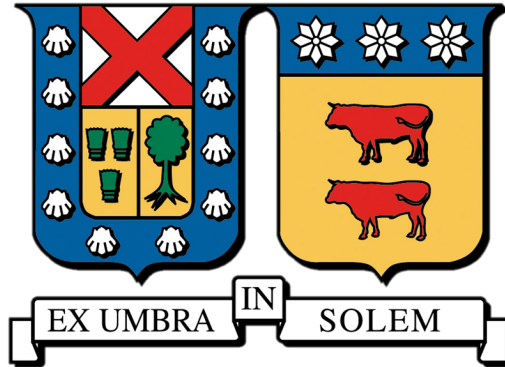


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**"ANÁLISIS TÉCNICO DEL ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE
AMONÍACO LÍQUIDO PARA APLICACIONES INDUSTRIALES SEGÚN
NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES"**

SEBASTIÁN ANDRÉS MUÑOZ VÁSQUEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA:
DR. ING. MARIO TOLEDO T.

PROFESOR CORREFERENTE 1:
ING. RAÚL DÍAZ N. (GREEN I&C)

PROFESOR CORREFERENTE 2:
ING. RAFAEL MENA Y.

VALPARAÍSO, CHILE
2023

Agradecimientos

A mi Familia, especialmente a mi Madre, por apoyarme, quererme y educarme de forma incondicional a lo largo de mi vida; a mis compañeros de la universidad con quienes pude generar un lazo de amistad y me acompañaron en todo el proceso; a mi pareja María Jesús por su apoyo incondicional; a los profesionales de Green I&C: Raúl Díaz, Carlos Soto, Gabriel González y Pedro Olate por darme la oportunidad de formular y desarrollar este trabajo de título; y al profesor Mario Toledo por su amabilidad y profesionalismo al guiarme. A cada uno, muchas gracias.

Resumen

En el contexto nacional del uso de energías renovables para la producción de amoníaco verde, el presente trabajo de titulación se enfocó en el análisis técnico para el almacenamiento de amoníaco líquido en tanques cilíndricos verticales (refrigerado) y su transporte a través de tuberías (no refrigerado), siguiendo normativas nacionales e internacionales.

Para los requisitos de diseño de los tanques de almacenamiento se utilizó la norma API620, mientras que los requisitos de diseño para el sistemas de tuberías fue guiado mediante la norma ASME B31.3. El amoníaco se consideró refrigerado a -33 [°C] para el almacenamiento, mientras que para el transporte por tuberías se consideró líquido a una presión de 10 [bar] y temperatura de 26 [°C].

Las normativas nacionales aplicables incluyen la categorización del amoníaco como un gas tóxico según la norma NCh382, y la identificación de riesgos a través de las normas NCh2190 y NCh1411/4. En el almacenamiento de amoníaco refrigerado, se consideró el Decreto 43 del Ministerio de Salud, que regula las condiciones de seguridad para el almacenamiento de sustancias peligrosas, exigiendo una distancia mínima de 30 [m] entre tanques. Mediante el Decreto 298 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, se regula el transporte de sustancias peligrosas pero por vías terrestres (calles y caminos), por lo que no se pudo aplicar al transporte por tuberías.

El diseño y construcción de los tanques y tuberías deben ser cuidadosamente realizados, utilizando materiales resistentes a la corrosión, tal como se indica en las especificaciones seleccionadas. Para las placas de revestimiento se escogió ASTM A516 Gr. 70, especificación que coincide con el material utilizado en la planta de ENAEX en Mejillones.

Los sistemas de tuberías deben ser diseñados para evitar fallas, manteniendo la flexibilidad necesaria para enfrentar cambios de temperatura y sobrecargas. Para reducir el riesgo de fugas, se prohibió el uso de distintos tipos de accesorios y juntas de tubería. El material de construcción seleccionado para la tubería y la mayoría de sus componentes es igualmente acero al carbono, aunque se acepta el uso de acero inoxidable principalmente para el reemplazo de partes ya existentes. Las tuberías de acero al carbono requieren revestimiento ya sea estén por sobre la superficie o enterradas. El aislamiento se utiliza cuando se transporta amoníaco refrigerado, es decir, a temperaturas menores a 0 [°C]. Se deben realizar análisis de riesgo para identificar posibles fallas en el proceso de almacenamiento y transporte de amoníaco, pues estos podrían generar accidentes catastróficos. Además, para los tanques se deben considerar diferentes situaciones operativas y ambientales para garantizar la seguridad y la integridad de las estructuras.

Abstract

In the national context of the use of renewable energies for the production of green ammonia, this thesis focused on the technical analysis of the storage of liquid ammonia in vertical cylindrical tanks (refrigerated) and its transport through pipes (non-refrigerated), following national and international regulations.

The design requirements for the storage tanks were based on API620, while the design requirements for the piping system were based on ASME B31.3. The ammonia was considered refrigerated at -33 [°C] for storage, while for pipeline transport it was considered liquid at a pressure of 10 [bar] and a temperature of 26 [°C].

Applicable national regulations includes the categorization of ammonia as a toxic gas according to NCh382 and the identification of risks by NCh2190 and NCh1411/4. For the storage of refrigerated ammonia, Decree 43 of the Ministry of Health has been taken into account, which regulates the safety conditions for the storage of hazardous substances and requires a minimum distance of 30 [m] between tanks. Decree 298 of the Ministry of Transport and Telecommunications regulates the transportation of hazardous substances by land (roads and highways), so it could not be applied to pipeline transportation.

The design and construction of the tanks and piping must be carried out carefully, using corrosion-resistant materials as indicated in the selected specifications. For the lining plates, ASTM A516 Gr. 70 was chosen, a specification that corresponds to the material used at the ENAEX plant in Mejillones.

Piping systems must be designed to prevent failures while maintaining the necessary flexibility to withstand temperature changes and overloads. To reduce the risk of leakage, the use of different types of pipe fittings and joints was prohibited. The material of construction selected for the piping and most of its components is also carbon steel, although the use of stainless steel is acceptable primarily for replacement of existing parts. Carbon steel piping requires coating, whether above-ground or buried. Insulation is used when transporting refrigerated ammonia, i.e. at temperatures below 0 [°C].

Risk analyses should be performed to identify potential failures in the ammonia storage and transportation process that could lead to catastrophic accidents. In addition, various operational and environmental situations must be considered for tanks to ensure the safety and integrity of the structures.

Glosario de términos

Abreviaturas

ABS	American Bureau of Shipping
ALE	Terremoto de nivel réplica
API	Instituto Estadounidense del Petróleo
ASME	Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
BPVC	Código de Calderas y Recipientes a Presión
CCS	Captura y almacenamiento de carbono
CGA	Compressed Gas Association
DNV	Det Norske Veritas
GLP	Gas licuado del petróleo
Gr	Grado
IACS	Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación
IAPH	Asociación Internacional de Puertos y Terminales
IGC	International Gas Carrier
IMO	Organización Marítima Internacionan
ISO	Organización Internacional de Normalización
IMDG	Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas
LNG	Gas natural licuado
LHV	Poder calorífico inferior
Max	Máximo
MGO	Marine gasoil
MIG	Gas inerte de metal
Min	Mínimo
MINSAL	Ministerio de Salud
MTT	Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones
NCh	Norma chilena
NTP	Sínstesis de plasma no térmico
NPS	Tamaño nominal de tubería
GEI	Gases de efecto invernadero

OBE	Terremoto en funcionamiento base
PQC	Productos Químicos Chile
SCC	Agrietamiento por corrosión bajo tensión
SCH	Schedule
SGMF	The Society for Gas as a Marine Fuel
SMAW	Soldadura por arco de metal protegido
SMR	Reformado de metano con vapor
SOLAS	Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar
SSE	Terremoto de parada segura
STD	Estándar
UE	Unión Europea

Fórmulas químicas

CO_2	Dióxido de carbono
H_2	Hidrógeno
H^+	Catión hidrógeno
H_2O	Agua
e^-	Electrón
N_2	Nitrógeno
N_2O	Óxido nitroso
NH_2CONH_2	Urea
NH_3	Amoníaco
NO_x	Óxidos de nitrógeno
O_2	Oxígeno

Lista de símbolos (tanques)

A_i	Coefficiente impulsivo de aceleración	[-]
A_c	Coefficiente convectivo de aceleración	[-]
A_t	Sección transversal del tanque	[in ²]
A_v	Parámetro de aceleración vertical del terremoto	[-]
c	Tolerancia de corrosión	[in]
D	Diámetro nominal	[ft]
E	Eficiencia de la unión de soldadura	[-]
F	Suma de fuerzas verticales	[lbf]
F_c	Esfuerzo de compresión longitudinal admisible	[psi]
F_p	Presión de funcionamiento normal sobre presión de diseño	[-]

F_u	Resistencia a la tensión	[psi]
F_y	Resistencia a la fluencia	[psi]
G	Peso específico del líquido	[-]
H	Altura de diseño del líquido	[ft]
I	Factor de importancia	[-]
J	Relación de anclaje	[-]
K	Coefficiente para ajustar aceleración espectral	[-]
K_s	Factor de agitación	[-]
M_{rw}	Momento sísmico de vuelco en la base del tanque	[lbf-ft]
N_i	Fuerza impulsiva en la carcasa del tanque	[lbf/in]
N_c	Fuerza convectiva en la carcasa del tanque	[lbf/in]
N_h	Fuerza hidrostática debido a presión del producto	[lbf/in]
P	Presión total	[psi]
R	Radio de la pared	[in]
R_c	Radio del tanque	[in]
R_s	Radio del techo	[in]
R_{wi}	Factor de reducción de fuerza para modo impulsivo	[-]
R_{wc}	Factor de reducción de fuerza para modo convectivo	[-]
S_a	Esfuerzo permitido	[psi]
S_{cc}	Esfuerzo de compresión por carga axial	[psi]
S_{cc}	Esfuerzo de compresión longitudinal admisible	[psi]
σ_c	Esfuerzo máximo de compresión longitudinal	[psi]
σ_T	Esfuerzo combinado total en la envoltura	[psi]
S_d	Esfuerzo de diseño	[psi]
S_{D1}	Parámetro de aceleración a periodos de 1 [s]	[-]
S_{DS}	Parámetro de aceleración a periodos cortos	[-]
S_{ms}	Esfuerzo máximo de la membrana	[psi]
S_{ts}	Esfuerzo admisible de tracción	[psi]
t	Espesor revestimiento	[in]
t_a	Espesor de anillo inferior bajo la carcasa	[in]
t_b	Espesor nominal de la placa anular	[in]
t_s	Espesor de capa inferior menos c	[in]
T_1	Fuerza unitaria longitudinal	[lbf/in]
T_2	Fuerza unitaria circunferencial	[lbf/in]
T_C	Periodo natural de agitación	[s]
T_L	Periodo de transición	[s]
W	Peso total de la parte del tanque y su contenido	[lbf]
w_a	Resistencia a levantamiento en región anular	[lbf/ft]

W_c	Parte convectiva efectiva del peso del líquido	[lbf]
W_i	Parte impulsiva efectiva del peso del líquido	[lbf]
w_{int}	Carga circunferencial diseñada de levantamiento	[lbf/ft]
W_p	Peso total del producto	[lbf]
W_r	Peso total de la cubierta fija, armazón y accesorios	[lbf]
w_{rs}	Carga del tejado que actúa sobre la carcasa	[lbf/ft]
W_s	Peso total de la carcasa del tanque y sus accesorios	[psi]
w_t	Peso del tanque y del techo	[lbf/ft]
X_c	Altura de modo convectivo	[ft]
X_i	Altura de modo impulsivo	[ft]
X_r	Altura del centro de gravedad de los accesorios del techo	[ft]
X_s	Altura del centro de gravedad del tanque	[ft]
Y	Distancia entre superficie del líquido y punto de análisis	[ft]

Lista de símbolos (tuberías)

A_f	Sección transversal interna de tubería	[in ²]
A_p	Sección transversal de la tubería	[in ²]
C	Factor de contracurvatura	[-]
C_1	Factor de relajación	[-]
D_{int}	Diámetro interior de tubería	[in]
D_{ext}	Diámetro exterior de tubería	[in]
E_a	Módulo de elasticidad a 21 [°C]	[Msi]
E_m	Módulo de elasticidad a temperatura de diseño	[Msi]
f	Factor de reducción de esfuerzos por efectos cíclicos	[-]
F_a	Fuerza longitudinal por cargas sostenidas	[lbf]
f_m	Valor máximo del factor de intervalo de esfuerzos	[-]
I	Momento de inercia	[in ⁴]
I_a	Índice de fuerza longitudinal sostenida	[-]
I_i	Índice de momento planar sostenido	[-]
I_t	Índice de momento torsional sostenido	[-]
i_i	Factor de intensificación de esfuerzos en plano	[-]
I_o	Índice de momento no planar sostenido	[-]
i_o	Factor de intensificación de esfuerzos fuera del plano	[-]
M_i	Momento de flexión en plano	[lbf-in]
M_o	Momento de flexión fuera de plano	[lbf-in]
M_t	Momento torsional	[lbf-in]

