso toroidal são realizados até a falha e comparados com os resultados de pressão interna limite obtidos na análise em elementos finitos e seu local de falha. Os resultados obtidos pela análise numérica em FEA foram 9% menores do que o obtido na análise experimental e os resultados obtidos em cálculos teóricos resultaram em uma pressão limite 35% menor, mostrando uma boa correlação da análise numérica quando se considera a não linearidade do material com o vivenciado experimentalmente.

Um dos estudos mais recentes teóricos sobre um caminho a ser considerado para a transformação das tensões obtidas em uma análise de elementos sólidos tridimensionais para as tensões em parcela de membrana e flexão está em [23], onde se consolida toda a teoria desenvolvida pelos trabalhos citados acima.

Por fim, a World Nuclear Association publicou recentemente alguns benchmarks de vasos de pressão nucleares onde compara [24] e analisa resultados [25] de práticas de análises recorrentes na indústria. Apresenta resultados de vaso de pressão com uma simplificação no raio do vaso para representar um modelo 3D numa análise 2D axissimétrica realizada por empresas reconhecidas mundialmente no segmento nuclear, cada uma com sua característica de análise não divulgadas (como software, malha, método de linearização).

Ainda assim, não houve nos documentos normativos alterações significativas e os critérios de Projeto por Análise estão consolidados em [01] e os procedimentos de avaliação mais atualizados estão indicados em [26].

## 1.2. OBJETIVOS

Como se verá no desenvolvimento do texto, as principais regras de Projeto por Análise nos códigos de vasos de pressão e tubulações, nucleares e não nucleares, são baseadas no método elástico linear associado à classificação de tensões em tensões primárias (para controle de carga), tensões primárias mais secundárias (para controle de deformação) e tensões totais (primárias mais secundárias mais de pico)

Esse método elástico linear associado à classificação de tensões é fácil de aplicar apenas em casos simples, como casca cilíndrica sob cargas quase estáticas axissimétricas. Para geometrias mais complexas e em situações de diversas combinações de carga, as metodologias de classificação de tensão disponíveis são complicadas de implementar, conservadoras e dependentes da abordagem do usuário.

Tais dificuldades, por exemplo, são encontradas comumente ao projetar e avaliar os componentes nucleares como um bocal de vaso de pressão sob cargas multidirecionais de tubulações ou os próprios sistemas de tubulação.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo a recomendação de diretrizes para a análise de tensões de vasos de pressão nucleares, em especial em intersecções vaso de pressão-bocal.

### 1.2.1. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, citam-se:

a) Avaliação das recomendações de [14], na ausência de recomendações em [26], e dos códigos de projeto [11], [12] em casos de estudo simples e indicação da melhor abordagem a ser utilizada no trabalho.

b) Avaliação de casos de estudo iniciais da literatura [12], [27] para entendimento dos conceitos do Projeto por Análise de [4] e para avaliações de tensões de modelos com elementos finitos sólidos com linearização de tensões.

c) Avaliação de geometrias mais complexas de bocais em vasos de pressão [24], [25].

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto é organizado da seguinte maneira:

**Capítulo 1: Introdução** – Introdução do assunto e objetivos do estudo.

**Capítulo 2: Projeto por Análise** – Este capítulo aborda as recomendações do código ASME para a análise de componentes mecânicos nucleares, especificamente, a análise de vasos.

**Capítulo 3: Metodologia** – Apresentação da metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, baseada no código ASME.

**Capítulo 4: Casos de Estudos Iniciais** – Comparação dos casos presentes na literatura com o método a ser proposto.

**Capítulo 5: Análise de Tensão dos Casos de Estudo Iniciais** – Análise de tensão linear nos casos presentes na literatura, com sugestões de criação de malha, locais para linearização.

**Capítulo 6: Conclusões** – Conclusão e observações relacionadas ao trabalho, bem como sugestões para estudos futuros.

Esta dissertação encerra com a lista de referências e apêndices.



## 2. PROJETO POR ANÁLISE

O código amplamente utilizado em análises de vasos de pressão nucleares de reatores PWR é o código ASME intitulado “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, Seção III: regras para a construção de componentes de uma instalação nuclear, divisão 1, subsecção NB para componentes de classe 1 [4]. Diferentemente dos códigos para vasos de pressão convencionais onde há duas opções para a realização do projeto recomendadas: projeto por norma e projeto por análise, a norma referente a vasos de pressão nucleares permite apenas o projeto por análise.

A opção de um projeto por norma implica o uso de uma série de fórmulas para se determinar parâmetros do projeto, tais como uma espessura mínima requerida para manter a tensão circunferencial abaixo dos limites admissíveis. Como se reconhece a presença de tensões localizadas maiores do que as calculadas pela teoria das cascas, coeficientes de seguranças e regras de detalhamento são utilizados de forma conservadora.

Com o objetivo de reduzir o conservadorismo, adicionar considerações de condições de operações outras além das convencionais (como acidentes, por exemplo) e vincular as tensões limites a diversos modos de falha, criou-se o projeto por análise.

No entanto, mesmo anos depois de sua criação, não foram implementadas no código regras precisas para a obtenção das várias categorias de tensões. O uso de modelos tridimensionais de EF facilitou a representação de configurações mais complexas, mas, no entanto, aumentou as dificuldades de comparação entre os seus resultados e os limites admissíveis. Outras dificuldades ocorrem para situações de carregamentos mais complexos, não associados a apenas um modo de falha.

O projeto por análise para um vaso de pressão consiste na análise de tensões, separação e classificação de tensões que devem estar em parcelas de membrana, de flexão e de pico que serão associadas a potenciais modos de falha de vasos de pressão. A filosofia utilizada está indicada em [4], [14].

O item NB-3000 do código ASME [4] é intitulado “projeto” e nele apresentam-se requisitos gerais (NB-3100) com considerações de carregamento, considerações especiais e algumas regras para o projeto geral, recomendações para análises que considerem altas temperaturas ou pressão externa.

No item NB-3200, responsável especificamente pelo projeto por análise, são listados os requisitos para a aceitabilidade do projeto:

- a) As intensidades de tensões do projeto não devem exceder as intensidades limites descritas no apêndice obrigatório XIII [12] de [1].
- b) O atendimento ao parágrafo NB-3100.
- c) Em casos onde há a presença de tensão compressiva, além dos itens a e b, a tensão crítica de flambagem deve ser avaliada.
- d) A proteção em relação à fadiga deve ser avaliada.

Além dos requisitos de projeto por análise, o código ASME [1] traz um parágrafo, NB-3300, intitulado projeto de vasos. Nele, há de requisitos gerais a considerações de projeto, bem como a análise de vasos. De um modo geral, os procedimentos, limites, classificações se encontram no apêndice obrigatório XIII “Projeto Baseado na Análise de Tensões” da código ASME, seção III, apêndices [26] e nele, os itens necessários para a análise de vasos são:

- a) XIII-1000: Requisitos gerais. Neste item há um subitem de requisitos para aceitabilidade de projetos, similares aos do item NB-3200 do código ASME [1] discutidos acima. Há, também, o destaque para a teoria de falha adotada: a teoria do máximo cisalhamento ou teoria de Tresca e são apresentadas algumas definições.
- b) XIII-2000: Análise de tensão. Neste item, detalhes de como obter a derivação da intensidade de tensão, o tratamento dado a tensões além do limite de escoamento em análises plásticas bem como a categorização de tensão são fornecidos.
- c) XIII-3000: Limites de tensão para itens que não sejam parafusos. Onde os limites para cada categoria associada a cada modo de falha são estabelecidos.

## 2.1. CATEGORIZAÇÃO DE TENSÃO

A categorização de tensão consiste em separar as tensões em três categorias definidas pelo código ASME [4] e [26]: primária, secundária e de pico.

Assim, diferentes limites e verificações são atribuídos a cada categoria de forma a evitar os modos de falha como o colapso plástico, o acúmulo de deformação plástica sob carregamentos cíclicos e a fadiga de baixo ciclo em um determinado componente sob avaliação.

### **2.1.1. Tensão Primária**

A tensão primária ( $P$ ) é a tensão produzida exclusivamente por carregamentos mecânicos, como pressão interna ou peso próprio, de forma a satisfazer a lei do equilíbrio de forças e momentos. Esta não é uma tensão auto-limitante, diferente da tensão secundária. A tensão primária pode ser classificada, inicialmente, como tensão de membrana e de flexão.

A tensão de membrana é o valor médio e uniformemente distribuído através da espessura do componente avaliado.

O código ASME designa duas categorias de tensão de membrana: tensão de membrana generalizada ( $P_M$ ) e tensão de membrana localizada ( $P_L$ ). O que diferencia a tensão de membrana localizada é que essa está associada também a um efeito de descontinuidade, produzindo devido a necessidade de compatibilização das deformações de diferentes partes da estrutura. Assim, de maneira conservadora, a tensão de membrana localizada é classificada como tensão primária mesmo tendo uma parcela de tensão secundária.

### **2.1.2. Tensão Secundária**

A tensão secundária ( $Q$ ) é definida por [13] como uma tensão a qual é desenvolvida por restrições devido à descontinuidade geométrica, ao uso de materiais de diferentes módulos de elasticidade (diferente relação de tensão x deformação) ou à expansão térmica diferencial. Diferentemente da tensão primária que equilibra as equações de equilíbrio (causada por carregamentos externos), a tensão secundária está associada as equações de compatibilidade (satisfazendo o conjunto de deformações impostas). Por essa razão, a tensão secundária é considerada uma tensão auto-limitante, na qual um escoamento local e pequenas distorções na peça podem satisfazer as condições de descontinuidade ou expansões térmicas.

Uma única aplicação da tensão não acarreta em falha. Porém, os efeitos da tensão secundária, somados com a tensão primária, estão relacionados com o acúmulo de deformações plásticas em carregamentos cíclicos.

### **2.1.3. Tensão de Pico**

A tensão de pico (F) é a parcela a qual, somada com as tensões primárias e secundárias, se torna a maior tensão na seção sob avaliação, a qual não causa distorção significativa à estrutura. Esta é causada por pequenas descontinuidades localizadas ou tensões térmicas localizadas incluindo os efeitos de concentração de tensão, quando existentes. Essa pode ser uma possível origem de falha por fadiga de baixo ciclo.

### **2.1.4. Classificação de Tensão para Vasos**

O item XIII – 2600 “Classificação de Tensões” do código ASME [26] afirma que a classificação de tensões em vasos e bocais é as mesmas e fornece a Tabela 2.1 de assistência para casos típicos.

Tabela 2. 1 - Classificação de tensão para vasos

(continua)

Parte do Vaso	Localização	Origem da Tensão	Tipo de Tensão	Classificação	Descontinuidade	
					Geral	Local
Qualquer	Qualquer	Diferencial da expansão térmica	Membrana + Flexão	Q (Nota 1)	Sim	Não
			Porção não linear da distribuição de tensão	F	Sim	Sim
Qualquer	Qualquer	Qualquer	Concentração de Tensão	F	Sim	Sim
Qualquer casca ou tampo	Qualquer seção pelo vaso	Força ou momento externo	Membrana	Pm	Não	Não
			Flexão através de toda a seção	Pm (nota 2)	Não	Não
	Perto de um bocal ou abertura	Força ou momento externo	Membrana	Pl	Sim	Não
			Flexão através de toda a seção	Q	Sim	Não
Casca cilíndrica ou esférica	Qualquer	Pressão interna	Membrana	Pm	Não	Não
			Gradiente através da espessura	Q	Não	Não
	Junção com tampo ou flange	Pressão interna	Membrana	Pl	Sim	Não
Tampo côncavo, cônico ou achatado	região da coroa ou central	Pressão interna	Flexão através de toda a seção	Q (Nota 3)	Sim	Não
			Membrana	Pm	Não	Não
	Junta ou junção a casca	Pressão interna	Flexão	Pb	Não	Não
			Membrana	Pl	Sim	Não
Casca ou tampo perfurado	Ligamento típico em um padrão uniforme	Pressão	Flexão	Q (Nota 3)	Sim	Não
			Membrana	Pm	Sim	Não
	Ligamento isolado ou atípico	Pressão	Flexão	Pb (nota 4)	Sim	Não
			Membrana	Q	Sim	Não
			Flexão	F	Sim	Não

Fonte: [26], modificado

Tabela 2.1 - Classificação de tensão para vasos

(conclusão)

Parte do Vaso	Localização	Origem da Tensão	Tipo de Tensão	Classificação	Descontinuidade	
					Geral	Local
Bocal	Qualquer	Pressão interna	Membrana	Pm	Não	Não
			Membrana	Pl	Sim	Não
			Flexão	Q	Sim	Não
			Diferencial de expansão	Membrana + Flexão	Q	Sim
	Dentro dos limites de reforço	Força ou momento externo	Membrana	Pm	Não	Não
			Flexão através de toda a seção	Pm (nota 2)	Não	Não
			Membrana	Pl	Sim	Não
	Fora dos limites de reforço	Força ou momento externo não decorrente de deslocamentos livres nas extremidades da tubulação	Flexão	Q	Sim	Não
			Membrana	Pm	Não	Não
			Flexão	Pb	Não	Não
			Membrana	Pl	Sim	Não
		Força ou momento externo decorrentes de deslocamentos livres nas extremidades da tubulação acoplada	Flexão	Q	Sim	Não
			Membrana	Pm	Não	Não
			Flexão	Q	Não	Não
			Membrana	Pl	Sim	Não
Revestimento	Qualquer	Pressão	Membrana	Q	Não	Não
		Gradiente térmico	Flexão	Q	Não	Não
		Diferencial de expansão	Membrana + Flexão	F	Não	Não

Fonte: [26], modificado

- a) Nota 1: Para um gradiente térmico radial,  $Q$  equivale a tensão linear.
- b) Nota 2:  $P_m$  inclui a tensão de flexão em toda seção. Ou seja, mesmo a parcela que varia linearmente em uma casca, tampo ou bocal, causada por carregamentos mecânicos, longe de descontinuidades, deve ser tratada como membrana generalizada.
- c) Nota 3: Se o momento de flexão na extremidade é necessário para manter a tensão de flexão entre limites aceitáveis, a flexão é classificada como  $P_b$ . Caso contrário, é classificada como  $Q$ .
- d) Nota 4:  $P_b$  é a tensão de flexão pela largura do ligamento, mas não na placa.

## 2.2. LIMITES DE TENSÃO

Os limites de tensão são determinados para cada categoria de tensão, de forma a evitar, como já mencionado, modos de falha específicos, como, por exemplo, o colapso plástico, o acúmulo de deformação plástica sob carregamentos cíclicos e a fadiga de baixo ciclo em um determinado componente sobre avaliação.

O código ASME [4], [26] considera, para a imposição de limites, o comportamento elasto perfeitamente plástico do material. Ou seja, não há encruamento. As tensões e deformação apresentam um comportamento linear até o limite de tensão de escoamento. Atingindo a tensão de escoamento as deformações aumentam indefinidamente sob carga constante (para uma viga sob carga axial centrada).

É importante mencionar que nesse trabalho não serão tratados os aspectos associados à fadiga de baixo ciclo e como é feita a limitação a esse modo de falha. O motivo para isso é que para a avaliação da fadiga de baixo ciclo não é necessário fazer a linearização de tensões.

### 2.2.1. Limites de Tensão Primária

Para compreender os limites estabelecidos para as tensões primárias, as quais tem o objetivo de prevenção do modo de falha de grandes distorções e colapso plástico, utiliza-se a hipótese de material elasto perfeitamente plástico aplicado a uma viga submetida a

forças axiais e momentos. As tensões numa seção podem ser separadas em parcela de membrana e flexão.

A Figura 2.1 ilustra um gráfico onde os limites utilizados no projeto ASME estão em azul tracejado. Os traços azuis segregam a região elástica da região plástica, onde alguns pontos da seção começam a plastificar. A curva preta contínua segregam a região parcialmente plastificada da região totalmente plastificada, onde todos os pontos a seção plastificam resultando em colapso plástico.

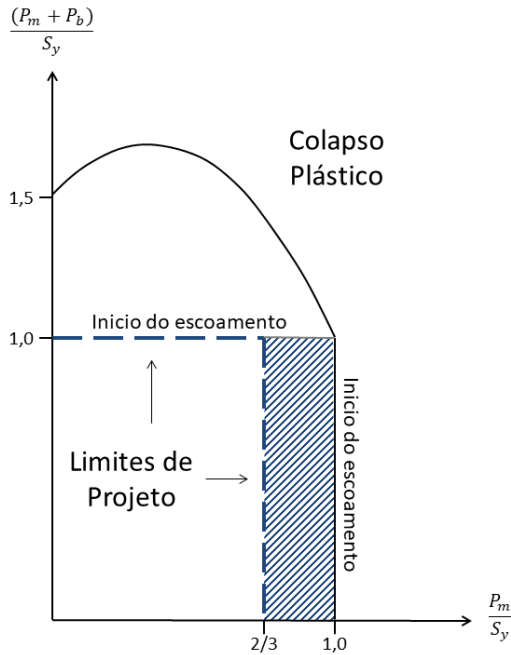
Embora o início do escoamento se dê para a tensão de membrana igual ao limite de escoamento, o código ASME [4],[26] limita a tensão de membrana a tensão de projeto  $S_m$  ( $2/3$  a tensão de escoamento  $S_y$ ) devido ao fato de quando a tensão de membrana atinge o limite de escoamento, não apenas um ponto plastifica, mas a seção toda, causando o colapso plástico.

Porém, apenas a tensão de membrana generalizada ( $P_m$ ), relacionada à média da intensidade de tensão ao longo da espessura longe da região de descontinuidade estrutural, é limitada a  $2/3$  de  $S_y$ . A tensão de membrana localizada ( $P_L$ ), diferentemente da generalizada, é limitada a  $S_y$  uma vez que o código reconhece a existência de uma parcela secundária na mesma. Assim, evitam-se distorções excessivas.

A tensão de membrana mais flexão ( $P_L + P_b$ ) é limitada a  $S_y$ , quando ocorre a plastificação da primeira fibra. Assim, evita-se que pontos da seção plastifiquem e garante-se que se está operando em regime elástico.



Figura 2. 1 - Limites de tensões primárias



Fonte: Autor

### 2.2.2. Limite de Tensão Primária Mais Secundária

A tensão primária mais secundária ( $P + Q$ ) é limitada em duas vezes o limite de escoamento  $S_y$  ou três vezes a tensão de projeto  $S_m$ . Este limite é imposto de forma a se garantir a acomodação elástica, que seria a acomodação da estrutura sob cargas cíclicas.

A Figura 2.2 ilustra três hipóteses de carga cíclica para diferentes relações de carga aplicada com o limite de escoamento do material.

Na hipótese A, o componente é carregado continuamente até uma tensão elástica  $S_1$ , maior que  $S_y$ , e nessa hipótese, menor que  $2 \times S_y$ . Logo em seguida, com a retirada da carga, haverá uma deformação residual na estrutura. Para eliminar essa deformação inicial, onde estrutura volta a sua posição inicial ponto (C), com a mesma inclinação relacionada ao módulo de elasticidade é necessário impor uma carga de compressão residual que deverá ser 'vencida' no próximo ciclo de carregamento, que equivale à diferença de  $S_1$  e  $S_y$ :  $(E \times \varepsilon_1) - S_y$ . Ao ser carregada novamente, a tensão aplicada externamente 'vence' a tensão residual do ciclo anterior e atinge o ponto B, no valor da tensão de limite de escoamento, não havendo nova geração de deformação plástica.

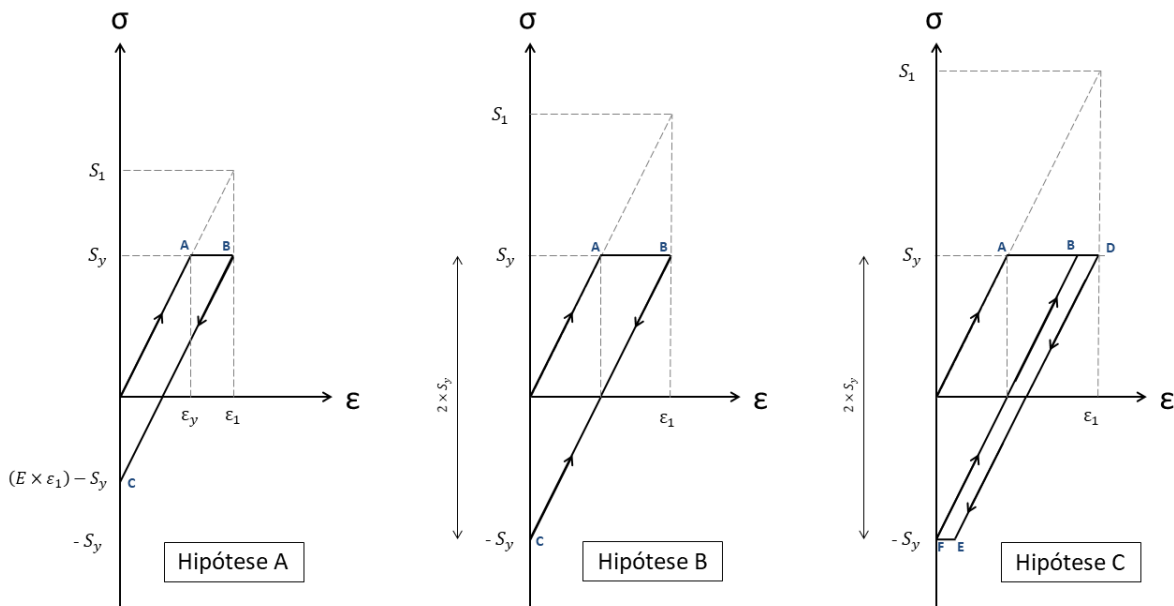
Na hipótese B, o componente é carregado continuamente até uma tensão elástica  $S_1$ , que equivale a  $2 \times S_y$ . Ao ser descarregado, a tensão residual resultante que faz a

estrutura voltar ao estado não deformado, equivale a  $S_y$  (ponto C). Assim, ciclando elasticamente entre os dois limites de escoamento de tração e compressão, garante-se que não há o acúmulo de deformação plástica, já que, exceto no primeiro ciclo, não haverá deformação plástica.

Esta condição de faixa carga, duas vezes a tensão de escoamento (ou três vezes a tensão de projeto) define o limite que um componente pode ser carregado ciclicamente, além da tensão de escoamento, que ocorrerá somente no primeiro ciclo, de forma a garantir o acomodamento elástico da estrutura e conseqüentemente evitar o acúmulo de deformações.

Uma vez que o componente é carregado a uma tensão  $S_1$ , maior que  $2 \times S_y$ , como na hipótese C, sofre a deformação plástica inicial e ao ser descarregado até o limite de escoamento a compressão  $-S_y$ , sofre outra deformação plástica e assim sucessivamente a cada ciclo, pois a carga ultrapassa o range elástico. Assim, a cada novo ciclo o componente sofre acúmulo de consecutivas deformações plásticas que podem levar o componente à falha.

Figura 2. 2 - Histórico de deformações



Fonte: Autor

Por esse motivo, o limite de tensão P+Q não é impositivo, como nos casos de tensão primária. Uma vez atingido os limites das tensões primarias, acarretam em falha na estrutura. Uma vez atingido os limites da tensão secundária, a estrutura falhará

futuramente após um determinado número de ciclos. Uma análise de fadiga deve ser realizada para a determinação dos números de ciclos que o componente poderá ser exposto.

### 2.2.3. Limites, Restrições e Comentários

A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos limites para cada classificação, o que cada restrição representa fisicamente e comentários sobre seu comportamento ao longo de uma seção.

Tabela 2. 2 - Classificação e limites de tensão

Tensão	Limite	Objetivo de evitar	Comentários
$P_m$	$S_m$	Colapso plástico	Média de SI na espessura
$P_L$	$1,5 \times S_m$		
$P_m + P_b$	$1,5 \times S_m$		
$P_L + P_b$	$1,5 \times S_m$	Acúmulo de deformação plástica	Distribuição linear de SI na espessura
$P + Q$	$3,0 \times S_m$		

Fonte: Autor

### 2.3. DERIVAÇÃO DA INTENSIDADE DE TENSÃO

O apêndice obrigatório XII do código ASME [26] traz um subcapítulo sobre a obtenção da intensidade de tensão para posteriormente realizar a classificação (item 2.1) e comparação com os limites impostos por categoria (item 2.2) de forma a se evitar os diversos modos de falha.

É fornecido no código ASME [26] um procedimento para a determinação das intensidades de tensões. Primeiramente é recomendada a escolha de um conjunto ortogonal de coordenadas como tangencial, longitudinal e axial e os nomeie como  $t$ ,  $l$  e  $r$ , respectivamente. Assim, determinam-se as componentes de tensões normais e cisalhamentos  $\sigma_t$ ,  $\sigma_l$ ,  $\sigma_r$ ,  $\tau_{lt}$ ,  $\tau_{lr}$  e  $\tau_{rt}$ . Este conjunto deve ser associado a uma ou a um conjunto de categorias ( $P_m$ ,  $P_L$ ,  $P_b$ ,  $Q$  e  $F$ ).

Com as componentes de tensões, determinam-se as tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  que, em alguns casos, coincidem com as tensões  $\sigma_t$ ,  $\sigma_l$ ,  $\sigma_r$ . As tensões principais são

subtraídas em pares, como na Equação 2.1, Equação 2.2 e Equação 2.3, assim a intensidade de tensão consiste no maior valor entre  $S_{12}$ ,  $S_{23}$  e  $S_{31}$ .

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (2.1)$$

$$S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3 \quad (2.2)$$

$$S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (2.3)$$

Com a intensidade de tensão, compara-se ao limite referente a sua categoria, definida anteriormente.

Porém, tal comparação só pode ser realizada diretamente em análises onde resultam em tensões em formato de membrana e flexão, onde a intensidade de tensão média (de membrana) é comparada aos limites impostos para  $P_m$  ou  $P_L$  e a intensidade de tensão linear (membrana + flexão) é comparada aos limites impostos para  $P_m + P_b$ ,  $P_L + P_b$  ou  $P + Q$ .

Para análises realizadas com elemento finitos de casca, o procedimento é intuitivo e não há grandes problemas para a obtenção das tensões e comparações com os limites do código. Entretanto, elementos finitos sólidos são preferíveis por serem mais fácil modelar sua geometria importada de modelos sólidos e permitirem maiores detalhes na geometria, como detalhes construtivos, que não são tão triviais de se simular com elementos de casca.

Então, ao realizar simulações com elementos finitos sólidos, torna-se necessária a realização de um procedimento chamado linearização de tensões que tem como objetivo converter as tensões ao longo da espessura, obtidas em vários nós e distribuição não linear, em parcelas de tensão de membrana e flexão.

O código ASME para componentes nucleares [4] bem como seu apêndice [26] não dispõe de procedimentos ou recomendações sobre como realizar a linearização de tensões. Porém, a seção VIII, Divisão 2 do código ASME [14], com regras alternativas para vasos de pressão não nucleares, apresenta o “Anexo 5-a: linearização de resultados de tensões para a classificação” com recomendação de métodos para a linearização de tensão, bem como a escolha das linhas de classificação de tensões (SCL – sigla em inglês para “stress classification line”).

### 3. METODOLOGIA

O código ASME [4] descreve como requisito de aceitabilidade que, no projeto por análise, os valores de intensidade de tensão definida com o critério de Tresca, não devem exceder os limites de tensão admissíveis aplicáveis. Ou seja, os valores da intensidade de tensão, para cada categoria, não devem ultrapassar seus respectivos limites impostos.

Todavia, a seção III do código ASME [4], específica para componentes nucleares, não define ou recomenda nenhum procedimento para a linearização das tensões.

No entanto, na seção VIII, Divisão 2 [14] que indica regras alternativas, também, para o projeto por análise, para vasos de pressão não nucleares são encontradas algumas recomendações. Essas recomendações são referentes a escolha de SCL e apresentam três métodos distintos para a realização da linearização de tensões, ou seja, transformação das tensões normais e cisalhantes em cada ponto ao longo da espessura (dentro de uma SCL) em parcelas de tensão de membrana, flexão e pico para a posterior comparação com os limites impostos.

#### 3.1. SELEÇÃO DE UMA LINHA DE CLASSIFICAÇÃO DE TENSÕES (SCL)

Linhas de classificação de tensão (SCL – stress classification line, em inglês) são os caminhos escolhidos pelo analista para linearizar e separar a distribuição de tensões real obtida em parcelas de tensão de membrana e flexão equivalentes para posterior comparação aos limites impostos pela ASME os quais também estão em parcelas de membrana e flexão.

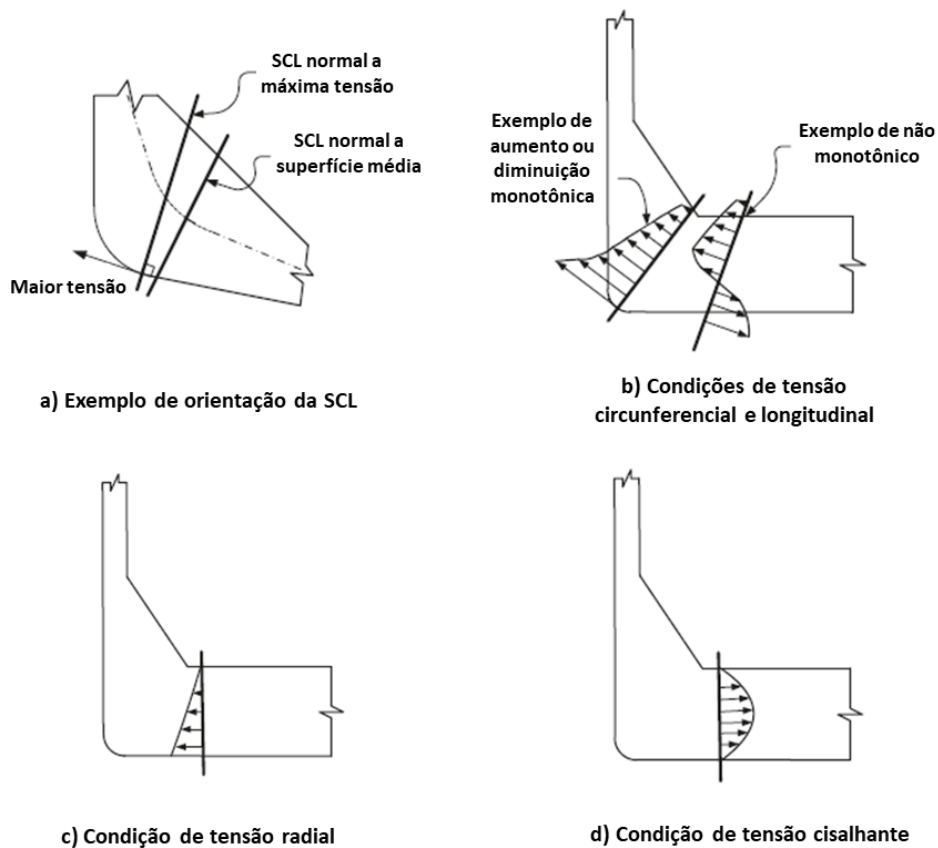
Para avaliar tensões relacionadas com os modos de falha de colapso plástico e acúmulo de deformação plástica sob carregamento cíclico, a recomendação encontrada no Anexo 5-A.3 (a) do código ASME seção VIII [14] é de que a SCL esteja localizada em regiões de descontinuidades estruturais grandes. O código ASME define uma região de descontinuidade estrutural grande como “fonte de intensificações de tensões ou deslocamentos que afeta uma porção relativamente grande da estrutura e tem um efeito significativo na tensão e deformação geral da estrutura como um todo”. Alguns exemplos de descontinuidade estrutural grande são junções de vasos, bocais, diâmetros diferentes de vasos (onde apresentam mudanças de geometria e espessura) e etc.

Para a avaliação de falhas localizadas e fadiga, as recomendações apontam que as SCLs devem estar posicionadas em descontinuidades estruturais localizadas. Estas são definidas pela ASME como “fonte de intensificação de tensão ou deslocamento a qual afeta uma região de volume relativamente pequeno e não tem efeito significativo na tensão e deslocamento da estrutura como um todo”. Como exemplos, citam-se filetes de raios pequenos ou soldas de penetração parcial.

Em adição, uma SCL deve seguir uma série de condições que levam em conta o comportamento das tensões, de forma a serem classificadas como seções válidas e não produzirem resultados ambíguos. Essas são:

- a) Orientação: uma SCL deve ser alocada de forma a ficar normal com a maior tensão. Como isso pode ser difícil de implementar, ela pode ser orientada de forma a ficar normal a superfície média de uma seção. (ver figura 3.1 (a)).
- b) Tensão circunferencial e longitudinal: devem aumentar ou diminuir monotonamente, com a exceção dos efeitos de concentração das tensões de pico ou térmicas. (ver Figura 3.1 (b)).
- c) Tensão radial: deve aumentar ou diminuir monotonamente, porém com valores menores dos que os encontrados nas tensões circunferencial e longitudinal (ver Figura 3.1 (c)).
- d) Tensão cisalhante: deve apresentar forma parabólica e/ou apresentar valores baixos quando comparados a tensões de circunferencial e longitudinal (ver Figura 3.1 (d)). Se a SCL não for normal à superfície interna ou externa, a distribuição pode não ser parabólica. Porém, a condição é satisfeita se os valores de tensão forem baixos. Se a distribuição for linear, o valor de tensão cisalhante é significativo.

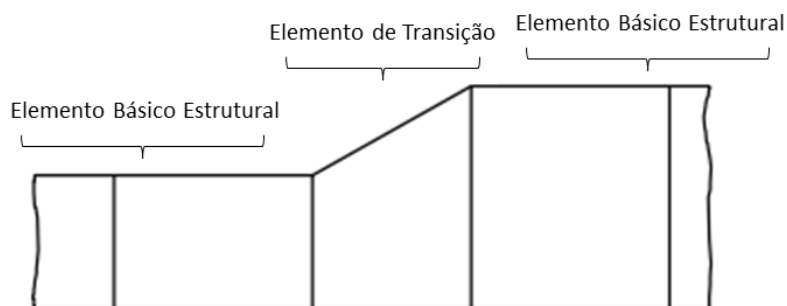
Figura 3. 1 - Condições de validade de uma SCL



Fonte: [14], modificado

No WRC 427 [12] encontram-se recomendações similares para a alocação de SCLs. Entretanto, utilizam-se termos como elementos básicos estruturais e elementos de transição para as recomendações. A Figura 3.2 ilustra a diferença de elementos estruturais e elementos de transição.

Figura 3. 2 - Elementos básicos estruturais e de transição



Fonte:[13], modificado

### 3.2. MÉTODOS DE LINEARIZAÇÃO DE TENSÃO

Embora o código ASME seção III [1] (para componentes nucleares) não apresente métodos para realizar a linearização de tensão, necessária para transformar as tensões nodais obtidas em análises com elementos finitos sólidos tridimensionais em parcelas de membrana e flexão para serem comparadas com os limites impostos pelo código, a seção VIII, Divisão 2 da ASME [14] (para vasos de pressão não nucleares) apresenta três métodos para realizar a linearização de tensão. São eles: método de integração de tensão, método de tensão estrutural baseado em forças nodais e método de tensão estrutural baseado na integração de tensão.

Vale comentar que os critérios de plastificação utilizados nos códigos são distintos. O código ASME seção III [4] que trata de componentes nucleares utiliza o critério de plastificação de Tresca. A seção VIII, divisão 2 do código [14] utiliza o critério de plastificação de von-Mises. Essa diferença não tem nenhum impacto nos aspectos dos métodos de linearização de tensões.

Sendo assim, serão utilizados os métodos de linearização da seção VIII, Divisão 2 [14] aplicados para a obtenção das parcelas de tensão de membrana, flexão e pico, numa seção ou SCL, porem serão aplicados os limites conforme a seção III [1].

É importante ressaltar que os métodos de linearização e suas respectivas equações para aplicação, mostrados a seguir, são retirados do Anexo 5-A do código ASME, seção VIII, Divisão 2 [14].

#### 3.2.1. Métodos de Integração de Tensão

O propósito do método é a obtenção das parcelas de tensão de membrana, flexão e pico através da distribuição total de tensão em pontos da SCL escolhida a partir da integração dos componentes de tensão ao longo dela.

