

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**BERNARDO CARVALHO HENN**

**DANIEL KONNO**

**VASOS DE PRESSÃO: COMPARAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE  
COMPONENTES ENTRE AS NORMAS ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO 1 E EN 13445  
APLICADO À INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

**CURITIBA**

**2022**

**BERNARDO CARVALHO HENN  
DANIEL KONNO**

**VASOS DE PRESSÃO: COMPARAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE  
COMPONENTES ENTRE AS NORMAS ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO 1 E EN 13445  
APLICADO À INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

**Pressure Vessel: Comparison of components design between ASME section  
VIII division 1 and EN 13445 standards applied to the pulp and paper industry**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Marcelo Maldaner.

**CURITIBA  
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**BERNARDO CARVALHO HENN  
DANIEL KONNO**

**VASOS DE PRESSÃO: COMPARAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE  
COMPONENTES ENTRE AS NORMAS ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO 1 E EN 13445  
APLICADO À INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/junho/2022

---

Marcelo Maldaner  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Nilton Luiz Cararo  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Edenilson Wichinescki  
Especialista  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA  
2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, por ter me amparado durante esse período acadêmico, mesmo ficando longe e dedicando horas para os meus estudos. Agradeço também aos meus colegas de faculdade e professores do curso que foram parceiros e me proporcionaram trocas valiosas para contribuir na minha formação.

- Bernardo Carvalho Henn

Agradeço aos meus pais, Roger e Neli, que me apoiaram por toda a minha trajetória acadêmica. Agradeço também à Letícia por todo o apoio e sugestões durante a efetuação deste trabalho.

- Daniel Konno

Agradecemos ao Prof. Me. Marcelo Maldaner por ter aceitado nosso convite e por ter nos orientado com excelência. Agradecemos também à empresa Valmet, por ter nos disponibilizado as normas atualizadas, utilizadas no presente trabalho.

## RESUMO

Para garantir a integridade estrutural e garantir a segurança durante a operação de um vaso de pressão, é fundamental a utilização de uma norma técnica. Apesar de não ser um passo aplicado cotidianamente nos escritórios de engenharia mecânica, é essencial a escolha de um código de dimensionamento para tornar possível a redução de material durante a fase de projeto. Isso é possível pois cada código possui uma metodologia própria. Sabendo disso, o objetivo do trabalho a seguir é comparar as normas ASME Seção VIII Divisão 1 e EN 13445 parte 3, para que haja visualização dos prós e contras de cada uma delas sob a ótica da mecânica estrutural. A comparação foi realizada através de variáveis calculadas, como a espessura mínima requerida e massa. O presente trabalho concluiu que a norma mais eficiente é a EN 13445, uma vez que a utilização dessa norma pode gerar uma economia em massa de até 30,3%, 47,0% e 53,4% para o aço carbono, aço inoxidável e aço duplex, respectivamente.

Palavras-chave: Vasos de pressão; Comparação de normas; ASME seção VIII divisão 1; EN 13445 parte 3.

## **ABSTRACT**

To guarantee the structural integrity and guarantee safety during the operation of a pressure vessel, it is essential to use a technical standard. Although it is not an everyday step applied in mechanical engineering offices, choosing a sizing code is essential to achieve material reduction during the design phase. This is possible because each code has its own methodology. Knowing this, the objective of the following work is to compare the ASME Section VIII Division 1 and EN 13445 part 3 standards, so that it is possible to visualize the pros and cons of each of them from the perspective of structural mechanics. The comparison will be performed using calculated variables such as the minimum required thickness and the weight. The present work concluded that the most efficient standard is EN 13445, once the use of this standard can generate mass savings of up to 30.3%, 47.0% and 53.4% for carbon steel, stainless steel and duplex steel, respectively.

**Keywords:** Pressure vessels; Standards comparison; ASME section VIII division 1; EN 13445 part 3.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Caracterização dos vasos de pressão .....	17
Figura 2 - Exemplo de um Vaso de Pressão .....	19
Figura 3 - Formatos de vasos de pressão .....	24
Figura 4 - Costado cilíndrico .....	25
Figura 5 - Costado esférico .....	25
Figura 6 - Costado cônico .....	26
Figura 7 - Tampo elíptico .....	27
Figura 8 - Tampo torisférico .....	27
Figura 9 - Tampo hemisférico .....	28
Figura 10 - Tampo cônico .....	28
Figura 11 - Tampo toricônico .....	29
Figura 12 - Fluxograma do desenvolvimento metodológico .....	32

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	49
Gráfico 2 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	49
Gráfico 3 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	50
Gráfico 4 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	53
Gráfico 5 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	54
Gráfico 6 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	54
Gráfico 7 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	58
Gráfico 8 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	59
Gráfico 9 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	59
Gráfico 10 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	65
Gráfico 11 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	65
Gráfico 12 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	66
Gráfico 13 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	70
Gráfico 14 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	70
Gráfico 15 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	71



Gráfico 16 - Espessuras mínimas requeridas para tampos toricônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	75
Gráfico 17 - Espessuras mínimas requeridas para tampos toricônicos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	76
Gráfico 18 - Espessuras mínimas requeridas para tampos toricônicos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	76
Gráfico 19 - mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C	82
Gráfico 20 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	83
Gráfico 21 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço carbonos sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150° .....	87
Gráfico 22 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150° .....	87
Gráfico 23 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	88
Gráfico 24 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	93
Gráfico 25 - spessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	93
Gráfico 26 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	94
Gráfico 27 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	97
Gráfico 28 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	97
Gráfico 29 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	98
Gráfico 30 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	101
Gráfico 31 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	102
Gráfico 32 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C .....	102

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo das propriedades dos materiais.....	32
Quadro 2 - Temperatura de projeto.....	33
Quadro 3 - Pressão de projeto .....	33
Quadro 4 - Materiais utilizados e suas equivalências .....	34
Quadro 5 - Massa específica dos materiais utilizados.....	34
Quadro 6 - Sobreespessura de corrosão .....	34
Quadro 7 - Normas ASME Seção VIII Divisão 1 - Definição da tensão admissível para a temperatura de 150 °C .....	36
Quadro 8 - Norma EN 13445 - Definição da tensão admissível para material 1.0473 para a temperatura de 150°C .....	37
Quadro 9 - Norma EN 13445 - Definição da tensão admissível para material 1.4307 para a temperatura de 150°C .....	37
Quadro 10 - Norma EN 13445 - Definição da tensão admissível para material 1.4362 para a temperatura de 150°C .....	38
Quadro 11 - Norma ASME Seção VIII divisão 1 - Definição do módulo de elasticidade para a temperatura de 150°C.....	39
Quadro 12 - Norma EN 13445 - Definição do módulo de elasticidade para a temperatura de 150°C .....	40
Quadro 13 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão interna conforme a norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) .....	42
Quadro 14 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão interna de projeto conforme a norma EN 13445 Parte 3 (2021) .....	43
Quadro 15 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão externa de projeto conforme a norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) .....	44
Quadro 16 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão externa de projeto conforme a norma EN 13445 Parte 3 (2021) .....	45
Quadro 17 - Definição das tabelas para os materiais selecionados (ASME) .....	80
Quadro 18 - Definição do limite nominal elástico a 150°C.....	81
Quadro 19 - Resumo da redução percentual média de massa para os componentes de aço carbono.....	105
Quadro 20 - Resumo da redução percentual média de massa para os componentes de aço inoxidável .....	106
Quadro 21 - Resumo da redução percentual média de massa para os componentes de aço duplex .....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C.....	50
Tabela 2 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C.....	51
Tabela 3 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	52
Tabela 4 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	55
Tabela 5 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C.....	55
Tabela 6 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	56
Tabela 7 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	60
Tabela 8 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C.....	60
Tabela 9 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	61
Tabela 10 - Área de tampos torisféricos ASME 10% obtida através do AutoCAD .....	63
Tabela 11 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C.....	66
Tabela 12 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C.....	67
Tabela 13 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	68
Tabela 14 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	71
Tabela 14 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	72
Tabela 15 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	72

Tabela 16 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	72
Tabela 17 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	77
Tabela 18 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	77
Tabela 19 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	78
Tabela 20 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	84
Tabela 21 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	84
Tabela 22 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	85
Tabela 23 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	88
Tabela 24 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	89
Tabela 25 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	90
Tabela 26 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	94
Tabela 27 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	95
Tabela 28 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	96
Tabela 29 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	98
Tabela 30 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	99
Tabela 31 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....	100

<b>Tabela 32 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 33 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 34 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C .....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BPVC	<i>Boiler and Pressure Vessels Code</i>
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Fator determinado na tabela G (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$A_c$	Área da seção cônica para o cálculo da massa
$A_{TT}$	Área do tampo torisférico para o cálculo da massa
$B$	Fator determinado da tabela do material aplicável (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$c_n$	Coefficiente polinomial (EN 13445 parte 3, 2021)
$D$	Diâmetro interno do tampo na interface com o costado (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$D_c$	Diâmetro médio do cilindro na junção com o cone (EN 13445 parte 3, 2021)
$D_{\text{cone}}$	Diâmetro interno do cone no ponto de tangência com o raio de rebordeamento adotado para a norma ASME Seção VIII divisão 1
$D_e$	Diâmetro externo do costado (EN 13445 parte 3, 2021)
$D_i$	Diâmetro interno do costado (EN 13445 parte 3, 2021)
$D_1$	Maior diâmetro externo da seção cônica (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$D_m$	Diâmetro médio do costado (EN 13445 parte 3, 2021)
$D_o$	Diâmetro externo do costado (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$D_s$	Menor diâmetro externo da seção cônica (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$e$	Espessura requerida (EN 13445 parte 3, 2021)
$E$	Módulo de elasticidade (ASME Seção VIII divisão 1, 2021) (EN 13445 parte 3, 2021)
$e_a$	Espessura de análise (EN 13445 parte 3, 2021)
$e_b$	Espessura mínima requerida no raio de rebordeamento para prevenir o colapso plástico (EN 13445 parte 3, 2021)
$e_j$	Espessura mínima requerida da parte arredondada do tampo toricônico (EN 13445 parte 3, 2021)
$e_s$	Espessura mínima requerida devido a tensão de membrana no centro do tampo (EN 13445 parte 3, 2021)
$e_y$	Espessura mínima requerida para evitar o escoamento axissimétrico na região do raio de rebordeamento (EN 13445 parte 3, 2021)
$f$	Tensão nominal de projeto (EN 13445 parte 3, 2021)
$f_b$	Tensão de projeto para a flambagem (EN 13445 parte 3, 2021)
$h_i$	Altura interna do tampo medido a partir da linha tangente (EN 13445 parte 3, 2021)
$h_o$	Altura do tampo elíptico medido a partir da linha tangente (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)(EN 13445 parte 3, 2021)
$K$	Fator de forma para um tampo elíptico (EN 13445 parte 3, 2021)
$l$	Comprimento entre reforços (ASME Seção VIII divisão 1, 2021) (EN 13445 PARTE 3, 2021)
$L$	Raio de coroa ou raio esférico interno de tampos (ASME Seção VIII divisão 1, 2021) ou raio de coroa ou raio esférico de cascos (EN 13445 parte 3, 2021)
$L_c$	Comprimento da seção cônica (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)

$L_e$	Comprimento equivalente da seção cônica entre linhas de reforço (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$m$	Massa do componente
$M$	Fator geométrico M para o cálculo de tampos torisféricos (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$P$	Pressão de projeto (ASME Seção VIII divisão 1, 2021) ou pressão de cálculo (EN 13445 parte 3, 2021)
$P_a$	Pressão admissível calculada (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$P_y$	Pressão onde a tensão circunferencial média alcança o ponto de escoamento (EN 13445 parte 3, 2021)
$P_m$	Pressão de instabilidade elástica para o colapso do vaso (EN 13445 parte 3, 2021)
$r$	Raio de rebordeamento de tampos (ASME Seção VIII divisão 1, 2021) (EN 13445 parte 3, 2021)
$R$	Raio médio do vaso (EN 13445 parte 3, 2021)
$R_i$	Raio interno da virola do costado adotado para a norma ASME Seção VIII divisão 1
$R_{max}$	Maior raio da seção cônica (EN 13445 parte 3, 2021)
$R_{min}$	Menor raio da seção cônica (EN 13445 parte 3, 2021)
$R_n$	Raio intermediário do cone (EN 13445 parte 3, 2021)
$R_o$	Raio externo do costado (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$R_{p 0,2 / T}$	Tensão de prova a 0,2% (EN 13445 parte 3, 2021)
$s$	Coefficiente de segurança para condições de projeto (EN 13445 parte 3, 2021)
$S$	Tensão máxima admissível (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$t$	Espessura mínima requerida (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$T$	Temperatura de projeto (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)(EN 13445 parte 3, 2021)
$t_e$	Espessura efetiva do cone (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$t_s$	Espessura mínima do tampo após a conformação (ASME Seção VIII divisão 1, 2021)
$z$	Coefficiente de junta (EN 13445 parte 3, 2021) ou coeficiente de junta adotada para a norma ASME Seção VIII Divisão 1
$\alpha$	Semi ângulo do cone no vértice (ASME Seção VIII divisão 1, 2021) (EN 13445 PARTE 3, 2021)
$\beta$	Fator determinado na figura 7.5-1 (EN 13445 parte 3, 2021)
$\gamma$	Fator determinado na equação (48) (EN 13445 parte 3, 2021)
$\varepsilon$	Tensão elástica média no colapso (EN 13445 parte 3, 2021)
$\pi$	Constante matemática
$\sigma_e$	Limite nominal elástico do material em questão (EN 13445 parte 3, 2021)
$\lambda$	Fator determinado na equação (46)
$\mu$	Massa específica do material
$\rho$	Fator determinado na equação (47) (EN 13445 parte 3, 2021)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Contextualização do tema	13
1.2	Caracterização da Oportunidade	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivos específicos	15
1.4	Justificativa	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
2.1	Vasos de pressão	17
2.2	Normas	19
2.2.1	Normas ASME	19
<u>2.2.1.1</u>	<u>ASME Seção VIII Divisão 1</u>	<u>20</u>
<u>2.2.1.2</u>	<u>ASME Seção II Parte A</u>	<u>21</u>
<u>2.2.1.3</u>	<u>ASME Seção II Parte D</u>	<u>22</u>
2.2.2	Normas EN	22
<u>2.2.2.1</u>	<u>EN 13445</u>	<u>22</u>
<u>2.2.2.2</u>	<u>EN 10028</u>	<u>23</u>
2.3	Componentes de um vaso de pressão	23
2.3.1	Costado	23
<u>2.3.1.1</u>	<u>Costado cilíndrico</u>	<u>24</u>
<u>2.3.1.2</u>	<u>Costado esférico</u>	<u>25</u>
<u>2.3.1.3</u>	<u>Costado cônico</u>	<u>26</u>
2.3.2	Tampos	26
<u>2.3.2.1</u>	<u>Tampos elípticos</u>	<u>26</u>
<u>2.3.2.2</u>	<u>Tampos torisféricos</u>	<u>27</u>
<u>2.3.2.3</u>	<u>Tampos hemisféricos</u>	<u>28</u>
<u>2.3.2.4</u>	<u>Tampos cônicos</u>	<u>28</u>
<u>2.3.2.5</u>	<u>Tampos toricônicos</u>	<u>29</u>
2.4	Soldas em vasos de pressão	29
2.5	Materiais	30
2.5.1	Aços carbonos	30
2.5.2	Aços inoxidáveis	30
2.5.3	Aços ferríticos-austeníticos	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>

<b>3.1</b>	<b>Temperatura de projeto.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Pressão de projeto .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>33</b>
3.3.1	Massa específica.....	34
<b>3.4</b>	<b>Sobreespessura de corrosão .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>Tensão admissível.....</b>	<b>35</b>
3.5.1	Norma ASME Seção VIII Divisão 1 .....	35
3.5.2	Norma EN 13445 Parte 3 .....	36
<u>3.5.2.1</u>	<u>Material 1.0473.....</u>	<u>36</u>
<u>3.5.2.2</u>	<u>Material 1.4307.....</u>	<u>37</u>
<u>3.5.2.3</u>	<u>Material 1.4362.....</u>	<u>38</u>
<b>3.6</b>	<b>Módulo de elasticidade .....</b>	<b>38</b>
3.6.1	Norma ASME Seção VIII Divisão 1 .....	38
3.6.2	Norma EN 13445 Parte 3.....	39
<b>3.7</b>	<b>Eficiência de junta .....</b>	<b>40</b>
3.7.1	Norma ASME Seção VIII Divisão 1 .....	40
3.7.2	Norma EN 13445.....	40
<b>3.8</b>	<b>Conformação de tampos.....</b>	<b>41</b>
<b>3.9</b>	<b>Metodologias de dimensionamento.....</b>	<b>41</b>
<b>3.10</b>	<b>Automatização de cálculos.....</b>	<b>45</b>
<b>3.11</b>	<b>Comparação dos resultados .....</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Pressão interna.....</b>	<b>47</b>
4.1.1	Costado cilíndrico .....	47
<u>4.1.1.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cilíndricos .....</u>	<u>47</u>
<u>4.1.1.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 costados cilíndricos.....</u>	<u>48</u>
<u>4.1.1.3</u>	<u>Comparação entre as normas costados cilíndricos .....</u>	<u>48</u>
4.1.2	Costado esférico.....	52
<u>4.1.2.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 costados esféricos .....</u>	<u>52</u>
<u>4.1.2.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 costados esféricos .....</u>	<u>53</u>
<u>4.1.2.3</u>	<u>Comparação entre as normas costados esféricos .....</u>	<u>53</u>
4.1.3	Costado cônico.....	56
<u>4.1.3.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cônicos .....</u>	<u>57</u>
<u>4.1.3.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 costados cônicos .....</u>	<u>57</u>
<u>4.1.3.3</u>	<u>Comparação entre as normas costados cônicos.....</u>	<u>58</u>

4.1.4	Tampo hemisférico .....	61
4.1.5	Tampo torisférico .....	62
<u>4.1.5.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos torisféricos .....</u>	<u>63</u>
<u>4.1.5.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 tampos torisféricos .....</u>	<u>63</u>
<u>4.1.5.3</u>	<u>Comparação entre as normas tampos torisféricos .....</u>	<u>64</u>
4.1.6	Tampo elíptico .....	68
<u>4.1.6.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos elípticos .....</u>	<u>69</u>
<u>4.1.6.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 tampos elípticos .....</u>	<u>69</u>
<u>4.1.6.3</u>	<u>Comparação entre as normas tampos elípticos .....</u>	<u>70</u>
4.1.7	Tampo cônico .....	73
4.1.8	Tampo toricônico .....	73
<u>4.1.8.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos toricônicos .....</u>	<u>74</u>
<u>4.1.8.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 tampos toricônicos .....</u>	<u>74</u>
<u>4.1.8.3</u>	<u>Comparação entre as normas tampos toricônicos .....</u>	<u>75</u>
<b>4.2</b>	<b>Pressão Externa .....</b>	<b>78</b>
4.2.1	Costado cilíndrico .....	79
<u>4.2.1.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cilíndricos .....</u>	<u>79</u>
<u>4.2.1.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 costados cilíndricos .....</u>	<u>80</u>
<u>4.2.1.3</u>	<u>Comparação entre as normas costados cilíndricos .....</u>	<u>82</u>
4.2.2	Costado esférico .....	85
<u>4.2.2.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 costados esféricos .....</u>	<u>85</u>
<u>4.2.2.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 costados esféricos .....</u>	<u>86</u>
<u>4.2.2.3</u>	<u>Comparação entre as normas costados esféricos .....</u>	<u>87</u>
4.2.3	Costado cônico .....	90
<u>4.2.3.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cônicos .....</u>	<u>91</u>
<u>4.2.3.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 costados cônicos .....</u>	<u>92</u>
<u>4.2.3.3</u>	<u>Comparação entre as normas costados cônicos .....</u>	<u>93</u>
4.2.4	Tampos hemisféricos .....	96
4.2.5	Tampos torisféricos .....	96
<u>4.2.5.1</u>	<u>Comparação entre as normas tampos torisféricos .....</u>	<u>97</u>
4.2.6	Tampos elípticos .....	100
<u>4.2.6.1</u>	<u>Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos elípticos .....</u>	<u>100</u>
<u>4.2.6.2</u>	<u>Norma EN 13445 parte 3 tampos elípticos .....</u>	<u>101</u>
<u>4.2.6.3</u>	<u>Comparação entre as normas tampos elípticos .....</u>	<u>101</u>
4.2.7	Tampos cônicos .....	104

4.2.8	Tampos toricônicos .....	105
4.3	<b>Resumo dos resultados</b> .....	<b>105</b>
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>109</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do tema

Dimensionar vasos de pressão é um grande desafio para as indústrias de papel e celulose, especialmente no Brasil, uma vez que a norma de dimensionamento nacional, ABNT NBR 16035, é uma combinação de normas estrangeiras. No Brasil, a avaliação e seleção de uma norma de dimensionamento, também chamado de código de dimensionamento, é de extrema importância para a redução de custos no momento da fabricação, montagem e inspeção do equipamento.

Segundo Telles (1996, p. 1), as indústrias de processo transformam os materiais de maneira física e/ou química. Os vasos de pressão (denominados equipamentos de processos) são amplamente utilizados nesse tipo de indústria, trabalhando dia e noite em operação.

Conforme Falcão (2008, p. 1), vasos de pressão são equipamentos utilizados em refinarias de petróleo, petroquímicas e indústrias alimentícias e farmacêuticas. Telles (1996, p. 1) vai além na aplicação do equipamento, explicitando que os vasos também são utilizados em terminais de armazenagem e distribuição de petróleo, e na parte térmica de centrais termelétricas.

Além disso, também são utilizados em indústria de papel e celulose que, para Silva, Bueno e Neves (2015), é um grande ramo pertencente à indústria de processos brasileira. Essa área de atuação teve uma crescente de 3% a.a. no período de 2004 a 2014. Conforme os autores, o consumo per capita de papel cresceu de 39 para 51 Kg por habitante no mesmo período; tal crescimento se dá pelo grande número de pessoas saindo da pobreza absoluta e pelas melhorias das condições de higiene. Os autores também afirmam que o setor ainda tem grande potencial de crescimento, com previsão de chegar até 482 milhões de toneladas produzidas mundialmente em 2030.

Os dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) de 2020 apontam que a celulose ocupou o sétimo lugar no ranking das exportações brasileiras, com um aumento de 10,7% no setor de madeira em tora para papel e celulose; destacando a cidade de Telêmaco Borba, no Paraná, que obteve o maior valor da produção, alcançando R\$568 milhões. O grande desenvolvimento deste setor desencadeia novos investimentos e projetos. Conforme a matéria presente no sítio da internet Tissue Online (2020), cerca de U\$10 bilhões de dólares em investimentos

serão aplicados em projetos e implementação de novas plantas industriais de papel e celulose no Brasil a partir de 2021.

Os vasos de pressão constituem a parte mais importante e de maior custo nas indústrias de processos, representando até 60% do custo total das indústrias (TELLES, 1996, p. 2). O autor comenta que a grande maioria dos vasos não são um item de produção seriada, eles são projetados e construídos por encomenda para atender o processo e sua condição de operação. Portanto, o projeto é realizado individualmente para cada vaso a ser construído, seguindo um processo normativo.

De acordo com Falcão (2008, p. 1), os códigos de dimensionamento surgiram após vários acidentes, tendo o primeiro código americano para vasos de pressão publicado em 1925. Os códigos de dimensionamento garantem a integridade do equipamento de acordo com os esforços a que eles estão sujeitos. Os códigos são revisados periodicamente para se adequarem ao avanço tecnológico. Existem diversas normas de dimensionamento, sendo que cada uma delas adota critérios e metodologias próprias.

A utilização de normas é necessária para a realização do dimensionamento de vasos de pressão. Para o vaso de pressão poder operar em território brasileiro, ele precisa passar por inspeções e testes conforme requisitos mínimos exigidos pela norma regulamentadora 13, que garante a integridade estrutural do equipamento, evitando diversos acidentes com vasos de pressão (Prometal Epis, 2019).

## **1.2 Caracterização da Oportunidade**

Para atender determinados requisitos e especificações de projeto, os vasos de pressão são equipamentos que, em sua grande maioria, são fabricados por encomenda (Telles, 1996, p. 33). Existem diversas normas técnicas relacionadas à projeto, fabricação, inspeção e teste desses equipamentos e, em cada uma delas, são fornecidos requisitos obrigatórios, proibições e orientações diferentes. Devido a isso, é fundamental o entendimento das diferenças entre os códigos.

Buscando a otimização de recursos materiais e financeiros, o presente estudo surgiu a partir da necessidade de entender e comparar a norma americana ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) Seção VIII Divisão 1 (2021) e a norma europeia EN 13445 (2021).

O tema de estudo surgiu através de uma demanda da empresa Valmet, que possui interesse em saber qual norma de dimensionamento é mais eficiente para a

redução de custos dos vasos de pressão. A Valmet é uma empresa multinacional que desenvolve e fornece tecnologias, automação e serviços. Seus principais clientes são indústrias do ramo de celulose, papel e energia (Valmet, 2021).

### **1.3 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é comparar o dimensionamento de componentes de vasos pressurizados entre a norma de projeto americana ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e a norma de projeto europeia EN 13445 (2021), buscando a redução de custos de material. Serão dimensionados os tampos hemisférico, torisférico, elíptico, cônico e toricônico, e os costados com formatos cilíndrico, esférico e cônico.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Estudar as normas de dimensionamento de vasos de pressão ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021).
- Desenvolver uma programação para automatizar o processo de dimensionamento dos componentes dos vasos de pressão.
- Comparar os resultados obtidos dos componentes dimensionados.
- Identificar nas comparações o menor custo dos componentes dimensionados, observando a melhor norma a ser utilizada.

### **1.4 Justificativa**

A oportunidade de desenvolver um projeto de vaso pressurizado aplicando os conhecimentos de engenharia foi o principal requisito para a escolha do tema abordado no presente trabalho.

A etapa de dimensionamento de um vaso de pressão é uma atividade inerente à área de engenharia mecânica e, portanto, devem ser considerados todos os aspectos éticos, sociais e econômicos envolvidos.

A redução de custos é de grande interesse por parte do projeto, pois, dessa forma, é possível alocar recursos em outras áreas. A diminuição dos gastos na área de vasos pressurizados seria de grande significância no custo total do projeto, visto que por são equipamentos de grande custo na maioria dos casos.

Além da redução de custo, o equipamento deve ser dimensionado para as piores condições e necessita atender os carregamentos de operação. Portanto, é

necessário garantir a integridade estrutural do vaso de pressão conforme os códigos de dimensionamento permitem. As atividades que envolvem vasos de pressão apresentam alto risco de acidentes durante a operação desses equipamentos, bem como em todas as atividades envolvidas com a sua manufatura. Portanto, devem ser considerados requisitos de segurança, com o objetivo de evitar riscos à vida, prejuízos a terceiros e danos ecológicos (Telles, 1996, p. 2).



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Ao longo do capítulo serão abordados os tipos e os componentes dos vasos pressurizados e as normas comumente utilizadas nos seus dimensionamentos.

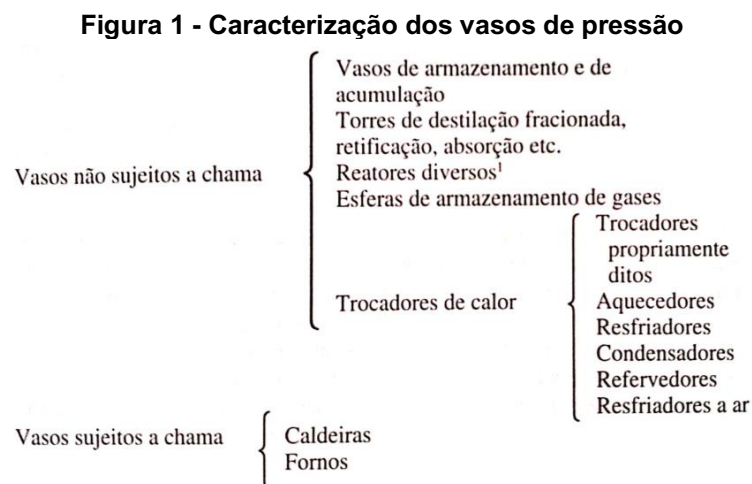
### 2.1 Vasos de pressão

Os vasos de pressão são os vários reservatórios que contém fluido sob pressão, seja ele líquido ou gasoso. Esses equipamentos devem atender os inúmeros processos e podem ter diversos formatos (Telles, 1996, p. 1).

Chattopadhyay (2004, p. 2) define os vasos de pressão como sendo recipientes que operam com diferenças entre as pressões externa e interna, podendo ocorrer mudanças de estado dos fluídos e reações químicas no interior do equipamento.

Annaratone (2007, p. V) afirma que os vasos são os equipamentos mais utilizados entre os diversos setores industriais. Ele enfatiza que não existiriam fábricas sem caldeiras a vapor, tanques, trocadores de calor, autoclaves, coletores etc., sendo eles elementos essenciais para os variados setores industriais. Chattopadhyay (2004, p. 3) coloca que os vasos de pressão são fundamentais para as indústrias.

Os vasos de pressão podem ser classificados com relação à sua utilização, sendo possível devido à necessidade de atender a variedade de processos existentes na indústria (Torino Soluzioni Ambientali, 2019). A Figura 1 descreve a categorização que o autor Telles (1996) apresenta em seu livro.



Fonte: Telles (1996, p. 2)

Os vasos sujeitos a chama são passíveis ao contato direto com o fogo, como caldeiras e fornos. Os vasos não sujeitos a chama podem ou não estarem sujeitos a altas temperaturas (Telles, 1996, p. 3).

Telles (1996, p. 4) descreve que a maior parte dos processos demandam realização em ambientes pressurizados, sendo alguns casos a importância do vácuo no interior do equipamento; neste caso, a pressão atmosférica atuará externamente sob o casco do vaso. Ele explica que o intervalo de temperatura e pressão de operação dos vasos são muito amplos, o que torna necessário o dimensionamento individual para cada caso.

Chattopadhyay (2004, p. 2) comenta que geralmente são utilizadas combinações de altas temperaturas e pressões no interior dos equipamentos, e que os vasos precisam ser dimensionados para resistir às condições de operação.

Segundo Telles (1996, p. 7), como os vasos de pressão necessitam atender os requisitos de processo, eles podem estar posicionados na horizontal, vertical ou em um plano inclinado, sendo que os vasos que são posicionados na vertical possuem o auxílio da gravidade no escoamento do fluido.

Conforme Falcão (2008, p. 49), os vasos posicionados na horizontal geralmente são cilíndricos e bi-apoiados em selas, que são soldadas no casco. Devido a forma que são suportadas e a presença das cargas de pressão atuantes em seu interior, o vaso é considerado com uma estrutura tubular.

De acordo com Telles (1996, p. 5), esses equipamentos podem alcançar grandes dimensões, podendo chegar a duzentas toneladas de peso e sessenta metros de comprimento. Chattopadhyay (2004, p. 2) complementa Telles, discorrendo que os vasos podem variar bastante de tamanho entre si e podem estar enterrados, afundados na água, suportados em plataformas ou localizados no chão. A Figura 2 a seguir mostra um exemplo de um vaso de pressão.

**Figura 2 - Exemplo de um Vaso de Pressão**



**Fonte: *New Century* [entre 1995 e 2021]**

## **2.2 Normas**

Os códigos de projeto têm como objetivo estabelecer requisitos mínimos de segurança para o dimensionamento, fabricação e inspeção. Os códigos que serão abordados no presente trabalho serão a ASME Seção VIII Divisão 1 (2021), *Rules for Construction of Pressure Vessels*, e a EN 13445 (2021), *Unfired Pressure Vessels*. Serão utilizadas também outras normas complementares com o intuito de aplicar algumas especificações de materiais e alguns padrões dimensionais.

### **2.2.1 Normas ASME**

No ano de 1911, a ASME (*The American Society of Mechanical Engineers*) constituiu de um comitê com o objetivo de estabelecer regras e padrões para a construção de vasos de pressão e caldeiras a vapor. Em 2009, esse comitê foi dividido em outros doze, cada um gerando uma norma diferente com escopos distintos relacionados a caldeiras e equipamentos pressurizados (ASME, 2021, p. XXXV). Serão utilizados no presente trabalho os códigos ASME Seção VIII Divisão 1, ASME Seção II Parte A e a ASME Seção II Parte D. Serão utilizadas também normas dimensionais complementares referentes à tubos como a ASME B36.10M (2018) e a ASME B36.19M (2018).

