



***Desenvolvimento de ferramentas computacionais para a modelagem e análise de defeitos de corrosão em vasos sob pressão.***

Gustavo Lima do Nascimento<sup>1</sup>, Antônio Almeida Silva<sup>2</sup>

## RESUMO

O objetivo desse trabalho é o de analisar um modelo de vaso de pressão que apresenta defeitos de corrosão generalizada através de ferramentas computacionais baseado no Método dos Elementos Finitos e pela norma API 579/ASME FFS-1 que se baseia na metodologia de FFS (Adequação-Ao-Serviço). A corrosão generalizada no modelo apresenta uma aproximação parabólica com uma perda de espessura de aproximadamente 52% da espessura total do vaso de pressão. Foram encontradas as tensões principais máximas do modelo sem o defeito que valem 67,314 MPa para uma pressão interna de 2,07 MPa. Através da metodologia do FFS foram encontradas novas pressões máximas de serviço (PMTA) para a dada perda de espessura. A avaliação de nível 1 obteve uma pressão de 1,17MPa que através de análise numérica apresentou uma tensão principal máxima de 117,67 MPa. Na avaliação de nível 2 foi obtido uma pressão de 1,30MPa apresentando tensões máximas de 130,74MPa. A tensão máxima na avaliação de nível 1 ficou abaixo da tensão admissível que corresponde a 120,06MPa colocando o vaso de pressão em segurança. A avaliação de nível 2, menos conservadora, apresentou tensão máxima acima da tensão admissível. Foi então encontrado uma pressão que causariam tensões próximas a da pressão sem a perda de espessura que corresponde a 0,67MPa. Através dessa análise é possível afirmar que mesmo através de avaliações das condições de serviço, o uso de ferramentas computacionais se torna necessário para saber se vasos de pressão estão operando com segurança.

**Palavras-chave:** Ferramentas computacionais, MEF, Vasos de pressão, Corrosão.

<sup>1</sup>Aluno de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFCCG, Campina Grande, PB, e-mail: gustavoliman@hotmail.com

<sup>2</sup>Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCCG, Campina Grande, PB, e-mail: antonio.almeida@ufcg.edu.br

# **DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL TOOLS FOR THE MODELING AND ANALYSIS OF CORROSION DEFECTS IN PRESSURE VESSELS.**

## **ABSTRACT**

The objective of this paper is to analyze a model of pressure vessel with generalized corrosion using computational tools based on the Finite Element Methods (FEM) and the standard API 579/ASME FFS-1 that is based on the methodology of FFS (Fitness-for-service). The generalized corrosion in the model presents a parabolic approach with a thickness loss of approximately 52% of the total thickness in the pressure vessel. The maximum principal stress of the model without defect were found and has the value of 67,314 MPa to an internal pressure of 2,07 MPa. Through FFS methodology were found a new MAWP for the given thickness loss. The level 1 assessment obtained a pressure of 1,17MPa that numerical analysis presented a maximum principal stress of 117.67 MPa. On level 2 assessment was obtained a pressure of 1,30MPa presenting a maximum principal stress of 130,74MPa. The principal maximum stress on the level 1 assessment was below of the allowable tensile stress that corresponds to 120,06MPa, putting the pressure vessel in safety. The level 2 assessment, less conservative, presented the principal maximum stress above of the allowable tensile stress. Finding a pressure that would a principal maximum stress close to the pressure without the loss thickness, this new pressure has the value of 0,67MPa. Through this analysis, it is possible to affirm that even through evaluation of the service conditions, the use of computational tools becomes necessary to know if pressure vessels are operating safely.

**Keywords:** Computational tools, FEM, Pressure Vessels, Corrosion.

## **1. INTRODUÇÃO**

O estudo na integridade estrutural de diversos componentes está presente durante boa parte do cotidiano de um engenheiro. Esse estudo se faz necessário desde o projeto até em uma avaliação de vida útil desses componentes, uma vez que graves danos podem ser cometidos por causa de uma simples descontinuidade em uma estrutura.

Na indústria de processos petroquímicos, por tratar de um regime contínuo e severo de serviço, muitas vezes são inviáveis que ocorram paradas, o que demanda uma maior confiança em componentes mecânicos desse ramo, como os vasos de pressão. Uma parada não planejada, devido a uma falha, pode acarretar em prejuízos para a indústria, além de que pode acabar causando graves danos para a vida humana.

Os vasos de pressão podem sofrer danos por diversos motivos, entre eles destacam-se como grande mecanismo de dano a corrosão, que aliada a solicitações mecânicas acabam por diminuir ainda mais sua vida útil. Levando isso em consideração algumas normas ou guias de avaliação da integridade estrutural foram criadas para avaliar a aceitabilidade de equipamentos danificados diante as condições operacionais poderem ter a aceitação dos serviços de componentes pressurizados. A norma API 579/ASME FFS-1, criada pela API (American Petroleum Institute) junto a ASME (American Society of Mechanical Engineers), avalia através da metodologia de adequação-ao-serviço (FFS - Fitness-for-Service) se

componentes pressurizados possuem condições de continuar operando mesmo com a presença de danos estruturais.

A avaliação de defeitos por corrosão através de modelos computacionais baseados em métodos numéricos é dado com uma boa ferramenta para avaliar se vasos de pressão possuem condições necessárias para poderem continuar em serviço. Porém, a criação de um bom modelo demanda um grande aprofundamento por parte do engenheiro, uma vez que deve procurar obter uma melhor representação do defeito para obtenção de resultados mais precisos.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver ferramentas de modelos computacionais, a fim de se ter uma melhor representação de defeitos causados pela generalização de corrosão em determinada área. Os modelos adotados deverão ser implementados para serem avaliados através de softwares comerciais que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF).

### 1.1. VASOS DE PRESSÃO

Vasos de pressão são equipamentos com bastante uso na indústria de processos, como refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas e indústrias farmacêuticas em geral, que se dedicam principalmente para o armazenamento, distribuição e manuseio de fluidos pressurizados. O regime severo de trabalho acaba por exigir aos vasos de pressão maior confiabilidade do projeto, por muitas vezes possuir regime contínuo de serviço durante longos períodos

Os vasos de pressão possuem, em sua maioria, os cascos em formatos provenientes de revolução, como cônicos, esféricos ou cilíndricos e a utilização desses formatos irá depender da finalidade de sua fabricação. Formatos cilíndricos são preferíveis e mais utilizados devido à facilidade de fabricação e transporte, uma vez que se pode ter total aproveitamento de chapas para a construção dos vasos.

Quando submetidos à pressão interna, tubos de parede fina, onde tem-se o raio pelo menos 10 vezes maior do que a espessura, apresentam o desencadeamento de tensões circunferenciais ( $\sigma_c$ ) e longitudinais ( $\sigma_l$ ) ao longo de sua estrutura, como mostrado na Fig. 1, sendo que a distribuição de tensões provenientes de pressões internas irá apresentar tensões maiores na superfície interior do que na superfície exterior, podendo ser uniformizada conforme for diminuindo a espessura.