O tensor de tensão de membrana é calculado pela média de cada componente de tensão ao longo dos pontos da SCL escolhida, utilizando a Equação 3.1.

$$\sigma_{ij,m} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_{ij} dx \quad (3.1)$$



O tensor de tensão de flexão é calculado através da Equação 3.2. Este varia de forma linear ao longo da SCL selecionada.

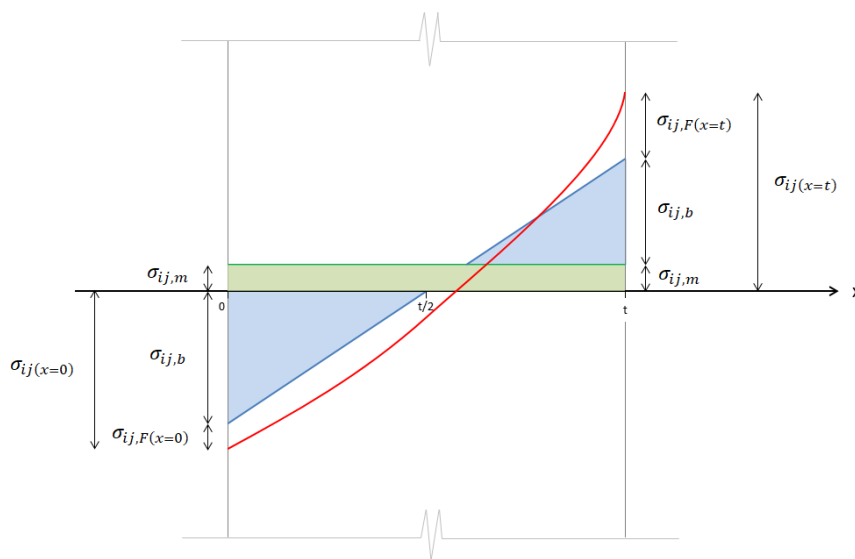
$$\sigma_{ij,b} = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma_{ij} \left( \frac{t}{2} - x \right) dx \quad (3.2)$$

O tensor de pico é calculado pela Equação 3.3 e Equação 3.4 nas extremidades das SCL. Esse consiste na diferença da tensão total e da soma da tensão de membrana e flexão, como ilustrado na Figura 3.3.

$$\sigma_{ij,F(x=0)} = \sigma_{ij(x=0)} - (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b}) \quad (3.3)$$

$$\sigma_{ij,F(x=t)} = \sigma_{ij(x=t)} - (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b}) \quad (3.4)$$

Figura 3.3 - Componentes linearizados



Fonte: Autor

### 3.2.2. Métodos de Tensão Estrutural Baseado em Forças Nodais

O método consiste em uma abordagem insensível à malha o qual tem o objetivo de se obter tensão em parcelas de membrana e flexão a partir de forças nodais. O método apresenta boa correlação para a análise de fadiga de juntas soldadas [14], [28] e pode ser utilizado diretamente.

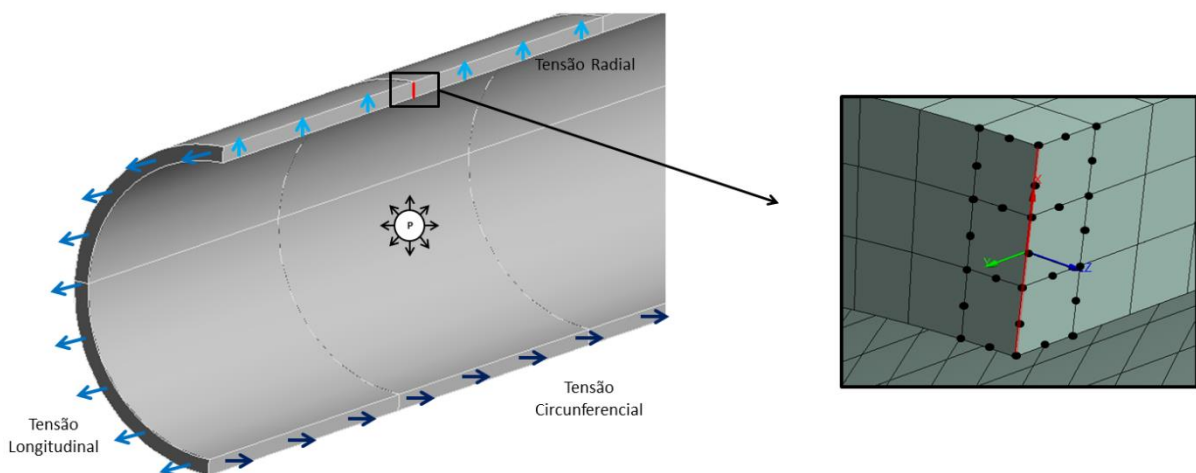
Embora a tensão seja calculada sobre uma SCL, o método utiliza forças nodais ao redor da SCL. Para isso, é necessário definir um plano a qual as forças serão extraídas. Este plano seria um plano de fratura hipotético, caso o componente viesse a falhar. Para determinar esse plano é necessário conhecimento do projetista sobre o componente e cargas aplicadas nele e nos modelos 3D alguns cuidados devem ser tomados.

Para modelos 3D, a força nodal utilizada no método não se restringe unicamente aos nós pertencentes à SCL. As forças nodais ao longo da face do elemento, referente ao plano de fratura hipotético, são utilizadas. De acordo com [14], é necessário que os elementos sejam de elementos de segunda ordem, com 20 nós por elemento, uma vez que as respostas em nós intermediários são utilizados para o cálculo de tensão.

A pré-avaliação do modelo é necessária de forma a identificar o possível plano de fratura hipotético no qual as forças nodais serão calculadas. Como exemplo, se tem na Figura 3.4 um cilindro pressurizado e suas tensões circunferencial, longitudinal e radial indicadas. Cria-se pela espessura do cilindro uma SCL a qual atende aos requerimentos de validade. Note que para esta SCL há dois possíveis planos para obter as forças nodais: no plano xz e plano xy.

Sabe-se que a tensão circunferencial em um cilindro submetido apenas à pressão interna e longe de descontinuidades, como no local analisado, é duas vezes maior que a longitudinal e que a radial assume valores pequenos. Assim, o plano de fratura hipotético é o plano xy, plano onde a maior tensão atua.

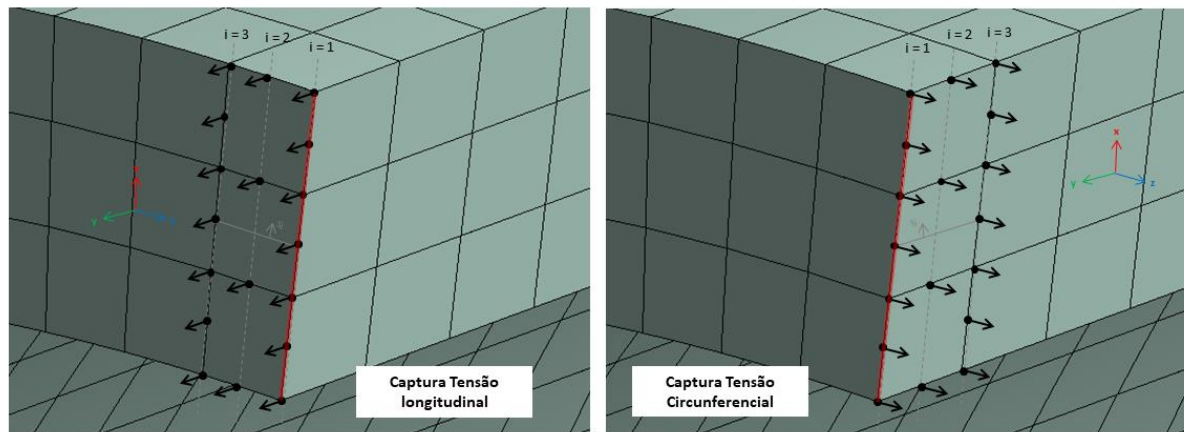
Figura 3. 4 - Exemplo cilíndrico



Fonte: Autor

Como visto na Figura 3.5, a tensão circunferencial se encontra na direção z. Assim, o plano de fratura no qual a maior tensão atua seria o plano xy e conseqüentemente o plano do qual as forças nodais são extraídas e utilizadas para o cálculo das tensões de membrana e flexão.

Figura 3.5 - Possíveis faces a serem analisadas



Fonte: Autor

Com o plano de orientação corretamente escolhido, as parcelas das tensões de membrana e flexão são calculadas através da Equação 3.7 e Equação 3.8, respectivamente.

$$\sigma_{mi} = \frac{f_i}{t} \tag{3.7}$$

$$\sigma_{bi} = \frac{6 \times m_i}{t^2} \tag{3.8}$$

Onde  $f_i$  representa a força na linha na posição  $i=1$  (na mesma posição que a SCL),  $i=2$  (no centro do elemento) e  $i=3$  (outra extremidade do elemento). As posições  $i=1$ ,  $i=2$  e  $i=3$  são ilustradas na Figura 3.5. As forças em cada linha são calculadas através da Equação 3.9, Equação 3.10 e Equação 3.11 e  $w$  corresponde a largura do elemento sólido finito.

$$f_1 = \frac{3 \times [(6 \times F_1) + (2 \times F_3) - F_2]}{2 \times w} \tag{3.9}$$

$$f_2 = \frac{-3 \times [(2 \times F_1) + (2 \times F_3) - (3 \times F_2)]}{4 \times w} \tag{3.10}$$

$$f_3 = \frac{3 \times [(2 \times F_1) + (6 \times F_3) - F_2]}{2 \times w} \quad (3.11)$$

As forças  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  são resultantes de forças nodais através da espessura do elemento ao longo do comprimento  $w$  (ver Equação 3.12, onde  $j$  é relacionado à direção da espessura), ou seja, a soma das forças nas posições  $i=1$ ,  $i=2$  e  $i=3$ .

$$F_i = \sum N F_{ij} \quad (3.12)$$

Na Equação 3.8,  $m_i$  representa o momento em linha na posição  $i=1$  (na mesma posição que a SCL),  $i=2$  (ao centro do elemento) e  $i=3$  (outra extremidade do elemento). Os momentos em linha são calculados através da Equação 3.13, 3.14 e 3.15.

$$m_1 = \frac{3 \times [(6 \times M_1) + (2 \times M_3) - M_2]}{2 \times w} \quad (3.13)$$

$$m_2 = \frac{-3 \times [(2 \times M_1) + (2 \times M_3) - (3 \times M_2)]}{4 \times w} \quad (3.14)$$

$$m_3 = \frac{3 \times [(2 \times M_1) + (6 \times M_3) - M_2]}{2 \times w} \quad (3.15)$$

Os momentos  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$  são resultantes de forças nodais através da espessura média  $S_j$  ao longo do comprimento  $w$  (ver Equação 3.16, onde  $j$  é relacionado à direção da espessura).

$$M_i = \sum N F_{ij} \times S_j \quad (3.16)$$

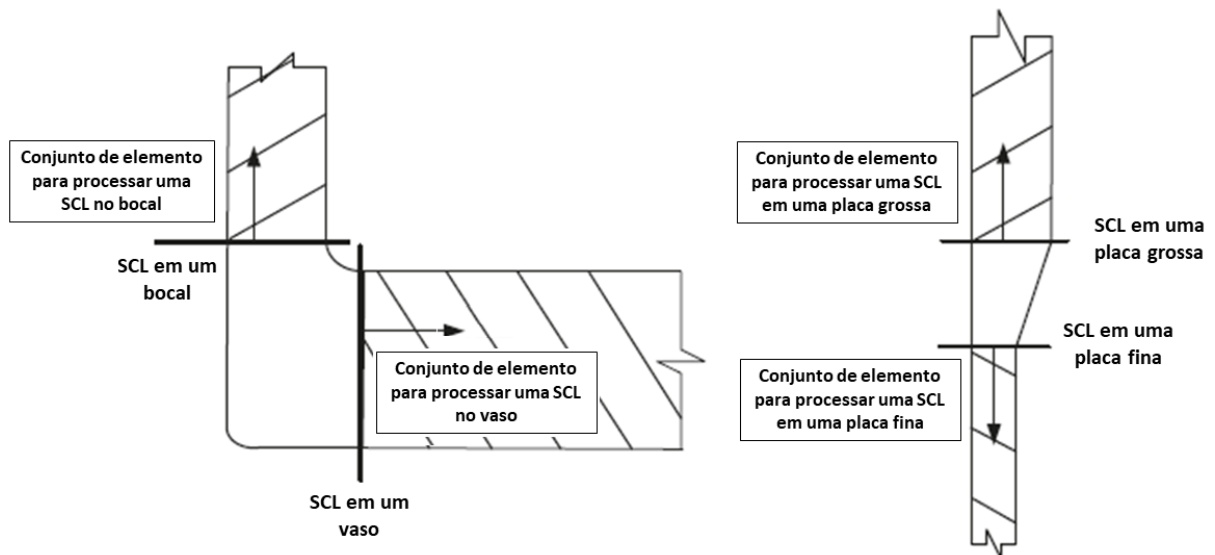
### 3.2.3. Métodos de Tensão Estrutural Baseado na Integração de Tensão

O método de tensão estrutural baseado na integração de tensão é equivalente ao método de integração de tensão, porém restringe o conjunto de elementos que podem conter uma SCL. O código ASME [14] ilustra na Figura 3.6 o conjunto de elementos nos quais, neste método, SCL podem ser alocadas.

Nota-se que este método é uma aplicação particularizada do método de integração de tensão que utiliza os conceitos de elemento estrutural e de transição discutidos em

[12]. O código ASME, seção VIII [14], recomenda este método para a linearização a menos que outro método apresente uma melhor precisão para os carregamentos e componentes dados.

Figura 3. 6 - Conjunto de elementos



Fonte: [14], modificado

A vantagem deste método, assim como o primeiro, é que a maioria dos softwares comerciais apresenta a ferramenta de linearização de tensões o que simplifica a aplicação dos mesmos. É necessário apenas estabelecer o caminho (a SCL) através de dois pontos, escolher a tensão a ser linearizada (incluindo operações entre tensões, como por exemplo, a intensidade de tensão que é a diferença das tensões principais máximas e mínimas) e as tensões são automaticamente fornecidas em parcelas de membrana, flexão, pico e total.

Além disso, não há a necessidade da SCL estar na extremidade ou centro dos elementos, como no método baseado em forças nodais. O software interpola os resultados de forma que isto facilite o estabelecimento da SCL e da malha.

### 3.3. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Com o objetivo de estabelecer a melhor metodologia para realizar a linearização das tensões, os métodos mencionados no item acima (3.2) são aplicados em duas geometrias distintas: um cilindro pressurizado onde a tensão de membrana predomina e

uma placa plana circular pressurizada em uma das faces onde há puramente tensão de flexão.

É válido ressaltar que se utiliza o software de elementos finitos ANSYS [5] em todas as análises da presente dissertação.

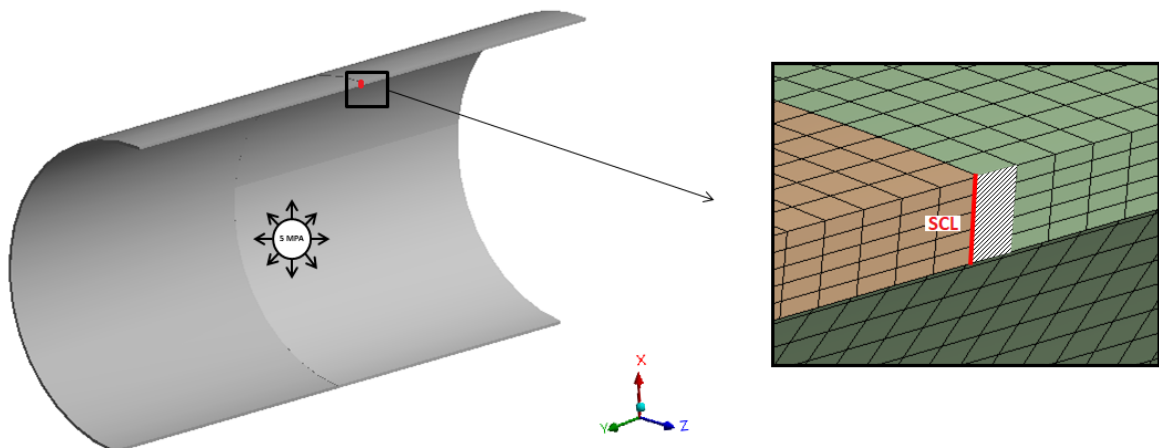
### 3.3.1. Cilindro Pressurizado

Para verificar a aplicabilidade dos métodos em caso onde a tensão de membrana prevalece, um cilindro pressurizado é analisado. O cilindro possui o comprimento de 1000mm, raio externo de 250mm e espessura de 5mm. O carregamento consiste em pressão interna de 5 MPa e seu respectivo carregamento de fechamento ('end-load').

Para a validação do modelo de elementos finitos, a tensão circunferencial média, definida pela teoria das cascas (Equação 3.17), é comparada com a tensão circunferencial de membrana calculada pelo software. O modelo de elementos finitos é apresentado na Figura 3.7.

$$\sigma_m = \frac{P \times R_m}{t} \quad (3.17)$$

Figura 3.7 - Conjunto de elemento utilizados para simulação



Fonte: Autor

A tensão circunferencial definida pela teoria das cascas, na Equação 3.17, para este caso é de 247,5 MPa. A tensão obtida pela simulação, utilizando uma configuração de malha de cinco elementos de interpolação quadrática pela espessura e de 2,5mm nas

demais direções, foi de 245,01 MPa. A diferença entre resultados é de 1%, o que valida a simulação. Opta-se por uma malha de cinco elementos na espessura de forma a se ter uma melhor precisão, considerando a indicação de [29], que informa que o mínimo para uma boa resposta em modelagens em elementos finitos sólidos com 20 nós são 3 elementos pela espessura.

É válido ressaltar que toda a simulação da presente dissertação realizada com elementos finitos tridimensionais utiliza-se o elemento SOLID186. O elemento SOLID186 é um elemento sólido estrutural da biblioteca do ANSYS [5] de interpolação quadrática, ou seja, constituído de 20 nós por elemento: um nó em cada extremidade do elemento e um nó intermediário entre eles. A vantagem deste elemento é a maior precisão, quando comparado a um elemento tridimensional de ordem linear (de oito nós por elemento, uma em cada extremidade).

Sendo assim, uma SCL é criada no centro do cilindro, a uma distância de decaimento de  $2,5 \times \sqrt{R_m \times t}$  das extremidades, onde condições de contorno são aplicadas, conforme ilustre na Figura 3.7. A SCL é criada na extremidade dos elementos e usa a contribuição nodal das faces hachuradas.

Quanto as condições de contorno, aplica-se a tensão de fechamento em uma das extremidades, proporcional a pressão aplicada, e restrição circunferencial e longitudinal na outra extremidade.

A Tabela 3.1 apresenta as tensões linearizadas normais aos eixos. Estas foram linearizadas com o método de integração de tensão, uma vez que esse possibilita a escolha da tensão que será linearizada.

Nota-se que as tensões normais aos eixos são as principais e com elas pode-se calcular a intensidade de tensão, provinda do critério de falha de Tresca, a diferença entre as tensões máxima e mínima conforme é proposto pela Seção III do código ASME. As tensões de membrana e flexão obtidas pelo método de tensão estrutural baseado em forças nodais são calculadas com as Equações 3.7 e 3.8. A Tabela 3.2 traz o cálculo das forças e momentos nodais resultantes, que serão utilizadas nas equações mencionadas.

Tabela 3. 1 - Tensões normais e principais linearizadas

Componente	Tensão Linearizada: Método Integração de Tensão (MPa)					
	Tensão Normal (X)	Tensão Normal (Y)	Tensão Normal (Z)	Máximo Princial	Média Principal	Mínimo Principal
<b>M</b>	-2.48	121.26	245.01	245.01	121.26	-2.48
<b>Bi</b>	-2.50	0.00	2.50	2.50	0.00	-2.48
<b>Bo</b>	2.50	0.00	-2.50	2.50	0.00	-2.48
<b>M + Bi</b>	-4.98	121.26	247.50	247.50	121.26	-4.98
<b>M + Bo</b>	0.02	121.26	242.51	242.51	121.26	0.02

Fonte: Autor

Tabela 3. 2 - Forças e momentos resultantes

Elemento	i=1					i=2					i=3				
	Nó	F (N)	F (N)	Sj (mm)	M (N.mm)	Nó	F (N)	F (N)	Sj (mm)	M (N.mm)	Nó	F (N)	F (N)	Sj (mm)	M (N.mm)
<b>624156</b>	998309	50.661	50.661	2.5	126.6525	4747059	-202.38	-202.38	2.5	-505.95	997501	50.661	50.661	2.5	126.653
	4748679	-202.51	-202.51	2	-405.02	-	-	-	2	-	4743465	-202.51	-202.51	2	-405.02
	998310	50.377	101.46	1.5	152.19	4743466	-203.07	-405.84	1.5	-608.76	995905	50.59	101.46	1.5	152.19
<b>686556</b>	998310	51.083			0	4743466	-202.77			0	995905	50.87			0
	4748676	-203.33	-203.33	1	-203.33	-	-	-	1	-	4743463	-203.33	-203.33	1	-203.33
	998308	50.577	101.871	0.5	50.9355	4743469	-203.88	-407.48	0.5	-203.74	995906	50.791	101.872	0.5	50.936
<b>748956</b>	998308	51.294			0	4743469	-203.6			0	995906	51.081			0
	4748673	-204.16	-204.16	0	0	-	-	-	0	-	4743467	-204.16	-204.16	0	0
	998307	50.781	102.289	-0.5	-51.1445	4743472	-204.7	-409.15	-0.5	204.575	995907	50.994	102.502	-0.5	-51.251
<b>811356</b>	998307	51.508			0	4743472	-204.45			0	995907	51.508			0
	4748670	-204.99	-204.99	-1	204.99	-	-	-	-1	-	4743470	-204.99	-204.99	-1	204.99
	998306	50.986	102.71	-1.5	-154.065	4743475	-205.53	-410.83	-1.5	616.245	995908	51.2	102.71	-1.5	-154.07
<b>873756</b>	998306	51.724			0	4743475	-205.3			0	995908	51.51			0
	4748667	-205.84	-205.84	-2	411.68	-		0	-2	0	4743474	-205.84	-205.84	-2	411.68
	998305	51.407	51.407	-2.5	-128.518	4748665	-205.95	-205.95	-2.5	514.875	998304	51.408	51.408	-2.5	-128.52
	<b>F1=</b>	-510.43	<b>M1=</b>	4.37		<b>F2=</b>	-2041.6	<b>M2=</b>	17.245		<b>F3=</b>	-510.22	<b>M3=</b>	4.26	

Fonte: Autor



A Tabela 3.3 apresenta a comparação das tensões linearizadas com ambos os métodos e as diferenças são pequenas para ambos quando comparados com valores teóricos. Para a tensão de membrana, que é a predominante no modelo, o método que mais se aproximou a valores teóricos foi o método da integração de tensão. Para a tensão de membrana mais flexão, para este método, a diferença foi cerca de 2% conservadoramente.

Tabela 3.3 - Comparação das tensões linearizadas

Componente	Teoria das Cascas (MPa)	Método Integração de Tensão, SI (MPa)	Diferença (%)	Método Força Nodal (MPa)	Diferença (%)
<b>M</b>	247.50	247.49	0.00	244.97	1.02
<b>B</b>	0.00	5.00	-	2.52	-
<b>M + B</b>	247.50	252.48	-2.01	247.49	0.00

Fonte: Autor

### 3.3.2. Placa Circular Pressurizada

De forma análoga ao item 3.3.3.1., os métodos são aplicados a um caso de placa circular pressurizada em uma das faces, na qual a tensão tenha um caráter puramente de flexão. A placa aqui estudada possui o diâmetro de 500 mm e espessura de 5 mm. Na simulação, a face interna é pressurizada a 0,2 MPa e nas faces laterais, em  $r=250\text{mm}$ , os nós são fixados nas três direções (x, y e z) por a espessura ao redor do perímetro de toda a placa, simulando um engaste da placa.

Para validação do modelo em elemento finito e posterior Comparação, a Equação 3.18 [30] é usada para calcular o momento fletor máximo, que ocorre no centro da placa.

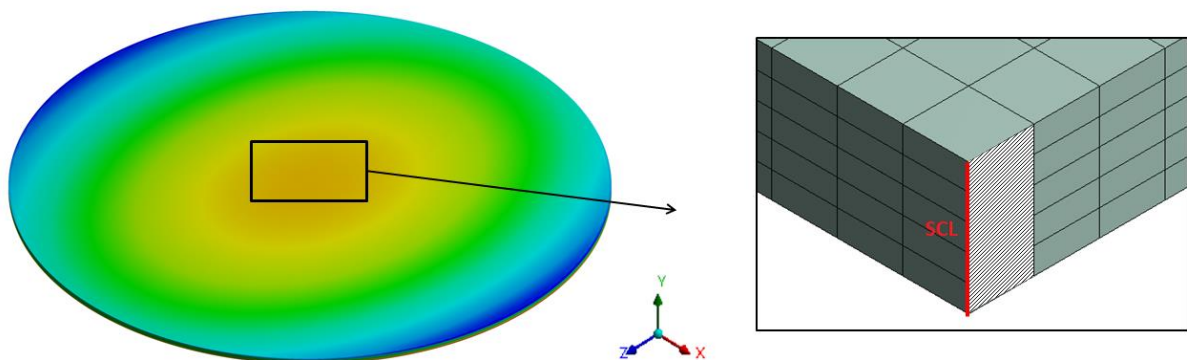
$$M_c = \frac{q \times a^2 \times (1-\nu)}{16} \quad (3.18)$$

Onde 'q' equivale ao carregamento uniformemente distribuído de 0,2 MPa, 'a' ao raio da placa (250 mm) e 'ν' ao módulo de Poisson que vale 0,3. Com o momento de 1.015,625 N para as condições informadas. Assim, calcula-se a tensão no centro através da Equação 3.19 [30]. Assim, chega-se a uma tensão de flexão máxima teórica no centro de 243,75 MPa.

$$\sigma_c = \frac{6 \times M_c}{t^2} \quad (3.19)$$

A simulação dispõe de elementos quadráticos de 2,5 mm (dimensão do plano da placa) e cinco elementos pela espessura, como na simulação do cilindro pressurizado. A Figura 3.8 ilustra o comportamento da tensão normal no eixo x (ou z, uma vez que são simétricos), a SCL traçada no centro da placa, a malha usada na simulação e a face de contribuição de força nodal.

Figura 3. 8- SCL, malha e distribuição da tensão normal ao eixo x



Fonte: Autor

A Tabela 3.4 é composta das tensões linearizadas, através do método de integração de tensão, nos eixos x, y e z, as quais correspondem às tensões principais.

Sendo assim, as componentes de tensão são calculadas pelo método de tensão estrutural baseado em força nodal. A Tabela 3.5 traz o cálculo das forças e momentos resultantes para obtenção das parcelas de tensões.

Finalmente, com as tensões calculadas com ambos os métodos são comparadas entre si, na Tabela 3.6. A tensão de membrana é desprezível e as tensões de flexão obtidas com ambos métodos chegam a valores muito próximos ao valor teórico.

Ao comparar com a tensão de flexão da teoria de 243,75 MPa, nota-se que ambos valores apresentam valores semelhantes. A diferença é de 0,11% e 0,03% para os métodos de integração de tensão e de força nodal, respectivamente.

Tabela 3. 4 - Tensões normais e principais linearizadas

Componente	Tensão Linearizada: Método Integração de Tensão (MPa)					
	Tensão Normal (X)	Tensão Normal (Y)	Tensão Normal (Z)	Máximo Princial	Média Principal	Mínimo Principal
<b>M</b>	-0.04	-0.10	-0.04	-0.04	-0.04	-0.10
<b>Bi</b>	-243.58	-0.12	-243.58	-0.12	-243.58	-243.58
<b>Bo</b>	243.58	0.12	243.58	243.58	243.58	0.12
<b>M + Bi</b>	-243.62	-0.22	-243.62	-0.22	-243.62	-243.62
<b>M + Bo</b>	243.53	0.02	243.53	243.53	243.53	0.02

Fonte: Autor

Tabela 3. 5 - Forças e momentos resultantes

Elemento	i=1					i=2					i=3				
	Nó	F (N)	F (N)	Sj (mm)	M (N.mm)	Nó	F (N)	F (N)	Sj (mm)	M (N.mm)	Nó	F (N)	F (N)	Sj (mm)	M (N.mm)
<b>40396</b>	177032	37.2144	37.2144	2.5	93.036	715968	-175.94	-175.94	2.5	-439.86	177031	37.2196	37.2196	2.5	93.049
	715972	-162.41	-162.41	2	-324.816	-	-	-	2	-	715969	-162.4	-162.4	2	-324.808
	194400	43.968	60.8936	1.5	91.3404	750784	-148.83	-243.57	1.5	-365.358	194396	43.972	60.9004	1.5	91.3506
<b>40397</b>	194400	16.9256			0	750784	-94.744			0	194396	16.9284			0
	750793	-81.176	-81.176	1	-81.176	-	-	-	1	-	750684	-81.176	-81.176	1	-81.176
	194399	23.6524	20.2846	0.5	10.14232	750685	-67.588	-81.137	0.5	-40.5684	194297	23.6544	20.2871	0.5	10.14356
<b>40398</b>	194399	-3.3678			0	750685	-13.549			0	194297	-3.3673			0
	750789	0.03561	0.03561	0	0	-	-	-	0	-	750486	0.03561	0.03561	0	0
	194398	3.34996	-20.32	-0.5	10.16002	750487	13.62	81.28	-0.5	-40.64	194198	3.34948	-20.323	-0.5	10.16126
<b>40399</b>	194398	-23.67			0	750487	67.66			0	194198	-23.672			0
	750785	81.248	81.248	-1	-81.248	-	-	-	-1	-	750288	81.248	81.248	-1	-81.248
	194397	-16.943	-60.931	-1.5	91.3968	750289	94.816	243.716	-1.5	-365.574	194099	-16.946	-60.938	-1.5	91.4076
<b>40400</b>	194397	-43.988			0	750289	148.9			0	194099	-43.992			0
	699010	162.476	162.476	-2	-324.952	-	-	-	-2	0	698610	162.476	162.476	-2	-324.952
	168693	-37.232	-37.232	-2.5	93.08	698609	176.016	176.016	-2.5	-440.04	168494	-37.238	-37.238	-2.5	93.094
	F1=	0.09	M1=	-423.04		F2=	0.3592	M2=	-1692.04		F3=	0.09	M3=	-422.98	

Fonte: Autor

Tabela 3. 6 - Comparação das tensões linearizadas

Componente	Teoria das Cascas (MPa)	Método Integração de Tensão, SI (MPa)	Diferença (%)	Método Força Nodal (MPa)	Diferença (%)
<b>M</b>	0.00	0.06	-	0.04	-
<b>B</b>	243.75	243.46	0.12	243.67	0.03
<b>M + B</b>	243.75	243.51	0.10	243.71	0.02

Fonte: Autor

### 3.3.3. Conclusões e Observações

Os casos estudados nos itens 3.3.1 e 3.3.2 tem como objetivo avaliar qual é o melhor método dentre os sugeridos pela ASME para seguir o estudo.

Para o caso de cilindro pressurizado, onde a tensão é puramente membrana, as tensões obtidas pelos métodos de [14] obtiveram uma boa aderência com a teoria. O método de integração de tensão forneceu o mesmo valor da teoria e o baseado em forças nodais obteve uma diferença 1% menor. A tensão de flexão obtida em ambos os casos não foram zero, mas são valores desprezíveis quando comparados com o valor da tensão de membrana.

No caso da placa circular, onde a tensão é puramente de flexão, ambos os métodos obtiveram boa aderência (menos de 0,2%) quando comparados com o resultado proveniente da teoria. A tensão de membrana obtida com os métodos foram praticamente zero, o que condiz com o comportamento da estrutura estudada.

É importante ressaltar que o método baseado em forças nodais captura a tensão com base nos nós selecionados e sua face de contribuição. Ou seja, para aplicá-lo corretamente se faz necessário um conhecimento prévio do comportamento da tensão na estrutura. Há também a necessidade de, nesse método, se gerar a malha de acordo com o local onde se aloca a SCL. A alocação da SCL, neste método, depende da posição dos elementos finitos sólidos e de seus nós.

Outra consideração importante que deve ser levada em conta para a escolha é como se realiza o procedimento com o software disponível. No software ANSYS [2], para a aplicação do método baseado em força nodal é necessária a migração da simulação para a interface APDL, uma vez que a interface do workbench static structural não disponibiliza a resposta de força nodal. Uma vez dentro da interface APDL, se faz necessária a identificação dos elementos e nós de interesse e a criação de uma planilha de cálculos para

se calcular as tensões em parcela de membrana e flexão, o que torna o procedimento mais trabalhoso e demanda maior tempo de processamento.

O software ANSYS [2] realiza o método da integração de tensão de forma direta. Ao selecionar um caminho, o software automaticamente lineariza qualquer das seis componentes de tensões, tensões principais e até faz operações entre tensões (intensidade de tensão de Tresca e tensão equivalente de von-Mises). Além de ser um procedimento mais simples, há a vantagem de se poder criar uma SCL em qualquer local, sem estar limitada a disposição dos elementos. Basta selecionar dois pontos nas superfícies e a SCL é criada, sem a necessidade de haver nós no caminho, e o software interpola as tensões de forma a obter dados em 49 pontos ao longo do caminho criado. Com estes dados, ele fornece em segundos (considerando uma análise elástica) as tensões de membrana, flexão, membrana mais flexão, pico e total no caminho com a interpolação de 49 pontos.

Considerando todas as questões aqui levantadas, opta-se pelo método recomendado pela própria ASME [14] para o prosseguimento das análises: o método de tensão estrutural baseado em integração de tensão.

## 4. CASOS DE ESTUDO INICIAIS

Nessa seção serão apresentados casos de estudo iniciais para entendimento dos conceitos do Projeto por Análise de [4],[26] e para avaliações de tensões de modelos com elementos finitos sólidos com linearização de tensões.

Foram utilizadas três referências básica que forneceram os casos de estudo: boletim WRC 297[31], o boletim WRC 429[12], a seção VIII do código ASME, divisão 2, manual de exemplos de problema (ou PTB – 3) [27] e os benchmarks da Word Nuclear Association [24], [25].

São avaliados, então, estes casos de vasos de pressão e bocais, onde se discute a aplicação de fórmulas para a obtenção de tensões causadas por cargas em bocais, a aplicabilidade e a validade das SCL, bem como a categorização das tensões, respectivamente.

Para efeito de comparação dos resultados obtidos com os da referência, serão utilizados os mesmos sistemas de unidades utilizados em [12], [27], [24] e [25], em cada caso.

### 4.1. WRC 429: GUIA PARA A APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE TENSÕES 3D

O boletim WRC 429[12] foi desenvolvido em 1998 para auxiliar projetistas a transformar as tensões obtidas através de uma análise de elementos finitos com elementos sólidos bi ou tridimensionais em parcelas de membrana e flexão. Nele são discutidas a aplicabilidade e validade de SCL.

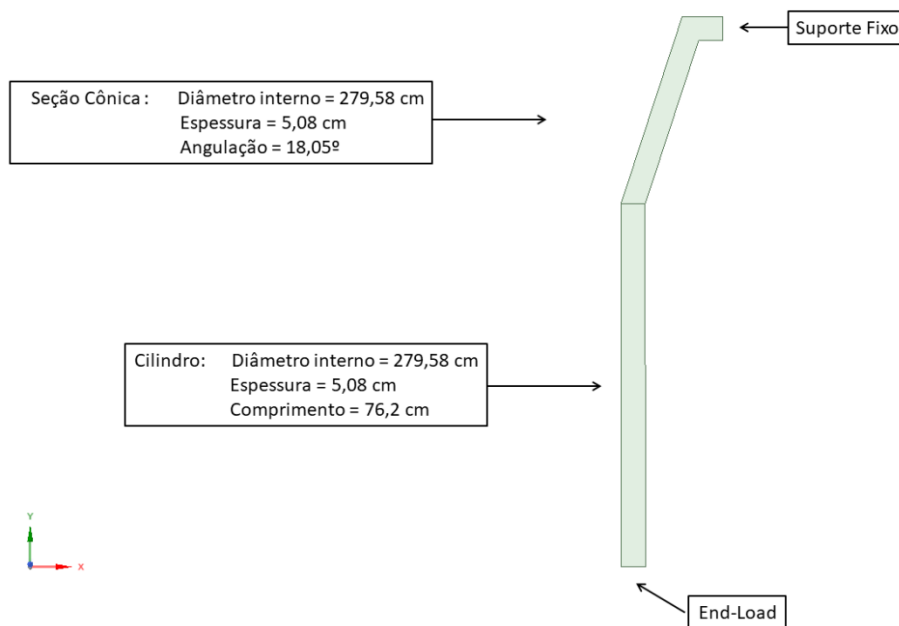
Aqui são separados quatro casos, sendo um caso axissimétrico (bidimensional) e três casos de conexão vasos de pressão/ bocais para reprodução dos resultados com o método de linearização escolhido anteriormente.