### 2.2.1.1 ASME Seção VIII Divisão 1

A norma americana ASME Seção VIII Divisão 1 – *Rules for Construction of Pressure Vessels* –, é a norma mais utilizada no Brasil (FALCÃO, 2008, p. 1). O código ASME Seção VIII Divisão 1 parágrafo U-1(a)(3), descreve que a norma possui requisitos obrigatórios, proibições e orientações de caráter não obrigatório, aplicáveis aos materiais, projeto, fabricação, inspeção, teste, certificação e alívio de pressão de vasos pressurizados (ASME, 2021, p. 1). Aspectos não abordados não devem ser considerados como proibidos. Conforme o desenvolvimento da tecnologia, as ferramentas e técnicas utilizadas no projeto e análise são alteradas e, por isso, é de suma importância a utilização do conhecimento, experiência e bom senso na aplicação dessas ferramentas.

Conforme a ASME Seção VIII Divisão 1 parágrafo U-1(c)(2) (ASME, 2021, p. 1), os vasos que possuem as seguintes características não estão inclusos no escopo dessa divisão:

- Equipamentos que se enquadram no escopo das outras seções do BPVC (*Boiler and Pressure Vessels Code*);
- Vasos de processo sujeitos a chama;
- Equipamentos pressurizados rotativos no qual as considerações principais de projeto e tensão decorram dos requisitos funcionais do equipamento. Alguns exemplos são: bombas, compressores, turbinas, cilindros hidráulicos e pneumáticos, entre outros;
- Sistemas em que a função principal é o transporte de fluidos, como arranjo de tubulações;
- Componentes de tubulação;
- Vasos que contenham ar, onde a compressão tem função de amortecedor, e vasos que contenham água, onde ambos não excedam as seguintes limitações: pressão de projeto 2 MPa e temperatura de projeto de 99 °C ;
- Tanques de armazenamento de água quente aquecido por vapor ou outros meios indiretos, onde não seja excedido as seguintes limitações: a temperatura de 99 °C, entrada de calor de 58,6 kW e capacidade nominal de água de 450 l;

- Vasos, sem limitação de tamanho, que não excedam a pressão interna ou externa de projeto no topo do equipamento de 100 kPa. Vasos com mais de um compartimento, onde cada um deles não excedam uma pressão interna ou externa de 100 kPa e não exceda uma pressão de 100 kPa nos componentes que pertencem à ambos os elementos;
- Vasos pressurizados destinados à ocupação humana.

De acordo com o parágrafo da ASME Seção VIII Divisão 1 U-1(d), as regras descritas foram elaboradas com base em princípios de projeto aplicados a vasos em que a pressão não exceda 20 Mpa (ASME, 2021, p. 2). Caso essa pressão seja excedida, deverão ser utilizadas recomendações adicionais para atender requisitos de projeto, princípios e boas práticas de engenharia.

#### 2.2.1.2 ASME Seção II Parte A

Por mais de cinquenta anos, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) cooperaram com o objetivo de fornecer especificações apropriadas para utilização no ramo de equipamentos pressurizados. A Parte A da norma ASME Seção II – *Ferrous Material Specifications* –, aborda especificações técnicas relacionadas a materiais ferrosos, enquanto a Parte B trata a respeito de materiais não ferrosos. As especificações presentes na ASME Seção II Parte A são preparadas e protegidas por direitos autorais por outras organizações como a ASTM, AWS (*American Welding Society*) entre outros. Todas elas são indicadas pelos símbolos ASME / organização de origem. O Comitê de Caldeiras e Vasos de Pressão da ASME realizou alterações nas especificações com o objetivo de adaptá-las aos códigos relacionados a esses tipos de equipamentos (ASME, 2021, p. xli).

A ASME Seção II Parte A é uma norma que fornece especificações de materiais ferrosos para a utilização nas demais seções do BPVC. As especificações são intituladas por “SA” e são derivados das normas “A” da ASTM (Stewart; Lewis, 2012, p. 5).

### 2.2.1.3 ASME Seção II Parte D

A norma ASME Seção II Parte D – *Properties (Metric)* – fornece tabelas com dados de tensões, propriedades mecânicas e tabelas com propriedades físicas de materiais (ASME, 2021, p.3).

### 2.2.2 Normas EN

O CEN (*European Committee for Standardization*) fornece para vários tipos de produtos: materiais, serviços e processos, uma plataforma para o desenvolvimento de documentos técnicos e normas europeias. O órgão também apoia atividades de padronização para inúmeros setores como o de energia, química, saúde, máquinas, materiais, equipamentos de pressão, dentre outros (CENCENELEC, 2021).

Alguns países, dentre eles a Áustria, Bélgica, Bulgária, Finlândia, França, Alemanha, Itália, Portugal, Suécia, entre outros, são obrigados a utilizar as normas europeias presentes no trabalho de acordo com os regulamentos internos do CEN-CENELEC (EN, 2021, p. 3).

#### 2.2.2.1 EN 13445

Para vasos pressurizados não sujeitos a chama, o código EN 13445 – *Unfired Pressure Vessels* – estabelece requisitos de projeto, construção, inspeção e teste. O termo não sujeito a chama exclui vasos expostos diretamente ao calor ou a chama de um processo de queima, não excluindo vasos sujeitos a aquecimento elétrico ou fluxos de processo aquecidos. Acessórios soldados, conexões aparafusadas e a extremidade da primeira solda circunferencial conectada à tubulação também são componentes inclusos no escopo da norma (EN, 2021, p. 4).

A EN 13445 se aplica em vasos em que a pressão máxima admissível é superior a 0,5 bar, mas também pode ser utilizado em vasos que operam como pressões mais baixas, incluindo vácuo. Essa norma também pode ser utilizada em vasos de transporte, itens relacionados ao uso em instalações nucleares e em vasos com risco de sobreaquecimento, desde que sejam utilizados requisitos alternativos e/ou adicionais (EN, 2021, p. 6).

#### 2.2.2.2 EN 10028

A norma europeia EN 10028 – *Flat products made of steels for pressure purposes* – especifica as condições de fornecimento de chapas para utilização em equipamentos pressurizados (EN, 2021, p. 4).

### **2.3 Componentes de um vaso de pressão**

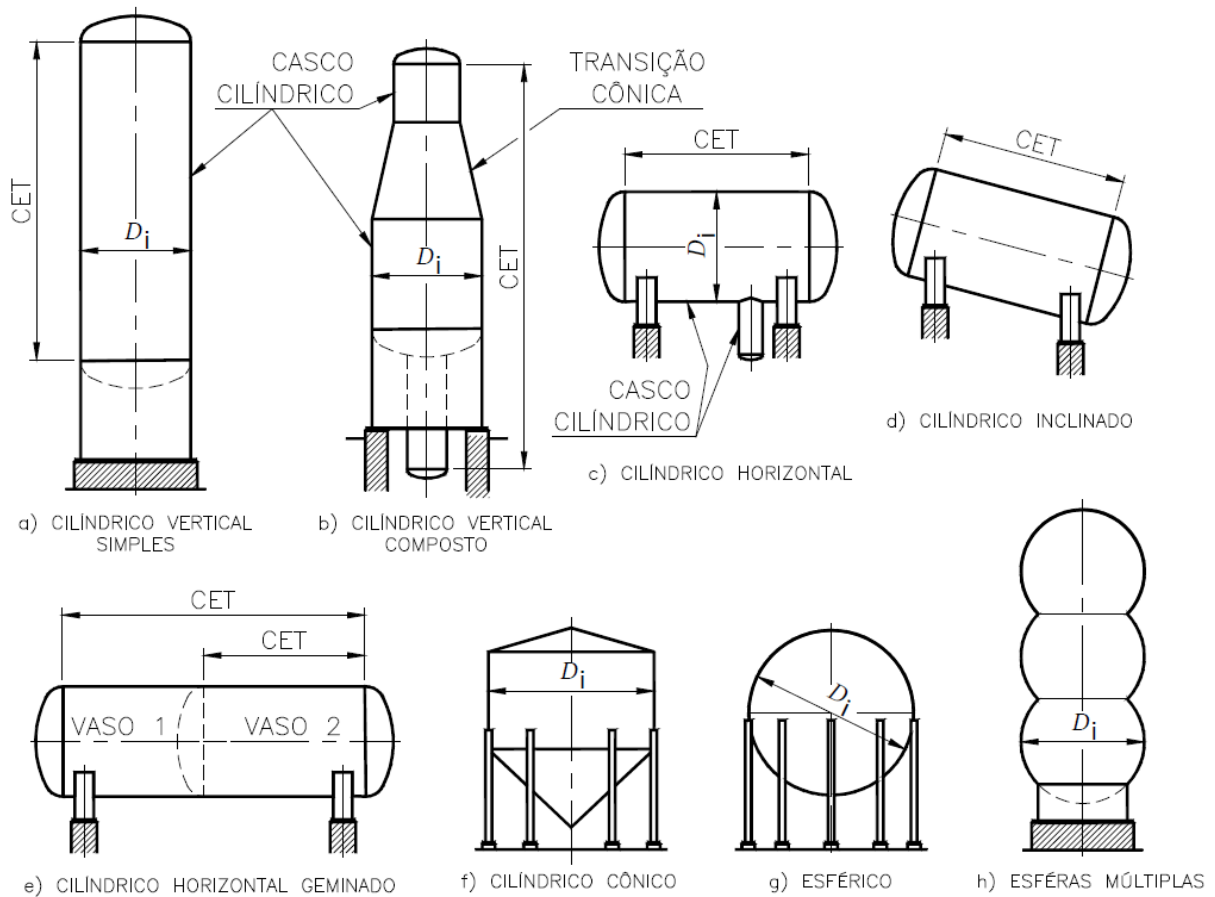
Nesta seção, serão apresentados alguns dos elementos utilizados nos vasos de pressão. Estes elementos são dimensionados conforme procedimentos normativos presentes nos códigos de dimensionamento. No presente trabalho serão utilizadas as normas ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e EN 13445 Parte 3 (2021).

#### 2.3.1 Costado

Os costados, também chamados de cascos, podem adotar diversas formas, sendo que a maioria delas são geometrias de revolução obtidas através da rotação de um plano, denominado meridiano, em relação a um eixo (Gill et al., 1970, p. 8). Telles (1996, p. 7) também descreve em seu livro que os cascos podem adotar vários formatos, podendo ser cilíndricos, esféricos ou cônicos, sendo possível haver combinações entre si.

A Figura 3 descreve algumas formas dos vasos e suas combinações, sendo os vasos esféricos menos usuais, principalmente o de esferas múltiplas (Telles, 1996, p. 9).

**Figura 3 - Formatos de vasos de pressão**



**Fonte: Telles adaptado (1996, p. 8)**

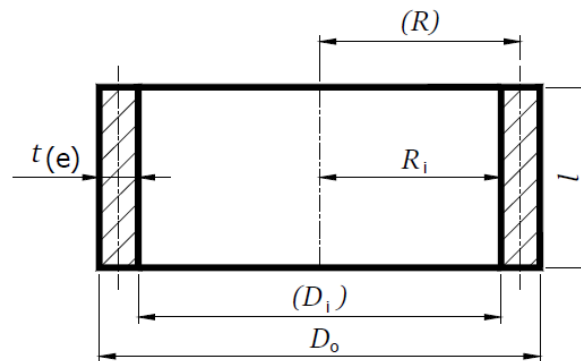
A seguir serão descritos os tipos de costados e tampos. As figuras 4 a 11 mostram os símbolos adotados nos cálculos para a norma ASME seção VIII divisão 1, e entre parênteses os símbolos adotados para os dimensionamentos EN 13445.

### 2.3.1.1 Costado cilíndrico

Telles (1996, p. 7) salienta em seu livro que a grande maioria dos vasos possuem casco cilíndrico; tal preferência surge pela fácil fabricação através de chapas e fácil transporte. O autor também explica em seu livro que, quando é necessário diferentes níveis de vazão no interior do equipamento, é utilizada uma combinação de cilindros com diferentes diâmetros para o costado. A figura 4 mostra um costado cilíndrico.



**Figura 4 - Costado cilíndrico**



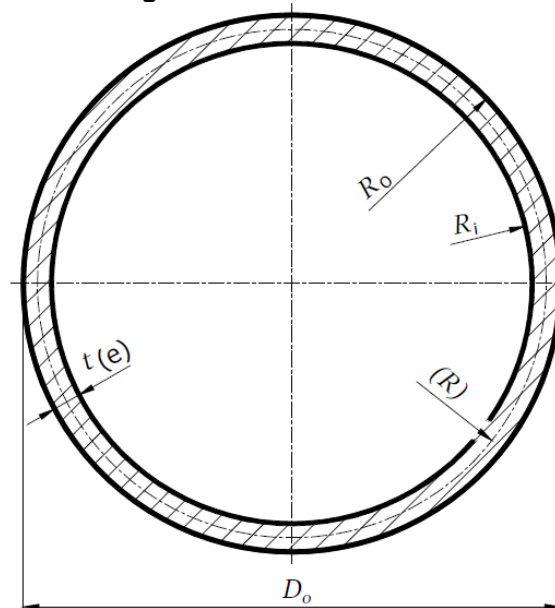
**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 2.3.1.2 Costado esférico

O melhor formato para o casco dos vasos de pressão é uma esfera, já que com essa geometria é possível chegar a espessuras e pesos menores; porém, eles possuem alto custo, ocupam muito espaço e seu formato é de difícil fabricação e transporte. Por conta das dificuldades, esse tipo de vaso só é usual para grandes dimensões. (Telles, 1996, p. 8).

Os vasos esféricos são largamente empregados para o armazenamento de gases sob alta pressão, sendo bastante utilizados em indústrias do ramo petrolífero, como as refinarias de petróleo (Silva Junior, 2011). A Figura 5 a seguir demonstra um costado esférico.

**Figura 5 - Costado esférico**

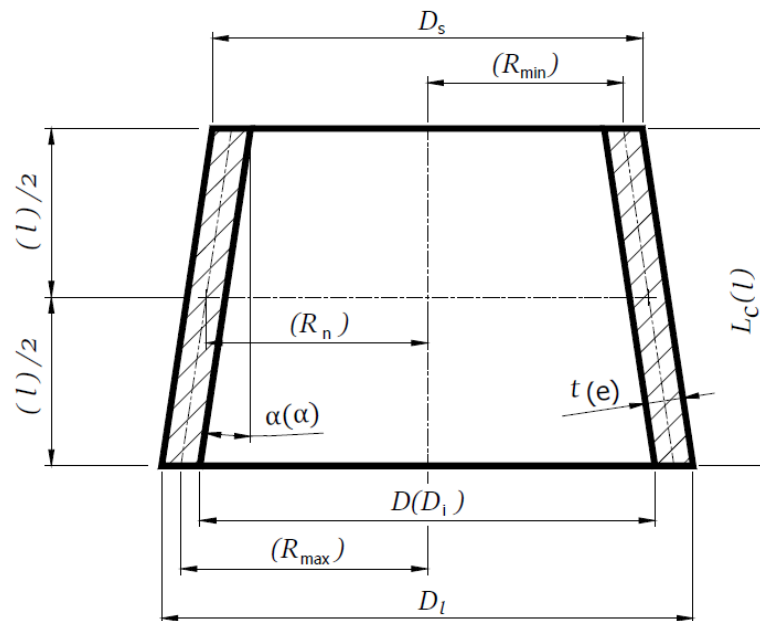


**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 2.3.1.3 Costado cônico

Os formatos de cascos podem ser combinados, e essa necessidade surge para a adequação do dimensionamento ao processo. O formato cônico é bastante utilizado nas transições de diâmetros entre dois cascos cilíndricos; como mencionado anteriormente, tal combinação possibilita alcançar vazões diferentes nas seções que compõem o equipamento. (Telles, 1996, p. 9). A figura 6 mostra um costado cônico.

**Figura 6 - Costado cônico**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

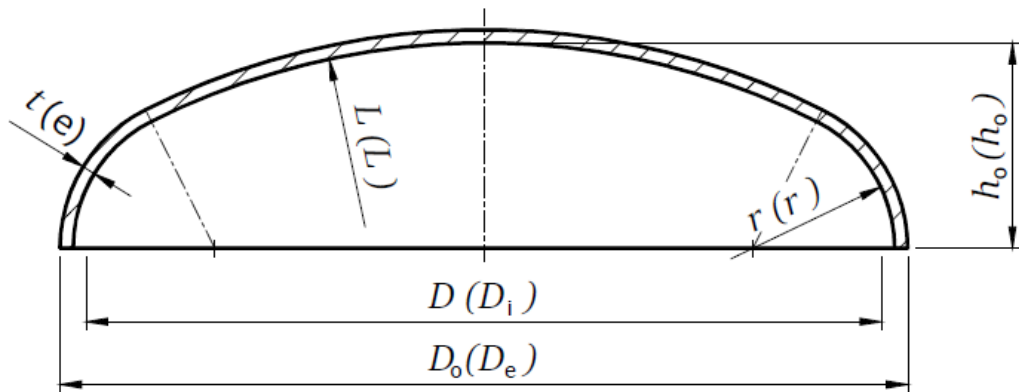
### 2.3.2 Tampos

Os tampos dos vasos de pressão são os elementos de fechamento dos cascos. Eles podem adotar diversos formatos, sendo mais usuais os tampos de geometria: hemisférica, torisférica, elíptica, plana e cônica. (Telles, 1996, p. 9).

#### 2.3.2.1 Tampos elípticos

Conforme Telles (1996, p. 9), os tampos elípticos possuem suas seções transversais no formato de uma elipse, e as espessuras alcançadas para este tipo de tampo são parecidas com as dimensões obtidas para um costado cilíndrico nas mesmas condições (temperatura, pressão, material e diâmetro). Porém, Falcão (2008, p. 32) aponta a dificuldade de fabricação desses tipos de tampos no Brasil, por conta da carência do mercado nacional em ferramentas especiais de conformação. A figura 7 mostra um tampo elíptico.

Figura 7 - Tampo elíptico

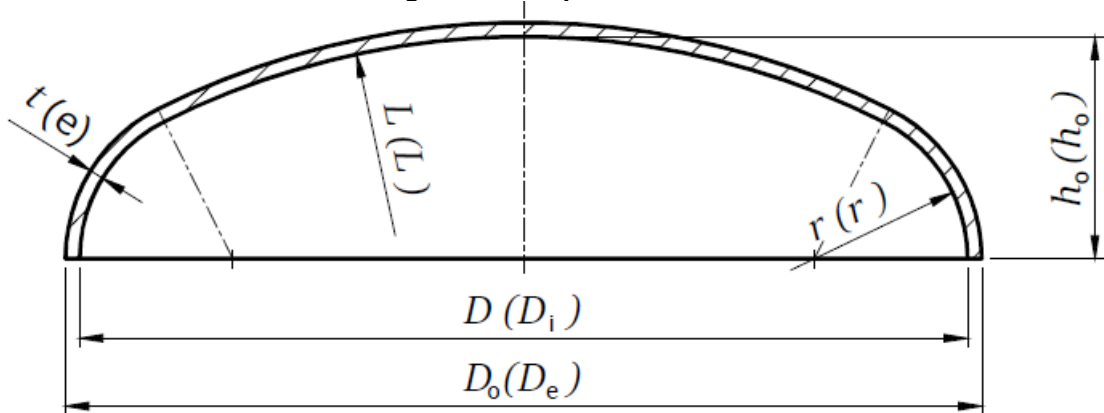


Fonte: Autoria própria (2022)

### 2.3.2.2 Tampos torisféricos

Os tampos torisféricos são obtidos através da junção de 2 geometrias, uma esfera e um toróide, sendo os tampos de mais fácil fabricação. Contudo, esse tipo de tampo alcança espessuras maiores que os elípticos nas mesmas condições (Telles, 1996, p. 9). Segundo Falcão (2008, p. 32), os tampos torisféricos sofrem perda por conformação por conta do método de fabricação. Portanto, é necessária atenção na hora de escolher a espessura das chapas para a fabricação, pois o tampo necessita ter sua espessura inferior maior que a espessura mínima requerida. A diferença entre o tampo torisférico e o tampo elíptico está na junção da geometria superior do tampo (elipse) com a parte inferior (cilindro), onde existe um toróide. A Figura 8 a seguir demonstra um tampo torisférico.

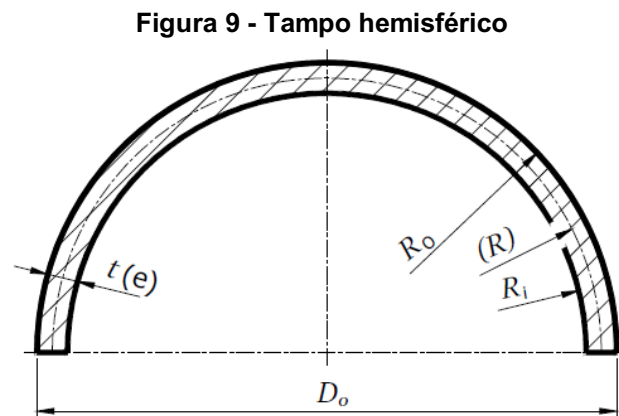
Figura 8 - Tampo torisférico



Fonte: Autoria própria (2022)

### 2.3.2.3 Tampos hemisféricos

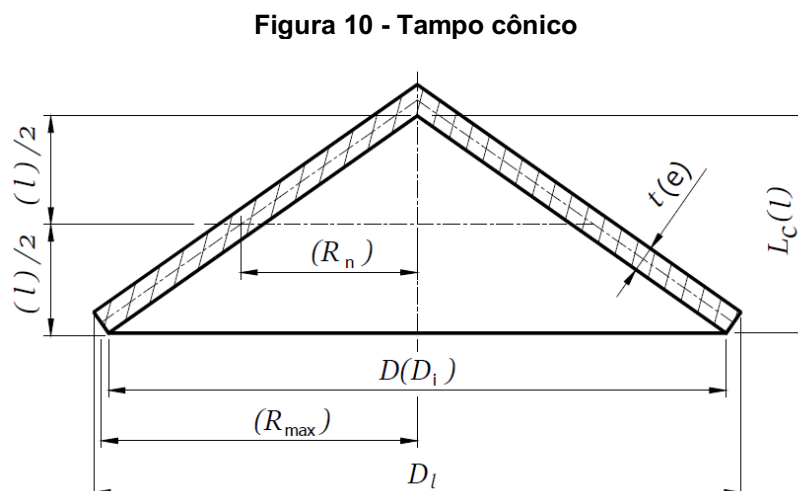
Os tampos hemisféricos ou esféricos são os tampos que possuem a melhor relação entre espessura e pressão suportada, como os cascos esféricos, porém eles ocupam bastante espaço quando comparados com os demais. Sua fabricação pode ser realizada por forjamento ou pela solda de diversas chapas conformadas. (Telles, 1996, p. 11). A figura 9 demonstra um tampo hemisférico.



Fonte: Autoria própria (2022)

### 2.3.2.4 Tampos cônicos

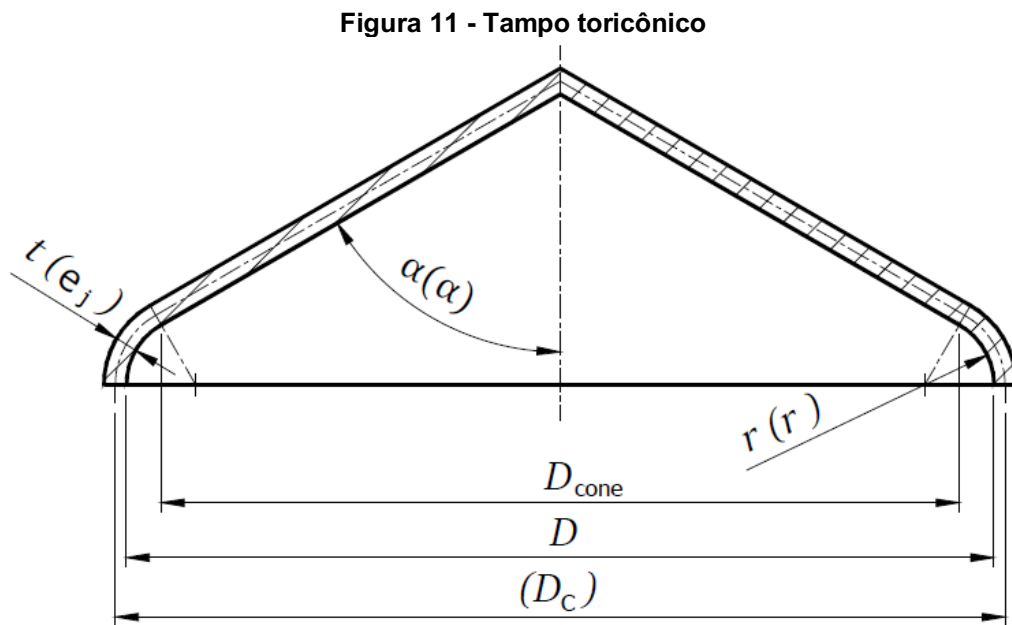
Segundo Telles (1996, p. 11), os tampos cônicos são pouco empregados em vasos, pois eles são os menos resistentes de todos. O autor discorre que, embora sua fácil fabricação, esse tipo de tampo somente é utilizado quando o vaso operar com fluidos viscosos ou quando é necessário o esvaziamento rápido do equipamento. A figura 10 a seguir exemplifica um tampo cônico.



Fonte: Autoria própria (2022)

### 2.3.2.5 Tampos toricônicos

Em alguns casos, existe um toróide na junção do tampo cônico com o casco cilíndrico. Nestes casos, os tampos são denominados toricônicos (Telles, 1996, p. 11). Segundo Falcão (2008, p. 32), os tampos toricônicos possuem uma região de transição tórica entre o cilindro e o cone, e eles são utilizados quando o semi-ângulo de vértice é superior a  $30^\circ$ , conforme a figura 11.



Fonte: Autoria própria (2022)

## 2.4 Soldas em vasos de pressão

A maneira mais fácil e econômica de fabricação de um vaso de pressão é através da conformação e soldagem de chapas de aço, a fim de alcançar o formato desejado. As soldas também realizam um papel importante na fixação de elementos nos cascos e nos tampos dos vasos de pressão (Telles, 1996, p. 136).

A norma ASME Seção VIII Divisão 1 parágrafo UW-35 (ASME, 2021, p. 132) aponta os requisitos mínimos para as soldas que unem as partes dos vasos de pressão; essas soldas necessitam ser de topo com penetração total. O código EN 13445 Parte 3 parágrafo 5.7.2 (EN, 2021, p. 28) também define que os componentes de um vaso de pressão necessitam ser soldados com soldas de topo e com penetração total.

Ambos os códigos de dimensionamento utilizam um fator de penalização da tensão admissível por conta da junta soldada. Este fator é utilizado no dimensionamento e depende do tipo de inspeção que a solda será sujeita. Na norma EN 13445 Parte 3, os coeficientes de eficiência de junta são abordados no parágrafo 5.6 (EN, 2021, p. 28). Os mesmos coeficientes são abordados de forma equivalente no parágrafo UW-12 da norma americana (ASME, 2021, p. 103).

## **2.5 Materiais**

Conforme Falcão (2008, p. 35), a definição básica do material a ser utilizado é realizada pela engenharia de processos, que detém o conhecimento das variáveis e do ambiente de trabalho do equipamento. O autor também comenta que é de responsabilidade do projetista do equipamento a especificação final do material, além da necessidade de dimensionamento do equipamento para uma determinada vida útil, que depende da perda de espessura por corrosão do material.

Aços carbono e aços inoxidáveis são os materiais mais utilizados na indústria de papel e celulose. O aço duplex vem ganhando força nos últimos anos, pois possui propriedades mecânicas melhores e uma tolerância à corrosão maior, podendo ser utilizados em ambientes mais severos e não necessitando de paradas constantes para o reparo de equipamentos (Megaligas, 2018).

### **2.5.1 Aços carbonos**

O aço carbono é o material mais utilizado na fabricação de equipamentos, pois ele possui boa conformabilidade, é de fácil obtenção e possui boa soldabilidade. O aço carbono é altamente suscetível à corrosão, sendo necessário o acréscimo de espessuras previstas para o prolongamento da vida útil do equipamento (Telles, 1996, p. 54).

### **2.5.2 Aços inoxidáveis**

Os aços inoxidáveis possuem elementos de liga que garantem propriedades anticorrosivas, garantindo uma vida útil maior aos equipamentos quando sujeitos a ambientes corrosivos. Estes tipos de aços são comercialmente mais caros que os aços carbono, sendo necessária a avaliação de sua utilização na fabricação de vasos de pressão (Telles, 1996, p. 55).

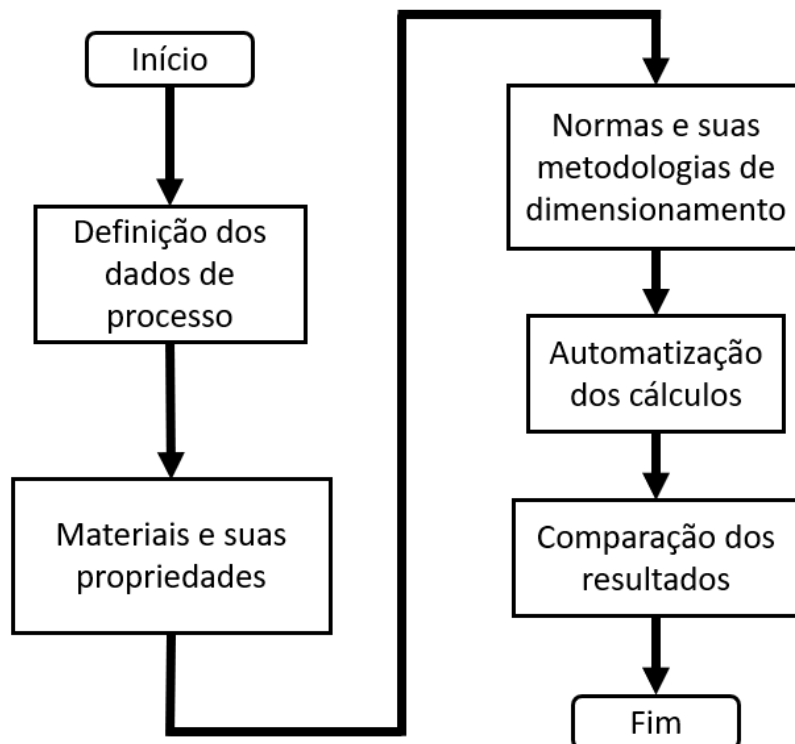
### 2.5.3 Aços ferríticos-austeníticos

Os aços ferríticos-austeníticos, também conhecidos como duplex, são aços que possuem altas resistências à corrosão e elevadas propriedades mecânicas, sendo bastante utilizados em meios altamente corrosivos. A combinação das fases austeníticas e ferríticas na composição do aço garantem as propriedades mencionadas anteriormente (Zucas, 2004).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as metodologias utilizadas no trabalho, bem como os parágrafos que contém as metodologias de dimensionamento das normas ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021) dos componentes de vasos pressurizados. Abaixo encontra-se o fluxograma contendo os tópicos que serão abordados na metodologia.

**Figura 12 - Fluxograma do desenvolvimento metodológico**



Fonte: Autoria própria (2022)

Abaixo encontra-se um quadro com as propriedades dos materiais que serão utilizadas nos cálculos. O método de obtenção desses valores será abordado nos subcapítulos seguintes.

**Quadro 1 - Resumo das propriedades dos materiais**

Propriedades	Aço Carbono		Aço Inoxidável		Aço Duplex	
	SA-516 Gr. 70	1.0473	SA-240 304L	1.4307	SA-240 S32304	1.4362
Massa Específica	7750 kg/m <sup>3</sup>		8030 kg/m <sup>3</sup>		7800 kg/m <sup>3</sup>	
Corrosão	3 mm		0 mm		0 mm	
Tensão Admissível	138 MPa	199 MPa	88 MPa	127 MPa	155 MPa	200 MPa
Módulo de Elasticidade	195 GPa	202,4 GPa	186 GPa	188,9 GPa	190 GPa	190 GPa

Fonte: Autoria própria (2022)



### 3.1 Temperatura de projeto

O parágrafo UG-20(a) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 define a temperatura de projeto como sendo a maior temperatura que o equipamento pode atingir sob as condições de operação (ASME, 2021, p. 16). A norma EN 13445 parte 3 define que a temperatura de projeto deve ser a temperatura utilizada para o dimensionamento de todos os componentes (EN, 2021, p. 11).