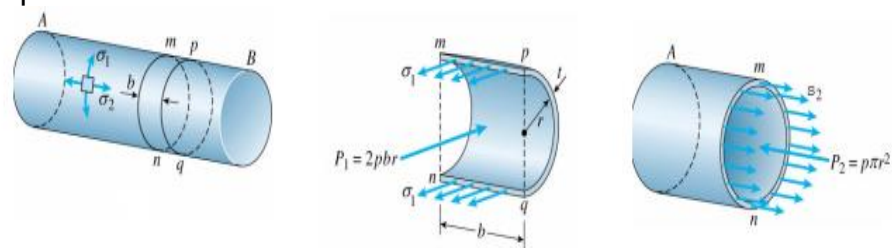


Figura 1 – Tensões geradas em vasos de pressão devido a pressões internas. (Franceschini, 2011)

Essas tensões são funções da pressão interna ( $P_i$ ) na qual o vaso está submetido, o raio da circunferência do cilindro ( $r$ ) e da espessura ( $t$ ) e podem ser dados pelas seguintes equações:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot i \cdot r}{t} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{p \cdot i \cdot r}{2 \times t} \quad (2)$$

Uma importante variável a ser obtida em um projeto de vasos de pressão é a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), pressão essa capaz de causar a máxima tensão que um material pode suportar. O cálculo da PMTA é dado por normas de construção de vasos de pressão e geralmente são dados em função da geometria e das propriedades mecânicas dos vasos de pressão.

## 1.2. DEFEITOS DE CORROSÃO

Entende-se por corrosão a deterioração de materiais, em sua maioria metálica, através de ações químicas ou eletroquímicas causada pela exposição ao ambiente em que se encontram. Esse fenômeno se torna indesejável em solicitações mecânicas, uma vez que deteriorado, um material passa a apresentar características diferentes daquelas a qual possuía, o tornando muitas vezes inadequado para a operação a qual foi submetido.

A corrosão apresenta problemas frequentes em diversas áreas, uma vez que afetam ligas que estão presentes em equipamentos eletrônicos, em estruturas expostas ao ar, em estruturas submersas ou enterradas, em meios de transportes e em equipamentos industriais como trocadores de calor, caldeiras e reatores. Normalmente, são necessários projetos dispendiosos para essas áreas e se exige delas uma grande resistência à corrosão a fim de se evitar quedas de produção por parte da estrutura corroída até evitar acidentes graves que venham a se tornar fatais.

Todos os materiais podem ser facilmente corroídos quando expostos a meios corrosivos específicos. Para se fazer uso de determinado material em um projeto, deve-se levar em consideração além do material, o meio corrosivo e todas as condições de operação, com o objetivo de ter o melhor mecanismo de combate a corrosão.

O estudo acerca das formas de corrosão possui grande importância quando se deseja conhecer melhor o processo corrosivo e os meios de proteção. (GENTIL, 2011) explica que a corrosão generalizada ou corrosão uniforme é o tipo de corrosão que se processa ao longo de uma superfície, ocorrendo perda uniforme da espessura ao longo de uma área extensa. É um tipo de corrosão em que é facilmente encontrada em dutos, tubulações e vasos de pressão.

O processo corrosivo pode ter seu mecanismo de ação acelerado quando o meio a qual o material se encontra estiver submetido a solicitações mecânicas. Algumas fraturas decorrentes dessa combinação podem ser encontradas mesmo sem a perda relativa de massa, acarretando em graves problemas, como a parada do equipamento ou colocando em risco a segurança do local de instalação.

Dentre casos mais recorrentes de problemas com a integridade estrutural pode-se dizer que a fadiga, associada com a corrosão, encontram-se entre os maiores mecanismos de falha em estruturas dentro de uma indústria de processos. A fragilização por hidrogênio, bem como a corrosão sob tensão também são de extrema importância quando se trata de integridade estrutural.

A corrosão sob tensão tem seu início através da nucleação da trinca em que ocorrem na formação de pites na superfície do metal. Normalmente rompe-se a

camada protetora a substancia corrosiva que entra em contato com material provocando com maior facilidade a propagação das trincas, devido a esforços mecânicos aliados com efeitos corrosivos.

### **1.3. REVISÃO DA NORMA API 579**

A norma API 579, do Instituto Americano de Petróleo (American Petroleum Institute), foi criada com o intuito de estabelecer padrões de procedimentos para avaliação da integridade estrutural e descontinuidades devido a mecanismos de danos em dutos, vasos de pressão, tanques e componentes pressurizados em geral.

O critério de avaliação da norma API 579 é baseada na adequação-ao-serviço (FFS – Fitness-For-Service) e avalia a necessidade de troca, reparo ou então o monitoramento da vida útil de componentes com defeitos. A metodologia da FFS classifica a severidade de uma falha em uma análise em que são levadas em consideração todas as condições ao qual o componente está submetido, como a sua geometria, as solicitações mecânicas e todas as características do defeito presente.

Em cada uma das seções do Código são utilizados 3 níveis de avaliação, onde o primeiro possui um maior grau de conservadorismo e conforme aumenta-se o nível aumenta-se também a quantidade de informações requeridas e métodos de inspeção mais apurados são necessários. Segundo a API 579 (2000), os níveis são cada vez mais rigorosos e cada nível equilibra a proporção entre o grau de conservadorismo, as condições ao qual está submetida, a habilidade do operador e a complexidade da análise, onde:

- Nível 1 – Nessa avaliação os procedimentos são destinados a providenciarem critérios de triagem, através de gráficos e tabelas, com o mínimo de inspeção requerida. Nesse nível, técnicos com conhecimento no FFS podem avaliar o componente com defeito;
- Nível 2 – As avaliações de nível 2 apresentam dados mais detalhados acerca do defeito, porém as informações são as mesmas das necessárias para a primeira avaliação. É preciso que se tenham cálculos mais apurados e com isso requer que seja avaliado por um engenheiro experiente ou então por alguém com alto conhecimento na metodologia FFS;
- Nível 3 – No nível 3 é preciso informações mais detalhadas acerca do defeito e com isso tem-se resultados mais precisos do que os níveis anteriores. Métodos de inspeção que possibilitem dar a melhor característica da falha são necessários. Normalmente, tem-se a utilização de métodos computacionais baseados nos MEF (Método dos Elementos Finitos) são utilizados para a avaliação desse nível, o que requer profissionais experientes nessa metodologia de avaliação.

### **1.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

O método dos elementos finitos se faz necessário por grande parte dos problemas de engenharia ser resolvidos através de funções diferenciais, que descrevem de forma contínua o comportamento físico de determinada geometria. Aplicando condições iniciais de contorno na região de domínio é possível obter resultados com grande proximidade da realidade. Porém, a solução desses problemas é dada de maneira muito trabalhosa. Isso traz a necessidade de modelos matemáticos que possuam maior facilidade de resolução.

Nesse contexto, o MEF tem a finalidade de discretizar o modelo contínuo. Em um sistema discreto, tem-se a divisão de determinada estrutura em diversas partes distintas (elementos) conectadas por pontos discretos (nós). Essa interconexão de nós e elementos acaba por resultar em um sistema de equações linear ou não linear, dado de forma matricial, do tipo  $[F] = [K].[u]$ , onde F representa o vetor de forças nodais, K representa o sistema de rigidez do elemento e u simboliza o vetor de deslocamentos nodais. Por não considerar mais a região como um diferencial, o resultado obtido após a discretização traz resultados aproximados, porém com um menor esforço envolvido.

Após a discretização da geometria, programas computacionais podem fazer uma análise e montar uma equação matricial para calcular o deslocamento e as tensões em cada um desses pontos de interligação. Os nós de um elemento poderão ter mais de um grau de liberdade, onde o cálculo se faz necessário para cada um desses nós.