N	Ciclos de desplazamiento completo estimado	[-]
P_j	Presión operativa interna	[psi]
R	Radio exterior de tubería	[in]
R_a	Fuerza o momento de reacción a temperatura instalación	
R_m	Fuerza o momento de reacción máximo	
r_2	Radio medio de sección transversal del ramal	[in]
S_A	Esfuerzo permitido por desplazamiento	[ksi]
S_a	Esfuerzo por fuerza longitudinal sostenida	[psi]
S_b	Esfuerzo por flexión resultante	[psi]
S_c	Esfuerzo permisible a la temperatura mínima esperada	[ksi]
S_E	Esfuerzos por desplazamiento	[psi]
S_h	Esfuerzo permisible a la temperatura máxima esperada	[ksi]
S_L	Suma de esfuerzos longitudinales por cargas sostenidas	[ksi]
S_{occ}	Suma de los esfuerzos ocasionales	[ksi]
S_t	Esfuerzo por torsión	[ksi]
T	Espesor de tubería	[in]
\bar{T}_b	Espesor de tramo coincidente	[in]
\bar{T}_h	Espesor del ramal de tubería	[in]
T_S	Espesor de pared de ramal efectivo	[in]
Z	Módulo de sección de tubería	[in ³]
Z_e	módulo efectivo de sección de ramal	[in ³]

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Producción	2
1.1.2. Uso	6
1.1.3. Almacenamiento y transporte	8
1.2. Motivación	9
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4. Alcances	14
2. Estado actual de la industria: infraestructura y marco regulatorio	16
2.1. Almacenamiento	16
2.2. Transporte	18
2.2.1. Transporte por tuberías	18
2.2.2. Transporte por camiones	19
2.2.3. Transporte por ferrocarriles	19
2.2.4. Transporte marítimo	20
2.3. Normativas	24
2.3.1. Normas nacionales	24
2.3.2. Normas internacionales	29
3. Almacenamiento	35
3.1. Condiciones de diseño	35
3.1.1. Modelos de referencia	36
3.2. Contenedores primario y secundario	39
3.2.1. Requisitos de fabricación para contenedores de líquidos primarios y secundarios y techos de temperatura refrigerada	41
3.2.2. Tratamiento térmico postsoldadura	41
3.2.3. Piezas sin presión	42
3.3. Contenedor de vapor de producto caliente	42
3.4. Tuberías	43
3.5. Esfuerzos	43
3.5.1. Cargas de diseño y combinaciones de carga	43
3.5.2. Combinación de cargas de diseño para tanques de doble pared	44

3.6.	Funcionamiento	45
3.6.1.	Niveles y volúmenes de líquidos	45
3.6.2.	Criterios de rendimiento	46
3.7.	Diseño de la fundación	48
3.8.	Selección de configuración	50
3.8.1.	Especificaciones	50
3.8.2.	Características	50
3.9.	Aplicación de normativa nacional	52
3.10.	Fallas a prevenir	52
3.11.	Análisis de esfuerzos	56
4.	Transporte	70
4.1.	Condiciones y criterios de diseño	71
4.1.1.	Condiciones de diseño	71
4.1.2.	Criterios de diseño	72
4.2.	Diseño	75
4.3.	Requisitos para componentes metálicos de tuberías	76
4.4.	Requisitos para juntas metálicas de tuberías	78
4.5.	Flexibilidad y soporte de tuberías	79
4.5.1.	Flexibilidad	79
4.5.2.	Soporte	81
4.6.	Materiales	84
4.7.	Fabricación de tuberías metálicas	86
4.8.	Selección de especificaciones para sistemas de tuberías	88
4.9.	Aplicación de normativa nacional	90
4.10.	Fallas a prevenir	90
4.11.	Análisis de esfuerzos	94
5.	Conclusiones	104
	Bibliografía	108
	Anexos	115
A.	Tabla R-1 API 620: Normas para materiales a temperatura de producto.	116
B.	Tabla 4-1 API 620: Requisitos mínimos de las especificaciones de placa que deben utilizarse para las temperaturas de diseño del metal.	117
C.	Tabla 5-1 API 620: Valores de tensión máxima admisible para tracción simple.	119
D.	Tabla A.1 API625: Propiedades físicas de gases.	122
E.	Conceptos de soldadura utilizados.	123
F.	Resistencia térmica ASTM C549.	124
G.	Estándares dimensionales para piezas forjadas ASTM A350.	125
H.	Requisitos de examen radiográfico/ultrasónico para uniones de juntas soldadas a tope en contenedores de líquidos primarios y secundarios.	126
I.	Requisitos de espesor de la placa anular inferior.	127

J.	Criterios de la relación de anclaje.	127
K.	Eficiencias máximas admisibles para uniones soldadas por arco.	128
L.	Factor de importancia.	129
M.	Factor de agitación.	129
N.	Materiales de las placas y esfuerzos admisibles.	130
Ñ.	Datos de expansión térmica total para metales.	132
O.	Coefficientes térmicos para metales.	136

Índice de Tablas

1.1.	Propiedades del amoníaco [2].	1
1.2.	Clasificación del amoníaco por colores [9].	2
1.3.	Usos del amoníaco según industria [19].	7
1.4.	Comparación de diferentes combustibles marítimos [33].	13
2.1.	Puntos de evaporación del amoníaco [40].	19
2.2.	Distancias de seguridad para tanques de gases tóxicos [56].	27
2.3.	Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco [5].	30
2.4.	Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco (continuación) [5].	31
2.5.	Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco (continuación) [5].	32
2.6.	Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco (continuación) [5].	33
3.1.	Selección de especificaciones para tanques [59].	50
3.2.	Fallas en instrumentos de seguridad de unidad de almacenamiento de amoníaco [74].	55
3.3.	Probabilidades de falla en tanque almacenador de amoníaco refrigerado [75].	56
3.4.	Variables consideradas para análisis de esfuerzo de ejemplo [76].	67
3.5.	Resultados análisis placas de revestimiento laterales.	67
3.6.	Resultados análisis esfuerzo máximo de compresión sobre pared cilíndrica.	67
3.7.	Resultados análisis esfuerzo máximo de membrana de la placa de revestimiento en condiciones de operación.	67
3.8.	Resultados análisis diseño placa anular.	68
3.9.	Resultados análisis esfuerzo de compresión carcasa-membrana.	68
3.10.	Resultados análisis esfuerzo dinámico del aro líquido.	68
3.11.	Resultados análisis placa del techo.	68
4.1.	Estándares dimensionales para componentes de tuberías [39] [80].	76
4.2.	Especificaciones técnicas para tuberías de amoníaco líquido no refrigerado [39].	88
4.3.	Especificaciones técnicas para componentes de tuberías de amoníaco líquido no refrigerado [39].	89
4.4.	Datos geométricos ramal.	102
4.5.	Datos geométricos cabezal.	102
4.6.	Momentos para cálculo de esfuerzos por desplazamiento.	102

4.7.	Fuerza, momentos y presión interna para cálculo de esfuerzos por cargas sostenidas.	102
4.8.	Esfuerzos por desplazamiento en ramal.	103
4.9.	Esfuerzos por cargas sostenidas en ramal.	103

Índice de Ilustraciones

1.1.	Métodos de producción de amoníaco en 2020 [4].	3
1.2.	Proceso de Haber-Bosch para producción de amoníaco [10].	4
1.3.	Usos finales del amoníaco y derivados [18].	7
1.4.	Corte esquemático de tubería submarina ENAEX [5].	9
1.5.	Densidad energética volumétrica de una serie de combustibles [9].	12
2.1.	Tipos de tanques para almacenamiento de amoníaco refrigerado [37].	17
2.2.	Sección prismática de un tanque de almacenamiento tipo A [45].	21
2.3.	Tanque de almacenamiento tipo B [47].	21
2.4.	Tanque de almacenamiento cilíndrico tipo C [47].	22
2.5.	Tanque de almacenamiento bilobular tipo C [45].	22
2.6.	Tanque de almacenamiento tipo membrana [45].	23
2.7.	Flujos comerciales mundiales de amoníaco en 2019 [49].	23
2.8.	Distintivo de seguridad para gases tóxicos [52].	25
2.9.	Identificación de riesgos de materiales NCh1411/4 [54].	25
2.10.	Señal de seguridad para amoníaco según Nch1411/4 [55].	26
3.1.	Tanque de acero de pared simple con dique [60].	35
3.2.	Sistema de Tanque de Contención Simple. Pared simple con contenedor primario de acero y aislamiento externo [61].	36
3.3.	Sistema de Tanque de Contención Simple. Doble pared con recipiente primario de acero y recipiente de vapor de acero [61].	37
3.4.	Sistema de Tanque de Contención Simple. Pared simple con contenedor primario de acero y aislamiento en cubierta suspendida (alternativa) [61].	38
3.5.	Sistema de Tanque de Contención Simple. Doble pared con recipiente primario de acero y contenedor de gas de purga de acero (alternativa) [61].	39
3.6.	Sección transversal de grieta causada por SCC [60].	53
3.7.	Unidad de almacenamiento de amoníaco [74].	55
3.8.	Diagrama de esfuerzos longitudinales (σ_x) y circunferenciales (σ_y) [76].	58
3.9.	Propiedades ASTM A516m Gr. 485 [78].	65
3.10.	Propiedades ASTM A516 Gr. 70 [79].	65
4.1.	Tuberías de amoníaco [81].	70
4.2.	Encabezado Tabla A-1 ASME B31.3 [80].	73
4.3.	Encabezado Tabla A-2 ASME B31.3 [80].	73
4.4.	Curvas Figura 323.2.2A: Temperaturas mínimas para materiales de acero al carbono sin pruebas de impacto [80].	74
4.5.	Encabezado Tabla A-1B ASME B31.3 [80].	74

4.6.	Extracto de Tabla C-6 ASME B31.3: Módulo de elasticidad para metales [80].	80
4.7.	Extracto de Apéndice D ASME B31.3: Factores de flexibilidad y de intensificación de esfuerzos [80].	81
4.8.	Materiales de construcción utilizados en las líneas de amoníaco líquido en varios Estados miembros de la UE [40].	85
4.9.	Extracto de Tabla 330.1.1 norma Asme B31.3 [80].	86
4.10.	Extracto de Tabla 331.1.1 norma Asme B31.3 [80].	87
4.11.	Corrosión externa bajo las abrazaderas de tuberías [40].	91
4.12.	Corrosión en uniones soldadas [40].	91
4.13.	Ejemplo de barrera de seguridad de acero a lo largo de una carretera [40].	92
4.14.	Ejemplo de barrera de seguridad con construcción de jaula, que protege tuberías en una alcantarilla [40].	92
4.15.	Factor del intervalo de esfuerzos, f [80].	95
4.16.	Esfuerzos permitidos básicos en tensión para aceros especificados, S_c y S_h [80].	96
4.17.	Esquema para Momentos en curvas [80].	97
4.18.	Esquema para Momentos en conexiones a ramal [80].	97
4.19.	Unión en T considerada para ejemplo [80].	101
A.1.	Normas para materiales a temperatura de producto [59].	116
B.1.	Requisitos mínimos de las especificaciones de placa que deben utilizarse para las temperaturas de diseño del metal [59].	117
B.2.	Requisitos mínimos de las especificaciones de placa que deben utilizarse para las temperaturas de diseño del metal (continuación) [59].	118
C.1.	Valores de tensión máxima admisible para tracción simple [59].	119
C.2.	Valores de tensión máxima admisible para tracción simple (continuación) [59].	120
C.3.	Valores de tensión máxima admisible para tracción simple (continuación) [59].	121
D.1.	Propiedades físicas de gases [61].	122
E.1.	Unión a tope [96].	123
E.2.	Soldadura a tope con penetración completa [98].	123
E.3.	Uniones de filete [96].	123
E.4.	Soldadura intermitente [99].	124
E.5.	Soldadura solapada [100].	124
F.1.	Resistencia térmica ASTM C549 [101].	124
G.1.	Estándares dimensionales para piezas forjadas ASTM A350 [71].	125
H.1.	Requisitos de examen radiográfico/ultrasónico para uniones de juntas soldadas a tope en contenedores de líquidos primarios y secundarios [59].	126
I.1.	Requisitos de espesor de la placa anular inferior [59].	127
J.1.	Criterios de la relación de anclaje [77].	127
K.1.	Eficiencias máximas admisibles para uniones soldadas por arco [59].	128
L.1.	Factor de importancia [77].	129
M.1.	Factor de agitación [77].	129
N.1.	Materiales de las placas y esfuerzos admisibles [77].	130

N.2.	Materiales de las placas y esfuerzos admisibles (continuación) [77].	131
Ñ.1.	Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales [80].	132
Ñ.2.	Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales (continuación) [80].	133
Ñ.3.	Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales (continuación) [80].	134
Ñ.4.	Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales (continuación) [80].	135
O.1.	Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales [80].	136
O.2.	Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales (continuación) [80].	137
O.3.	Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales (continuación) [80].	138
O.4.	Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales (continuación) [80].	139

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El amoníaco (NH_3) es un compuesto químico formado por una molécula de nitrógeno y tres de hidrógeno. A condiciones atmosféricas de temperatura y presión, es un gas incoloro, con un olor muy penetrante. Esta forma de amoníaco es conocida como amoníaco gaseoso o anhidro (“sin agua”) [1]. En la Tabla 1.1 se indican las propiedades del amoníaco:

Tabla 1.1: Propiedades del amoníaco [2].

