



IX Congresso de Pesquisa e Extensão da FSG  
& VII Salão de Extensão

<http://ojs.fsg.br/index.php/pesquisaextensao>

ISSN 2318-8014



**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA CÂMARA DE EBULIÇÃO NUCLEADA PARA  
ELEVADAS PRESSÕES**

Paulo Ricardo Godois<sup>a</sup>, Gustavo Alberto Ludwig<sup>a\*</sup>

a) Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Serra Gaúcha, Caxias do Sul, RS.

**Informações de Submissão**

Gustavo Alberto Ludwig, endereço: Rua Os  
Dezoito do Forte, 2366. Caxias do Sul – RS.  
CEP: 95020-472.  
E-mail: paulogodois@yahoo.com.br

**Palavras-chave:**

**Resumo**

Muitas situações na engenharia envolvem os processos de ebulição. No caso da ebulição nucleada, é preciso um estudo mais aprofundado para conseguir se aperfeiçoar sua utilização técnica de intensificação e podendo minimizar os riscos implicado ao confinamento quando este é imposto pelo projeto, pois isto pode acarretar em problemas vinculados ao desencadeamento prematuro do fluxo crítico, que representa o limite em que o sistema é operado na ebulição nucleada. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo o projeto e a construção de uma câmara de ebulição nucleada tendo sua pressão de trabalho limitada em 60 bar. Para construção da câmara de ebulição nucleada os materiais utilizados são um tubo mecânico utilizado para o corpo do equipamento, e as demais peças todas confeccionadas em aço SAE 1020, sendo fabricadas pelo processo de usinagem, a união das peças onde necessário é feita por parafusos com ou sem porcas e contraporcas ou pelo processo de soldagem. A câmara possui duas escotilhas de vidro temperado para que se possa observar o seu interior durante os testes realizados, assim podendo ver o que ocorre no fluido refrigerante utilizado para testes

## 1 INTRODUÇÃO

No final da década de 60, estudos referentes ao fenômeno da ebulição foram intensificados, muitos autores definem ebulição como um processo em que ocorre uma modificação de sua condição líquida para a gasosa (vapor), sucedendo quando o líquido utilizado entra em contato com uma área aquecida em uma temperatura mais elevada do que a de saturação deste líquido. O primeiro apontamento que se tem sobre o estudo da ebulição foi uma publicação em meados do século XVII do médico Joan Gottlob Leidenfrost (1756), onde este fez um experimento em que presenciou a vaporização de uma gota d'água em uma superfície aquecedora (DA ROCHA, 2007). O

acontecimento considerado como o marco para o entendimento do fenômeno da ebulição surgiu com o trabalho de Nukiyama (1934) intitulado como "*The Maximum and Minimum Values of the Heat  $Q$  Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure*", este trabalho proporcionou uma nova visão sobre o fenômeno da ebulição, onde foi introduzido pela primeira a chamada de "Curva de Ebulição" (STELUTE, 2004).

Atualmente uma das áreas da ebulição com maior destaque e muito costumeira em trabalhos e pesquisas acadêmicas, é a ebulição nucleada que é a fase na qual bolhas surgem no fluido durante o fenômeno de ebulição, a resposta mais utilizada para este interesse é a possibilidade das mais diversas áreas de aplicação do estudo da ebulição nucleada, dando grande realce para indústria, onde pode ser citado como o exemplo os evaporadores de frigoríficos onde a ebulição nucleada se encontra presente, em evaporadores inundados para o resfriamento de líquidos também sendo observada em vasos de pressão (CABRAL, 2012), (DA SILVA, 2005).

Para os estudos da ebulição nucleada, o equipamento com maior utilização em meios acadêmicos e de pesquisa é a bancada experimental para ebulição nucleada, onde um dos itens mais importantes do equipamento é a câmara de ebulição nucleada. Diferentemente do projeto de outros equipamentos, uma câmara de ebulição nucleada não é um item fabricado em série, sendo equipamentos fabricados sob medida para circunstâncias de operações específicas como pode ser visto nos equipamentos acadêmicos fabricados por Da Rocha (2007) e Passarella (2016).

Devido à escassez de artigos, normas e trabalhos acadêmicos diretamente direcionados ao projeto e produção das câmaras de ebulição nucleada, geralmente o material utilizado para a confecção destes equipamentos, são as bases para o projeto e construções de vasos de pressão e suas normas, uma vez que funcionalidade de ambos os equipamentos é similar (armazenar fluidos em altas pressões em seu interior) (TELLES 1996).

Com a finalidade de capacitar o Centro Universitário da Serra Gaúcha (FSG) em produzir pesquisas e estudos sobre diversos fluidos refrigerantes no regime da ebulição nucleada, além de oportunizar aulas práticas em disciplinas como mecânica dos fluidos aos alunos da instituição de ensino, esta monografia tem como finalidade o projeto e a construção de uma câmara de ebulição nucleada para ser integrada junto a uma bancada de estudos de ebulição, utilizando a norma para vasos de pressão ASME Seção VIII Divisão I.

## 1.1 Questão de pesquisa

Com o aumento da utilização de equipamentos que possuem seu funcionamento baseado no fenômeno da ebulição nucleada, pesquisas nesta determinada área da ebulição tem ganhado destaque nos últimos anos em meios acadêmicos. Apesar da alta demanda no mercado de equipamentos com a finalidade de analisar fluídos no regime de ebulição nucleada, não existem empresas especializadas na construção deste tipo de equipamento, e a quantidade de material literário confiável para a construção dos mesmos é muito escassa, diante disto, equipamentos com projetos baseados em sistemas alternativos já existentes são sempre bem-vindos.