#### 4.1.1. Cone-cilindro com Carregamento Axial Externo

A geometria em questão, intitulada pela literatura [12] cone-cilindro, é ilustrada pela Figura 4.1. Trata-se de um suporte em saia e seu carregamento consiste em uma carga axial aplicada em forma de pressão no valor de 1,222 lb/in<sup>2</sup>.

Como o WRC 429 [12] não providencia todas as informações da geometria, como raios na junção do cone e cilindro e junção do cone com o suporte fixo, são modelados junções sem os respectivos raios o que pode acarretar em diferença nos resultados de tensões nas áreas próximas da junção. O material utilizado na simulação tem o limite de escoamento de, aproximadamente, 275,8 MPa (40.000psi).

Figura 4. 1 - Geometria, informação e condições de simulação



Fonte: Autor

Para simulação, uma malha de elementos finitos similar a malha criada pelo próprio WRC 429 é utilizada. Como trata-se de uma análise axissimétrica devido a condições de geometria e carregamentos, utiliza-se elementos finitos sólidos bidimensionais para a análise. O elemento utilizado é o PLANE183 do software ANSYS [5], elemento estrutural de ordem quadrática que possui oito nós por elemento: nas extremidades dos elementos e entre nós (podendo ser seis nós, quando utilizado elementos triangulares, o que não foi o caso). Trata-se de um elemento com dois graus de liberdade por nó (translação nas duas direções do elemento) comumente utilizado em análises axissimétricas.

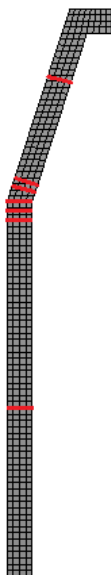
Quanto à disposição da malha, dispõe de quatro elementos finitos pela espessura: um total de 388 elementos e 1367 nós.

Como o WRC 429 apresenta valores de tensão linearizada principal, normais e de intensidade de tensão, as tensões linearizadas de intensidade de tensão são utilizadas para Comparação. Utiliza-se o método de integração de tensão, já justificado no item 3.3.3.

Como as geometrias não são idênticas, cria-se SCL em posições similares, para a obtenção do resultado mais próximo possível. A Figura 4.2 ilustra as SCL criadas e a malha utilizada na simulação. As SCL são nomeadas por números de 1 a 7, sendo a SCL 1 presente no meio do cilindro, a SCL 7 a presente no cone e as SCL 2 a 6 entre a transição cone-cilindro. As SCL são posicionadas em locais semelhantes ao que o WRC 429, de forma a poder comparar os resultados apresentados por ele com os obtidos pelo método de linearização escolhido.

A intensidade de tensão é linearizada e comparada com as fornecidas no WRC 429 e apresentadas na Tabela 4.1. O WRC 429 não fornece dados de tensão para tensão de membrana mais flexão interna e externa, apenas para a maior delas. As tensões de membrana mais flexão são calculadas em ambas extremidades da SCL: para a parte interior das SCL (M+Bi) e exterior (M+Bo).

Figura 4. 2 - Malha e SCL para validação



Fonte: Autor

Nota-se que as diferenças são inferiores a 5% para as SCL 1 a 4, que correspondem a região cilíndrica. Para as localizadas na região do cone, as



diferenças são maiores para a tensão de membrana mais flexão, porém ainda inferiores a 10%. A diferença acentuada na região cônica pode estar associada a fatores como a intersecção ser modelada como aguda (sem um raio de transição), a valores pequenos de tensão (onde pequenas diferenças são grandes porcentagens), a diferença de malha na região de transição (acentuada pela região com cantos agudos). Entretanto, considera-se a aproximação de valores (menos que 10%) satisfatória.

Tabela 4. 1 - Diferenças no SI

SCL	Componente	SI (Psi)		
		WRC	Simulação	Diferença (%)
1	Membrana	1,121	1,124	0,26
	M + Bi	1,442	1,498	3,86
	M + Bo	-	0,772	-
2	Membrana	1,117	1,151	3,05
	M + Bi	-	1,115	-
	M + Bo	2,629	2,564	2,47
3	Membrana	1,098	1,147	4,48
	M + Bi	-	1,279	-
	M + Bo	2,849	2,755	3,30
4	Membrana	1,099	1,080	1,73
	M + Bi	-	1,556	-
	M + Bo	2,845	2,983	4,84
5	Membrana	1,118	1,171	4,73
	M + Bi	-	1,255	-
	M + Bo	2,616	2,843	8,67
6	Membrana	1,150	1,199	4,46
	M + Bi	-	1,004	-
	M + Bo	2,307	2,510	8,80
7	Membrana	1,100	1,163	5,74
	M + Bi	1,570	1,718	9,45
	M + Bo	-	0,608	-

Fonte: Autor

#### 4.1.2. Intersecção Cilindro-cilindro Com Uma Razão d/d Alta

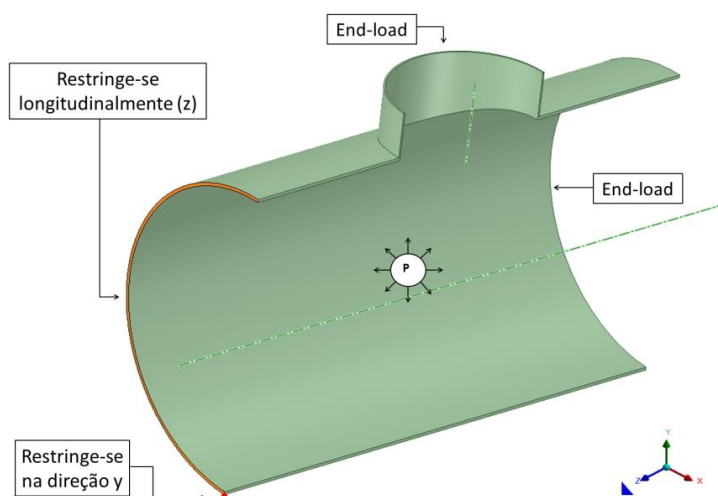
A primeira geometria do grupo WRC 429 intitulado “problemas nas intersecções cilindro-cilindro” e consiste em uma intersecção de dois cilindros sem reforço, de raio externo de 127 e 63,5 mm e espessura de 2,54 e 1,27 mm.

A geometria utilizada na simulação e as condições de contorno são ilustradas na Figura 4.3. A distância de decaimento utilizada é de  $3,0 \times \sqrt{R_m \times t}$ , um pouco maior do que o mínimo (e comumente recomendado)  $2,5 \times \sqrt{R_m \times t}$ , para garantir que os carregamentos e condições de contorno não causem influência no comportamento de tensão na área estudada.

A simulação é realizada com um eixo de simetria (eixo x). Os carregamentos são pressão interna e o respectivo carregamento de fechamento, aplicados nas extremidades dos cilindros. Tabela 4.2 apresenta o procedimento para o cálculo dos carregamentos de fechamento, que é obtido pela equação 4.1, onde a pressão interna vale 0,3447 MPa. O material utilizado na simulação tem o limite de escoamento de, aproximadamente, 275,8 MPa (40.000psi).

$$\sigma_{\text{fechamento}} = \frac{P_{\text{interna}} \times R_{\text{interno}}^2}{(R_{\text{externo}}^2 - R_{\text{interno}}^2)} \quad (4.1)$$

Figura 4.3 - Condição de simulação



Fonte: Autor

Tabela 4.2 - Cálculo dos carregamentos de fechamento

<b>P interna (MPa) 0,34474</b>							
<b>Cilindro</b>	<b>R int (cm)</b>	<b>R ext (cm)</b>	<b>A Int (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>A ext (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Dif. Areas (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Força</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
<b>Menor</b>	6,223	6,35	121,66	126,68	5,02	41,94	8,36
<b>Maior</b>	12,446	12,7	486,64	506,71	20,07	167,76	8,36

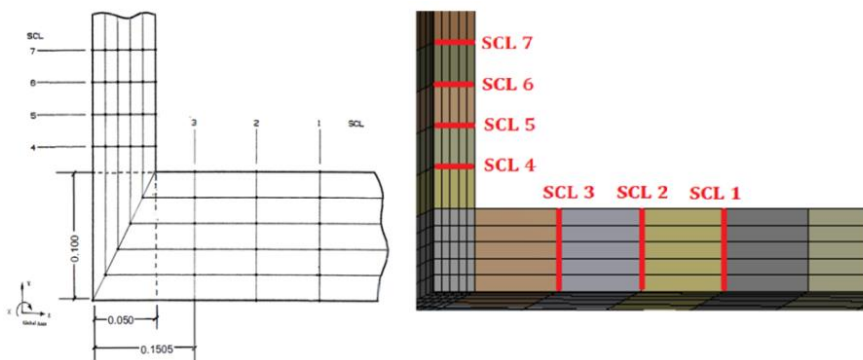
Fonte: Autor

A tensão é fornecida pelo WRC 429 para sete SCL ao longo do plano longitudinal. Como as coordenadas destas SCL são fornecidas, pode-se avaliar a tensão no local exato e comparar as tensões com certa precisão.

Porém, antes, uma verificação é feita no modelo com base na teoria das cascas. Utilizando a Equação 3.17 para calcular a tensão de membrana, obtém-se o valor de 17,06 MPa. Então, cria-se uma SCL entre o bocal e a extremidade do vaso, longe da interferência de ambos, e a tensão de membrana obtida é de 16,75 MPa. Como a simulação e a teoria matemática resultam em resultados próximos (cerca de 1,8% de diferença), o modelo é considerado válido.

A malha utilizada pelo WRC 429 contém 5 elementos através da espessura, e uma proporção de 1:5. Então se cria uma malha com as mesmas características, com elementos sólidos 3D estruturais, de interpolação quadrática, com 20 nós. Para a criação da geometria, a opção 'share topology' é utilizada. Assim, a criação da malha é facilitada e nenhum contato é criado. A Figura 4.4 ilustra a esquerda a malha e SCL do WRC 429 e a direita a da simulação realizada.

Figura 4. 4 - Malha e SCL



Fonte: Autor

Assim, a tensão total circunferencial, axial e radial foi calculada, em ambas extremidades da SCL, comparadas e disposta na Tabela 4.6. A intensidade de tensão (SI) foi calculada apenas para as SCL 3 e SCL 4.

As tensões dispostas na Tabela 4.3 não são tensões linearizadas e sim as tensões totais em cada extremidade de SCL. Compara-se assim resultados das

tensões para analisar a coerência de resultados e posteriormente a aderência do método escolhido com os resultados dispostos pelo WRC 429.

Os pontos externos apresentam valores de tensão significativamente menores do que os internos o que influencia para a diferença ser maior.

As maiores diferenças em tensão circunferencial foram encontradas em pontos externos, onde os valores encontrados na simulação são menores do que os relatados no WRC 429, se tornando mais significantes quanto mais perto da junção. Apesar das diferenças serem maiores, os valores são de mesma ordem. Em pontos internos as diferenças são menores, chegando a 7% em locais próximos da junção.

A tensão longitudinal obtida na simulação para as SCL 1, 2, 6 e 7 tem resultados muito próximos aos relatados no WRC 429. Nas SCL 3, 4 e 5, próximas a junção dos cilindros, as diferenças são mais significativas, especialmente para a SCL 4 e 5 referentes ao cilindro maior.

Quanto a tensão radial, os valores tiveram boa aderência, uma vez que se tratam de valores pequenos (quase nulos) e pouco significativos, quando comparados com a tensão circunferencial e longitudinal.

A Tabela 4.4 apresenta as diferenças de intensidade de tensão calculadas e fornecidas pelo WRC 429 para as SCL 3 e 4, uma vez que são as únicas disponíveis. O mesmo padrão de diferenças é encontrado: As diferenças são maiores para o lado externo, e maiores conforme mais próximos da junção estão.

Além da proximidade que as SCL estão da junção, o fato do modelo não apresentar uma transição entre cilindros abaulada (com um raio de transição entre cilindros) acarreta a um fator alto de concentração de tensão e a diferença entre malhas usadas na literatura e na análise do presente trabalho podem acentuar as diferenças. Mesmo assim, com exceção das SCL 3 e 4, por motivos já pontuados, as diferenças encontradas são pequenas para as tensões internas (que são as maiores e as usadas para avaliação do modelo) e os resultados obtidos com o método escolhido é considerado aderente aos resultados disponíveis.

Tabela 4. 3 - Diferença de tensão

SCL	Localização	Tensão Circunferencial (MPa)			Tensão Longitudinal (MPa)			Tensão Radial (MPa)		
		WRC 429	Simulação	Dif (%)	WRC 429	Simulação	Dif (%)	WRC 429	Simulação	Dif (%)
1	Interna	130,86	129,58	0,98	94,33	90,82	3,72	-0,26	-0,47	-
	Externa	12,22	8,60	29,64	-64,07	-60,52	5,54	0,74	0,47	-
2	Interna	148,60	148,01	0,40	87,06	85,81	1,43	-1,45	0,30	-
	Externa	35,84	29,74	17,03	-58,65	-59,12	0,79	-0,34	1,67	-
3	Interna	164,81	167,29	1,50	60,60	71,09	17,32	-3,30	0,00	-
	Externa	66,89	56,49	15,55	-48,24	-52,46	8,75	-0,90	1,08	-
4	Interna	126,47	133,06	5,21	90,96	142,19	56,32	1,82	-0,15	-
	Externa	116,17	32,68	71,87	-73,62	-129,26	75,58	4,12	-13,46	-
5	Interna	116,17	107,13	7,78	141,77	143,14	0,97	-1,37	-0,33	-
	Externa	28,88	18,29	36,66	-102,06	-11,51	88,72	-5,46	5,73	-
6	Interna	91,18	86,02	5,65	125,70	128,54	2,26	-0,43	0,00	-
	Externa	12,22	5,99	51,01	-99,31	-99,29	0,02	1,73	3,56	-
7	Interna	73,11	65,08	10,98	119,13	113,94	4,36	-0,26	-0,42	-
	Externa	0,92	-6,11	-	-84,61	-87,05	2,88	-0,25	0,40	-

Fonte: Autor

Tabela 4. 4 - Diferença de intensidade de tensão

SCL	Localização	SI (ksi)		
		WRC 429	Simulação	Dif (%)
3	Interna	24,69	23,98	2,97
	Externa	16,65	15,53	7,19
4	Interna	17,99	20,95	14,14
	Externa	10,21	22,68	54,99

Fonte: Autor

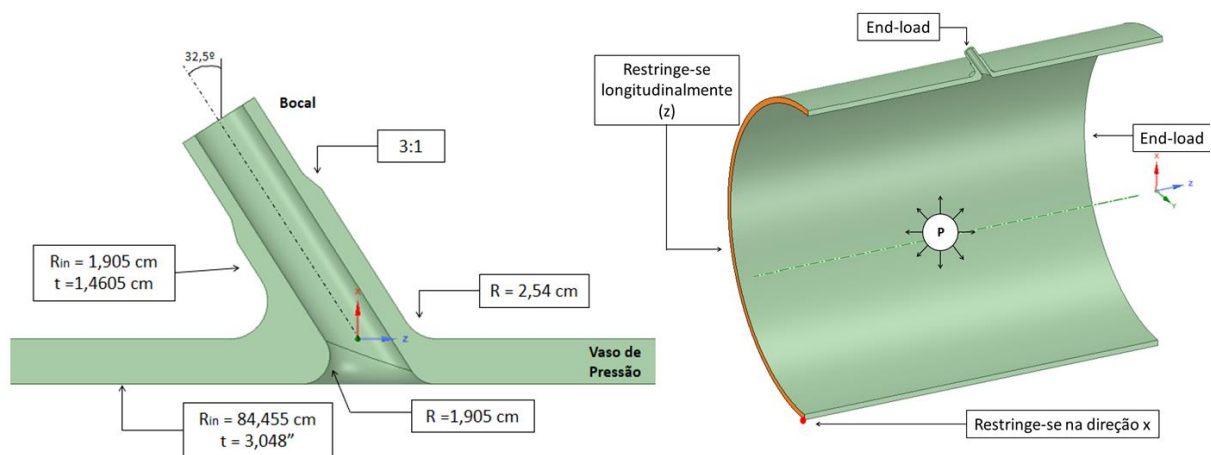
### 4.1.3. Pequeno Bocal Angular ao Vaso

A atual geometria é a segunda do grupo intitulado “problemas em intersecções cilindro-cilindro” e consiste na junção de um vaso de pressão e um bocal inclinado.

Detalhes da geometria, assim como condições da simulação são ilustrados na Figura 4.5. A distância de decaimento usada é de  $3,0 \times \sqrt{R_m \times t}$  e a simulação é realizada com um plano de simetria (eixo x). Os carregamentos são a pressão interna e seus respectivos carregamentos de fechamento (end-load) aplicados nas extremidades do bocal e vaso. A Tabela 4.5 apresenta o cálculo dos respectivos carregamentos de fechamento, utilizando a Equação 4.1. O material utilizado na simulação tem o limite de escoamento de, aproximadamente, 275,8 MPa (40.000psi).

É válido ressaltar que a geometria fornecida pelo WRC 429 apresenta certas incoerências e falta de informações, bem como exata posição de SCLs estudadas.

Figura 4. 5 - Geometria e condições de simulação



Fonte: Autor

Tabela 4. 5 - Cálculo dos carregamentos de fechamento

$P$ interna (MPa)	9,65266						
	R int (cm)	R ext (cm)	A Int (cm <sup>2</sup> )	A ext (cm <sup>2</sup> )	Dif. Areas (cm <sup>2</sup> )	Força	Tensão (MPa)
<b>Bocal</b>	1,905	2,8575	11,40	25,65	14,25	110,05	7,72
<b>Vaso</b>	84,455	87,503	22407,21	24053,76	1646,55	216289,19	131,36

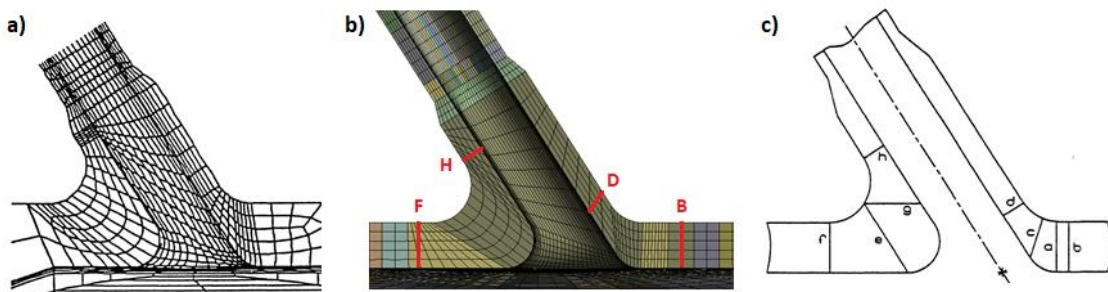
Fonte: Autor

Assim, com o objetivo de reproduzir os resultados do WRC 429, uma malha similar é criada, com cinco elementos pela espessura. Elementos sólidos 3D estruturais são utilizados, de interpolação quadrática, com 20 nós. Para a criação da geometria, a opção 'share topology' é utilizada. Assim, a criação da malha é facilitada e nenhum contato é criado. A Figura 4.6 ilustra a malha usada no WRC 429 (a) e a malha utilizada na simulação (b). Nota-se que não há proporção no desenho do WRC 429 (a), quando a espessura dos dois lados do bocal tem largura diferentes.

O WRC 429 define oito SCL e discute sua validade (Figura 4.6(c)). Estas também não possuem coordenadas e sem a taxa de proporção se torna difícil a tarefa de se criar SCL nos mesmos lugares. Assim, comparam-se apenas as SCL consideradas válidas: SCL B, D, H e F.

As tensões principais fornecidas em ksi são comparadas e dispostas na Tabela 4.6. A Comparação se torna difícil uma vez que não há informações de posição das SCL e nem como determinar de forma mais assertiva sem uma determinada taxa de proporção.

Figura 4. 6 - Malha e SCL para validação



Fonte: Autor

Como a validação acarreta em algumas dúvidas, uma verificação é feita com base na teoria das cascas. Utilizando a Equação 3.17 para calcular a tensão de membrana no vaso de pressão, obtém-se o valor de 272,3 MPa. Então, cria-se uma SCL entre o bocal e a extremidade do vaso, longe da interferência de ambos, e a tensão de membrana obtida é de 273,4 MPa. Como a simulação e a teoria matemática resultam em resultados próximos (cerca de 0,4% de diferença), o modelo é considerado válido.

Nota-se que os valores das tensões principais linearizadas proveniente da simulação divergem das fornecidas pelo WRC 429. Além da posição das SCL não serem informadas, estas estão em região de transição de bocal e cilindro, o que se mostrou,

embora a simulação ter coerência com a teoria das cascas, divergência nessas localidades com os resultados do WRC 429. Vale lembrar que onde as SCL B, D, H e F foram alocadas não estão de acordo com os requisitos ASME [14], porém são consideradas válidas pelos requisitos do WRC 429 [12] uma vez que não estão alocadas entre curvaturas da geometria ou região onde a espessura varia.

A divergência encontrada entre valores não desvalida de imediato o método escolhido, porém alerta a disposição de SCL em trechos onde a espessura escolhida, embora seja contínua, não é a da peça final e sim um detalhe de transição. A distribuição da malha na região pode ser sensível aos resultados e o local ter um alto fator de concentração de tensão. O ideal seria comparar valores com SCL que estivessem em locais recomendados por [14], porém a literatura não disponibiliza valores de tensões linearizados nestes locais.



Tabela 4. 6 - Comparação de tensão

SCL	Componente	S1 (ksi)			S2 (ksi)			S3 (ksi)		
		WRC	Simulação	Dif (%)	WRC	Simulação	Dif (%)	WRC	Simulação	Dif (%)
<b>B</b>	Membrana	29,00	43,29	49,27	13,10	20,16	53,89	-0,30	-0,67	122,30
	M + Bi	35,10	51,87	47,79	5,10	17,60	245,08	-1,40	-1,36	3,21
	M + Bo	23,00	34,70	50,88	21,10	22,72	7,68	0,70	0,02	97,63
<b>D</b>	Membrane	14,40	14,84	3,08	3,80	5,90	55,23	0,40	0,99	148,07
	M + Bi	31,00	46,51	50,02	11,50	26,73	132,43	0,80	2,60	225,00
	M + Bo	-2,20	1,38	162,75	-5,10	-16,82	229,75	1,20	-16,93	1.511,08
<b>F</b>	Membrana	11,80	40,18	240,53	15,80	19,71	24,74	-0,58	0,60	203,20
	M + Bi	11,00	46,67	324,25	14,60	18,61	27,46	-1,30	0,40	130,77
	M + Bo	12,50	33,70	169,57	6,80	20,81	206,01	0,14	0,70	410,95
<b>H</b>	Membrane	1,10	1,78	61,82	16,20	0,93	94,29	-1,10	-0,06	94,80
	M + Bi	-4,60	1,17	125,53	9,00	0,89	90,16	-1,40	-1,29	7,64
	M + Bo	6,70	2,39	64,38	23,70	0,97	95,92	-0,90	0,15	116,44

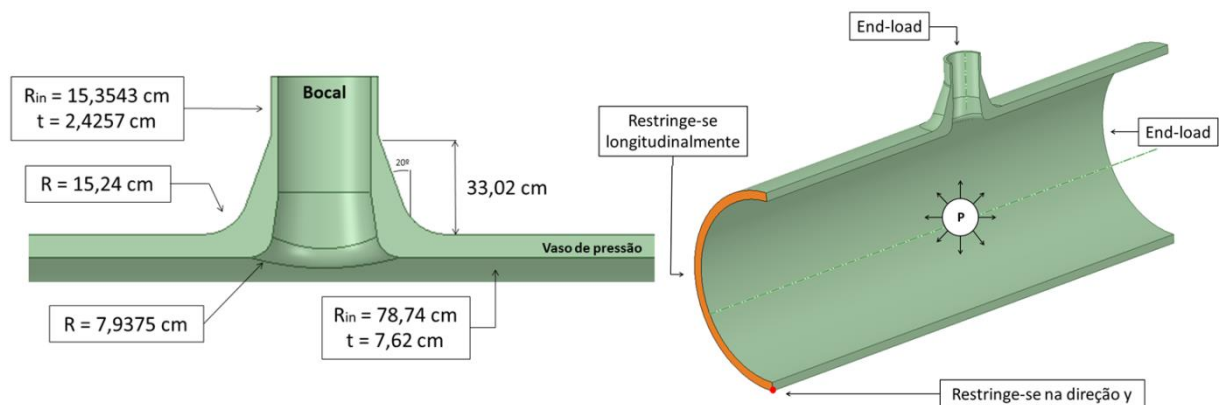
Fonte: Autor

#### 4.1.4. Intersecção Radial Bocal-cilindro

A terceira geometria do grupo do WRC 429 “intersecção cilindro-cilindro” consiste em uma intersecção cilindro-bocal radial.

Detalhes da geometria usada na simulação e suas condições de simulação estão ilustrados na Figura 4.7. A distância de decaimento utilizada é de  $3,0 \times \sqrt{R_m \times t}$  e a simulação é realizada com um eixo de simetria (eixo x). Os carregamentos são a pressão interna e seus respectivos carregamentos de fechamento (end-loads), cujos cálculos estão detalhados na Tabela 4.7.

Figura 4. 7 - Geometria e condições da simulação



Fonte: Autor

Tabela 4. 7 - Cálculo dos carregamentos de fechamento

<b>P interna (MPa)</b> 17,2375							
	<b>R int (cm)</b>	<b>R ext (cm)</b>	<b>A Int (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>A ext (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Dif. Areas (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Força</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
<b>Bocal</b>	15,3543	17,78	740,64	993,15	252,50	12766,86	50,56
<b>Vaso</b>	78,74	86,36	19477,84	23430,15	3952,32	335749,19	84,95

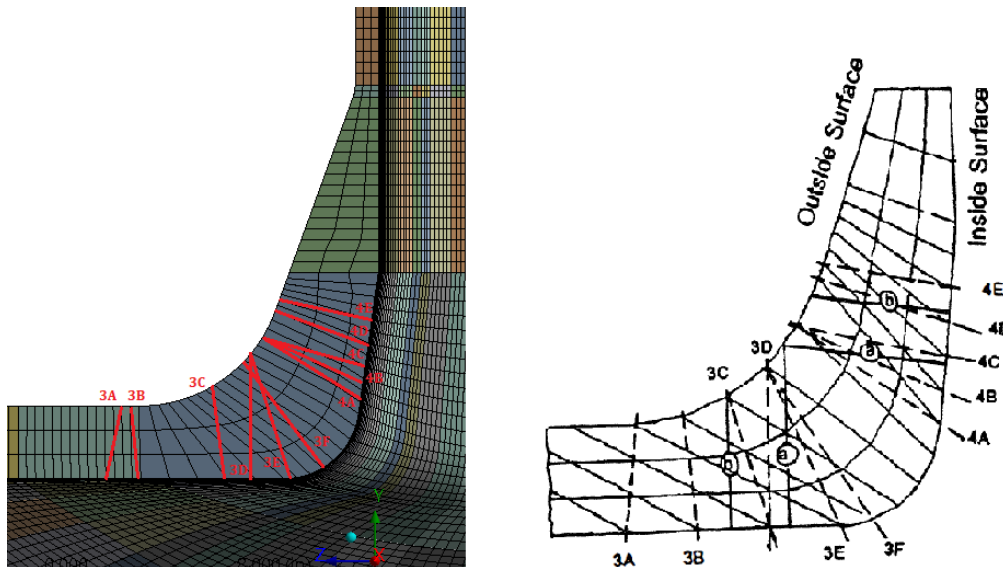
Fonte: Autor

Uma verificação é feita, baseada na teoria das cascas. Usando a Equação 3.17, calcula-se a tensão de membrana a 186,73 MPa. Uma SCL é traçada entre o bocal e o fim do vaso, de forma a tensão obtida não ter influência de ambos. Obtém-se a tensão linearizada de membrana, com uma malha similar a utilizada na simulação do WRC 429 (utiliza-se elementos sólidos 3D estruturais de interpolação quadrática, com 20 nós por

elemento, detalhadas abaixo), com o valor de 186,51 MPa. Assim, com uma diferença de 0,12%, verifica-se a validade do modelo numérico.

Para a reprodução e posterior comparação para validação dos resultados da simulação com os obtidos na literatura, uma malha de elementos finito similar é utilizada na simulação, contento três elementos na espessura do vaso e bocal. A Figura 4.8 ilustra a malha usada no WRC 429 à direita e a esquerda a da simulação. Na figura também estão alocadas as SCL definidas pelo WRC 429 e as alocadas de forma similar no modelo. Como o desenho não apresenta a posição exata, procura-se alocar as SCL em posições similares, o que pode causar alguma diferença entre comparação dos resultados.

Figura 4. 8 - Malha e SCL



Fonte: Autor

Assim, o WRC 429 lineariza as tensões e a intensidade de tensão para estas SCL com o objetivo de determinar sua validade. A Tabela 4.8 apresenta a comparação das tensões linearizadas para as SCL apresentadas em ksi, uma vez que foi a única unidade fornecida.

Embora dentro da transição entre cilindro e bocal, as SCL tiveram suas tensões linearizadas relativamente próximas as fornecidas pelo WRC 429. A intensidade de tensão teve sua maior diferença de 15% na SCL 3F, que fica bem na curva de transição bocal-cilindro. As SCL que obtiveram a menor diferença, menor que 5%, são as 3A e 3B que ficam em elementos estruturais e seguem os requisitos ASME.

Tabela 4. 8 - Comparação de tensão

SLC	Classificação	Tensão Circunferencial (ksi)			Tensão longitudinal (ksi)			Tensão Radial (ksi)			SI (ksi)		
		WRC	Simulação	Dif (%)	WRC	Simulação	Dif (%)	WRC	Simulação	Dif (%)	WRC	Simulação	Dif (%)
3A	Membrana	27,99	29,20	4,31	12,69	15,38	21,21	-1,14	-1,02	10,77	29,10	30,21	3,83
	M + Bi	38,00	38,59	1,56	15,22	17,11	12,39	-1,94	-2,56	31,75	40,10	40,85	1,87
	M + Bo	17,81	19,80	11,17	10,15	13,66	34,54	-0,34	0,22	165,02	-	-	-
3B	Membrana	28,48	30,09	5,66	12,73	15,56	22,23	-1,01	-0,89	12,24	29,50	30,98	5,01
	M + Bi	41,68	40,64	2,51	16,37	17,14	4,67	-1,88	-2,16	15,00	43,60	42,80	1,83
	M + Bo	15,29	19,55	27,85	9,12	13,99	53,36	-0,18	0,39	316,67	-	-	-
3C	Membrana	28,53	30,51	6,95	11,30	12,40	9,73	-0,85	-1,09	28,35	29,40	31,64	7,62
	M + Bi	47,01	48,27	2,68	16,90	18,94	12,09	-1,65	-2,35	42,31	48,70	50,63	3,96
	M + Bo	10,05	12,75	26,88	5,91	5,86	0,93	-0,26	0,16	163,08	-	-	-
3D	Membrana	25,84	27,40	6,02	9,61	8,78	8,67	-0,85	-1,42	67,06	26,70	28,90	8,23
	M + Bi	47,24	50,61	7,13	16,99	17,72	4,30	-1,22	-1,62	32,46	48,50	52,36	7,96
	M + Bo	4,44	4,18	5,76	2,51	-0,17	106,57	-0,77	-1,22	59,08	-	-	-
3E	Membrana	29,76	28,86	3,04	8,73	7,30	16,37	-0,66	-1,06	60,62	30,40	30,21	0,63
	M + Bi	55,94	51,26	8,37	14,35	12,92	9,97	-0,09	-1,18	1212,22	56,90	53,08	6,71
	M + Bo	3,58	6,45	80,28	3,64	1,68	53,80	-0,52	-0,94	80,60	-	-	-
3F	Membrana	31,67	30,51	3,67	7,97	6,41	19,57	-0,45	-0,19	57,51	32,10	31,37	2,26
	M + Bi	60,77	50,89	16,26	12,20	8,81	27,80	-0,49	0,38	177,64	61,30	52,10	15,00
	M + Bo	2,57	10,13	294,05	3,75	4,01	6,98	-0,43	-0,76	77,21	-	-	-
4A	Membrana	25,41	24,34	4,20	5,22	4,79	8,28	1,77	1,87	5,53	23,60	23,23	1,56
	M + Bi	55,20	50,00	9,42	12,06	13,66	13,26	2,58	3,01	16,54	52,60	48,92	7,00
	M + Bo	-4,38	-1,13	74,17	-2,28	-4,00	75,44	1,62	0,73	55,03	-	-	-
4B	Membrana	21,51	22,00	2,27	5,55	5,48	1,31	1,62	1,37	15,36	19,90	20,94	5,21
	M + Bi	46,56	46,52	0,08	14,09	15,98	13,39	1,80	2,37	31,42	44,80	45,13	0,74
	M + Bo	-3,55	-2,53	28,82	-3,21	-5,02	56,42	1,66	0,38	77,30	-	-	-
4C	Membrana	17,92	19,55	9,12	5,96	5,93	0,53	1,29	0,88	31,54	16,60	18,81	13,33
	M + Bi	38,77	42,31	9,13	15,89	17,62	10,91	1,02	1,62	59,22	37,80	41,37	9,46
	M + Bo	-2,93	-3,20	9,30	-4,02	-5,77	43,43	1,60	0,14	91,13	-	-	-
4D	Membrana	12,89	13,77	6,80	6,85	6,51	4,96	0,46	-0,04	107,81	12,40	13,80	11,31
	M + Bi	31,85	33,17	4,15	17,28	19,15	10,79	0,20	0,35	76,42	31,60	33,19	5,03
	M + Bo	-6,06	-5,64	6,96	-4,10	-6,13	49,40	1,00	-0,42	142,47	-	-	-
4E	Membrana	9,76	10,13	3,79	7,02	6,41	8,76	0,02	-0,49	2545,00	9,70	10,64	9,67
	M + Bi	25,65	25,93	1,10	17,35	18,76	8,14	-0,41	-0,48	16,41	26,10	26,62	1,98
	M + Bo	-6,13	-5,67	7,50	1,03	-5,95	677,91	1,03	-0,50	148,74	-	-	-

Fonte: Autor

## 4.2. CÓDIGO ASME, DIV 2, MANUAL DE EXEMPLO DE PROBLEMAS (PTB-3)

O código ASME, divisão 2, manual de exemplo de problemas (ou PTB-3) [27] apresenta para o caso de um vaso de pressão assimétrico a realização de análise de tensão e de fadiga elásticas como exemplo para projetistas que possam ter dúvidas em sua aplicação.

### 4.2.1. Junção Vaso de Pressão-Bocal

A Figura 4.9 ilustra a geometria do vaso, bem como seus materiais constituintes. Trata-se de um caso axissimétrico de vaso de pressão com bocal superior, estendido a uma distância de  $5 \times \sqrt{R_m \times t}$ , a partir da parte elíptica, para calcular o comportamento das tensões no vaso.