O quadro 2 abaixo define a temperatura que será utilizada no presente trabalho.

**Quadro 2 - Temperatura de projeto**

Norma de Dimensionamento	Temperatura de Projeto [°C]
ASME Seção VIII Divisão 1	150
EN 13445 parte 3	150

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.2 Pressão de projeto

Conforme o parágrafo UG-21 da norma ASME Seção VIII Divisão 1, para o dimensionamento de um vaso de pressão, devem ser utilizadas a pressão e temperatura mais severas esperadas para a condição de operação (ASME, 2021, p. 17). A norma EN 13445 parte 3 define que a pressão de projeto deve ser a pressão utilizada para o dimensionamento de todos os componentes (EN, 2021, p. 10).

A pressão que será utilizada está definida no quadro 3 abaixo.

**Quadro 3 - Pressão de projeto**

Norma de Dimensionamento	Pressão Interna de Projeto [MPa]	Pressão Externa de Projeto [MPa]
ASME Seção VIII Divisão 1	0,6	0,1
EN 13445 parte 3	0,6	0,1

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.3 Materiais

Foram escolhidos 3 materiais utilizados nas indústrias de papel e celulose. Abaixo, o quadro 4 apresenta os materiais que serão utilizados no dimensionamento aplicando o código ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021). Os materiais que serão empregados são equivalentes para ambas as normas. As especificações dos materiais usados estão presentes na norma ASME Seção II Parte A (2021), EN 10028 Parte 2 (2017) e EN 10028 Parte 7 (2016).

**Quadro 4 - Materiais utilizados e suas equivalências**

Material	ASME Seção VIII Divisão 1	EN 13445 parte 3
Aço Carbono	SA-516 Gr. 70	1.0473
Aço Inoxidável	SA-240 304L	1.4307
Aço Duplex	SA-240 S32304	1.4362

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.3.1 Massa específica

Serão utilizados no cálculo das massas dos componentes, para ambas as normas, os valores de massa específica fornecidos na tabela PRD da norma ASME Seção II parte D (ASME, 2021, p.1134).

**Quadro 5 - Massa específica dos materiais utilizados**

Material	ASME Seção VIII Divisão 1	EN 13445	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
Aço Carbono	SA-516 Gr. 70	1.0473	7750
Aço Inoxidável	SA-240 304L	1.4307	8030
Aço Duplex	SA-240 S32304	1.4362	7800

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.4 Sobreesspessura de corrosão

Os parágrafos UG-25(a) e (b) da ASME Seção VIII Divisão 1 (ASME, 2021, p. 20) comentam que o usuário da norma deve especificar as tolerâncias de corrosão que serão utilizadas, e que isso pode ser realizado através do aumento da espessura dos componentes dimensionados. O código EN 13445 parte 3 também define a necessidade de uma espessura adicional adequada para cobrir a perda por corrosão durante toda a vida útil do vaso (EN, 2021, p. 15).

Para o dimensionamento dos componentes, será considerado uma sobreesspessura de corrosão conforme o quadro 6 abaixo.

**Quadro 6 - Sobreesspessura de corrosão**

Material	ASME Seção VIII Divisão 1	EN 13445
	Sobreesspessura de Corrosão [mm]	Sobreesspessura de Corrosão [mm]
Aço Carbono	3	3
Aço Inoxidável	0	0
Aço Duplex	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.5 Tensão admissível

A ASME Seção VIII divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021) definem procedimentos para a obtenção da tensão admissível. A seguir será descrita a metodologia de obtenção e os valores das tensões admissíveis que serão utilizados no presente trabalho.

#### 3.5.1 Norma ASME Seção VIII Divisão 1

O parágrafo UG-23(a) da ASME Seção VIII divisão 1 (2021) define que as tensões máximas admissíveis são fornecidas na ASME Seção II parte D subparte 1 (ASME, 2021, p. 17).

A tabela 1A da ASME Seção II Parte D fornece as tensões admissíveis para materiais ferrosos. Conforme o apêndice mandatório 1 da ASME Seção II Parte D (ASME, 2021, p. 1266), a definição dessas tensões é realizada através do critério estabelecido pela tabela 1-100, onde a tensão admissível será o menor valor obtido através dos seguintes critérios:

- Critério 1: dois terços da tensão de escoamento à temperatura ambiente;
- Critério 2: dois terços da tensão de escoamento à temperatura de dimensionamento;
- Critério 3: tensão de resistência à tração à temperatura ambiente dividido por 3,5;
- Critério 4: tensão de resistência à tração à temperatura de dimensionamento dividido por 3,5.

O quadro 7 abaixo apresenta as tensões de escoamento e de resistência à tração utilizados e as tensões admissíveis calculadas para cada material na temperatura de 150°C, conforme os critérios mencionados anteriormente.

**Quadro 7 - Normas ASME Seção VIII Divisão 1 - Definição da tensão admissível para a temperatura de 150 °C**

Material	Critério	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de resistência à tração [MPa]	Tensão definida pelo critério [MPa]	Tensão admissível [MPa]
SA-516 Gr. 70	1	262	-	175	138
	2	232	-	155	
	3	-	483	138	
	4	-	483	138	
SA-240 304L	1	172	-	115	88
	2	132	-	88	
	3	-	483	138	
	4	-	421	120	
SA-240 S32304	1	400	-	267	155
	2	319	-	213	
	3	-	600	171	
	4	-	542	155	

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.5.2 Norma EN 13445 Parte 3

A norma EN 13445 parte 3 define que a tensão nominal de projeto deve ser utilizada nos cálculos dos componentes pressurizados (EN, 2021, p. 11). A seguir, serão descritas as metodologias de obtenção e os valores das tensões admissíveis conforme a norma EN 13445 para cada material utilizado.

#### 3.5.2.1 Material 1.0473

Conforme a tabela 3 da EN 10028 parte 2, o material aço carbono 1.0473 possui um alongamento de ruptura mínimo de 20% (EN, 2017, p. 12). Portanto, esse material pode ser categorizado através do capítulo 6.2 da norma EN 13445 Parte 3, que classifica os materiais de aço carbono, não austeníticos e com alongamento de ruptura mínimo menor que 30% (EN, 2021, p. 32).

Utilizando o capítulo 6.2 da norma, calcula-se a tensão nominal de projeto para as condições normais de operação. O valor da tensão nominal de projeto será o menor valor obtido através dos dois critérios abaixo:

- Critério 1: tensão de prova a 0,2% na temperatura de cálculo dividido pelo fator de segurança de 1,5;
- Critério 2: tensão de resistência à tração na temperatura de 20°C dividido pelo fator de segurança de 2,4.

O quadro 8 apresenta a tensão admissível definida pelos critérios para a temperatura de 150°C.

**Quadro 8 - Norma EN 13445 - Definição da tensão admissível para material 1.0473 para a temperatura de 150°C**

Material	Critério	Tensão de prova a 0,2% [MPa]	Tensão de resistência à tração [MPa]	Tensão definida pelo critério [MPa]	Tensão admissível [MPa]
1.0473	1	299	-	199	199
	2	-	510	213	

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.5.2.2 Material 1.4307

A tabela 9 da EN 10028 parte 7 define que o aço inoxidável 1.4307 possui um alongamento de ruptura mínimo de 45% (EN, 2016, p. 19). Então, pode-se dizer que o material é caracterizado pelo capítulo 6.5 da norma EN 13445 parte 3, que classifica os materiais de aço austenítico e com alongamento de ruptura mínimo maior ou igual a 35% (EN, 2021, p. 33).

Utilizando o capítulo 6.5, pode-se calcular a tensão nominal de projeto para as condições normais de operação. A tensão nominal de projeto será o menor valor obtido através dos dois critérios abaixo:

- Critério 1: tensão de prova a 1% na temperatura de cálculo dividido pelo fator de segurança de 1,2;
- Critério 2: tensão de resistência à tração na temperatura de cálculo dividido pelo fator de segurança de 3,0.

O quadro 9 apresenta, para a temperatura de 150°C, a tensão admissível definida pelos critérios 1 e 2.

**Quadro 9 - Norma EN 13445 - Definição da tensão admissível para material 1.4307 para a temperatura de 150°C**

Material	Critério	Tensão de prova a 1% [MPa]	Tensão de resistência à tração [MPa]	Tensão definida pelo critério [MPa]	Tensão admissível [MPa]
1.4307	1	162	-	135	127
	2	-	380	127	

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.5.2.3 Material 1.4362

Conforme a tabela 10 da EN 10028 parte 7, o material aço duplex 1.4362 possui um alongamento de ruptura mínimo de 20% (EN, 2017, p. 12). Portanto, esse material pode ser categorizado através do capítulo 6.3 da norma EN 13445 Parte 3, que classifica os materiais não fundidos, aços austeníticos não enquadrados nos capítulos 6.4 e 6.5 e com alongamento de ruptura mínimo menor que 30% (EN, 2021, p. 32).

Utilizando o capítulo 6.3, calcula-se a tensão nominal de projeto para as condições normais de operação. A tensão nominal de projeto será o menor valor obtido através dos dois critérios abaixo:

- Critério 1: tensão de prova a 0,2% na temperatura de cálculo dividido pelo fator de segurança de 1,5;
- Critério 2: tensão de resistência à tração na temperatura de 20°C dividido pelo fator de segurança de 1,875.

O quadro 10 expõe a tensão admissível definida pelos critérios para a temperatura de 150°C.

**Quadro 10 - Norma EN 13445 - Definição da tensão admissível para material 1.4362 para a temperatura de 150°C**

Material	Critério	Tensão de prova a 0,2% [MPa]	Tensão de resistência à tração [MPa]	Tensão definida pelo critério [MPa]	Tensão admissível [MPa]
1.4362	1	300	-	200	200
	2	-	577	308	

Fonte: Autoria própria (2022)

## 3.6 Módulo de elasticidade

A ASME Seção VIII divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021) definem procedimentos para o cálculo do módulo de elasticidade. Abaixo, será descrito o método de obtenção do módulo de elasticidade para a temperatura de 150°C.

### 3.6.1 Norma ASME Seção VIII Divisão 1

Para alguns dimensionamentos de componentes de vasos pressurizados, será necessário a utilização do módulo de elasticidade do material.

A tabela TM-1 da norma ASME Seção II parte D, fornece os valores de módulo de elasticidade para os materiais ferrosos (ASME, 2021, p. 6). Esses valores serão utilizados para os cálculos da norma ASME Seção VIII divisão 1.

Conforme a tabela 1 da especificação SA-516 presente na norma ASME Seção II Parte A (ASME, 2019, p. 881), o material SA-516 Gr. 70 possui menos de 0,3% de carbono em sua composição. O material SA-240 304L possui a composição nominal 18Cr–8Ni e, portanto, ele pertence ao grupo G. A composição nominal do aço duplex SA-240 S32304 é 23Cr–4Ni–Mo–Cu–N, por esse motivo ele pertence ao grupo H. Com os grupos definidos, é possível estabelecer o módulo de elasticidade para cada material na temperatura de 150°C, esses valores serão demonstrados no quadro 11 abaixo.

**Quadro 11 - Norma ASME Seção VIII divisão 1 - Definição do módulo de elasticidade para a temperatura de 150°C**

Material	Grupo	Módulo de elasticidade [MPa]
SA-516 Gr. 70	Aço carbono com C ≤ 0.30%	195000
SA-240 304L	Grupo G	186000
SA-240 S32304	Grupo H	190000

**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 3.6.2 Norma EM 13445 Parte 3

A norma europeia usa sistemática de grupo semelhante para determinar o módulo de elasticidade dos materiais. A tabela A-1 presente na norma EN 13445 parte 2 (EN, 2021, p.17) é responsável por categorizar os materiais em grupos, onde são separados por suas composições químicas.

A tabela 1 da norma EN 10028 parte 2 estabelece um limite máximo para os elementos presentes na composição química do aço EN 1.0473. Dessa forma, pode-se enquadrar esse aço carbono no grupo 1 da tabela A-1 da norma EN 13445 Parte 2.

O material 1.4307 é um aço austenítico e, conforme a norma EN 10028 parte 7 (EN, 2017, p. 12), seu teor de Cr não excede o limite de 19% na sua composição, atendendo os requisitos do grupo 8.1.

Para o material 1.4362 (aço austenítico-ferrítico), a norma EN 10028 parte 7 (EN, 2017, p. 14) determina que seu teor de Cr não pode exceder o limite de 24%. Portanto, este material atende os requisitos para pertencer ao grupo 10.1.

Com os grupos determinados, é possível realizar o cálculo do módulo de elasticidade utilizando a expressão abaixo, presente no anexo O da norma EN 13445 parte 3 (EN, 2021, p. 816).

$$Z = c_0 + c_1T + c_2T^2 \quad (1)$$

Consultando a tabela O-2 presente no mesmo anexo (EN, 2021, p. 817), é possível determinar as constantes  $c_0$ ,  $c_1$  e  $c_2$  para o cálculo do módulo de elasticidade para cada material na temperatura de 150°C, esses valores serão demonstrados no quadro 12 abaixo.

**Quadro 12 - Norma EN 13445 - Definição do módulo de elasticidade para a temperatura de 150°C**

Material	Grupo	$c_0$	$c_1$	$c_2$	Módulo de elasticidade [MPa]
1.0473	Grupo 1	213,16	-6.91 E-2	-1,824 E-5	202385
1.4307	Grupo 8.1	201,66	-8.48 E-2	0	188940
1.4362	Grupo 10.1	205,00	-1,00 E-1	0	190000

Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.7 Eficiência de junta

A eficiência de junta soldada é definida através da realização de ensaios não destrutivos nas soldas do vaso pressurizado. Na comparação entre as normas ASME Seção VIII divisão 1 e EN 13445, será utilizada uma eficiência igual à 1,00, pois essa eficiência de junta, para ambas as normas, equivale ao mesmo método de ensaio.

#### 3.7.1 Norma ASME Seção VIII Divisão 1

A tabela UW-12 fornece os valores de eficiência de junta permitidos pela norma ASME Seção VIII divisão 1 (ASME, 2021, p. 103). Para que a eficiência de junta utilizada nos cálculos seja igual à 1,00, é necessário a realização de ensaio de radiografia ou ultrassom por todo o comprimento das soldas feitas no vaso.

#### 3.7.2 Norma EN 13445

Para todos os grupos de materiais cobertos pela norma EN 13445, categorizados na tabela A-1 da EN 13445 parte 2, pode-se utilizar os procedimentos do grupo de teste 1a definidos através das tabelas 6.6.1-1 e 6.6.2-1 da EN 13445



parte 5. Através dessas duas tabelas, é possível definir que a eficiência de junta em soldas longitudinais, soldas realizadas em tampos, costados esféricos e costados cônicos, seja igual a 1,00. Para isso, é necessário a realização do procedimento de radiografia ou ultrassom em todo o comprimento das soldas (EN, 2021, p. 24).

### **3.8 Conformação de tampos**

Durante o processo de fabricação de tampos pressurizados, existe uma perda de espessura devido ao processo de conformação. Como essa perda de espessura é diferente dependendo do fabricante, este trabalho não considerará o aumento da espessura mínima calculada.

### **3.9 Metodologias de dimensionamento**

Utilizando os códigos de dimensionamento ASME seção VIII divisão I (2021) e EN 13445 parte 3 (2021), abordados no referencial teórico, serão dimensionados os tampos hemisféricos, torisféricos, elíptico, cônico e toricônico. Também haverá o dimensionamento dos costados com formatos cilíndrico, esférico e cônico.

Os componentes serão dimensionados conforme os carregamentos de pressão interna ou externa. Os quadros 13 e 14 abaixo, demonstram as metodologias de cálculo para o carregamento de pressão interna para a norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021), respectivamente.

**Quadro 13 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão interna conforme a norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021)**

<b>Componente</b>	<b>Metodologia utilizada</b>
Costado Cilíndrico	Cálculo: parágrafo UG-27(c) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Costado Esférico	Cálculo: parágrafo UG-27(d) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Costado Cônico	Cálculo: parágrafo UG-32(f) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Elíptico	Cálculo: parágrafo UG-32(c) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Torisférico	Cálculo: parágrafo 1-4(d) do mandatório 1 da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Hemisférico	Cálculo: parágrafo UG-32(e) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Cônico	Cálculo: parágrafo UG-32(f) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Toricônico	Cálculo: parágrafo UG-32(g) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Quadro 14 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão interna de projeto conforme a norma EN 13445 Parte 3 (2021)**

<b>Componente</b>	<b>Metodologia utilizada</b>
Costado Cilíndrico	Cálculo: subcapítulo 7.4.2 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Costado Esférico	Cálculo: subcapítulo 7.4.3 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Costado Cônico	Cálculo: subcapítulo 7.6.4 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Tampo Elíptico	Cálculo: subcapítulo 7.5.4 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Tampo Torisférico	Cálculo: subcapítulo 7.5.3 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Tampo Hemisférico	Cálculo: subcapítulo 7.5.2 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Tampo Cônico	Cálculo: subcapítulo 7.6.4 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).
Tampo Toricônico	Cálculo: subcapítulos 7.6.4 e 7.6.7 da norma EN 13445 Parte 3 (2021).

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para o carregamento de pressão externa, serão utilizadas as metodologias das normas ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) e EN 13445 (2021) citadas nos quadros 15 e 16 abaixo, respectivamente.

**Quadro 15 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão externa de projeto conforme a norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021)**

<b>Componente</b>	<b>Metodologia utilizada</b>
Costado Cilíndrico	Cálculo: parágrafo UG-28(c) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Costado Esférico	Cálculo: parágrafo UG-28(d) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Costado Cônico	Cálculo: parágrafo UG-33(f) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Elíptico	Cálculo: parágrafo UG-33(d) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Torisférico	Cálculo: parágrafo UG-33(e) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Hemisférico	Cálculo: parágrafo UG-33(c) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Cônico	Cálculo: parágrafo UG-33(f) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).
Tampo Toricônico	Cálculo: parágrafo UG-33(a)(3) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021).

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Quadro 16 - Metodologias utilizadas para o dimensionamento da espessura mínima requerida devido ao esforço de pressão externa de projeto conforme a norma EN 13445 Parte 3 (2021)**

<b>Componente</b>	<b>Metodologia utilizada</b>
Costado Cilíndrico	Cálculo: subcapítulo 8.5.2 da norma EN 13445 (2021).
Costado Esférico	Cálculo: subcapítulo 8.7.1 da norma EN 13445 (2021).
Costado Cônico	Cálculo: subcapítulo 8.6.3 da norma EN 13445 (2021)
Tampo Elíptico	Cálculo: subcapítulo 8.8.3 da norma EN 13445 (2021).
Tampo Torisférico	Cálculo: subcapítulo 8.8.2 da norma EN 13445 (2021).
Tampo Hemisférico	Cálculo: subcapítulo 8.8.1 da norma EN 13445 (2021).
Tampo Cônico	Cálculo: subcapítulo 8.6.3 da norma EN 13445 (2021).
Tampo Toricônico	Componente não abordado na norma EN 13445 parte 3

**Fonte: Autoria própria (2022)**

### **3.10 Automatização de cálculos**

Serão realizados cálculos a partir de métodos analíticos para os carregamentos de pressão interna e externa mencionados acima. Tendo em vista que a norma não estabelece nenhuma exigência ou proibição do uso de programas de computador que automatizam o processo de análise dos componentes sob o escopo da ASME Seção VIII Divisão 1 (2021, p. XXXV), será realizada uma programação em *Visual Basic for Applications* utilizando o software Excel, com o objetivo de realizar a automatização do processo de cálculo, conforme ambos os códigos de dimensionamento.

Para os cálculos iterativos, será implementado o método da bisseção com a finalidade de encontrar as variáveis desejadas. O método da bisseção é um algoritmo utilizado para encontrar as raízes de funções contínuas em um intervalo; este método não é tão eficaz na rapidez, porém é de fácil implementação e atinge raízes com baixa margem de erro (Ruggiero; Lopes, 1997, p.47).

### **3.11 Comparação dos resultados**

Após a realização dos cálculos de dimensionamento, será efetuada uma comparação quantitativa entre os resultados obtidos, com a finalidade de determinar o código de projeto mais eficiente. A avaliação será executada para os componentes mencionados anteriormente, de maneira a evidenciar qual norma requer menores espessuras e, conseqüentemente, o peso do material utilizado.

## 4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

A seguir serão apresentados, para os esforços de pressão interna e externa, os métodos de cálculo utilizados para a determinação da espessura mínima requerida, as condições que devem ser satisfeitas para a utilização desses métodos, bem como as comparações dos resultados obtidos através das normas ASME Seção VIII divisão 1 e EN 13445 parte 3, para cada componente.

### 4.1 Pressão interna

Será utilizada uma pressão interna de projeto de 0,6MPa e uma temperatura de projeto de 150°C no dimensionamento de todos os componentes, com o objetivo de comparar as normas ASME Seção VIII divisão 1 e EN 13445 parte 3 sob as mesmas condições.

#### 4.1.1 Costado cilíndrico

Utiliza-se as fórmulas (1) e (2) abaixo para o cálculo da massa dos costados cilíndricos. A primeira equação emprega a simbologia utilizada na metodologia de cálculo da ASME Seção VIII divisão 1, enquanto a segunda emprega a simbologia da EN 13445 parte 3.

$$m = \left\{ \left[ \frac{\pi(D_i + 2e)^2}{4} \right] - \left[ \frac{\pi(D_i)^2}{4} \right] \right\} \mu \quad (1)$$

$$m = \{ [\pi(R_i + t)^2] - [\pi(R_i)^2] \} \mu \quad (2)$$

##### 4.1.1.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cilíndricos

Para o cálculo da espessura mínima de um costado cilíndrico submetido a pressão interna, utiliza-se o parágrafo UG-27(c) e fórmulas suplementares presentes no apêndice mandatório 1 da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021). Como não será calculado nenhum vaso de pressão com espessuras que excedam a metade do raio interno do vaso, será utilizada apenas a metodologia do parágrafo UG-27(c).

A espessura mínima requerida  $t$  deve ser o maior valor obtido com as fórmulas (3) e (4) abaixo:

$$t = \frac{PR_i}{Sz - 0,6P} \quad (3)$$

$$t = \frac{PR_i}{2Sz + 0,4P} \quad (4)$$

Onde  $P$  é a pressão interna do projeto,  $R_i$  é o raio interno da virola do costado que está sendo calculado,  $S$  é a tensão admissível e  $z$  é a eficiência de junta.

#### 4.1.1.2 Norma EN 13445 parte 3 costados cilíndricos

A metodologia de cálculo para costados cilíndricos aplica-se apenas para os vasos onde a seguinte condição é satisfeita (EN, 2021, p. 36):

$$\frac{e}{D_e} \leq 0,16 \quad (5)$$

Onde  $e$  é a espessura e  $D_e$  é o diâmetro externo do vaso pressurizado.

O subcapítulo 7.4.2 fornece o método de cálculo para os cálculos cilíndricos. Pode-se utilizar a equação (6) para calcular a espessura mínima requerida  $e$ :

$$e = \frac{P D_i}{2fz - P} \quad (6)$$

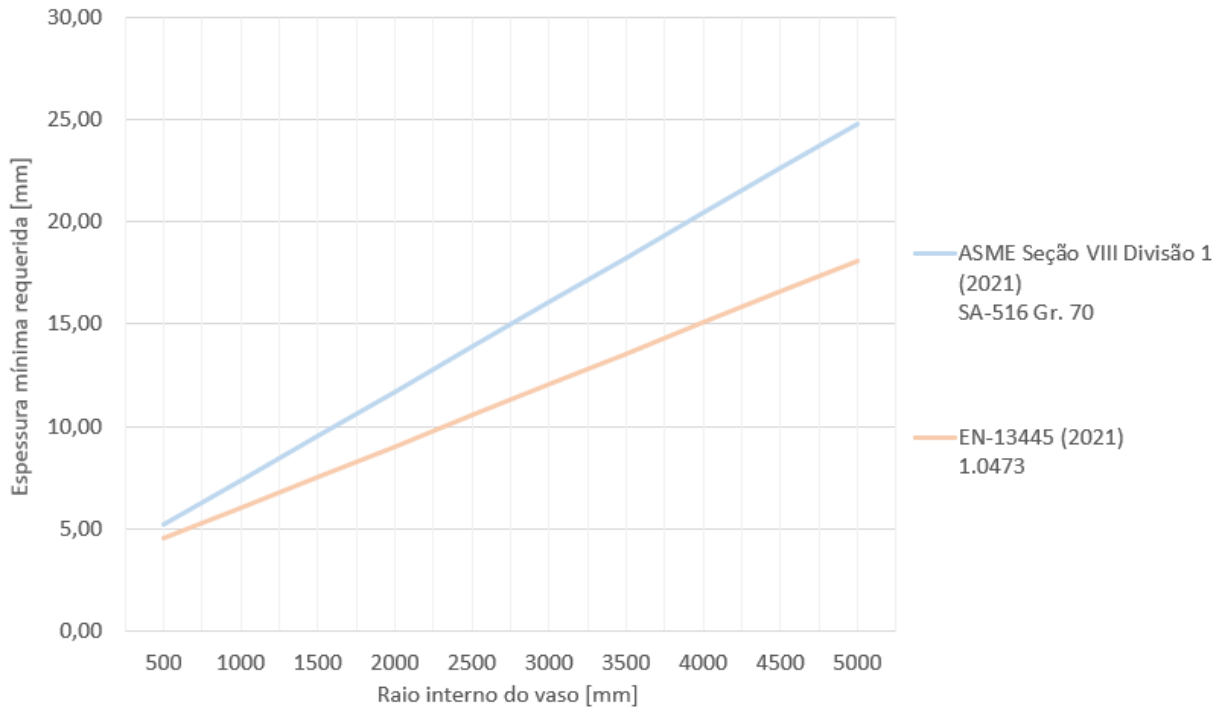
Sendo  $P$  a pressão de projeto,  $D_i$  o diâmetro interno do vaso,  $f$  a tensão admissível e  $z$  o coeficiente de junta.

#### 4.1.1.3 Comparação entre as normas costados cilíndricos

Os gráficos 1, 2 e 3 apresentam os resultados de espessura mínima requerida de costados cilíndricos em função do raio interno e do material do vaso pressurizado.

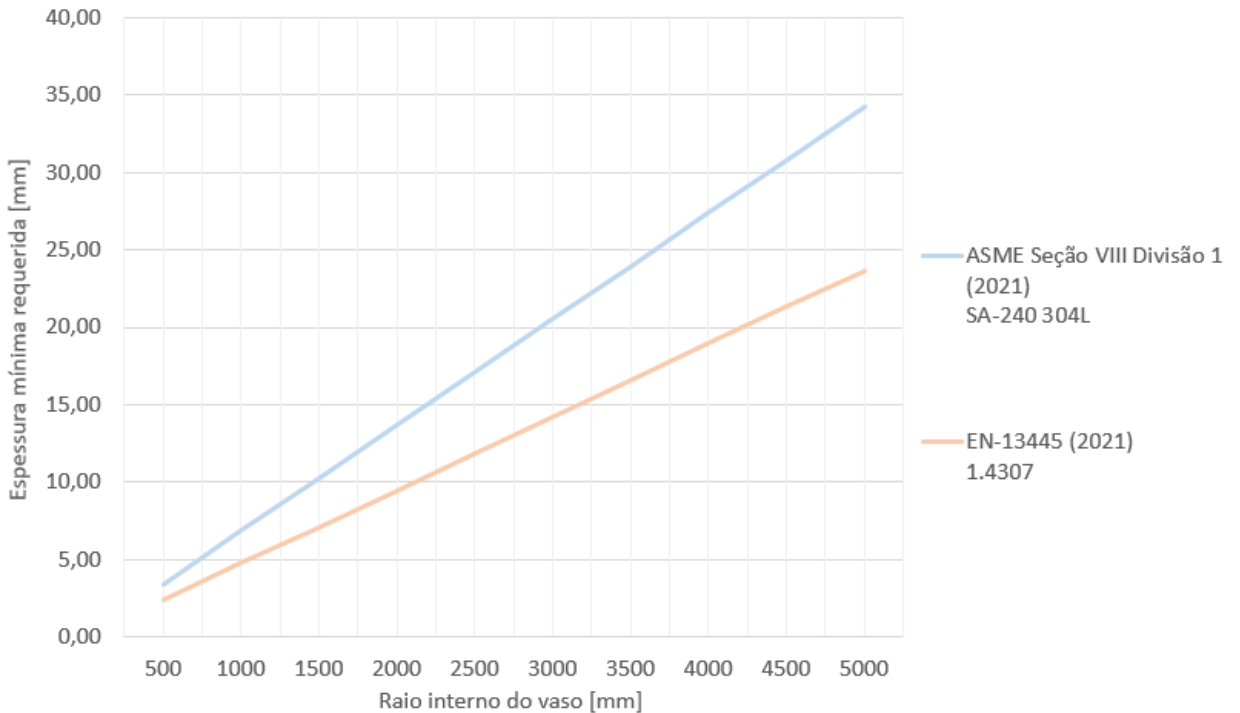


**Gráfico 1 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



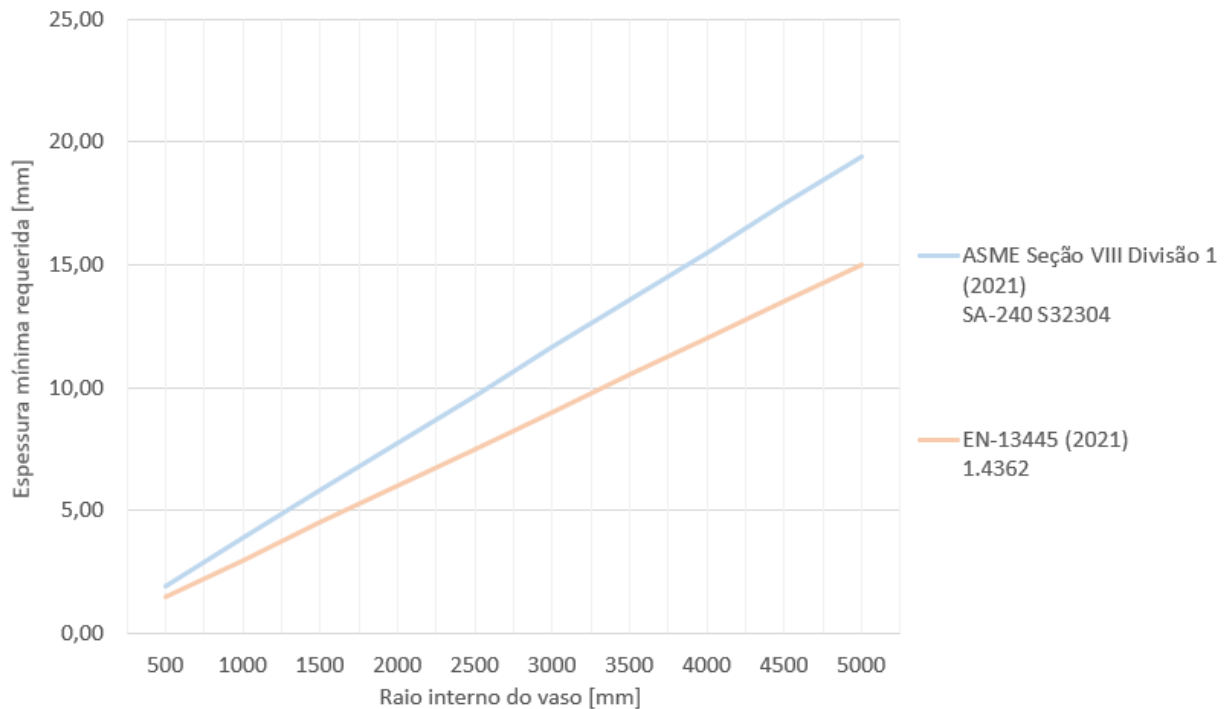
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 2 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 3 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

As tabelas 1, 2 e 3 apresentam as espessuras e a massa dos costados cilíndricos por kg/m.

Através dos gráficos e tabelas, é possível observar que a norma europeia EN 13445 utiliza menos material. Na primeira comparação, a redução de espessura e de massa média para os aços carbono é de aproximadamente 30,2% e 30,3%, respectivamente. A percentagem de redução de espessura e de massa para aços inoxidáveis são de 44,6% e 44,7%, nessa ordem. Para os aços duplex a redução de espessura e de massa foram de e 29,1% e 29,2%, respectivamente.