### 1.1.1 Objetivo

Construir uma câmara de ebulição nucleada utilizando a norma de vasos de pressão ASME Seção VIII Divisão I.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O fenômeno da ebulição nucleada

A ebulição pode ser citada como o processo de mudança da fase líquido-vapor de maneira similar a evaporação, possuindo apenas algumas diferenças. A evaporação é apresentada na fase líquido-vapor, quando a pressão do vapor se encontra menor comparada a pressão de saturação do fluído que está sendo aquecido. Este fenômeno acaba decorrendo na interface sólido-líquido, quando o fluído é colocado em contato com uma superfície aquecida a uma temperatura superior o suficiente a temperatura de saturação do líquido (Çengel, 2012).

O fluxo de calor presente na ebulição é descrito pela lei de Newton do resfriamento conforme Eq. (1).

$$q''_{ebu} = h(T_s - T_{sat}) \quad (1)$$

Onde  $q''_{ebu}$  é definido como o fluxo de calor presente na ebulição,  $h$  o coeficiente de transferência calor por convecção,  $T_s$  temperatura da superfície e  $T_{sat}$  a temperatura de saturação.

As bolhas são formadas neste processo, pelo balanço de forças concebidas entre a pressão do líquido e a de vapor, e pela tensão superficial  $\sigma$  durante a fase líquido-vapor que é o resultado da força de atração das moléculas na interface com direção à fase líquida. A tensão que se encontra na superfície, pode ser diminuída com o aumento da temperatura, tornando-a nula em sua temperatura

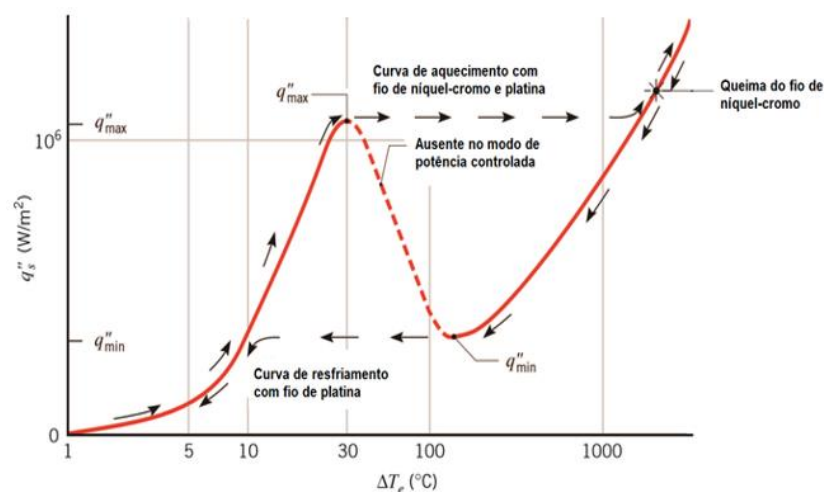
---

crítica, por isso as bolhas não são formadas durante a ebulição em pressões e temperaturas supercríticas (Çengel, 2012).

### 2.1.1 A curva de ebulição

Os estudos dedicados para o reconhecimento dos regimes de ebulição nucleada, tiveram início com Nukiyama (1934), usando um aparato rudimentar composto por um fio de platina em posição horizontal imerso em um banho de água destilada. Onde foi medida as temperaturas do banho, através de pressão de saturação, e do fio pela sua resistência elétrica com utilizando a ponte de Wheatestone. Com o conhecimento prévio da corrente elétrica e da tensão aplicada ao fio, foi possível obter a potência dissipada assim construindo uma curva de  $q''$  vs  $\Delta T$ , tempo depois sendo designada como curva de ebulição (Figura 1) (NUKIYAMA, 1934).

Figura 1 - Curva de ebulição de Nukiyama.



Fonte: Adaptado de Incropera et. al, 2014.

### 2.1.2 Regimes de ebulição

Segundo o autor Kandilikar (1999) a ebulição pode ser dividida nos seis seguintes regimes (Figura 2):

- Convecção livre: O líquido adjacente à superfície, estando em equilíbrio térmico com a mesma, aparece com a temperatura superior comparando com a temperatura na saturação, porém, se encontrando no estado metaestável. Existindo apenas um mecanismo de troca de calor afiliado a este regime, é o de convecção natural, o que gera baixos índices de transferência de calor.

- **Ebulição nucleada parcial:** Quando o aquecimento se encontra alto o suficiente para ativar áreas de nucleação de bolhas, que causam um inesperado aumento em sua retirada de fluxo de calor da superfície no momento em que o modo de aquecimento utilizado, é o de temperatura manipulada ou uma diminuição da temperatura da superfície. As áreas ativadas nesta fase são poucas e bastante espaçadas entre si.