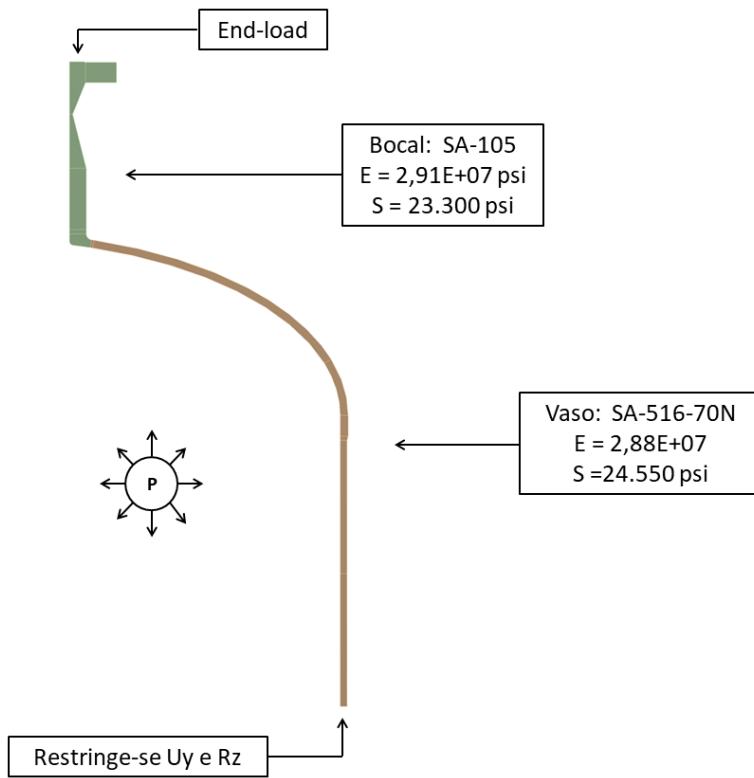
Como condição de contorno, fixa-se o final do vaso na direção longitudinal (eixo y) e impede-se a rotação no eixo z. Os carregamentos são as pressões internas aplicada nas faces internas de 420 psi e o respectivo carregamento de fechamento (end-load) de 982,3 psi aplicado no bocal. Mais informações sobre a geometria podem ser encontradas no código ASME PTB-3 Seção VIII, Divisão 2: Manual de exemplos de problemas (2013) [27].

Para a validação da simulação, utiliza-se uma malha com elementos de 0,1 polegadas, aproximadamente, de forma semelhante à usada no exemplo da ASME. A malha consiste em 7355 elementos quadráticos e 24002 nós, como visualizado na Figura 4.10. As SCL estão dispostas na Figura 4.11 e foram distribuídas de acordo com o próprio exemplo do código ASME.

Lineariza-se as tensões com o método previamente escolhido e justificado e compara-se com os valores da parcela de membrana (única parcela disponibilizada) que o manual de exemplos apresenta, conforme Tabela 4,9. Note-se que as tensões são tensões equivalentes, de von-Mises. Isso se deve ao manual de exemplos ASME ser proveniente da seção VIII do mesmo, que aborda vasos de pressão sem a especificação nuclear.

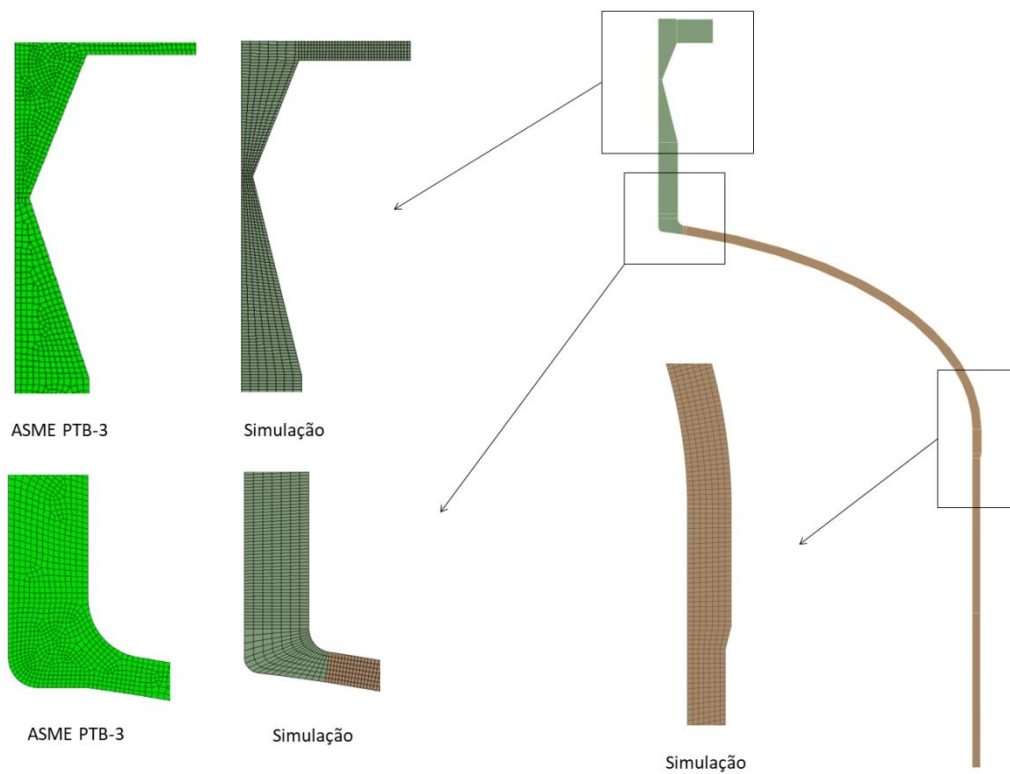
As diferenças observadas são relativamente pequenas. A maior diferença observada é na SCL 3, a 7,8%, que fica entre a transição do bocal com o vaso, como já observado nos exemplos anteriores (diferenças maiores nas áreas de transição). As demais ficam abaixo dos 5%, comprovando a boa relação do método com uma das literaturas mais recente e também com um exemplo do próprio código ASME.

Figura 4. 9 - Geometria



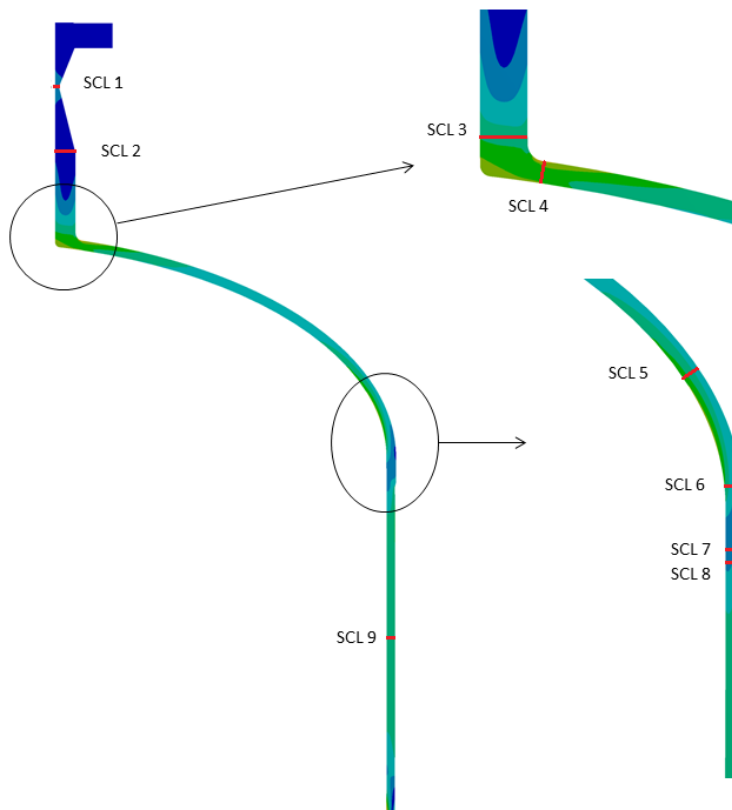
Fonte: Autor

Figura 4. 10 - Malhas



Fonte: Autor

Figura 4. 11 - SCLs



Fonte: Autor

Tabela 4. 9 - Diferença da tensão equivalente de membrana

SCL	Tensão Equivalente: Membrana Linearizada (psi)		
	ASME	Simulação	Dif (%)
1	6476	6850,8	5,8
2	1118	1146,2	2,5
3	16077	17337	7,8
4	22232	22948	3,2
5	18025	18169	0,8
6	9613	9171,2	4,6
7	10048	10359	3,1
8	10985	11260	2,5
9	19028	19823	4,2

Fonte: Autor

#### 4.3. REGRAS DE PROJETO PARA UMA ANÁLISE NÃO LINEAR. PARTE 2B: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE UM BENCHMARK NÃO LINEAR

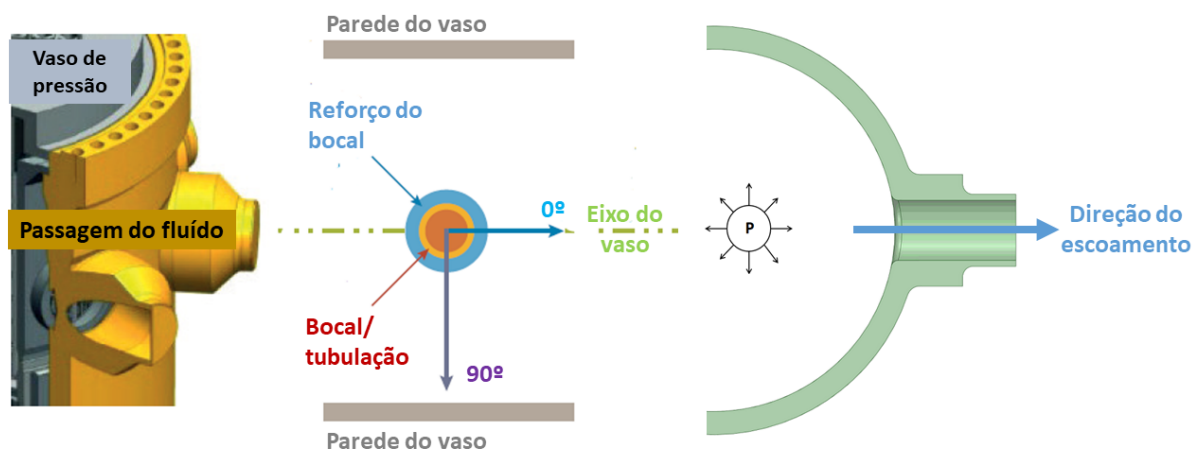
O último caso para a reprodução e comparação dos resultados com o objetivo de validar o método de linearização escolhido é um caso presente no estudo “Non-linear Analysis Design Rules” [24], com resultados apresentados em [25]. Embora o título referencie uma análise não linear, o primeiro benchmark (1.0) trata-se de um bocal nuclear presente num vaso de pressão onde uma análise elástica é realizada.

Alguns diferenciais englobam esta referência em específico. O primeiro é o fato de diferentes empresas realizarem a análise da mesma geometria e fornecerem resultados de acordo com a metodologia e com o software utilizado por padrão pelas mesmas. Empresas como a americana Westinghouse, a russa Rosatom, dentre outras geram uma análise 2D do bocal e linearizam tensões em SCL pré-definidas. Outro diferencial é o fato de performarem uma análise axissimétrica em 2D de uma geometria que originalmente não é passível de tal simplificação.

No total são oito companhias ao redor do mundo que participaram do estudo, utilizando softwares de elementos finitos como ANSYS, ABAQUS, SYSTUS e FASEM.

A geometria analisada é proveniente de uma intersecção vaso de pressão-bocal (Figura 4.12) e tem as dimensões originais apresentadas na Figura 4.13.

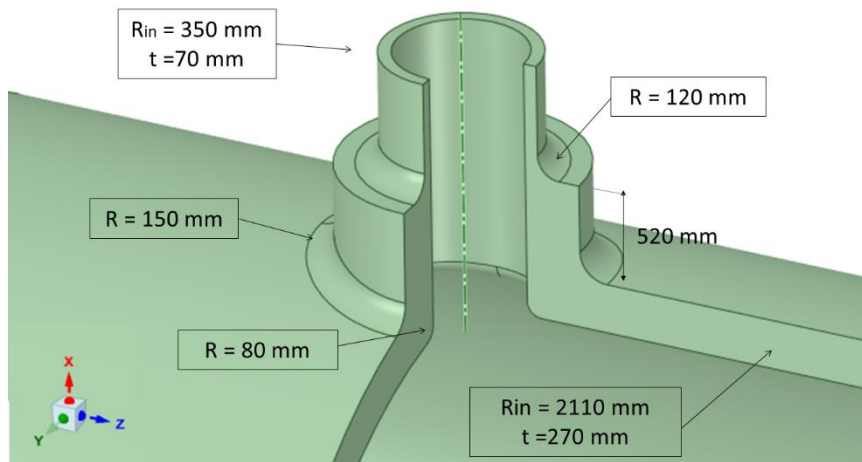
Figura 4. 12 - Bocal Nuclear



Fonte: Autor



Figura 4. 13 - Geometria do bocal



Fonte: Autor

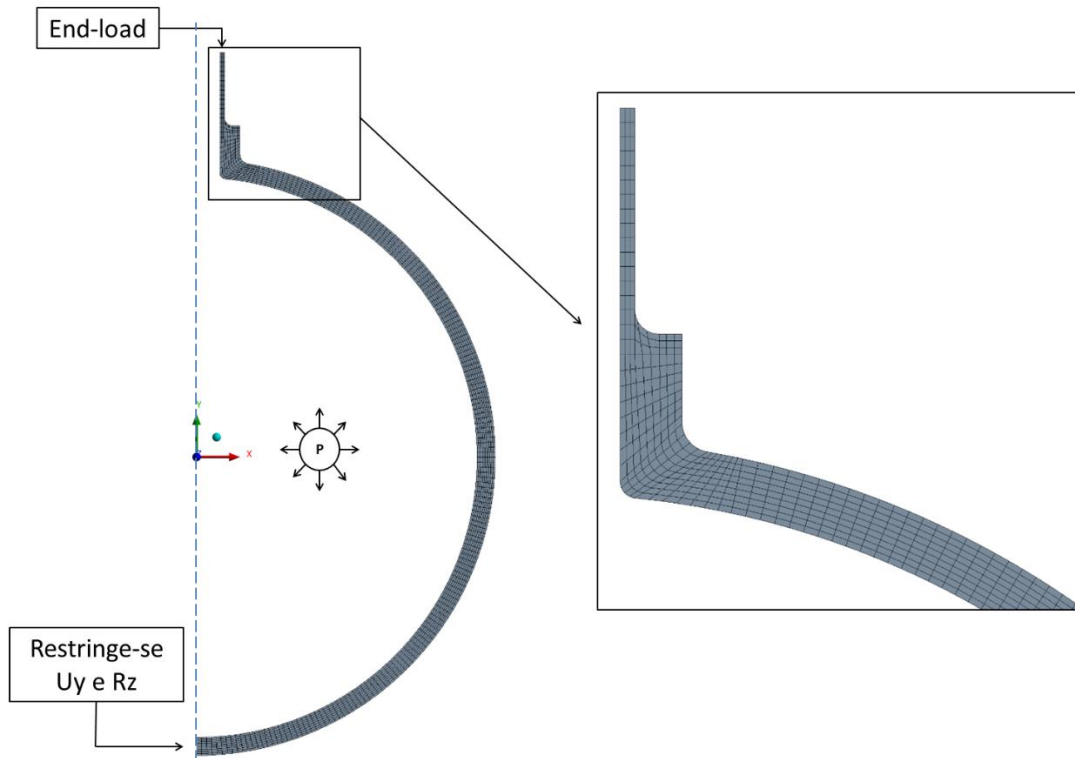
A referência adota uma simplificação da geometria, onde, ao invés de se analisar o bocal numa interseção com um cilindro, analisa-se ele numa esfera de raio duas vezes maior que o do cilindro, possibilitando uma análise axissimétrica. Outra simplificação feita é a análise apenas das tensões devido à pressão interna. As cargas provenientes da tubulação não são aplicadas uma vez que uma análise axissimétrica que não permite tal.

Informações sobre malha, condições de contorno e análises adotadas pelos participantes não foram fornecidas. Então, a malha e condições de contorno utilizadas foram baseadas nas análises 2D realizadas anteriormente, que tiveram boas correlações com os dados de suas respectivas referências.

Quanto à malha, foram utilizados elementos finitos sólidos 2D de ordem quadrática. Foram utilizados seis elementos pela espessura do vaso e três para o bocal, totalizando 5741 nós e 1770 elementos. Para a condição de contorno, restringe-se o deslocamento na direção  $y$  e a rotação em  $z$  na extremidade inferior do vaso. O carregamento de fechamento de  $36,63 \text{ MPa}$  no bocal (calculado com a Equação 4.1) devido à pressão interna de  $17 \text{ MPa}$  também é inserido na simulação. Detalhes da malha e condições de contorno estão na Figura 4.14.

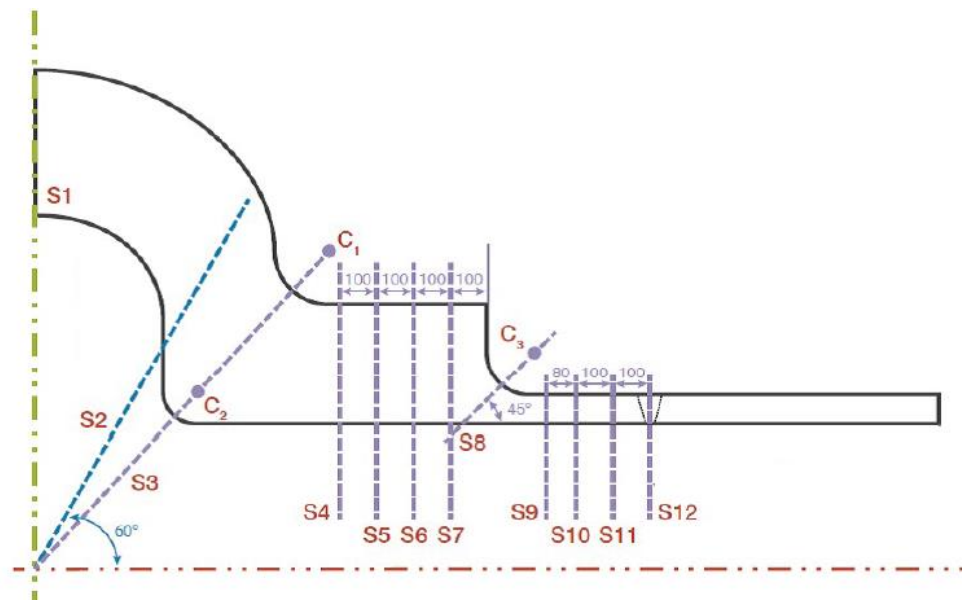
A referência escolhe 12 SCL para a linearização e análise, dispostas na Figura 4.15.

Figura 4. 14 - Malha e condições de contorno



Fonte: Autor

Figura 4. 15 - SCLs



Fonte: [25]

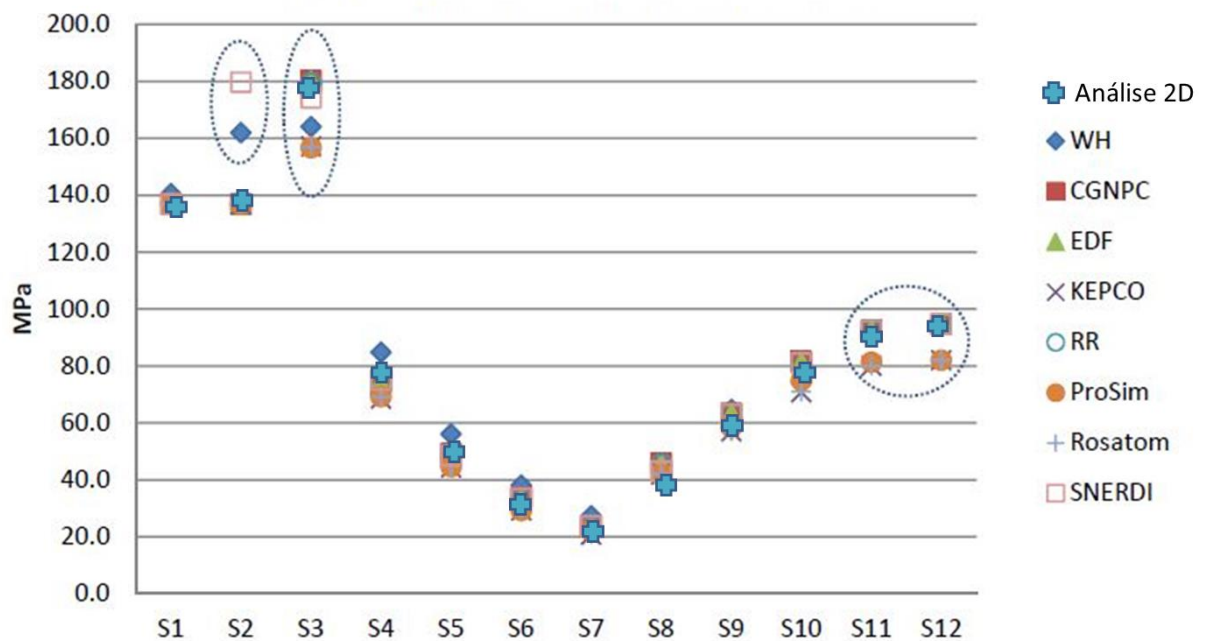
Para comparação dos resultados se dispõe apenas de gráficos com os valores das análises de todos os participantes. Sendo assim, os valores de tensão de membrana, flexão

e membrana mais flexão são linearizados nas exatas posições e os valores obtidos inseridos dos gráficos disponíveis. Sendo assim, a Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 ilustram as comparações entre respostas de tensões de membrana, flexão e membrana mais flexão, respectivamente, para cada SCL.

Apesar dos valores de tensão não serem dados para a comparação exata, nota-se que o comportamento das tensões e valores são parecidos para as SCL que se localizam em elementos estruturais. Para as SCL em elementos de transição (SCL 3 e 8) os valores variam mais e são justificados pela própria referência devido a se localizarem em áreas de concentração de tensão. O autor também justifica as diferenças entre valores com o refinamento de malha e diferentes condições de contorno impostas por cada analista, que não são fornecidas.

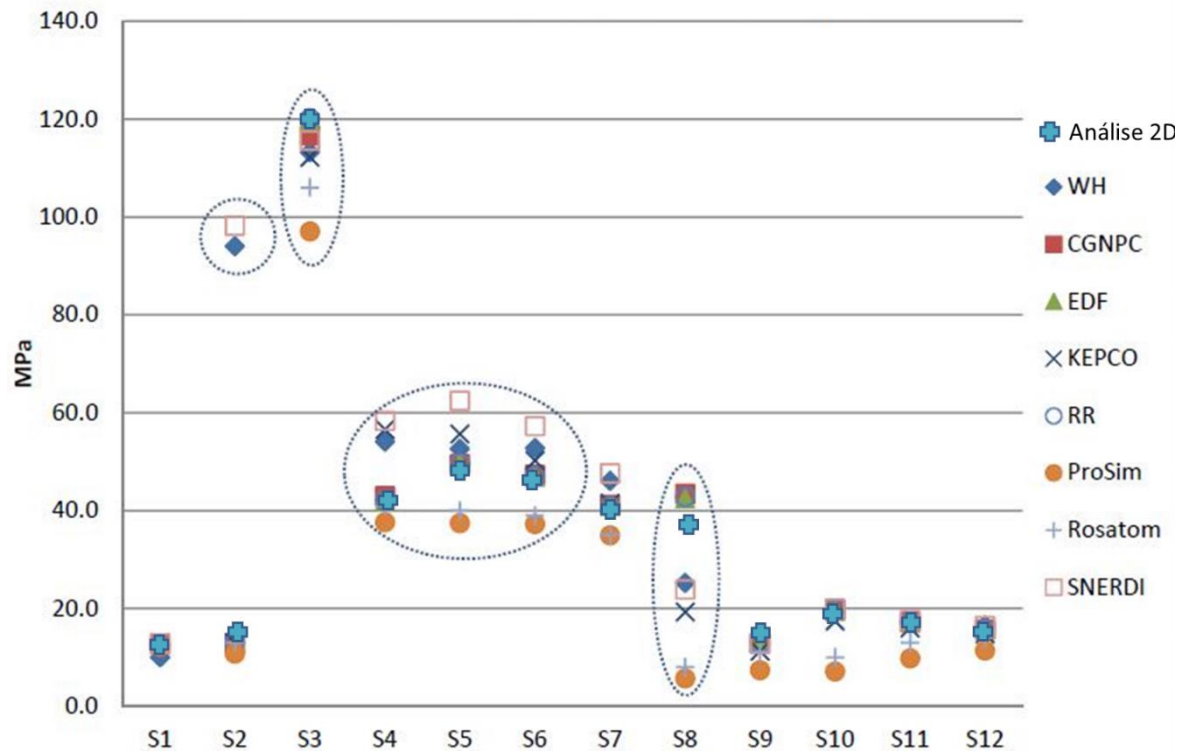
Note que a SCL 2 é indicada pela Figura 4.15 como uma SCL que fica a 60° da linha média do bocal. Entretanto, divergências entre os valores de tensões para as diferentes empresas pode indicar também que o local linearizado não foi o mesmo. A tensão de flexão alcançando valores altos, próximos a tensão de flexão para SCL 3, podem indicar a proximidade da SCL 2 a SCL 3.

Figura 4. 16 - Comparação entre tensões de membrana



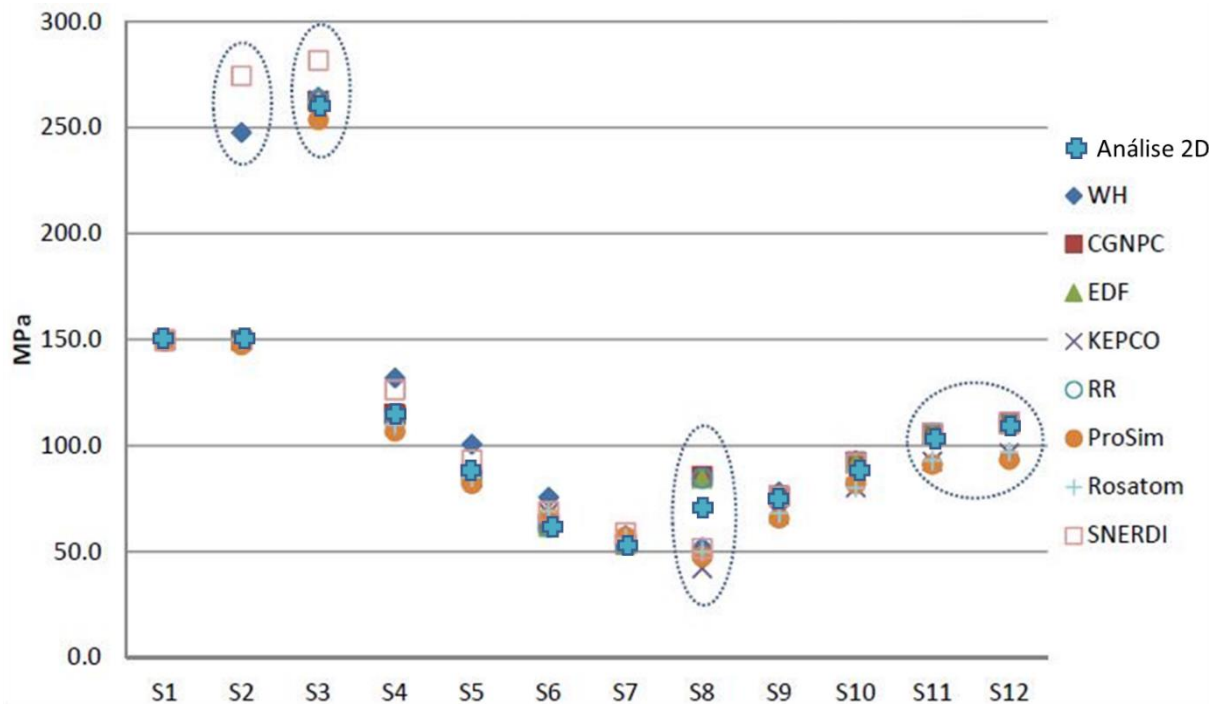
Fonte: [25], modificado

Figura 4. 17 - Comparação entre tensões de flexão



Fonte: [25], modificado

Figura 4. 18 - Comparação entre tensões de membrana mais flexão

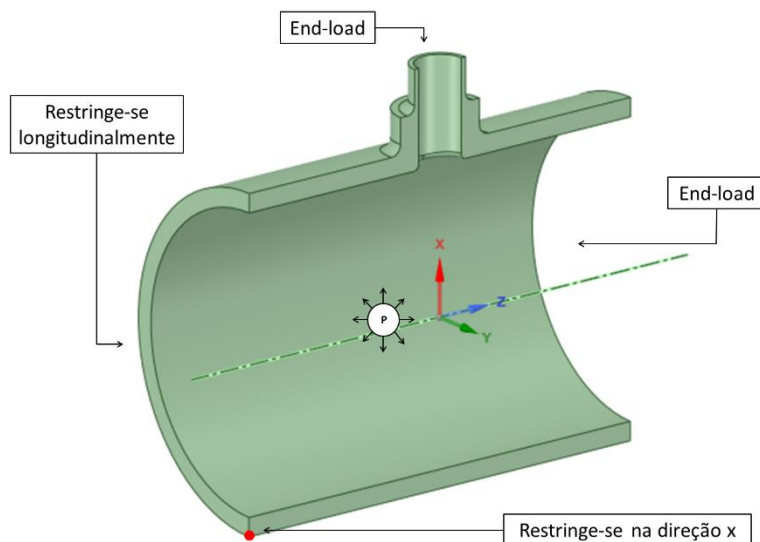


Fonte: [25], modificado

Entretanto, um questionamento sobre os dados obtidos em uma análise axissimétrica de uma geometria não passível de tal simplificação é levantado. Para verificar se essa simplificação realmente apresenta resultados condizentes com simulação de uma geometria 3D, uma análise 3D é realizada.

Utilizando um eixo de simetria, mesmos carregamentos mecânicos (pressão interna de 17 MPa e carregamento de fechamento de 36,63 e MPa), restringe-se longitudinalmente a extremidade oposta do vaso que é aplicada o carregamento de fechamento e radialmente no ponto inferior do vaso, na mesma extremidade. A Figura 4.19. ilustra as condições de contorno e carregamentos utilizados.

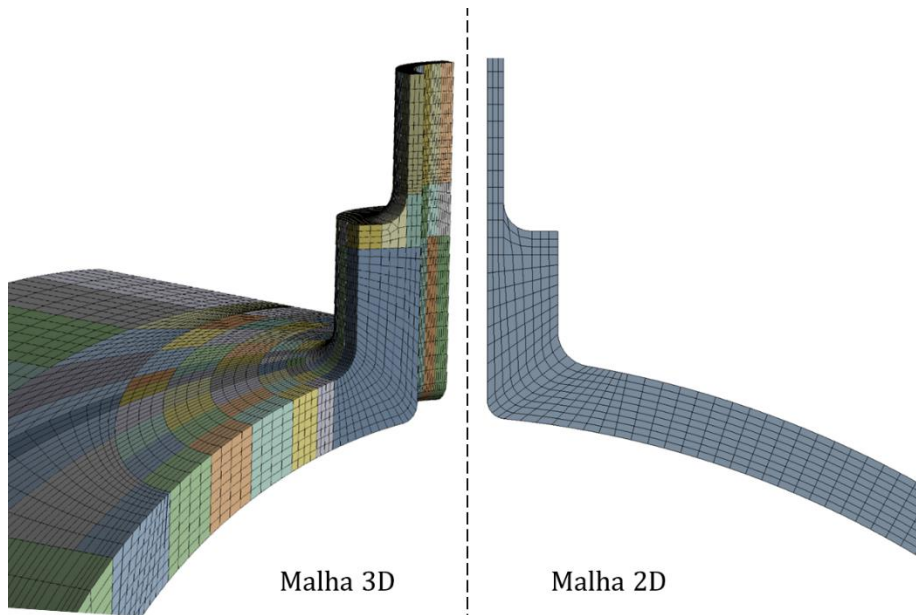
Figura 4. 19 - Condições de contorno da simulação



Fonte: Autor

Quanto à malha, utiliza-se uma malha de elementos sólidos tridimensionais de ordem quadrática. Dispõe-se de nove elementos ao longo do vaso e três no bocal, de forma a esta ser semelhante a malha utilizada na análise 2D. Conta-se 1103561 elementos e 455712 nós ao todo. A Figura 4.20 compara as malhas das duas análises. Note a diferença no raio do vaso nas duas análises, onde a geometria em 2D é modelada com o raio duas vezes maior que seu valor real.

Figura 4. 20 - Comparação de malhas



Fonte: Autor

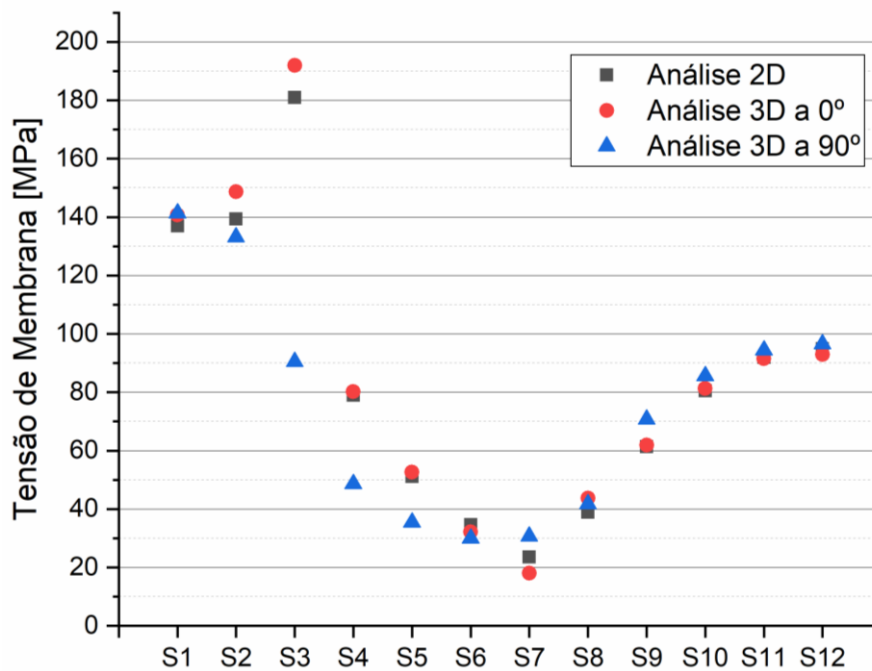
Assim, compara-se as componentes de intensidades tensões linearizadas para cada SCL já apresentadas na Figura 4.15. Os resultados da análise 2D axissimétrica são comparadas com os resultados da análise 3D, nas mesmas posições, porem longitudinalmente (ângulo de  $0^\circ$ ) e transversalmente (ângulo de  $90^\circ$ ).

A Figura 4.21 compara as tensões de membrana, a Figura 4.22 compara as tensões de flexão e a Figura 4.23 compara as tensões de membrana mais flexão.

Para a tensão de membrana, os resultados da análise 2D chegaram muito próximos ao da análise 3D a  $0^\circ$ , com exceção das SCL 2 e 3 que estão localizadas em locais de concentração de tensão. Quando comparadas com os resultados da análise a  $90^\circ$ , para locais onde o código ASME VIII classifica as SCLs válidas (posicionadas sob elementos estruturais), como a SCL 1, 2, 9, 10, 11 e 12, os valores das três análises se encontram próximos. Note que o valor das tensões para as três análises se aproximam conforme se afastam de descontinuidades, como para a SCL 1 e 12.

