

Apresentação dos Códigos de projeto e construção de vasos de pressão, dos fatores de segurança correspondentes e das Tensões admissíveis resultantes

1. Introdução

O termo vaso de pressão *pressure vessel* designa, genericamente, todos os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado, a partir de 1,0 barg (15 psig), e aqueles que operam em pressões negativas ou vácuo.

Os vasos de pressão geralmente têm o formato de cilindros, esferas, cones, elipsoides, toroides ou combinações destas geometrias.

Como “vasos de pressão” compreendem-se, dentre outros, os seguintes equipamentos, normalmente, presentes em instalações de óleo&gás, siderúrgicas, termoelétricas, indústrias químicas, etc.

- Vasos, propriamente ditos, verticais ou horizontais;
- Torres ou colunas de processo;
- Reatores de processamento;
- Permutadores ou trocadores de calor tubulares ou de placas;
- Esferas e cilindros de armazenamento de gás;
- Filtros de processo;
- Secadores;
- Painéis de pressão industriais;
- Autoclaves;
- Demais equipamentos que operam em pressões internas ou externas, superiores a 15 psig.

Este Código ASME VIII não se aplica a equipamentos contendo pressão que são parte integrante ou componentes de um dispositivo mecânico rotativo ou alternativo, como

- (1) bombas
- (2) compressores
- (3) turbinas
- (4) gerador
- (5) motores
- (6) cilindros hidráulicos ou pneumáticos em que as principais considerações e/ou tensões de projeto são derivadas dos requisitos funcionais do dispositivo.

Para caleiras de vapor e os equipamentos do circuito de vapor o Código ASME Section I é o aplicável.

As tubulações e componentes de tubulação são abrangidos pelo escopo dos códigos de tubulação ASME B31.

O Código de projeto e construção de vasos de pressão, normalmente, utilizado no Brasil, para os equipamentos empregados na indústria do óleo&gás. é o ASME Section VIII que tem três divisões: Division 1, Division 2 e Division 3, a depender do nível de pressão interna do equipamento:

- ASME BPVC Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels
- ASME BPVC Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2: Rules for Construction of Pressure Vessels Alternative Rules for Construction of Pressure Vessels
- ASME BPVC Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII. Division 3: Rules for Construction of Pressure Vessels Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels

2. Aplicação de cada Divisão do Código ASME VIII

2.1. ASME Sec. VIII Div. 1

Este é o Código, mais comumente utilizado para projeto e construção de Vasos de Pressão, e estabelece as exigências e requisitos sobre materiais de construção, projeto, cálculo, fabricação e detalhes de fabricação, exames, inspeção de fabricação, testes, certificação e alívio de pressão.

O Código ASME VIII-1 contém no corpo principal e em apêndices obrigatórios e não obrigatórios, critérios de projeto, métodos de exame não destrutivos e padrões de aceitação de inspeção e testes para vasos de pressão, além dos critérios de estabelecimento das tensões admissíveis, a serem empregadas no dimensionamento dos componentes e partes dos vasos.

Os projetos do vasos de pressão, de acordo com o Código ASME Seção VIII Divisão 1, são elaborados por regras práticas, fórmulas simples, detalhes típicos de fabricação e não requerem a avaliação detalhada de

todas as tensões atuantes.

No ASME VIII 1 o projeto é por regras simplificadas, que visam controlar o nível das tensões atuantes. A Divisão 1 tem requisitos de projeto menos rigorosos em comparação com a Divisão 2 e possui requisitos também menos rigorosos para controle e garantia de qualidade. As regras desta Divisão foram formuladas com base em princípios testados de projeto e práticas de fabricação confiáveis e aplicáveis a vasos de pressão, projetados, em geral, para pressões não superiores a 3.000 psi (20 MPa).

2.2. ASME Sec. VIII Div. 2

Esta Divisão 2 contém requisitos obrigatórios, proibições específicas e orientações não obrigatórias para projeto, materiais, fabricação, exame, inspeção, testes, proteção contra sobrepressão e certificação de vasos de pressão.

O Código ASME VIII-2 concentra-se em projetos, especificações de materiais e técnicas de exame não destrutivo, mais rigorosos, para vasos de pressão.

O Código Seção VIII Divisão 2 estabelece diretrizes específicas para análise de todas as tensões atuantes, como elas são combinadas e as tensões admissíveis, para as diferentes categorias de tensões combinadas.