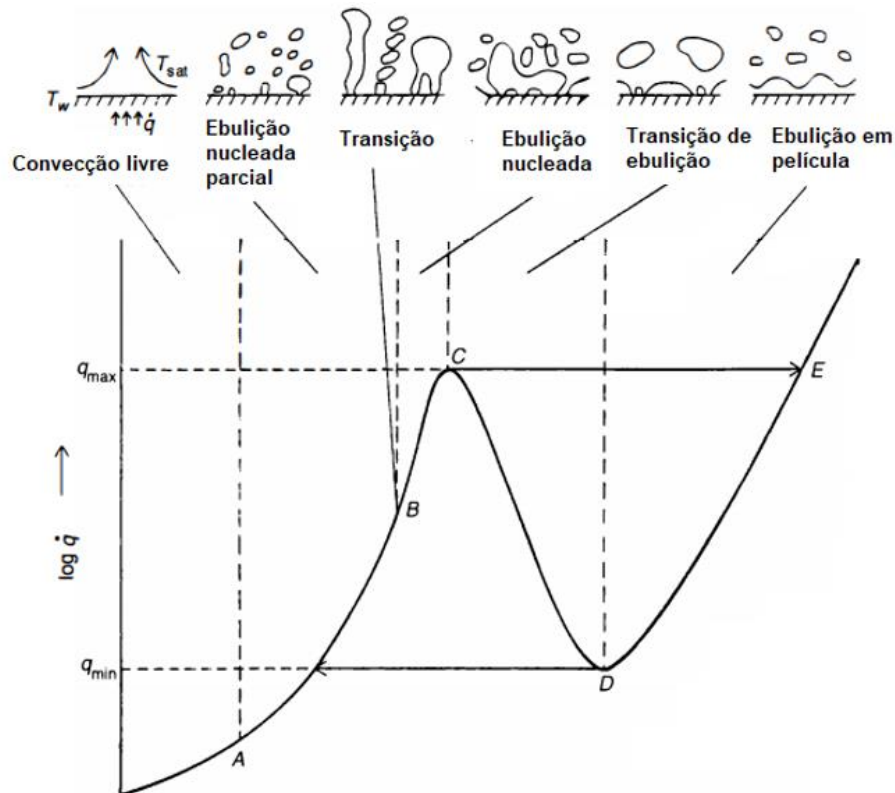
- **Transição:** À medida em que é aumentado o fluxo de calor, a tendência é que aconteça a interação entre as bolhas vizinhas ou aquelas que estão na superfície por já se desprenderem, este sub-regime é caracterizado pela presença de bolhas em tamanhos maiores e coalescida em forma que lembram cogumelos.

- **Ebulição nucleada:** Quanto maior for o número de áreas ativadas, existe um aumento na remoção do calor até o ponto qual, por motivo da à alta frequência no surgimento de bolhas e espaçamento entre as áreas ativas, colunas de bolhas passam a se formar da união entre as mesmas. Quando existe uma movimentação considerada grande entre essas colunas com a eficácia de impedir o remolhamento da superfície, assim criando instabilidades hidrodinâmicas e uma fina película de vapor entre a face e o líquido atinge-se o fluxo crítico de calor (FCC).

- **Transição de ebulição:** Caracterizada pela intermitência entre a ebulição nucleada e a ebulição em película. Em conformidade com o fluxo de calor vai se aproximando do fluxo de calor crítico, criando um fortalecimento na constituição das bolhas ao ponto que dificulta hidrodinamicamente o escoamento do líquido para a região que é ocupada pelas bolhas e conseqüentemente ocorre a secagem do local da parede.

- **Ebulição em película:** Cessadas as variabilidades, um filme de vapor contínuo se forma entre a superfície e o líquido. A influência da radiação pode se tornar considerável, ao mesmo tempo em que o transporte de calor por convecção e condução aumentam do grau de superaquecimento, assim gerando um aumento das taxas de transferência de calor considerado novo, em quantidade menor que a de ebulição nucleada

Figura 2- Regimes de ebulição.



Fonte: Adaptado de Kandlikar, 1999.

## 2.2 A câmara de ebulição nucleada

A câmara de ebulição nucleada (Figura 3), é um equipamento impermeável produzido com aço de baixo teor de carbono de classificação segundo a Society of Automotive Engineers (SAE) atualizada no ano de 2020, como SAE 1020.

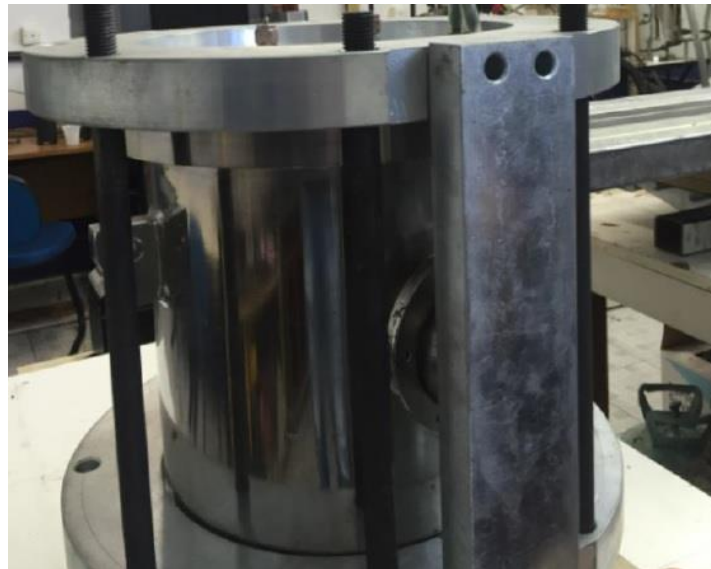
A câmara apresenta um diâmetro interno de 204,50 mm contando com uma camada interna de 0,1 mm de cromo para tornar o interior do equipamento resistente a oxidação, possuindo uma altura interna de 346 mm, o que corresponde a uma capacidade volumétrica de aproximadamente 11,4 litros.

As paredes da câmara possuem espessura mínima de 24,25 mm tendo uma pressão máxima de trabalho de 60 bar e pressão máxima admissível de 80 bar, quando comparada ao equipamento projetado por Passarella (2016), o qual usou uma espessura de 15 mm para a parede do equipamento sendo que este possui uma pressão máxima de trabalho de 40 bar. Na altura média da câmara são encontradas duas escotilhas com diâmetro de 83 mm com a finalidade de visualização em seu interior.