Propiedad	Valor
Densidad energética [MJ/L]	12,9
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	18,8
Calor de vaporización [kJ/kg]	1.371
Temperatura de autoignición [°C]	651
Densidad de líquido [kg/m ³]	696 (a -33 [°C])
Temperatura de llama adiabática a 1 bar [°C]	1.800
Peso molecular [g/mol]	17,031
Punto de fusión [°C]	-77,7
Punto de ebullición [°C]	-33
Punto de inflamación [°C]	132
Temperatura crítica [°C]	132,25
Presión crítica [bar]	113
Rango inflamable en aire seco (%)	15,15 a 27,35
Energía mínima de ignición [mJ]	8
Número de Cetano	0
Número de Octano	~130

Comúnmente es producido mediante un proceso llamado Haber-Bosch, creado a ini-

cios del siglo XX, en donde el nitrógeno atmosférico (N_2) reacciona con hidrógeno (H_2) sobre un catalizador a altas temperaturas y presiones para la síntesis de amoníaco. Se suele almacenar en forma líquida a presión atmosférica y a $-33,6$ $^{\circ}C$ [3].

El amoníaco es un producto químico ampliamente comercializado en todo el mundo cuyas aplicaciones derivadas incluyen la producción de fertilizantes, explosivos, refrigerantes, entre varios otros. Suponiendo un valor medio de 300 dólares por cada tonelada métrica de amoníaco para la última década, el mercado mundial posee un tamaño de alrededor de 55.000 millones de dolares anuales [4].

Actualmente, se producen alrededor de 185 millones de toneladas de amoníaco al año en el mundo, de los cuales el 80 % se utiliza como materia prima para fertilizantes y el otro 20 % para la producción de químicos industriales [5]. El amoníaco representa aproximadamente el 45 % del consumo mundial de hidrógeno, lo cual lo convierte en el mayor consumidor de hidrógeno en la actualidad [6].

En particular, el uso actual del amoníaco está enfocado en la producción de fosfato de amoníaco, nitrato de amonio y urea, los cuales corresponden a las principales materias primas para producir fertilizantes, productos químicos e industriales [7]. Además de esto, se está estudiando su uso como combustible, orientado principalmente al transporte marítimo y generación eléctrica estacionaria [3].

En Chile, prácticamente el total del amoníaco es utilizado en las operaciones de la empresa Enaex (Empresa Nacional de Explosivos), que importa este compuesto principalmente de Estados Unidos para la producción de nitrato de amonio. Durante el año 2022, la compañía produjo 805 mil toneladas de nitrato de amonio en el complejo Prillex América (Mejillones), que es el mayor complejo productivo de Nitrato de Amonio de grado explosivo a nivel mundial, con una capacidad productiva nominal de 850 mil toneladas anuales [8].

Según el proceso y la fuente de energía en la producción del hidrógeno, el amoníaco se puede clasificar con los siguientes colores:

Tabla 1.2: Clasificación del amoníaco por colores [9].

Color	Fuente primaria de energía	Proceso
NH_3 Gris	Gas natural, carbón.	SMR o gasificación del carbón
NH_3 Azul	Gas natural	SMR con tecnología CCS
NH_3 Verde	Energías renovables	Electrólisis

1.1.1. Producción

Actualmente, el amoníaco es una de las sustancias naturales más ampliamente producidas en el mundo, con una producción global anual de entre 150 y 180 millones de

toneladas [3]. Prácticamente el 100 % del amoníaco es producido mediante el uso de combustibles fósiles, principalmente mediante el reformado de gas natural y la gasificación con carbón [5]. La producción de esta forma de amoníaco es responsable de alrededor del 2 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial [3].

El amoníaco es comúnmente producido mediante un proceso de dos partes principales: en primer lugar, se obtiene hidrógeno y nitrógeno por separado, y segundo, se realiza la síntesis del amoníaco a través del proceso de Haber-Bosch [3].

Para obtener el hidrógeno, las principales formas utilizadas actualmente son el reformado de gas natural y el proceso de gasificación con carbón o biomasa. El nitrógeno se suele obtener incorporando una unidad de separación de aire. Posteriormente, el nitrógeno atmosférico reacciona con el hidrógeno a alta presión (de 150 a 300 [bar]) y temperatura (350 a 500 [°C]) sobre un catalizador (proceso Haber-Bosch) para producir amoníaco [3][9]. La reacción química es la siguiente:



Según la forma de obtención del hidrógeno, en 2020 los métodos de producción de amoníaco se distribuyeron como se observa en la Figura 1.1:

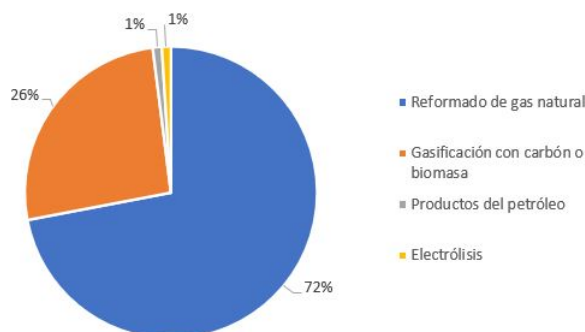


Figura 1.1: Métodos de producción de amoníaco en 2020 [4].

En la Figura 1.2 se muestra un esquema simplificado del método convencional de producción de amoníaco obteniendo el hidrógeno mediante reformado de gas natural.

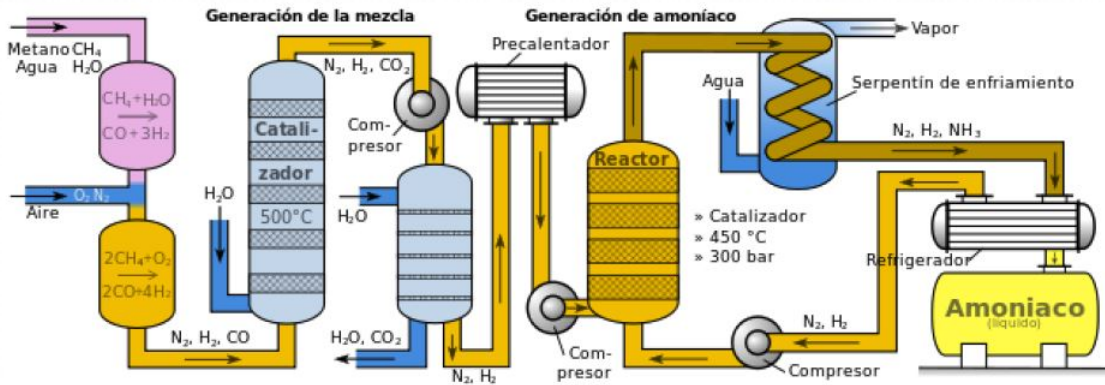


Figura 1.2: Proceso de Haber-Bosch para producción de amoníaco [10].

El método de Haber-Bosch es un proceso que se ha optimizado con el tiempo, pero sigue teniendo dos principales inconvenientes: el primero es la generación de grandes emisiones de GEI, que superan los $2,16 \text{ [kg-CO}_2\text{/kg-NH}_3\text{]}$; el segundo, el elevado consumo energético, que supera los $30 \text{ [GJ/ton-NH}_3\text{]}$, debido principalmente a las condiciones de operación, que involucran una alta presión y temperatura [11].

Gran parte de las plantas de producción de amoníaco utilizan instalaciones antiguas, por lo que se debe destacar que pueden tener un consumo energético de alrededor del 20 % más alto que las instalaciones nuevas [12].

Respecto al consumo de agua, sin considerar pérdidas, es necesario un mínimo de $1,5 \text{ [ton-H}_2\text{O/ton-NH}_3\text{]}$, por lo que para regiones áridas, como Chile, se debe sobreestimar el consumo de agua según las condiciones específicas del lugar, pues se proyectan mayores pérdidas en el proceso. Además del clima, si se considera la producción de amoníaco en Chile, la escasez hídrica obligaría a utilizar procesos como la desalinización de agua de mar, que en particular añade un costo adicional energético de $3 \text{ a } 5 \text{ [kWh/ton-H}_2\text{O]}$ [13].

Tomando en consideración los inconvenientes ambientales, energéticos y económicos asociados al proceso Haber-Bosch, existen distintas iniciativas para el desarrollo de alternativas más sustentables en la producción del amoníaco. Entre estas se encuentran la síntesis de plasma no térmico (NTP), la producción electroquímica de amoníaco o la fotorreducción directa de nitrógeno a amoníaco [11].

La síntesis de plasma no térmico es un proceso de activación física, capaz de activar tanto el nitrógeno como el hidrógeno y producir iones y radicales libres que reaccionan sobre la superficie de un catalizador para producir amoníaco. Dentro de sus ventajas, se encuentra que, en condiciones adecuadas, el calentamiento por microondas permite calentar el catalizador de forma selectiva para alcanzar la temperatura necesaria sin la necesidad de que se produzcan reacciones y sin calentar el entorno [11].

El uso de plasma no térmico permite trabajar a bajas temperaturas (aproximadamen-

te 50 [°C]) y condiciones de presión de aproximadamente 1 [atm]. Esto permite resolver algunos algunos de los problemas asociados al proceso Haber-Bosch, como los elevados costes de capital, el uso de combustibles fósiles, etc. Esta tecnología aún se encuentra en fase de investigación y desarrollo [11].

La producción electroquímica de amoníaco posee un gran proyección en la actualidad porque puede ser alimentada mediante el uso de energías renovables, permitiría producción a pequeña y mediana escala, exige condiciones de operación menos restrictivas, e implica un gasto energético aproximadamente 20 % menor que el proceso Haber-Bosch. La producción de amoníaco se lleva a cabo mediante la reducción electroquímica entre el nitrógeno e hidrógeno, en donde se dan las siguientes reacciones [14]:



La fotorreducción directa de nitrógeno a amoníaco es una tecnología en estudio que utiliza un diseño de catalizadores de nanopartículas, como catalizadores a base de metales no preciosos compuestos de hierro y níquel, que son materiales bimetalicos y se predice teóricamente que conducen a superficies óptimas para la reducción del nitrógeno. Tiene como objetivo solucionar el inconveniente de baja eficiencia (inferior a 1 %) de la producción electroquímica debido a sus condiciones de baja presión y temperatura, lo cual hace requerir un catalizador para mejorar la eficiencia de la producción de amoníaco [11].

Por otra parte, ante la disminución que se ha dado en los costos de las energías renovables, y la gran disponibilidad de esta en ciertas regiones del planeta, como ocurre en el caso de Chile, se tienen grandes proyecciones para la producción de amoníaco verde, que corresponde a aquel producido utilizando hidrógeno verde, el cual se produce mediante electrólisis usando electricidad proveniente de fuentes de energía renovable. A su vez, para que el amoníaco sea "verde" en su totalidad, el nitrógeno también se debe obtener mediante el uso de energías renovables, lo cual se puede realizar con el método convencional de unidad de separación de aire. Luego de tener ambos compuestos, estos se introducen en el proceso Haber-Bosch, por lo que no se produce la emisión de GEI en ninguna parte del proceso.

El hidrógeno también puede ser producido por otras vías renovables, tales como por el método de producción termoquímico, que puede ser alimentado por energía solar térmica o energía nuclear (no se consideraría verde en este caso debido a sus emisiones bajas de GEI), donde se utilizan altas temperatura para obtener hidrógeno [15].

Por último, es de importancia considerar que el proceso de Haber-Bosch requiere un suministro de energía que sea idealmente estable, por lo que si una planta de amoníaco verde se alimenta con electricidad proveniente de plantas solares fotovoltaicas o eólicas, se debería buscar alternativas para complementar las fluctuaciones de energía.

Estas variabilidades se pueden abordar de distintas formas, como pueden ser sistemas de almacenamiento, incluyendo baterías y/o almacenando hidrógeno para corregir la variabilidad a corto y largo plazo respectivamente. También se puede mantener una carga base mínima utilizando una fuente de electricidad descarbonizada estable, tales como las provenientes de energía geotérmica, hidroeléctrica, nuclear, o mediante conexión directa a una red eléctrica. En el último caso, la red debe ser lo suficientemente estable, y para que el amoníaco se considere "verde", se debe certificar que esta electricidad provenga de energías renovables al ser comprada [15].

1.1.2. Uso

Cerca del 80 % del total de toneladas de amoníaco producidas es utilizada en agricultura, sector donde se utiliza como materia prima para la producción de fertilizantes, los cuales tienen como objetivo acelerar el crecimiento de las plantas [16].

De la demanda total del amoníaco, sólo un 2 % se utiliza directamente como fertilizante, pues la mayoría es usada para la producción de fertilizantes nitrogenados, destacando en este grupo la urea como el compuesto con mayor volumen de producción, con un 55 % [7].