Os vasos de pressão de projeto pela Divisão 2 têm espessuras de paredes metálicas menores que os similares projetados pela Div 1, são portanto mais leves, porém, devido às maiores exigências sobre materiais construtivos e práticas de fabricação e inspeção, não são, necessariamente, de menor preço.

No ASME VIII 2 o projeto é por análise das tensões, e o fator de segurança do projeto é inferior ao da Div 1, logo permitindo tensões admissíveis superiores.

Na prática a Divisão 2 é empregada para reatores de processamento de pressão e temperatura elevados, para as esferas de grande porte de armazenamento de gás natural e gases liquefeitos de petróleo e para vasos de pressão para ocupação humana, principalmente nas indústrias de mergulho

A Divisão 2 permite valores de intensidade de tensão admissível mais elevados, mas, por outro lado, requer um conjunto de padrões muito mais rigorosos de projeto e métodos de análise de tensão mais detalhados, incluindo por ex., o uso de análise por elementos finitos (FEA-Finite Element Analysis), resultando em projetos mais complexos, em comparação com a Divisão 1.

A Divisão 2 também possui requisitos de inspeção mais extensos durante a fabricação, incluindo métodos adicionais de Exames Não Destrutivos (END) e testes mais rigorosos, bem como documentação mais abrangente do processo de fabricação.

No ASME VIII 2 o projeto é por análise das tensões atuantes, pois, o fator de segurança do projeto é inferior ao da Divisão 1, logo permitindo tensões admissíveis superiores e espessuras de parede menores, por outro lado, requer especificações de material de construção mais rigorosas e práticas de inspeção e teste da fabricação mais detalhadas..

2.3. ASME Sec. VIII Div. 3

Esta Divisão 3 está focada no projeto e construção de vasos de alta pressão. usados em indústrias como óleo&gás, processamento químico e geração de energia, abrangendo materiais, projeto, fabricação, exame, inspeção, testes, certificação e alívio de pressão, destinados a pressões de operação superiores a 70 MPa (10.000 psi).

A Divisão 3 é aplicada para vasos de pressão sujeitos a pressões internas ou externas superiores às cobertas pela Divisão 1 ou Divisão 2 e fornece diretrizes para projetar vasos de pressão capazes de suportar pressões e temperaturas extremamente altas, garantindo segurança e confiabilidade em aplicações industriais críticas.

As regras desta Divisão constituem requisitos para projeto, construção, inspeção e proteção contra sobrepressão de vasos de pressão, com pressões de projeto geralmente acima de 10 ksi (70 MPa).

2.4. Resumo

Resumidamente, o Código ASME Seção VIII consiste em três divisões.

A Divisão 1 está concentrada em uma abordagem de projeto por regras aprovadas pela prática, não requer a avaliação detalhada de todas as tensões atuantes e a pressão interna para projeto está limitada a 3 000 psi.

A Divisão 2 apresenta uma abordagem de projeto por análise das tensões atuantes e práticas mais rigorosas de especificação dos materiais construtivos e de inspeção e testes de fabricação e a pressão interna para projetos limitados a 10 000 psi.

A Divisão 3 destina-se a projetar vasos de pressão que necessitam de operação a uma pressão, interna ou externa, acima de 10 000 psi.

Os projetos devem *satisfazer* todos os requisitos aplicáveis para a combinação mais severa de cargas e limites de tensão equivalentes.

3. Tensão admissível versus stress intensity

A *stress intensity* é definida como duas vezes a tensão de cisalhamento máxima.

Em outras palavras, a *stress intensity* é a diferença entre a tensão principal algebricamente maior e a tensão principal algebricamente menor em um determinado ponto.

A *stress intensity* é a diferença máxima entre as tensões principais, isto, é igual ao dobro da tensão de cisalhamento máxima, e é o fator de limitação das tensões atuantes, quando se executa a análise de tensões por ex. pelo método dos elementos finitos.

As tensões de tração são consideradas positivas e as tensões de compressão são consideradas negativas.

Já a tensão admissível *allowable stress* é o valor permitido, determinado com base na tensão de ruptura, na tensão de escoamento e nos dados de fluência, o menor valor dentre os três governa.