Apesar da pressão máxima de trabalho do equipamento ser 60 bar, todo o equipamento foi

dimensionado para uma pressão de 80 bar, assim possuindo uma margem de segurança considerada alta, assim o equipamento projetado e confeccionado na presente monografia, não necessita dos reforços feitos na câmara produzida por Passarella (2016), sendo que o equipamento antes do seu primeiro funcionamento deve passar por um teste hidrostático para ser validado e ter sua segurança atestada, uma vez que este equipamento apesar de possuir sistemas de segurança apresenta um grande grau de perigo por trabalhar com pressões consideradas altas

Figura 3 - Exemplo de câmara de ebulição nucleada.



Fonte: Adaptado de Passarella, 2016.

### 2.2.1 Vaso de pressão

De acordo com Carter e Ball (2002), as primeiras referências literárias que se tem a respeito de um vaso de pressão datam do século XV, onde Leonardo Da Vinci descreveu um equipamento similar aos vasos de pressão moderno em sua obra “*Codex Madrid I*”.

Para Bizzo (2003), a história moderna dos vasos de pressão acabou procedendo com as industriais iniciais do vapor por volta do século XVII. Thomas Savery patenteou um sistema de bombeamento de água que utilizava como força motriz o vapor isto no ano de 1698, após treze anos da invenção de Savery, Newcomen acabou criando um equipamento com a mesma finalidade, se tratando de um reservatório esférico, que apresentava aquecimento direto no fundo. James Watt no ano de 1769 acabou adaptando esse projeto para uso em locomotivas a vapor assim criando a caldeira vagão.

Vaso de pressão também conhecidos como câmaras hiperbáricas (Figura 4), é todo o recipiente estanque, capaz de conter fluídos ou gases pressurizados podendo ou não se encontrar superior à do ambiente, entre esses equipamentos pode se encaixar os mais simples como uma panela de pressão até equipamentos sofisticados como um reator nuclear. Por serem equipamentos que sempre estão sujeitos a pressão são considerados de alto risco por armazenarem uma grande quantidade de energia acumulada em seu interior (TELLES, 1996).

Figura 4 - Exemplo de vaso de pressão



Fonte: Adaptado de [www.totalmat.com.br](http://www.totalmat.com.br), acessado em 19/04/20.

### 2.3 Norma, cálculos e tabelas utilizadas

Nos subcapítulos a seguir é apresentado um resumo das fórmulas e critérios do código ASME, Seção VIII, Divisão I, assim podendo realizar os cálculos mecânicos para os componentes usuais de um vaso de pressão (TELLES, 1996). Lembrando que este código apenas acaba considerando o efeito da pressão interna ou externa, ficando os demais carregamentos a critério do projetista, não se restringindo apenas à forma de calcular estes como também quanto a primordialidade ou não de serem calculados. As fórmulas que estão presentes neste código são baseadas na teoria de membrana, contendo alguns coeficientes empíricos de correção. Não sendo considerados os esforços de flexão decursivos da espessura ou das discontinuidades geométricas (TELLES, 1996)



### 2.3.1 Cálculo de Cascos Cilíndricos para Pressão Interna

O código divide entre os cascos cilíndricos de pequena e grande espessura (conforme parágrafo UG-27), denominando de “grande espessura” os cascos para os quais se  $e_{int} > \frac{1}{2} R_{int}$  ou para  $P_{int} > 0,385\sigma_{adm}E$ . Onde se é definido  $e_{int}$  como a espessura mínima para pressão interna,  $R_{int}$  como raio interno do cilindro,  $P_{int}$  como pressão interna do projeto,  $E$  o coeficiente de solda (Telles, 1996).

Para cálculos cilíndricos de pequena espessura é utilizado a Eq. (2) localizada no parágrafo UG-27 da norma (Telles, 1996):

$$e_{int} = \frac{P_{int}R_{int}}{\sigma_{adm}E - 0,6P_{int}} + C \quad (2)$$

Sendo  $C$  a margem para corrosão. A tensão mínima admissível básica do material que se é encontrada pela tabela UCS-23 () do código (Telles, 1996).

Tabela 1 - Resumo tabela UCS-23 para aços carbono

Forma de apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (MPa) Temperatura (° C)					
		-30 a 93	150 a 260	300	325	350	400
Chapas	A-285-C	108,0	108,0	106,0	104,0	101,0	88,9
Tubos cond.	A-53-A	108,0	108,0	106,0	104,0	101,0	88,9
Tubos cond.	A-53-B	80,6	80,6	80,6	80,6	78,8	62,3
Tubos t.e.	A-179	101,0	101,0	101,0	101,0	98,4	75,9
Forjados	A-181-60	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	73,3

Fonte: Adaptado de Telles, 1996.

Sendo o coeficiente de solda a única incógnita desconhecida até o momento o valor desta pode ser obtido pela norma conforme o parágrafo UW-12 e tabela UW-12 (Tabela 2) do código, mas segundo Telles (1996) é tomado como padrão para cilindros sem costura o valor de  $E = 1$ .