La urea (NH_2CONH_2) corresponde a un compuesto orgánico soluble en agua, siendo un 75 % del total que se produce usado directamente como fertilizante para proveer de nitrógeno a cultivos, y el 25 % restante utilizado en la producción de plásticos, tintas, resinas, adhesivos, entre otras diversas aplicaciones industriales [7].

A causa del uso del amoníaco para la producción de fertilizantes, existe una dependencia directa entre el costo de este y el de commodities agrícolas. Esta relación se puede ejemplificar con las consecuencias de la invasión de Rusia a Ucrania en febrero del 2022, pues el aumento del costo del gas natural produjo un incremento en el costo de producción del amoníaco (debido al método con el que se sintetiza actualmente), y esto produjo a su vez un aumento en los precios del maíz [17].

Además de su uso como materia prima en la producción de fertilizantes, el amoníaco es utilizado para la fabricación de productos de distintos sectores industriales, tales como explosivos para la minería, telas y fibras, productos para la industria química y farmacéutica, refrigerantes, entre otros. En la Figura 1.3 se presentan los principales derivados del amoníaco utilizados en la industria, sus productos y aplicaciones asociadas.

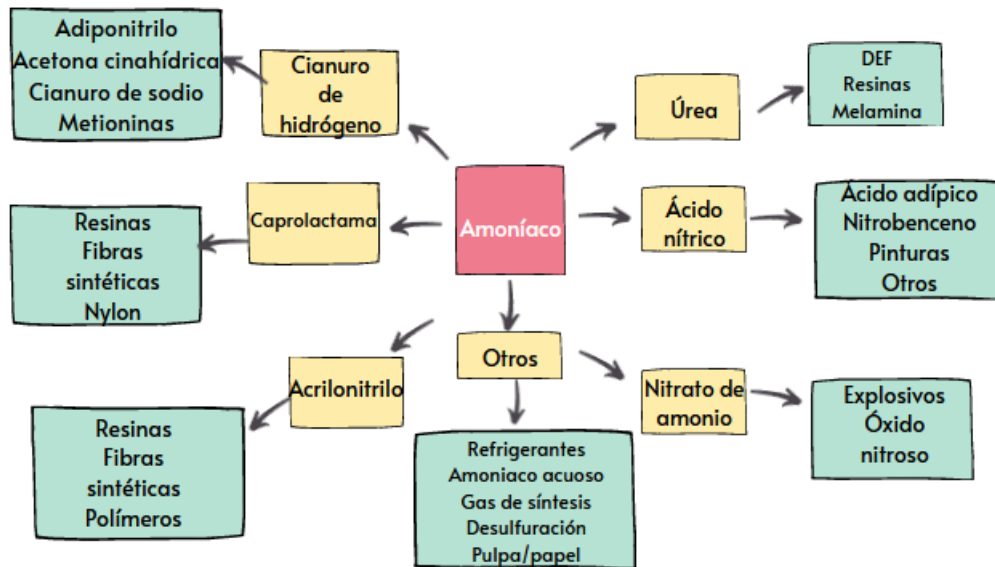


Figura 1.3: Usos finales del amoníaco y derivados [18].

En la Tabla 1.3 se muestran los usos del amoníaco según el sector industrial respectivo:

Tabla 1.3: Usos del amoníaco según industria [19].

Industria	Uso
Fertilizantes	Producción de: -Urea -Nitrato de amonio -Otros fertilizantes -Aplicación directa
Química	Síntesis de: -Ácido nítrico -Bicarbonado de sodio
Explosivos	Nitrato de amonio
Fibras y plásticos	Nylon y otras poliamidas
Refrigeración	Uso para formación de hielo y climatizar ambientes
Farmacéutica	Fabricación de: -Sulfoamidas -Ácidos fólicos -Antipalúdicos -Vitaminas (niacotinamida y tiamina)
Papel y celulosa	Hidrógeno sulfito de amonio
Limpieza	Amoníaco turbio (solución de limpieza)

Como se puede observar en la Figura 1.3 y en la Tabla 1.3, el amoníaco está presente en una gran cantidad de aplicaciones, lo cual lo convierte en un producto valioso. Como es una sustancia tóxica, se debe manejar con cuidado, siguiendo estrictos estándares de seguridad.

En Chile se puede conseguir amoníaco anhidro en estado líquido mediante proveedores locales, tales como la empresa Indura, que vende cilindros de 1 [kg] de capacidad a presión atmosférica [20]. La otra forma de obtenerlo es mediante proveedores de amoníaco en solución acuosa, con una concentración de entre 20 y 25 %. Entre estos proveedores se encuentran PQC, AseoHigine, Avalco, Diprolab, entre otros.

1.1.3. Almacenamiento y transporte

Tuberías y buques llevan varias décadas transportando amoníaco líquido principalmente para la industria de fertilizantes. El amoníaco está bien desarrollado en términos de transporte intercontinental, que depende en gran medida de los buques cisterna semi-refrigerados de gas licuado de petróleo (GLP). Las rutas comerciales actuales incluyen el transporte desde el Golfo Árabe y Trinidad y Tobago hasta Europa y Norteamérica. TogliattiAzot, en Rusia, produce hasta 3 megatoneladas de amoníaco al año, de las cuales la mayor parte recorre unos 2.500 [km] hasta Odessa a lo largo del conducto de amoníaco más largo del mundo, tras lo cual se envía a diversos países [4].

El amoníaco se vuelve líquido a -33 [°C] o a 8,6 [bares]. Dos de los tanques de amoníaco refrigerado más grandes del mundo se encuentran actualmente en Qatar y tienen una capacidad de 50 mil toneladas cada uno, que ocupan una superficie combinada de unos 160 [m] por 90 [m] (aproximadamente 1,5 hectáreas) [9]. Sólo en Estados Unidos hay más de 10.000 lugares de almacenamiento de amoníaco, muchos de los cuales conectan con una red de tuberías de más de 3.000 [km] que une el Golfo de México con el Medio Oeste. Actualmente, la mayor planta del mundo es la de SAFCO IV, en Arabia Saudí, con una capacidad productiva de 1,3 [Mt] de amoníaco al año [4].

El terminal marítimo de la Planta Prillex América de ENAEX se encuentra ubicado en la comuna de Mejillones, Región de Antofagasta, y está destinado a la recepción de amoníaco líquido, lo cual ocurre a través de los barcos que llegan transportando hasta 27.000 toneladas de amoníaco, y que posteriormente llevan el producto mediante tuberías hasta los tanques de almacenamiento de amoníaco en la planta [5].

La línea submarina de tuberías que transporta el amoníaco hacia la planta de ENAEX en Mejillones lo hace operando a una temperatura de -33 [°C]. Consta de un tubo interior aislado, que cumple la función de transportar el amoníaco, y un tubo exterior que sirve de recubrimiento, soporte y contenedor de posibles fugas de la línea interior. Además, posee un sistema de detección de fugas en caso de cualquier anomalía de la línea [5]. La configuración de esta tubería se muestra en la Figura 1.4:

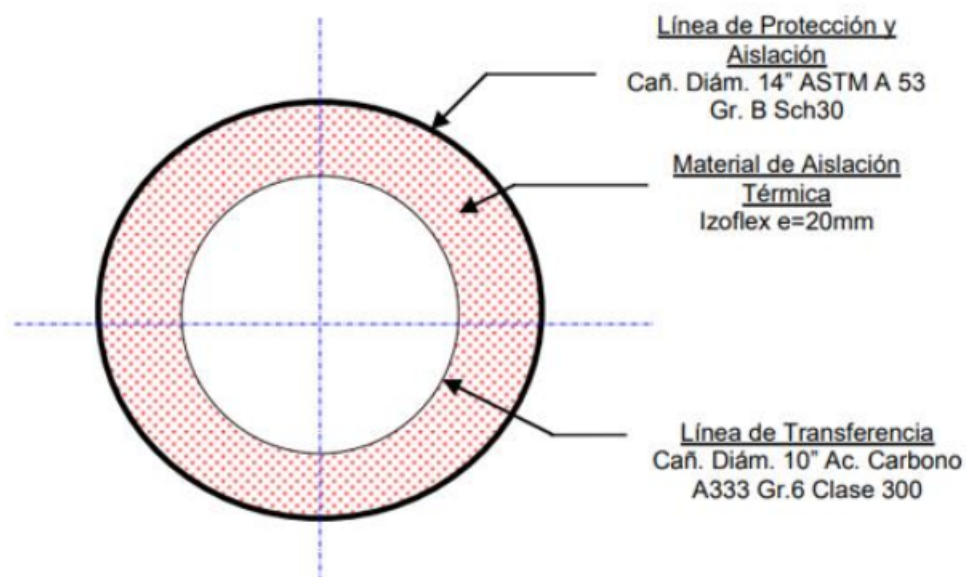


Figura 1.4: Corte esquemático de tubería submarina ENAEX [5].

Esta tubería se extiende desde la plataforma marina hasta el camino costero. Desde este punto hasta los tanques de almacenamiento de amoníaco sigue una tubería de aislamiento simple [5].

1.2. Motivación

El amoníaco verde es la descripción dada al amoníaco sintetizado mediante el uso de hidrógeno verde. A su vez, el hidrógeno verde es aquel producido utilizando energías renovables para alimentar el proceso de electrólisis del agua. El principal reto es el costo de este último, pues el hidrógeno producido a base de electrólisis es actualmente mucho más costoso que aquel obtenido mediante reformado de vapor [3].

Se ha proyectado que en la industria del amoníaco se podría disminuir entre 70 y 95 % las emisiones de GEI respecto al contexto actual gracias a la incorporación y avance del amoníaco verde [7].

Se espera que durante los próximos años se ponga en operación diversos proyectos tanto nacionales como internacionales para la producción de amoníaco verde. Distintos proveedores de tecnología y combustibles actualmente se encuentran trabajando para proveer soluciones que permitan la producción de amoníaco verde a una escala comercial.

Por otro lado, en el ámbito nacional, se estima que la producción de hidrógeno verde podría tener uno de los costos nivelados más bajo en el mundo para el 2030 [21]. A causa de esto, se han anunciado distintos proyectos desarrollados tanto por empresas nacionales como internacionales, entre los que se incluye la producción de amoníaco verde como uno de los intereses principales. Entre los distintos proyectos anunciados que incluyen la producción de amoníaco verde en Chile se encuentran:

- HyEx: Es un proyecto desarrollado por Engie y Enaex, que tiene como objetivo la producción de amoníaco verde en la zona norte del país para reemplazar las importaciones actuales de amoníaco e impulsar su consumo tanto nacional como internacional. La primera fase, estimada para el 2025, consiste en una planta piloto en la cual se considera la producción de 18.000 toneladas métricas anuales de amoníaco verde. La segunda fase, para el 2030, considera la producción de alrededor de 700.000 toneladas métricas anuales de amoníaco verde, por lo que se planifica una producción a gran escala [22].
- AES ANDES: Esta compañía energética, subsidiaria de AES Corporation, pretende producir 250.000 toneladas anuales de amoníaco verde para exportación y uso como combustible en el transporte marítimo, comenzando sus operaciones el 2025 [23].
- ACH-MRP: Aker Clean Hydrogen y Mainstream Renewable Power han firmado un convenio para el desarrollo de un proyecto de producción de amoníaco verde a gran escala en Chile, que considera un millón de toneladas anuales de este producto, iniciando las operaciones el 2027 [23].
- HOASIS: A cargo de TCI GECOMP, empresa dedicada a proyectos de energías renovables, es un proyecto localizado en la región de Antofagasta que busca promover el hidrógeno como una solución que contribuya al autoabastecimiento energético y permita el desarrollo local basado en un modelo de economía circular. Sus proyecciones incluyen una producción anual de 250.000 toneladas de amoníaco verde, iniciando operaciones el 2024 [23].
- HNH Energy: Localizado en la región de Magallanes y desarrollado por AustriaEnergy junto a Ökowind, es un proyecto que busca producir amoníaco verde a gran escala para exportación. Iniciando sus operaciones el 2026, pretende producir 850.000 toneladas anuales de amoníaco verde [24].
- H1 Magallanes: Desarrollado por CWP Global con asistencia de su empresa regional H1 América, tiene el objetivo de construir una planta de hidrógeno y amoníaco verde a gran escala, logrando con esto construir un tren de síntesis de amoníaco, el cual permitirá economías de escala y costos competitivos. Se espera que las operaciones del proyecto inicien el 2028, logrando una producción anual de 1 millón de toneladas de amoníaco verde [23].
- H2 Magallanes: Ubicado en la comuna de San Gregorio en la región de Magallanes y desarrollado por Total Eren, corresponde al mayor proyecto de hidrógeno verde anunciado en el país a día de hoy, y además, es el mayor proyecto en todo el continente americano, teniendo el décimo lugar a nivel mundial. Se estima que su capacidad de producción anual de amoníaco verde sea de 7 millones de toneladas, lo cual es equivalente a aproximadamente 20 veces el amoníaco que se importa y consume en Chile en la actualidad [25]. Se estima que el proyecto se construya a partir del 2025, iniciando su producción en 2027 [26].