Vários itens possuem grande importância em uma análise por simulação numérica. Os aspectos acerca dos elementos, como sua forma e seu grau de interpolação são tidos como primordiais. Ao grau de interpolação se diz aos graus de liberdade, que se será relacionada a quantidade de nós em um elemento e a sua disposição, normalmente, encontram-se localizados nas extremidades do elemento, mas também podem ser encontrados em suas arestas ou faces.

A Figura 2 representa de forma sucinta como se relacionam os graus de liberdade de acordo com as dimensões dos mesmos. Elementos unidimensionais irão apresentar um único grau de liberdade, porém aumentando a sua dimensão é possível ter **mais** graus de liberdade conforme a quantidade de nós é aumentada.

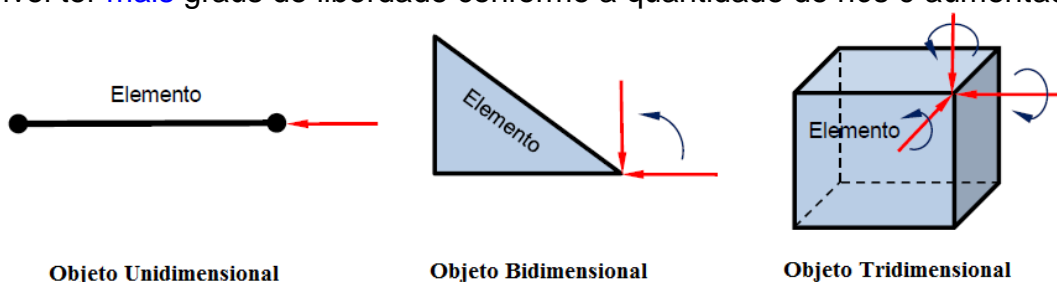


Figura 2 – Objetos com seus nós e graus de liberdade  
Fonte: Alves, 2006

A Figura 3 mostra de forma mais simplificada como o grau polinomial irá aumentar com o acréscimo de nós em um elemento triangular bidimensional. Vale destacar que o aumento do grau polinomial é acompanhado com um maior número de termos. A quantidade dos termos irá se relacionar com a convergência da análise, quanto maior for essa quantidade maior serão os pontos interligados, ou seja, trarão resultados melhores em menores distancias do que se comparado com um elemento com uma menor quantidade de termos, conseqüentemente, menor quantidade de nós.

Triângulo de Pascal	Grau polinomial, p	Número de termos, n
1	0 (constant)	1
x y	1 (linear)	3
x <sup>2</sup> xy y <sup>2</sup>	2 (quadratic)	6
x <sup>3</sup> x <sup>2</sup> y xy <sup>2</sup> y <sup>3</sup>	3 (cubic)	10
x <sup>4</sup> x <sup>3</sup> y x <sup>2</sup> y <sup>2</sup> xy <sup>3</sup> y <sup>4</sup>	4 (quartic)	15

$n = \frac{(p+1)(p+2)}{2}$

Figura 3 – Grau polinomial dos elementos

A variedade de elementos irá se diferenciar de acordo com o software de análise utilizado, podendo ter softwares em que se admitem objetos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. A geometria do elemento poderá ser modificada também a depender do software. Os elementos geométricos irão diferir entre si em relação a quantidade de nós. Elementos hexaédricos são preferíveis em algumas análises por possuírem facilidade de convergência de resultados, porém, outros elementos que possuem uma quantidade menor de nós poderão chegar a essa convergência, isso faz com que seja utilizado um menor custo computacional para a análise.

Em uma análise através do método dos elementos finitos (MEF) é importante aliar a convergência com o menor custo computacional, o que irá levar a um menor gasto de tempo. Uma quantidade elevada de nós e elementos, ou seja, em uma discretização bem refinada, irá demandar maior quantidade de processamentos que serão feitos pelo software. Por isso, é importante levar em consideração que é importante ter-se uma quantidade pequena de nós. Porém, essa quantidade inferior de nós poderá diminuir a exatidão da análise, que pode deixar de ter nós em regiões críticas. A Fig. 4 mostra um gráfico que apresenta uma boa relação entre a quantidade de nós e convergência dos resultados.

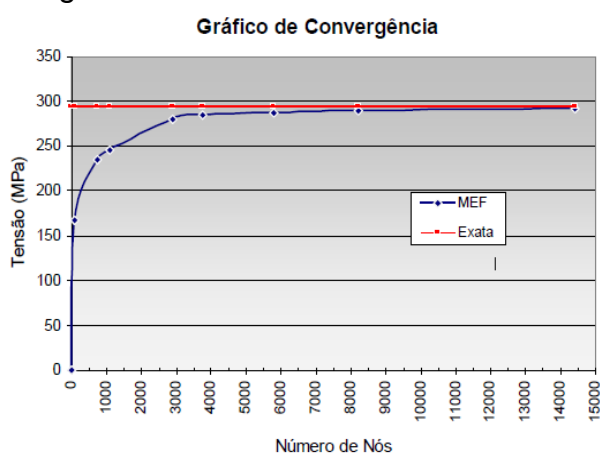


Figura 4 – Gráfico de convergência de tensão pelo número de nós  
Fonte: Alves, 2003

Os resultados apresentados por uma análise por MEF geralmente apresentam uma boa aproximação do que ocorre na realidade. Porém vale destacar que podem haver algumas diferenças, uma vez que o material, a geometria e os carregamentos podem não ser exatamente iguais aquele que determinado componente possui.

Em análises com o MEF o corpo rígido é tratado como homogêneo, porém os materiais nem sempre possuem essa homogeneidade, e conseqüentemente, não possuem as mesmas propriedades internamente. Além disso, a geometria desses componentes pode não ser exatamente igual ao projetado, o que afeta diretamente na análise da distribuição de tensões ao longo do corpo.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.1. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem deve ser feita de maneira que se consiga obter a máxima precisão com o menor recurso computacional, uma vez que uma malha bem

modelada, embora dê uma melhor precisão dos resultados, irá demandar um alto custo computacional. Em contrapartida, uma malha menos refinada pode acarretar em uma imprecisão dos resultados, o que acaba por ocasionar uma análise incorreta dos resultados.

A Figura 5 mostra um fluxograma detalhado das atividades seguidas para o desenvolvimento do modelo e análise dos resultados apresentados pela simulação numérica.

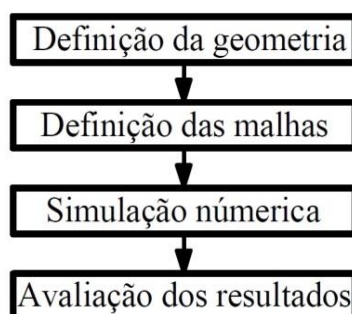


Figura 5 – Fluxograma das etapas de avaliação  
Fonte: Própria

Inicialmente deve-se definir uma geometria típica para o vaso de pressão, bem como a geometria e dimensões do modelo de defeito do vaso. A geração de malhas deve ser tomada de forma cuidadosa e concisa. Após a geração de uma boa malha o modelo está pronto para ser avaliado pelo software, dadas as condições de contorno. Os resultados devem ser comparados com aqueles descritos pela norma API579/ASME – FFS.

## 2.2. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO DEFEITO

Levando em consideração que defeitos provenientes de corrosão tendem a causar perda generalizada de forma irregular, inicialmente, foi utilizado como característica geométrica da falha uma aproximação de formato parabólico, como mostrado na Fig. 6.