Tabela 2 - Resumo tabela UCS-23 para aços carbono

Tipo de solda	Limitações	Radiografia total	Grau de inspeção	
			Radiografia parcial (por amostragem)	Não radiografado
Solda de topo realizada em ambos os lados, ou procedimento equivalente, para se obter penetração e fusão totais (excluem-se as soldas com mata-junta permanentes)	Nenhuma	1,0	0,85	0,70
Solda de topo, em apenas um lado, com mata-junta permanente	Nenhuma	0,90	0,80	0,63
Solda topo, em apenas um lado, sem mata-junta	Permitido apenas para soldas circunferenciais, para espessuras inferiores a 15 mm, e diâmetro vaso inferior a 610 mm	-	-	0,60
Solda sobreposta, com filete duplo de altura total	Permitido apenas para soldas longitudinais em espessuras inferiores a 10 mm e para soldas circunferenciais em espessuras inferiores a 15 mm	-	-	0,55

Fonte: Adaptado de Telles, 1996.

### 2.3.2 Cálculo de Tampos para Pressão Interna

Segundo o parágrafo UG-32 do código a espessura de tampos elípticos deve ser calculada conforme a Eq. (3):

$$e_{te} = \frac{P_{int}R_{int}}{\sigma_{adm}E - 0,1P_{int}} + C \quad (3)$$

De acordo com o parágrafo com o parágrafo UG-32 a espessura de tampos toriesféricos deve ser calculada conforme a Eq. (4):

$$e_{tt} = \frac{0,885P_{int}L}{\sigma_{adm}E - 0,1P_{int}} + C \quad (4)$$

Sendo  $L$ , o lado maior do perfil toriesférico.

De acordo com o parágrafo UG-32 a espessura de tampos cônicos deve ser calculada conforme a Eq. (5):

$$e_{tc} = \frac{P_{int}R_{int}}{\cos 30^\circ(\sigma_{adm}E - 0,6P_{int})} + C \quad (5)$$

De acordo com o parágrafo UG-34 a espessura de tampos planos deve ser calculada conforme a Eq. (6):

$$e_{tp} = d_{tp} \sqrt{\frac{NP_{int}}{\sigma_{adm}}} + C \quad (6)$$

Sendo  $N$ , um fator adimensional que depende do tampo e sistema de fixação no casco sendo utilizado o valor de 0,30 no projeto construindo (Telles, 1996).

### 2.3.3 Cálculo de Vidros das Escotilhas

Para o cálculo da espessura do vidro optou-se por uma pesquisa de fabricantes especializados na fabricação de vidros para caldeiras, por se tratarem de itens de risco foi selecionado o fabricante Vidrak Visores de Vidros Industriais por se tratar de uma empresa especializada no ramo e que vem atuando a bastante tempo.

Sendo necessário para o primeiro passo o cálculo do diâmetro médio ( $d_{md}$ ) Eq. (7):

$$d_{md} = \frac{d_{tot} + d_{vis}}{2} \quad (7)$$

Onde  $d_{tot}$  é definido como o diâmetro total do vidro e  $d_{vis}$  o diâmetro visível do vidro.

Com o valor de  $d_m$  calculado é possível se obter o valor da espessura do vidro é conforme a Eq. (8):

$$e_{vdr} = 0,55 \times d_{md} \sqrt{\frac{P_{int} \times C.S.}{\gamma}} \quad (8)$$

Sendo  $C.S.$  o coeficiente de segurança que para este tipo de equipamento é adotado como padrão 8 para vidros não temperados,  $P_{int}$  a pressão interna e  $\gamma$  uma constante onde assume o valor de 500 para vidro comum e 2000 para vidro temperado e  $d_{md}$  o diâmetro médio.

### 2.3.4 Cálculo de Parafusos para Vasos de Pressão

Segundo Cruz (2008), para o início do cálculo do diâmetro dos parafusos primeiramente é necessário calcular a área da força atuante através da Eq. (9):

$$A_{fat} = \frac{\pi d_{fat}^2}{4} \quad (9)$$

Onde  $d_{fat}$  é o diâmetro da força atuante.

Obtendo-se o valor da  $A_{fat}$  o segundo passo a é o cálculo da força total aplicada  $F_{ta}$  utilizando a Eq. (14):

$$F_{ta} = P_{int} \times A_{fat} \quad (10)$$

Onde  $P_{int}$  é a pressão interna e  $A_{fat}$  é a área da força atuante.

Com o valor calculado de  $F_{ta}$  deve-se calcular o valor da força devido a pressão interna  $F_{int}$  sendo esta força que será aplicada em cada parafuso com o auxílio da Eq. (15):

$$F_{int} = \frac{F_{ta}}{Z_{par}} \quad (11)$$

Onde  $F_{ta}$  força total aplicada e  $Z_{par}$  é a quantidade de parafusos.

Como último passo para determinar o tipo de parafuso é utilizado a Eq. (12):

$$Nom_{par} = 0,1tpf \sqrt{\frac{4Z_{par} \times F_{int}}{\pi P_{int}}} \quad (12)$$

Sendo  $tpf$  o conteúdo armazenado no vaso de pressão assumindo o valor de 1 para fluídos e 0,8 para vapor.

Lembrando que a distância recomendada entre parafusos não deve ultrapassar 120 mm um do lado do outro.

## 2.4 Soldas em Vasos de Pressão

Uma grande maioria dos vasos de pressão, são fabricados com chapas de aço ligadas entre si pelo processo de soldagem. Também é usado a solda para a fixação de todas as outras partes constituintes da parede de pressão do vaso, bem como para muitas das peças que não são pressurizadas do vaso tanto internas como externas (Telles, 1996).

Para as soldas de emenda de chapas no casco e nos tampos dos vasos de pressão é obrigado que estas sejam de topo, com penetração total e de tipo facilmente radiografável, estes requisitos das soldas na parede de pressão são uma exigência geral de todas as normas, podendo se tomar como exemplo o parágrafo UW-35, do código ASME Seção VIII Divisão I (Telles, 1996).