- Selknam: Comenzando sus operaciones el 2026, este proyecto localizado en la isla de Tierra del Fuego contempla reutilizar instalaciones existentes de ENAP (oleoductos) y el puerto de Clarenia para la exportación de amoníaco verde. El proyecto es desarrollado por la empresa Albatros en conjunto a Alfanar, y se está negociando la participación de ENAP. Se estima que se podrían producir 500.000 toneladas de amoníaco verde anuales [23].
- Tango: Gasco, HyNewGen, Linde, Vopak y el Puerto de Rotterdam se encuentran a cargo del desarrollo de este proyecto de hidrógeno verde en Chile, el cual busca ser el corredor del producto desde Chile hasta Europa. En su primera fase, partiendo el 2027, se estima una exportación inicial de 172.000 toneladas anuales de amoníaco verde, mientras que en la segunda fase se espera poder producir y exportar 430.000 toneladas por año [27].
- Pauna Greener Future: A cargo de Statkraft Chile, con fondos adquiridos mediante la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID), la empresa desarrollará un estudio de prefactibilidad de un proyecto de producción de hidrógeno y amoníaco verde utilizando energía solar fotovoltaica en la región de Antofagasta. En la actualidad, es uno de los proyectos en evaluación ambiental de mayor capacidad del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [28].

Se mencionó previamente la amplia gama de usos que posee el amoníaco en la actualidad. Además de que la producción de amoníaco verde permitirá un avance en la misión de carbono neutralidad a través de la descarbonización de uso actual, que es principalmente la producción de fertilizantes, se están desarrollando nuevos usos sin emisión de GEI para este compuesto:

- Carrier de energía: el amoníaco puede ser usado como medio para almacenar y transportar energía química, la cual se puede liberar ya sea por reacción directa con el aire o por descomposición parcial o total del amoníaco para la producción de hidrógeno [3].
- Combustible: el amoníaco puede alimentar calderas, turbinas, celdas de combustible y motores de combustión interna sin emitir CO₂ con su uso. Por lo tanto, se podrá utilizar como combustible para aplicaciones de transporte, así como para la producción de energía eléctrica [3][29][30]. Es importante destacar que utilizar el amoníaco como combustible puede implicar productos de combustión como NO_x, amoníaco no quemado y N₂O. Estas emisiones deberán ser reguladas por las normativas asociadas a esta aplicación del amoníaco.

Respecto al amoníaco como carrier de energía, en particular de hidrógeno, se considera este uso ya que el hidrógeno verde a producir se obtendrá en sector alejados de los centros de consumo debido a la disponibilidad de las energías renovables [5]. Al necesitar transportar grandes cantidades de hidrógeno verde por largas distancias, se debe considerar su densidad energética por unidad de volumen, la cual es baja en comparación con combustibles convencionales, o con el mismo amoníaco (ver Figura 1.5). Esto quiere decir, que para almacenar y transportar la misma cantidad de energía, el hidrógeno requiere más espacio, lo cual implica mayores costos y dificultades logísticas.

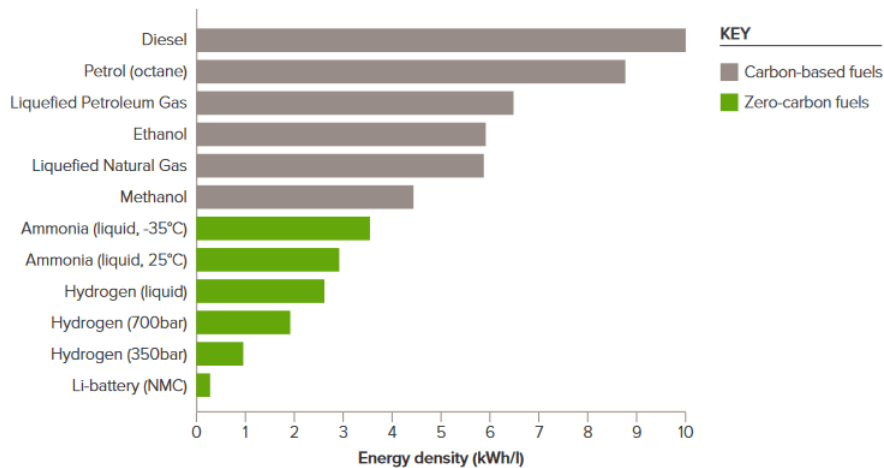


Figura 1.5: Densidad energética volumétrica de una serie de combustibles [9].

Para solucionar este problema del hidrógeno en su forma gaseosa, se podría licuar, pero para esto se debe llevar a -253 [°C], lo cual implica un gran costo energético, y por ende económico [15]. Por otro lado, se puede convertir el hidrógeno en carriers que posean mayor densidad energética y sean más fáciles de almacenar y transportar. Entre estos carriers, destacan los productos que se derivan del hidrógeno, como los hidrocarburos naturales, metanol, hidruros metálicos y el amoníaco. Este último, a excepción de los hidruros metálicos, es el único que no posee carbono en su estructura molecular (NH_3), lo cual es importante, ya que no requiere procesos de recuperación y reciclaje después de realizar la deshidrogenación [31].

El amoníaco líquido permite almacenar 121 kilogramos de hidrógeno por metro cúbico, mientras que el hidrógeno líquido y gaseoso pueden almacenar 71 y 39 kilogramos de hidrógeno por metro cúbico respectivamente, lo que quiere decir que con el amoníaco líquido es posible almacenar 1,7 veces más hidrógeno si estuviera líquido y 3,1 veces más hidrógeno si este estuviera gaseoso, lo cual da la oportunidad de transportar grandes cantidades de hidrógeno en menores volúmenes de tanques de almacenamiento [32].

Como el amoníaco está libre de carbono, podría permitir la alimentación de turbinas de gas, calderas, celdas de combustible y motores de combustión interna sin implicar emisiones de GEI. Sin embargo, el uso de amoníaco como combustible aún se encuentra en etapa de desarrollo [5].

En su uso como combustible, destaca en mayor medida el interés en el uso de este compuesto para el transporte marítimo. En el contexto de disminuir las emisiones generadas por los buques, el transporte marítimo impulsado por amoníaco se considera fundamental para este objetivo. El amoníaco ofrece muchas ventajas asociadas a su escalabilidad potencial y su aplicación en rutas de larga distancia. Para demostrar la viabilidad de la propulsión de buques utilizando amoníaco verde, se deberá diseñar y construir nuevos buques, como también se tendrá que elaborar una estrategia para el

abastecimiento de amoníaco verde [3].

Tabla 1.4: Comparación de diferentes combustibles marítimos [33].

Combustible	LHV [MJ/kg]	Densidad energética volumétrica [GJ/m ³]	Presión de almacenamiento [bar]	Temperatura de Almacenamiento [°C]
MGO	42,7	36,6	1	120
LNG	50	23,4	1	-162
Metanol	19,9	15,8	1	20
Amoníaco líquido	18,6	12,7	1	-34
H2 líquido	120	8,5	1	-253
H2 comprimido	120	7,5	700	20

Si se considera la gran cantidad de proyectos asociados a la producción de amoníaco verde en Chile, las investigaciones en desarrollo para nuevos usos del amoníaco y para su producción más eficiente, así como las grandes oportunidades que se tendrán para avanzar en la lucha contra el calentamiento global, es de sumo interés poseer una documentación de base para abordar proyectos relacionados al amoníaco. Esta documentación de base debe poder tratar puntos tales como la forma de almacenar, aplicar, transportar, acondicionar y producir el amoníaco. Bajo el hecho de que prácticamente todo el amoníaco lo importa ENAEX para la fabricación de explosivos, es probable que pocas empresas chilenas posean profesionales con experiencia práctica en el uso del amoníaco y que tampoco tengan la base de información que se requeriría para el desarrollo de proyectos de este producto.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

En el contexto nacional de la producción y aplicación industrial de hidrógeno y amoníaco verde, este trabajo de titulación tiene como objetivo general definir los requisitos y especificaciones técnicas para el diseño de tanques de almacenamiento y transporte por tuberías de amoníaco líquido, considerando normativas nacionales e internacionales.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Revisar el estado del arte acerca del almacenamiento y transporte del amoníaco, así como de las normativas nacionales e internacionales aplicables.

2. Establecer requisitos de diseño para tanques de almacenamiento y sistema de tuberías para amoníaco líquido, según norma API 620 y ASME B31.3, respectivamente.
3. Seleccionar las especificaciones técnicas para cada componente de un tanque y sistema de tuberías, según los requisitos establecidos.
4. Realizar análisis teórico de esfuerzos a las especificaciones seleccionadas para almacenamiento y transporte de amoníaco.

1.4. Alcances

- El presente trabajo de título contempla la propuesta de criterios y condiciones de diseño para almacenar y transportar amoníaco líquido (refrigerado en el caso del almacenamiento) a partir de normas nacionales e internacionales (API 620 y ASME B31.3).
- La norma API 620 cubre el diseño y la construcción de tanques de acero al carbono, soldados, de baja presión apoyados sobre cimentación y que poseen un solo eje de revolución vertical.
- El alcance del almacenamiento se limita únicamente al diseño de las distintas partes estructurales del tanque. No cubre el dimensionamiento de tuberías ni contempla el diseño de otras partes auxiliares como son plataformas o escaleras de acceso al techo.
- La norma ASME B31.3 establece los requisitos para materiales y componentes, el diseño, la fabricación, el ensamblaje, la instalación, los exámenes, la inspección y pruebas de tubería de procesos (para productos químicos, derivados del petróleo, refrigerantes, entre otros). Se excluye: tuberías con una presión interna de diseño entre 0 y 15 [psi] (105 [kPa]); calderas de potencia diseñadas según la Sección I del Código BPVC, y tuberías externas de la caldera, las cuales deben cumplir con el Código B31.1; tubos en el interior de calentadores; y recipientes a presión, intercambiadores de calor, bombas, compresores y otros equipos para manejo o procesamiento de fluidos, incluidas las tuberías internas y las conexiones para las tuberías externas.
- Se propone un análisis de esfuerzos utilizando dichas normas. Se omitieron aquellos análisis de esfuerzos que requieren el uso de normas adicionales relacionadas por ejemplo, con condiciones climáticas, vibraciones, entre otros.
El análisis de esfuerzos para tanques no incluye un cálculo de dimensiones para todos los componentes. En el caso de la sección dedicada al transporte mediante tuberías, el análisis de esfuerzos no incluye dimensionamiento de ningún componente.
- No se consideran criterios ni requisitos para instrumentos de seguridad o equipos auxiliares, el enfoque es netamente de la estructura que se postula como almacenador o transportador del amoníaco al inicio de las Secciones 3 y 4.

- Se puede considerar como una documentación de base para el desarrollo de un proyecto, pero se requiere a un ingeniero especialista para tratar aquellos puntos no abordados, y que debieran ser considerados por temas de diseño y seguridad.

Capítulo 2

Estado actual de la industria: infraestructura y marco regulatorio

2.1. Almacenamiento

Para almacenar amoníaco, se debe determinar si se hará en estado líquido o gaseoso. Las opciones que se pueden considerar son:

- Almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado a presión atmosférica (-33 [°C] y 1 [bar]) [34].
- Almacenamiento de amoníaco líquido presurizado (Hasta 18 [bar] y temperatura cercana a la atmosférica) [35].
- Almacenamiento de amoníaco líquido semirrefrigerado a baja presión (menor a 10 [bar] y aproximadamente -10 [°C]) [34].
- Almacenamiento de amoníaco gaseoso a baja presión y temperatura ambiental (menor a 10 [bar]) [34].

Para almacenar amoníaco en estado gaseoso se requieren tanques de mayor volumen que en los casos en los que se almacena la misma cantidad en forma líquida, esto debido a que el estado gaseoso posee una menor densidad.

Los tanques de almacenamiento de gran escala son construidos sobre el mismo terreno donde serán ubicados, mientras que los más pequeños se diseñan y construyen en fábricas especializadas. Según las necesidades de cada caso, en base a la forma de almacenar el amoníaco, se pueden definir dos alternativas principales de tanques para almacenar el amoníaco:

- Tanques presurizados cilíndricos o esféricos presurizados, construidos en fábricas especializadas, son de acero al carbono, horizontales, con alivio de tensiones mediante cabezales esféricos. También destacan los tanques semirrefrigerados (o semipresurizados) de amoníaco líquido saturado a 0 [°C], que cuentan con aislación térmica. Este formato de almacenamiento de amoníaco anhidro tiene una capacidad que ronda las 2.000 toneladas métricas [35] [36].

- Tanques cilíndricos refrigerados a -33 [°C], utilizados para grandes plantas de producción o terminales de distribución, contando con una capacidad de almacenamiento típica de entre 10.000 y 50.000 toneladas. Estos tanques se pueden clasificar también en dos tipos [37]:
 - Tanques de acero de pared simple con aislamiento exterior. Algunos de estos depósitos están rodeados de muros de hormigón para contener todo su contenido.
 - Tanques de acero con doble pared y aislamiento de perlita entre las paredes. Se conocen también como tanques de doble contención.