**Tabela 1 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Raio Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	5,18	4,51	126,76	110,30	14,9%	14,9%
1000	7,36	6,02	359,67	294,01	22,3%	22,3%
1500	9,54	7,53	698,95	551,35	26,7%	26,8%

**Tabela 1 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(conclusão)

Raio Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
2000	11,72	9,04	1144,59	882,32	29,6%	29,7%
2500	13,90	10,55	1696,60	1286,92	31,7%	31,8%
3000	16,08	12,06	2354,97	1765,15	33,3%	33,4%
3500	18,26	13,57	3119,71	2317,01	34,6%	34,6%
4000	20,44	15,08	3990,82	2942,51	35,5%	35,6%
4500	22,62	16,59	4968,29	3641,63	36,3%	36,4%
5000	24,80	18,10	6052,13	4414,39	37,0%	37,1%
MÉDIA	-	-	-	-	30,2%	30,3%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 2 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Raio Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	3,42	2,37	86,65	59,87	44,6%	44,7%
1000	6,85	4,74	346,60	239,50	44,6%	44,7%
1500	10,27	7,10	779,85	538,86	44,6%	44,7%
2000	13,69	9,47	1386,40	957,98	44,6%	44,7%
2500	17,12	11,84	2166,25	1496,85	44,6%	44,7%
3000	20,54	14,21	3119,40	2155,46	44,6%	44,7%
3500	23,96	16,57	4245,85	2933,82	44,6%	44,7%
4000	27,38	18,94	5545,60	3831,93	44,6%	44,7%
4500	30,81	21,31	7018,65	4849,78	44,6%	44,7%
5000	34,23	23,68	8665,00	5987,38	44,6%	44,7%
MÉDIA	-	-	-	-	44,6%	44,7%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 3 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Raio Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,94	1,50	47,63	36,87	29,1%	29,2%
1000	3,88	3,00	190,52	147,47	29,1%	29,2%
1500	5,82	4,51	428,67	331,80	29,1%	29,2%
2000	7,76	6,01	762,09	589,87	29,1%	29,2%
2500	9,70	7,51	1190,76	921,68	29,1%	29,2%
3000	11,64	9,01	1714,70	1327,22	29,1%	29,2%
3500	13,58	10,52	2333,90	1806,49	29,1%	29,2%
4000	15,52	12,02	3048,36	2359,50	29,1%	29,2%
4500	17,46	13,52	3858,07	2986,24	29,1%	29,2%
5000	19,40	15,02	4763,06	3686,72	29,1%	29,2%
MÉDIA	-	-	-	-	29,1%	29,2%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.1.2 Costado esférico

Utiliza-se as fórmulas (7) e (8) abaixo para o cálculo da massa dos costados esféricos. A primeira equação emprega a simbologia utilizada na metodologia de cálculo da ASME Seção VIII divisão 1, enquanto a segunda emprega a simbologia da EN 13445 parte 3.

$$m = \left\{ \left[ \frac{4\pi}{3} \left( \frac{D_i + 2e}{2} \right)^3 \right] - \left[ \frac{4\pi}{3} \left( \frac{D_i}{2} \right)^3 \right] \right\} \mu \quad (7)$$

$$m = \left\{ \left[ \frac{4}{3} \pi (R_i + t)^3 \right] - \left[ \frac{4}{3} \pi (R_i)^3 \right] \right\} \mu \quad (8)$$

##### 4.1.2.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 costados esféricos

Os costados esféricos serão dimensionados conforme o procedimento do parágrafo UG-27(d). Uma condição necessária para a utilização desse método está expressa a seguir:

$$t \leq 0,356R_i \quad (9)$$

Com a condição (9) satisfeita, utiliza-se a fórmula (10) para a o cálculo da espessura mínima requerida  $t$ :

$$t = \frac{PR_i}{2S_z - 0,2P} \quad (10)$$

#### 4.1.2.2 Norma EN 13445 parte 3 costados esféricos

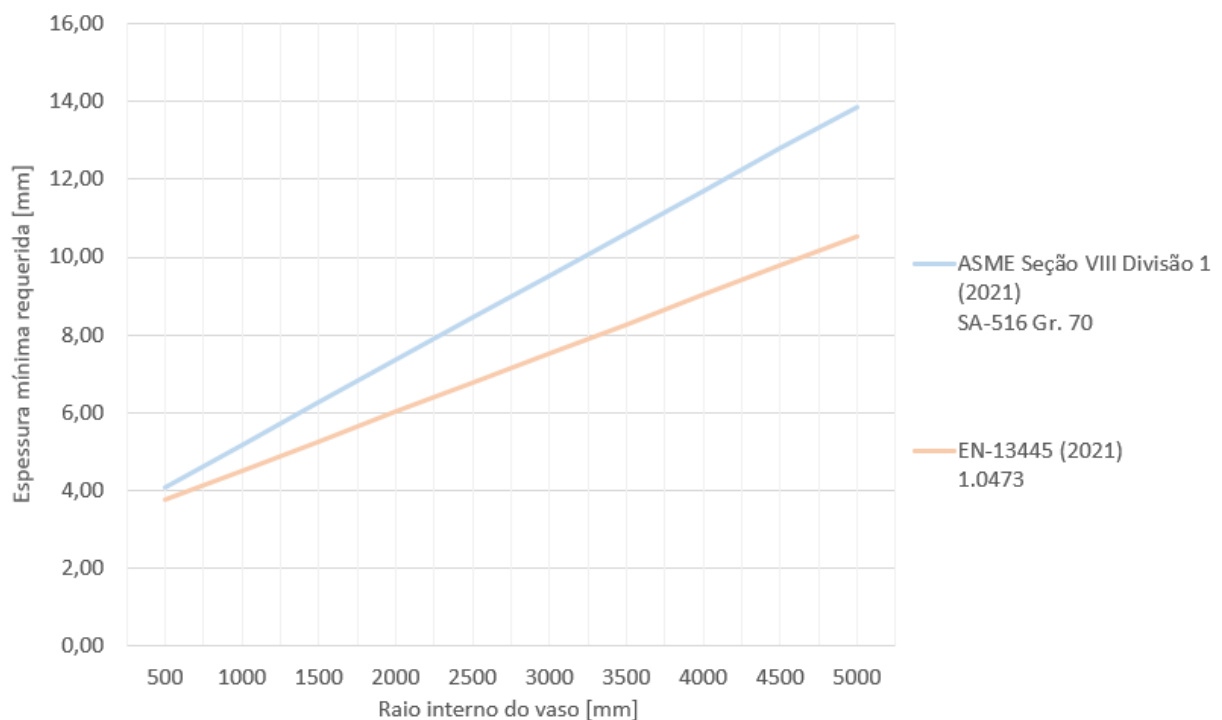
O subcapítulo 7.4.3 fornece o método de cálculo para os costados esféricos. Essa metodologia se aplica apenas para os vasos onde a condição (5) é satisfeita (EN, 2021, p. 36):

$$e = \frac{PD_i}{4f_z - P} \quad (11)$$

#### 4.1.2.3 Comparação entre as normas costados esféricos

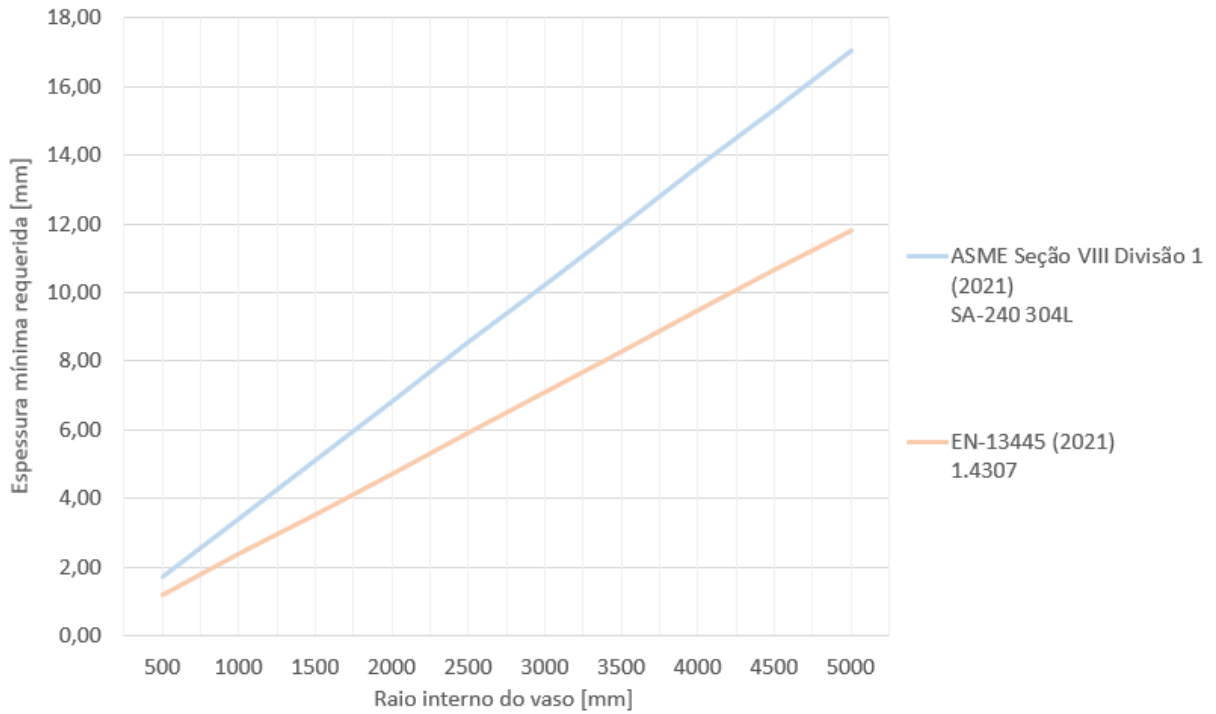
Os resultados de espessura mínima calculada requerida de costados esféricos para aço carbono, aço inoxidável e aço duplex, estão apresentados nos gráficos 4, 5 e 6 respectivamente.

**Gráfico 4 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



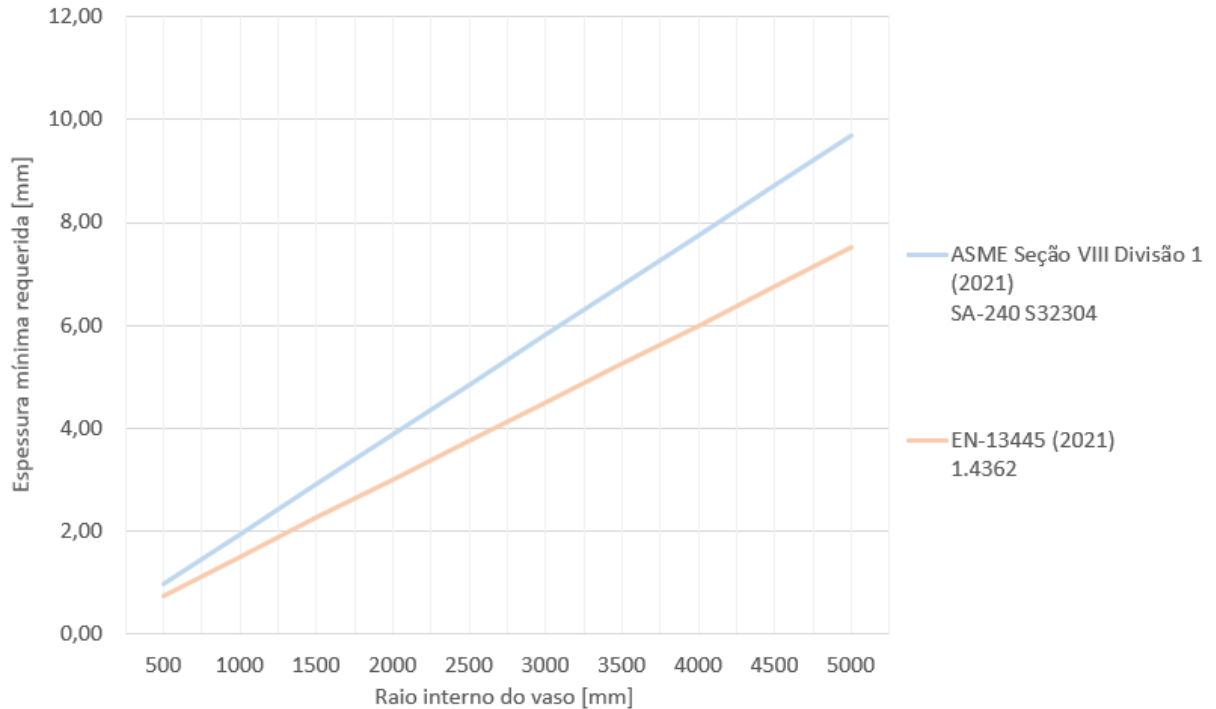
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 5 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 6 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

É possível observar por meio dos gráficos acima que, para os três materiais, a norma EN 13445 requer uma espessura mínima menor do que a ASME Seção VIII divisão 1.

As tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados obtidos de espessuras mínimas e a massa dos costados esféricos.

Para os aços carbonos, as reduções de espessura e massa foram de 23,6% e 23,7%, respectivamente. A redução para os aços inox foi de 44,2% e para os aços duplex foram 29%.

**Tabela 4 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Raio Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,09	3,75	100,33	92,10	8,9%	8,9%
1000	5,17	4,51	506,59	441,08	14,8%	14,9%
1500	6,26	5,26	1377,97	1157,31	19,0%	19,1%
2000	7,35	6,02	2873,67	2351,16	22,1%	22,2%
2500	8,44	6,77	5152,90	4132,99	24,6%	24,7%
3000	9,52	7,53	8374,87	6613,16	26,6%	26,6%
3500	10,61	8,28	12698,76	9902,03	28,2%	28,2%
4000	11,70	9,03	18283,78	14109,96	29,5%	29,6%
4500	12,79	9,79	25289,14	19347,33	30,6%	30,7%
5000	13,87	10,54	33874,04	25724,48	31,6%	31,7%
MÉDIA	-	-	-	-	23,6%	23,7%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 5 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Raio Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,71	1,18	43,18	29,90	44,2%	44,4%
1000	3,41	2,36	345,41	239,21	44,2%	44,4%
1500	5,12	3,55	1165,77	807,34	44,2%	44,4%
2000	6,82	4,73	2763,32	1913,70	44,2%	44,4%
2500	8,53	5,91	5397,11	3737,69	44,2%	44,4%

**Tabela 5 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
<b>Raio Interno do Vaso [mm]</b>	<b>ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L</b>	<b>EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307</b>	<b>ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]</b>	<b>EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]</b>	<b>Diferença Espessura [%]</b>	<b>Diferença Massa [%]</b>
3000	10,23	7,09	9326,20	6458,72	44,2%	44,4%
3500	11,94	8,28	14809,66	10256,21	44,2%	44,4%
4000	13,65	9,46	22106,55	15309,57	44,2%	44,4%
4500	15,35	10,64	31475,92	21798,19	44,2%	44,4%
5000	17,06	11,82	43176,85	29901,50	44,2%	44,4%
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	-	44,2%	44,4%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 6 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>Raio Interno do Vaso [mm]</b>	<b>ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304</b>	<b>EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362</b>	<b>ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]</b>	<b>EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]</b>	<b>Diferença Espessura [%]</b>	<b>Diferença Massa [%]</b>
500	0,97	0,75	23,77	18,42	29,0%	29,0%
1000	1,94	1,50	190,15	147,36	29,0%	29,0%
1500	2,90	2,25	641,77	497,33	29,0%	29,0%
2000	3,87	3,00	1521,22	1178,86	29,0%	29,0%
2500	4,84	3,75	2971,14	2302,47	29,0%	29,0%
3000	5,81	4,50	5134,13	3978,66	29,0%	29,0%
3500	6,78	5,25	8152,80	6317,97	29,0%	29,0%
4000	7,74	6,00	12169,78	9430,90	29,0%	29,0%
4500	8,71	6,76	17327,68	13427,99	29,0%	29,0%
5000	9,68	7,51	23769,10	18419,73	29,0%	29,0%
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	-	29,0%	29,0%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.1.3 Costado cônico

Na comparação será utilizado, para ambas as normas, o ângulo  $\alpha$  igual a 30°. O ângulo  $\alpha$  do costado cônico está representado na figura 6.



Para o cálculo das massas dos costados cônicos com ângulo  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ , foi utilizada a metodologia presente na tabela 2.10 do livro Manual de Projeto de Vasos de Pressão (Moss, Denis R., p. 103).

$$m = A_c t \mu \quad (12)$$

Onde a área do cone  $A_c$  é calculada pelas expressões (13) e (14). A equação (13) emprega a simbologia utilizada na metodologia de cálculo da ASME Seção VIII divisão 1, enquanto que a equação (14) emprega a simbologia da EN 13445 parte 3.

$$A_c = 1,57[(D_l - 2t)^2 - (D_s - 2t)^2] \quad (13)$$

$$A_c = 1,57[(R_{max} - e)^2 - (R_{min} - e)^2] \quad (14)$$

#### 4.1.3.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cônicos

O método utilizado no dimensionamento dos costados cônicos está presente no parágrafo UG-32(f) da ASME Seção VIII divisão 1. Para a utilização deste método, o ângulo  $\alpha$  não pode ser maior que  $30^\circ$  (ASME, 2021, p. 31). Com essa condição satisfeita, utiliza-se a equação (15) para o cálculo da espessura mínima requerida.

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (Sz - 0,6P)} \quad (15)$$

Onde  $D$  é o diâmetro interno no ponto considerado para o dimensionamento.

#### 4.1.3.2 Norma EN 13445 parte 3 costados cônicos

Os costados cônicos são dimensionados conforme o subcapítulo 7.6.4 da norma EN 13445. Será utilizada a expressão (16) para o cálculo da espessura mínima requerida  $e_{con}$ .

$$e_{con} = \frac{PD_i}{2fz - P} \frac{1}{\cos(\alpha)} \quad (16)$$

Onde  $D_i$  é o diâmetro interno no ponto considerado para o dimensionamento.

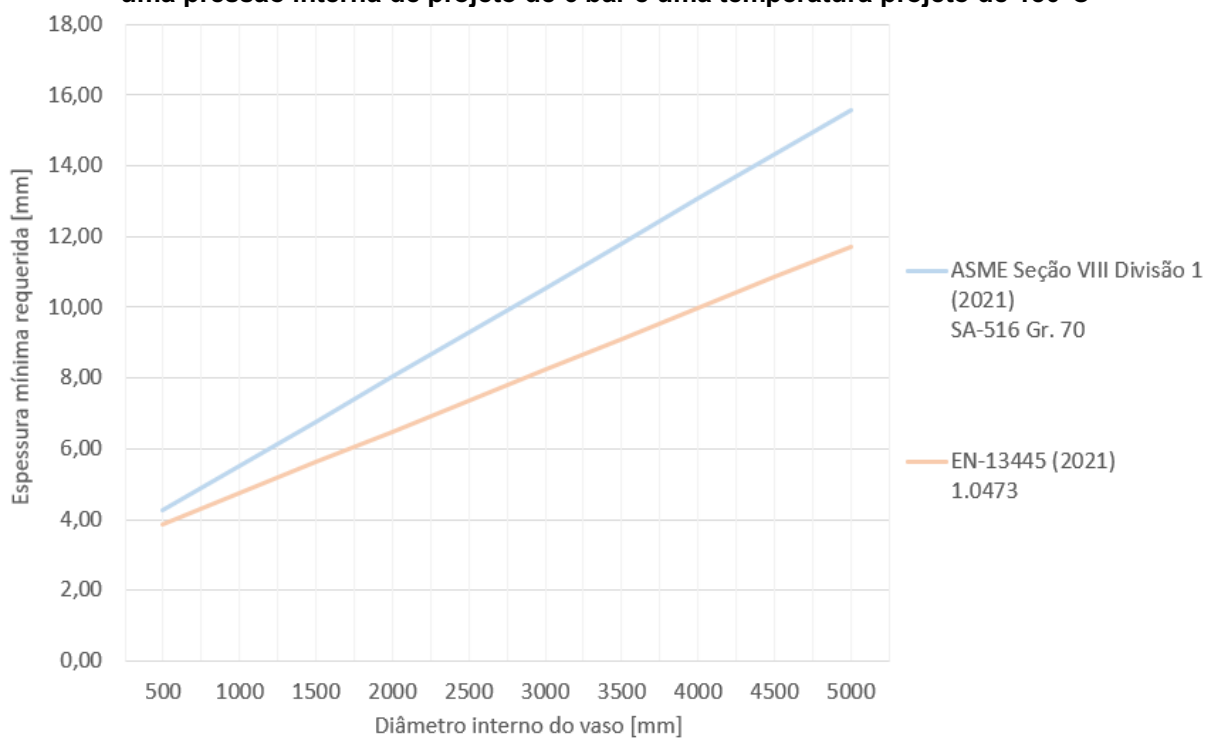
A equação (16) pode ser utilizada se o ângulo alfa não ultrapassar o valor de  $75^\circ$  e se a condição (17) for satisfeita.

$$\frac{e_a \cos(\alpha)}{D_c} > 0,001 \quad (17)$$

#### 4.1.3.3 Comparação entre as normas costados cônicos

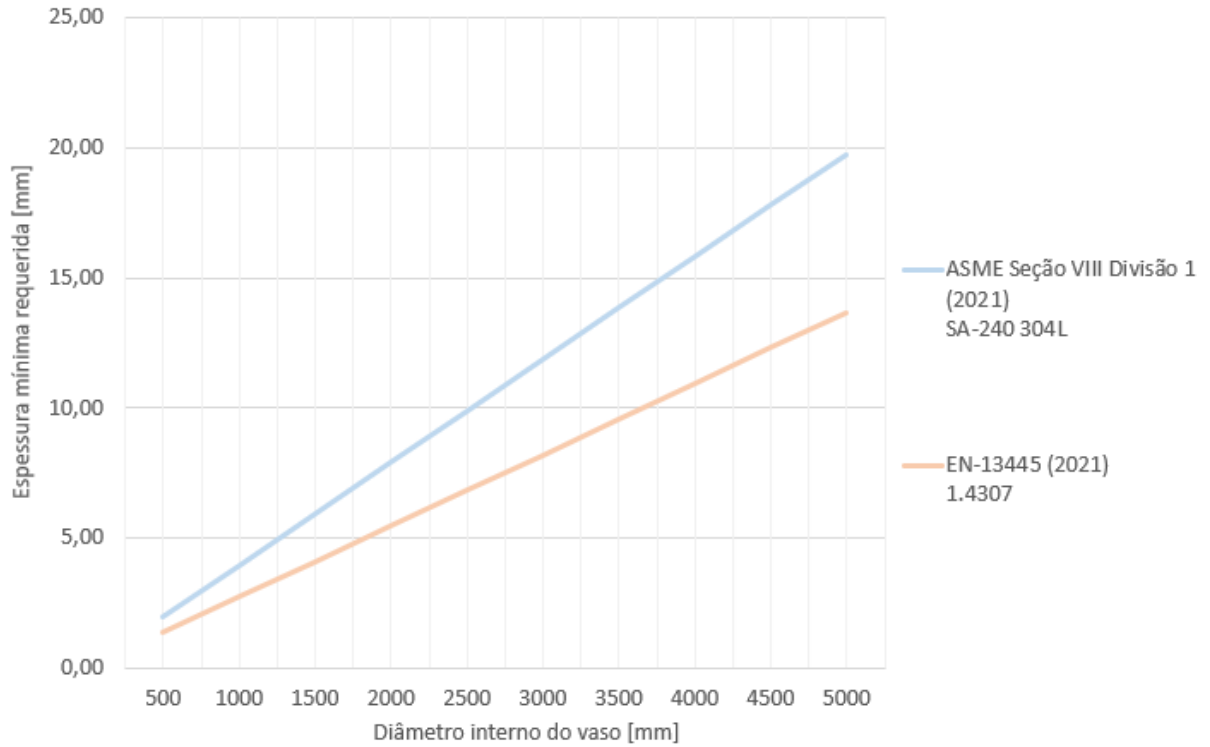
Os resultados de espessura mínima calculada requerida de costados cônicos estão apresentados nos Gráficos 7, 8 e 9 abaixo.

**Gráfico 7 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



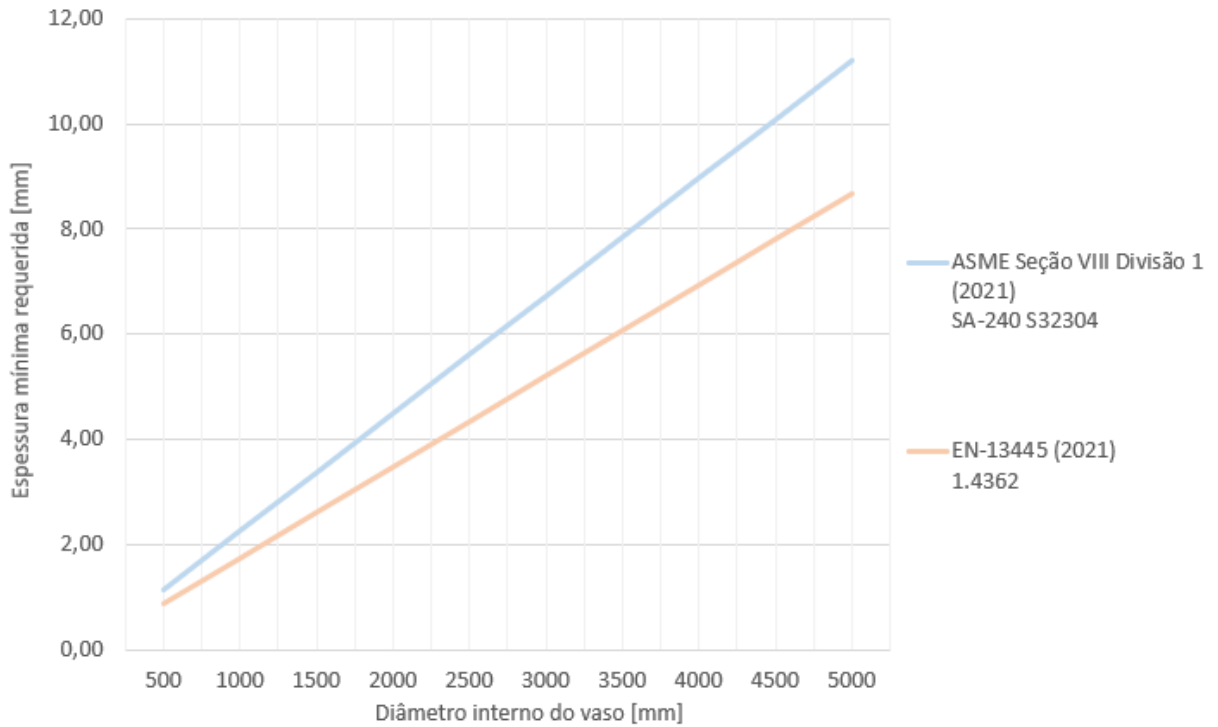
**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Gráfico 8 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 9 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

É possível observar por meio dos gráficos acima que, para os três materiais, a norma ASME Seção VIII divisão 1 requer uma espessura mínima maior do que a EN 13445 parte 3.

As reduções médias de espessura e massa para os aços carbono, aços inox e aços duplex foram de 25,1%, 44,6% e 29,1%, respectivamente. As tabelas 7, 8 e 9 apresentam os dados de espessuras mínimas e a massa dos costados esféricos.

**Tabela 7 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,26	3,87	42,56	38,69	10,0%	10,0%
1000	5,52	4,74	132,64	114,05	16,3%	16,3%
1500	6,78	5,62	258,09	213,90	20,7%	20,7%
2000	8,03	6,49	418,90	338,24	23,8%	23,8%
2500	9,29	7,36	615,06	487,08	26,3%	26,3%
3000	10,55	8,23	846,59	660,41	28,2%	28,2%
3500	11,81	9,10	1113,48	858,24	29,7%	29,7%
4000	13,07	9,97	1415,73	1080,56	31,0%	31,0%
4500	14,33	10,85	1753,34	1327,37	32,1%	32,1%
5000	15,58	11,72	2126,31	1598,68	33,0%	33,0%
MÉDIA	-	-	-	-	25,1%	25,1%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 8 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,98	1,37	20,46	14,16	44,6%	44,6%
1000	3,95	2,73	98,47	68,11	44,6%	44,6%
1500	5,93	4,10	234,02	161,87	44,6%	44,6%
2000	7,91	5,47	427,10	295,43	44,6%	44,6%
2500	9,88	6,84	677,73	468,79	44,6%	44,6%
3000	11,86	8,20	985,90	681,96	44,6%	44,6%
3500	13,83	9,57	1351,60	934,92	44,6%	44,6%
4000	15,81	10,94	1774,85	1227,69	44,6%	44,6%

**Tabela 8 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
4500	17,79	12,30	2255,64	1560,25	44,6%	44,6%
5000	19,76	13,67	2793,97	1932,62	44,6%	44,6%
MÉDIA	-	-	-	-	44,6%	44,6%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 9 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,12	0,87	11,27	8,72	29,1%	29,1%
1000	2,24	1,73	54,21	41,98	29,1%	29,1%
1500	3,36	2,60	128,83	99,76	29,1%	29,1%
2000	4,48	3,47	235,12	182,07	29,1%	29,1%
2500	5,60	4,34	373,09	288,91	29,1%	29,1%
3000	6,72	5,20	542,74	420,28	29,1%	29,1%
3500	7,84	6,07	744,06	576,17	29,1%	29,1%
4000	8,96	6,94	977,06	756,60	29,1%	29,1%
4500	10,08	7,81	1241,74	961,55	29,1%	29,1%
5000	11,20	8,67	1538,09	1191,04	29,1%	29,1%
MÉDIA	-	-	-	-	29,1%	29,1%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.1.4 Tampo hemisférico

A metodologia de cálculo de tampos hemisféricos, segundo a norma ASME Seção VIII divisão 1, está descrita no parágrafo UG-32(e). As condições e o método de cálculo são iguais aos de costados esféricos, porém o cálculo, ao invés de considerar o raio interno do vaso  $R_i$ , considera o raio esférico interno do tampo  $L$ .

A norma EN 13445 também considera que os tampos hemisféricos devem ser dimensionados conforme a metodologia dos costados esféricos (EN, 2021, p. 38).

Visto que a metodologia de dimensionamento é a mesma dos costados esféricos para ambas as normas, a comparação entre elas está exposta no capítulo 4.1.2.3 deste trabalho.

#### 4.1.5 Tampo torisférico

Será dimensionado o tampo torisférico denominado ASME 10%. Os valores dos raios de rebordeamento  $r$  e raio de coroa  $L$  são dependentes do diâmetro interno do vaso  $D$ , onde o raio de coroa é igual ao diâmetro interno. A expressão (18) calcula o raio de rebordeamento.

$$r = 0,1L \quad (18)$$

Para o cálculo das massas dos tampos torisféricos, foi utilizada a metodologia presente na tabela 2.10 do livro Manual de Projeto de Vasos de Pressão (Moss, Denis R., p. 103). As equações (19) e (20) empregam a simbologia utilizada nos métodos de cálculo da ASME Seção VIII divisão 1 e a simbologia da EN 13445 parte 3, respectivamente.

$$m = A_{TT} t \mu \quad (19)$$

$$m = A_{TT} e \mu \quad (20)$$

A tabela 10 expõe as áreas dos tampos torisféricos  $A_{TT}$ , obtidas através do software AutoCAD.