Quando existe a possibilidade, essas soldas devem ser feitas por ambos os lados, lembrando que em vasos pequenos com diâmetro de 500 mm ou menos onde não existe a possibilidade de soldagem pelo lado interno, existe a possibilidade desta ser feita apenas no lado externo, sendo que o código ASME Seção VIII Divisão II como é citado no parágrafo AD-415, se é exigido soldagem em ambos os lados em todas as soldas de topo em aços de alta resistência (Telles, 1996).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Elaboração do projeto

Para o projeto das partes da câmara são utilizados os cálculos apresentados no referencial teórico, para o cálculo da espessura do corpo da câmara e da espessura das escotilhas foi tomado como padrão o valor obtido na espessura do corpo para que o projeto fique padronizado, todos os valores obtidos nos cálculos podem ser visualizados a seguir:

Espessura do corpo e das escotilhas:

$$e_{int} = \frac{P_{int} R_{int}}{\sigma_{adm} E - 0,6 P_{int}} + C = 24,25 \text{ mm} \quad (2)$$

Espessura do vidro:

$$e_{vdr} = 0,55 \times d_{md} \sqrt{\frac{P_{int} \times C.S.}{\gamma}} = 16,00 \text{ mm} \quad (8)$$

Espessura dos tampos planos:

$$e_{tp} = d_{tp} \sqrt{\frac{N P_{int}}{\sigma_{adm}}} + C = 43,00 \text{ mm} \quad (6)$$

Parafusos das escotilhas:

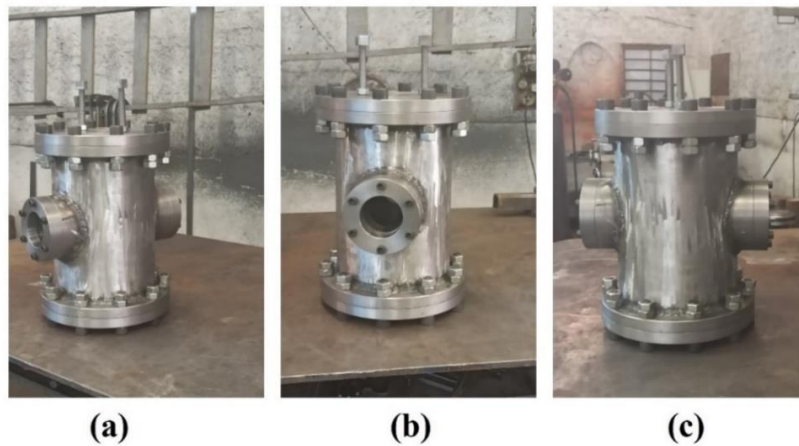
$$Nom_{par} = 0,1 t p f \sqrt{\frac{4 Z_{par} \times F_{int}}{\pi P_{int}}} = M8 \quad (12)$$

Parafuso dos tampos:

$$Nom_{par} = 0,1 t p f \sqrt{\frac{4 Z_{par} \times F_{int}}{\pi P_{int}}} = M20 \quad (12)$$

Com a obtenção dos resultados anteriores a câmara pode ser confeccionada como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - (a) Vista diagonal da câmara montada; (b) Vista frontal da câmara montada; (c) Vista lateral da câmara montada.



Fonte: O autor, 2020.

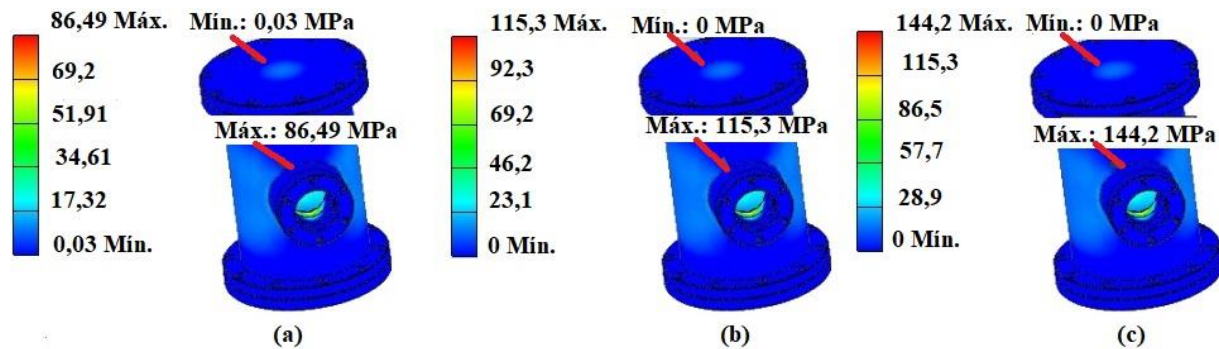
## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Resultado para Tensão de Von Misses

A comparação entre as pressões, pode ser vista na Figura 6 – a , Figura 6 – b e Figura 6 – c a câmara apresenta ao redor de seu tampo uma cor azul marinho e no centro a tonalidade azul claro, já em seu corpo nas laterais próximas as escotilhas é apresentado o tom azul claro e no restante do corpo a tonalidade predominante é a azul marinho, nas escotilhas a tonalidade azul marinho predomina o exterior do item, a grande distinção de tonalidades pode ser testemunhada no interior da câmara próximo ao canto vivo é notado um tom azul claro e amarelo apresentando uma tendência para a coloração vermelha.

As colorações apresentadas nos 3 estudos de pressão da Figura 6, sofrem sutis variações que não são significativas no estudo, o que se pode concluir com os resultados da tensão de Von Mises, é que a câmara se mostra segura até pressões de 100 bar e o canto vivo no interior das escotilhas que possui uma coloração amarela tendendo para o vermelho é o ponto onde vai se concentrar as maiores tensões no equipamento.