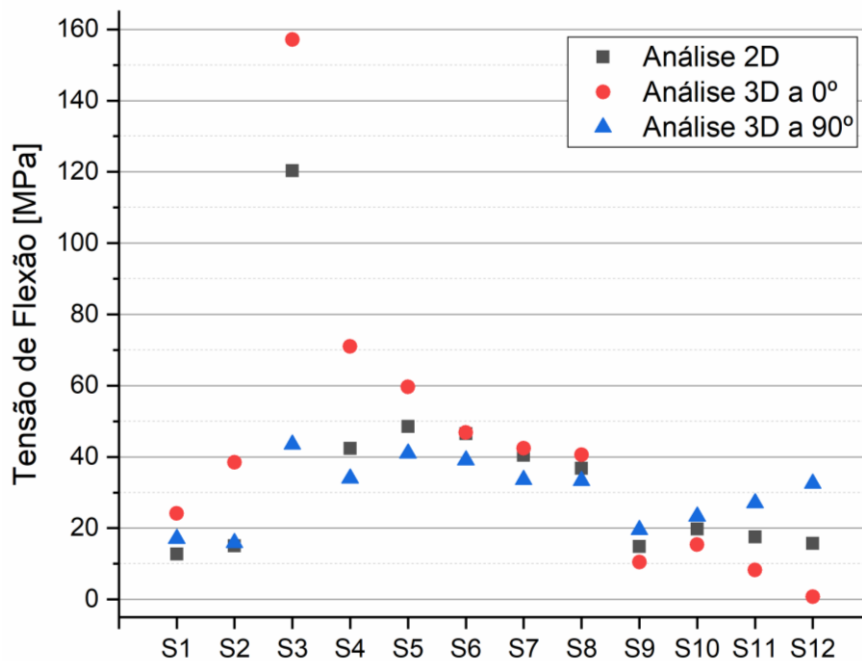
Para a tensão de flexão, os valores obtidos são relativamente pequenos quando comparados com a tensão de membrana, com exceção da SCL 3, devido à sua posição. Em geral, o valor obtido proveniente da análise 2D encontra-se entre os valores da análise 3D a  $0$  e  $90^\circ$ .

Figura 4. 21 - Comparação para tensão de membrana



Fonte: Autor

Figura 4. 22 - Comparação para tensão de flexão



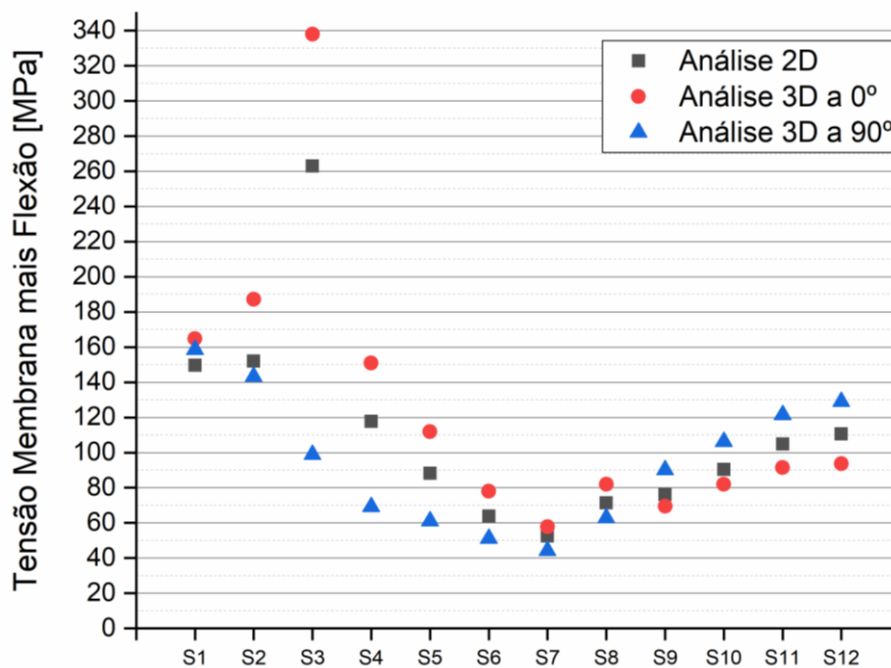
Fonte: Autor

Quanto à tensão de membrana mais flexão, as SCL de 1 a 7 apresentam maiores valores quando analisadas longitudinalmente (a 0°) do que transversalmente (90°).

Depois, o comportamento se inverte. Quanto aos valores da análise axissimétrica, eles estão posicionados entre os dois valores obtidos na análise tridimensional. A diferença entre valores da análise 3D e 2D para a S1 é de 9,13% e para a S12 de 14,35%.

Conclui-se que a simplificação de análise resulta em um comportamento final similar com a análise onde os dados são fieis à geometria, quando analisados as tensões de membrana e o conjunto de tensão membrana mais flexão (que são os necessários para a validação junto a ASME). Entretanto, os valores obtidos são menores do que os obtidos em uma análise tridimensional e podem levar a uma análise subestimada.

Figura 4. 23 - Comparação para tensão de membrana mais flexão



Fonte: Autor



## 5. ANÁLISE DE TENSÃO DOS CASOS DE ESTUDO INICIAIS

Embora as referências [12], [24], [25] e [27] analisadas discutam itens relacionados a uma análise de tensões, elas não discutem como realizar a linearização das tensões através das SCL. Tampouco providenciam ao projetista diretrizes de uma análise de tensões em elementos estruturais presentes em um vaso de pressão (vaso, bocais ou suportes), seja ele nuclear ou não.

Sendo assim, este capítulo tem o objetivo de realizar uma análise de tensões elásticas detalhadas que sirva ao projetista como guia para diversos casos. É válido ressaltar que os elementos são analisados como itens nucleares, tanto para classificação tanto para a comparação os limites admissíveis de tensão. Ou seja, o método de linearização de [14] é utilizado, porém a categorização e classificação de tensões, bem como a comparação destas tensões com os limites impostos é feito conforme requisitos de [4].

### 5.1. WRC 429: GUIA PARA A APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE TENSÕES 3D

Embora o boletim WRC 429[12] discuta a validade de uma SCL, ele não apresenta diretrizes concretas para a análise de tensões. E é o que será realizado para os quatro casos exemplos extraídos desta referência.

#### 5.1.1. Cone-cilindro com Carregamento Axial Externo

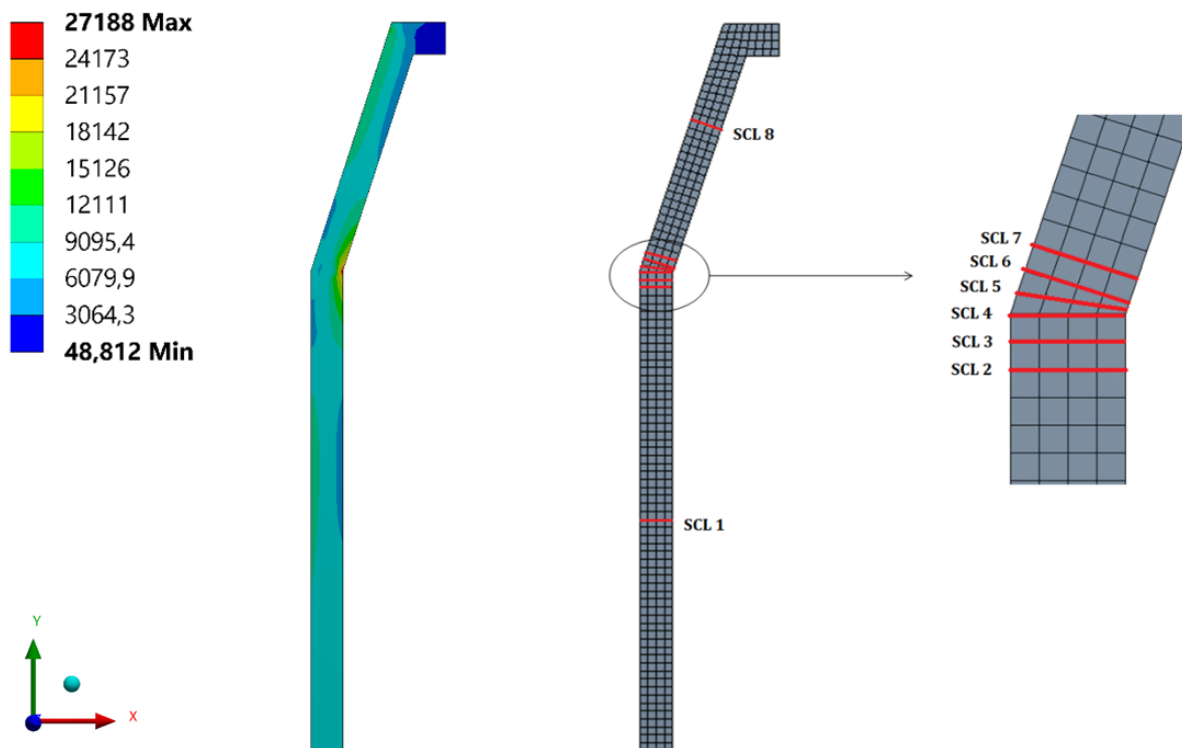
Para realizar a análise de tensão elástica do componente axissimétrico em questão, cria-se a geometria e malha em elementos finitos com elementos sólidos bidimensionais. A malha utilizada é a mesma criada com o intuito de reproduzir dados do WRC429, ilustrado na Figura 4.1. Os elementos finitos utilizados, carregamentos, condições de contorno e materiais são os mesmos descritos em 4.1.1.

Realiza-se a simulação e verifica-se o comportamento das tensões. Como esperado, conforme Figura 5.1, os picos de tensão ocorrem na região de intersecção entre o cone e cilindro. Esta é uma localidade onde a tensão há parcelas secundárias.

Para a análise, oito SCL são escolhidas em locais semelhantes às que o WRC 429 define. Duas longe da junção cone-cilindro para a verificação das tensões primárias e seis

na junção. Note que as SCL 4, 5 e 6 encontram-se em região de transição e, conforme os critérios do método escolhido de acomodação de uma SCL, são muito próximas da transição e podem não serem consideradas validas.

Figura 5.1 - Intensidade de tensão (Pa), malha e SCL



Fonte: Autor

A tabela 5.1 traz as tensões linearizadas normais, cisalhantes e principais para as oito SCL. Note que as tensões principais são equivalentes as normais. Embora as SCL localizadas na transição (SCL 4, 5 e 6) não seja válido conforme os requerimentos e considerações de elemento estrutural e de transição, as tensões possuem valores baixos, não chegando a 14000 Pa.

Realiza-se, com as tensões linearizadas, a categorização das tensões para os dois componentes: Cone e cilindro. A Tabela 5.2 apresenta de forma resumida onde aparecem as maiores tensões, seus valores, classificação e compatibilidade com os requisitos do código ASME [4]. Os componentes passam na análise de acordo com os requerimentos da ASME, conservadoramente, uma vez que a tensão de escoamento vale 275 MPa (40000 psi) e o limite para tensão primária de membrana generalizada  $S_m$  vale aproximadamente 180 MPa.

Tabela 5. 1 - Comportamento de tensão (Pa)

SCL	Componente	Tensão Longitudinal (Pa)	Tensão circunferencial (Pa)	Tensão Radial (Pa)	Tensão Cisalhante (Pa)	S1 (Pa)	S2 (Pa)	S3 (Pa)	SI (Pa)
1	Membrana	7754,8	534,1	5,8	-85,4	7755,8	534,1	4,9	7750,9
	M + Bi	10569,7	1393,1	8,0	-85,8	10570,7	1393,1	7,1	10563,6
	M + Bo	4939,9	-324,8	3,6	-84,9	7753,6	-324,8	-2810,0	10563,6
2	Membrana	7669,8	8875,4	111,2	1105,5	8875,4	7828,1	-47,2	8922,6
	M + Bi	-2171,2	6167,9	165,7	1000,1	8931,1	5120,6	-9889,3	18820,3
	M + Bo	17510,8	11582,9	56,7	1210,9	18717,5	10535,6	-102,8	18820,3
3	Membrana	7658,2	9207,6	514,6	1193,5	9207,6	7852,3	320,5	8887,1
	M + Bi	-3921,8	5931,6	429,0	686,5	9144,2	4576,3	-11281,5	20426,1
	M + Bo	19238,2	12483,6	600,3	1700,5	20809,6	11128,3	383,9	20426,1
4	Membrana	7643,8	9597,9	1295,3	1278,5	9597,9	7891,6	1047,5	8550,4
	M + Bi	-5942,2	5382,8	125,0	-593,3	8703,6	3676,5	-12814,5	21518,4
	M + Bo	21229,8	13813,0	2465,6	3150,3	23459,9	12106,7	1941,8	21518,4
5	Membrana	8077,3	9640,4	819,4	-1142,7	9640,4	8252,9	643,7	8996,7
	M + Bi	-4918,7	5795,7	192,8	-146,2	9093,6	4408,2	-12432,3	21525,7
	M + Bo	21073,3	13485,1	1445,9	-2139,2	22716,4	12097,6	1190,5	21525,7
6	Membrana	8094,5	9462,2	218,4	-1049,4	9462,2	8231,9	81,0	9381,2
	M + Bi	-3119,5	6322,4	236,1	-844,5	9483,6	5092,1	-11137,0	20620,2
	M + Bo	19308,5	12602,0	200,7	-1254,3	20680,2	11371,7	59,6	20620,2
7	Membrana	8108,3	9356,8	30,9	-958,2	9356,8	8220,4	-81,3	9438,0
	M + Bi	-1512,9	6674,6	70,6	-944,8	9396,5	5538,2	-9702,5	19098,9
	M + Bo	17729,5	12039,0	-8,9	-971,6	18978,0	10902,6	-121,0	19098,9
8	Membrana	8141,1	5960,3	-3,2	247,8	8148,6	5960,3	-10,7	8159,3
	M + Bi	6290,0	5381,3	16,5	250,0	8168,3	5381,3	-1861,8	10030,1
	M + Bo	9992,2	6539,3	-22,9	245,7	9999,7	6539,3	-30,5	10030,1

Fonte: Autor

Tabela 5. 2 - Categorização de tensão

	Componente	SCL	SI (Pa)	Classificação	Limite	Atende a ASME ?
<b>Cone</b>	Membrana	3	8887,10	Pl	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	3	20426,10	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim
<b>Cilindro</b>	Membrana	7	9438,00	Pl	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	5	21525,70	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim

Fonte: Autor

### 5.1.2. Interseção Cilindro-cilindro Com Uma Razão d/d Alta

Para a realização da análise de tensões elásticas, se faz um estudo de malha para verificar a influência desta na qualidade dos resultados. Estuda-se três novas malhas, que são refinadas, partindo da criada a partir da utilizada no WRC 429 (ilustrada no capítulo 4). Procura-se aumentar o número dos elementos entre malhas em 50%, buscando a melhor qualidade de resposta.

A Tabela 5.3 apresenta informações das quatro malhas estudadas. A Figura 5.2 ilustra a diferença na densidade de malha entre a primeira e quarta malha.

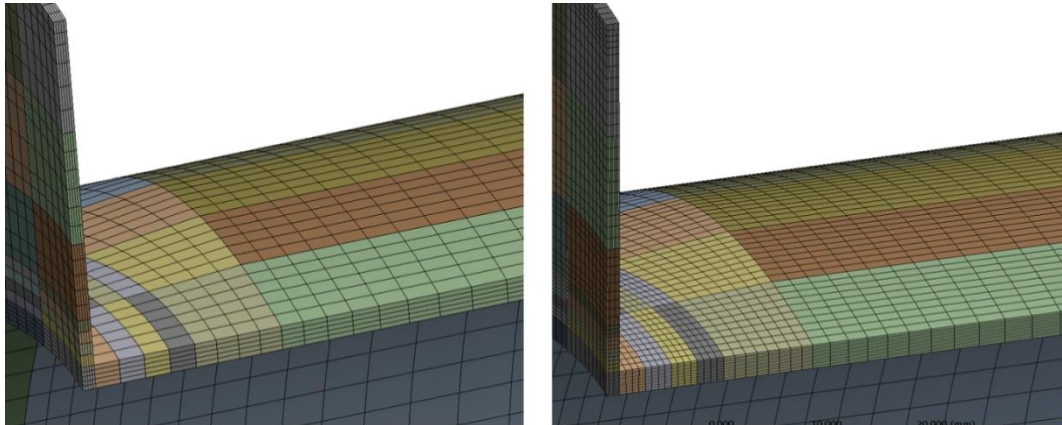
Tabela 5. 3 - Informação de malha

Malha	Nº de elementos	Nº de nós	Elementos pela espessura
<b>1</b>	53715	251282	5
<b>2</b>	88086	402200	6
<b>3</b>	131624	583724	8
<b>4</b>	243940	1060739	10

Fonte: Autor

A Tabela 5.4 apresenta a intensidade de tensão linearizada para as SCL utilizadas no processo de verificação. As diferenças das tensões entre malhas são mínimas, não chegando a 1%, o que mostra que a malha não influenciou significativamente nas tensões e que a malha 1 com cinco elementos pela espessura é suficiente para a realização da análise de tensão. Embora haja a recomendação do mínimo de elementos finitos a se utilizar em cilindros pressurizados ser de três elementos através da espessura [29], refina-se a partir da malha do documento base (cinco) e esta condição se mostra suficiente.

Figura 5. 2 - Malha 1 e malha 4



Fonte: Autor

Tabela 5. 4 - Diferença entre malhas

		<b>Intensidade de Tensão (MPa)</b>						
<b>Parametro</b>		<b>Malha 1</b>	<b>Malha 2</b>	<b>Dif (%)</b>	<b>Malha 3</b>	<b>Dif (%)</b>	<b>Malha 4</b>	<b>Dif (%)</b>
SCL 1	M	73,79	73,70	0,11	73,75	0,06	73,73	0,02
	M + Bi	154,61	155,20	0,38	155,27	0,05	155,27	0,00
	M + Bo	80,29	81,68	1,74	81,68	0,00	81,69	0,01
SCL 2	M	95,18	96,15	1,02	96,31	0,17	96,31	0,00
	M + Bi	178,79	176,55	1,25	176,41	0,08	176,38	0,02
	M + Bo	101,21	99,38	1,81	99,14	0,24	99,10	0,05
SCL 3	M	125,64	125,01	0,50	124,78	0,18	124,73	0,04
	M + Bi	196,58	198,90	1,18	199,51	0,31	199,57	0,03
	M + Bo	122,44	124,56	1,73	125,06	0,40	125,09	0,02
SCL 4	M	88,02	87,92	0,11	87,03	1,01	86,65	0,43
	M + Bi	211,41	210,42	0,47	214,24	1,82	214,94	0,33
	M + Bo	198,95	199,07	0,06	201,83	1,39	202,63	0,40
SCL 5	M	56,80	56,66	0,25	57,95	2,28	58,13	0,31
	M + Bi	201,91	201,53	0,19	196,85	2,32	196,03	0,42
	M + Bo	175,04	175,57	0,30	168,37	4,10	167,47	0,53
SCL 6	M	35,74	35,64	0,30	36,51	2,46	36,59	0,21
	M + Bi	174,83	174,47	0,21	172,49	1,13	172,06	0,25
	M + Bo	147,53	147,96	0,29	144,48	2,35	144,26	0,15
SCL 7	M	20,24	20,17	0,38	20,84	3,34	20,88	0,19
	M + Bi	148,19	147,91	0,19	146,92	0,67	146,67	0,17
	M + Bo	121,51	121,92	0,34	119,90	1,66	119,90	0,00

Fonte: Autor

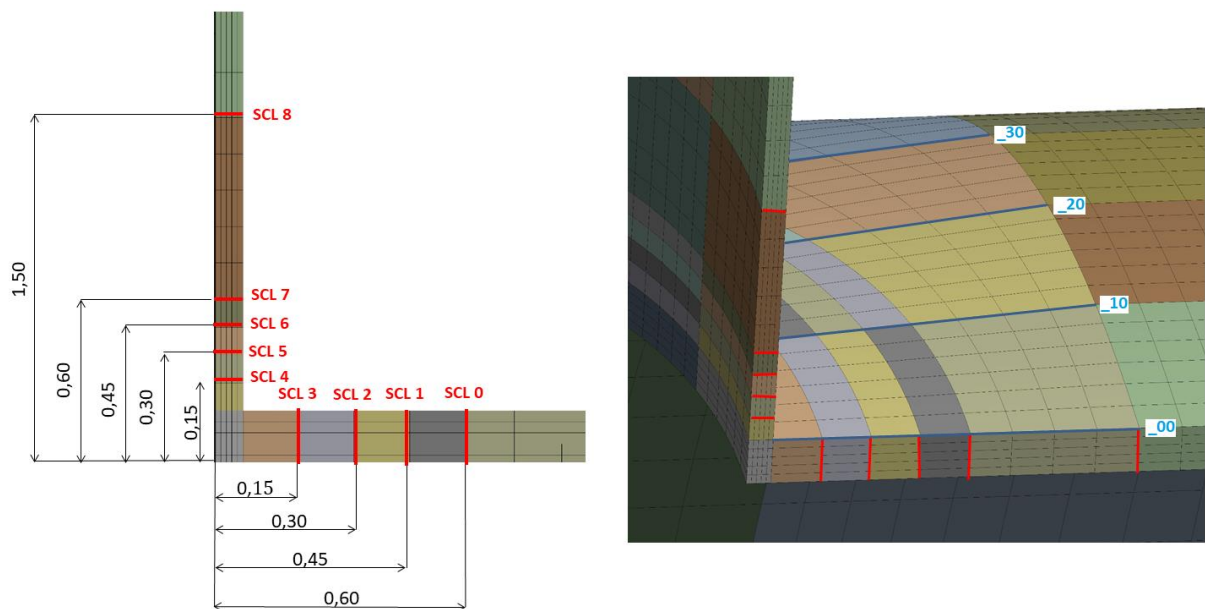
As SCL que serão analisadas seguem os requisitos da ASME, estão fora de elementos de transição e localizadas onde as tensões são maiores em casos de vasos pressurizados: na intersecção de cilindros. As SCL são as mesmas que as sugeridas pelo

WRC 429, com a adição de mais duas, uma em cada cilindro como ilustrado na esquerda da Figura 5.3. Note que as distâncias estão em função de  $\sqrt{R_m \times t}$ .

Assim, o comportamento das tensões é estudado nessas SCL, a cada  $10^\circ$ , partindo do plano longitudinal ( $0^\circ$ ) até o plano transversal ( $90^\circ$ ), uma vez que o conjunto tem dois planos de simetria, conforme ilustrado em azul na direita da Figura 4.11.

Assim, para identificação das SCL, elas serão nomeadas a partir da sua distância da junção e seu ângulo. Por exemplo, a SCL 1\_00 corresponde a SCL a uma distância de 0,25527 cm ( $0,45 \times \sqrt{R_m \times t}$ ) da junção, no plano longitudinal de simetria ( $00^\circ$ ).

Figura 5.3 - SCLs



Fonte: Autor

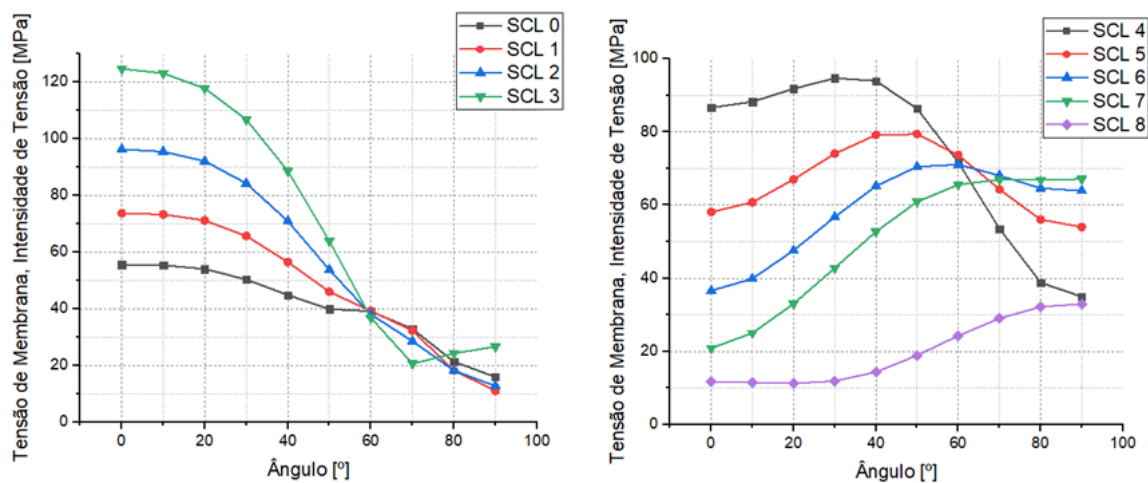
Com a malha estabelecida e as SCLs definidas, as intensidades de tensão linearizadas para as nove SCL, a cada  $10^\circ$ , nos planos de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  são obtidos e estão dispostos no Apêndice A. Assim, o comportamento da tensão ao longo do componente pode ser mapeado.

A Figura 5.4 ilustra o comportamento das tensões de membrana para o cilindro maior, a esquerda, e cilindro menor, a direita. Como esperado, as SCL mais próximas da junção dos cilindros, como SCL 4 e SCL5, apresentam maiores valores de tensões de membrana. Nas SCL de 0 a 3 do cilindro maior tendem a ter sua tensão reduzidas,

conforme o ângulo aumenta. Assim, a maior tensão de membrana ocorre na seção longitudinal ( $0^\circ$ ) do cilindro maior e a menor na seção transversal ( $90^\circ$ ).

Nas SCL do cilindro menor próxima a junção, as tensões de membrana aumentam até aproximadamente o ângulo de  $40^\circ$  e depois sua intensidade é reduzida até  $90^\circ$ . Na SCL 8, longe da descontinuidade numa razão de  $1,5 \times \sqrt{R_m \times t}$ , a tensão de membrana tende a aumentar até o ângulo de  $40^\circ$ .

Figura 5. 4 - Tensão de membrana para o cilindro maior e menor



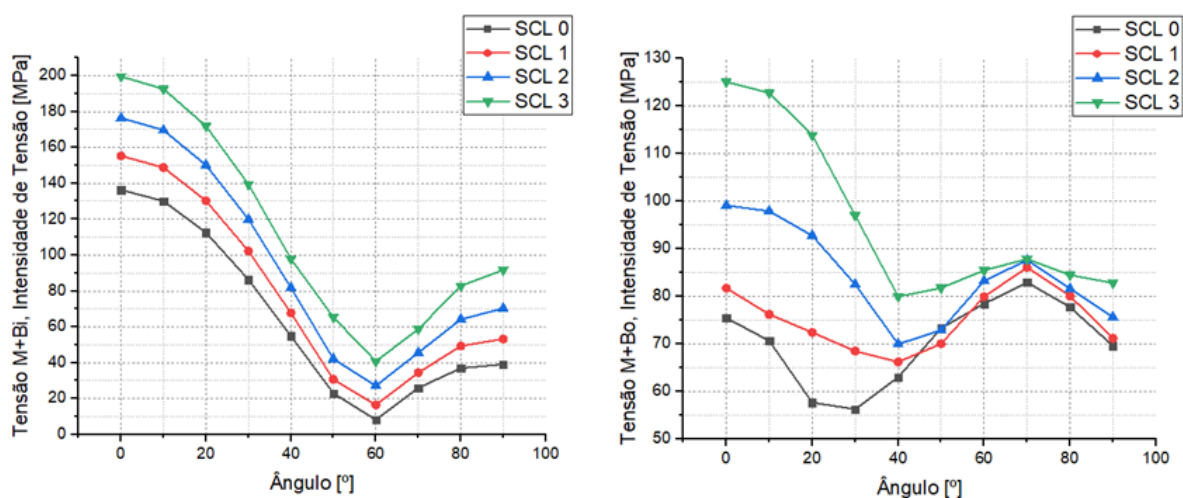
Fonte: Autor

A Figura 5.5 ilustra as tensões de membrana mais flexão na superfície interna, à esquerda, e externa, à direita, do cilindro maior. As tensões de membrana mais flexão são maiores para os pontos analisados próximos da junção de cilindros. As tensões de membrana e flexão na superfície interna apresentam suas máximas tensões localizadas no plano longitudinal ( $0^\circ$ ). Estas reduzem até o ângulo de  $60^\circ$  graus, onde atingem o seu menor valor e voltar a crescer até o plano transversal.

Quanto à tensão de membrana e flexão na superfície externa, estas não apresentam um comportamento tão uniforme quanto as tensões de membrana e flexão internas. As tensões de membrana e flexão na superfície externa diminuem sua intensidade conforme o ângulo aumenta até aproximadamente  $40^\circ$ , onde ocorre outro aumento até  $70^\circ$  e elas voltam a diminuir. As máximas ocorrem no plano longitudinal para a SCL 3 e 2, as duas mais próximas da junção, e no plano de  $70^\circ$  para as SCL 1 e 0. As diferenças entre estas tensões no plano de  $0^\circ$  e  $70^\circ$  são de 9,9 e 5,3%, para SCL 0 e 1 respectivamente.

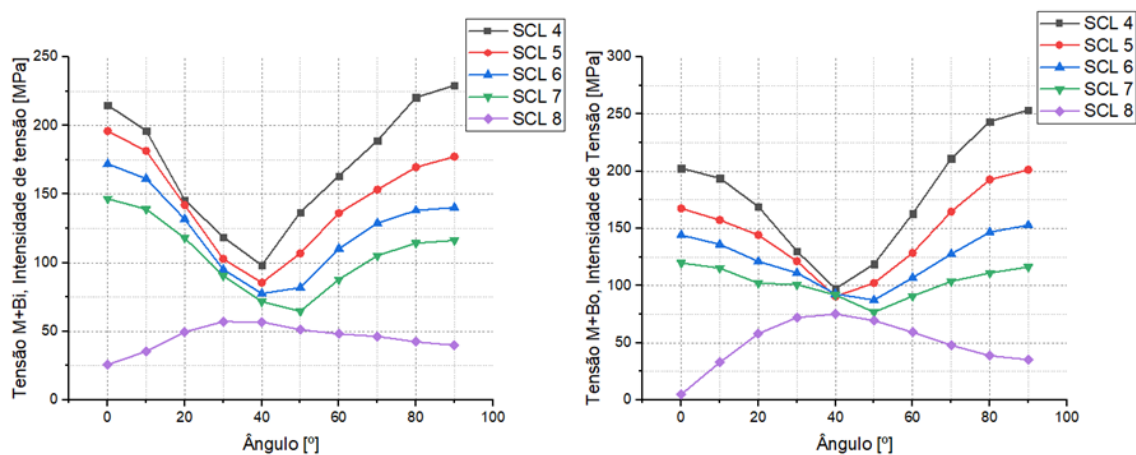
A Figura 5.6 ilustra as tensões de membrana mais flexão na superfície interna, à esquerda, e externa, à direita, do cilindro menor. Para a tensão de membrana mais flexão são maiores para os pontos analisados próximos da junção de cilindros. As tensões de membrana e flexão interna das SCL 4, 5, 6 e 7 apresentam suas máximas tensões localizadas no plano transversal (90°). Estas reduzem até o ângulo de 40 graus, onde atingem o seu menor valor e voltam a crescer até o plano transversal.

Figura 5. 5 - Tensão de membrana mais flexão interna e externa para o cilindro maior



Fonte: Autor

Figura 5. 6 - Tensão de membrana mais flexão para o cilindro menor



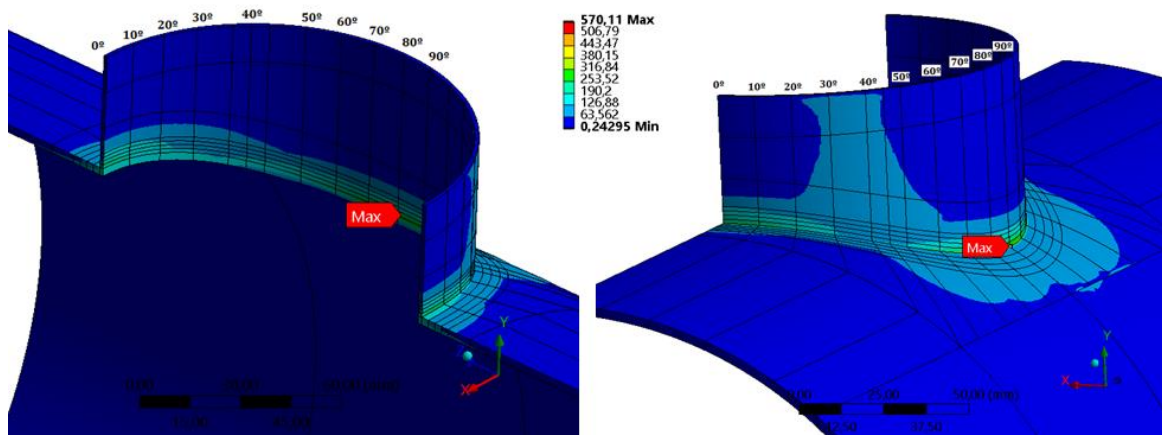
Fonte: Autor



Devido à SCL 8 estar longe da região de transição, seu comportamento é diferente. Apresentando seu máximo valor para os dois casos no ângulo de 40°, que é onde é observada uma faixa com valores maiores de tensão.

Esta faixa de tensão e o comportamento da intensidade de tensão na Figura 5.7.

Figura 5.7 - Intensidade de tensão para o cilindro menor



Fonte: Autor

### 5.1.2.1. Categorização e classificação das Tensões

A categorização de tensão é feita para as maiores tensões, em ambos cilindros e apresentadas na Tabela 4.12.

Tabela 4.10 - Categorização de tensão

	Componente	SCL	SI (MPa)	Classificação	Limite	Atende a ASME ?
<b>Cilindro Maior</b>	Membrana	3_00	124,73	Pl	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	3_00	199,57	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim
<b>Cilindro Menor</b>	Membrana	4_40	94,70	Pl	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	4_90	253,62	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim

Fonte: Autor

Para o cilindro maior a SCL 3 é a mais solicitada, conforme esperado, uma vez que é a SCL mais próxima da junção. Seu maior valor de membrana e membrana mais flexão ocorrem no plano longitudinal e possuem o valor de, respectivamente, 124,73 e 199,57 MPa. A tensão de membrana é classificada como primária localizada, e a de membrana mais flexão como primária mais secundária, devido à sua proximidade com a junção.

Porém, uma vez que a tensão de projeto  $S_m$  para o material vale aproximadamente 180MPa (26667 psi), a tensão de membrana e de membrana mais flexão passaria na análise de acordo com os requerimentos ASME, simplesmente como tensão de membrana generalizada (limitadas a  $S_m$ ) e como tensão primária de membrana mais flexão (limitadas a  $1,5x S_m$ , ou 275MPa).

O mesmo ocorre para a SCL 4 localizada no cilindro menor. Onde a maior tensão de membrana ocorre no plano de  $40^\circ$ , 94,70 MPa e a tensão maior de membrana mais flexão no plano transversal, 253,62 MPa.

### 5.1.3. Pequeno Bocal Angular ao Vaso

Para a realização da análise de tensões elásticas, se faz um estudo de malha para verificar a influência desta na qualidade dos resultados. Estuda-se três novas malhas, a partir da criada no capítulo 4, onde se reproduz a malha utilizada na referência WRC 429. Procura-se aumentar o número dos elementos entre malhas em 50%, chegando a uma malha de 127000 elementos, buscando a melhor qualidade de resposta.

A Tabela 5.5 condensa as informações das quatro malhas estudadas. A Figura 5.8 ilustra a diferença na densidade de malha entre a primeira e quarta malha.

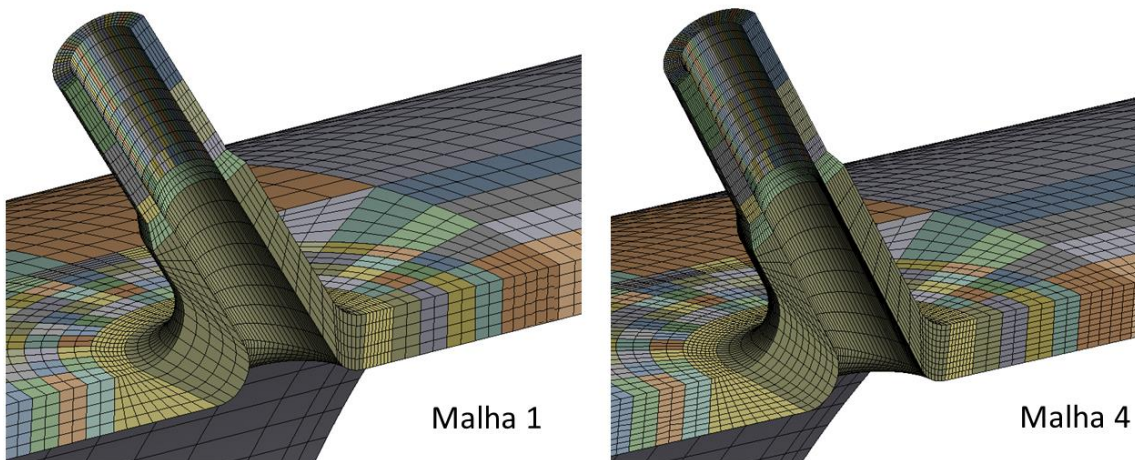
Tabela 5. 5 - Informação de malha

Malha	Nº de elementos	Nº de nós	Elementos pela espessura
1	39260	184449	5
2	65982	297994	6
3	81416	362790	8
4	127770	558296	10

Fonte: Autor

O parâmetro de comparação para a análise de convergência usado é a intensidade de tensão linearizada para nove SCL, cujas informações são fornecidas a seguir. A Tabela 5.6 apresenta as componentes da intensidade de tensão para cada malha, bem como suas diferenças. Novamente, o refino de malha não se mostra necessário, pois as tensões nas SCL não variaram com o aumento no números de elementos. A malha 1 se mostra suficientemente refinada para a análise de tensões.