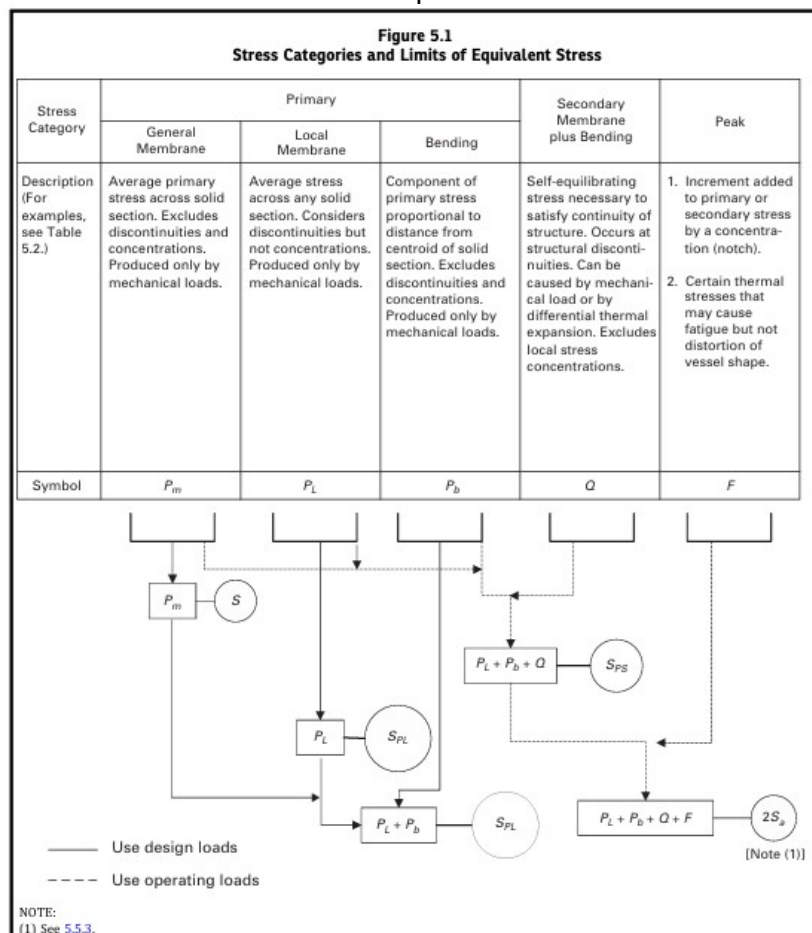
A tensão admissível *allowable stress* é baseada na teoria de falha pela tensão principal máxima (Teoria de Rankine) e a *stress intensity* é baseada na teoria de falha por tensão de cisalhamento máxima (Teoria de Tresca).

As fórmulas para calcular a espessura da parede, no caso do Código ASME VIII-1, são baseadas na tensão principal máxima e as fórmulas dos Códigos ASME VIII-2 e 3 são baseadas na tensão de cisalhamento máxima.

Em geral, as tensões através da parede de um vaso de pressão são compostas por membrana primária, flexão primária e um componente de tensão de pico (empregada para a verificação da fadiga).

As tensões primárias podem ser classificadas como secundárias, dependendo de serem ou não dependentes de deformação.

O Código ASME VIII-2 orienta como classificar cada tipo de tensão e como combiná-las.



Ao se linearizar as tensões através da espessura, a análise de tensões (FEA-Finite Element Analysis) remove o componente de tensão de pico, para deixar a tensão primária mais a tensão de flexão na superfície, que é então comparada com o fator da tensão máxima *stress intensity* de projeto (relacionado à tensão de escoamento).

A tensão primária ou de membrana pode ser considerada como a tensão média através da espessura da parede e a tensão primária mais a tensão de flexão é a tensão atuante na superfície.

Tensão Primária

É uma tensão normal ou uma tensão de cisalhamento, desenvolvida pela carga imposta, que é necessária para satisfazer as leis de equilíbrio de forças e momentos externos e internos.

A característica básica de uma tensão primária é que ela não é autolimitada.

Tensões primárias que excedem consideravelmente o limite de escoamento resultam em falha ou pelo menos em distorção grosseira.

Uma tensão térmica não é classificado como tensão primária.

Exemplos de tensão primário são:

(1) tensão longitudinal média através da parede e tensão circunferencial média através da parede em um cilindro fechado sob pressão interna, longe de descontinuidades

(2) tensão de flexão na porção central de um tampo plano devido à pressão.

Tensão Secundária

É uma tensão normal ou uma tensão de cisalhamento desenvolvida pela restrição de partes adjacentes.

A característica básica de uma tensão secundária é que ela é autolimitada.

O escoamento local e pequenas distorções podem satisfazer as condições que causam a ocorrência da tensão e não é esperada ser causa de falha.