Figura 6 - Tensão de Von Mises (MPa) em pressões diferentes: (a) Pressão de 60 bar; (b) Pressão de 80 bar; (c) Pressão de 100 bar.



Fonte: O autor, 2020.

Com base nos estudos realizados anteriormente na área de análises de elementos finitos de equipamentos estanques realizados por Da Silva (2015), Iecker (2014), Mendonça (2011) e De Freitas (2017) é possível deduzir que a câmara de ebulição nucleada suporta sem ter sua integridade comprometida as pressões simuladas, pois o equipamento projetado pelos autores citados anteriormente em sua análise de elementos finitos, possuem coloração similar a este estudo e também pontos de concentração de tensão similares quando testados em pressões em alguns casos até superiores a 100 bar.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi desenvolvido o projeto e a fabricação de uma câmara de ebulição nucleada baseada na norma de vasos de pressão ASME Seção VIII Divisão I, o estudo respaldou se em vasos de pressão pela falta de material confiável para o projeto e construção de uma câmara de ebulição nucleada.

Durante o projeto e a manufatura do equipamento, não existiram grandes dificuldades pois o conhecimento teórico passado durante os anos nas disciplinas do curso de engenharia mecânica pode ser colocado em prática, já na parte de fabricação não surgiram dificuldades, uma vez que pela experiência adquirida ao longo dos anos nos processos de usinagem foram suficientes para que este passo fosse concluído.

A simulação dos elementos finitos foi realizada em pressões de 60,80 e 100 bar gerando como resultados as tensões de Von Mises e o deslocamento, antes da realização da simulação o maior sobressalto, era referente ao dimensionamento correto dos tampos da câmara, pois se imaginava que



nesta região seria o ponto de maior acúmulo de tensões. Tendo sido realizada a simulação de elementos finitos e obtidos os resultados, estes demonstraram que a câmara possivelmente possui sua integridade estrutural inabalada até pressões de 100 bar, e que os possíveis pontos de acúmulo de pressão são os interiores das escotilhas e não os tampos.

## 6 REFERÊNCIAS

www.archdaily.com.br acessado em 23/10/19.

www.willtec.com.br acessado em 19/04/20.

www.totalmat.com.br acessado em 19/04/20.

www.engineersedge.com acessado em 27/03/20.

www.vidrak.com.br acessado em 16/05/20

ASME. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code Division I: Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessel**. 1. ed. New York: ASME Setting the Standard, v. 1, f. 717, 2019.

ASME. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code Division II: Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels Alternative Rules**. 1. ed. New York: ASME Setting the Standard, v. 1, f. 301, 2019.

BIZZO, Waldir A. . **Geração Distribuição e Utilização de Calor**. 1 ed., São Paulo: UNICAMP, v. 1, f. 145, 2003, p. 67-100.

CABRAL, Francismara Pires. **Estudo da Ebulição Convectiva de Nanofluidos no Interior de Microcanais**. 2012, f. 115, p. 1-55, Dissertação (Mestrado engenharia mecânica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

**Catálogo Aços Grupo Gonçalves Dias**, ano desconhecido.

CAREY, Van P.. **Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: Na Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment**. 2 ed., Estados Unidos da América: CRC Press, v. 1, f. 766, 2018, p. 108-320.

CLOUGH, Ray W.. **The Finit Element Method in Plane Stress Analysis**. 1 ed., Pittsburgh: American Society of Civil Engineers, v.1, f. 35, 1960, p. 10-35.

CARTER, Will; BALL, Bruce. **Guidebook to ASME Section VIII – Div. I.** 3 ed., Canada: CASTI Publishing Inc, v. 1, f. 300, 2002, p. 1-20.

CRUZ, Antônio José Ramos de Souza. **Elementos de Máquinas.** f. 104, p. 19 -22, 2008.

DATRES, Kézio Durval Lima *et al.* Ensaio de Tração e Metalografia do Aço SAE 1020. **Revista Engenharia em Aço.** 1 ed., Araçatuba, v.2, p. 71-81, 2017.

DA CRUZ, Michele David. **Autodesk Inventor 2013: Teoria de Projetos, Modelagem, Simulação e Prática.** 1 ed., São Paulo: Érica, v. 1, f. 358, 2012, p. 311-320.

DA ROCHA, Sérgio Pereira. **Ebulição Nucleada do R 134-a em Superfícies Lisa e Micro-Aletada Externas de Tubos Horizontais de Cobre.** 2007, f. 130, p. 10-88, Tese (Pós graduação engenharia mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

DA ROSA, Edison. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga.** 1 ed, Florianópolis: GRANTE, v.1, f. 399, 2002, p. 124-125.

DA SILVA, Adson Beserra. **Projeto de Vaso de Pressão Segundo Norma ASME e Análise pelo Método dos Elementos Finitos.** 2015, f. 142, p. 18-79, Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

DA SILVA, Evandro Fockink. **Efeito da Geometria na Ebulição Nucleada de Refrigerantes Halogenados em Tubos Horizontais.** 2005, f. 159, p. 1-46, Tese (Doutorado em engenharia mecânica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DE ALMEIDA, Paulo Samuel. **Fermentaria de Corte, Dobra e Repuxo.** 1 ed., São Paulo: Érica, v. 1, f. 346, 2017, p. 59-98.

DE FRANCESCHI, Alessandro; ANTONELLO, Miguel Guilherme. **Elementos de Máquinas.** 1 ed., Santa Maria: UFSM, v.1, f. 152, 2014, p. 123-134.