El almacenamiento en tanques cilíndricos refrigerados ha sido ampliamente aceptado por dos razones principales. En primer lugar, implica un costo menor por unidad de volumen. En segundo lugar, es más seguro que los tanques de almacenamiento que utilizan presiones superiores a la atmosférica. Es por esto que, con la producción industrial de amoníaco a gran escala, se ha hecho común almacenar el amoníaco a presión atmosférica y a -33 [°C]. En la Figura 2.1 se muestran los diferentes tipos de tanques utilizados para el almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado:

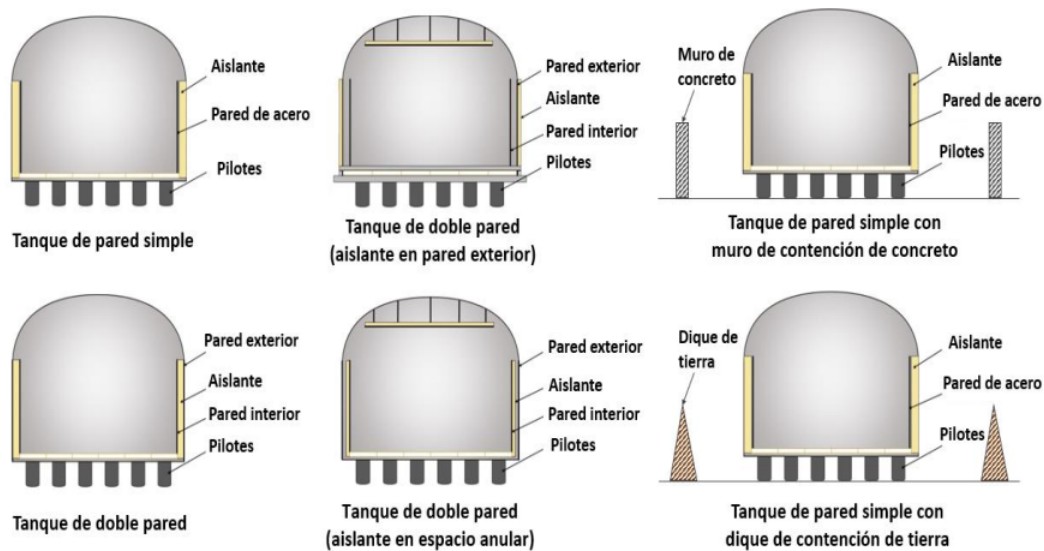


Figura 2.1: Tipos de tanques para almacenamiento de amoníaco refrigerado [37].

La manipulación del amoníaco, incluyendo su almacenamiento, es y ha sido una de las principales preocupaciones de la industria debido a los riesgos que implica manejar sustancias tóxicas y corrosivas de este tipo. Los distintos formatos para almacenar el amoníaco permite tener flexibilidad en costos dependiendo de la cantidad que se desea almacenar. El amoníaco es generalmente almacenado bajo presión a temperatura atmosférica o completamente refrigerado a -33 [°C] y presión atmosférica, siendo esta última la opción de mayor interés cuando se trata de evaluar proyectos acerca de plantas de amoníaco, pues los tanques refrigerados son los que tienen una mayor capacidad, a la

vez que son los más seguros por estar a presión atmosférica.

En el almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado los factores críticos a considerar por motivos de seguridad son el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) y toda fuga que pueda ocurrir.

Por último, cabe destacar que si bien el almacenamiento en tanques refrigerados permite almacenar una mayor cantidad del producto, implica un mayor costo energético, y por ende monetario, por lo que se debe evaluar su factibilidad económica según la cantidad que se desea almacenar. Estos costos, de capital y operativos, se relacionan a requisitos adicionales de infraestructura y equipos necesarios para mantener el amoníaco a esa temperatura.

2.2. Transporte

A día de hoy, el amoníaco es transportado a lo largo de todo el mundo. Dependiendo de la distancia entre producción y consumo, puede ser transportado internacionalmente a través de vías marítimas utilizando buques, o a nivel local mediante tuberías, camiones o ferrocarriles.

2.2.1. Transporte por tuberías

A nivel local, el transporte de grandes cantidades de amoníaco líquido por tuberías a lo largo de grandes distancias suele ser más barato que por camión o tren. Para esta opción de transporte, es fundamental considerar los riesgos de fragilización por corrosión y bajas temperaturas a las cuales se ven expuestas las tuberías debido a la naturaleza del amoníaco. Debido al riesgo de corrosión, se debe evitar el uso de materiales como el cobre, el zinc y el aluminio, los cuales son usados comúnmente en procesos industriales pero son propensos a dañarse debido a la naturaleza corrosiva del amoníaco [38]. El acero y el hierro se utilizan en la mayoría de los casos como materiales de construcción para tuberías de amoníaco líquido. A modo de referencia, el acero según las especificaciones ASTM A106 Grado B o API5L se puede utilizar cuando se tengan tuberías por encima de 0 [°C], mientras que para tuberías por debajo de los -29 [°C], se recomienda usar acero ASTM A333; esto se aplica a los materiales de las tuberías, así como a las bridas, conectores y otros equipos utilizados [39].

Como el amoníaco tiene un punto de ebullición bajo (-33 [°C]), se crea una presión adicional en las tuberías durante su transferencia. Esta presión genera un problema para el uso a largo plazo de las líneas de transferencia. Para mantener el equilibrio de presión en las líneas de transferencia, son colocados depósitos de agua en la tubería a determinadas distancias y el exceso de amoníaco se elimina del sistema mediante el mecanismo de adsorción [38].

Otro aspecto importante a considerar es que se debe evitar que el amoníaco se evapore en el interior de las tuberías, ya que esto reduciría la capacidad de transporte,

dificultaría la medición de flujo y el control del proceso, así como podría provocar daños por cavitación en la pared interior de la tubería. Para prevenir estas situaciones, lo mejor es asegurar que la presión en el interior del tubo se mantenga por encima de la presión de vaporización del amoníaco, la cual depende de la temperatura [5]. En la Tabla 2.1 se indican distintos puntos de vaporización del amoníaco:

Tabla 2.1: Puntos de evaporación del amoníaco [40].

Temperatura [°C]	Presión [bar]
-74,3	0,08
-33,6	1,01
-18,7	1,96
4,7	4,9
25,7	9,8
35,0	12,8
50,1	19,6
66,1	29,4
78,9	39,2

2.2.2. Transporte por camiones

Esta forma de transportar el amoníaco es la más costosa, por lo que sólo se suele utilizar para traslado en distancias cortas, según determine el costo de instalación de tuberías para la distancia equivalente. La capacidad que puede transportar un camión por carretera puede variar según cada región o país, pero un valor estimado de capacidad de carga es de alrededor de 26 toneladas en tanques presurizados a 20 [bar] [41]. Las personas encargadas del transporte de sustancias peligrosas por carretera debe tener un certificado personal de capacitación.

2.2.3. Transporte por ferrocarriles

Cada año se transportan 1,5 millones de toneladas de amoníaco en Europa mediante transporte ferroviario, lo que equivale a unos 30.000 vagones cisterna. En los últimos 30 años sólo se han producido unos pocos accidentes, y ninguno de ellos ha provocado víctimas o heridos debido a la fuga de amoníaco [12].

Esta forma de transporte se realiza utilizando vagones cisterna con capacidad usual que van desde los 25 a 90 toneladas de amoníaco. Por lo general, el transporte por ferrocarriles se utiliza para distancias menores a las del transporte marítimo o por tuberías; como ejemplo, para el transporte desde un terminal de almacenamiento hacia otro [5].

2.2.4. Transporte marítimo

El transporte de amoníaco mediante buques de carga es similar a aquellos utilizados para transportar GLP, debido a que poseen una presión de vapor saturado similar. Sin embargo, debido a la corrosividad, toxicidad y reactividad del amoníaco, no todos los buques de GLP se pueden utilizar para transportar amoníaco [34]. Los buques para el transporte de amoníaco pueden contar con una capacidad para transportar hasta 50.000 toneladas de amoníaco, siendo acumuladas en 80.000 [m³] [42].

El amoníaco puede ser transportado en tres tipos de buques diferentes, dependiendo de cómo se almacene la carga [34]:

- Refrigerado: normalmente a -50 [°C] a una presión cercana a la atmosférica.
- Semirrefrigerado: normalmente a -10 [°C] y entre 4 y 8 [bar] de presión.
- Presurizado: normalmente a 17 [bar], lo que corresponde a la presión de vapor del amoníaco de unos 45 [°C].

El Código IGC (The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk) clasifica los tanques de carga en cinco tipos principales: tanques integrales, tanques de membrana, tanques de semimembrana, tanques independientes y tanques con aislamiento interno. Por su lado, los tanques independientes se subdividen en otras tres subcategorías, denominadas Tipo A, Tipo B y Tipo C, mientras que los tanques de aislamiento interno incluyen dos subcategorías, que son los tanques de Tipo 1 y Tipo 2 [43].

En el almacenamiento de amoníaco para transporte marítimo, los tanques aceptables son los independientes de tipo A, B y C, así como los tanques de membrana. Estos tanques se encuentran definidos en el código IGC. En la práctica, sólo los tipos A y C son utilizados para este propósito [34].

Los tanques Tipo A son del tipo no presurizado, emplean un diseño prismático y una barrera secundaria completa (ver Figura 2.2). Poseen mamparos longitudinales, lo que le confiere unas características antisalpicaduras superiores [44]. La presión de diseño de este tipo de tanque es menor a los 0,7 [bar], lo cual implica que las cargas se deben transportar en condiciones refrigeradas a una presión cercana a la atmosférica. La característica más distintiva en los tanques del Tipo A es que el Código IGC especifica que deben tener una barrera secundaria para contener cualquier fuga durante al menos 15 días. La barrera secundaria debe ser una barrera completa de tal capacidad que sea suficiente para contener todo el volumen del tanque en cualquier ángulo de escora. A menudo, esta barrera secundaria está formada por los espacios del casco del buque [45]. Son construidos con Arctic D, un acero aleado con níquel resistente a temperaturas bajo cero [46].

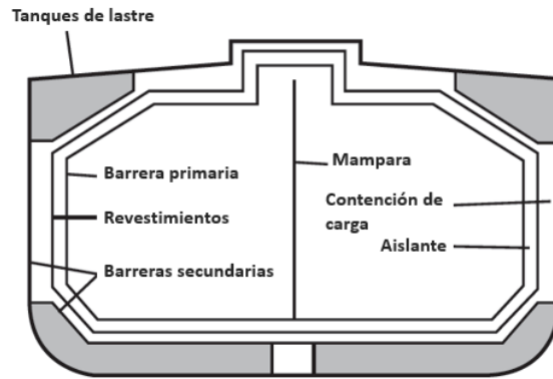


Figura 2.2: Sección prismática de un tanque de almacenamiento tipo A [45].

Los tanques Tipo B (Figura 2.3) tienen una estructura esférica y son colocados en el casco del buque de modo que sólo la mitad o la mayor parte de la esfera queda por debajo del nivel de la cubierta principal. La superficie exterior de la chapa del tanque está provista de aislamiento externo, y la parte del tanque situada por encima del nivel de la cubierta principal está protegida por una capa protectora contra la intemperie [45]. No se necesita una barrera secundaria completa, pues con una barrera parcial que cubra el plano bajo cubierta es suficiente, logrando con esto una reducción de costos [46]. El concepto en el que se basa el diseño de este tipo de tanque es disponer de una estructura en la que pueda detectarse una grieta mucho antes de que se produzca la falla [45]. Cualquier fuga del tanque de carga será drenada por el espacio anular entre el tanque y el aislamiento localizado en la parte baja de la esfera [46].

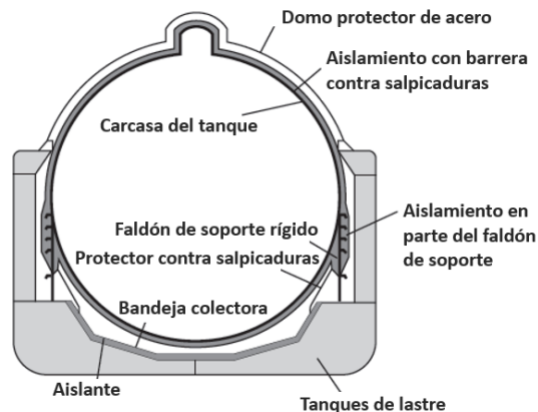


Figura 2.3: Tanque de almacenamiento tipo B [47].

Los tanques Tipo C son recipientes presurizados de forma cilíndrica o esférica diseñados para soportar presiones de vapor superiores a 2 [bar], siendo esto el criterio de diseño dominante, y pudiendo ser montados de forma vertical u horizontal en función del diseño [46]. Las formas más comunes de estos depósitos son la cilíndrica (Figura 2.4) y la bilobular (Figura 2.5). Estos tipos de tanques no requieren una barrera secunda-

ria [45]. En el caso de los buques semipresurizados, también se puede utilizar para el transporte totalmente refrigerado, siempre que se empleen aceros apropiados para bajas temperaturas en la construcción de los tanques [48].