Exemplos de tensão secundário são:

(1) tensões térmicas

(2) tensão de flexão em uma descontinuidade estrutural

O ASME VIII identificou vários possíveis modos de falha, a serem considerados nos cálculos de dimensionamento e verificação de vasos de pressão por análise de tensões (design by analysis):

- Deformação elástica excessiva, incluindo instabilidade elástica;
- Deformação plástica excessiva (Colapso plástico, que é a perda de equilíbrio global da estrutura quando submetido à carga limite);
- Fratura frágil;
- Deformação por fluência;
- Instabilidade plástica – plasticidade incremental (ratching);
- Vibração dinâmica;
- Fadiga de baixo ciclo (alta deformação);
- Corrosão por tensão;
- Corrosão-fadiga.

No estabelecimento dos limites aceitáveis de tensão para os mecanismos de falha elencados, as atenções foram concentradas em três abordagens abaixo listadas:

(a) Evitar que ocorra deformação global ou ruptura do vaso;

(b) Evitar o ratching;

(c) Evitar a fadiga.

Nota:

O comportamento de shakedown plástico é aquele em que o estado estacionário é um circuito elástico-plástico fechado, sem acúmulo líquido de deformação plástica.

O comportamento de hatching é aquele em que o estado estacionário é um loop elástico-plástico aberto, com o material acumulando uma deformação líquida durante cada ciclo.

4. Fatores de segurança e tensões admissíveis

As tensões máximas admissíveis e os fatores de segurança correspondentes, para projeto de vasos de pressão e os critérios de obtenção dessas tensões constam do Código ASME Section II Part D Materials Properties.

4.1. Para os vasos de pressão de projeto e construção pelo Código ASME VIII-1

As bases para o estabelecimento de valores de tensões admissíveis para o projeto de vasos de pressão são:

- a. Os valores de tensão de tração máximos admissíveis para diferentes materiais, exceto parafusos, são fornecidos no Código ASME Seção II, Parte D, Subparte 1. Parte D Tabelas 1A e 1B

- Table 1A Section I; Section III, Division 1, Classes 2 and 3; **Section VIII, Division 1**; and Section XII Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials
- Table 1B Section I; Section III, Division 1, Classes 2 and 3; **Section VIII, Division 1**; and Section XII Maximum Allowable Stress Values, S, for Nonferrous Materials.

b. A tensão de compressão longitudinal máxima admissível a ser usada no projeto de cascos ou tubos cilíndricos, sem costura ou soldados de topo, deve ser calculada conforme o Código ASME VIII-1 parágrafo UG-23 *Maximum Allowable Stress Values* item (b) *The maximum allowable longitudinal compressive stress*.

As propriedades mecânicas consideradas e os fatores de segurança aplicados para estabelecer as tensões máximas admissíveis, excet parafusos, são conforme Tabela Table 1-100 *Criteria for Establishing Allowable Stress Values for Table 1A and 1B* e apresentados a seguir.

(a) Em temperaturas abaixo da faixa de resistência à fluência e em que a tensão de ruptura governa, o valor máximo de tensão admissível a tração é o menor dentre os seguintes:

- (1) a tensão mínima de ruptura à tração na temperatura ambiente dividida por 3,5
- (2) a tensão mínima de ruptura à tração na temperatura de projeto dividida por 3,5
- (3) dois terços do limite da tensão mínima de escoamento à temperatura ambiente
- (4) dois terços do limite da tensão mínima de escoamento à temperatura de projeto

(b) Em temperaturas na faixa em que a resistência à fluência governa, o valor máximo de tensão admissível para todos os materiais não deve exceder o menor dentre os seguintes:

- (1) 100% da tensão para produzir uma taxa de fluência de 0,01%/1.000 h
- (2) 100Favg% da tensão média para causar ruptura ao final de 100.000 h
- (3) 80% da tensão mínima para causar ruptura ao final de 100.000 h

Table 1-100
Criteria for Establishing Allowable Stress Values for Tables 1A and 1B