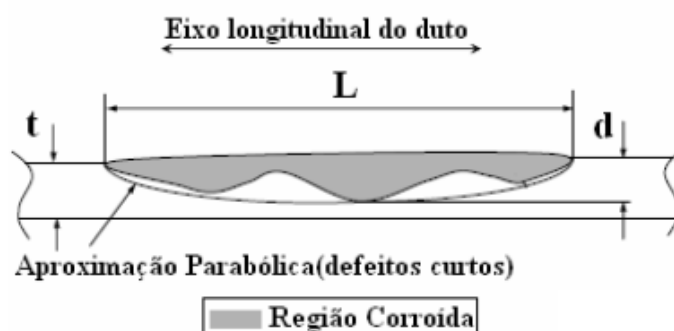


Figura 6 – Aproximação parabólica de corrosão generalizada  
(Fonte: adaptado de CABRAL, 2007)

Além da utilização da geometria parabólica foi necessária aplicar um raio de concordância nas bordas do defeito, sua utilização se dá pelo fato que essas quinas podem alterar de forma significativa a distribuição de tensões na região do defeito, uma vez que essas quinas irão se comportar como concentradores de tensão.



## 2.3. APLICAÇÕES DAS MALHAS

A partir do modelo geométrico criado, pode-se fazer uso do mesmo para avaliações através de simulações computacionais. Os softwares comerciais para avaliar a integridade estrutural baseiam-se em um método numérico bastante utilizado pela sua confiabilidade nos resultados. O Método dos Elementos Finitos (MEF) possuem ampla utilização devido a sua flexibilidade e consiste em discretizar o domínio físico de uma geometria através de uma quantidade finita de elementos de com as mais variadas geometrias.

A análise de avaliação através do MEF segue os mesmos passos quando utilizado um sistema contínuo, porém, o elemento diferencial agora é dado como um elemento discreto. Por isso, é necessária a criação de modelos adequados para a avaliação, sendo escolhidas de forma correta as propriedades do material, bem como as condições de contorno do problema.

A metodologia utilizada para a modelagem da geometria é baseada nos procedimentos do CENPES/PETROBRÁS, onde são realizados vários estudos de refinamento de malhas. Esse método de discretização consiste na utilização de uma malha mais refinada na região do defeito, com uma transição lenta para uma malha menos refinada, com o objetivo de possibilitar um menor recurso computacional.

## 2.4. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A seção 4 da norma API 579/ASME – FFS-1 diz respeito a perda generalizada de metal em um equipamento pressurizado. Porém, o método de avaliação presente nesta seção pode ser utilizado para avaliação de perda de metal seja ela localizada ou uniforme, na qual tiver excedido uma margem de corrosão futura (FCA – Future Corrosion Allowance). O processo de avaliação irá depender dos dados que foram disponibilizados, como a espessura e as características de perda do metal.

A avaliação se dá em torno de cálculos para poder classificar se um componente pressurizado se encontra em condições de permanecer em serviço. Os cálculos são baseados na medida da espessura da parede do tubo, onde ela será dependente para poder encontrar uma nova PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível) de equipamentos que estejam dentro dos requisitos para avaliação por essa norma.

A metodologia de avaliação pela API 579 para perdas generalizadas de espessura é dada da seguinte forma:

1. Determina a espessura mínima de projeto para a parede do vaso de pressão, que vai ser o maior valor entre as espessuras levando em consideração as tensões circunferenciais e longitudinais que é dado segundo a ASME B&PV Code, Section VIII, Division I, paragraph UG-27 por:

- a. Tensões circunferenciais:

$$t_{min}^c = \frac{P \times (R + FCA)}{(S \times E) + 0,6 \times P} \quad (3)$$

- b. Tensões longitudinais:

$$t_{min}^l = \frac{P \times (R + FCA)}{(2 \times S \times E) + 0,6 \times P} \quad (4)$$

- Determinar a menor espessura medida no vaso de pressão e as medidas de todas as espessuras na região do defeito que será utilizada na avaliação;
- Determinar o valor da Relação de Espessura Restante,  $R_t$  (Remaining Thickness Ratio), que é dado por:

$$R_t = \left( \frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}} \right) \quad (5)$$

- Determinar o comprimento de espessura média,  $L$  que vai ser dado por:

$$L = Q \times \sqrt{D \times t_{min}} \quad (6)$$

onde  $Q$  vai ser dado por:

$$Q = 1,123 \times \left[ \left( \frac{1 - R_t}{1 - \frac{R_t}{RSF_a}} \right)^2 - 1 \right]^{0,5} \quad (7)$$

onde a norma API 579 recomenda usar o valor de 0,9 para o Fator de Força Restante,  $RSF_a$  quando não se conhece o valor do mesmo;

- Determinar a espessura mínima medida,  $t_{am}$ , avaliando a média das espessuras ao longo do comprimento  $L$ ;
- Avaliar segundo os níveis de avaliação 1 ou 2.

Para atender as condições de avaliação de nível 1, ao qual tem-se como método mais conservador, os componentes pressurizados deverão atender os critérios descritos nas Eq. (8) e (9), para poder ter sua validação.

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \quad (8)$$

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5 * t_{min}; 0,1] \quad (9)$$

Onde,  $t_{am}$  é a média dada pelas espessuras corroídas,  $FCA$  é a margem para corrosão futura, e  $t_{mm}$  é a mínima espessura encontrada na inspeção. Caso nenhuma dessas condições forem satisfeitas o componente não poderá continuar nas condições de trabalho que foram impostas. Com isso, a norma API 579/ASME FFS-1 recomenda que seja feita uma redução da PMTA para que o componente possa operar dentro das condições na qual a corrosão generalizada o propiciou. A Eq. (10) mostra o cálculo da nova PMTA para o componente danificado, segundo o método de avaliação de nível 1.

$$PMTA' = \frac{S \times E \times t_c}{R_c + 0,6 \times t_c} \quad (10)$$

Onde, tem-se:

$$t_c = \frac{t_{am} - FCA}{RSF_a} \quad (11)$$

Tem-se que  $S$  é a tensão admissível pelo material,  $E$  é a eficiência de solda e  $R_c$  é dado por:  $R_c = R + FCA$ . Levando em consideração que não foram satisfeitos os critérios descritos pelo nível 1 e se deseja tomar um método de avaliação mais rigoroso para a perda de espessura do vaso de pressão, então deve-se fazer uso do método de avaliação de nível 2.

A grande diferença entre os níveis de avaliação 1 e 2 está na presença do  $RSF_a$  (Allowable Remaining Strength Factor – Fator de Força Restante Permitido). O  $RSF_a$  possibilita uma melhor estimativa do comportamento do material em uma análise não linear quando estiver submetido a carregamentos que estejam próximos

ao colapso. Convenciona-se o uso do  $RSF_a$  como sendo igual a 0,9. Sendo assim, o critério de aceitação de nível 2 pode ser obtido pelas Equações 12 e 13.