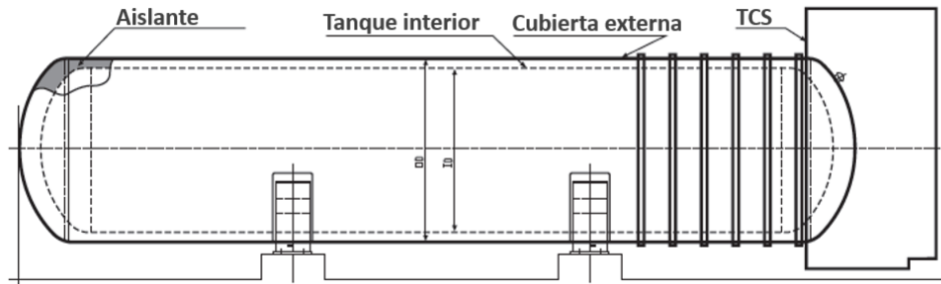


Figura 2.4: Tanque de almacenamiento cilíndrico tipo C [47].

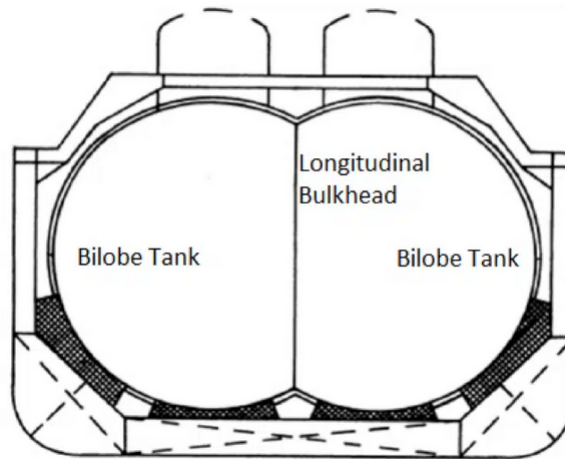


Figura 2.5: Tanque de almacenamiento bilobular tipo C [45].

Por último, los tanques de membrana (Figura 2.6), a diferencia de los depósitos independientes, no son estructuras autoportantes, si no que poseen un grado de integración con el casco del buque, aunque no forma parte de este. Su barrera primaria consiste en una fina capa de membrana (de 0,7 a 1,5 [mm] de grosor), y está diseñada para compensar las dilataciones, contracciones térmicas y tensiones para evitar esfuerzos excesivos. Los sistemas de contención de membrana siempre deben estar provistos de una barrera secundaria para garantizar la integridad de todo el sistema en caso de fuga de la barrera primaria. Estos sistemas se emplean para transportar GNL por la buena respuesta de las membranas ante temperaturas criogénicas (-163 [°C]) [46]. Los tipos más comunes de tanques de membrana son los desarrollados por dos empresas francesas: Technigaz y Gaz Transport. El sistema de Technigaz utiliza un sistema de acero inoxidable construido con láminas onduladas de tal forma que una lámina puede dilatarse o contraerse de forma independiente a la lámina adyacente. El sistema Gaz Transport utiliza Invar como membranas primaria y secundaria. El Invar tiene un bajo coeficiente de dilatación

térmica, lo que hace innecesarias las ondulaciones. El aislamiento suele ser de materiales como el poliuretano reforzado [45].

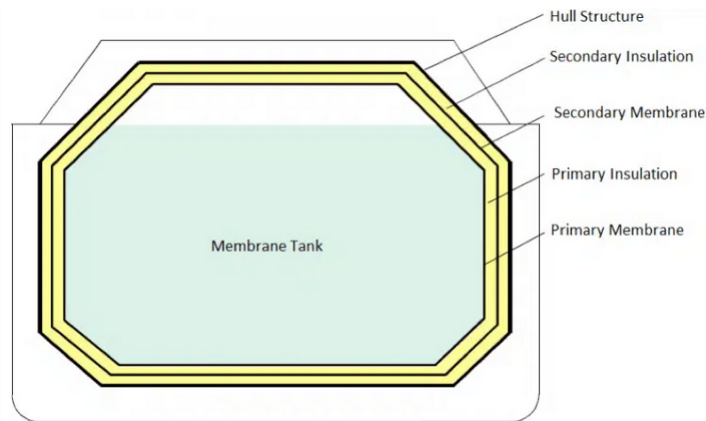


Figura 2.6: Tanque de almacenamiento tipo membrana [45].

Dada la gran cantidad de amoníaco que se comercializa a nivel mundial, es necesario poseer una importante red de puertos, buques y tuberías distribuidas tanto en los países productores como consumidores de este compuesto. En tierra, el amoníaco suele transportarse como gas licuado a presión por ferrocarril en vagones cisterna, por carretera en camiones cisterna, en zonas agrícolas en tanques nodriza y para zonas pobladas a través de tuberías. A día de hoy, las rutas marítimas internacionales se encuentran bien establecidas y existe una amplia red de puertos en todo el mundo que manipulan amoníaco a gran escala, como se puede observar en la Figura 2.7. El transporte de grandes volúmenes de amoníaco líquido por tuberías a través de grandes distancias es mucho más económico que el transporte por ferrocarril [40].

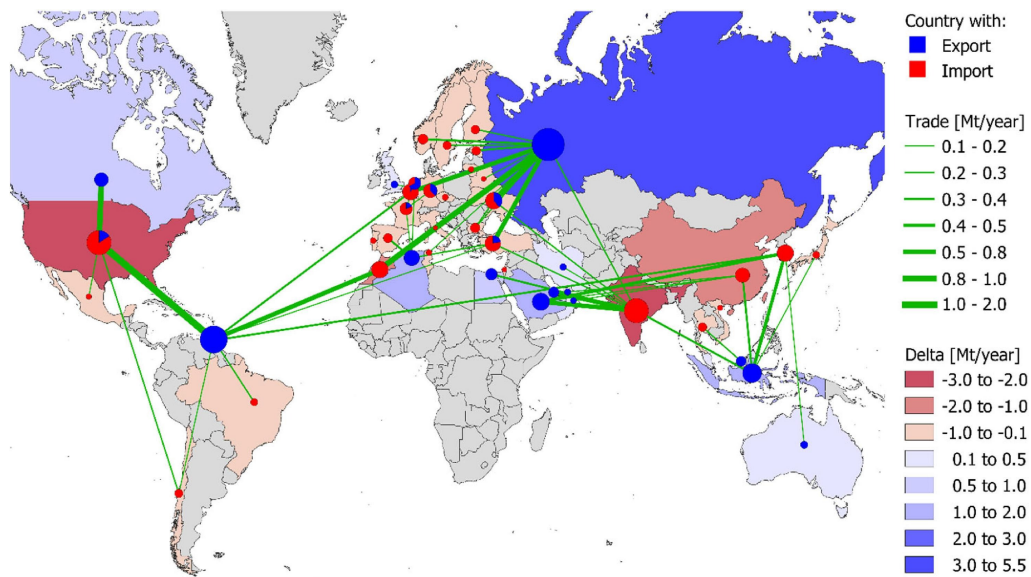


Figura 2.7: Flujos comerciales mundiales de amoníaco en 2019 [49].

2.3. Normativas

Las principales preocupaciones que surgen en el uso del amoníaco están relacionadas con la toxicidad y el impacto ambiental que podría provocar una fuga. Para reducir los riesgos de exposición en el transporte y almacenamiento de amoníaco líquido, es preferible manejarlo en forma refrigerada, es decir, bajo -33 [°C], porque en el caso cuando está bajo presión es más riesgoso que se liberen al aire grandes cantidades rápidamente. A presión atmosférica, la filtración de amoníaco de un tanque de almacenamiento refrigerado será dispersada rápidamente en la fase gaseosa, por ser más liviano que el aire. Por otro lado, en el uso de tanques de almacenamiento presurizado, una fuga de amoníaco líquido hace que se forme una nube densa más pesada que al aire [15].

Es necesario tener en cuenta las características más importantes relacionadas a la seguridad de las personas y del medio ambiente cuando se trate de manipular el amoníaco, pues este es un gas tóxico y corrosivo, por lo que es necesario contar con un marco regulatorio que exija y pueda garantizar su correcto manejo y la seguridad de las personas que estén expuestas a este compuesto.

2.3.1. Normas nacionales

En Chile, el Artículo 3 de la Resolución Exenta 408 del Ministerio de Salud (MINSAL) define al amoníaco (anhidro y en disolución acuosa) como una sustancia peligrosa [50]. Según la NCh382, que permite la clasificación de las distintas sustancias peligrosas, clasifica al amoníaco anhidro en la división 2.3: la clase 2 corresponde a gases comprimidos, licuados, disueltos a presión, o criogénicos, y la subdivisión 3 quiere decir que es un gas tóxico [51].

La norma NCh2190 establece requisitos de seguridad para identificar los riesgos que poseen las sustancias peligrosas, incluyendo requisitos acerca de las características de las marcas, rótulos y etiquetas, uso de ellos, excepciones en el uso y los lugares en que se deben colocar. Esta norma es aplicable a la manipulación y almacenamiento en tránsito de sustancias peligrosas por vía terrestre previamente definidas en la NCh382 y para el comercio tanto de importación como de exportación. En particular, como el amoníaco anhidro pertenece a la categoría de gas tóxico según la norma NCh382, se debe utilizar el distintivo de seguridad que se muestra en la Figura 2.8 [52]:



Figura 2.8: Distintivo de seguridad para gases tóxicos [52].

La norma NCh1411/4 trata acerca de identificación de riesgos de materiales, siendo aplicable a toda instalación que fabrique, almacene, o use materiales que presente riesgos (excluyendo el transporte de productos peligrosos). Se tienen tres categorías para identificar los tipos de peligros que presenta un material: salud, inflamabilidad y reactividad o inestabilidad. Como se muestra en la Figura 2.9, cada categoría tiene una ubicación, así como también posee una graduación del 0 al 4, según la severidad probable del riesgo [53].



Figura 2.9: Identificación de riesgos de materiales NCh1411/4 [54].

Según la norma NCh114/4, la descripción de riesgo específico del amoníaco anhidro corresponde a gas tóxico [55].

En riesgos para la salud, al amoníaco le corresponde el grado 3: materiales cuyos efectos aún en exposiciones breves pueden causar una lesión grave, temporal o residual, aún cuando se haya dado pronto tratamiento médico, incluyendo los que requieren protección para evitar el contacto con cualquier parte del cuerpo [53] [55].

Para inflamabilidad, el amoníaco posee grado 1: materiales que deben ser precalentados para que ocurra la combustión. Los materiales de este grado requieren un precalentamiento considerable bajo cualquier condición de temperatura ambiental para que se produzca la ignición y la combustión [53][55].

Por último, en reactividad, al amoníaco le pertenece el grado 0: materiales que por sí mismos son normalmente estables, aún en condiciones de exposición al fuego y que no reaccionan con el agua [53][55].

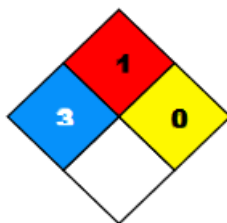


Figura 2.10: Señal de seguridad para amoníaco según Nch1411/4 [55].

El Decreto 43 del MINSAL regula las condiciones de seguridad para el almacenamiento de sustancias peligrosas. Respecto al amoníaco líquido y en solución, como corresponde a un gas tóxico según la NCh382, el decreto especifica qué tipo de instalación se puede utilizar según la cantidad máxima a almacenar [56]:

- Artículo 20: Para 1 cilindro o 5 [kg] en cartridge, el amoníaco podrá almacenarse envasado sobre el piso o en estanterías de material liso no absorbente.
- Artículo 25: Para 2 cilindros o 10 [kg] en cartridge, el amoníaco se puede almacenar en bodegas comunes.
- Artículo 34: Para 3 cilindros o 300 [kg] en cartridge, la instalación admisible para almacenar el amoníaco son bodegas para sustancia peligrosas.
- Artículo 34: El almacenamiento mayor a 3 cilindros o 300 [kg] en contenedor se deberá realizar en bodegas exclusivas para la(s) clase(s) y/o divisiones.

En el Artículo 76, ubicado en el párrafo III del Título IV del Decreto 43 del MINSAL, se indican los lineamientos que se deben aplicar a los gases tóxicos [56]:

- El almacenamiento de gases tóxicos sobre 3 cilindros o 300 [kg] en cartridge, se debe realizar en un área exclusiva para ello. Dicha área deberá contar con techo con una cubierta liviana y, en caso de ser una bodega, debe poseer un sistema de detección automático para el gas específico y acciones de control en caso de fuga. Si no existiesen detectores específicos, será obligatorio el uso de equipos de protección personal para manejar este tipo de gases, por ejemplo: máscaras con filtros específicos para sustancias manejadas y/o equipos de respiración autónomos para el personal.