**Tabela 10 - Área de tampos torisféricos ASME 10% obtida através do AutoCAD**

<b>Diâmetro Interno do Vaso [mm]</b>	<b>Raio da Coroa [mm]</b>	<b>Raio de rebordeamento [mm]</b>	<b>Area do tampo torisférico ASME 10% [mm<sup>2</sup>]</b>
500	500	50	247496,77
1000	1000	100	989987,10
1500	1500	150	2227470,98
2000	2000	200	3959948,41
2500	2500	250	6187419,39
3000	3000	300	8909883,93
3500	3500	350	12127342,02
4000	4000	400	15839793,65
4500	4500	450	20047238,84
5000	5000	500	24749677,58

**Fonte: Autoria própria (2022)**

#### 4.1.5.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos torisféricos

Para o cálculo de um tampo torisférico ASME 10%, é necessário a utilização da formulação presente no parágrafo 1-4(d) do apêndice mandatório 1 da ASME Seção VIII divisão 1. Utiliza-se a equação (21) para o cálculo da espessura mínima requerida:

$$t = \frac{PLM}{2S_z - 0,2P} \quad (21)$$

Onde o fator  $M$  é calculado pela seguinte expressão:

$$M = \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right) \quad (22)$$

#### 4.1.5.2 Norma EN 13445 parte 3 tampos torisféricos

Existem seis condições necessárias para a realização do dimensionamento de um tampo torisférico através da norma europeia; elas estão expressas a seguir:

$$r \leq 0,2D_i \quad (23)$$

$$r \geq 0,06D_i \quad (24)$$

$$r \geq 2e \quad (25)$$

$$e \leq 0,08D_e \quad (26)$$

$$e_a \geq 0,001D_e \quad (27)$$

$$L \leq D_e \quad (28)$$

Com as seis condições anteriores satisfeitas, pode-se utilizar a metodologia do capítulo 7.5.3.2 da norma EN 13445. A espessura requerida do tampo torisférico deve ser o maior valor dentre  $e_s$ ,  $e_y$  e  $e_b$  obtido através das equações (29), (30) e (31), respectivamente:

$$e_s = \frac{PL}{2fz - 0,5P} \quad (29)$$

$$e_y = \frac{\beta P(0,75L + 0,2D_i)}{f} \quad (30)$$

$$e_b = (0,75L + 0,2D_i) \left[ \frac{P}{111f_b} \left( \frac{D_i}{r} \right)^{0,825} \right]^{\left( \frac{1}{1,5} \right)} \quad (31)$$

Onde  $e_s$  é a espessura mínima requerida devido a tensão de membrana no centro do tampo,  $e_y$  é espessura mínima requerida para evitar o escoamento axissimétrico na região do raio de rebordeamento,  $e_b$  é a espessura mínima requerida no raio de rebordeamento para prevenir o colapso plástico e  $\beta$  é o fator determinado na figura 7.5-1 da norma EN 13445 parte 3.

A tensão de projeto para a flambagem  $f_b$  pode ser calculada utilizando a seguinte fórmula:

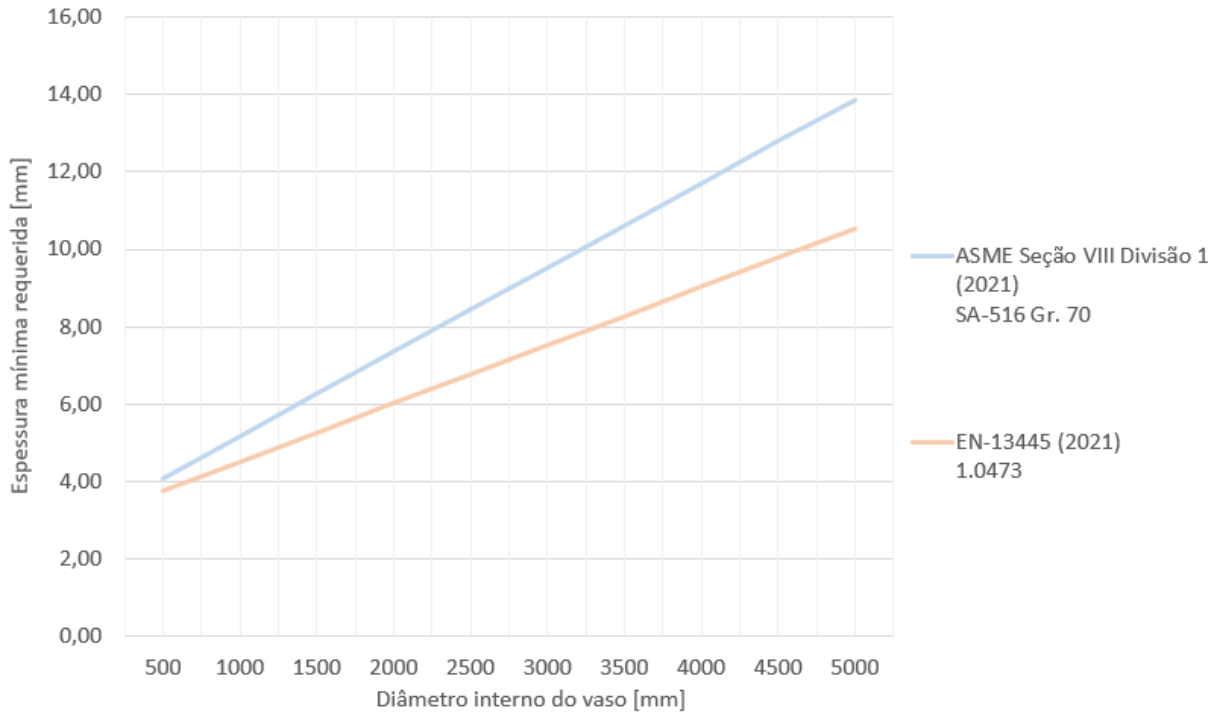
$$f_b = \frac{R_{p0,2/T}}{1,5} \quad (32)$$

#### 4.1.5.3 Comparação entre as normas tampos torisféricos

Os gráficos 11, 12 e 13 abaixo, apresentam os resultados de espessura mínima requerida de tampos torisféricos em função do diâmetro interno do vaso de pressão.

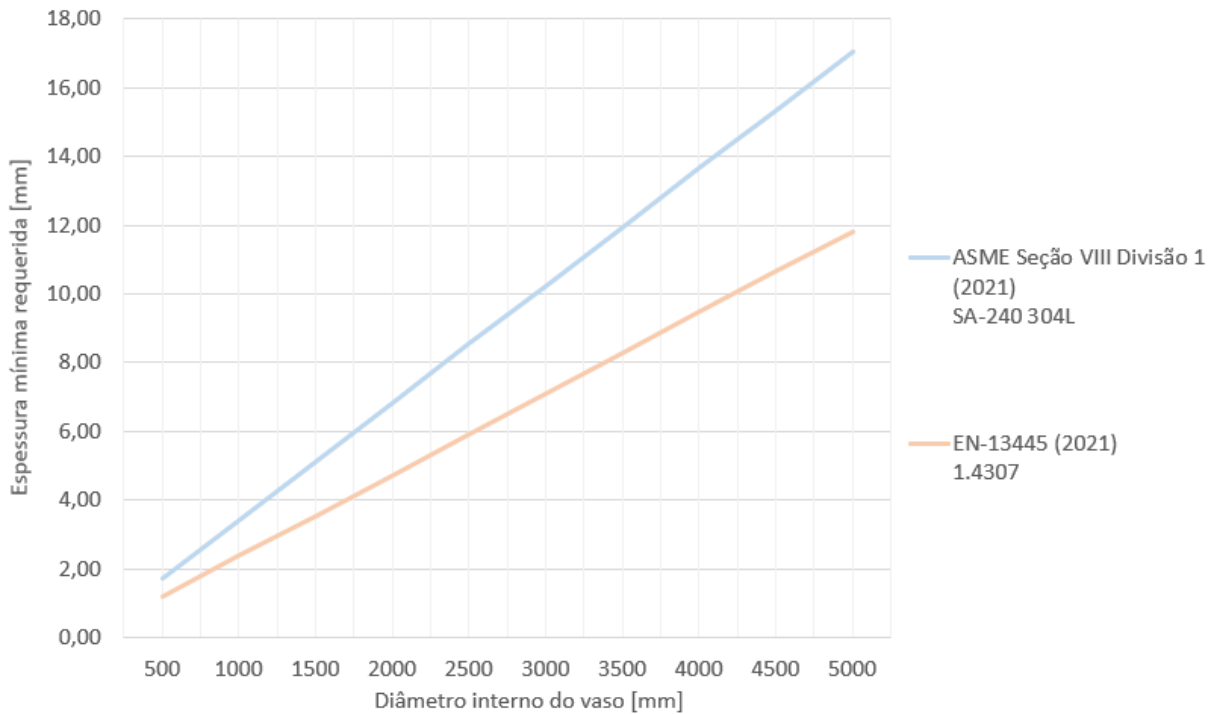


**Gráfico 10 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



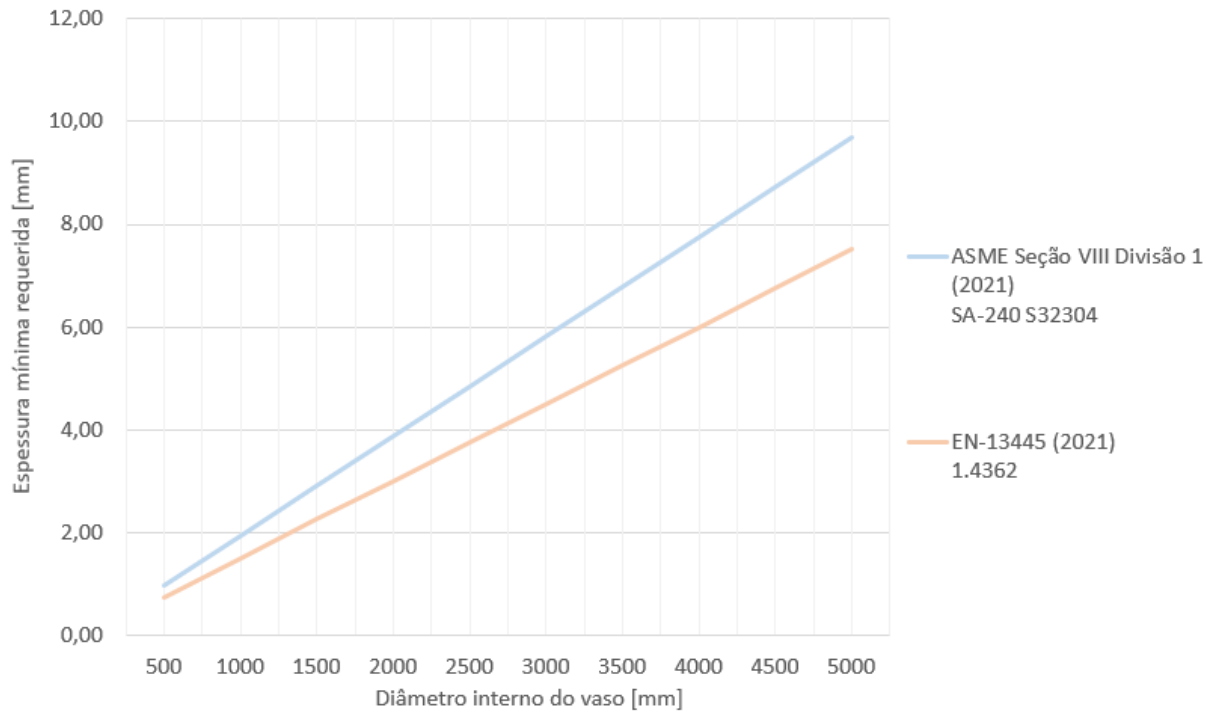
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 11 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 12 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

Através das tabelas 11, 12 e 13, é possível concluir que tampos torisféricos dimensionados em conformidade com o código ASME Seção VIII divisão 1 necessitam de espessuras maiores que a norma EN 13445 parte 3. O código ASME teve um aumento médio de espessura e massa de 23,6%, 44,2% e 29% para os materiais aço carbono, inoxidável e duplex, respectivamente.

**Tabela 11 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,09	3,75	7,84	7,20	8,9%	8,9%
1000	5,17	4,51	39,70	34,59	14,8%	14,8%
1500	6,26	5,26	108,11	90,85	19,0%	19,0%
2000	7,35	6,02	225,56	184,67	22,1%	22,1%
2500	8,44	6,77	404,58	324,72	24,6%	24,6%

**Tabela 11 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

**(conclusão)**

<b>Diâmetro Interno do Vaso [mm]</b>	<b>ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70</b>	<b>EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473</b>	<b>ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]</b>	<b>EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]</b>	<b>Diferença Espessura [%]</b>	<b>Diferença Massa [%]</b>
3000	9,52	7,53	657,69	519,68	26,6%	26,6%
3500	10,61	8,28	997,39	778,25	28,2%	28,2%
4000	11,70	9,03	1436,20	1109,09	29,5%	29,5%
4500	12,79	9,79	1986,65	1520,88	30,6%	30,6%
5000	13,87	10,54	2661,23	2022,32	31,6%	31,6%
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	-	<b>23,6%</b>	<b>23,6%</b>

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 12 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>Diâmetro Interno do Vaso [mm]</b>	<b>ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L</b>	<b>EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307</b>	<b>ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]</b>	<b>EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]</b>	<b>Diferença Espessura [%]</b>	<b>Diferença Massa [%]</b>
500	1,71	1,18	3,27	2,27	44,2%	44,2%
1000	3,41	2,36	26,17	18,15	44,2%	44,2%
1500	5,12	3,55	88,34	61,24	44,2%	44,2%
2000	6,82	4,73	209,39	145,16	44,2%	44,2%
2500	8,53	5,91	408,96	283,52	44,2%	44,2%
3000	10,23	7,09	706,69	489,92	44,2%	44,2%
3500	11,94	8,28	1122,20	777,98	44,2%	44,2%
4000	13,65	9,46	1675,12	1161,29	44,2%	44,2%
4500	15,35	10,64	2385,08	1653,48	44,2%	44,2%
5000	17,06	11,82	3271,72	2268,15	44,2%	44,2%
<b>MÉDIA</b>	-	-	-	-	<b>44,2%</b>	<b>44,2%</b>

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 13 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	0,97	0,75	1,86	1,44	29,0%	29,0%
1000	1,94	1,50	14,86	11,52	29,0%	29,0%
1500	2,90	2,25	50,14	38,87	29,0%	29,0%
2000	3,87	3,00	118,84	92,14	29,0%	29,0%
2500	4,84	3,75	232,12	179,96	29,0%	29,0%
3000	5,81	4,50	401,10	310,97	29,0%	29,0%
3500	6,78	5,25	636,93	493,80	29,0%	29,0%
4000	7,74	6,00	950,76	737,10	29,0%	29,0%
4500	8,71	6,76	1353,71	1049,51	29,0%	29,0%
5000	9,68	7,51	1856,94	1439,65	29,0%	29,0%
MÉDIA	-	-	-	-	29,0%	29,0%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.1.6 Tampo elíptico

Para realizar a comparação entre as normas, será feita uma padronização das dimensões dos tampos. A seguir, serão calculados os tampos elípticos denominados ASME 2:1; a norma ASME Seção VIII Divisão 1 fornece aproximações para o raio de rebordamento  $r$  e o raio esférico  $L$  (ASME, 2021, p. 30). Essas aproximações estão expostas nas equações (33) e (34) abaixo:

$$L = 0,9D \quad (33)$$

$$r = 0,17D \quad (34)$$

Para o cálculo das massas dos tampos elípticos ASME 2:1, foi utilizada a metodologia presente na tabela 2.10 do livro Manual de Projeto de Vasos de Pressão (Moss, Denis R., p. 103). As equações (35) e (36) empregam a simbologia utilizada nos métodos de cálculo da ASME Seção VIII divisão 1 e a simbologia da EN 13445 parte 3, respectivamente.

$$m = 1,084(D + t)^2\mu \quad (35)$$

$$m = 1,084(D_i + e)^2\mu \quad (36)$$

#### 4.1.6.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos elípticos

A espessura mínima requerida dos tampos elípticos é calculada através da equação (37)

$$t = \frac{PD}{2S_z - 0,2P} \quad (37)$$

A equação acima só pode ser utilizada se a condição (38) for satisfeita.

$$\frac{t_s}{L} \geq 0,002 \quad (38)$$

#### 4.1.6.2 Norma EN 13445 parte 3 tampos elípticos

Um tampo elíptico pode ser dimensionado pela norma EN 13445 se a condição (39) abaixo for cumprida:

$$1,7 < K < 2,2 \quad (39)$$

onde  $K$  é calculado com a seguinte expressão:

$$K = \frac{D_i}{(2h_i)} \quad (39)$$

Se a condição (39) for satisfeita, utiliza-se o capítulo 7.5.4 da norma EN 13445 para o dimensionamento de tampos elípticos. O método de dimensionamento é o mesmo dos tampos torisféricos, porém o raio de rebordeamento  $r$  e o raio de coroa  $L$ , são calculados através das expressões (40) e (41) respectivamente.

$$r = D_i \left( \left( \frac{0,5}{K} \right) - 0,08 \right) \quad (40)$$

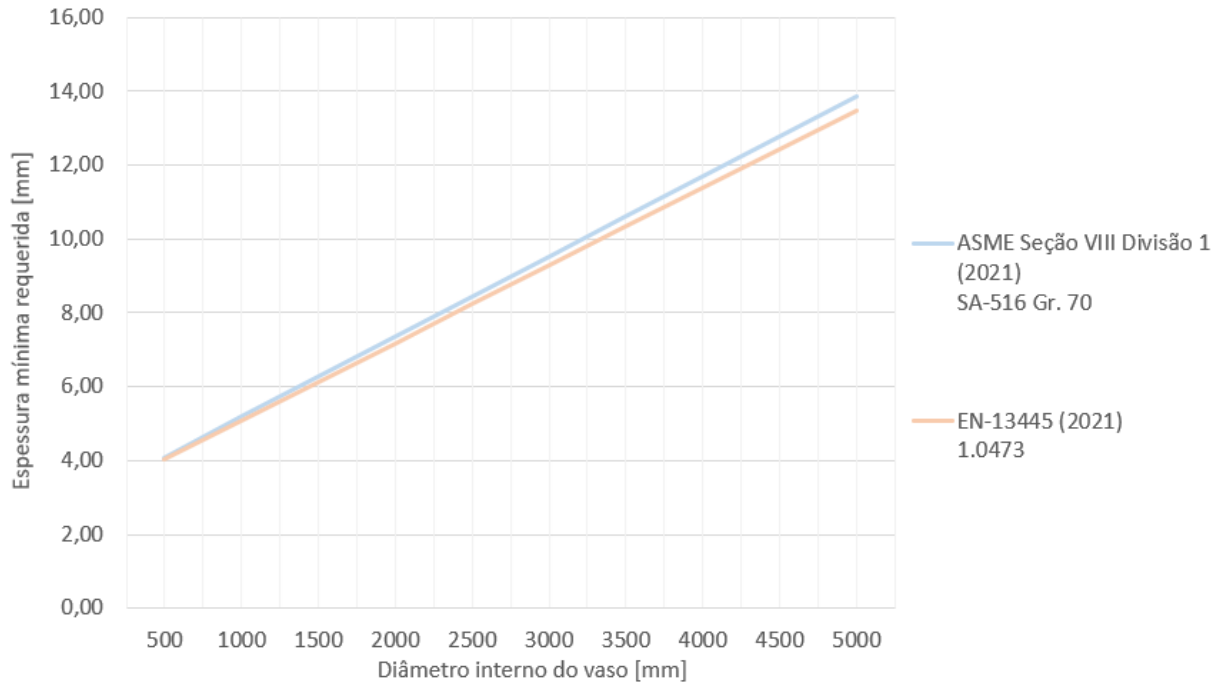
$$L = D_i(0,44K + 0,02) \quad (41)$$

Como a altura  $h_i$  de um tampo ASME 2:1 é um quarto do diâmetro interno, o fator de forma de um tampo elíptico  $K$  será igual a 2 em todos os cálculos. Com isso, o raio de rebordeamento  $r$  e o raio de coroa  $L$  calculados através das expressões (40) e (41), serão iguais aos valores obtidos pelas expressões (33) e (34) definidas anteriormente.

#### 4.1.6.3 Comparação entre as normas tampos elípticos

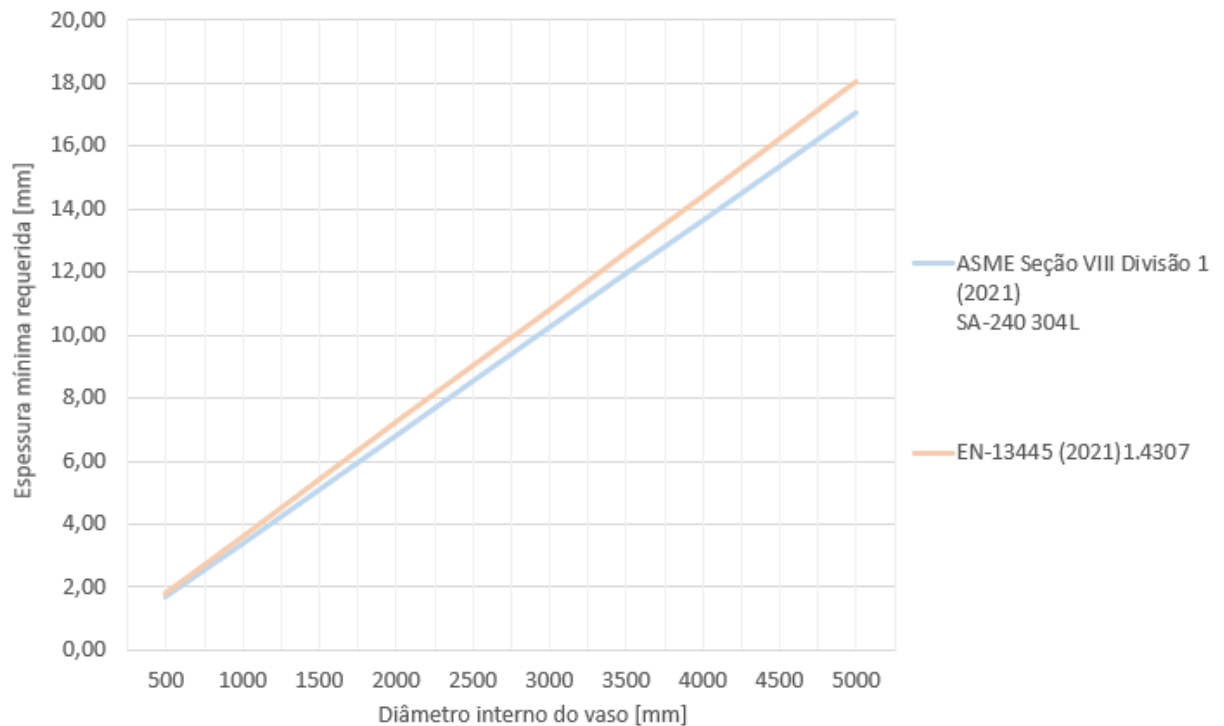
Os gráficos 13, 14 e 15 apresentam os resultados de espessura mínima requerida de tampos elípticos em função do diâmetro interno do vaso pressurizado.

**Gráfico 13 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



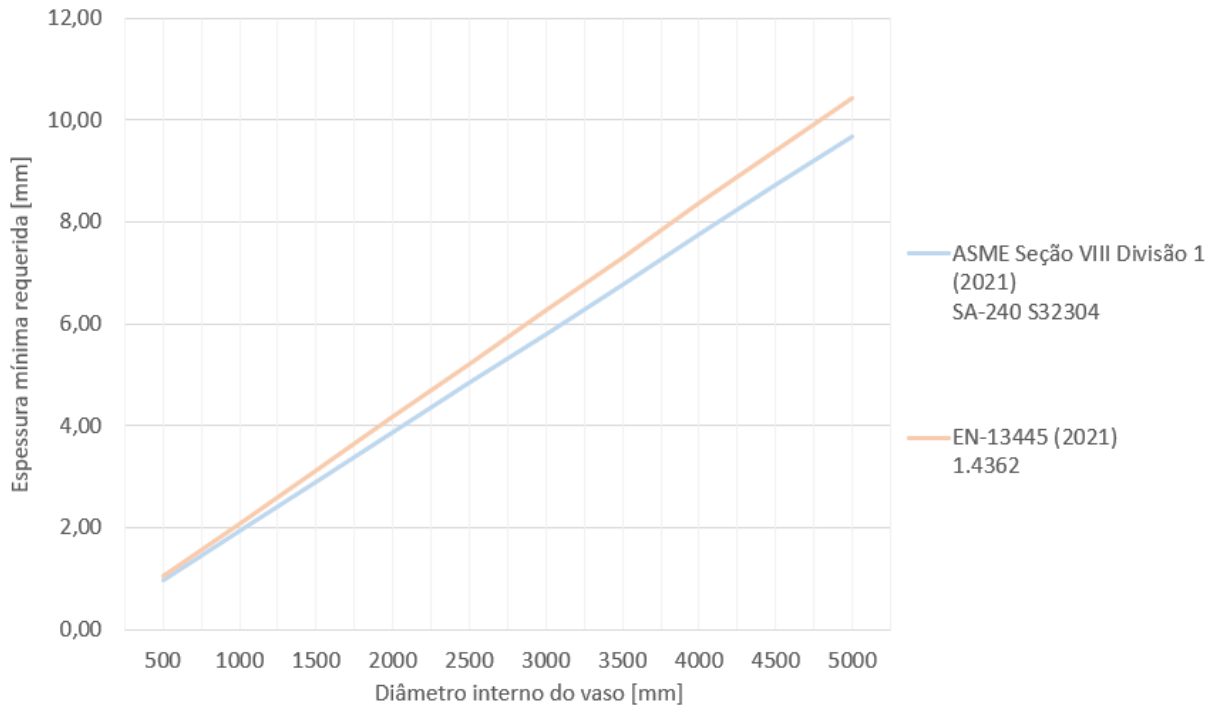
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 14 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 15 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

As tabelas 14, 15 e 16 apresentam as espessuras e as massas dos tampos elípticos ASME 2:1.

Através dos gráficos e tabelas, é possível observar que a diferença entre as normas é pequena. A norma ASME Seção VIII utiliza mais massa de material para os aços carbono, em média 2,4%. Porém, para os aços inoxidáveis e duplex, a EN 13445 requer uma espessura e, portanto, massa maior, 5,5% e 7,3%, respectivamente.

**Tabela 14 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,09	4,05	8,73	8,64	1,0%	1,0%
1000	5,17	5,09	43,93	43,22	1,6%	1,6%
1500	6,26	6,14	119,36	117,00	2,0%	2,0%
2000	7,35	7,19	248,80	243,21	2,3%	2,3%
2500	8,44	8,23	446,00	435,10	2,5%	2,5%
3000	9,52	9,28	724,72	705,91	2,6%	2,7%
3500	10,61	10,33	1098,74	1068,88	2,8%	2,8%

**Tabela 15 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
4000	11,70	11,37	1581,80	1537,26	2,9%	2,9%
4500	12,79	12,42	2187,68	2124,28	3,0%	3,0%
5000	13,87	13,46	2930,14	2843,19	3,0%	3,1%
MÉDIA	-	-	-	-	2,4%	2,4%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 16 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,71	1,80	3,74	3,96	-5,5%	-5,5%
1000	3,41	3,61	29,90	31,65	-5,5%	-5,5%
1500	5,12	5,41	100,90	106,82	-5,5%	-5,5%
2000	6,82	7,22	239,18	253,20	-5,5%	-5,5%
2500	8,53	9,02	467,15	494,52	-5,5%	-5,5%
3000	10,23	10,83	807,24	854,54	-5,5%	-5,5%
3500	11,94	12,63	1281,86	1356,97	-5,5%	-5,5%
4000	13,65	14,44	1913,45	2025,56	-5,5%	-5,5%
4500	15,35	16,24	2724,43	2884,06	-5,5%	-5,5%
5000	17,06	18,05	3737,21	3956,18	-5,5%	-5,5%
MÉDIA	-	-	-	-	-5,5%	-5,5%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 17 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(continua)</b>						
Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	0,97	1,04	2,05	2,22	-7,3%	-7,3%
1000	1,94	2,09	16,43	17,73	-7,3%	-7,3%
1500	2,90	3,13	55,47	59,84	-7,3%	-7,3%
2000	3,87	4,18	131,48	141,85	-7,3%	-7,3%



**Tabela 16 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C (conclusão)**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
2500	4,84	5,22	256,79	277,04	-7,3%	-7,3%
3000	5,81	6,26	443,74	478,73	-7,3%	-7,3%
3500	6,78	7,31	704,64	760,21	-7,3%	-7,3%
4000	7,74	8,35	1051,82	1134,77	-7,3%	-7,3%
4500	8,71	9,40	1497,61	1615,72	-7,3%	-7,3%
5000	9,68	10,44	2054,34	2216,35	-7,3%	-7,3%
MÉDIA	-	-	-	-	-7,3%	-7,3%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.1.7 Tampo cônico

O método de cálculo utilizado para o dimensionamento de tampos conforme a norma ASME Seção VIII divisão 1, é o mesmo utilizado para os costados cônicos (ASME, 2021, p. 31).

Para o dimensionamento de tampos cônicos, a norma europeia EN 13445 parte 3 também considera o mesmo método utilizado para costados cônicos.

Sendo assim, os resultados de comparação entre as normas acima estão citados no capítulo 4.1.3.3 deste trabalho.

#### 4.1.8 Tampo toricônico

Na comparação dos tampos toricônicos, será considerado para ambas as normas o ângulo  $\alpha$  igual a 30° e um raio de rebordeamento  $r$ , calculado conforme a equação (42). O ângulo  $\alpha$  do tampo toricônico está representado na figura 11.

$$r = 0,1D \quad (42)$$

Foi utilizado a mesma metodologia de cálculo de massa do tampo cônico para estimar a massa do tampo toricônico.

#### 4.1.8.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos toricônicos

O processo de dimensionamento da parte cônica de um tampo toricônico é semelhante ao do costado cônico, porém, ao invés de utilizar o diâmetro interno do tampo  $D$  na fórmula (15), utiliza-se o diâmetro interno do cone no ponto de tangência com o raio de rebordeamento  $D_{cone}$  (ASME, 2021, p. 31).  $D_{cone}$  pode ser calculado com a expressão (43).

$$D_{cone} = D - 2r(1 - \cos(\alpha)) \quad (43)$$

Já para o dimensionamento da parte arredondada do tampo toricônico, é calculado com a equações (21) e (22) de tampos torisféricos, porém o raio  $L$  utilizado é calculado conforme a equação (44) abaixo.

$$L = \frac{D_{cone}}{2 \cos(\alpha)} \quad (44)$$

#### 4.1.8.2 Norma EN 13445 parte 3 tampos toricônicos

O método de cálculo da parte cônica de um tampo toricônico, dimensionado conforme a EN 13445, é igual ao costado cônico.

Para determinar a espessura mínima requerida da parte arredondada do tampo toricônico  $e_j$ , utiliza-se a equação (45).

$$e_j = \frac{PD_c \lambda}{2f\gamma} \quad (45)$$

Onde  $\lambda$ ,  $\rho$  e  $\gamma$  são calculados conforme as equações (46), (47) e (48), respectivamente.:

$$\lambda = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{D_c}{e_j}} \frac{\tan(\alpha)}{1 + 1/\sqrt{\cos(\alpha)}} - 0,15 \quad (46)$$

$$\rho = \frac{0,028r}{\sqrt{D_c e_j}} \frac{\alpha}{1 + 1/\sqrt{\cos(\alpha)}} \quad (47)$$

$$\gamma = 1 + \frac{\rho}{1,2 \left(1 + \frac{0,2}{\rho}\right)} \quad (48)$$

A metodologia de cálculo descrita acima só pode ser utilizada se a condição (49) for satisfeita.