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \times RSF_a \quad (12)$$

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5 * t_{min}; 0,1] \quad (13)$$

Um novo cálculo da PMTA é admitido caso o vaso de pressão não satisfaça a Eq. 12, onde esse valor é dado pela Equação 14.

$$PMTA'' = \frac{S \times E \times \frac{t_c}{RSF_a}}{R_c + \frac{0,6 \times t_c}{RSF_a}} \quad (14)$$

Analogamente a avaliação de nível 2, temos que

$$t_c = \frac{t_{am} - FCA}{RSF_a} \quad (15)$$

Caso deseja-se escolher um método de avaliação ainda mais rigoroso, o nível 3 utiliza-se de métodos numéricos para avaliar se um componente pressurizado pode ser submetido as condições de serviço impostas. Normalmente são utilizados softwares baseados no método dos elementos finitos para esse tipo de avaliação. Dados mais específicos sobre o carregamento, a geometria e a não linearidade do material são necessários para esse tipo de avaliação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Definição da Geometria

Considerando a representatividade de um defeito proveniente da corrosão, as condições de trabalho do modelo desenvolvido foram baseadas nas condições de construção do Código ASME, Seção VIII, Divisão 1. Os dados do modelo utilizado encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1: Condições de operação e dimensões do vaso de pressão**

Pressão de Operação (P):	2,07 [MPa]
Diâmetro Interno (D):	1219,2 [mm]
Espessura (t):	19,5 [mm]
Pressão Admissível (S)	120,06 [MPa]

(Fonte: Adaptado de: API579, Fitness-for-service, 2000)

As dimensões acerca da geometria apresentada pelo defeito são mostradas na Tabela 2, onde foi usado como comprimento de espessura mínima cerca de 52% da espessura real do vaso de pressão.

**Tabela 2: Dados da geometria do defeito**

Comprimento circunferencial:	228,600 [mm]
Comprimento longitudinal:	228,600 [mm]
Espessura mínima medida	9,144 [mm]
Raio de concordância	50,000 [mm]

(Fonte: Adaptado de: API579, Fitness-for-service, 2000)

A partir das dimensões do vaso e da geometria do defeito, deu-se início a construção do modelo. Devido a maior simplicidade, a geometria foi modelada a partir do próprio software que será utilizado na avaliação. Embora essa ferramenta ofereça maiores limitações do que outros softwares que possibilitem a criação de geometrias CAD, ela foi suficiente para apresentar o modelo da forma planejada.

Inicialmente foi proposto uma geometria completa do vaso de pressão, porém, após alguns testes para aplicação de malhas, foi observado que o modelo apresentava simetria. Foi então utilizado o modelo mostrado na Figura 7. Esse modelo apresentou convergência dos resultados quando comparado com o modelo completo, porém ofereceu um menor custo computacional, com a quantidade de elementos reduzidos em até 4 vezes se comparado com o modelo completo.

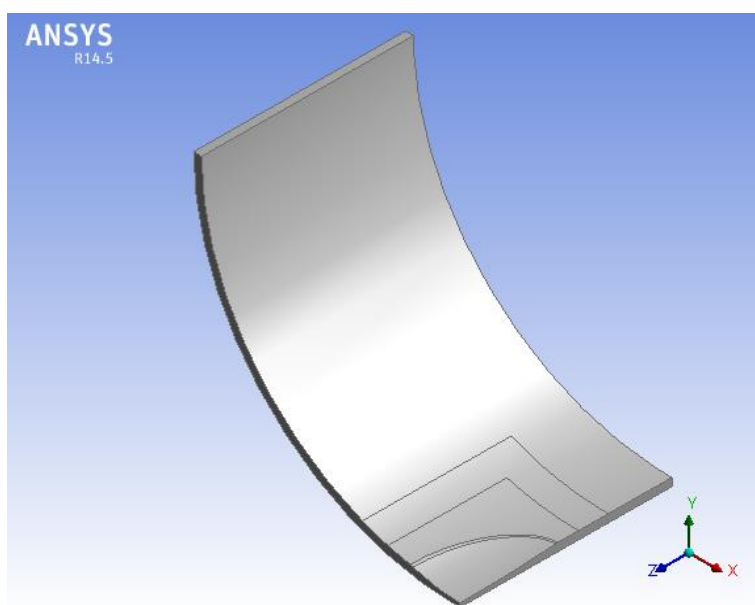


Figura 7 – Vista isométrica do modelo e defeito adotado.

A partir dessa imagem é possível observar a aproximação parabólica utilizada, tanto longitudinalmente quanto de forma circunferencial. Foi adotado também um raio de concordância de 50mm para que as bordas do defeito não funcionem como concentradores de tensão. Além disso foi utilizado algumas demarcações para ser possível a utilização de uma transição controlada do tamanho dos elementos do modelo.

### 3.2. Aplicação das Malhas

Após ser obtida a geometria do modelo com o defeito foi utilizado um método de convergência dos resultados para a aplicação das malhas. Inicialmente foi colocado uma malha muito refinada com o objetivo de se obter a convergência dos resultados. Logo após foi reduzindo a quantidade de nós e elementos do modelo com o intuito de se obter resultados que convergissem e apresentassem um menor custo computacional.

Inicialmente foi proposto o uso de malhas hexaédricas, pois a mesma possui um maior número de nós por elemento, o que em teoria traria uma melhor aproximação dos resultados. Porém, foram utilizadas malhas tetraédricas, com o uso do elemento SOLID187 que é um elemento tetragonal com 10 nós de avaliação e 3 graus de liberdade em cada nó. O seu uso se tornou favorável, pois a mesma

conseguiu convergir os resultados apresentando menor custo computacional, ou seja, foi necessário um menor tempo para resolução do problema.

A Figura 8 detalha melhor a discretização da geometria, onde a região do defeito apresenta um maior acúmulo de nós em relação ao restante da geometria, uma vez que a análise nessa região deve ser mais precisa.

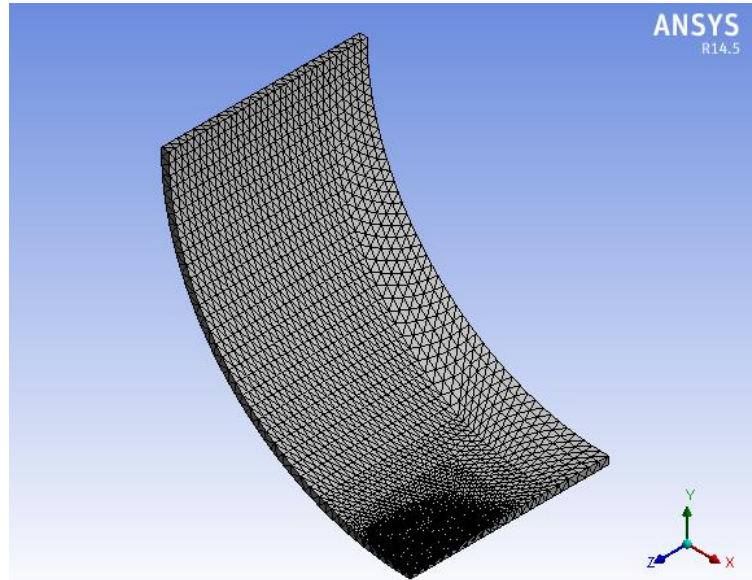


Figura 8 – Malha utilizada no modelo.

Como foi explicado na descrição da geometria, foi utilizado uma divisão para melhor controlar o tamanho dos elementos. A Figura 9 mostra com maiores detalhes essa transição, onde foi dada uma redução de 5mm em cada uma das delimitações para transição da malha: 20mm; 15mm; 10mm; 5mm.