Figura 5.8 - Malha 1 e malha 4

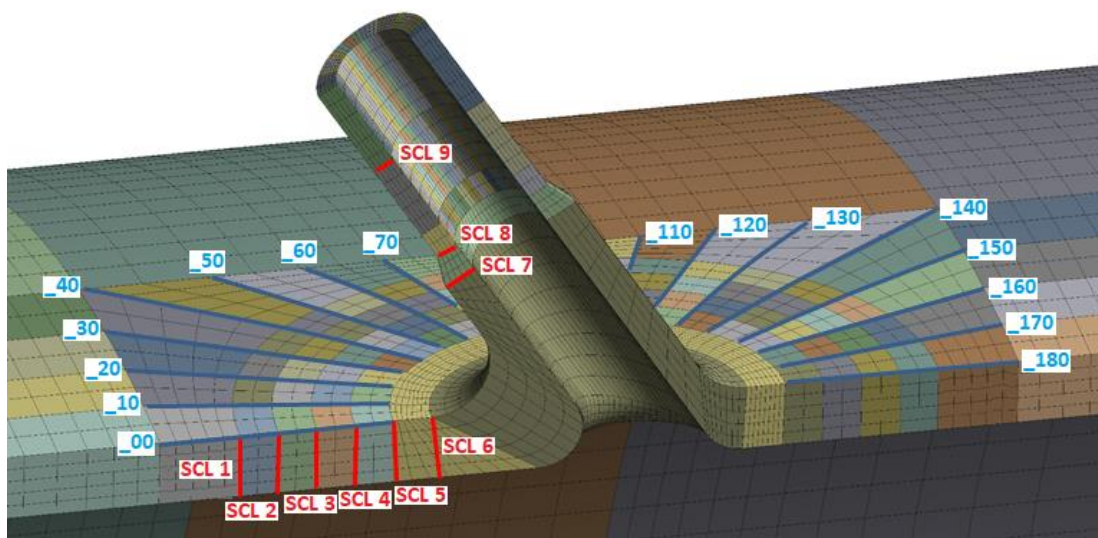


Fonte: Autor

As SCL seguem as recomendações do código ASME: estão alocadas em elementos estruturais. Assim, nove SCL são criadas. Seis SCL são criadas no vaso, espaçadas a  $0,02 \times \sqrt{R_m \times t}$  da curva interna da transição vaso-bocal e três SCL no bocal, sendo duas na transição de elemento de transição e estrutural e uma espaçada de  $2 \times \sqrt{R_m \times t}$  da última (SCL 8). Elas são indicadas na Figura 5.9, em vermelho.

Assim, a intensidade de tensão é analisada para as SCL a cada  $10^\circ$ , em planos variando de 10 em  $10^\circ$ , de 0 a  $180^\circ$ , uma vez que a geometria apresenta apenas um eixo de simetria. Os planos estão ilustrados em azul na Figura 5.9.

Figura 5.9 - SCL e planos



Fonte: Autor

Tabela 5. 6 - Diferença de malhas

Intensidade de tensão (MPa)								
SCL	Componente	Malha 1	Malha 2	Dif(%)	Malha 3	Dif (%)	Malha 4	Dif(%)
1	M	276,51	276,49	0,01	276,52	0,01	276,49	0,01
	M + Bi	300,07	300,09	0,01	300,15	0,02	300,06	0,03
	M + Bo	252,96	252,90	0,02	252,89	0,00	252,92	0,01
2	M	277,36	277,34	0,01	277,34	0,00	277,34	0,00
	M + Bi	303,61	303,63	0,01	303,66	0,01	303,58	0,03
	M + Bo	252,20	251,06	0,45	251,03	0,01	251,10	0,03
3	M	278,49	278,48	0,00	278,48	0,00	278,48	0,00
	M + Bi	308,74	308,75	0,00	308,79	0,01	308,71	0,03
	M + Bo	248,24	248,20	0,02	248,18	0,01	248,26	0,03
4	M	279,77	279,76	0,00	279,76	0,00	279,76	0,00
	M + Bi	315,83	315,84	0,00	315,88	0,01	315,79	0,03
	M + Bo	243,71	243,69	0,01	243,64	0,02	243,74	0,04
5	M	281,07	281,07	0,00	280,95	0,04	281,04	0,03
	M + Bi	326,77	326,77	0,00	326,65	0,04	326,67	0,01
	M + Bo	235,36	235,37	0,00	235,24	0,06	235,41	0,07
6	M	279,86	279,78	0,03	279,41	0,13	279,54	0,05
	M + Bi	345,84	345,89	0,01	345,23	0,19	345,26	0,01
	M + Bo	214,10	213,92	0,08	213,85	0,03	214,09	0,11
7	M	15,22	15,22	0,05	15,19	0,20	15,19	0,05
	M + Bi	20,81	20,80	0,04	20,73	0,34	20,77	0,20
	M + Bo	9,82	9,84	0,18	9,86	0,18	9,80	0,61
8	M	21,63	21,61	0,08	21,62	0,01	21,56	0,24
	M + Bi	26,28	26,31	0,12	26,30	0,03	26,28	0,06
	M + Bo	17,19	17,13	0,34	17,15	0,09	17,07	0,48
9	M	23,19	23,19	0,01	23,19	0,00	23,15	0,19
	M + Bi	31,98	31,98	0,00	31,98	0,01	31,92	0,20
	M + Bo	14,40	14,41	0,02	14,40	0,03	14,38	0,17

Fonte: Autor

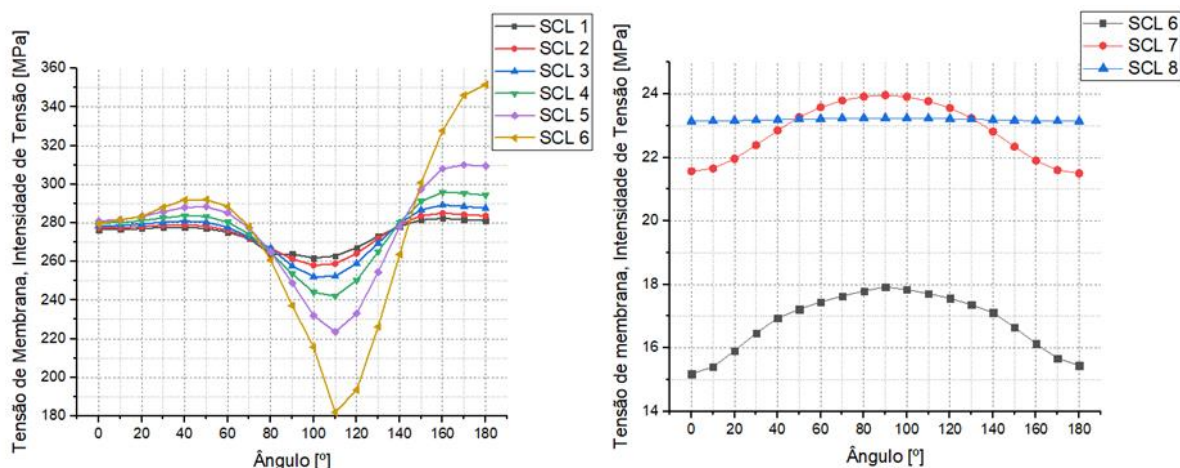
### 5.1.3.1. Mapeamento de Tensões

As tensões são analisadas nos planos do 0 a 180°, a cada 10°, e estão apresentadas no Apêndice B.

A Figura 5.10 ilustra o comportamento da tensão de membrana conforme a mudança no ângulo, a direita para o vaso e a esquerda para o bocal. A maior tensão de membrana ocorre no plano longitudinal (180°) para o vaso e no plano transversal (90°) para o bocal. A variação da tensão ao variar dos ângulos analisados é maior para as SCL mais próximas da junção: quanto maior a distância à descontinuidade, mais linear se torna

o comportamento da tensão ao redor do bocal. Nota-se que a SCL 8, distante a  $2 \times \sqrt{R_m} \times t$  da transição, apresenta um comportamento quase linear em função dos ângulos.

Figura 5. 10 - Tensão de membrana



Fonte: Autor

As tensões de membrana ao lado do vaso nas descontinuidades tendem a aumentar de 0 a 45°, diminuir de 45 a 110° e aumentar novamente até 180°, alcançando seu maior valor. A tensão de membrana para as SCL de 1 a 6 diminuem de 0 a 110° a e aumentam novamente até 180°. Quanto mais próximo da descontinuidade, maior a amplitude da tensão em relação aos planos.

O comportamento da tensão de membrana no bocal é mais previsível, nas SCL 6 e 7 a tensão aumenta até 90° (18 e 11% respectivamente) e diminui até 180, chegando ao mesmo valor que a 0°. Já a SCL 8 não sofre mudança considerável.

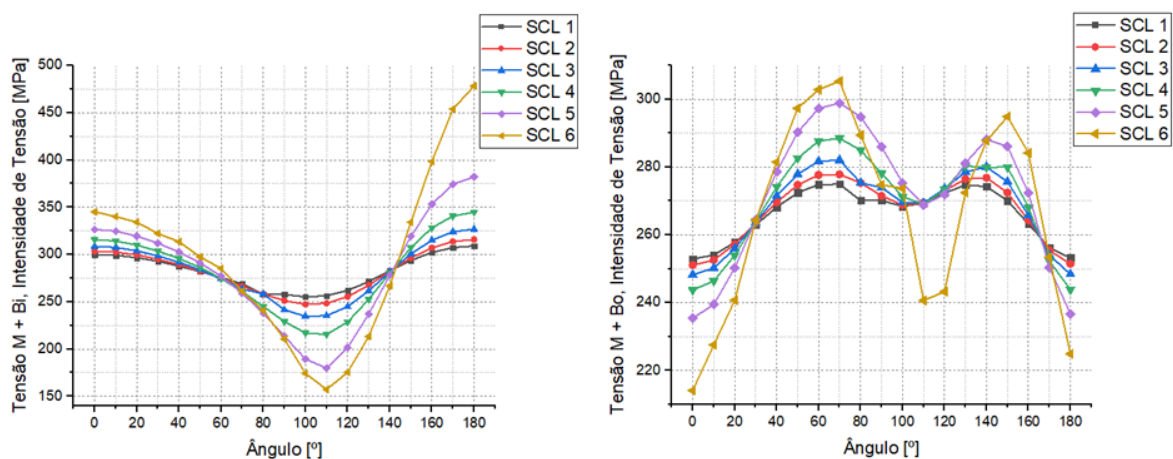
A Figura 5.11 ilustra o comportamento da tensão de membrana mais flexão no vaso, na superfície interna (à esquerda) e na superfície externa (à direita). A tensão de membrana e flexão na superfície interna nas SCL 1, 2, 3, 4, 5, e 6 sofrem uma queda até o ângulo de 110° em seguida de um aumento até 180°. Novamente, as diferenças são maiores conforme mais perto está o ponto analisado da descontinuidade.

A tensão de membrana e flexão na superfície externa sofre um aumento até 70°, em seguida sofre uma redução até o ângulo de 110°, um aumento até aproximadamente 140° e reduz até 180° novamente.

A Figura 5.12 ilustra o comportamento da tensão de membrana mais flexão no bocal, na superfície interna (a esquerda) e na superfície externa (a direita). A tensão de

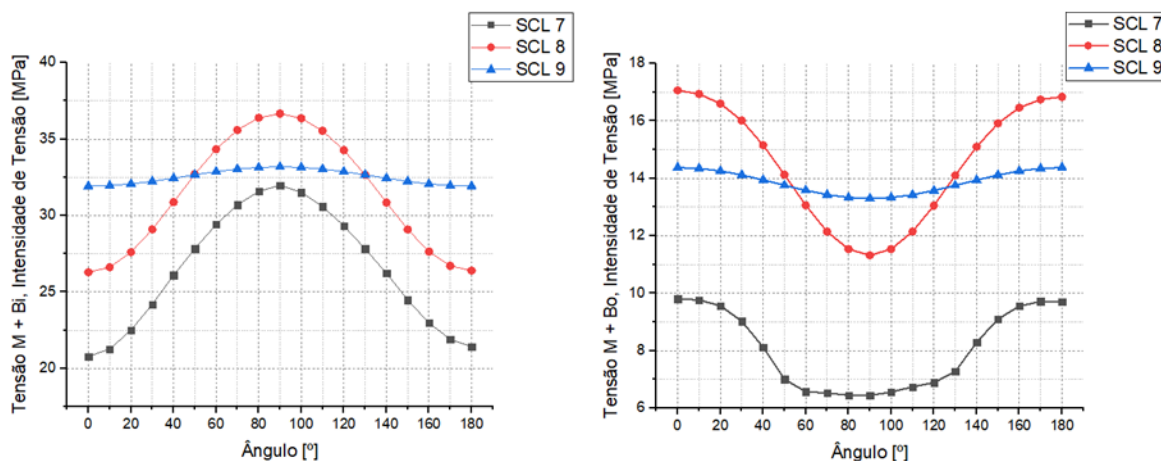
membrana e flexão na superfície interna nas SCL 7, 8 e 9 sofrem um aumento do ângulo de 0 a 90° e retornam praticamente para o mesmo valor de 0° em 180°. As diferenças são maiores conforme se aproximam da descontinuidade. Quanto a tensão de membrana e flexão na superfície externa, elas sofrem uma queda no ângulo de 0 a 90° e retornam praticamente para o mesmo valor de 0° em 180°.

Figura 5. 11 - Tensão de membrana mais flexão para o vaso



Fonte: Autor

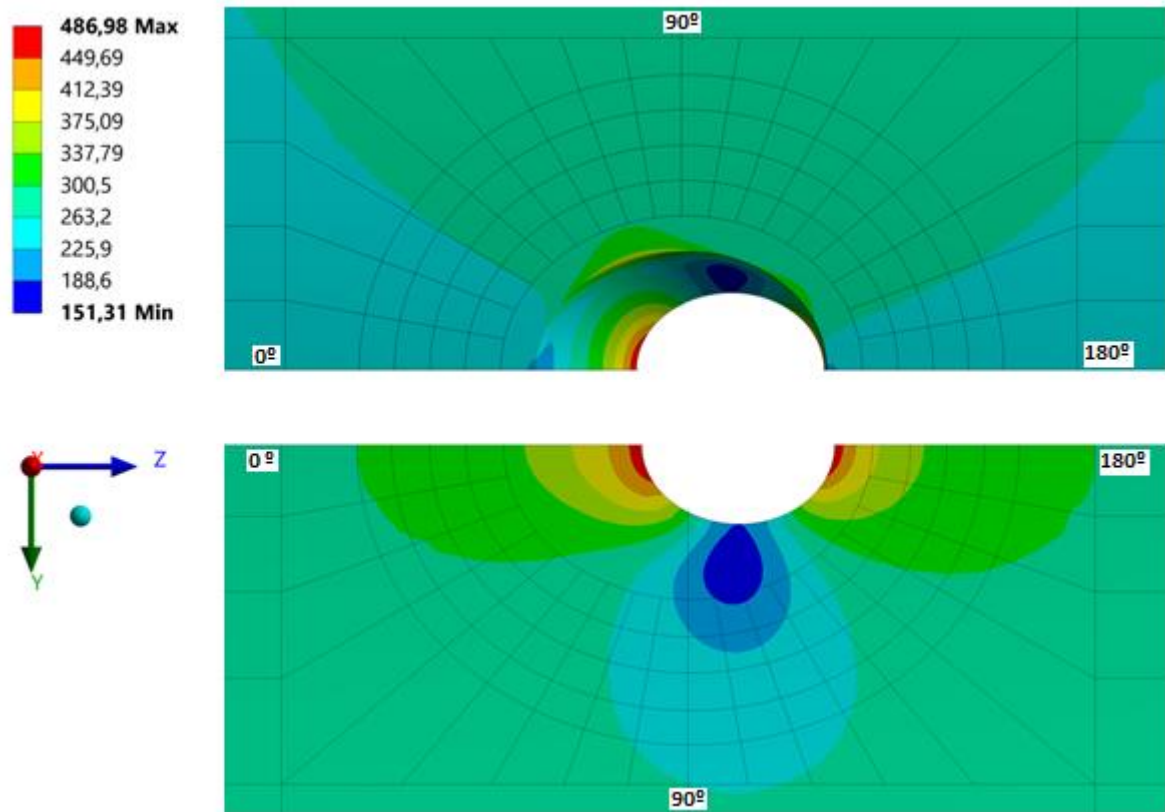
Figura 5. 12 - Tensão de membrana mais flexão para o bocal



Fonte: Autor

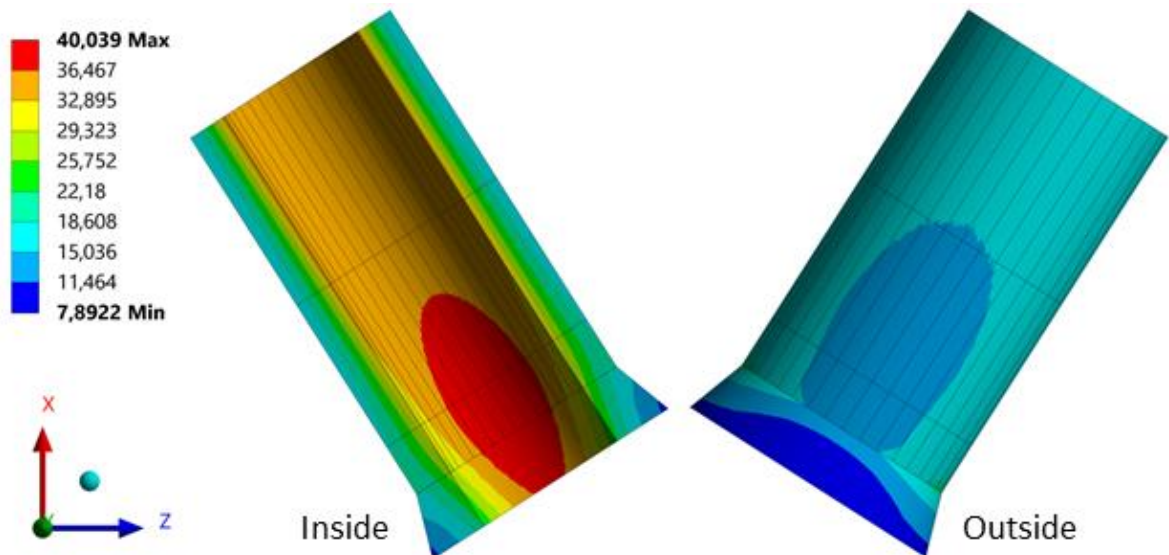
A Figura 5.13 e a Figura 5.14 ilustra a intensidade de tensão para o vaso e bocal, respectivamente. Assim, torna-se mais fácil visualizar o comportamento das tensões e identificação com os gráficos acima.

Figura 5. 13 - Intensidade de tensão para o vaso



Fonte: Autor

Figura 5. 14 - Intensidade de tensão para o bocal



Fonte: Autor

### 5.1.3.2. *Categorização e Classificação das Tensões*

A categorização de tensão é feita para as maiores tensões, para o vaso de pressão e bocal e apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5. 7 - Categorização das tensões

	Componente	SCL	SI (MPa)	Classificação	Limite	Atende a ASME ?
<b>Vaso</b>	Membrana	5_170	310,03	PI	1,5 x Sm = 275 MPa	Não
	Membrana + Flexão	5_170	374,53	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim
<b>Bocal</b>	Membrana	7_90	23,96	PI	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	8_90	36,66	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim

Fonte: Autor

As SCL que apresentam maiores tensões de membrana e membrana mais flexão para o vaso e bocal são, respectivamente, as SCL 7 e 8. Como a SCL 7 está entre elementos estruturais e de transição, a tensão analisada pode ou não ser considerada válida. E, devido a sua localização, ela apresenta um caráter de tensão secundária. Como a tensão no bocal não ultrapassa os 40 MPa, ele atende os requisitos ASME.

Quanto ao bocal, a SCL onde ocorre a maior tensão é a SCL 6. Como ela está entre os elementos estruturais e de transição, pode não ser considerada válida, dependendo do analista. Como as tensões nesta SCL são muito elevadas (346,16 MPa de membrana e 453,91 MPa de membrana mais flexão) e não passam de acordo com os requisitos ASME, estuda-se a próxima SCL que está alocada apenas em elementos estruturais: a SCL 5.

Todavia, a SCL 5, como apresentado na Tabela 5.7, também não atende aos requisitos ASME de tensão de membrana localizada.

Portanto, para adequação com os critérios ASME, a tensão deve ser reduzida de forma a ser menor que seu limite imposto. Como a tensão é um resultado da geometria e da carga aplica, para atender aos critérios da ASME, sugere-se reduzir a pressão interna (uma vez que é o único carregamento atuante). Outra sugestão para que a condição de operação seja segura, partindo do pressuposto que a peça ainda não foi fabricada, seria mudar o material do bocal para um com a tensão de escoamento maior, ou, até mesmo, a mudança da geometria.



#### 5.1.4. Interseção Radial Bocal-cilindro

A partir da malha criada na Figura 4.8, no item 4.1.4 (semelhante à do WRC 429) se realiza um refinamento, aumentando em média 50% o número de elementos. Criam-se três novas malhas, até atingir um número de 214050 elementos. A Figura 5.15 ilustra a diferença na densidade de malha para as malhas 1 e 4.

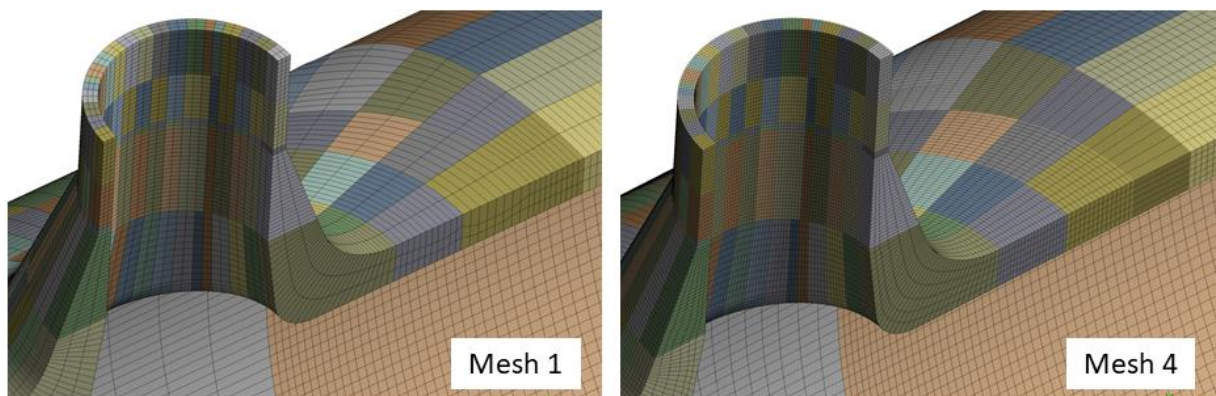
A Tabela 5.8 apresenta informações sobre as presentes malhas, tais como número de elementos, nós e elementos pela espessura.

Tabela 5. 8 - Informação de malha

Malha	Nº de elementos	Nº de nós	Elementos pela espessura
1	67497	341628	3
2	100528	483173	4
3	141310	657432	5
4	214050	973078	6

Fonte: Autor

Figura 5. 15 - Malha 1 e malha 4



Fonte: Autor

O parâmetro de comparação para a análise convergência usado foi a intensidade de tensão nas SCL, essas seguem o requisito ASME de serem localadas em elementos estruturais. São sete SCL: quatro no vaso, espaçadas de  $0,5 \times \sqrt{R_m \times t}$  a partir do fim do

raio de transição vaso-bocal e três no bocal, espaçadas de  $1,5 \times \sqrt{R_m \times t}$  a partir do fim da região de transição na espessura. Elas são ilustradas na Figura 5.16, em vermelho.

As diferenças de intensidade de tensão para as sete SCL entre malhas são apresentadas na Tabela 5.9 e nota-se que o refinamento não influencia significativamente as tensões linearizadas.

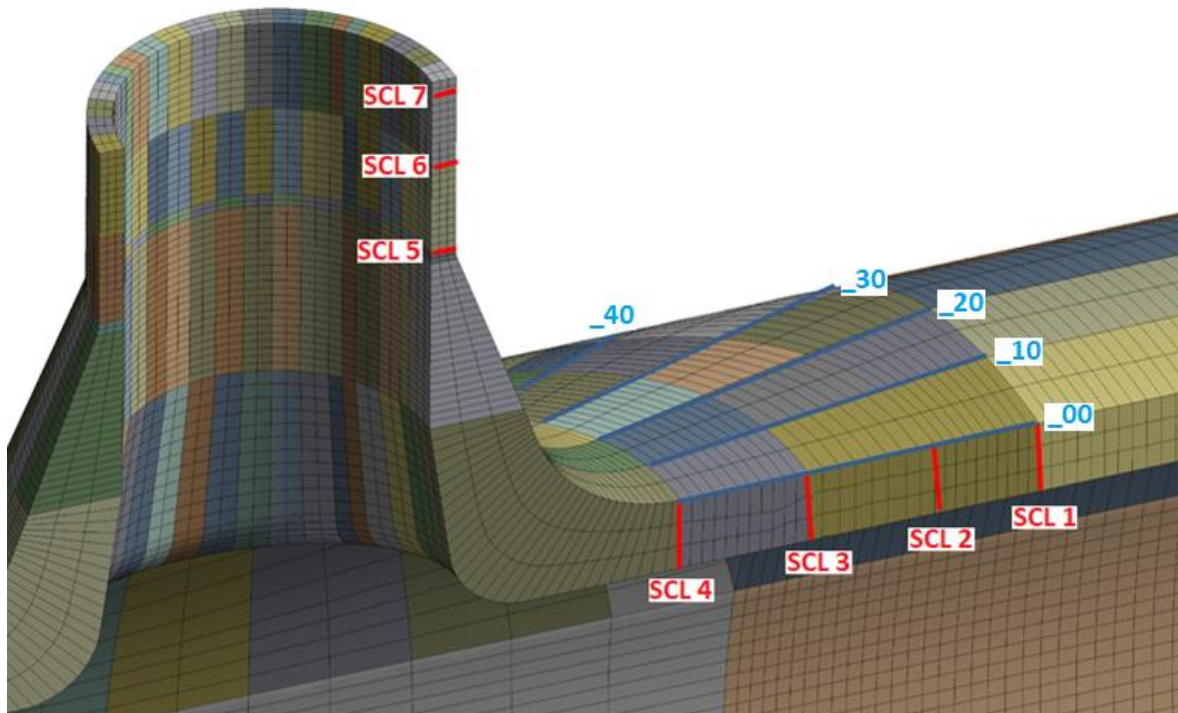
Tabela 5.9 - Diferença de tensões

SCL	Componente	Intensidade de tensão (MPa)						
		Malha 1	Malha 2	Dif (%)	Malha 3	Dif (%)	Malha 4	Dif (%)
1	Membrana	185,62	185,63	0,01	185,63	0,00	185,60	0,02
	M+Bo	149,67	149,66	0,01	149,67	0,01	149,65	0,01
	M+Bi	221,57	221,59	0,01	221,60	0,00	221,55	0,02
2	Membrana	187,37	187,38	0,01	187,38	0,00	187,36	0,01
	M+Bo	144,61	144,61	0,00	144,62	0,01	144,60	0,01
	M+Bi	230,14	230,15	0,00	230,14	0,00	230,11	0,01
3	Membrana	194,09	194,10	0,01	194,10	0,00	194,08	0,01
	M+Bo	139,35	139,36	0,01	139,37	0,01	139,36	0,01
	M+Bi	248,83	248,84	0,00	248,83	0,00	248,80	0,01
4	Membrana	208,86	208,93	0,03	208,85	0,04	208,92	0,03
	M+Bo	135,03	134,95	0,06	134,95	0,00	134,91	0,03
	M+Bi	282,76	283,00	0,08	282,83	0,06	283,01	0,06
5	Membrana	96,14	96,21	0,07	96,23	0,02	96,25	0,03
	M+Bo	126,53	126,50	0,02	126,49	0,01	126,54	0,04
	M+Bi	66,06	66,26	0,31	66,32	0,10	66,34	0,02
6	Membrana	116,25	116,24	0,01	116,24	0,00	116,23	0,01
	M+Bo	148,99	148,97	0,01	148,95	0,01	148,93	0,01
	M+Bi	83,51	83,52	0,01	83,53	0,02	83,54	0,01
7	Membrana	112,73	112,66	0,06	112,68	0,02	112,59	0,08
	M+Bo	152,93	152,95	0,01	152,91	0,03	152,92	0,01
	M+Bi	72,53	72,37	0,22	72,45	0,11	72,27	0,24

Fonte: Autor

A análise de tensão é realizada com as configurações da malha 1 e as tensões são analisadas nas sete SCL a cada 10°, como indicado na Figura 5.16, em azul. Devido a simetria em dois eixos do modelo, a análise será feita do ângulo 0 ao ângulo 90.

Figura 5. 16 - SCLs



Fonte: Autor

#### 5.1.4.1. Mapeamento de Tensão

As intensidades de tensão são mapeadas e analisadas nos planos do 0 a 90°, a cada 10°, e estão dispostas no Apêndice C. Mapeia-se então o comportamento de seus componentes linearizados.

A Figura 5.17 ilustra o comportamento da tensão de membrana conforme a mudança no ângulo, à direita para o vaso e à esquerda para o bocal. A maior tensão de membrana ocorre no plano transversal (90°) para o bocal, como previsto nos casos anteriores. Para o vaso, ocorre no plano de 30°.

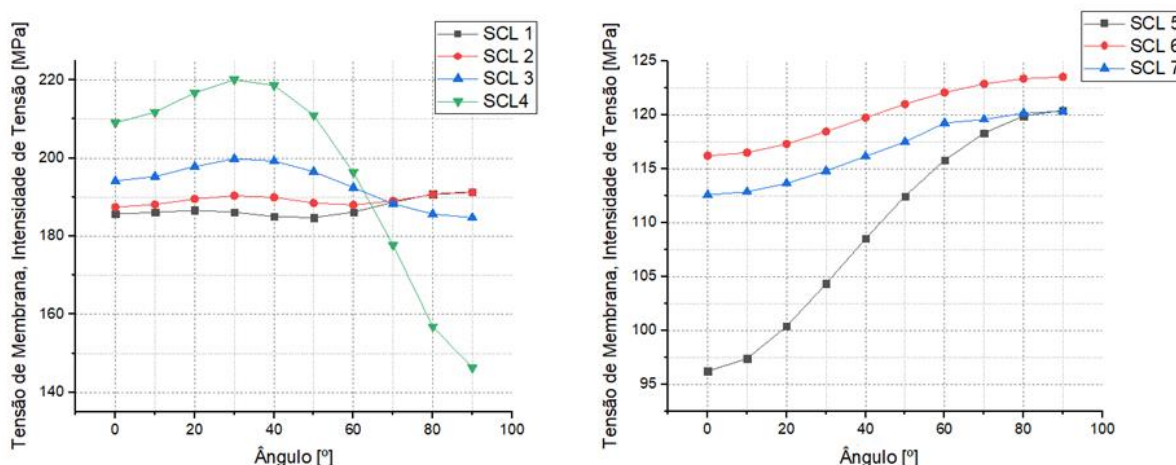
Como notado nos casos anteriores, quanto mais próximo a SCL estiver da junção, maior a variação de tensão em função da posição angular.

A Figura 5.18 ilustra o comportamento da tensão de membrana mais flexão para o vaso conforme a mudança no ângulo, à direita na superfície interna e à esquerda na superfície externa.

Quanto à tensão de membrana mais flexão na superfície interna, a maior tensão ocorre no plano longitudinal (0°) e a menor não ocorrem no plano transversal (90°) para

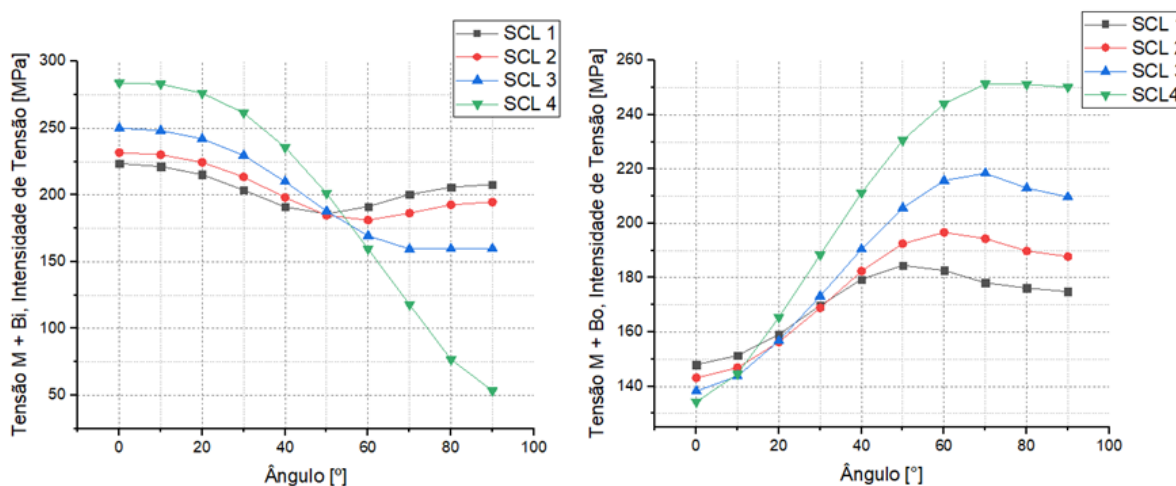
as SCL 1 e 2. Sobre a tensão na superfície externa de membrana mais flexão, a menor tensão ocorre no plano longitudinal e a maior ocorre no plano de 60° para a SCL 1 e 2 e no plano de 70° para as SCL 3 e 4 e após atingirem seus maiores valores, seu valor diminui. Seu comportamento pode ser observado na Figura 5.20.

Figura 5. 17 - Tensão de membrana



Fonte: Autor

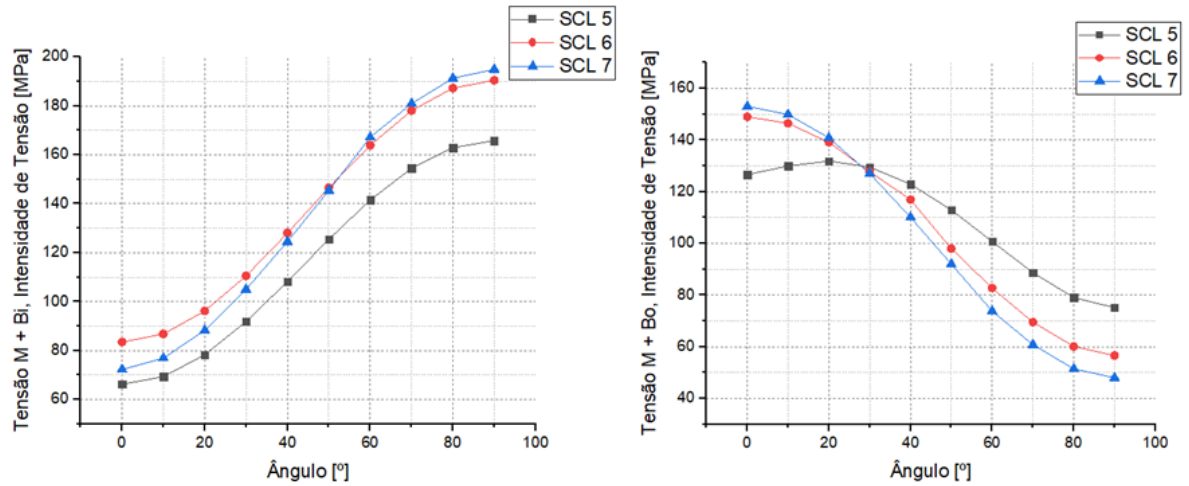
Figura 5. 18 - Tensão de membrana mais flexão para o vaso



Fonte: Autor

A Figura 5.19 ilustra a tensão de membrana mais flexão para o bocal na superfície interna, a esquerda, e na superfície externa a direita. A tensão de membrana mais flexão na superfície interna atinge seu maior valor no plano longitudinal (90°) e menor valor no plano transversal (90°). O oposto ocorre para a tensão na superfície externa.