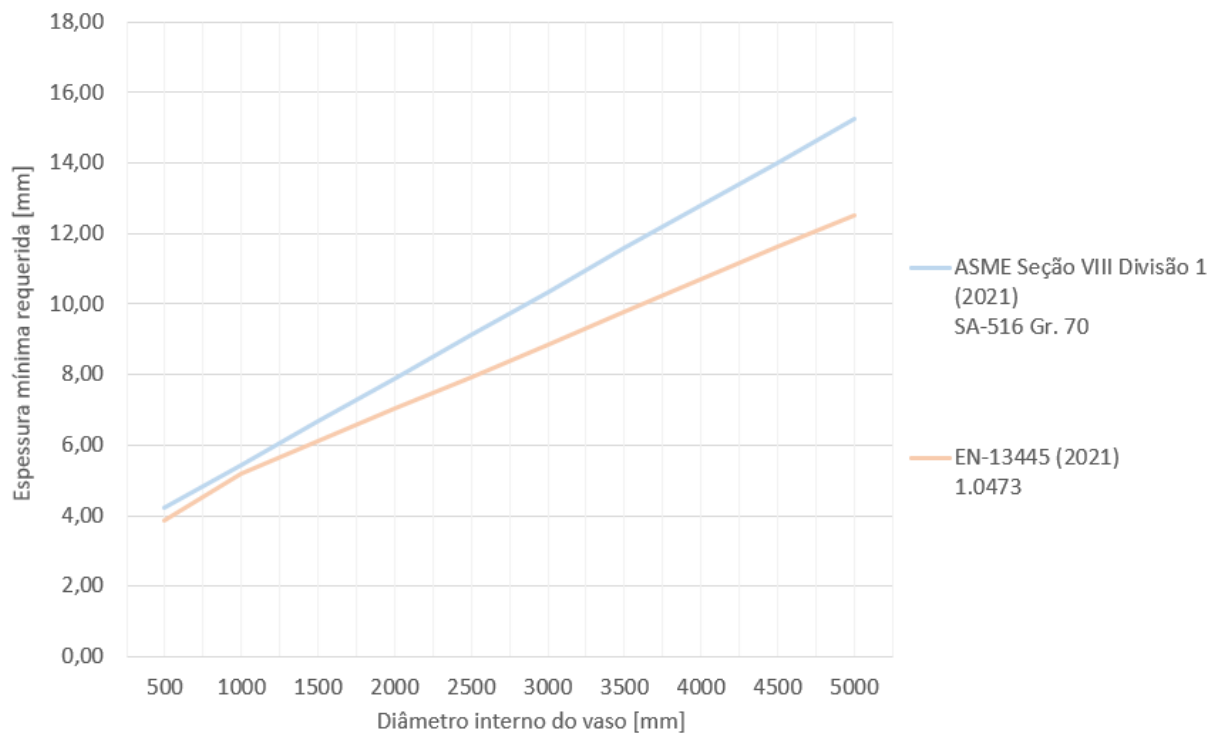
$$r < 0,3D_c \quad (49)$$

#### 4.1.8.3 Comparação entre as normas tampos toricônicos

No dimensionamento de tampos toricônicos, é possível utilizar espessuras distintas para a região cônica e para a região do raio de rebordeamento. Será considerada para a comparação, uma espessura uniforme igual a maior espessura mínima calculada para essas regiões

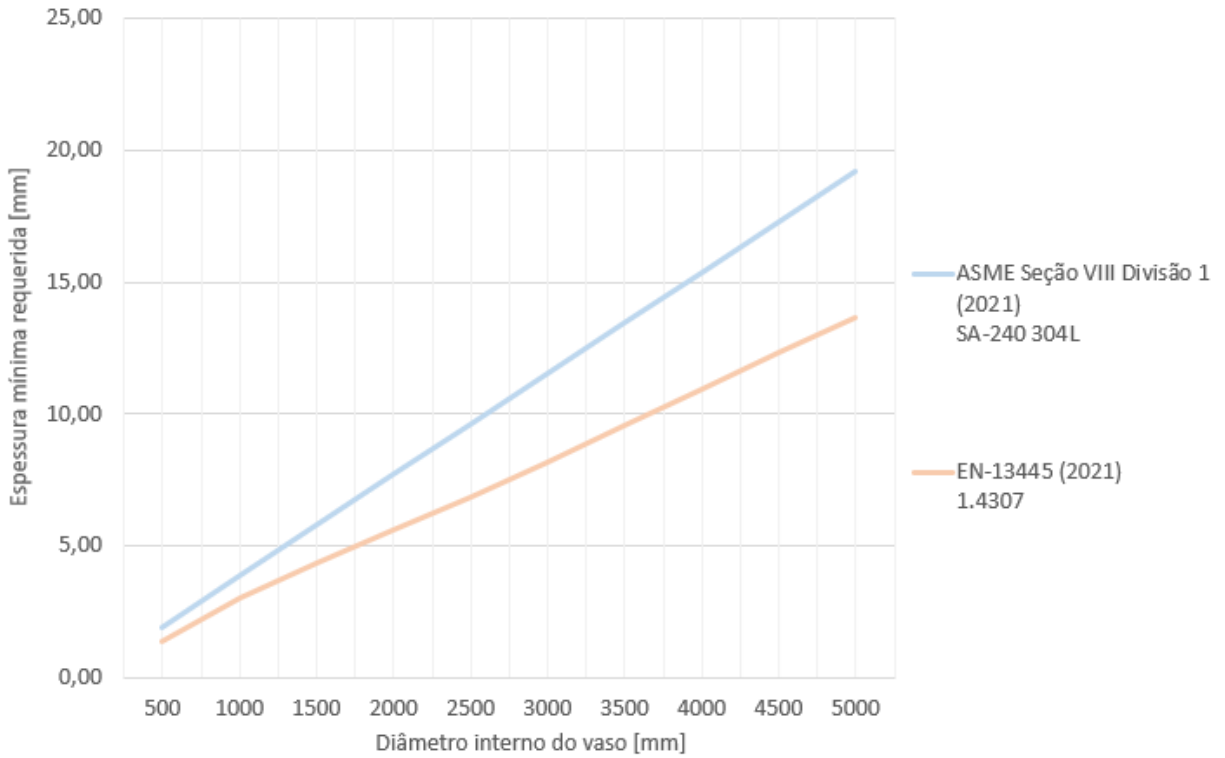
Os resultados de espessura mínima requerida de tampos toricônicos estão apresentados nos gráficos 16, 17 e 18.

**Gráfico 16 - Espessuras mínimas requeridas para tampos toricônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



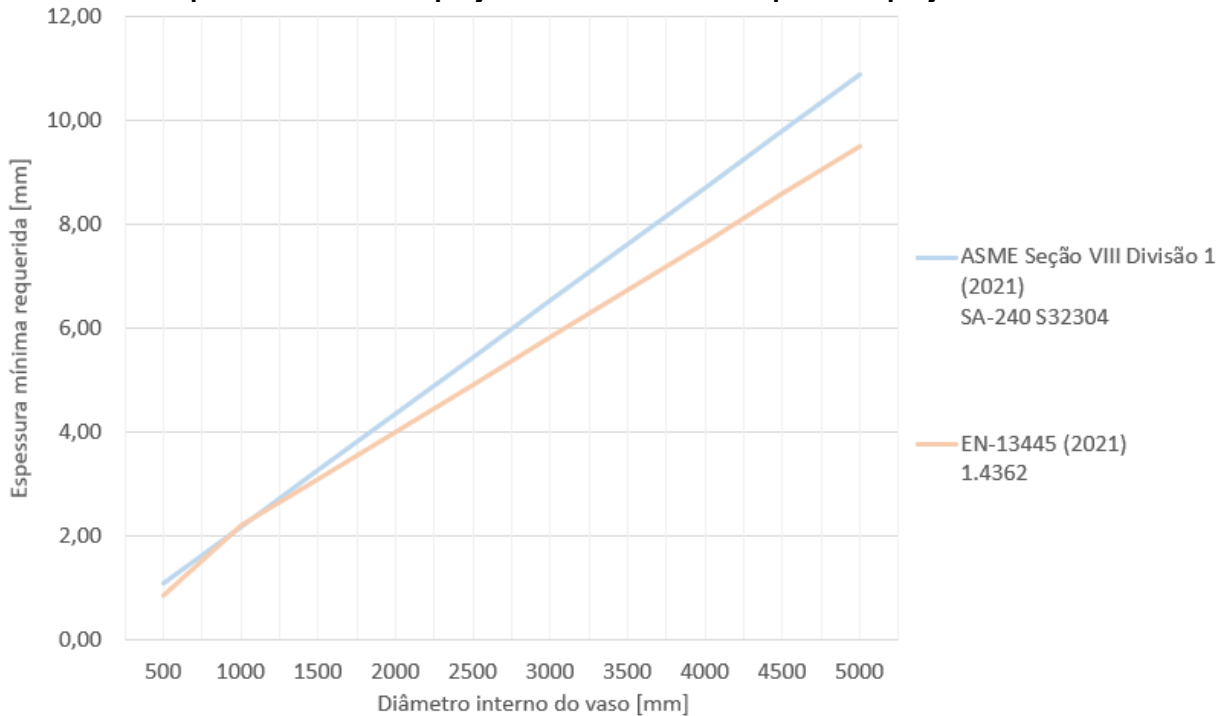
**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Gráfico 17 - Espessuras mínimas requeridas para tampos toricônicos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 18 - Espessuras mínimas requeridas para tampos toricônicos de aço duplex sujeitos a uma pressão interna de projeto de 6 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

As tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados de espessuras mínimas e massa obtidas para tampos torisféricos.

De maneira geral, a norma EN 13445 parte 3 utiliza menos material que a ASME Seção VIII divisão 1. As reduções médias de espessura e massa para os aços carbono, aços inox e aços duplex foram de 14,7%, 38,2% e 11,7%, respectivamente.

**Tabela 18 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço carbono para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,22	3,87	51,40	47,11	9,1%	9,1%
1000	5,45	5,21	265,22	253,49	4,6%	4,6%
1500	6,67	6,11	730,86	669,61	9,1%	9,1%
2000	7,90	7,03	1537,72	1368,11	12,4%	12,4%
2500	9,12	7,94	2775,21	2416,17	14,9%	14,9%
3000	10,35	8,86	4532,75	3880,96	16,8%	16,8%
3500	11,57	9,78	6899,74	5829,65	18,4%	18,4%
4000	12,80	10,70	9965,58	8329,39	19,6%	19,6%
4500	14,02	11,61	13819,68	11447,35	20,7%	20,7%
5000	15,25	12,53	18551,46	15250,70	21,6%	21,6%
MÉDIA	-	-	-	-	14,7%	14,7%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 19 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,92	1,37	24,25	17,23	40,7%	40,7%
1000	3,85	3,03	193,98	152,65	27,1%	27,1%
1500	5,77	4,31	654,70	488,78	33,9%	33,9%
2000	7,69	5,59	1551,88	1128,27	37,5%	37,5%
2500	9,62	6,88	3031,01	2168,93	39,7%	39,7%
3000	11,54	8,20	5237,59	3722,66	40,7%	40,7%
3500	13,46	9,57	8317,10	5911,44	40,7%	40,7%
4000	15,39	10,94	12415,03	8824,07	40,7%	40,7%

**Tabela 18 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço inoxidável para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
4500	17,31	12,30	17676,87	12563,96	40,7%	40,7%
5000	19,23	13,67	24248,10	17234,52	40,7%	40,7%
MÉDIA	-	-	-	-	38,2%	38,2%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 20 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos toricônicos de aço duplex para uma pressão interna de projeto de 6 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro Interno do Vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,09	0,87	13,35	10,62	25,7%	25,7%
1000	2,18	2,20	106,79	107,79	-0,9%	-0,9%
1500	3,27	3,10	360,41	342,04	5,4%	5,4%
2000	4,36	4,01	854,31	786,21	8,7%	8,7%
2500	5,45	4,92	1668,58	1507,67	10,7%	10,7%
3000	6,54	5,84	2883,31	2573,76	12,0%	12,0%
3500	7,63	6,75	4578,59	4051,81	13,0%	13,0%
4000	8,72	7,67	6834,51	6009,18	13,7%	13,7%
4500	9,81	8,58	9731,17	8513,18	14,3%	14,3%
5000	10,90	9,50	13348,65	11631,16	14,8%	14,8%
MÉDIA	-	-	-	-	11,7%	11,7%

Fonte: Autoria própria (2022)

## 4.2 Pressão Externa

Para determinar a espessura requerida para ambas as normas, são realizados cálculos iterativos. Como mencionado anteriormente, para atingir as raízes foi utilizado o método da bissecção, com um erro de  $1 \times 10^{-6}$ , alterando os valores da espessura a cada iteração.

Com o objetivo de estudar casos usuais, serão calculados vasos pressurizados que se enquadrem na condição (50) abaixo:

$$\frac{D_o}{t} \geq 10 \quad (50)$$

Onde  $D_o$  é o diâmetro externo e  $t$  é a espessura mínima requerida.

#### 4.2.1 Costado cilíndrico

Para o cálculo da pressão externa, as duas normas utilizam coeficientes que dependem da geometria do equipamento ( $A$  e  $\varepsilon$ ), e serão abordados de forma mais detalhada nos subcapítulos a seguir. Os dados são disponibilizados através de tabelas na norma ASME seção VIII divisão I, e através de gráficos na norma EN 13445 parte 3. Portanto, a fim de garantir que ambos os dimensionamentos estejam sob as mesmas condições, além de facilitar a implementação do código, foi adotado como padrão um comprimento de costado ( $l$ ) igual a quatro vezes o seu diâmetro externo ( $D_o$ ).

Para o cálculo do peso do costado cilíndrico, foi utilizado o mesmo procedimento presente no capítulo 4.1.1.

##### 4.2.1.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cilíndricos

Para o cálculo da espessura mínima de um costado cilíndrico sujeito a pressão externa, utiliza-se o parágrafo UG-28(c) da norma ASME seção VIII Divisão 1 (2021). O parágrafo disponibiliza uma metodologia de cálculo em um conjunto de 7 passos.

As primeiras variáveis calculadas são as razões  $l/D_o$  e  $D_o/t$ , onde  $l$  é o comprimento entre reforços. Para isso, é estimado um valor de espessura para a iteração inicial. Com os valores calculados, é possível determinar a constante  $A$ , presente na tabela G da norma ASME seção II parte D (ASME, 2021, p. 1216). Foi utilizado o método de interpolação di-logarítmica para o cálculo de valores intermediários aos valores fornecidos pela tabela G.

Depois de determinada a constante  $A$ , é determinada a constante  $B$  a partir da tabela do material selecionado e a temperatura de projeto; as tabelas contendo as constantes dos materiais se localizam na norma ASME seção II parte D (ASME, 2021, p. 1218). Para encontrar valores intermediários de  $B$ , foi utilizada a interpolação di-logarítmica. Abaixo, está uma tabela relacionando os materiais com suas respectivas tabelas para obtenção do  $B$ .

**Quadro 17 - Definição das tabelas para os materiais selecionados (ASME)**

Material	Tabela
SA 516. Gr. 70	CS-2
SA-240 304L	HA-3
SA-240 S32304	HA-5

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Com a constante  $B$  determinada, é possível calcular a máxima pressão externa admissível através da seguinte fórmula:

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)} \quad (51)$$

O último passo determinado pela norma é a comparação da pressão admissível calculada ( $P_a$ ) com a pressão de projeto ( $P$ ). Caso a condição a seguir não seja satisfeita  $P_a < P$ , a norma obriga o usuário a realizar novos cálculos aumentando o valor da espessura até que a condição seja satisfeita.

#### 4.2.1.2 Norma EN 13445 parte 3 costados cilíndricos

O subcapítulo utilizado para o cálculo de cilindros sujeito a pressão externa é o 8.5.2.2 da norma EN 13445 parte 3 (EN, 2021, p. 61). Conforme este subcapítulo, para determinar o valor da espessura mínima, são calculados  $P_y$  e  $P_m$ , onde  $P_y$  é a pressão onde a tensão circunferencial média alcança o ponto de escoamento, e  $P_m$  é a pressão de instabilidade elástica para o colapso do vaso.

$$P_y = \frac{\sigma_e e_a}{R} \quad (52)$$

$$P_m = \frac{E e_a \varepsilon}{R} \quad (53)$$

Onde  $R$  é o raio médio do vaso,  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $\varepsilon$  é a tensão elástica média no colapso e  $e_a$  é a espessura analisada.

A variável  $\sigma_e$  (limite nominal elástico) é determinada a partir da tensão de prova a 0,2% ( $R_{p\ 0,2/T}$ ); para o aço carbono foi utilizado o subcapítulo 8.4.1 da norma EN 13445 parte 3, enquanto para os aços inoxidáveis e duplex foi utilizado o



subcapítulo 8.4.2. A determinação de  $\sigma_e$  foi realizada conforme a tabela abaixo. Esses valores também serão utilizados em outros dimensionamentos do presente trabalho.

**Quadro 18 - Definição do limite nominal elástico a 150°C**

Material	Tensão de prova a 0,2% [MPa]	Subcapítulo 8.4.1	Subcapítulo 8.4.2	$\sigma_e$ [MPa]
1.0473	299	$\sigma_e = R_{p\ 0,2/T}$	-	299
1.4307	132	-	$\sigma_e = \frac{R_{p\ 0,2/T}}{1,25}$	105,6
1.4362	300	-	$\sigma_e = \frac{R_{p\ 0,2/T}}{1,25}$	240

**Fonte: Autoria própria (2022)**

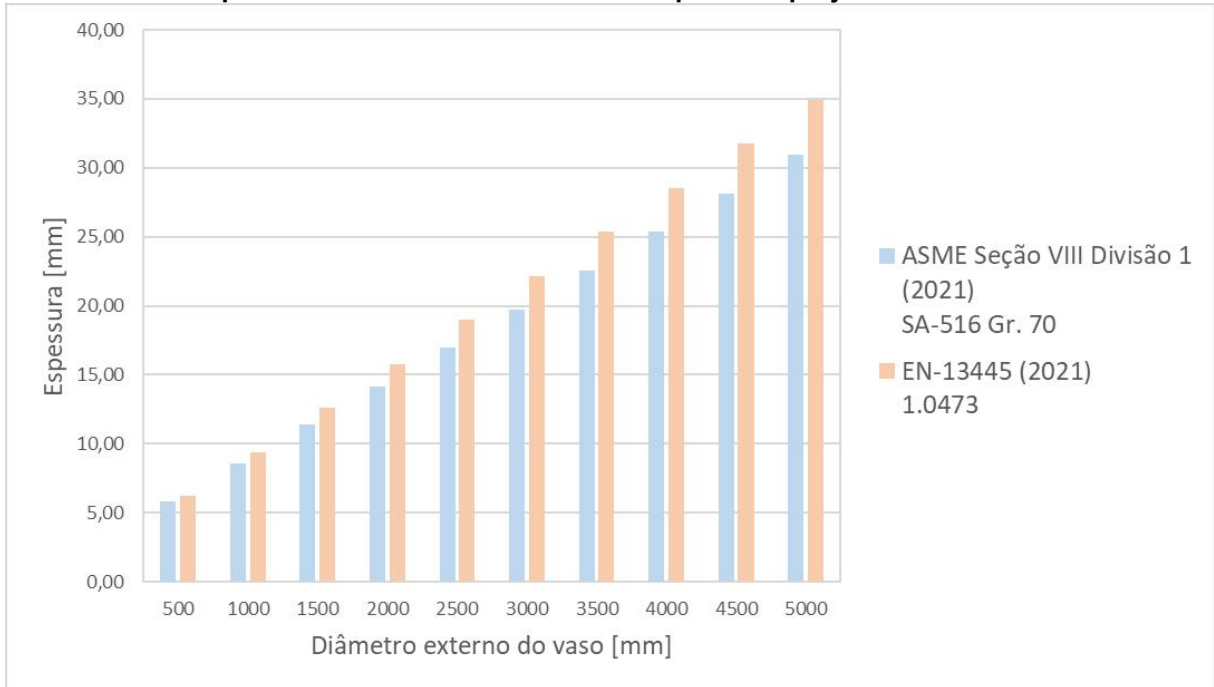
Para o cálculo inicial, é estimado um valor inicial para a espessura, e calculadas as razões  $l/2R$  e  $2R/e_a$ , onde  $l$  é o comprimento entre duas linhas de reforços. Com esses valores, é possível determinar o valor de  $\varepsilon$  através da figura 8.5-3 (EN, 2021, p. 63). Para a implementação do código, os autores utilizaram os valores de  $\varepsilon$  para  $l/2R$  igual a 4 e construíram uma tabela alterando os valores de  $\varepsilon$  conforme  $2R/e_a$ . Para determinar os valores intermediários, foi utilizada a interpolação dilogarítmica. Depois de determinada as constantes do material e  $\varepsilon$ , é calculado  $P_y$  e  $P_m$  através das fórmulas (52) e (53).

Em seguida, é calculada a razão de  $P_m/P_y$  e determinada a razão de  $P_r/P_y$  através da figura 8.5-5 (EN, 2021, p. 65); para obtenção de valores intermediários foi utilizada a interpolação linear, onde  $P_r$  é a pressão de colapso do limite inferior calculada.

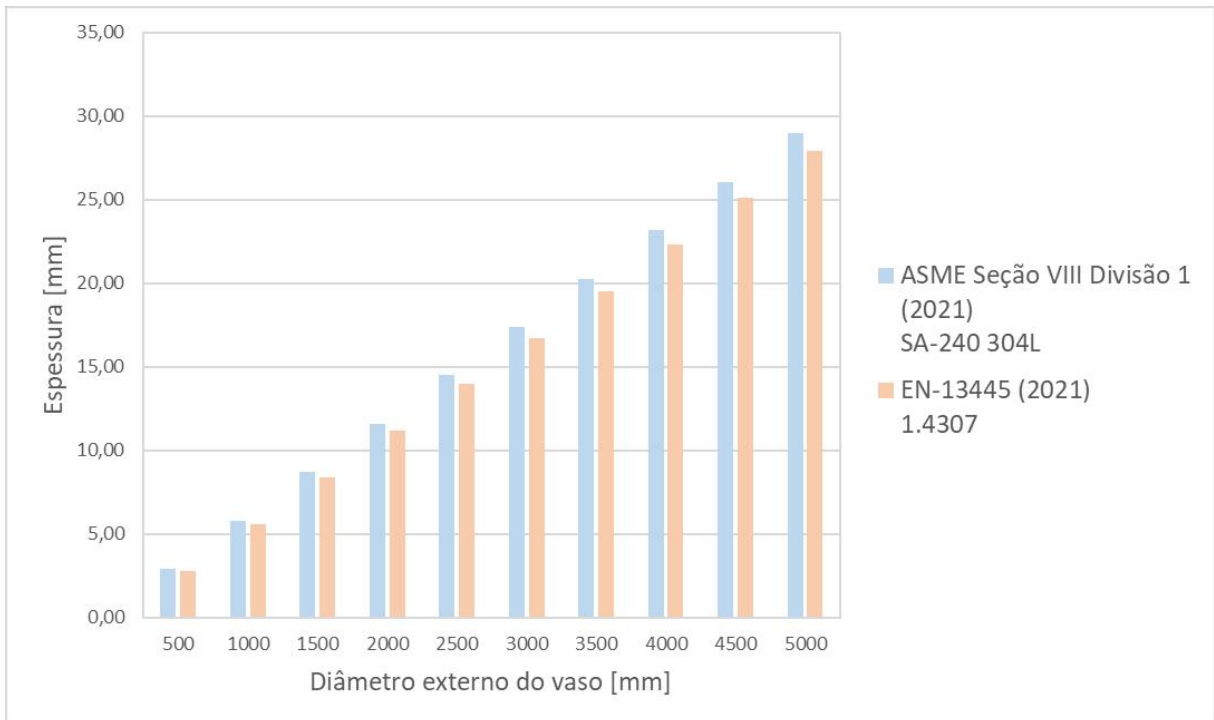
Uma vez determinada a razão  $P_r/P_y$ , é calculado  $P_r$  multiplicando essa razão por  $P_y$ . Quando determinado  $P_r$ , é realizada a seguinte comparação:  $P < P_r/s$ . Onde  $s$  é o coeficiente de segurança determinado no subcapítulo 8.4.4 da norma EN 13445 parte 3 (EN, 2021, p.60); para condições de projeto, o  $s$  assume o valor de 1,5. Caso a condição não seja satisfeita, a norma obriga o usuário a refazer os cálculos com um valor de espessura maior, até que a condição seja atendida.

#### 4.2.1.3 Comparação entre as normas costados cilíndricos

**Gráfico 19 - mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**

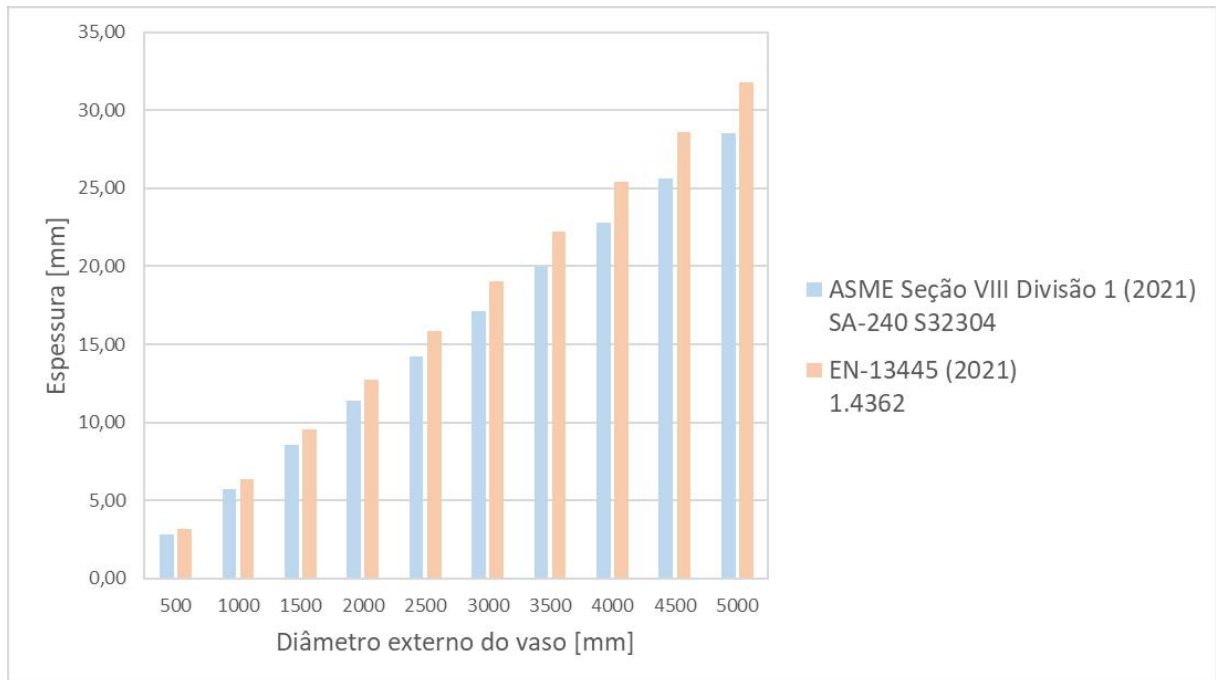


Fonte: Autoria própria (2022)



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 20 - Espessuras mínimas requeridas para costados cilíndricos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os gráficos anteriores apresentam os resultados alcançados para a espessura requerida para costados cilíndricos sujeito a pressão externa, em função do diâmetro externo e do comprimento entre reforços. As tabelas elaboradas estão presentes no final deste subcapítulo e apresentam dados da espessura requerida e massa dos costados calculados.

Através das comparações, observou-se que a norma EN 13445 parte 3 atingiu espessuras menores somente para os costados de aço inoxidável, com uma redução constante de 3,8% para a espessura e a massa. Em relação aos costados de aço carbono e aço duplex, a norma ASME seção VIII divisão 1 apresentou uma menor utilização de material. Para o aço carbono, os costados apresentaram uma redução de 10,1% para as espessuras requeridas e a massa, e para o aço duplex ocorreu uma redução constante de 10,3% para as espessuras e 10,2% para a massa.

**Tabela 21 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	5,79	6,19	69,70	74,46	-6,5%	-6,4%
1000	8,58	9,39	207,22	226,40	-8,5%	-8,5%
1500	11,38	12,58	412,36	455,58	-9,6%	-9,5%
2000	14,17	15,77	685,10	762,02	-10,2%	-10,1%
2500	16,96	18,97	1025,44	1145,71	-10,6%	-10,5%
3000	19,75	22,16	1433,40	1606,66	-10,9%	-10,8%
3500	22,55	25,35	1908,96	2144,85	-11,1%	-11,0%
4000	25,34	28,55	2452,13	2760,30	-11,2%	-11,2%
4500	28,13	31,74	3062,91	3453,00	-11,4%	-11,3%
5000	30,92	34,93	3741,30	4222,96	-11,5%	-11,4%
MÉDIA	-	-	-	-	-10,1%	-10,1%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 22 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	2,90	2,79	35,05	33,78	3,8%	3,8%
1000	5,79	5,58	140,19	135,11	3,8%	3,8%
1500	8,69	8,37	315,42	303,99	3,8%	3,8%
2000	11,58	11,16	560,74	540,43	3,8%	3,8%
2500	14,48	13,95	876,16	844,42	3,8%	3,8%
3000	17,37	16,74	1261,67	1215,96	3,8%	3,8%
3500	20,27	19,53	1717,27	1655,06	3,8%	3,8%
4000	23,17	22,32	2242,96	2161,71	3,8%	3,8%
4500	26,06	25,11	2838,75	2735,92	3,8%	3,8%
5000	28,96	27,90	3504,63	3377,68	3,8%	3,8%
MÉDIA	-	-	-	-	3,8%	3,8%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 23 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cilíndricos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg/m]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg/m]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	2,85	3,18	34,50	38,42	-10,3%	-10,2%
1000	5,70	6,35	137,99	153,66	-10,3%	-10,2%
1500	8,55	9,53	310,49	345,74	-10,3%	-10,2%
2000	11,40	12,70	551,98	614,65	-10,3%	-10,2%
2500	14,25	15,88	862,46	960,39	-10,3%	-10,2%
3000	17,10	19,05	1241,95	1382,96	-10,3%	-10,2%
3500	19,95	22,23	1690,43	1882,36	-10,3%	-10,2%
4000	22,80	25,41	2207,90	2458,60	-10,3%	-10,2%
4500	25,65	28,58	2794,38	3111,66	-10,3%	-10,2%
5000	28,50	31,76	3449,85	3841,56	-10,3%	-10,2%
MÉDIA	-	-	-	-	-10,3%	-10,2%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.2 Costado esférico

Para o cálculo da massa, foi utilizada a mesma metodologia presente no capítulo 4.1.2.

##### 4.2.2.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 costados esféricos

Para o cálculo da espessura mínima de um costado cilíndrico sujeito a pressão externa, utiliza-se o parágrafo UG-28(d) da norma ASME Seção VIII Divisão 1 (2021). A metodologia de cálculo apresentada é semelhante ao cálculo para cascos cilíndricos, se diferenciando na parte da determinação da constante  $A$  e no cálculo da máxima pressão externa admissível.

Para determinar a constante  $A$  para cascos esféricos, é estimado um valor para a espessura e aplicada à equação abaixo.

$$A = \frac{0,125}{(R_o/t)} \quad (53)$$

Depois de encontrado o valor de  $A$ , a metodologia para encontrar o valor da constante  $B$  é igual a metodologia da ASME para os cascos cilíndricos sujeitos a pressão externa. Quando determinado  $B$ , o valor da máxima pressão externa admissível é calculado através da seguinte equação.

$$P_a = \frac{B}{(R_o/t)} \quad (54)$$

O último passo determinado pela norma é a comparação da pressão calculada com a pressão de projeto. Caso a condição a seguir não seja satisfeita  $P_a < P$ , a norma obriga o usuário a realizar novos cálculos aumentando o valor de  $t$  até que a condição seja satisfeita.

#### 4.2.2.2 Norma EN 13445 parte 3 costados esféricos

Para o dimensionamento de costados esféricos, é utilizado o subparágrafo 8.7.1 da norma EN 13445 parte 3 (EN, 2021, p.88). Conforme a norma, para encontrar a espessura mínima do costado, é necessário calcular os valores de  $P_y$  e  $P_m$  (estipulando uma espessura inicial) conforme as equações abaixo.

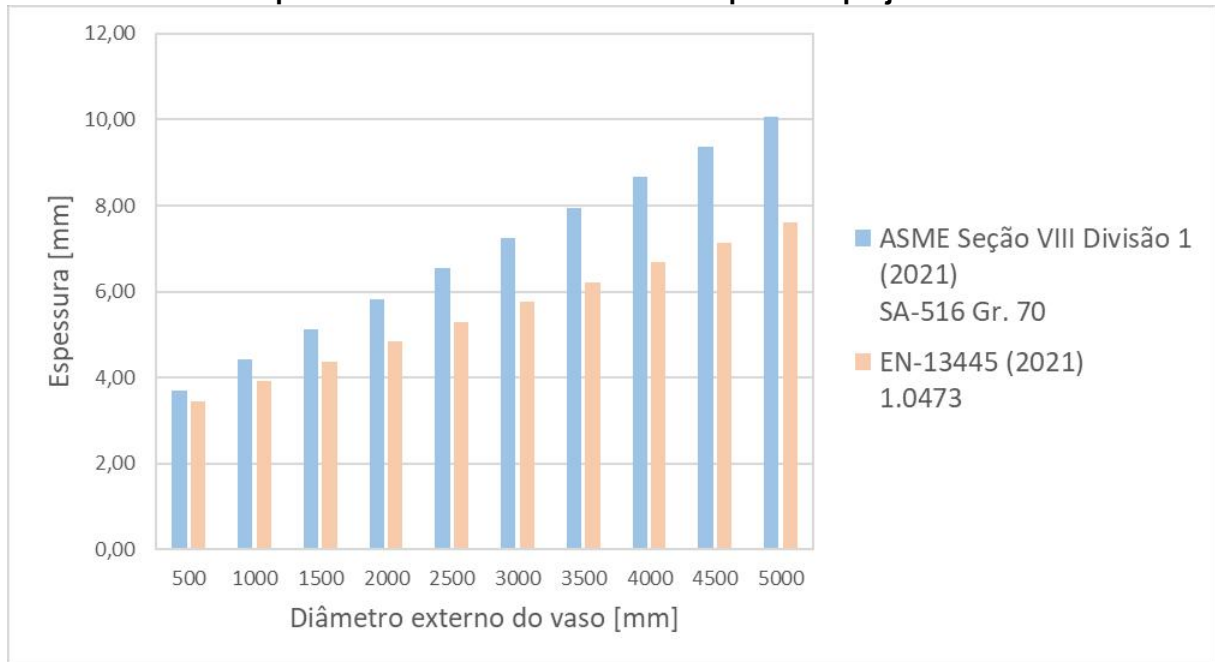
$$P_y = \frac{2\sigma_e e_a}{R} \quad (55)$$

$$P_m = \frac{1,21 E e_a^2}{R} \quad (56)$$

Depois de calculado  $P_y$  e  $P_m$ , é calculada a razão de  $P_m/P_y$  para encontrar a razão de  $P_r/P_y$  tabelada, como no casco cilíndrico. Aplicando-se, então, a mesma condição dos costados cilíndricos  $P < P_r/s$ .