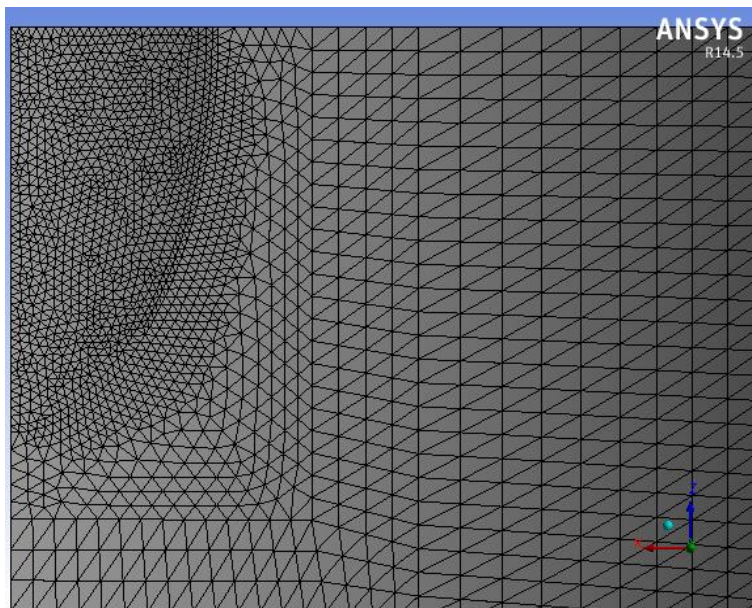


Figura 9 – Vista superior da região do defeito.

### 3.3. APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como foi utilizado condições de simetria no modelo geométrico definido, então é necessário aplicar as condições de contorno no software que de análise numérica. A Figura 10 mostra como essas condições de contorno se apresentam, onde A representa a pressão aplicada em todas as partes internas do vaso de pressão. B, C e D representam as condições de deslocamento 0 nas direções x, y e z, respectivamente. Esse deslocamento 0 foi utilizado para poder aplicar as condições de simetria.

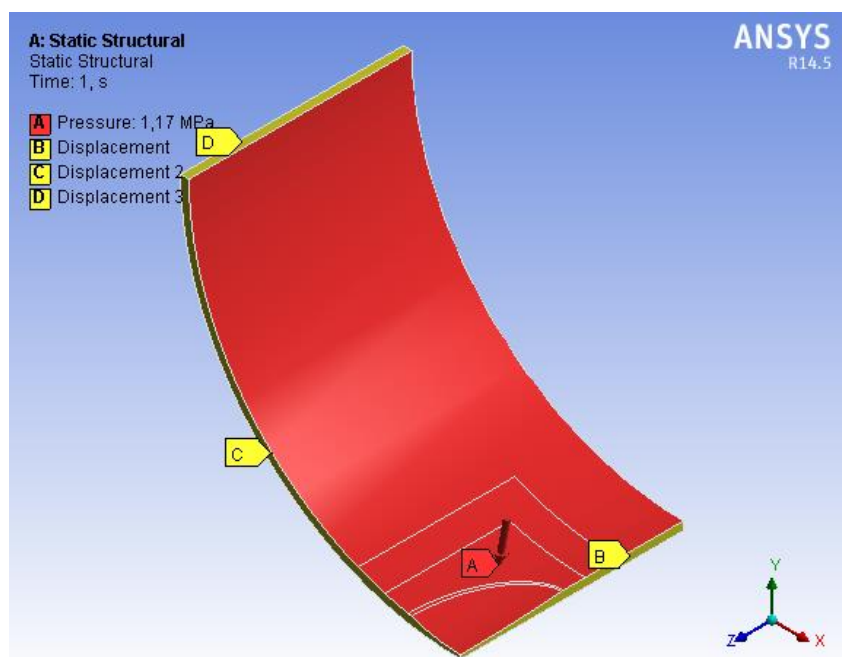


Figura 10 – Condições de contorno aplicada no modelo.

### 3.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

Antes de ser feita a avaliação no modelo segundo as normas da API 579, foi feito uma validação do software com o intuito de se obter a convergência dos valores referentes ao vaso de pressão sem a presença do defeito de corrosão.

Utilizando o valor da tensão máxima que atua no vaso de pressão, temos que, através da equação 1:

$$\sigma_t = \frac{2,07 \times 609,6}{19,05} = 66,24 \text{ MPa}$$

O valor analítico da tensão principal máxima que atua em um elemento diferencial do modelo tem o valor de  $\sigma_t = 66,24$  Mpa. Com o resultado do valor analítico foi então desenvolvido um modelo sem o defeito, com o intuito de avaliar a distribuição de tensões ao longo do corpo. A Figura 11 mostra a tensão máxima que ocorre no vaso sem a perda de espessura. Foi encontrado uma tensão máxima de 67,314 MPa.

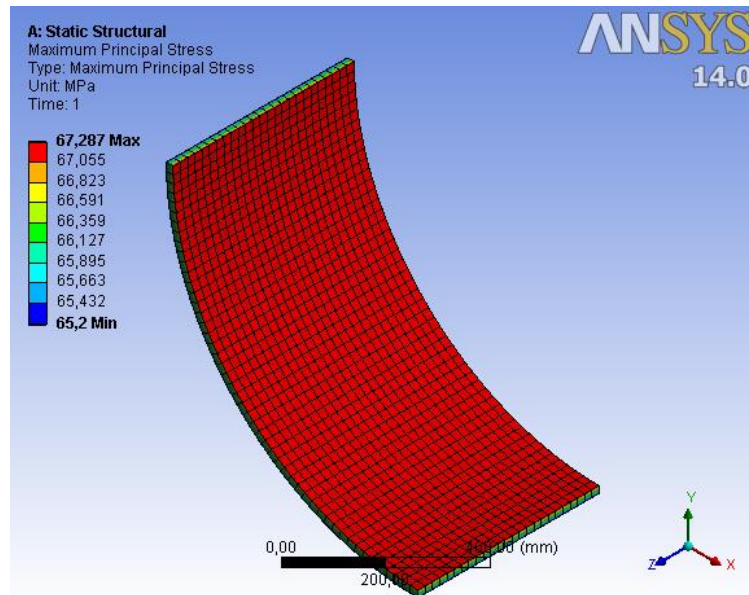


Figura 11 – Análise numérica do vaso de pressão sem defeito.

Sendo assim, o resultado numérico foi de 67,314 MPa, enquanto o resultado analítico foi de 66,24 MPa, esse valor equivale a um erro de 1,62%, um erro relativamente pequeno que mostra a confiabilidade do software utilizado.

### 3.4. Avaliação do Vaso de Pressão pelos Níveis 1 e 2 da API 579

Através da metodologia empregada pela API 579 para corrosão generalizada podemos obter a nova pressão máxima de trabalho admissível pelo vaso de pressão.

1. O primeiro passo é a verificação da espessura mínima dada pelas tensões circunferências e longitudinais dadas, respectivamente, pelas equações 3 e 4.

$$t_{min}^c = \frac{2,07 \times (609,6 + 2,54)}{(120,06 \times 0,85) + 0,6 \times 2,07} = 12,26 \text{ mm}$$

$$t_{min}^l = \frac{2,07 \times (609,6 + 2,54)}{(2 \times 120,06 \times 0,85) + 0,6 \times 2,07} = 6,17 \text{ mm}$$

O valor de  $t_{min}$  será então o maior valor entre os valores referentes ao sentido circunferencial e longitudinal, onde

$$t_{min} = \max[t_{min}^l; t_{min}^c] = 12,26 \text{ mm}$$

2. O segundo passo da metodologia é a verificação das espessuras de cada lugar da região do defeito. A Figura 12 mostra os detalhes de como foi obtido o grid para avaliação da espessura do vaso de pressão. Foi utilizado um passo de 50mm no sentido circunferencial e 60mm no sentido longitudinal.