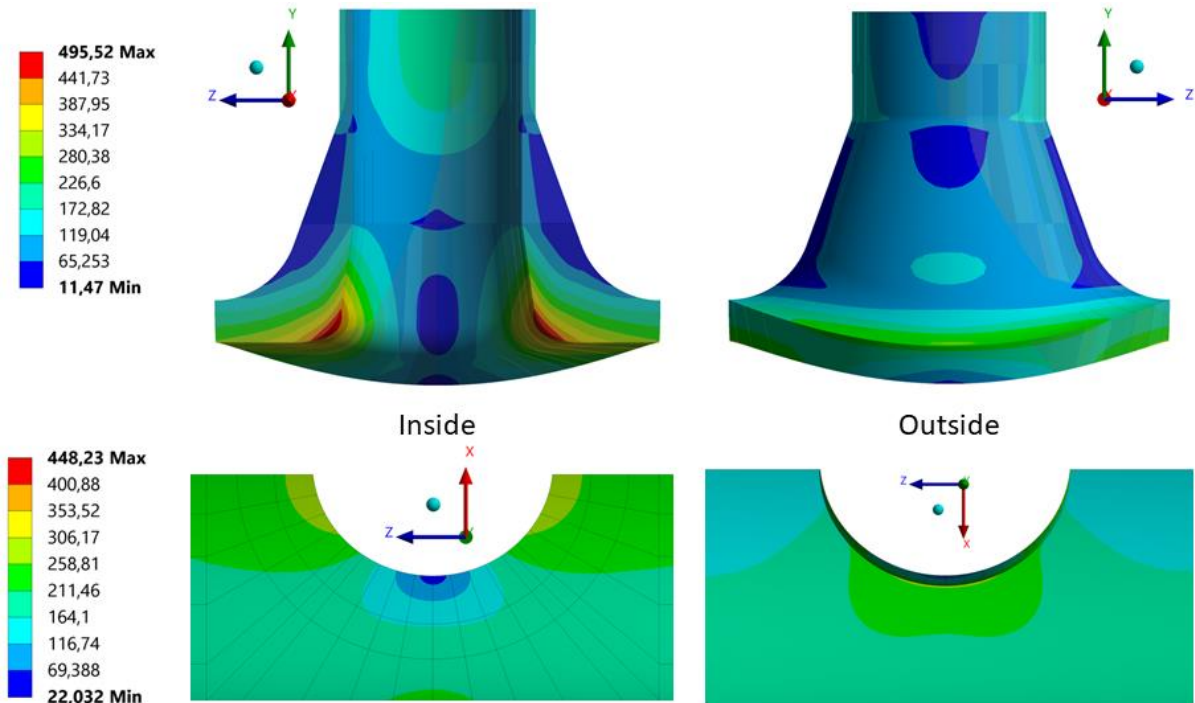
Figura 5. 19 - Tensão de membrana mais flexão para o bocal



Fonte: Autor

A Figura 5.20 ilustra o comportamento da intensidade de tensão descrito acima para o bocal. Note as linhas a cada 10°, para facilitarem na leitura da imagem e compreensão dos dados.

Figura 5. 20 - Intensidade de tensão



Fonte: Autor

### 5.1.4.2. *Categorização e Classificação das Tensões*

A categorização de tensão é feita para as maiores tensões, para o vaso de pressão e bocal e apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5. 10 - Categorização das tensões

	<b>Componente</b>	<b>SCL</b>	<b>SI (MPa)</b>	<b>Classificação</b>	<b>Limite</b>	<b>Atende a ASME ?</b>
<b>Vaso</b>	Membrana	4_30	220,12	Pl	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	4_00	283,91	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim
<b>Bocal</b>	Membrana	6_90	123,55	Pl	1,5 x Sm = 275 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	7_90	194,91	P + Q	3,0 x Sm = 550 MPa	Sim

Fonte: Autor

Para o vaso de pressão, as maiores tensões de membrana e membrana mais flexão se encontram na SCL 4. Como está na transição de elementos estruturais e de transição, pode ou não ser considerada válida, a depender do analista, porque ela não se encontra totalmente entre elementos estruturais. Devido à sua localização, as tensões presentes na SCL 4 apresentam um caráter secundário e são classificadas como membrana localizada e primária mais secundárias.

Com relação ao bocal, a maior tensão de membrana e membrana mais flexão ocorre na SCL 6 e 7, respectivamente, no plano transversal (90°). Ambas apresentam parcela secundária devido a suas localizações. Embora os limites sejam maiores devido a parcela secundária, ambos atenderiam o requisito ASME mesmo se fossem tensões apenas primárias.

## 5.2. CÓDIGO ASME, DIV 2, MANUAL DE EXEMPLO DE PROBLEMAS (PTB-3)

Embora o manual exemplo de problemas do código ASME discuta a aplicabilidade das SCL, ela não discute a classificação e categorização das tensões. Diferentemente do item 4.2.1, onde foi feita uma comparação dos resultados da referência com o método de linearização escolhido, este item tem o objetivo de fazer a análise de tensões do componente.

### 5.2.1. Junção Vaso de Pressão-Bocal

Para a análise das tensões, as SCL são criadas e dispostas no mesmo local que o exemplo da ASME. A Figura 4.11 ilustra a posição das SCL em detalhes, e o comportamento da intensidade de tensão da estrutura. As informações da simulação como material, carregamento, condições de contorno estão dispostas no item 4.2.1.

Nota-se que as SCL 2, 3, 4, 6, 7 e 8 encontram-se entre elementos de transição e estruturais e fica a critério do avaliador decidir se estas são ou não linhas válidas. A SCL 1 está localizada entre dois elementos de transição e não é considerada uma SCL válida.

Como os materiais do vaso e bocal são diferentes, a tensão de projeto  $S_m$  para o vaso vale 169 MPa e para o bocal 160 MPa.

A Tabela 5.10 apresenta as maiores tensões, sua localização para cada um dos três componentes e a classificação de cada uma das tensões. A Tabela 5.11 traz as componentes de tensões linearizadas. Note que novamente, como esperado para um vaso pressurizado, as tensões normais correspondem as tensões principais.

Tabela 5. 11 - Categorização de tensão

	Componente	SCL	SI (MPa)	Classificação	Limite	Atende a ASME ?
<b>Bocal</b>	Membrana	3	130,96	PI	$1,5 \times S_m = 240 \text{ MPa}$	Sim
	Membrana + Flexão	3	174,62	P + Q	$3,0 \times S_m = 480 \text{ MPa}$	Sim
<b>Tampo</b>	Membrana	4	182,31	PI	$1,5 \times S_m = 253,5 \text{ MPa}$	Sim
	Membrana + Flexão	4	330,92	P + Q	$3,0 \times S_m = 507 \text{ MPa}$	Sim
<b>Vaso</b>	Membrana	9	157,77	PI	$1,5 \times S_m = 253,5 \text{ MPa}$	Sim
	Membrana + Flexão	9	160,49	P + Q	$3,0 \times S_m = 507 \text{ MPa}$	Sim

Fonte: Autor

Na região do bocal, as SCL 1, 2 e 3, mesmo que sua posição esteja entre os elementos estruturais e de transição, as tensões de membrana e membrana mais flexão não ultrapassam a tensão de projeto de 160 MPa, que seria o limite para a tensão de membrana generalizada.

As SCL 4 a 9 encontram-se na região do vaso de pressão cuja tensão de projeto  $S_m$  vale 169 MPa. A SCL 4 é que apresenta as maiores tensões. Caso considerado válido pelo avaliador considera-se o efeito de tensão secundária devido a sua posição.

Tabela 5. 12 - Tensões Linearizadas, em MPa

SCL	Componente	Tensão Longitudinal	Tensão Circunferencial	Tensão Radial	Tensão Cisalhamento	S1	S2	S3	SI
<b>1</b>	M	34,61	62,44	7,90	0,00	62,44	34,61	7,90	54,54
	M + Bi	-49,77	34,71	-4,54	-2,73	50,11	6,87	-76,57	126,68
	M + Bo	118,98	90,18	20,35	2,73	146,92	62,34	20,24	126,68
<b>2</b>	M	6,88	4,31	-0,68	2,46	7,61	4,31	-1,41	9,02
	M + Bi	32,12	11,86	-2,72	1,60	32,87	11,86	-3,48	36,36
	M + Bo	-18,36	-3,25	1,36	3,32	9,68	-3,25	-26,68	36,36
<b>3</b>	M	7,46	121,54	1,42	-13,53	121,54	18,30	-9,42	130,96
	M + Bi	51,51	149,57	1,82	-13,55	165,59	46,34	-9,02	174,62
	M + Bo	-36,59	93,51	1,03	-13,51	121,15	-9,73	-53,47	174,62
<b>4</b>	M	87,51	189,37	7,49	-5,94	189,37	87,94	7,06	182,31
	M + Bi	-68,09	148,79	-1,65	6,65	181,31	47,36	-149,62	330,92
	M + Bo	243,11	229,95	16,63	-18,53	346,05	128,53	15,12	330,92
<b>5</b>	M	71,27	-73,26	0,26	-2,84	71,38	0,15	-73,26	144,65
	M + Bi	152,86	-50,91	-0,20	-2,55	152,97	22,50	-73,72	226,70
	M + Bo	-10,31	-95,61	0,72	-3,13	71,85	-22,20	-154,85	226,70
<b>6</b>	M	64,41	6,40	-0,91	-7,21	65,20	6,40	-1,69	66,89
	M + Bi	105,80	18,49	-2,32	-7,77	106,60	18,49	-3,12	109,71
	M + Bo	23,02	-5,70	0,51	-6,65	66,62	-5,70	-43,09	109,71
<b>7</b>	M	64,15	68,61	-4,87	-1,81	68,61	64,20	-4,92	73,53
	M + Bi	38,42	62,35	-3,56	-8,39	71,44	57,94	-32,17	103,61
	M + Bo	89,88	74,87	-6,19	4,77	95,86	70,45	-7,75	103,61
<b>8</b>	M	73,93	86,10	4,86	-1,29	86,10	73,95	3,11	82,99
	M + Bi	-0,55	62,50	7,99	-8,48	79,26	50,35	-72,14	151,40
	M + Bo	148,41	109,70	-2,74	5,89	161,35	97,56	9,94	151,40
<b>9</b>	M	74,16	156,33	-1,43	-0,40	156,33	74,16	-1,44	157,77
	M + Bi	73,35	157,62	-2,87	-0,41	157,62	73,35	-2,87	160,49
	M + Bo	74,97	155,04	0,00	-0,41	157,77	74,97	-2,72	160,49

Fonte: Autor



Assim, a tensão de membrana é considerada localizada e é limitada a  $1,5 \times S_m$  (aproximadamente 253 MPa) e a de membrana mais flexão é limitada a  $3,0 \times S_m$ . Sendo assim, o componente passa pelos critérios da ASME.

### 5.3. REGRAS DE PROJETO PARA UMA ANÁLISE NÃO LINEAR. PARTE 2B: AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE UM BENCHMARK NÃO LINEAR

Embora a análise realizada no item 4.3 tenha sido considerada apenas o carregamento de pressão interna e os respectivos carregamentos de fechamento, a literatura apresenta carregamentos provenientes da tubulação aplicados no bocal em que um caso de análise de um vaso real deve ser considerado.

Assim, uma análise elástica é realizada conforme o código ASME, Seção III, que trata de componentes nucleares. Devido sua falta de diretrizes, para o processo de linearização de tensões é escolhido o Método de Tensão Estrutural Baseado na Integração de Tensão, um dos métodos sugerido pelo código ASME, seção VIII, que trata de vasos de pressão.

A simulação é realizada adotando-se uma distância de decaimento de  $3,0 \times \sqrt{R_m \times t}$ , com uma pressão interna de 17MPa aplicadas nas faces internas do bocal e do vaso, carregamento de fechamento (end-load) aplicadas na extremidade do vaso e bocal (calculados na Tabela 5.13, com a Equação 4.1), restrição de deslocamento circunferencial nas duas extremidades do vaso e longitudinal em uma delas, como ilustra a Figura 5.21.

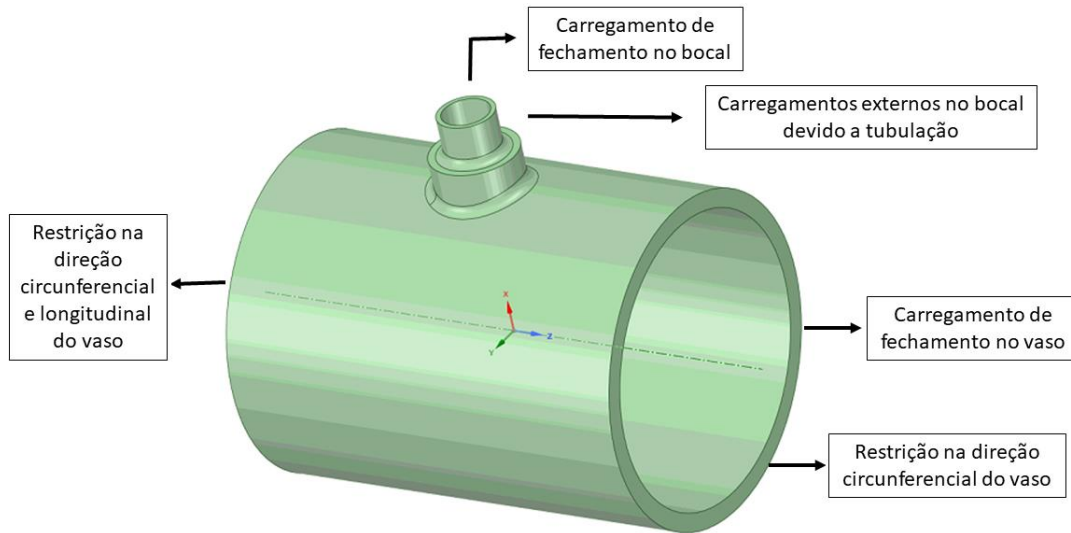
Quanto aos carregamentos nos bocais proveniente da tubulação, se tem forças em x, y e z de 100, 1850 e 600 kN, respectivamente e momentos  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$  de 150, 25 e 25  $\times 10^7$  N.mm, respectivamente.

Tabela 5. 13 - Cálculo do carregamento de fechamento

<b>P interna (MPa)</b>		<b>17</b>						
	<b>R int (mm)</b>	<b>R ext (mm)</b>	<b>A Int (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>A ext (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Dif. Areas (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Força (N)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	
<b>Vaso</b>	2110	2380	13986685	17795237	3808553	237773639	62,43	
<b>Bocal</b>	350	420	384845	554177	169332	6542367	38,64	

Fonte: Autor

Figura 5. 21 - Condição de contorno

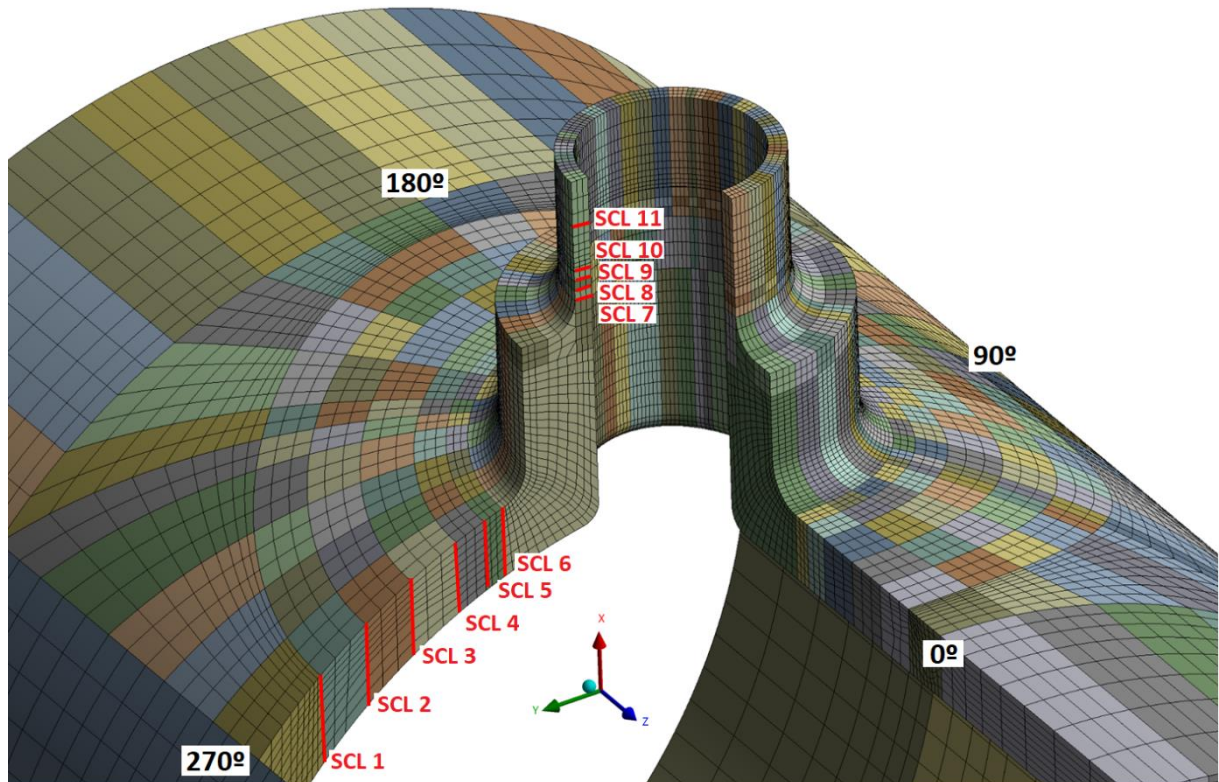


Fonte: Autor

A malha em elementos finitos segue as recomendações feitas anteriormente, para outros modelos analisados no item 5. Devido à diferença de espessura entre o vaso e bocal e o fato de procurar criar elementos finitos de tamanhos aproximados, o bocal é modelado com três elementos sólidos quadráticos ao longo da espessura (indicado como suficiente em algumas literaturas). Como procura-se criar uma malha onde os elementos se aproximam de cubos de dimensões de mesma ordem, a espessura do vaso conta com nove elementos ao longo da espessura, para uma melhor transição de malha. A geometria é dividida para o melhor controle da malha, com a condição de compartilhamento de geometria, e com esta opção não é necessária a criação de nenhum contato. A malha de elementos finitos, ilustrada na Figura 5.22, apresenta 1103561 elementos e 455712 nós.

Uma verificação da simulação é feita comparando a tensão de membrana proveniente de uma SCL entre o bocal e a extremidade do vaso, longe o suficiente de ambos de forma as tensões do bocal não afetarem o resultado e comparadas com a tensão teórica proveniente da teoria das cascas (Equação 3.17). A tensão obtida pela simulação é de 140,6 MPa e da teoria 141,3 MPa. A diferença é pequena, 0,5%, e a simulação é considerada válida.

Figura 5. 22 – Malha e SCLs



Fonte: Autor

A simulação é feita e a análise das tensões nas SCL nos ângulos de 0 a 360° é realizada. As SCLs são escolhidas de acordo com as recomendações do Código ASME, Seção VIII [14] e suas tensões linearizadas e comparadas com os limites ASME [4]. São ao todo onze SCL, onde seis estão localizadas no vaso de pressão e cinco no bocal.

A SCL 6 está localizada entre os elementos de transição e estrutural do vaso e as SCL de 1 a 5 estão localizadas a uma distância de  $1,0 \times \sqrt{R_m \times t}$ ,  $0,75 \times \sqrt{R_m \times t}$ ,  $0,5 \times \sqrt{R_m \times t}$ ,  $0,35 \times \sqrt{R_m \times t}$  e  $0,1 \times \sqrt{R_m \times t}$ , respectivamente.

A SCL 7 encontra-se entre os elementos de transição e estrutural do bocal e as SCL de 8 a 11 estão localizadas a uma distância de  $1,5 \times \sqrt{R_m \times t}$ ,  $0,75 \times \sqrt{R_m \times t}$ ,  $0,5 \times \sqrt{R_m \times t}$  e  $0,5 \times \sqrt{R_m \times t}$ , respectivamente.

### 5.3.1.1. Mapeamento de Tensão

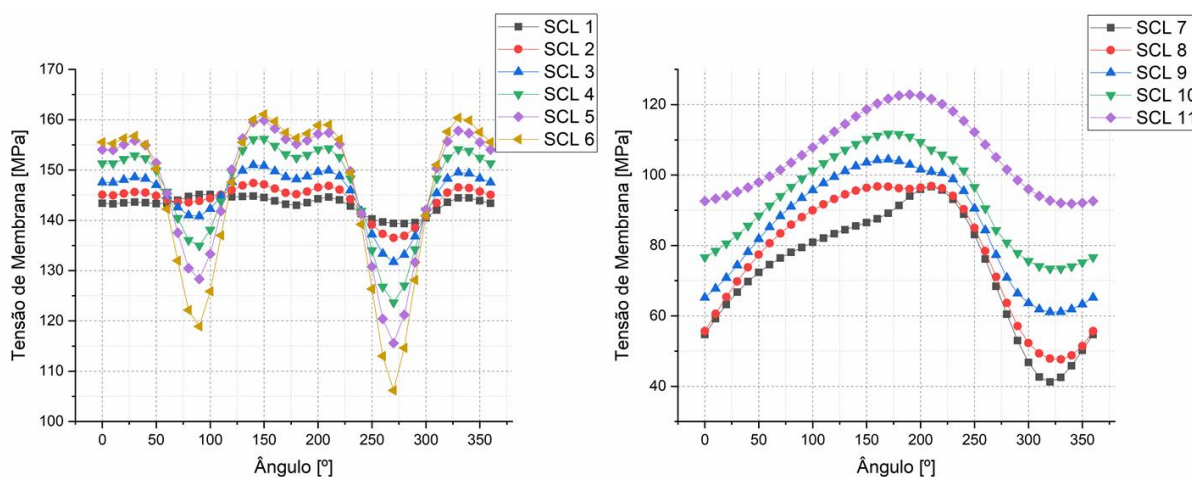
Devido aos momentos aplicados no bocal nas três dimensões, as intensidades de tensões são aferidas e linearizadas para cada SCL, a cada  $10^\circ$  ao longo de toda circunferência ( $360^\circ$ ). Mapeia-se estas tensões que estão dispostas no Apêndice D.

A Figura 5.23 ilustra o comportamento da tensão de membrana para as SCL do vaso, à esquerda, e do bocal, à direita.

Para o vaso (esquerda da Figura 5.23), de um modo geral, as SCL analisadas apresentam um comportamento semelhante. Entretanto, as SCL posicionadas próximo da intersecção vaso bocal têm uma maior variação das tensões ao longo da circunferência do que as mais distantes que apresentam um valor quase constante de, aproximadamente, 141 MPa (valor obtido pela Equação 3.17, de tensão de membrana para o vaso longe de descontinuidades). As tensões apresentam um valor quase constante de 0 a  $30^\circ$ , quando começam a decair até  $90^\circ$ . Começam a subir novamente até um ângulo de  $150^\circ$ , sofrendo um leve declínio até  $180^\circ$  e subindo novamente até o ângulo de  $200^\circ$ . As tensões sofrem um declínio maior atingindo o menor valor ao longo da circunferência até o ângulo  $270^\circ$ , quando sofre um aumento até o ângulo de  $330^\circ$ .

Para o bocal, o comportamento é mais simples. As tensões sofrem um aumento até o ângulo de  $180/200^\circ$  e um declínio até o ângulo de  $330^\circ$ . Diferentemente do vaso, neste caso, as tensões com maiores valores são as mais distantes da descontinuidade, causadas pelo carregamento externo no bocal, proveniente de cargas da tubulação.

Figura 5. 23 - Tensão de membrana

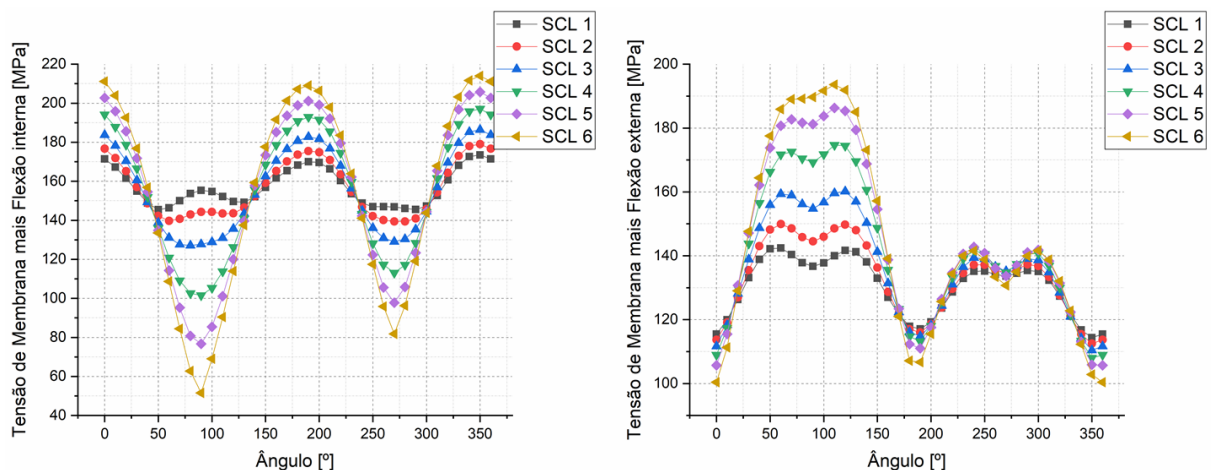


Fonte: Autor

A Figura 5.24 ilustra o comportamento das tensões de membrana mais flexão internas, à esquerda, e externa, à direita, para o vaso de pressão. Os comportamentos são opostos, note que na região onde experimentam aumentos, na parte externa do vaso ocorre um declínio. Os comportamentos das SCL seguem o mesmo padrão: apresentam maiores valores quando localizadas mais próximas de descontinuidades, como esperado.

Para o lado interno, as tensões decaem de 0 a 90°, aumentam de 90 a 180°, decaem novamente até 270° e experimentam um aumento até 360°. Para o lado externo, o que ocorre é praticamente o inverso: um aumento considerável de 0 a até uns 110°, seguidos de um declínio brusco 180°. De 180 a 240°, um aumento, seguido de uma ligeira redução até 270°, um aumento até 300° e uma redução até 360°.

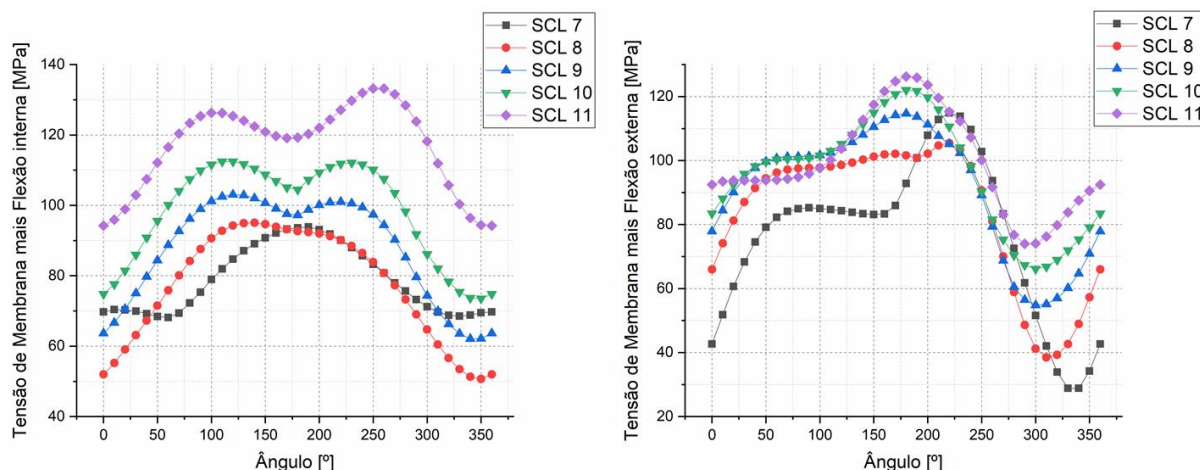
Figura 5. 24 - Tensão de membrana mais flexão pro vaso



Fonte: Autor

A Figura 5.25 ilustra o comportamento das tensões de membrana mais flexão internas, à esquerda, e externa, à direita, para o bocal. Para o bocal, o comportamento das tensões é menos complexo e, devido às cargas externas, as tensões analisadas são maiores quando aferidas longe da região de intersecção. Para o lado interno, as tensões sofrem um aumento de 0 a 100°, um declínio até 170°, seguido de um aumento até o ângulo 270° (onde a SCL 11 atinge seu maior valor). Para a parte externa, a tensão aumenta de 0 a 50°, permanece praticamente constante quando atinge seu maior valor próximo dos em 180° e decai atingindo seu menor valor próximo dos 300°.

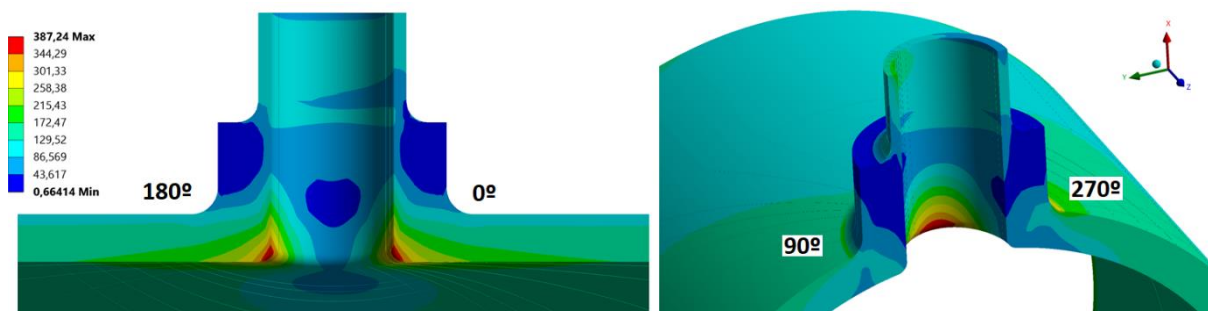
Figura 5. 25 - Tensão de membrana mais flexão pro bocal



Fonte: Autor

A Figura 5.26 ilustra a distribuição de intensidade de tensão na geometria, em MPa, com os ângulos 0, 90, 180 e 270° indicados, de modo a ser possível ver a distribuição de tensão melhor no componente.

Figura 5. 26 - Intensidade de tensão, em MPa



Fonte: Autor

### 5.3.1.2. Categorização e Classificação das Tensões

A categorização de tensão é feita para as maiores tensões, para o vaso de pressão e bocal e apresentadas na Tabela 5.14.

Para o vaso de pressão, as maiores tensões de membrana e membrana mais flexão se encontram na SCL 6, a SCL que se encontra entre o elemento de transição e estrutural (como esperado). Esta pode ou não ser considerada válida uma vez que ela não se encontra totalmente entre elementos estruturais. Devido à sua localização, as tensões

presentes na SCL 6 apresentam um caráter secundário e são classificadas como membrana localizada e primária mais secundárias.

Com relação ao bocal, a maior tensão de membrana e membrana mais flexão ocorre na SCL 11. Como essa SCL se localiza a uma distância de  $1,5 \times \sqrt{R_m \times t}$ , sua tensão de membrana é classificada como tensão de membrana generalizada e sua tensão de membrana mais flexão como tensão de membrana mais flexão (ambas, classificadas como tensão primária).

Tabela 5. 14 - Intensidade de tensão linearizadas

	Componente	SCL	SI (MPa)	Classificação	Limite	Atende a ASME?
<b>Vaso</b>	Membrana	6_150	161,08	P <sub>L</sub>	1.5 x S <sub>m</sub> = 276 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	6_350	213,98	P + Q	3.0 x S <sub>m</sub> = 552 MPa	Sim
<b>Bocal</b>	Membrana	11_190	122,87	P <sub>m</sub>	1.0 x S <sub>m</sub> = 184 MPa	Sim
	Membrana + Flexão	11_270	188,86	P <sub>m</sub> + P <sub>b</sub>	1.5 x S <sub>m</sub> = 276 MPa	Sim

Fonte: Autor

Como todas as tensões no componente são menores do que os limites para suas respectivas categorias, conclui-se que o presente bocal atende os requisitos ASME, tanto para os limites de tensão primária, quanto para o limite de tensão secundária.

#### 5.4. COMENTÁRIOS FINAIS

As modelagens realizadas foram simuladas pelo software comercial de elementos finitos ANSYS com elementos finitos sólidos tridimensionais de interpolação quadrática (20 nós por elemento) e elementos sólidos bidimensionais de interpolação quadrática (8 nós por elemento), uma vez que permitem a modelagem de um maior número de detalhes e fornecem informações mais precisas (comparando malhas de elementos finitos sólidos e de casca de mesma dimensão).

O processo de linearização é realizado pelo próprio software, pelo método escolhido no capítulo 3, onde se calcula a tensão média (tensão de membrana) e a distribuição linear (tensão de flexão) ao longo de 49 pontos de uma SCL selecionada.

Em relação a malha, para os casos estudados, verificou-se que cinco elementos pela espessura são mais do que suficientes para uma boa resposta de tensões linearizadas. Em alguns casos, uma vez que o refino da malha foi realizado a partir da malha indicada em

sua referência específica, apenas três elementos dispostos ao longo de sua espessura estudos já produziu resultados consistentes, como indicado em [29].

Para a transição entre cilindros, a superfície é dividida de forma estratégica para impor uma malha com maior qualidade de elementos na área de interesse. Divide-se a superfície do vaso na junção com o bocal em uma forma quadricular, ou retangular, suavizando a transição dos elementos entre o vaso e bocal. O compartilhamento de geometria é utilizado para a criar os comandos para a malha e a deixar contínua, excluindo a necessidade de criação de contatos, o que pode tornar a análise menos custosa.

Para condições de contorno, deve-se analisar a geometria e suas cargas para verificar a possibilidade de adotar a simetria em um plano. Em caso de vasos pressurizados, deve-se calcular os carregamentos de fechamento (end-load), que seria a pressão equivalente a tensão longitudinal ao fim da casca do vaso e bocal. Restrições são necessárias e para cada caso, um grupo de restrições são utilizadas.

Assim, cria-se SCLs ao longo da espessura dos elementos estruturais (vaso e bocal em análise) em regiões de descontinuidades estruturais, onde as tensões costumam ser maiores. A linearização de tensão nas SCL é realizada variando circunferencialmente, na mesma posição radial, a partir da superfície externa do bocal, de 10 em 10°. Mapeia-se o comportamento das tensões linearizadas nessas SCLs de forma a encontrar em qual posição radial elas atingem seu maior valor.

Com as maiores tensões de membrana e de membrana mais flexão, obtidas pelo método de linearização anteriormente escolhido, realiza-se a categorização e, estabelecendo o tipo de tensão que se está lidando, compara-se com os respectivos limites. A tensão de membrana é classificada como  $P_m$  ou  $P_L$  e a tensão de membrana mais flexão é classificada como  $P_L + P_b$  ou  $P + Q$  dependendo de onde a SCL está alocada. Se na região onde se aloca a SCL é uma região onde há uma descontinuidade estrutural, e conseqüentemente, há a compatibilidade de diferentes deformações, então na SCL há a presença de tensão secundária e conseqüentemente as tensões linearizadas são classificadas como  $P_L$  e  $P + Q$ , respectivamente.