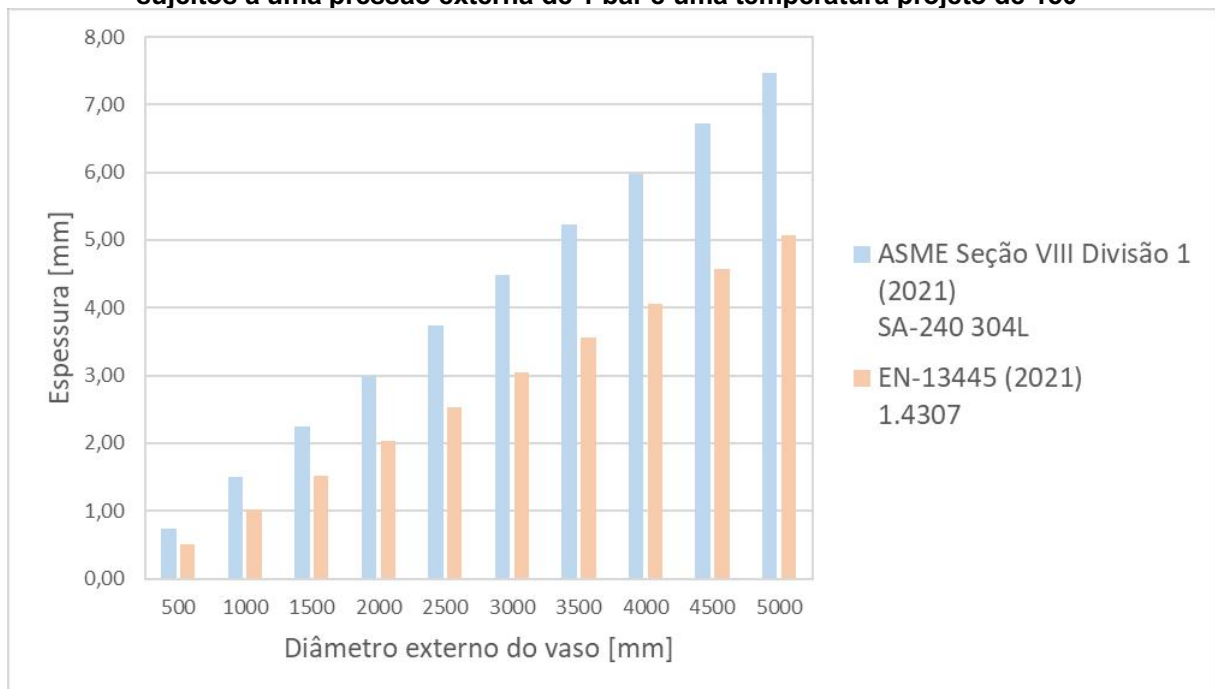
#### 4.2.2.3 Comparação entre as normas costados esféricos

**Gráfico 21 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço carbonos sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°**



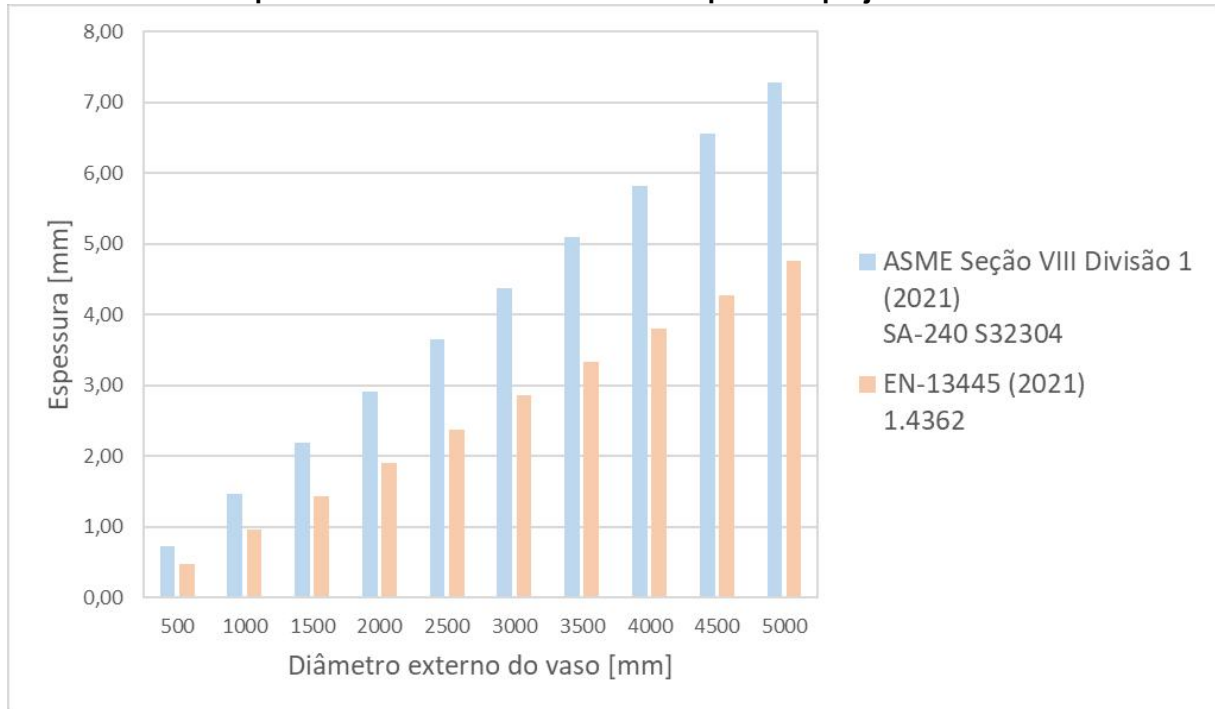
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 22 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 23 - Espessuras mínimas requeridas para costados esféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os gráficos acima exibem os resultados da espessura requerida para costados esféricos sujeitos a pressão externa, em função do diâmetro externo do vaso. As tabelas comparativas estão presentes abaixo.

Através das comparações, foi verificado que a norma EN 13445 parte 3 alcançou espessuras menores em relação a norma ASME seção VIII divisão 1. Para os costados de aço carbono, ocorreu uma redução média de 22,7% na espessura requerida e 22,8% na massa. Para os costados de aço inoxidável e duplex, a norma europeia apresentou uma diminuição constante nas espessuras requeridas de 46,9% e 53,2%, e 47,0% e 53,4% nas massas, respectivamente.

**Tabela 24 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	3,708013177	3,46	22,91	21,36	7,1%	7,3%
1000	4,416025758	3,92	108,47	96,23	12,6%	12,7%
1500	5,124038637	4,38	282,62	241,47	16,9%	17,0%



**Tabela 23 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
2000	5,832052112	4,84	571,30	473,95	20,4%	20,5%
2500	6,54006514	5,30	1000,42	810,51	23,3%	23,4%
3000	7,248078167	5,76	1595,93	1268,02	25,7%	25,9%
3500	7,956090674	6,23	2383,75	1863,33	27,8%	27,9%
4000	8,664103627	6,69	3389,81	2613,31	29,6%	29,7%
4500	9,372116581	7,15	4640,04	3534,80	31,1%	31,3%
5000	10,08012953	7,61	6160,38	4644,68	32,5%	32,6%
MÉDIA	-	-	-	-	22,7%	22,8%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 25 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	0,745944381	0,51	4,72	3,21	46,9%	47,0%
1000	1,491889358	1,02	37,75	25,67	46,9%	47,0%
1500	2,237834036	1,52	127,40	86,65	46,9%	47,0%
2000	2,983779311	2,03	301,99	205,39	46,9%	47,0%
2500	3,729724139	2,54	589,82	401,15	46,9%	47,0%
3000	4,475668967	3,05	1019,20	693,19	46,9%	47,0%
3500	5,221613273	3,55	1618,46	1100,76	46,9%	47,0%
4000	5,967558026	4,06	2415,89	1643,12	46,9%	47,0%
4500	6,71350278	4,57	3439,81	2339,51	46,9%	47,0%
5000	7,459447533	5,08	4718,54	3209,21	46,9%	47,0%
MÉDIA	-	-	-	-	46,9%	47,0%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 26 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados esféricos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diâmetro externo [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	0,728496909	0,48	4,48	2,92	53,2%	53,4%
1000	1,456993222	0,95	35,81	23,35	53,2%	53,4%
1500	2,185489833	1,43	120,85	78,80	53,2%	53,4%
2000	2,913985848	1,90	286,46	186,79	53,2%	53,4%
2500	3,642482311	2,38	559,48	364,83	53,2%	53,4%
3000	4,370978773	2,85	966,79	630,42	53,2%	53,4%
3500	5,099474713	3,33	1535,22	1001,09	53,2%	53,4%
4000	5,827971101	3,80	2291,64	1494,33	53,2%	53,4%
4500	6,556467488	4,28	3262,90	2127,67	53,2%	53,4%
5000	7,284963876	4,76	4475,86	2918,62	53,2%	53,4%
MÉDIA	-	-	-	-	53,2%	53,4%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.3 Costado cônico

Para os cálculos dos costados cônicos, ambas as normas utilizam metodologias de cálculo semelhantes aos dimensionamentos de cilindros sujeitos à pressão externa. A norma ASME seção VIII divisão 1 considera o maior diâmetro do cone para a obtenção do coeficiente  $A$ . Em contrapartida, a norma EN utiliza o raio intermediário ( $R_n$ ) do cone para a obtenção do coeficiente  $\varepsilon$ .

$$R_n = \frac{(R_{max} + R_{min})}{2} \quad (57)$$

O  $R_n$  pode ser definido conforme a equação acima, onde  $R_{max}$  é o maior raio do cone e  $R_{min}$  é o menor.

Em ambas as normas, a obtenção dos coeficientes referente a geometria do equipamento ( $A$  e  $\varepsilon$  para a ASME e EN respectivamente) dependem do ângulo  $\alpha$ . O ângulo  $\alpha$  é presente entre a linha de centro do equipamento e a parede do costado, como exemplificado na figura 7. Para as análises foi considerado um ângulo de 60°.

Com o objetivo de facilitar a implementação do código e as comparações, foi definida uma relação entre o diâmetro externo ( $D_o$ ), espessura ( $e_a$ ) e o ângulo  $\alpha$  para a o comprimento entre reforços ( $l$ ). A relação obtida está presente na equação abaixo.

$$L = R_n \cos(\alpha) \quad (58)$$

Esta relação para o comprimento entre reforços foi colocada pelos autores para os cálculos da norma EN 13445 atuarem na tabela de  $\varepsilon$  elaborada; uma nova tabela foi feita para os cálculos do costado cônico. Como mencionado anteriormente, o ASME disponibiliza tabelas para a obtenção do coeficiente  $A$ , portanto não houve dificuldade com a implementação do código da ASME. Para chegar na equação (58), foi utilizada a relação  $l/(2R_n \cos(\alpha))$  presente no subcapítulo 8.6.3 da norma EN 13445 parte 3 (EN, 2021, p. 81) e igualada a 0,5.

Para o cálculo das massas dos costados cônicos com ângulo igual a  $60^\circ$ , foi utilizada a mesma equação (12), presente no capítulo 4.1.3. Porém, o cálculo da área do cilindro foi efetuado de maneira a atender os cones com  $\alpha$  igual a  $60^\circ$ , conforme a tabela 2.10 do livro Manual de Projeto de vasos de Pressão (Moss, Denis R., p. 103). Abaixo, esta apresentada a equação utilizada para o cálculo das áreas das seções cônicas, a primeira equação está conforme a simbologia utilizada da norma ASME seção VIII divisão 1 e a segunda conforme a norma EN 13445 parte 3.

$$A_c = \pi \frac{(D_l + D_s)}{2} \left( L_c^2 + \frac{(D_l - D_s)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (59)$$

$$A_c = \pi (R_{max} + R_{min})(l^2 + (R_{max} - R_{min})^2)^{1/2} \quad (60)$$

#### 4.2.3.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 costados cônicos

O parágrafo responsável pelo dimensionamento de seções cônicas e tampos cônicos é o UG-33(f) presente na norma ASME seção VIII divisão 1 (ASME, 2021, p.32).

Similar ao dimensionamento de cascos cilíndricos, as primeiras variáveis calculadas são as razões  $L_e/D_l$  e  $D_l/t_e$ , onde  $L_e$  é o comprimento equivalente da seção,  $D_l$  é o diâmetro externo da maior parte do cone e  $t_e$  é a espessura efetiva. As variáveis  $L_e$  e  $t_e$  são definidas conforme as equações abaixo.

$$t_e = t \cos(\alpha) \quad (61)$$

$$L_e = \frac{L_c}{2} \left( 1 + \frac{D_s}{D_l} \right) \quad (62)$$

Onde  $L_c$  é o comprimento da parte cônica.

Depois de definidas as razões de  $L_e/D_l$  e  $D_l/t_e$ , é possível entrar na tabela G e obter o valor da constante  $A$ . O restante da metodologia de dimensionamento é igual a de cascos cilíndricos. Porém, no cálculo da máxima pressão externa admissível, é utilizada a relação de  $D_l/t_e$  no lugar da relação  $D_o/t$ , conforme equação abaixo.

$$P_a = \frac{4B}{3(D_l/t_e)} \quad (63)$$

#### 4.2.3.2 Norma EN 13445 parte 3 costados cônicos

Para o dimensionamento do costado cônico conforme a norma EN 13445 parte 3, é necessário seguir o procedimento de cálculo presente no subcapítulo 8.6.3 da norma (EN, 2021, p.81). Conforme explícito na norma, para determinar a espessura mínima da seção cônica, é necessário calcular os valores de  $P_y$  e  $P_m$ , similar aos dimensionamentos anteriores. As equações abaixo calculam os valores das pressões.

$$P_y = \frac{e_a \sigma_e \cos(\alpha)}{R_{max}} \quad (64)$$

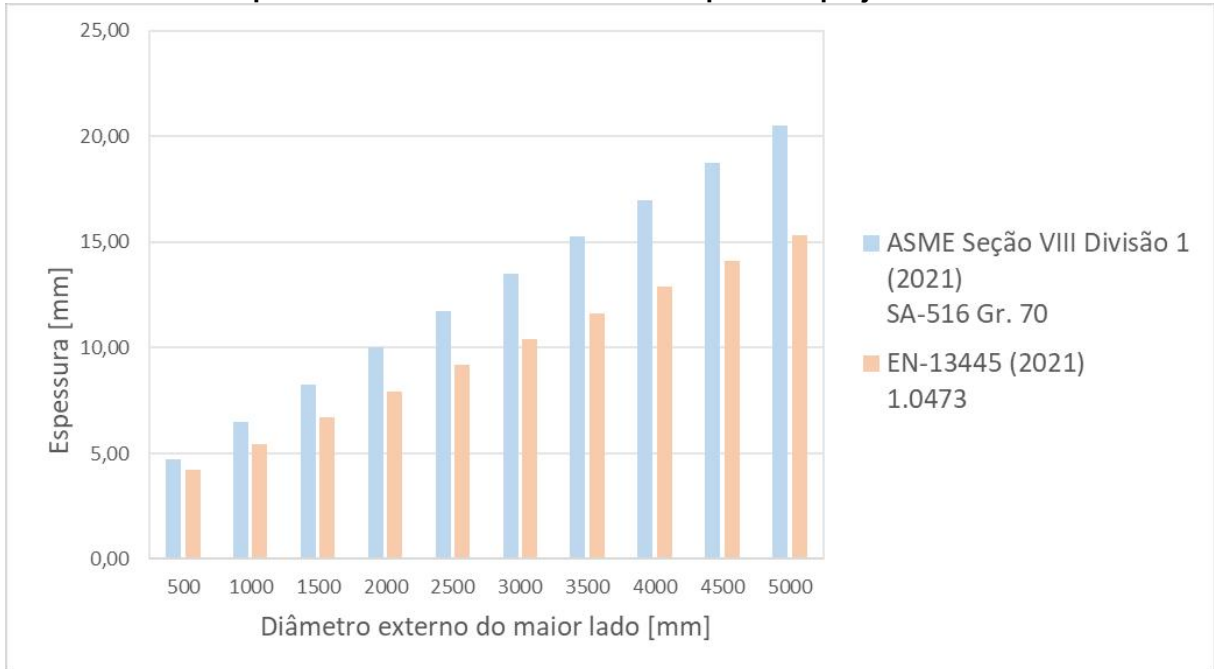
$$P_m = \frac{E e_a \varepsilon (\cos(\alpha))^3}{R_{max}} \quad (65)$$

Depois de calculadas as pressões, é necessário encontrar o valor de  $\varepsilon$  na figura 8.5-3, semelhante ao dimensionamento de costados cilíndricos, porém utilizando a razão  $l/(2R_n \cos(\alpha))$  no lugar de  $l/(2R)$ , e  $(2R_n \cos(\alpha))/e_a$  no lugar de  $2R/e_a$ .

Uma vez determinado o coeficiente  $\varepsilon$ , o restante do procedimento de dimensionamento de costados cônicos é igual ao dimensionamento de costados cilíndricos e esféricos.

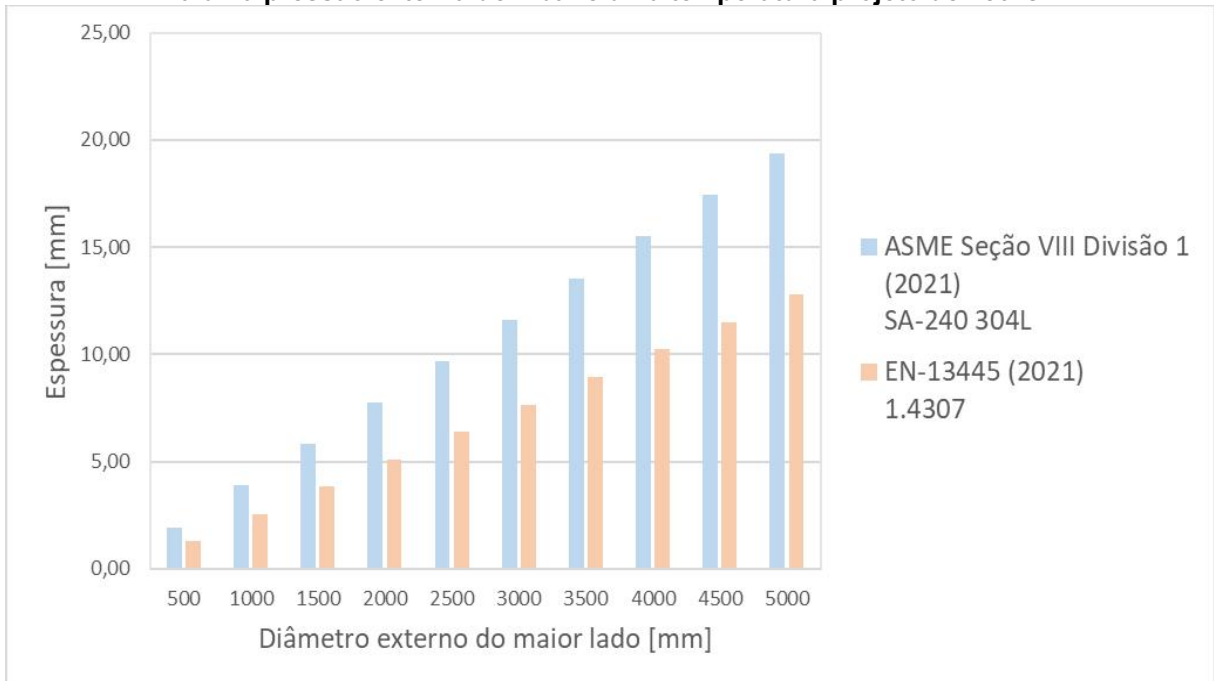
#### 4.2.3.3 Comparação entre as normas costados cônicos

**Gráfico 24 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



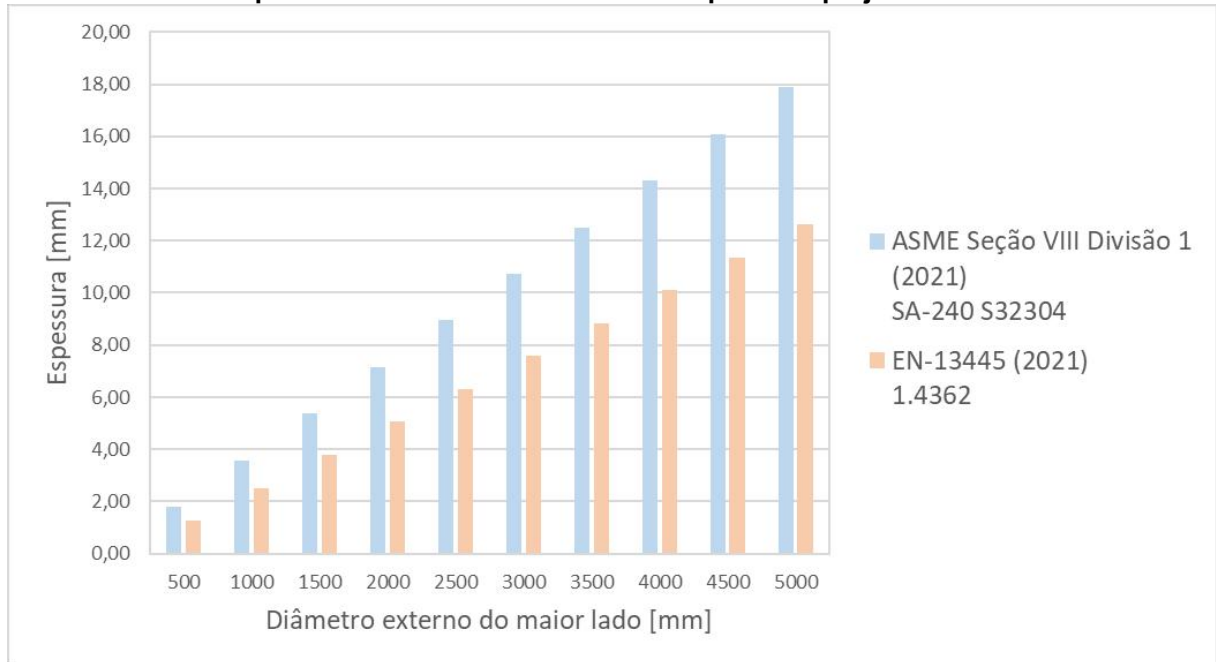
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 25 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 26 - Espessuras mínimas requeridas para costados cônicos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os gráficos acima apresentam os resultados obtidos para a espessura requerida de seções cônicas em função de seus diâmetros e seu comprimento. As tabelas geradas estão localizadas abaixo.

Através das tabelas elaboradas, é possível perceber que a norma europeia alcança menores pesos e espessuras requeridas. Para os costados de aço carbono, ocorre uma redução média de 26,8% na espessura requerida e 26,4% na massa. Quando projetados de aço inoxidável, os costados obtiveram uma redução constante de 51,7% na espessura requerida e de 51,1% na massa. Da mesma maneira ocorreu para os costados de aço duplex, que atingiram reduções constantes de 41,6% para a espessura requerida e 41,1% para a massa.

**Tabela 27 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diâmetro externo do maior lado [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,75	4,23	10,96	9,80	12,2%	11,8%
1000	6,50	5,47	60,50	51,04	18,9%	18,5%
1500	8,25	6,70	173,26	141,18	23,1%	22,7%

**Tabela 26 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Diametro externo do maior lado [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
2000	10,00	7,94	373,90	297,62	26,0%	25,6%
2500	11,75	9,17	687,06	537,80	28,1%	27,8%
3000	13,50	10,40	1137,37	879,15	29,8%	29,4%
3500	15,25	11,64	1749,49	1339,11	31,0%	30,6%
4000	17,00	12,87	2548,06	1935,08	32,1%	31,7%
4500	18,75	14,10	3557,71	2684,52	32,9%	32,5%
5000	20,50	15,34	4803,10	3604,83	33,6%	33,2%
MÉDIA	-	-	-	-	26,8%	26,4%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 28 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diametro externo do maior lado [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,94	1,28	4,65	3,08	51,7%	51,1%
1000	3,87	2,55	37,20	24,62	51,7%	51,1%
1500	5,81	3,83	125,54	83,09	51,7%	51,1%
2000	7,75	5,11	297,58	196,96	51,7%	51,1%
2500	9,68	6,38	581,22	384,69	51,7%	51,1%
3000	11,62	7,66	1004,35	664,74	51,7%	51,1%
3500	13,56	8,94	1594,87	1055,59	51,7%	51,1%
4000	15,49	10,21	2380,67	1575,69	51,7%	51,1%
4500	17,43	11,49	3389,67	2243,51	51,7%	51,1%
5000	19,37	12,77	4649,76	3077,52	51,7%	51,1%
MÉDIA	-	-	-	-	51,7%	51,1%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 29 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os costados cônicos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diametro externo do maior lado [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,79	1,26	4,17	2,96	41,6%	41,1%
1000	3,58	2,53	33,39	23,66	41,6%	41,1%
1500	5,36	3,79	112,70	79,85	41,6%	41,1%
2000	7,15	5,05	267,15	189,28	41,6%	41,1%
2500	8,94	6,32	521,77	369,69	41,6%	41,1%
3000	10,73	7,58	901,62	638,83	41,6%	41,1%
3500	12,52	8,84	1431,74	1014,44	41,6%	41,1%
4000	14,31	10,11	2137,17	1514,26	41,6%	41,1%
4500	16,09	11,37	3042,97	2156,05	41,6%	41,1%
5000	17,88	12,63	4174,17	2957,54	41,6%	41,1%
MÉDIA	-	-	-	-	41,6%	41,1%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.4 Tampos hemisféricos

O cálculo de tampos hemisféricos dimensionados conforme a norma ASME Seção VIII divisão 1, utiliza o mesmo método de cálculo de costados esféricos (ASME, 2021, p.32).

Para a norma europeia EN 13445 também é utilizado o mesmo método de costados esféricos (EN, 2021, p.88).

Como a metodologia é a mesma para ambas as normas, os resultados comparativos deste item serão os mesmos descritos no capítulo 4.2.2 do presente trabalho.

#### 4.2.5 Tampos torisféricos

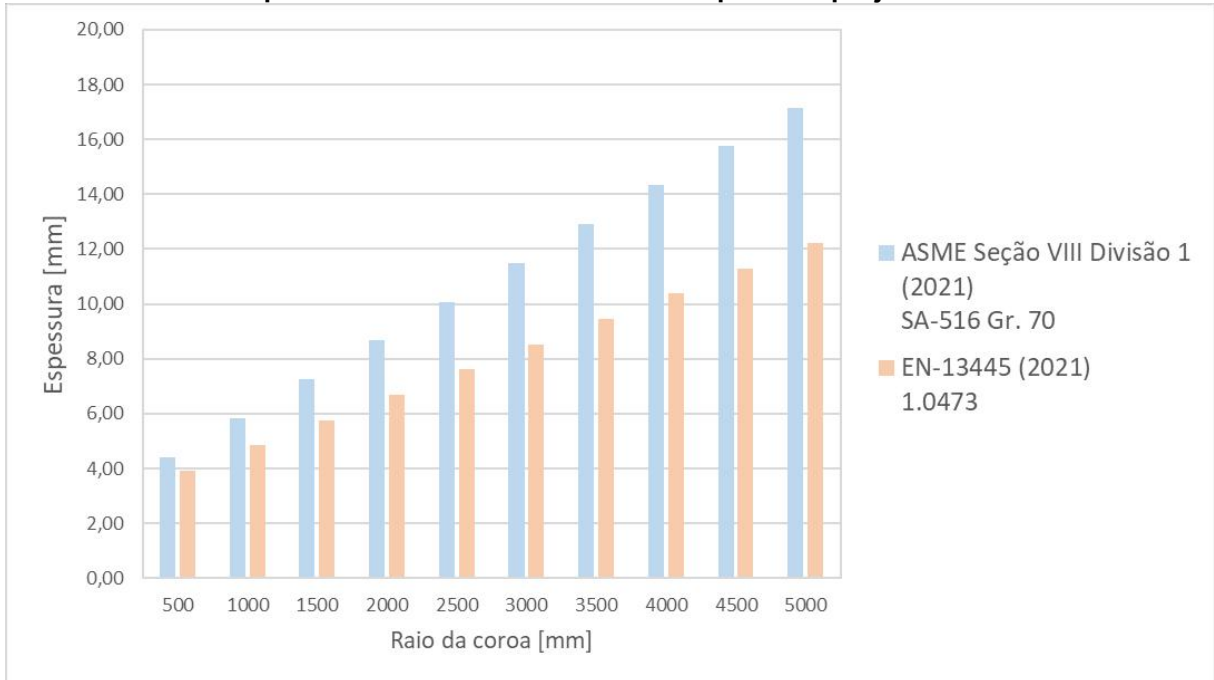
Para a obtenção da espessura requerida para tampos torisféricos, ambas as normas utilizam o mesmo procedimento para costados esféricos. Porém, o valor de  $R$  adotado nos cálculos da ASME e  $R_0$  adotado nos cálculos da EN são equivalentes ao raio da coroa do tampo. Para a comparação, foi escolhido o tampo torisféricos ASME 10% para ambas as normas, como no capítulo 4.1.5 de pressão interna.

A metodologia utilizada para o cálculo da massa do tampo foi a mesma descrita no capítulo 4.1.5.