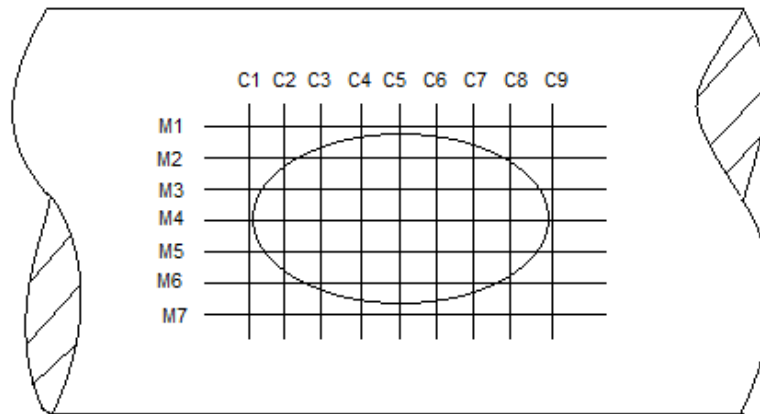


Figura 12 – Grid utilizado para verificação das espessuras.

A partir do *grid*, foi possível analisar as espessuras de toda região do defeito, onde os valores de cada espessura foram colocados na Tabela 3.

**Tabela 3. Valores das espessuras da região do defeito do vaso de pressão**

Plano de inspeção (mm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
<b>M1</b>	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05
<b>M2</b>	19,05	19,05	19,05	17,71	17,09	17,71	19,05	19,05	19,05
<b>M3</b>	19,05	17,33	13,92	11,87	11,19	11,87	13,92	17,33	19,05
<b>M4</b>	19,05	15,29	11,08	9,83	9,14	9,83	11,08	15,29	19,05
<b>M5</b>	19,05	17,33	13,92	11,87	11,19	11,87	13,92	17,33	19,05
<b>M6</b>	19,05	19,05	19,05	17,71	17,09	17,71	19,05	19,05	19,05
<b>M7</b>	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05	19,05

A espessura mínima encontra-se no meio da tabela (C5 e M4), entre os eixos de simetria do vaso de pressão e seu valor será:

$$t_{mm} = 9,144 \text{ mm}$$

3. O terceiro passo para avaliação é determinar o valor de  $R_t$ , que será dado por:

$$R_t = \left( \frac{9,144 - 2,54}{12,26} \right) = 0,54$$

4. A partir desse valor podemos calcular o valor do comprimento da espessura média (L), porém, antes de encontrar esse valor, deve-se achar o valor de Q, admitindo  $RSF_a = 0,9$ ; tem-se que:

$$Q = 1,123 \times \left[ \left( \frac{1 - 0,54}{1 - \frac{0,54}{0,90}} \right)^2 - 1 \right]^{0,5} = 0,64$$

Portanto o valor aproximado de  $L \cong 120$  mm.

5. Sendo assim, temos que o valor da espessura mínima média será dado pela média das espessuras mensuradas entre o intervalo L, que corresponde aos valores C4, C5 e C6. Sendo assim, temos que:



$$t_{am} = \frac{9,83 + 9,144 + 9,83}{3} = 9,60 \text{ mm}$$

Tendo conhecimento desses valores pode-se determinar as novas pressões de trabalho pelo nível 1 e 2 de avaliação. Primeiramente, pelo nível 1, temos que analisar se o vaso de pressão atende aos critérios das Equações 8 e 9. Portanto:

$$9,60 - 2,54 \geq 12,26 \text{ (falso)}$$

$$9,144 - 2,54 \geq \text{máx}[0,5 * 12,26; 0,1] \text{ (verdadeiro)}$$

Como apenas o segundo critério foi atendido então o vaso de pressão não pode operar sob as mesmas condições de operação. Sendo assim, deve-se encontrar uma nova pressão de trabalho que será dada pela equação 10, onde pela equação 11  $t_c=7,06$  mm e  $R_c= 609,6 + 2,54 = 612,14$  mm, portanto:

$$PMTA' = \frac{120,06 \times 0,85 \times 7,06}{612,14 + 0,6 \times 7,06} = 1,17 \text{ MPa}$$

Sendo assim, pelo nível 1 de avaliação sob a nova pressão de trabalho é igual a 1,17 MPa. Como o vaso de pressão não passou no nível 1 de avaliação, então deve-se fazer o nível 2, um método menos conservador que é dada de maneira análoga ao nível 1. Sendo assim, o vaso de pressão deverá atender aos critérios das equações 12 e 13, onde:

$$9,60 - 2,54 \geq 12,26 \times 0,9 \text{ (falso)}$$

$$9,144 - 2,54 \geq \text{máx}[0,5 * 12,26; 0,1] \text{ (verdadeiro)}$$

Novamente o primeiro critério não é satisfeito necessitando encontrar uma outra carga de trabalho. Pela Equação 15 temos que  $t_c=7,84$  mm. Sabemos que  $R_c= 609,6 + 2,54 = 612,14$  mm, portanto, pela Equação 14 podemos encontrar a nova carga de trabalho que será dada por:

$$PMTA'' = \frac{120,06 \times 0,85 \times \frac{7,06}{0,9}}{612,14 + 0,6 \times \frac{7,06}{0,9}} = 1,30 \text{ MPa}$$

Sendo assim, pelo nível 2 de avaliação, a Pressão Máxima de Trabalho Admissível será de 1,30 MPa, ou seja, pressões excedentes a essa levarão o vaso de pressão ao colapso.

### 3.5. Avaliação do Vaso de Pressão pelo Nível 3 da API 579

Com os valores das novas PMTA encontradas pela metodologia de avaliação da API 579 para defeitos de perda generalizada de espessura, deseja-se utilizar de métodos computacionais para a análise do comportamento do vaso de pressão sob as condições encontradas anteriormente. Caso o vaso de pressão não suporte as novas condições de serviço, então torna-se válido encontrar uma nova PMTA para o qual o vaso de pressão não chegará ao colapso.

Avaliando como se comporta o vaso de pressão sob o nível 1 de avaliação, onde tem-se que a PMTA será de 1,17 MPa, por uma análise numérica obtém-se uma Tensão Principal Máxima de 117,67 MPa na região de menor espessura. Esse valor é menor que a Tensão Admissível no vaso de pressão, porém ele trabalha a tensões próximas de chegar ao colapso. A Figura 13 mostra detalhes da distribuição de tensão no vaso de pressão.

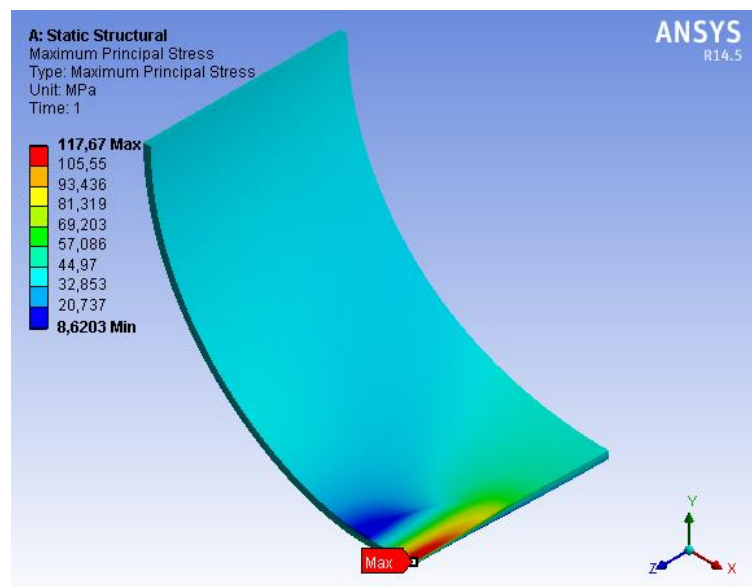


Figura 13 – Distribuição de tensão para a pressão de 1,17MPa

Analogamente a avaliação de nível 1, o nível 2 apresentou uma nova pressão de trabalho igual a 1,30 MPa. Utilizando da ferramenta computacional foi possível obter uma tensão de 130,74 MPa. A tensão principal máxima encontrada pelo nível 2 de avaliação é superior a Tensão Admissível pelo vaso de pressão, fazendo com que o vaso de pressão não trabalhe em segurança. A Figura 14 mostra com maiores detalhes a distribuição de tensão para a pressão interna de 1,30 MPa.