## 6. CONCLUSÕES

Embora as referências analisadas discutam itens relacionados a uma análise de tensões, como recomendações quanto a alocações de uma SCL, elas não discutem um método de linearização das tensões através das SCL. Tão pouco providenciam ao projetista diretrizes de uma análise de tensões em elementos estruturais presentes em um vaso de pressão (vaso, bocais ou suportes), seja ele nuclear ou não.

Sendo assim, realizou-se uma série de análises de tensões elásticas detalhadas que sirva ao projetista como guia para a realização de análise de tensões para casos complexos, que envolvam desde recomendações para a simulação (como recomendação de criação de malha e condições de contorno), quanto para o processo de linearização e para a separação e classificação das tensões (ausentes no código ASME, Seção III [4]).

As modelagens são simuladas pelo software comercial de elementos finitos ANSYS com elementos finitos sólidos tridimensionais de interpolação quadrática (20 nós por elemento), uma vez que permitem a modelagem de um maior número de detalhes e fornecem informações mais precisas (comparando malhas de elementos finitos sólidos e de casca de mesma dimensão) sobre a distribuição de tensão em locais de descontinuidade estrutural, tal como variação de espessura do cilindro, ou cascas de parede grossas. Como a resposta de tensão para este tipo de elemento se dá em forma de tensor de tensões com três tensões normais e três cisalhantes e não em parcelas de membrana e flexão, como os limites impostos pelo código, o processo de linearização se torna necessário.

Para ao processo de linearização, adota-se um dos procedimentos de linearização presente e recomendado pelo código ASME, Seção VIII, Divisão 2 [14] que trata de vasos de pressão sem a especificação nuclear, na ausência de recomendações na Seção III, que trata de componentes nucleares. Este método, chamado de método de tensão estrutural baseado na integração de tensão se mostrou eficaz quando comparado a resultados das referências, dentro de suas limitações. Nele, as tensões ao longo da SCL são matematicamente trabalhadas de forma a se obter a tensão média, associada à tensão de membrana e a variação linear, associada à tensão de flexão. Há também a recomendação para a alocação das SCL, que devem ser alocadas em elementos estruturais e nunca elementos de transição, ou regiões de descontinuidades estruturais localizadas, definidas

pelo Código ASME [14] como fontes de intensificação de tensão ou deslocamento a qual afeta uma região de volume relativamente pequeno.

Assim, analisa-se os principais casos de intersecções de cilindros da literatura [12], [24], [25], [27] conforme os requisitos do código ASME Seção III, Divisão 1 [4] como se fossem componentes nucleares.

A tomada de tensão ao longo das SCLs é feita na região de descontinuidades estruturais gerais, ao longo de toda circunferência de forma a se mapear o comportamento das tensões devido a pressão interna e carregamento de bocais, e, assim, identificar as maiores tensões que o componente está submetido.

A tensão de membrana, média da intensidade de tensão ao longo da SCL, é classificada como  $P_m$  ou  $P_L$ , dependendo de onde a SCL está alocada. Caso esteja em regiões onde se identifique parcelas de tensão secundária (causada pela compatibilidade de diferentes deformações), a tensão é classificada como  $P_L$  e limitada à  $1,5 S_m$ , de forma a se evitar o colapso plástico. Caso contrário, esta é classificada como  $P_m$  e limitada à  $S_m$ , também evitando a falha por colapso plástico.

A tensão de membrana mais flexão é classificada como  $P_L + P_b$  ou  $P + Q$  dependendo de onde a SCL está alocada. Caso esteja em regiões onde se identifique parcelas de tensão secundária, a tensão é classificada como  $P + Q$  e limitada à  $3,0 S_m$ . Caso contrário, esta é classificada como  $P_L + P_b$  e limitada à  $1,5 S_m$ . Os limites impostos são impedir que ocorra falha por acúmulo de deformação plástica, garantindo que a peça esteja ciclando no regime elástico.

Os limites de tensão primária devem ser respeitados, para cada categoria. Porém os limites de tensão secundárias, caso não sejam atendidos, não implicam na não satisfação dos requerimentos ASME. Nestes casos, e somente nesses, se fazem necessária uma análise de fadiga diferenciada, onde assume-se que as tensões não estão ciclando em regime elástico.

Com as análises dos casos de estudos, presentes no capítulo 5, e todas as recomendações e considerações aqui feitas, espera-se que a complexidade de análise de tensão elásticas de componentes nucleares realizadas com elementos finitos sólidos e comparação com limites do código ASME [4] sejam esclarecidas, principalmente para casos de intersecções de vaso de pressão-bocal.

## REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Nuclear Power Reactors in the World*. Vienna, 2019.
- [2] ALBUQUERQUE, L. B. *Categorização De Tensões Em Modelos De Elementos Finitos De Conexões De Bocal-Vaso De Pressão*. 1999. Dissertação. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *IAEA Safety Standards Series: Safety of Nuclear Power Plants*. vol. 1, pp. 323–346, 2000.
- [4] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components*. Division 1 - Subsection NB. Class 1 Components. 2019.
- [5] ANSYS® Product Laucher Release 19.2. ANSYS 19.2 Help.
- [6] Three Mile Island accident. *In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre*. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Three\\_Mile\\_Island\\_accident#Effect\\_on\\_nuclear\\_power\\_industry](https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident#Effect_on_nuclear_power_industry)>. Acesso em: 20 set. 2020.
- [7] KROENKE, W. C. *Classification of Finite Element Stresses According to ASME Section III Stress Categories*. 1974.
- [8] KROENKE, W.C., ADDICOTT, G. W., HINTON, B. M. *Interpretation of Finite Element Stresses According to ASME Section III*. vol. PVP. 1975.
- [9] HECHMER, J. L., HOLLINGER, G. L. *Three Dimensional Stress Criteria - Application of Code Rules*. vol. PVP. 1987.
- [10] HECHMER, J. L., HOLLINGER, G. L. *Considerations in the Calculations of the Primary-Plus-Secondary Stress Intensity Range for Code Stress Classification*. vol. PVP. 1988.
- [11] HECHMER, J. L., HOLLINGER, G. L. *Three Dimensional Stress Criteria*. vol. PVP. 1991.
- [12] HECHMER, J. L., HOLLINGER, G. L. *WRC Bulletin 429 - 3D Stress Criteria Guidelines for Application*. New York, 1998.
- [13] EUROPEAN COMMISSION. *The Design-by-Analysis Manual*. 1999.
- [14] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII- Rules for Construction of Pressure Vessels*. Division 2 - Alternative Rules. 2019.
- [15] SCHINDLER, S. *Comparison of Design by Analysis Methods*. pp. 1–7, 2006.
- [16] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *European Standard for Unfired Pressure Vessels*, EN 13445-3. 2002.
- [17] MACKENZIE D. e LI. H. *A Plastic Load Criterion for Inelastic Design by Analysis*. J. Press.

- Vessel Technol., vol. 128, no. 1, p. 39, 2006, doi: 10.1115/1.2137768.
- [18] YANG. J. ***Stress Classification Plane and Its Application in Finite Element Analysis***. vol. 2, pp. 171–179, 2009, doi: 10.1115/icone17-75547.
- [19] Godbole. P. B. e Pore. S. ***A New Method for Stress Categorization on Planes***. J. Press. Vessel Technol., vol. 132, p. 6, 2010, doi: 10.1115/1.4001521.
- [20] STONEHOUSE. M., SEIPP. T. G., KANAMARU. S. e MORRISON. S. ***A Novel Comparison of Design-by-Analysis Methods***. J. Press. Vessel Technol., vol. 134, no. 5, p. 054502, 2012, doi: 10.1115/1.4006343.
- [21] ROHART. P., PANIER. S., SIMONET. Y., HARIRI. S. e AFZALI. M. ***A Review of State-of-the-Art Methods for Pressure Vessels Design Against Progressive Deformation***. J. Press. Vessel Technol., vol. 137, no. 5, p. 051202, 2015, doi: 10.1115/1.4029095.
- [22] EVANS C. J. e MILLER. T. F. ***Failure Prediction of Pressure Vessels Using Finite Element Analysis***. J. Press. Vessel Technol., vol. 137, no. 5, p. 051206, 2015, doi: 10.1115/1.4029192.
- [23] MACKENZIE D. ***Stress Linearization Concepts and Restrictions in Elastic Design The ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section***. ASME 2017 Press. Vessel. Pip. Conf. ASME Pap. No. PVP2017-65678, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1115/PVP2017-65678.
- [24] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. ***Non-Linear Analysis Design Rules Part 2a: Specification of Benchmarks on Nozzles Under Pressure, Thermal and Piping Loads***. 2019.
- [25] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. CODES. M. e FORCE. S. T. ***Non-Linear Analysis Design Rules. Part 2B: Assessment of Non-Linear Benchmark Results***. 2020.
- [26] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ***ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components***. Appendices. 2011.
- [27] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ***ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII***. Division 2: Example Problem Manual. 2013.
- [28] WINDOWS.M., CORPORATION. M., HORI. K., e SAKAJIRI. A. ***Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches***. 2ª Ed. 2006.
- [29] XUE L. e WIDERA. G. E. O. ***Guidelines for FEA Modeling of Cylinder-to-Cylinder Intersection***. vol. 477, no. Table 1, pp. 1–7, 2004.
- [30] YOUNG. W. C. e BUDYNAS. R. G. ***Roark's Formulas for Stress and Strain***. Seventh Ed. 1938.
- [31] MOKHTARIAN. K., RANJAN. G. V., RODABAUGH. E. C. ***WRC Bulletin 297: Local Stresses In Cylindrical Shells Due To External Loadings On Nozzle***. 1987.

**APÊNDICE A**

		<b>Intensidade de tensão (MPa)</b>									
		<b>Ângulo (°)</b>									
<b>SCL</b>	<b>Componente</b>	<b>_00</b>	<b>_10</b>	<b>_20</b>	<b>_30</b>	<b>_40</b>	<b>_50</b>	<b>_60</b>	<b>_70</b>	<b>_80</b>	<b>_90</b>
<b>0</b>	M	55,64	55,41	54,03	50,34	44,86	39,90	39,12	32,90	21,33	15,92
	M+Bi	136,29	130,06	112,52	86,28	54,88	23,00	8,22	25,98	36,98	39,12
	M+Bo	75,44	70,63	57,64	56,25	62,96	73,27	78,44	82,92	77,72	69,55
<b>1</b>	M	73,73	73,31	71,18	65,70	56,52	46,03	39,24	32,34	18,21	11,06
	M+Bi	155,27	148,81	130,28	102,20	67,67	30,75	16,54	34,49	49,30	53,23
	M+Bo	81,69	76,19	72,40	68,47	66,19	70,01	79,91	86,06	80,05	71,15
<b>2</b>	M	96,31	95,49	92,12	84,29	70,96	53,79	38,03	28,59	18,20	12,78
	M+Bi	176,38	169,62	150,11	119,90	81,77	42,14	27,14	45,65	64,17	70,27
	M+Bo	99,10	97,89	92,75	82,49	69,95	72,87	83,24	87,61	81,58	75,60
<b>3</b>	M	124,73	123,12	117,80	106,78	88,64	63,92	36,82	20,64	24,29	26,65
	M+Bi	199,57	192,59	171,90	139,43	97,81	65,37	40,79	58,78	82,86	91,69
	M+Bo	125,09	122,78	113,89	96,97	79,93	81,76	85,45	87,82	84,46	82,80
<b>4</b>	M	86,65	88,25	91,79	94,70	93,94	86,36	71,69	53,54	38,83	34,95
	M+Bi	214,94	196,30	145,87	118,67	98,09	136,81	163,25	189,09	220,53	229,35
	M+Bo	202,63	194,06	169,08	130,10	97,26	118,87	162,91	211,23	243,56	253,62
<b>5</b>	M	58,13	60,76	67,04	74,07	79,18	79,41	73,70	64,30	56,02	54,01
	M+Bi	196,03	181,52	142,03	102,78	85,46	106,87	136,15	153,28	169,62	177,32
	M+Bo	167,47	157,38	144,23	121,35	90,50	102,28	128,58	164,72	192,72	201,32
<b>6</b>	M	36,59	39,88	47,59	56,76	65,20	70,48	71,09	68,07	64,61	63,92
	M+Bi	172,06	161,29	131,80	95,18	77,57	81,94	110,30	128,87	138,08	140,28
	M+Bo	144,26	136,11	121,13	111,09	92,69	87,37	106,85	127,64	146,76	152,89
<b>7</b>	M	20,88	25,02	33,02	42,80	52,74	60,89	65,59	66,99	66,86	67,13
	M+Bi	146,67	139,05	118,09	90,42	71,63	64,64	87,78	105,22	114,29	116,32
	M+Bo	119,90	115,29	102,10	100,92	91,86	76,74	90,86	103,70	111,15	116,32
<b>8</b>	M	11,78	11,48	11,26	11,89	14,35	18,90	24,28	29,05	32,17	32,97
	M+Bi	25,69	35,40	49,53	57,08	56,78	51,11	48,07	46,25	42,39	39,85
	M+Bo	4,83	32,76	57,94	72,08	75,03	69,41	59,20	47,83	38,60	35,21

## APÊNDICE B

		Intensidade de tensão linearizada (MPa)												
		Ângulo (°)												
SCL	Componente	_00	_10	_20	_30	_40	_50	_60	_70	_80	_90	_100	_110	_120
<b>1</b>	M	276,49	276,59	277,05	277,62	277,78	277,1	275,19	271,95	263,91	263,91	261,81	262,88	267,14
	M+Bi	300,06	299,26	296,7	292,86	287,84	282,02	275,60	268,97	257,73	257,73	255,21	256,38	261,97
	M+Bo	252,92	254,06	257,8	262,93	268,19	272,45	274,85	274,94	270,12	270,12	268,42	269,38	272,33
<b>2</b>	M	277,34	277,48	278,1	278,79	279,08	278,39	276,15	272,15	266,78	261,36	258,04	258,91	264,16
	M+Bi	303,58	302,61	299,63	295,13	289,34	282,54	274,84	266,52	258,23	251,21	247,27	248,35	255,37
	M+Bo	251,10	252,56	257,19	263,30	269,61	274,74	277,67	277,82	275,34	271,53	268,83	269,49	273,03
<b>3</b>	M	278,48	278,71	279,43	280,39	280,97	280,33	277,72	272,69	266,78	257,72	252,16	252,26	259,03
	M+Bi	308,71	307,54	303,9	298,60	291,84	283,75	274,30	263,53	258,23	241,51	234,75	235,23	244,79
	M+Bo	248,26	250,21	255,97	263,62	271,48	277,92	281,70	282,07	275,34	273,94	269,59	269,38	273,63
<b>4</b>	M	279,76	280,07	281,14	282,60	283,71	283,37	280,41	274,20	264,78	253,58	244,10	242,03	250,23
	M+Bi	315,79	314,29	310,01	303,73	295,80	286,24	274,63	260,80	245,04	229,13	216,95	215,49	228,55
	M+Bo	243,74	246,42	253,99	263,97	274,18	282,6	287,66	288,50	284,95	278,17	271,25	269	273,35
<b>5</b>	M	281,04	281,57	283,24	285,81	288,08	288,36	285,22	277,41	264,98	248,87	232,06	223,51	233,09
	M+Bi	326,67	324,74	319,49	311,99	302,64	291,16	277,08	259,11	237,71	213,66	189,44	179,81	201,48
	M+Bo	235,41	239,49	250,25	264,44	278,68	290,26	297,32	298,91	294,79	285,96	275,30	268,81	271,94
<b>6</b>	M	279,54	281,63	283,41	288,07	291,93	292,06	288,56	278,07	260,74	237,09	215,67	181,91	193,51
	M+Bi	345,26	340,18	334,22	322,29	313,59	297,49	285,28	261,12	240,68	210,61	174,25	157,24	175,32
	M+Bo	214,09	227,53	240,69	264,30	281,48	297,34	302,84	305,37	289,43	274,73	273,69	240,64	243,26
<b>7</b>	M	15,19	15,41	15,916	16,47	16,95	17,22	17,45	17,64	17,795	17,93	17,84	17,718	17,56
	M+Bi	20,77	21,26	22,502	24,18	26,10	27,823	29,40	30,69	31,573	31,98	31,51	30,592	29,32
	M+Bo	9,80	9,77	9,5615	9,02	8,12	7,0031	6,57	6,52	6,4415	6,44	6,55	6,7375	6,88
<b>8</b>	M	21,56	21,66	21,958	22,39	22,85	23,271	23,58	23,79	23,921	23,96	23,91	23,775	23,56
	M+Bi	26,28	26,61	27,596	29,09	30,87	32,706	34,33	35,59	36,388	36,66	36,36	35,535	34,27
	M+Bo	17,07	16,94	16,604	16,01	15,16	14,129	13,06	12,14	11,534	11,32	11,54	12,145	13,05
<b>9</b>	M	23,15	23,15	23,159	23,17	23,19	23,204	23,22	23,23	23,239	23,24	23,24	23,229	23,22
	M+Bi	31,92	31,95	32,065	32,24	32,44	32,663	32,87	33,04	33,145	33,18	33,15	33,036	32,87
	M+Bo	14,38	14,35	14,258	14,12	13,95	13,759	13,58	13,43	13,334	13,30	13,33	13,43	13,58

SCL	Componente	Intensidade de tensão linearizada (MPa)					
		Ângulo (°)					
		_130	_140	_150	_160	_170	_180
1	M	272,98	278,25	281,51	282,32	281,66	281,16
	M+Bi	271,40	282,77	293,78	302,30	307,41	309,10
	M+Bo	274,71	274,25	270,11	263,19	256,25	253,21
2	M	271,85	279,11	283,70	285,03	284,29	283,65
	M+Bi	267,55	282,3	296,36	307,18	313,74	315,88
	M+Bo	276,50	276,83	272,48	264,28	255,44	251,42
3	M	269,56	279,87	286,82	289,24	288,51	287,67
	M+Bi	261,52	281,56	300,60	315,24	324,07	326,93
	M+Bo	278,56	280,03	275,66	265,75	254,06	248,41
4	M	265,09	280,23	291,21	295,85	295,44	294,35
	M+Bi	252,52	280,6	307,35	328,21	340,81	344,86
	M+Bo	280,31	279,95	279,97	268,11	252,28	243,84
5	M	254,50	278,06	297,35	308,03	310,03	309,45
	M+Bi	236,89	278,06	319,21	353,23	374,53	382,20
	M+Bo	281,20	288,14	286,13	272,36	250,42	236,70
6	M	226,16	263,63	300,86	327,76	346,16	351,61
	M+Bi	213,26	266,91	334,15	398,50	453,91	478,39
	M+Bo	272,49	287,69	294,89	284,19	253,37	224,88
7	M	17,36	17,114	16,66	16,14	15,682	15,45
	M+Bi	27,82	26,221	24,47	22,96	21,898	21,42
	M+Bo	7,27	8,2883	9,10	9,55	9,7121	9,70
8	M	23,24	22,816	22,34	21,90	21,602	21,51
	M+Bi	32,66	30,844	29,08	27,64	26,7	26,39
	M+Bo	14,11	15,104	15,92	16,46	16,746	16,84
9	M	23,20	23,185	23,17	23,16	23,149	23,15
	M+Bi	32,66	32,441	32,23	32,06	31,952	31,91
	M+Bo	13,76	13,943	14,12	14,26	14,348	14,38

**APÊNDICE C**

		<b>Intensidade de tensão (MPa)</b>									
		<b>Ângulo (°)</b>									
<b>SCL</b>	<b>Componente</b>	<b>_00</b>	<b>_10</b>	<b>_20</b>	<b>_30</b>	<b>_40</b>	<b>_50</b>	<b>_60</b>	<b>_70</b>	<b>_80</b>	<b>_90</b>
<b>1</b>	M	185,74	186,09	186,64	186,17	185,02	184,76	186,19	188,69	190,79	191,41
	M+Bo	147,98	151,36	159,15	169,77	179,40	184,53	182,68	178,15	176,19	174,90
	M+Bi	223,50	221,30	215,26	203,55	191,03	185,82	191,34	200,38	205,87	207,92
<b>2</b>	M	187,45	188,13	189,54	190,39	189,95	188,51	188,02	189,07	190,68	191,25
	M+Bo	143,15	146,90	156,31	168,90	182,40	192,54	196,68	194,39	189,88	187,82
	M+Bi	231,75	230,10	224,47	213,46	198,09	184,79	181,19	186,42	192,66	194,73
<b>3</b>	M	194,15	195,30	197,86	199,84	199,26	196,56	192,49	188,31	185,69	184,75
	M+Bo	138,24	143,78	156,77	173,23	190,50	205,70	215,75	218,43	213,03	209,71
	M+Bi	250,06	248,19	241,99	229,65	209,94	187,83	169,40	159,55	159,72	159,87
<b>4</b>	M	209,06	211,78	216,74	220,12	218,63	211,00	196,35	177,69	156,84	146,32
	M+Bo	134,29	144,56	165,41	188,43	211,27	230,63	159,63	117,94	251,21	250,15
	M+Bi	283,91	283,03	276,16	261,42	235,65	201,24	244,01	251,38	76,81	53,46
<b>5</b>	M	96,23	97,40	100,39	104,35	108,53	112,47	115,80	118,33	119,91	120,44
	M+Bo	126,61	129,92	131,85	129,53	122,89	112,90	100,77	88,66	79,04	165,79
	M+Bi	66,21	69,35	78,30	91,85	108,25	125,47	141,53	154,50	162,90	75,17
<b>6</b>	M	116,23	116,51	117,32	118,47	119,76	121,02	122,09	122,89	123,38	123,55
	M+Bo	148,98	146,44	139,08	127,70	116,91	97,96	82,74	69,52	60,14	56,63
	M+Bi	83,48	86,76	96,17	110,51	128,01	146,56	163,93	178,07	187,27	190,46
<b>7</b>	M	112,60	112,88	113,66	114,82	116,17	117,51	119,26	119,60	120,17	120,36
	M+Bo	152,95	149,82	140,82	127,02	110,07	91,98	73,83	60,83	51,48	48,03
	M+Bi	72,25	76,93	88,26	105,05	124,53	145,45	167,14	180,94	191,31	194,91



## APÊNDICE D

SCL	Componente	Intensidade de tensão linearizada (MPa)															
		Ângulo (°)															
		_00	_10	_20	_30	_40	_50	_60	_70	_80	_90	_100	_110	_120	_130	_140	_150
1	M	143.38	143.26	143.47	143.63	143.52	143.30	143.38	143.97	144.72	145.15	145.15	144.86	144.67	144.72	144.81	144.55
	M+Bi	171.44	167.26	161.59	154.94	148.77	145.47	146.38	150.06	153.66	155.33	154.68	152.18	149.62	149.22	152.12	156.91
	M+Bo	115.49	119.96	126.33	133.13	138.86	142.19	142.45	140.39	137.84	136.72	137.74	140.00	141.69	141.24	138.09	132.94
2	M	145.07	144.97	145.32	145.64	145.50	144.88	144.11	143.61	143.55	143.85	144.34	145.07	146.00	146.92	147.40	147.15
	M+Bi	176.66	171.85	165.18	157.05	148.66	142.24	139.75	140.74	142.92	144.32	144.28	143.43	143.56	146.49	152.29	159.15
	M+Bo	113.71	119.11	126.95	135.47	143.03	148.16	149.92	148.54	145.80	144.49	145.96	148.56	149.73	147.98	143.19	136.32
3	M	147.56	147.52	148.08	148.57	148.32	147.03	144.91	142.61	141.00	140.82	142.27	144.82	147.62	149.88	151.00	150.83
	M+Bi	183.76	178.25	170.41	160.49	149.31	138.72	131.14	127.64	127.10	127.74	128.86	131.04	135.68	143.43	153.11	162.62
	M+Bo	111.70	118.36	128.17	138.90	148.70	155.92	159.36	158.90	156.16	154.73	156.73	159.64	160.19	157.00	150.31	141.26
4	M	151.33	151.33	152.19	152.90	152.36	149.93	145.68	140.45	136.04	134.94	138.10	143.77	149.56	153.91	156.11	156.17
	M+Bi	194.12	187.82	178.62	166.54	151.90	135.91	120.78	109.06	102.53	101.51	105.32	113.79	126.20	140.89	155.63	168.49
	M+Bo	108.93	117.32	129.97	143.78	156.50	166.26	171.71	172.56	170.43	169.28	171.74	174.66	174.40	169.60	160.59	148.69
5	M	154.03	153.98	155.06	155.86	154.94	151.43	145.32	137.54	130.47	128.34	133.32	141.81	150.12	156.28	159.50	159.87
	M+Bi	202.69	195.85	185.61	171.83	154.60	134.84	114.27	95.21	80.77	76.68	85.44	101.11	120.00	139.63	157.92	173.33
	M+Bo	105.71	115.47	130.70	147.12	162.13	173.76	180.69	182.74	181.64	181.22	183.74	186.30	185.34	179.40	168.74	154.60
6	M	155.54	155.26	156.31	156.79	155.05	150.22	142.25	131.98	122.17	118.89	125.87	137.00	147.59	155.53	159.99	161.08
	M+Bi	211.16	203.96	192.60	176.86	156.84	133.52	108.68	84.42	62.78	51.59	69.03	90.42	113.96	137.56	159.32	177.63
	M+Bo	100.40	111.28	129.05	147.64	164.42	177.52	185.89	189.02	189.17	189.69	191.67	193.60	191.87	185.02	173.10	157.21
7	M	54.72	59.23	63.21	66.73	69.76	72.34	74.53	76.41	78.09	79.45	80.87	82.09	83.30	84.44	85.51	86.51
	M+Bi	69.73	70.38	70.27	69.93	69.24	68.44	68.14	69.37	72.26	75.34	78.96	81.97	84.72	87.09	89.10	90.77
	M+Bo	42.67	51.81	60.66	68.34	74.54	79.15	82.27	84.12	84.97	85.26	85.03	84.72	84.29	83.84	83.41	83.11
8	M	55.68	60.59	65.34	69.80	73.79	77.40	80.61	83.43	85.92	88.03	89.99	91.67	93.18	94.50	95.58	96.36
	M+Bi	51.98	55.20	59.05	63.11	67.25	71.50	75.84	80.12	84.16	87.57	90.63	92.79	94.24	94.96	95.04	94.63
	M+Bo	65.98	74.13	81.25	87.04	91.42	94.43	96.25	97.19	97.54	97.69	97.79	98.09	98.61	99.37	100.29	101.21
9	M	65.24	67.74	70.83	74.40	78.16	81.83	85.24	88.33	91.09	93.53	95.74	97.72	99.51	101.13	102.52	103.60
	M+Bi	63.69	66.67	70.57	75.05	79.73	84.36	88.73	92.71	96.20	99.01	101.18	102.52	103.07	102.87	102.02	100.70
	M+Bo	77.88	84.44	90.08	94.52	97.69	99.68	100.72	101.12	101.19	101.31	101.68	102.53	103.91	105.81	108.10	110.52
10	M	76.65	78.45	80.54	82.94	85.62	88.45	91.30	94.05	96.63	99.03	101.27	103.37	105.34	107.17	108.81	110.18
	M+Bi	74.82	77.60	81.45	85.98	90.81	95.61	100.10	104.08	107.39	109.89	111.61	112.43	112.43	111.70	110.40	108.72
	M+Bo	83.44	88.11	92.41	95.84	98.23	99.65	100.30	100.48	100.55	100.83	101.57	102.99	105.16	108.04	111.43	114.98
11	M	92.60	93.31	94.19	95.23	96.47	97.94	99.62	101.50	103.52	105.64	107.84	110.07	112.32	114.53	116.66	118.62
	M+Bi	94.26	95.91	98.93	102.92	107.46	112.12	116.55	120.39	123.39	125.34	126.29	126.24	125.40	124.03	122.42	120.88
	M+Bo	92.48	93.46	93.76	93.75	93.73	93.80	93.96	94.26	94.82	95.89	97.63	100.22	103.72	108.01	112.77	117.50

		Intensidade de tensão linearizada (MPa)															
		Ângulo (°)															
SCL	Componente	_160	_170	_180	_190	_200	_210	_220	_230	_240	_250	_260	_270	_280	_290	_300	_310
1	M	143.88	143.20	143.01	143.50	144.27	144.61	144.08	142.82	141.33	140.25	139.67	139.39	139.33	139.56	140.51	142.06
	M+Bi	161.62	165.44	168.30	169.96	169.65	166.38	160.36	153.61	148.78	147.03	146.98	146.90	146.08	145.61	147.25	152.67
	M+Bo	127.01	121.60	117.91	117.08	119.25	123.61	128.65	132.93	135.14	135.19	134.16	133.65	134.54	135.42	135.09	132.33
2	M	146.31	145.45	145.19	145.70	146.53	146.85	146.09	144.19	141.62	139.12	137.29	136.51	136.91	138.46	140.83	143.43
	M+Bi	165.31	170.13	173.62	175.46	174.88	170.88	163.54	154.61	146.87	142.17	140.12	139.39	139.39	140.95	145.73	154.23
	M+Bo	128.70	121.77	117.03	115.98	118.65	123.77	129.61	134.53	137.18	137.19	135.61	134.73	135.82	137.27	136.77	133.38
3	M	149.76	148.61	148.20	148.74	149.64	149.92	148.78	145.97	141.84	137.22	133.36	131.75	133.17	136.82	141.31	145.41
	M+Bi	170.53	176.51	180.69	182.70	181.76	176.86	167.93	156.40	144.91	136.05	130.87	129.05	130.40	135.34	144.55	156.92
	M+Bo	131.39	122.35	116.13	114.81	118.24	124.35	131.04	136.53	139.38	139.03	136.56	135.18	136.90	139.05	138.63	134.84
4	M	154.78	153.13	152.42	153.00	154.07	154.29	152.56	148.35	141.87	134.02	126.78	123.65	127.03	134.23	141.95	148.32
	M+Bi	178.56	185.88	190.77	192.92	191.50	185.45	174.49	159.64	143.22	128.14	117.27	113.11	117.12	128.31	144.15	161.59
	M+Bo	135.60	123.33	114.72	113.19	118.01	125.56	133.19	139.04	141.69	140.53	136.78	134.72	137.41	140.62	140.70	136.89
5	M	158.25	156.17	155.19	155.87	157.19	157.42	155.14	149.73	141.30	130.76	120.38	115.57	121.20	131.68	142.09	150.38
	M+Bi	185.15	193.56	198.93	201.08	199.16	192.11	179.52	162.24	142.24	122.27	105.55	97.80	105.83	123.35	144.34	165.37
	M+Bo	138.75	123.41	112.34	111.01	117.59	126.46	134.72	140.58	142.77	140.82	136.13	133.65	136.98	141.05	141.81	138.38
6	M	159.67	157.45	156.35	157.27	158.87	159.00	156.07	149.41	139.19	126.34	113.01	106.18	114.61	128.13	140.96	151.05
	M+Bi	191.60	201.30	207.18	209.04	206.29	197.91	183.52	163.93	141.06	117.47	95.83	81.83	96.28	119.10	143.85	167.82
	M+Bo	139.11	121.00	107.15	106.69	115.53	125.67	134.34	139.99	141.57	138.82	133.39	130.73	134.96	139.92	141.64	138.76
7	M	87.58	89.13	91.37	94.00	95.97	96.67	95.77	93.11	88.88	83.11	76.15	68.38	60.48	52.96	46.74	42.64
	M+Bi	92.14	93.28	93.63	93.87	93.11	91.86	90.12	88.01	85.71	83.25	80.77	77.98	75.69	73.23	71.19	69.66
	M+Bo	83.34	85.95	92.83	100.84	107.90	112.82	114.91	113.81	109.70	102.79	93.75	83.34	72.53	61.81	51.56	42.04
8	M	96.74	96.70	96.28	96.03	96.42	96.88	96.27	94.09	90.30	84.98	78.42	71.09	63.67	57.11	52.31	49.33
	M+Bi	93.92	93.20	92.65	92.40	92.00	91.27	90.10	88.49	86.43	83.88	80.79	77.26	73.29	69.04	64.70	60.47
	M+Bo	101.91	102.10	101.60	100.81	102.13	104.73	105.45	103.31	98.32	90.68	81.03	70.04	58.90	48.60	41.24	38.48
9	M	104.28	104.44	104.00	102.97	101.61	101.00	100.60	98.86	95.48	90.53	84.33	77.34	70.85	66.42	63.62	61.90
	M+Bi	99.10	97.57	97.26	98.79	100.10	100.86	101.03	100.58	99.42	97.40	94.39	90.27	85.22	79.61	74.37	69.94
	M+Bo	112.70	114.21	114.68	113.72	111.29	107.71	105.18	102.40	97.05	89.17	79.35	68.73	60.52	56.49	54.85	55.13
10	M	111.19	111.71	111.63	110.88	109.38	107.18	105.80	104.41	101.29	96.56	90.50	84.36	80.79	77.81	75.56	74.09
	M+Bi	106.88	105.09	104.48	107.23	109.34	110.87	111.83	112.13	111.63	110.15	107.51	103.51	98.24	91.78	86.15	82.07
	M+Bo	118.24	120.73	122.02	121.74	119.73	115.96	110.60	104.14	98.29	90.36	81.57	75.27	70.38	67.30	66.15	66.83
11	M	120.33	121.68	122.55	122.87	122.57	121.65	120.15	118.08	115.40	112.19	108.67	105.05	101.63	98.56	96.00	94.06
	M+Bi	119.70	119.12	119.27	120.28	122.04	124.42	127.12	129.77	131.93	133.18	133.21	131.57	128.44	123.85	118.17	111.92
	M+Bo	121.67	124.73	126.27	125.94	123.66	119.58	115.25	112.32	107.25	100.12	91.69	83.20	76.77	73.98	74.08	76.28

<b>Intensidade de tensão linearizada (MPa)</b>						
<b>Ângulo (°)</b>						
<b>SCL</b>	<b>Componente</b>	<b>_320</b>	<b>_330</b>	<b>_340</b>	<b>_350</b>	<b>_360</b>
<b>1</b>	M	143.59	144.47	144.46	143.90	143.38
	M+Bi	160.72	168.19	172.63	173.49	171.44
	M+Bo	127.37	121.62	116.76	114.36	115.49
<b>2</b>	M	145.51	146.53	146.42	145.71	145.07
	M+Bi	164.40	173.04	178.01	178.99	176.66
	M+Bo	127.67	121.09	115.42	112.49	113.71
<b>3</b>	M	148.30	149.54	149.33	148.36	147.56
	M+Bi	169.61	179.65	185.27	186.37	183.76
	M+Bo	128.48	120.96	114.25	110.44	111.70
<b>4</b>	M	152.45	154.13	153.79	152.43	151.33
	M+Bi	177.46	189.28	195.76	197.07	194.12
	M+Bo	129.98	121.50	113.37	108.03	108.93
<b>5</b>	M	155.68	157.80	157.33	155.52	154.03
	M+Bi	183.62	196.85	204.16	205.76	202.69
	M+Bo	131.43	122.39	113.03	105.90	105.71
<b>6</b>	M	157.60	160.37	159.87	157.55	155.54
	M+Bi	188.28	203.19	211.64	213.98	211.16
	M+Bo	132.09	122.80	112.32	102.83	100.40
<b>7</b>	M	41.20	42.52	45.82	50.21	54.72
	M+Bi	68.76	68.54	68.80	69.48	69.73
	M+Bo	33.92	28.84	28.87	34.20	42.67
<b>8</b>	M	47.84	47.65	48.75	51.46	55.68
	M+Bi	56.62	53.45	51.31	50.70	51.98
	M+Bo	39.25	42.65	48.95	57.30	65.98
<b>9</b>	M	61.10	61.14	61.90	63.31	65.24
	M+Bi	66.27	63.54	62.07	62.13	63.69
	M+Bo	57.01	60.17	64.73	70.94	77.88
<b>10</b>	M	73.39	73.41	74.04	75.17	76.65
	M+Bi	78.34	75.41	73.69	73.50	74.82
	M+Bo	68.95	71.96	75.36	79.10	83.44
<b>11</b>	M	92.76	92.06	91.87	92.11	92.60
	M+Bi	105.75	100.37	96.44	94.40	94.26
	M+Bo	79.80	83.81	87.55	90.53	92.48

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino**  
**Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000**  
**Fone/Fax(0XX11) 3133-8908**  
**SÃO PAULO – São Paulo – Brasil**  
**<http://www.ipen.br>**

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---