Product/Material	Room Temperature and Below		Above Room Temperature						
	Tensile Strength	Yield Strength	Tensile Strength		Yield Strength		Stress Rupture		Creep Rate
Wrought or cast ferrous and nonferrous	$\frac{S_T}{3.5}$	$\frac{2}{3} S_Y$	$\frac{S_T}{3.5}$	$\frac{1.1}{3.5} S_{TRT}$	$\frac{2}{3} S_Y$	$\frac{2}{3} S_Y R_Y$ or $0.9 S_Y R_Y$ [Note (1)]	$F_{avg} S_{Ravg}$	$0.8 S_{Rmin}$	$1.0 S_c$
Welded pipe or tube, ferrous and nonferrous	$\frac{0.85}{3.5} S_T$	$\frac{2}{3} \times 0.85 S_Y$	$\frac{0.85}{3.5} S_T$	$\frac{(1.1 \times 0.85)}{3.5} S_{TRT}$	$\frac{2}{3} \times 0.85 S_Y$	$\frac{2}{3} \times 0.85 S_Y R_Y$ or $0.9 \times 0.85 S_Y R_Y$ [Note (1)]	$(F_{avg} \times 0.85) S_{Ravg}$	$(0.8 \times 0.85) S_{Rmin}$	$0.85 S_c$

4.2. Para os vasos de pressão de projeto e construção pelo Código ASME VIII-2

Os valores de tensão de tração máximos admissíveis para diferentes materiais, exceto parafusos, são fornecidos no Código ASME Seção II, Parte D, Subparte 1. Tabelas Tables 2A e 2B e Tables 5A e 5B.

- Table 2A Section III, Division 1, Classes 1, MC, and CS; Section III, Division 3; and Section III, Division 5 Design Stress Intensity Values, Sm, and **Section VIII, Division 2, Class 1** Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials
- Table 2B Section III, Division 1, Classes 1, MC, and CS; Section III, Division 3; and Section III, Division 5 Design Stress Intensity Values, Sm, and **Section VIII, Division 2, Class 1** Maximum Allowable Stress Values, S, for Nonferrous Materials
- Table 5A **Section VIII, Division 2, Class 2** Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials
- Table 5B **Section VIII, Division 2, Class 2** Maximum Allowable Stress Values, S, for Nonferrous Materials

As tensões admissíveis a serem usadas nesta Divisão para todas as formas de produtos, exceto parafusos, são fornecidas nas tabelas a seguir:

(a) Aço carbono e aço de baixa liga

- (1) Class 1 – ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 2A
- (2) Class 2 – ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 5A

(b) Aços de alta resistência temperados e revenidos

- (1) Class 1 – ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 2A
- (2) Class 2 – ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 5A

(c) Aço de alta liga

- (1) Class 1 – ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 2A
- (2) Class 2 – ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 5A

Nota:

Vaso de pressão Class 1 – vaso projetado usando as tensões admissíveis do Código ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 2A ou Table 2B.

Vaso de pressão Class 2 – vaso projetado usando as tensões admissíveis do Código ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 5A ou Table 5B.

Os valores máximos de tensão *stress intensity* em qualquer temperatura são os valores mais baixos obtidos a partir dos critérios da Tabela Table 2-100.

Os valores máximos de tensão *stress intensity* de projeto das Tabelas Tables 2A e Table 2B, em qualquer temperatura, não devem ser maiores que o menor dentre os seguintes valores:

- (a) Um terço da resistência à tração de ruptura mínima à temperatura ambiente.
- (b) Um terço da resistência à tração de ruptura à temperatura de projeto.
- (c) Dois terços da tensão mínima de escoamento à tração à temperatura ambiente.
- (d) Dois terços da tensão mínima de escoamento à tração à temperatura de projeto .

Table 2-100(a)
Criteria for Establishing Design Stress Intensity Values for Tables 2A and 2B

Product/Material	Room Temperature and Below		Above Room Temperature			
	Tensile Strength	Yield Strength	Tensile Strength		Yield Strength	
Wrought or cast, ferrous and nonferrous	$\frac{S_T}{3}$	$\frac{2}{3}S_Y$	$\frac{S_T}{3}$	$\frac{1.1}{3} S_T R_T$	$\frac{2}{3}S_Y$	$\frac{2}{3} S_Y R_Y$ or $0.9 S_Y R_Y$ [Note (1)]
Welded pipe or tube, ferrous and nonferrous	$\frac{0.85}{3} S_T$	$\frac{2}{3} \times 0.85 S_Y$	$\frac{0.85}{3} S_T$	$\frac{1.1 \times 0.85}{3} S_T R_T$	$\frac{2}{3} \times 0.85 S_Y$	$\frac{2}{3} \times 0.85 S_Y R_Y$ or $0.9 \times 0.85 S_Y R_Y$ [Note (1)]

Os valores máximos de tensão admissíveis para as Tabelas Tables 5A e 5B em qualquer temperatura são os valores mais baixos obtidos a partir dos critérios da Tabela Table 10-100.