DE FREITAS, Artur Siqueira Nóbrega. **Análise Estrutural e de Estabilidade do Vaso de Pressão de um AUV.** 2017, f. 135, p. 44-74, Dissertação (Mestrado em ciências na engenharia de controle e automação), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

DE SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos.** 5 ed., São Paulo: Blucher, v. 15, f. 286, 1982, p. 6-101.

DIAS, F. Teixeira *et al.* **Método de Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia.** 2 ed., Lisboa: ETEP, v. 1, f. 472, 2018, p. 3-75.

GORENFLO, D.. State of Art in Pool boiling Heat Transfer oh New Refrigerants. **International Journal of Refrigeration.** 1 ed., Alemanha, v. 44, p. 6-24, 2001.

HARVEY, John F.. **Theory and Design of Pressure Vessels**. 1 ed., Estados Unidos da América: VNR, v.1, f. 623, 1985, p. 406-426.

IECKER, Thyago Duarte. **Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos**. 2014, f. 62, p. 40-56, Tese (Bacharelado em engenharia mecânica), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2014.

INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7 ed., Rio de Janeiro: LTC, v. 1, f. 643, 2014, p. 394-415.

KANDILIKAR, Satish. **Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation**. 1 ed. Estados Unidos da América: Taylor & Francis, v.1, f. 738, 1999, p. 311-436.

KIM, Jungho. The Review of Nucleate Pool Boiling Bubble Heat Transfer Mechanisms. **Journal of Multiphase Flow**, Estados Unidos da América, v. 35, p. 1067-1076, 2009.

KOTTHOFF, S.; GORENFLO, D.; DANGER, E; LUKE, A.. Heat Transfer and Bubble Formation in Pool Boiling: Effect of Basic Surface Modifications for Heat Transfer Enhancement. **International Journal of Thermal Sciences**, Vol. 45, p. 217-236. 2006

LEIDENFROST, Joan Gottlob. **De Aquavae Commvnis: Nonnvlis Qualitativs Tractaus**. 1 ed. Alemanha. Univerf Bibliopolae, v.1, f. 150, 1756, p. 1-139.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3 ed., São Paulo: Blucher Ltda, v. 1, f. 408, 2015, p 1-100

MARQUES, Paulo Villani *et al.* **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed., Belo Horizonte: UFMG, v. 1, f. 360, 2009, p 17-41.

MATOS, Rudmar Serafim. **Apostila de Refrigeração**. UFPR: Curitiba, f. 248, p. 192-205, 2010.

MENDONÇA, Douglas Piccolo. **Análise de Tensões através do Método dos Elementos Finitos de um Vaso de Pressão conforme Código ASME**. 2011, f. 136, p. 59-123, Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica na área de projetos), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

NICOLA, Marcelo Dalvi; VIEIRA, Marcos Fernando Neto. **Projeto Mecânico e Construção de Vaso de Pressão: Estudo do Caso Serviço com Sulfeto de Hidrogênio**. 2012, f. 159, p. 17-58, Monografia (Bacharelado em engenharia mecânica), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

NETO, Amaury Rainho Neto. **Análise da Ebulição Nucleada da Água Contendo Nanopartículas de Alumina, Maguemita ou Nanotubo de Carbono**. 2011, f. 132, p. 27-83, Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

NEWBY, Kenneth. **ASM Handbook: Surface Engineering**. ASM International, v. 5, 1994, p. 684-721.

NORTON, Robert L.. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, v. 1, f. 1030, p. 16-20, 2013.

NUKIYAMA, Shiro. The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure. **Journal Japan Society Mechanical Engineers**, Japão, v. 37, p. 367-374, 1934.

PASSARELLA, Rafael Boschini Albuquerque. **Projeto de Seção de Teste e Montagem de uma Bancada de Ebulição em Piscina do R-744 em uma Placa Vertical**. 2016, f. 38, p. 3-31, Monografia (Bacharelado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SILVEIRA, Lucas Ezequias da Silva. **Análise Experimental da Ebulição em Canais de Diâmetro Reduzido: Efeitos do Diâmetro, do Fluido e da Temperatura**. 2018, f. 124, p. 23-59, Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

SILVA, André Luiz da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2 ed. Sumaré: Eletrometal, v. 1, f. 512, p. 191-337, 1988.

SPIRRAKOS, Constantine C. *et al.* **Finit Element Modeling in Engineering Practice**. 1ed. Pittsburgh: Algor, v. 1, f. 322, 1996, p. 80-250.

STELUTE, Elvio Bugança. **Efeito da Rugosidade Superficial na Ebulição Nucleada de Refrigerantes Halogenados em Tubos Horizontais**. 2004, f. 175, p. 1-72, Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

TELLES, Pedro C. Silva. **Vasos de Pressão**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, f. 320, p. 1-294, 1996.

THOME, R. John; COLLIER, G. John. **Convective Boiling and Condensation**. 3 ed. Oxford: Oxford University Press, v.1 f. 596, p. 1 – 212, 1996.

ZHAOHU, Z.; MAOQIOONG, G.; ZHIJIAN, LI; JIANFEG, WU. , Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Coefficients of Pure HFC134a, HC290, HC600a and Their Binary and Ternary Mixtures. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Estados Unidos da América, v. 50, p. 94-104, 2007.

WENDLING, Marcelo. **Sensores**. Ed. 1, Guaratinguetá: UNESP, v.1, f. 19, p. 3-18, 2010.

ÇENGEL, Yunu A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4 ed., Porto Alegre: AMGH, v1, f 928, 2012, p. 582-618.