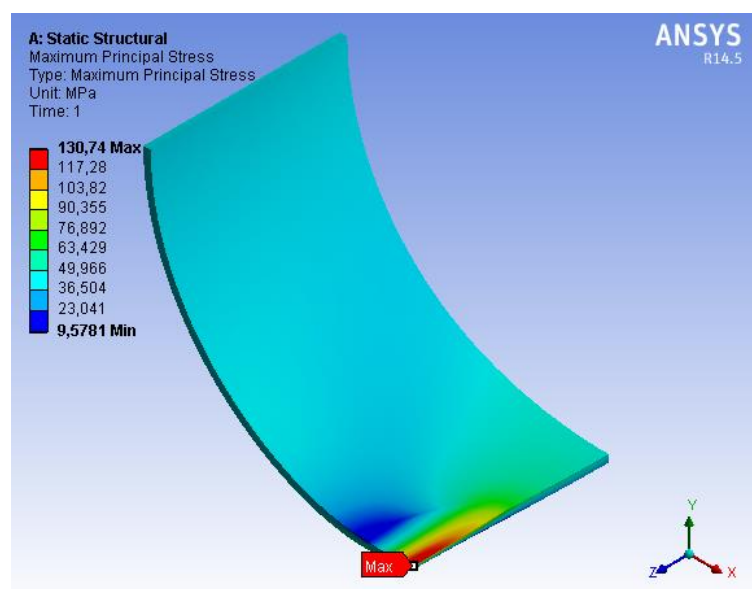


Figura 14 – Distribuição de tensão para a pressão de 1,30 MPa

A partir desses resultados é desejável encontrar uma pressão de trabalho que consiga oferecer uma tensão principal máxima próxima a encontrada ao vaso sem a perda de espessura de 67,314 MPa. Foi utilizada o método da tentativa, onde foram testadas algumas pressões até que fosse encontrado esses valores de tensão. Após algumas simulações numéricas foi obtida a tensão de 67,314 Mpa, que foi

encontrada para uma pressão de 0,67 MPa, onde pela Figura 15 é possível analisar melhor a distribuição de tensão.

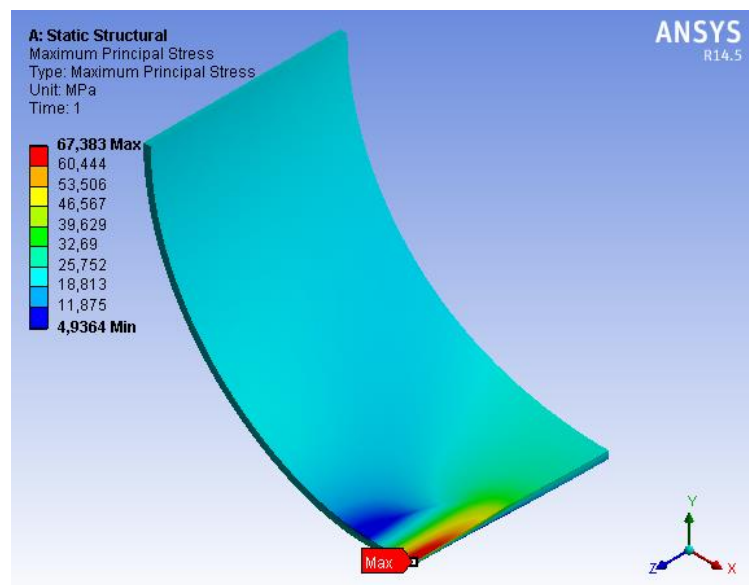


Figura 15 – Distribuição de tensão para a pressão de 0,67Mpa

#### 4. CONCLUSÕES

Através desse trabalho foi possível verificar a importância do uso de ferramentas computacionais para a análise de vasos de pressão com a presença de defeitos simulando um tipo de corrosão generalizada, uma vez que métodos empíricos muitas vezes não apresentam resultados que levarão os componentes pressurizados a condições de serviço seguras, como foi o caso da avaliação de nível 2. Por outro lado, a avaliação mais conservadora de nível 1 apresentou resultados que não levariam o componente ao colapso, porém, as tensões encontradas se aproximam do valor de tensão máxima admissível pelo vaso de pressão. Com o uso das ferramentas computacionais foi possível também a verificação de uma nova PMTA para fazer com que o vaso de pressão pudesse estar em serviço com tensões máximas semelhantes daquelas que não apresentam o defeito de corrosão.

Outro fator importante do trabalho é a utilização de modelos mais simplificados, o que podem oferecer uma maior rapidez na solução do problema apresentando resultados que convergem para modelos mais próximos do real. Essa simplificação demanda um menor custo computacional associado com um menor tempo para avaliação de modelos reais.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido como parte da avaliação do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica e Inovação (PIBITI/CNPQ-UFCG) e teve o apoio do CNPQ, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Os autores também agradecem ao suporte do Laboratório de Mecânica Computacional e da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (CCT-UFCG).

## 6. REFERÊNCIAS

**AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – API. API 579/ASME FFS-1.** FitnessFor Service. 2016.

ALVES, Avelino F. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE.** Érica, 2003. 294p.

**AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – API. API 579, Fitness For Service,** First Edition, 2000.

**AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME, Section VIII, Division1.** Rules for Construction of Pressure Vessels. 2013.

AZEVEDO, D.F.O. **Análise estrutural com Ansys Workbench: StaticStructural.** Mogi das Cruzes,2016. 180p.

GENTIL, V. **Corrosão,** 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

LACERDA JUNIOR, J. A. **Apontamentos de Aula do Engº Mecânico,** Volume 2, Disciplina: Mecânica dos Materiais 2. 197p.

TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão.** 2ª Edição, Rio de Janeiro: LTC. 2005.

BATHE, K. J. **Finite Elements Procedures.** Ed. Prentice-Hall. 1996.

ALMEIDA, J. I. L. **Análise numérica da integridade estrutural de vasos de pressão com corrosão usando a norma API 579.** 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB). 2012.

CABRAL, H. L. D. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos.** 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). 2007.

FRANCESCHINI, A. S. **Avaliação do fenômeno de união de trincas induzidas pelo hidrogênio e sua influência na integridade estrutural de um vaso de pressão.** 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

ROCHA, R. S. **Avaliação do alívio mecânico de tensões residuais devido a sobrecarga provocada por teste Hidrostático.** 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 2009.

NASCIMENTO, G. L.; ALMEIDA, A. A.; AGRA, I. T. P. L.; DAMASCENO, F. O. **Development of computational tools for the modeling and analysis of corrosion defects in pressure vessels.** In: CILAMCE – Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 38. Florianópolis, ABCME, 2017.