As propriedades mecânicas consideradas e os fatores aplicados para estabelecer as tensões máximas admissíveis são os seguintes

(a) Em temperaturas abaixo da faixa em que a resistência à fluência e em que a tensão de ruptura governa, as tensões admissíveis são o menor dentre os seguintes valores:

- (1) a resistência à tensão de tração mínima de ruptura à temperatura ambiente dividida por 2,4
- (2) a resistência à tensão de tração mínima de ruptura à temperatura de projeto dividida por 2,4
- (3) a tensão mínima de escoamento à tração à temperatura ambiente dividida por 1,5
- (4) a tensão mínima de tensão de escoamento à tração à temperatura de projeto dividida por 1,5, exceto para aços inoxidáveis austeníticos, ligas de níquel, ligas de cobre e ligas de cobalto.

(b) Em temperaturas na faixa em que a fluência governa, o valor máximo de tensão admissível para todos os materiais não deve exceder o menor dos seguintes:

- (1) 100% da tensão média para produzir uma taxa de fluência de 0,01%/1000 h
- (2) 100Favg% da tensão média para causar ruptura ao final de 100.000 h
- (3) 80% da tensão mínima para causar ruptura ao final de 100.000 h.

Table 10-100
Criteria for Establishing Allowable Stress Values for Tables 5A and 5B

Product/Material	Below Room Temperature		Room Temperature and Above			
	Tensile Strength	Yield Strength	Tensile Strength	Yield Strength	Stress Rupture	Creep Rate
All wrought or cast ferrous and nonferrous product forms except bolting, and except for austenitic stainless steel, nickel alloy, copper alloy, and cobalt alloy product forms having an S_y/S_T ratio less than 0.625	$\frac{S_T}{2.4}$	$\frac{S_y}{1.5}$	$\frac{S_T}{2.4}$	$\frac{R_y S_y}{1.5}$	$\text{Min.}(F_{\text{avg}} S_{R\text{avg}}, 0.8 S_{R\text{min}})$	$1.0 S_{C\text{avg}}$
All wrought or cast austenitic stainless steel, nickel alloy, copper alloy, and cobalt alloy product forms except bolting, having an S_y/S_T ratio less than 0.625 [Note (1)]	$\frac{S_T}{2.4}$	$\frac{S_y}{1.5}$	$\frac{S_T}{2.4}$	$\text{Min.}(\frac{S_y}{1.5}, \frac{0.9 S_y R_y}{1.0})$	$\text{Min.}(F_{\text{avg}} S_{R\text{avg}}, 0.8 S_{R\text{min}})$	$1.0 S_{C\text{avg}}$

4.3. Para os vasos de pressão de projeto e construção pelo Código ASME VIII-3

Table 9-100.1
Load Case Combinations and Allowable Stresses for an Elastic Analysis

Load Combinations [Note (1)]	Stress Assessment and Allowable Stress [Note (2)] [Note (4)]				
	General Primary Membrane	Local Primary Membrane	Local Primary Membrane Plus Bending	Range of Primary Plus Secondary	Range of Primary Plus Secondary Plus Peak
	P_m	P_L	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$	$P_L + P_b + Q + F$
Design					
(1) $P_D + P_s + D$	$k_{c1} S_y / 1.5$	$k_{c1} S_y$	$\alpha k_{c1} S_y / 1.5$	Not applicable	
(2) $P_D + P_s + D + L + L_A$					
(3) $P_D + P_s + D + L + L_A + T$					
(4) $P_D + P_s + D + S_s$					
(5) $0.6D + (0.6W \text{ or } 0.7E)$ [Note (3)]					
(6) $P_O + P_s + D + (0.6W \text{ or } 0.7E)$					
(7) $P_O + P_s + D + 0.75(L + L_A + T) + 0.75S_s$					
(8) $P_O + P_s + D + 0.75(0.6W \text{ or } 0.7E) + 0.75(L + L_A) + 0.75S_s$					
(9) Other design load combinations as defined in the User's Design Specification					
Operating					
Use same load case combinations for design with maximum operating loads in stead of design loads.	Not applicable			$2S_y$	S_{eq}
Pressure Test					
(18) $P_T + P_s + D + 0.6W_{pt}$	KT-312.3	Not applicable	KT-312.3	Not applicable	

ASME VIII-3 Table 9-100.1 Load case combinations and allowable stresses for an elastic analysis