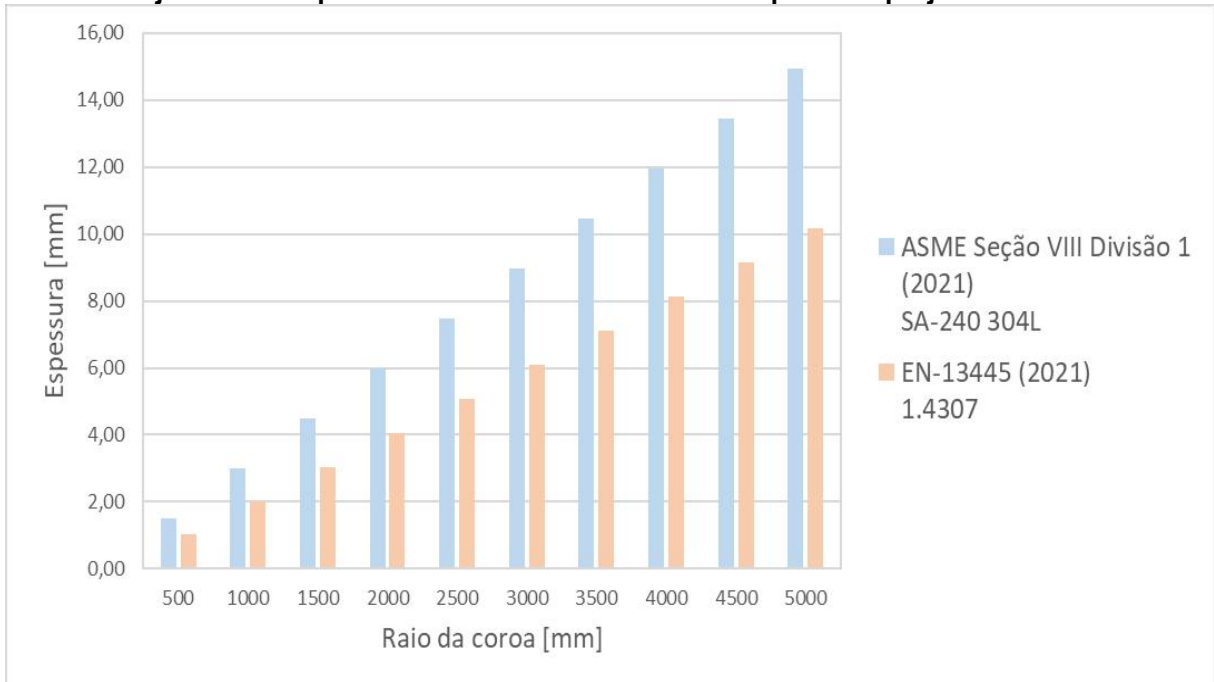
4.2.5.1 Comparação entre as normas tampos torisféricos

**Gráfico 27 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



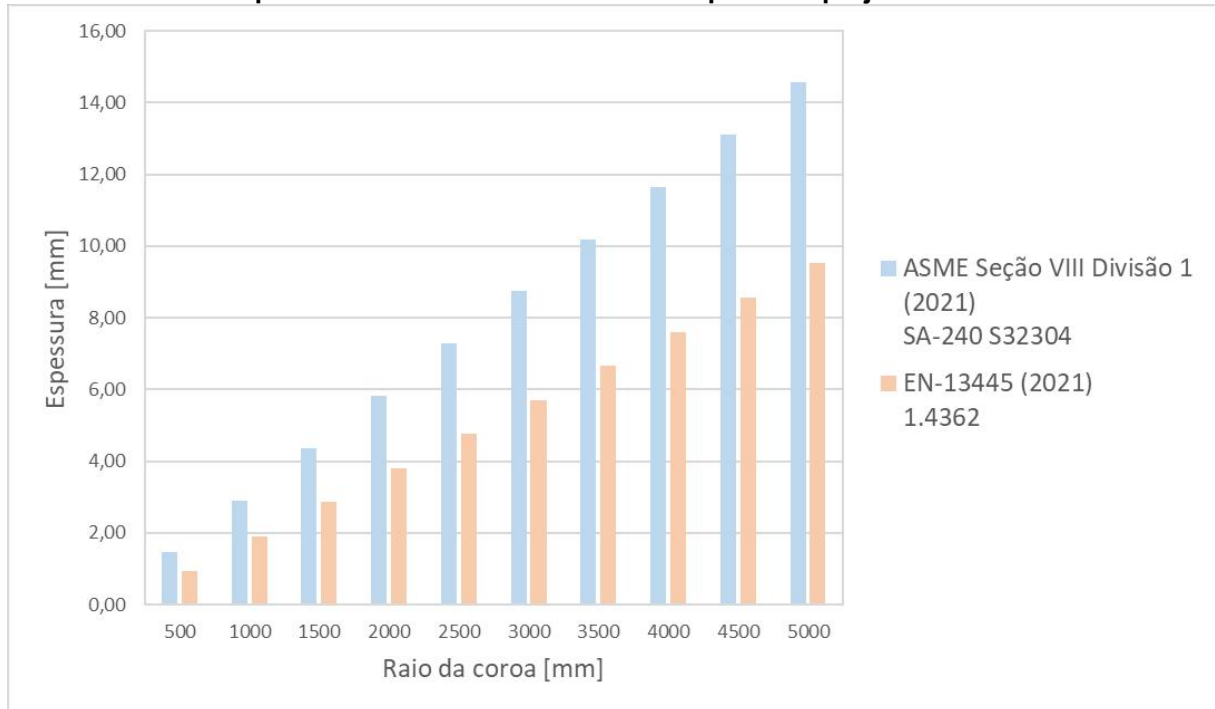
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 28 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 29 - Espessuras mínimas requeridas para tampos torisféricos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os gráficos acima apresentam os resultados obtidos para a espessura requerida de tampos torisféricos ASME 10%, em função do raio de coroa do equipamento.

Através das tabelas abaixo, notou-se que a norma europeia EN 13445 parte 3 solicita menos material em relação a norma ASME seção VIII divisão 1, atingindo espessuras requeridas e massa menores. Observa-se que, para os tampos de aço carbono, ocorreu uma redução média de 31,0% para a espessura requerida e a massa. Para os aços inoxidáveis e duplex, ocorreu uma redução constante na espessura e massa de 46,7% e 53,1% respectivamente.

**Tabela 30 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Raio da Coroa [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,416025162	3,92	8,47	7,52	12,6%	12,6%
1000	5,83205986	4,84	44,75	37,17	20,4%	20,4%
1500	7,248082638	5,77	125,12	99,56	25,7%	25,7%

**Tabela 29 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Raio da Coroa [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
2000	8,664110184	6,69	265,90	205,30	29,5%	29,5%
2500	10,08013177	7,61	483,37	365,00	32,4%	32,4%
3000	11,49615812	8,53	793,83	589,30	34,7%	34,7%
3500	12,91218448	9,46	1213,58	888,79	36,5%	36,5%
4000	14,32821083	10,38	1758,91	1274,09	38,1%	38,1%
4500	15,74423182	11,30	2446,12	1755,82	39,3%	39,3%
5000	17,16025758	12,22	3291,51	2344,60	40,4%	40,4%
MÉDIA	-	-	-	-	31,0%	31,0%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 31 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Raio da Coroa [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,491880417	1,02	2,96	2,02	46,7%	46,7%
1000	2,98377037	2,03	23,72	16,16	46,7%	46,7%
1500	4,475662708	3,05	80,05	54,55	46,7%	46,7%
2000	5,967550278	4,07	189,76	129,31	46,7%	46,7%
2500	7,459443808	5,08	370,62	252,57	46,7%	46,7%
3000	8,951332569	6,10	640,44	436,44	46,7%	46,7%
3500	10,44322133	7,12	1016,99	693,04	46,7%	46,7%
4000	11,93511009	8,13	1518,07	1034,52	46,7%	46,7%
4500	13,42700422	9,15	2161,47	1472,97	46,7%	46,7%
5000	14,91889358	10,17	2964,98	2020,54	46,7%	46,7%
MÉDIA	-	-	-	-	46,7%	46,7%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 32 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos torisféricos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Raio da Coroa [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,45699501	0,95	2,81	1,84	53,1%	53,1%
1000	2,913980484	1,90	5,63	3,68	53,1%	53,1%
1500	4,370977879	2,86	8,44	5,51	53,1%	53,1%
2000	5,827970505	3,81	11,25	7,35	53,1%	53,1%
2500	7,284969091	4,76	14,06	9,19	53,1%	53,1%
3000	8,74196291	5,71	16,88	11,03	53,1%	53,1%
3500	10,19895673	6,66	19,69	12,86	53,1%	53,1%
4000	11,65595055	7,62	22,50	14,70	53,1%	53,1%
4500	13,112939	8,57	25,31	16,54	53,1%	53,1%
5000	14,56993222	9,52	28,13	18,38	53,1%	53,1%
MÉDIA	-	-	-	-	53,1%	53,1%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.6 Tampos elípticos

Para o dimensionamento de tampos elípticos, ambas as normas adotam os procedimentos de dimensionamento de costados esféricos sujeitos a pressão externa, com uma pequena diferença no valor do raio, que será abordada nos subcapítulos abaixo.

Para facilitar as comparações e atender uma condição em que ambas as normas estejam no mesmo regime, foi adotada uma razão de  $D_o/(2h_o)$  de 2. Onde  $h_o$  é a altura do tampo elíptico e  $D_o$  é o diâmetro externo do tampo.

Para o cálculo do peso, foi utilizada a mesma metodologia presente no capítulo 4.1.6.

##### 4.2.6.1 Norma ASME seção VIII divisão 1 tampos elípticos

Para a norma ASME, o que difere o dimensionamento de um tampo elíptico para um costado esférico é o valor do  $R_o$  utilizado nas equações (53) e (54). Para cascos esféricos,  $R_o$  assume o valor do raio externo do vaso; para tampos elípticos,  $R_o$  assume o valor do raio externo equivalente da elipse. A fórmula abaixo determina o valor de  $R_o$ .

$$R_o = K_o D_o \quad (66)$$

Onde  $K_o$  é um fator retirado da tabela UG-33.1 da norma ASME (ASME, 2021, p.32), que depende da razão  $D_o/(2h_o)$ .

#### 4.2.6.2 Norma EN 13445 parte 3 tampos elípticos

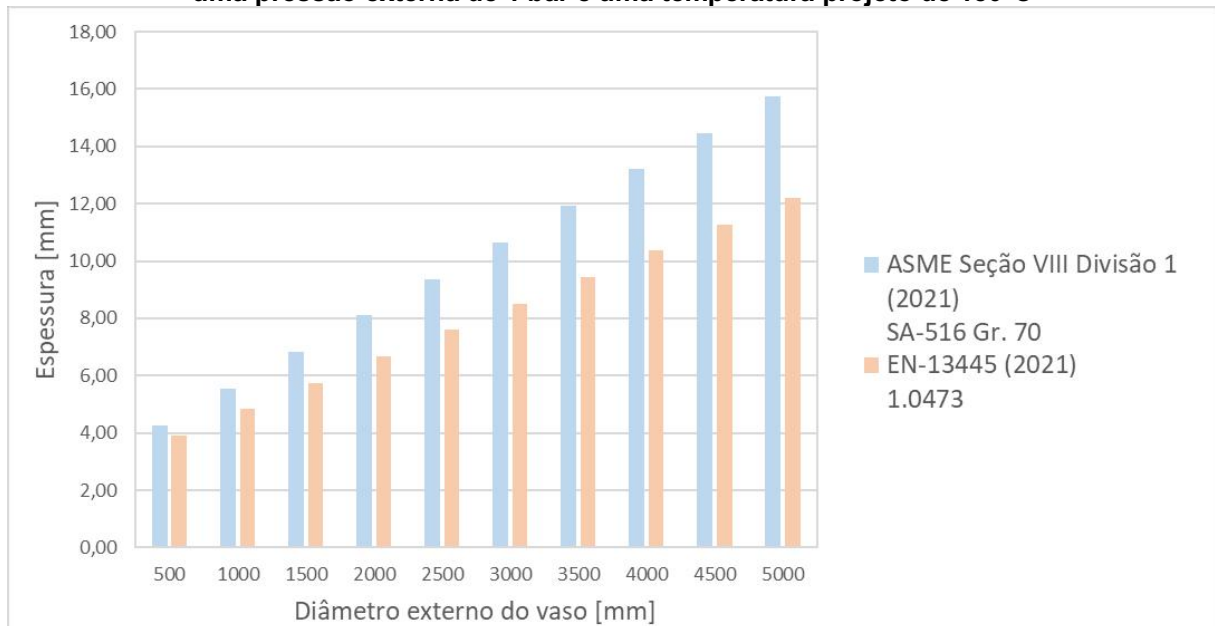
Para o dimensionamento de costados esféricos conforme a norma EN, a variável  $R$  adota o valor do raio médio do vaso nas equações (55) e (56), enquanto, para o dimensionamento de tampos elípticos, é possível determinar o  $R$  conforme a equação abaixo.

$$R = \frac{D_e^2}{2h_o} \quad (67)$$

Onde  $D_e$  é o diâmetro externo do vaso. Uma vez determinado o  $R$  para os tampos elípticos, repetiu-se o mesmo procedimento presente no capítulo 4.2.2.2.

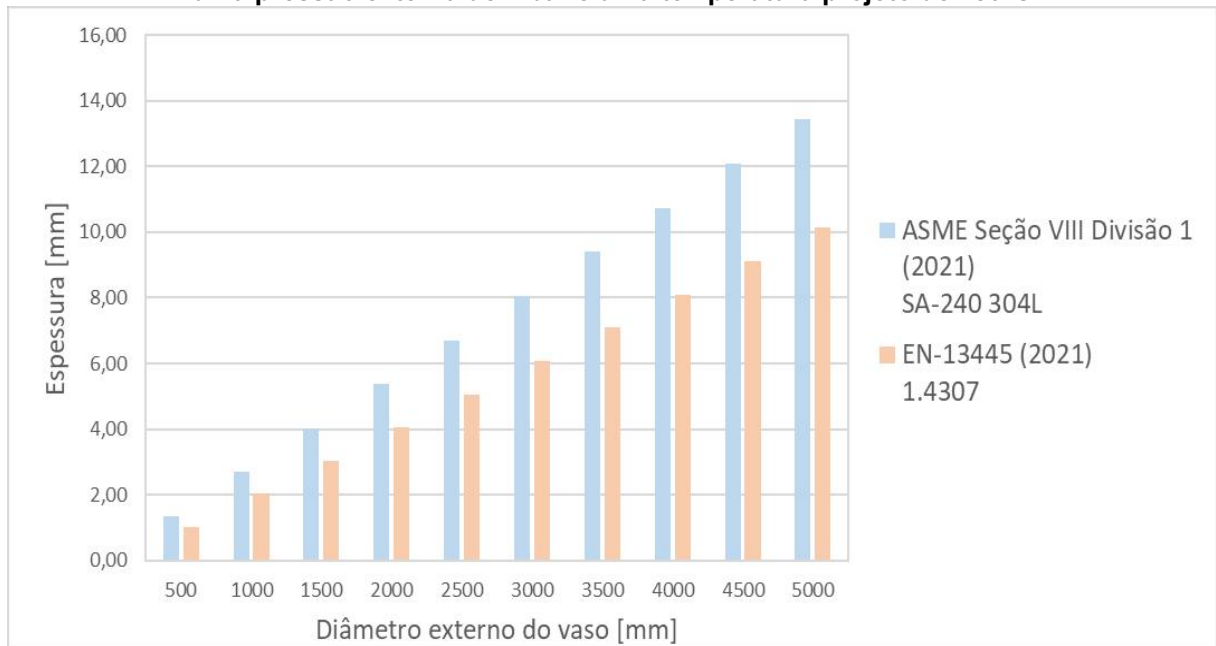
#### 4.2.6.3 Comparação entre as normas tampos elípticos

**Gráfico 30 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço carbono sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



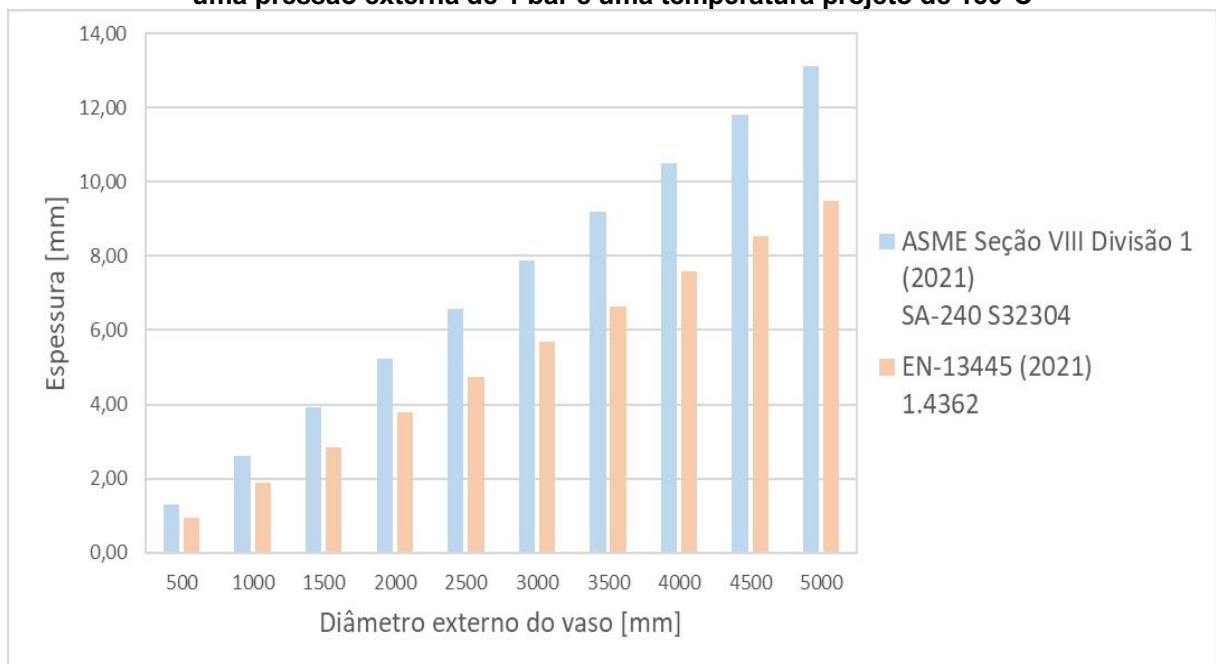
Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 31 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço inoxidável sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Gráfico 32 - Espessuras mínimas requeridas para tampos elípticos de aço duplex sujeitos a uma pressão externa de 1 bar e uma temperatura projeto de 150°C**



Fonte: Autoria própria (2022)

Os gráficos acima apresentam os resultados obtidos para a espessura requerida de tampos elípticos ASME 2:1 em função do diâmetro externo do vaso. Os resultados também estão apresentados nas tabelas abaixo.

Através das comparações elaboradas, é possível observar que a norma europeia EN 13445 parte 3 atinge espessuras menores em relação a norma ASME seção VIII divisão 1. Para os tampos de aço carbono, ocorre uma redução média de 22,3% na espessura requerida e 22,2% na massa. Já para o aço inoxidável, ocorreu uma redução constante das espessuras e das massas de 32,6% e 32,8%, respectivamente. Para o aço duplex aconteceu da mesma forma: uma redução de 38,3% e 38,5% para a espessura e massa, nessa ordem.

**Tabela 33 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço carbono para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diametro externo do vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-516 Gr. 70	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.0473	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	4,27	3,92	8,82	8,10	9,1%	8,9%
1000	5,55	4,84	46,10	40,25	14,7%	14,5%
1500	6,82	5,76	127,80	107,98	18,5%	18,4%
2000	8,10	6,68	269,92	222,84	21,3%	21,1%
2500	9,37	7,59	488,41	396,36	23,4%	23,2%
3000	10,65	8,51	799,27	640,07	25,1%	24,9%
3500	11,92	9,43	1218,47	965,52	26,4%	26,2%
4000	13,20	10,35	1761,99	1384,25	27,5%	27,3%
4500	14,47	11,27	2445,80	1907,78	28,4%	28,2%
5000	15,74	12,19	3285,89	2547,67	29,2%	29,0%
MÉDIA	-	-	-	-	22,3%	22,2%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 34 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

(continua)

Diametro externo do vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,34	1,01	2,94	2,21	32,6%	32,8%
1000	2,69	2,03	23,50	17,70	32,6%	32,8%
1500	4,03	3,04	79,32	59,73	32,6%	32,8%
2000	5,37	4,05	188,01	141,59	32,6%	32,8%
2500	6,71	5,06	367,20	276,55	32,6%	32,8%
3000	8,06	6,08	634,52	477,88	32,6%	32,8%

**Tabela 33 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço inoxidável para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

<b>(conclusão)</b>						
Diametro externo do vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 304L	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4307	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
3500	9,40	7,09	1007,60	758,85	32,6%	32,8%
4000	10,74	8,10	1504,05	1132,75	32,6%	32,8%
4500	12,08	9,11	2141,51	1612,84	32,6%	32,8%
5000	13,43	10,13	2937,60	2212,40	32,6%	32,8%
MÉDIA	-	-	-	-	32,6%	32,8%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 35 - Comparação entre as normas ASME Seção VIII e EN-13445 para os tampos elípticos de aço duplex para uma pressão externa de projeto de 1 bar e temperatura de projeto de 150°C**

Diametro externo do vaso [mm]	ASME Seção VIII Divisão 1 (2021) Espessura mínima requerida [mm] SA-240 S32304	EN-13445 (2021) Espessura mínima requerida [mm] 1.4362	ASME SEÇÃO VIII Divisão 1 (2021) massa [kg]	EN 13445 parte 3 (2021) massa [kg]	Diferença Espessura [%]	Diferença Massa [%]
500	1,31	0,95	2,79	2,01	38,3%	38,5%
1000	2,62	1,90	22,29	16,10	38,3%	38,5%
1500	3,93	2,84	75,23	54,33	38,3%	38,5%
2000	5,25	3,79	178,33	128,78	38,3%	38,5%
2500	6,56	4,74	348,30	251,52	38,3%	38,5%
3000	7,87	5,69	601,86	434,63	38,3%	38,5%
3500	9,18	6,64	955,73	690,18	38,3%	38,5%
4000	10,49	7,59	1426,62	1030,25	38,3%	38,5%
4500	11,80	8,53	2031,26	1466,89	38,3%	38,5%
5000	13,11	9,48	2786,37	2012,20	38,3%	38,5%
MÉDIA	-	-	-	-	38,3%	38,5%

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.2.7 Tampos cônicos

O cálculo de tampos cônicos dimensionados conforme a norma ASME Seção VIII divisão 1, utiliza o mesmo método de cálculo de costados cônicos (ASME, 2021, p.32).

Como a metodologia é a mesma para ambas as normas, os resultados comparativos deste item serão os mesmos descritos no capítulo 4.2.3 do presente trabalho.



#### 4.2.8 Tampos toricônicos

Para o dimensionamento de tampos toricônicos, a norma ASME seção VIII divisão 1 usa a mesma metodologia de costados e tampos cônicos (ASME, 2021, p. 32), porém utilizando uma distância entre reforços diferente, como explícito no parágrafo UG-33(g) da norma (ASME, 2021, p. 34).

A norma EN 13445 parte 3 não aborda o dimensionamento de tampos toricônicos; ela aborda somente o dimensionamento de seções cônicas no parágrafo 8.6.3 (EN, 2021, p. 81). Portanto, a comparação desta geometria de tampo não será realizada para os casos de pressão externa.

#### 4.3 Resumo dos resultados

Abaixo, os quadros 19, 20 e 21 apresentam um resumo contendo as normas que atingiram os melhores resultados, obtidos através das comparações para os materiais aço carbono, aço inoxidável e aço duplex, respectivamente.

**Quadro 19 - Resumo da redução percentual média de massa para os componentes de aço carbono**

Carregamento	Componente do vaso de pressão	Redução percentual média de massa	Norma mais efetiva
Pressão interna	Costado cilíndrico	30,3	EN 13445
	Costado esférico	23,7	EN 13445
	Costado cônico	25,1	EN 13445
	Tampo hemisférico	23,7	EN 13445
	Tampo torisférico	23,6	EN 13445
	Tampo elíptico	2,4	EN 13445
	Tampo cônico	25,1	EN 13445
	Tampo toricônico	14,7	EN 13445
Pressão externa	Costado cilíndrico	10,1	ASME Seção VIII divisão 1
	Costado esférico	22,8	EN 13445
	Costado cônico	26,4	EN 13445
	Tampo hemisférico	22,8	EN 13445
	Tampo torisférico	31,0	EN 13445
	Tampo elíptico	22,2	EN 13445
	Tampo cônico	26,4	EN 13445

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Quadro 20 - Resumo da redução percentual média de massa para os componentes de aço inoxidável**

<b>Carregamento</b>	<b>Componente do vaso de pressão</b>	<b>Redução percentual média de massa</b>	<b>Norma mais efetiva</b>
Pressão interna	Costado cilíndrico	44,7	EN 13445
	Costado esférico	44,4	EN 13445
	Costado cônico	44,6	EN 13445
	Tampo hemisférico	44,4	EN 13445
	Tampo torisférico	44,2	EN 13445
	Tampo elíptico	5,5	ASME Seção VIII divisão 1
	Tampo cônico	44,6	EN 13445
	Tampo toricônico	38,2	EN 13445
Pressão externa	Costado cilíndrico	3,8	EN 13445
	Costado esférico	47,0	EN 13445
	Costado cônico	51,1	EN 13445
	Tampo hemisférico	47,0	EN 13445
	Tampo torisférico	46,7	EN 13445
	Tampo elíptico	32,8	EN 13445
	Tampo cônico	51,1	EN 13445

**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Quadro 21 - Resumo da redução percentual média de massa para os componentes de aço duplex**

<b>Carregamento</b>	<b>Componente do vaso de pressão</b>	<b>Redução percentual média de massa</b>	<b>Norma mais efetiva</b>
Pressão interna	Costado cilíndrico	29,2	EN 13445
	Costado esférico	29,0	EN 13445
	Costado cônico	29,1	EN 13445
	Tampo hemisférico	29,0	EN 13445
	Tampo torisférico	29,0	EN 13445
	Tampo elíptico	7,3	ASME Seção VIII divisão 1
	Tampo cônico	29,1	EN 13445
	Tampo toricônico	11,7	EN 13445
Pressão externa	Costado cilíndrico	10,2	ASME Seção VIII divisão 1
	Costado esférico	53,4	EN 13445
	Costado cônico	41,1	EN 13445
	Tampo hemisférico	53,4	EN 13445
	Tampo torisférico	53,1	EN 13445
	Tampo elíptico	38,5	EN 13445
	Tampo cônico	41,1	EN 13445

**Fonte: Autoria própria (2022)**

## 5 CONCLUSÃO

No segmento de papel e celulose, os vasos de pressão detêm uma grande parcela nos custos de engenharia, fabricação, montagem e instalação em um projeto. Nesse sentido, atingir menores espessuras é um ponto decisivo para a redução de custos.

Para identificar formas de se obter melhor uso de material, o presente trabalho comparou as normas ASME seção VIII divisão 1 e EN 13445 parte 3. Este estudo buscou identificar quais delas teriam maior eficiência. Através do desenvolvimento de programações utilizando o *Visual Basic for Applications*, foram simulados cenários para a comparação entre os resultados obtidos.

Para os casos de pressão interna, a norma EN 13445 parte 3 é mais eficiente que a norma ASME Seção VIII divisão 1 em relação ao gasto de material. Isso se deve ao fato de que a norma europeia possui uma tensão admissível maior que a norma americana, possibilitando atingir menores espessuras. As reduções de massa para o aço carbono, aço inoxidável e aço duplex variaram entre 14,7% a 30,3%, 28,2 a 44,7% e 11,7% a 29,2%, respectivamente

Para os casos de pressão externa, a norma europeia EN 13445 parte 3 também apresentou uma eficiência maior, alcançando espessuras menores. Isso se deve ao uso das constantes adimensionais dependentes da geometria dos costados ( $A$  e  $\varepsilon$ ), e das tensões utilizadas para os cálculos. As reduções de massa para o aço carbono, aço inoxidável e aço duplex variaram entre -10,1% a 31,0%, 3,8% e 47,0% e -10,2% e 53,4%. Para o casco cilíndrico, observou-se que a norma ASME seção VIII divisão 1 alcançou espessuras menores para alguns materiais (representado por uma diferença negativa), porém, acredita-se que isso ocorreu por conta da falta de precisão na obtenção do coeficiente  $\varepsilon$ , visto que na norma EN 13445 parte 3 não há uma tabela ou expressão para a determinação desse fator, apenas um gráfico.

A implementação dos códigos para o levantamento dos dados foi uma etapa difícil durante a realização deste trabalho. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a melhoria na implementação dos códigos, otimizando o tempo de cálculo para os casos de pressão externa, e melhorar a precisão do resultado obtido para cilindros sujeito a esse tipo de carregamento, conforme o código europeu EN 13445 parte 3.

Outras sugestões seriam a implementação do custo dos materiais na análise, a comparação de outros códigos de dimensionamento de vasos pressurizados e a comparação de outros componentes utilizados nesses equipamentos.

## REFERÊNCIAS

- ANNARATONE, Donatello. **Pressure Vessel Design**. 1. ed. Berlin: Springer, 2007.
- BAGATTINI, Matteo. **How to design a stiffening ring against external pressure using NextGen**, 22 mai. 2017. Disponível em: <https://nextgen.santambrogio.it/en/docs/how-to-design-a-stiffening-ring-against-external-pressure-using-nextgen>. Acesso em: 13 dezembro 2021.
- CENCENELEC. **Sobre o CEN**. Disponível em: <https://www.cencenelec.eu/about-cen/>. Acesso em: 24 outubro 2021.
- CHATOPADHYAY, Somnath. **Pressure Vessels: Design and Practice**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 13445 Parte 1**. Helsinque: 21 maio 2021.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 13445 Parte 3**. Helsinque: 21 maio 2021.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 13445 Parte 5**. Helsinque: 21 maio 2021.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 10028 Parte 1**. Helsinque: 04 agosto 2017.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 10028 Parte 2**. Helsinque: 04 agosto 2017.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 10028 Parte 7**. Helsinque: 05 agosto 2016.
- FALCÃO, Carlos. **Projeto Mecânico Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos**. Curso de Projeto Mecânico de Vasos de Pressão e Trocadores de Calor. Maio de 2008. Notas de Aula. Falcão Consultoria e Projetos.
- GILL, S. S.; CLOUD, R. L.; KENDRICK, S.; KITCHING, R.; KRAUS, H.; LECKIE, F. A.; PENNY, R. K.; ROSE, R. T.. **The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components** . 1. ed. Pergamon Press, 1970.
- JUNIOR, Valter Firmino da Silva. **Projeto Estrutural e de Fabricação de Vaso de Pressão Esférico**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo.
- LOSCHI, M. PEVS 2020: com crescimento de 17,9%, valor da produção de silvicultura e extração vegetal chega a R\$ 23,6 bilhões. **Estatísticas Econômicas**, 6 out. 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31802-pevs-2020-com-crescimento-de-17-9-valor-da-producao-de-silvicultura-e-extracao-vegetal-chega-a-r-23-6-bilhoes>. Acesso em: 18 outubro 2021.
- MARTÍN, César Boró. **Nozzle Design: The Weak Point of Every Equipment**. Disponível em: <https://arvengtraining.com/en/nozzle-design-the-weak-point-of-every-equipment/>. Acesso em: 13 dezembro 2021.

MOSS, D.; BASIC, M. **Pressure Vessel Design Manual**. 4. ed. Butterworth-Heinemann, 2013.

Novos projetos de celulose representam investimento de mais de US\$ 18 bilhões. **Tissue Online**, 24 nov. 2020. Disponível em: <https://tissueonline.com.br/novos-projetos-de-celulose-representam-investimento-de-mais-de-us-18-bilhoes/>. Acesso em: 19 outubro 2021.

NR 13 - Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e muito mais. **Prometal Epis**, 18 fev. 2019. Disponível em: <https://www.prometalepis.com.br/blog/nr-13-caldeiras-vasos-de-pressao-tubulacoes-e-muito-mais/>. Acesso em: 16 novembro 2021.

O que são vasos de pressão e como são classificados. **Torino Soluzioni Ambientali**, 15 fev. 2018. Vasos de Pressão. Disponível em: <http://www.tsambientali.com.br/o-que-sao-vasos-de-pressao-e-como-sao-classificados/>. Acesso em: 25 outubro 2021.

Pressure Vessel Design. **New Century**. Disponível em: <https://newcenturyeng.com/services/pressure-vessel-design/>. Acesso em: 10 dezembro 2021.

RUGGIERO, M. A.; LOPES, V. L. **Cálculo Numérico Aspectos Teóricos e Computacionais**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 1997.

SILVA, C. A.; BUENO, J. M.; NEVES, M. R. A indústria de celulose e papel no Brasil na primeira década do século XXI - algumas considerações sobre o que poderá ainda acontecer. **Guia ABTCP**, p. 20-32, 2015.

STEWART, M.; LEWIS, O. T. **Pressure Vessels Field Manual**. 1. ed. Waltham: GPP, 2013.

TELLES, Pedro. **Tubulações Industriais- Materiais, Projeto e Montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TELLES, Pedro. **Vasos de Pressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME seção VIII divisão 1: Boiler and Pressure Vessel Code**. Nova Iorque: 01 julho 2021.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME seção II parte A: Ferrous Material Specifications**. Nova Iorque: 01 julho 2021.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME seção II parte D: Properties (Metric)**. Nova Iorque: 01 julho 2021.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B36.10M**. Nova Iorque: 12 outubro 2018.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B36.19M**. Nova Iorque: 19 setembro 2018.

Uso duplex na indústria de celulose e papel. **Megaligas**, [2018]. Disponível em: <http://www.megaligas.com.br/noticia-231>. Acesso em: 09 novembro 2021.

VALMET. **Sobre a Valmet**. Disponível em: <https://www.valmet.com/pt/sobre-a-valmet/>. Acesso em: 21 outubro 2021.

ZUCAS, R. A. **Aços Inoxidáveis Duplex: Características, aplicação na indústria de Óleo & Gás e soldabilidade**. p. 1-11, 2004.