- Cuando se vaya a almacenar más de 5 cilindros se deberá contar con, al menos, dos equipos de respiración autónoma, para respuesta a emergencias.
- El área para el almacenamiento deberá tener un distanciamiento del muro medianero o deslinde de la instalación de 10 [m] y de 3 [m] a cualquier otra construcción al interior del sitio.

Siguiendo con el Decreto 43, en el Artículo 158, perteneciente al Párrafo III del Título IX, orientado al almacenamiento a granel, se señala que todo tanque de gases dentro de la categoría 2.3 de la norma NCh382, es decir, gases tóxicos, deberá contar con un sistema de detección de fugas, y que aquellos tanques que almacenen este clase de gases podrán tener dos costados libres, de 4 [m] por la zona de carga y de 3 [m] por el otro costado [56]. Además, para los gases tóxicos, el Artículo 158 presenta las distancias de seguridad que deben poseer los tanques, las cuales se muestran en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Distancias de seguridad para tanques de gases tóxicos [56].

Capacidad del tanque [m ³]	Distancia para tanques en superficie [m]	Distancia para tanques bajo tierra [m]
Hasta 5	5	5
Mayor a 5 y hasta 20	10	5
Mayor a 20 y hasta 60	15	8
Mayor a 60 y hasta 200	15	10
Mayor a 200 y hasta 400	20	10
Mayor a 400	30	20

Por otro lado, el Artículo 150 del Decreto 43 (almacenamiento a granel) especifica que los tanques recibidores de amoníaco líquido a alta presión deberán contar con un sistema de control de derrame, el cual consiste en un depósito de contención con capacidad equivalente al 50 % del volumen del tanque, exceptuando los de doble cámara. Si el depósito de contención servirá a dos o más tanques, su capacidad debe ser equivalente al 50 % del volumen del tanque mayor, descontado el volumen que ocupa el resto de los tanques hasta la altura del pretil, siempre que las sustancias almacenadas en todos los tanques sean compatibles entre sí. Si las sustancias fueran incompatibles, no se podrá utilizar un depósito de contención común, sino que se deberá usar un depósito de contención para cada tanque fijo, cumpliendo las demás condiciones de este artículo [56].

A través del Decreto 298, el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) indica los lineamientos para el transporte de amoníaco por vía terrestre. En particular, regula los requisitos generales, condiciones y procedimientos que son aplicables al transporte de sustancias peligrosas por medio de vía terrestre: lugares de tránsito, señaléticas, identificación, estacionamiento, antigüedad del camión admisible, entre otros. Algunos de los puntos más relevantes de este decreto son los siguientes [57]:

- Cuando el cargamento comprenda sustancias peligrosas y no peligrosas compatibles entre sí, éstas deberán estibarse separadamente.
- Vehículos que no excedan la antigüedad máxima de 15 años, deben ser cerrados o transportar la carga tapada.
- Se debe portar con rótulos que indiquen clase de peligrosidad de las sustancias transportadas por todos los lados visibles del vehículo.
- Las operaciones de carga y descarga implicarán la detención total del vehículo, a menos que se necesite, la utilización de un sistema integrado a este (sistemas de transferencia).
- Un vehículo transportando materiales peligrosos sólo deberá estacionar a más de cien metros de una zona de fuego abierto.
- Los vehículos que transporten sustancias peligrosas deberán evitar el uso de vías en áreas densamente pobladas y no podrán circular por túneles cuya longitud sea superior a 500 [m], siempre y cuando cuando éstos tengan una vía alternativa segura.
- Cuando el peso de la carga sea mayor a 3.500 [kg] se debe portar una luz de emergencia.
- Todos los bultos deben estar marcados y etiquetados de acuerdo con la norma NCh2190.
- Se deberá limpiar los depósitos luego de transportar una sustancia peligrosa, a menos que la nueva carga esté constituida del mismo producto que el cargamento anterior.

Siguiendo con las normativas del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT), la Resolución 96 regula lo que es manipulación y almacenamiento en instalaciones portuarias. En particular, tiene aplicación a tres tipos de carga: de depósito prohibido, de depósito condicionado y cargas de ingreso prohibido [58]. En esta resolución, el amoníaco anhidro forma parte de las cargas de depósito condicionado, pues al ser un gas tóxico, está definido dentro de la clase 2: gases comprimidos, licuados o disueltos bajo presión.

Es importante mencionar que Chile se encuentra sujeto al Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG) y sus Anexos, aprobado por el Decreto Supremo N° 777, con el objetivo de mantener y aumentar los niveles de operatividad y seguridad que se tiene en los puertos. Según el Código IMDG, las mercancías pertenecientes a la clase 2.3 (gases tóxicos) se consideran de embarque o retiro inmediato, pudiendo estas depositarse de forma excepcional en el recinto o área especial de la Administración de Puerto a solicitud del Cliente, con una copia informativa previa para la Autoridad Marítima y posterior autorización del Administrador del Puerto [58].

2.3.2. Normas internacionales

Dado que a nivel mundial se viene utilizando el amoníaco a nivel industrial hace muchos años, diversas instituciones de otros sectores del mundo han definido normativas para lograr asegurar el correcto uso de dicho compuesto, entre las que se encuentran ANSI, ASME, ASTM, CGA, ISO, entre otras. Para el transporte de amoníaco en la industria marítima, la Organización Marítima Internacional (IMO) y las Sociedades de Clasificación han cubiertos los estándares, normativas y guías para almacenar y transportar amoníaco en la industria marítima, siguiendo los códigos IGF e IGC. A día de hoy, no se ha desarrollado una normativa para el uso del amoníaco como combustible, es por esto que en todos los casos, las normativas a utilizar se escogen en base al tipo de fluido que representa el amoníaco (tóxico, corrosivo, etc). A continuación, en las Tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se presentan diferentes normativas y guías de aceptación internacional aplicables al almacenamiento y/o transporte de amoníaco que se pueden considerar al evaluar proyectos relacionados a este producto:

Tabla 2.3: Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco [5].

Código	Título	Almacenamiento	Transporte
ASME B31.3	Process Piping	X	X
ASME B31.4	Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries	X	X
ASME B31.5	Refrigeration Piping and Heat Transfer Components	X	X
ASME – BPVC VIII-1	Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1	X	X
ASME – BPVC VIII-2	Rules for Construction of Pressure Vessels Division 2	X	X
ASME – BPVC XII	Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks	X	X
ISO 5771	Rubber hoses and hose assemblies for transferring anhydrous ammonia – Specification	X	X
ISO 13623	Petroleum and natural gas industries— Pipeline transportation systems	X	X
ISO 11114- 1	Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents — Part 1: Metallic materials	X	X
ISO 6957	Copper alloys — Ammonia test for stress corrosion resistance	X	X

Tabla 2.4: Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco (continuación) [5].

Código	Título	Almacenamiento	Transporte
ISO 20519	Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels		X
ISO 28460	Petroleum and natural gas industries — Installation and equipment for liquefied natural gas — Ship-to-shore interface and port operations		X
IGC Code – Chapter 1	Use of Cargo as Fuel	X	X
IGC Code - regulations 17.12.1 to 7	Special Requirements - 17.12 Ammonia	X	X
IGC Code – Chapter 6	Materials of Construction and Quality Control	X	X
IGF Code – part A sec. 4.2.1 & 4.2.3	Risks arising from the use of low-flashpoint fuels affecting persons on board, the environment, the structural strength or the integrity of the ship	X	X
IGF Code – part A sec. 3.2.6 & 5.2.1.3	Unintended accumulation of explosive, flammable or toxic gas concentrations	X	X
IGF Code – part A-1 SEC. 7	Material and general pipe design	X	X
SOLAS regulation II 1/55	Alternative design and arrangements: methodology for alternative design and arrangements for machinery, electrical installations and low-flashpoint f uel storage and distribution systems	X	X

Tabla 2.5: Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco (continuación) [5].

Código	Título	Almacenamiento	Transporte
IMO MSC.1/Circ. 1455	Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments		X
IACS – Rec No.142.	LNG Bunkering Guidelines		X
IAPH – LNG Bunker Checklists			X
SGMF – Gas as a marine fuel (safety guidelines)			X
DNV – Rules for Classification:Ships – 2022 - Pt.6 Ch.2 Sec.8	Alternative Fuels – Fuel Ready: requirements related to later conversion to one or several alternative fuels other than the fuel the vessel is originally designed for	X	X
DNV – Rules for Classification: Ships – 2022 - Pt.6 Ch.2 Sec.14	Gas Fuelled Ship Installations - Gas Fuelled Ammonia: criteria for the arrangement and installation of machinery for propulsion and auxiliary purposes, using ammonia as fuel	X	X
ABS – Guide for Gas and Other Low-Flashpoint Fuel Ready Vessels	Optional application to ship types other than those falling under the scope of the IGC Code and the ABS requirements under Part 5C, Chapter 8 of the ABS Rules for Building and Classing Marine Vessels and burning their cargo as fuel.	X	X

Tabla 2.6: Normativas y guías internacionales para el almacenamiento y transporte de amoníaco (continuación) [5].

Código	Título	Almacenamiento	Transporte
ABS – Guide for Ammonia Fueled Vessels	Guide for the design, construction, and survey of vessels utilizing anhydrous ammonia (ammonia) as fuel. This guide is focused on systems and arrangements provided for the use of ammonia for propulsion and auxiliary systems.	X	X
Korean Register - Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels	Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels	X	X
Bureau Veritas - NR671 - July 2022	Ammonia - Fuelled Ships: Tentative Rules		X
DNV Recommended Practice G105	Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities		X
DNV - Ammonia as a marine fuel safety handbook			X

Respecto al Código IGF, este ha sido desarrollado sobre una base para la combustión de gas natural. Se pueden utilizar otros combustibles de bajo punto de inflamación si cumplen los requisitos operativos del Código IGF y proporcionen un nivel de seguridad equivalente al de los combustibles convencionales. Este código actualmente no establece requisitos para otros combustibles, como el amoníaco, pero describe un mecanismo para adoptar especificaciones de diseño alternativas para el uso de otros combustible. Por tanto, hasta que se establezca una regulación específica sobre el uso de amoníaco como combustible, la homologación de buques que utilicen combustibles distintos al gas natural se basará en este mecanismo de diseño alternativo.

El hecho de que el amoníaco sea un gas tóxico y corrosivo, genera la necesidad de tener aspectos de seguridad en cuenta debido al peligro al que se ven expuestas las personas y el impacto medioambiental que podría causar una eventual fuga de este compuesto. Actualmente, los riesgos medioambientales del amoníaco transportado como carga ya son abordados por regulaciones, por lo que se debe poner los esfuerzos en lograr que las nuevas aplicaciones del amoníaco incluyan las medidas necesarias para evitar los impactos ambientales asociados a los nuevos usos, los cuales implican a su uso como combustible o carrier de energía (para uso directo o su conversión en hidrógeno mediante oxidación parcial).

Por último, es de suma importancia que se establezcan normas nacionales de seguridad eficaces para aplicaciones más concretas como lo son el almacenamiento de amoníaco en tanques verticales u horizontales (según su estado), o el transporte mediante tuberías. Esto debido a que los decretos que se tienen a día de hoy sólo consideran el almacenamiento en cantidades del orden de hasta 300 [kg] [56], lo cual no apunta al tamaño de una planta de amoníaco, y respecto al transporte, sólo se encuentra regulado el transporte mediante vehículos terrestres. Las normas presentadas en las Tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 podrían servir como lineamientos para el desarrollo de nuevas normativas nacionales, las cuales eventualmente deberán ser cumplidas en el desarrollo de los distintos proyectos que se están abordando en Chile.

Capítulo 3

Almacenamiento

Esta sección se centra en el uso de tanques que almacenan amoníaco líquido refrigerado. Se hará uso de la norma API 620 “Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks” en complemento con la norma API 625 “Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage” para orientar los requisitos específicos que se necesitan en los materiales, el diseño y la fabricación de tanques que se utilizarán para el almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado a -33 [°C] y presión atmosférica. Para el análisis de esfuerzos, también se hará uso de la norma API 650 “Welded Tanks for Oil Storage”, pues la norma API620 autoriza su uso para el análisis sísmico [59].



Figura 3.1: Tanque de acero de pared simple con dique [60].

3.1. Condiciones de diseño

Para definir criterios del almacenamiento, se considerará como referencia realizarlo en estado líquido refrigerado a -33 [°C] y a presión atmosférica. Los tanques que almacenan el producto en este estado suelen utilizarse a partir de las 5.000 toneladas métricas,

llegando hasta 50.000, por lo que el alcance de la presente sección considera ese como el rango óptimo para esta forma de almacenar el amoníaco. Si se deseara almacenar menos o más, se sugiere realizar un estudio de factibilidad técnica-económica para determinar la mejor alternativa.

3.1.1. Modelos de referencia

El diseño para los tanques que almacenan amoníaco refrigerado considera los dos modelos para sistemas de contención única más utilizados, siendo el primero un depósito de acero de pared simple con aislamiento exterior, y el segundo es un depósito de acero con doble pared y aislamiento de perlita entre las paredes [37]. En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran modelos de referencia:

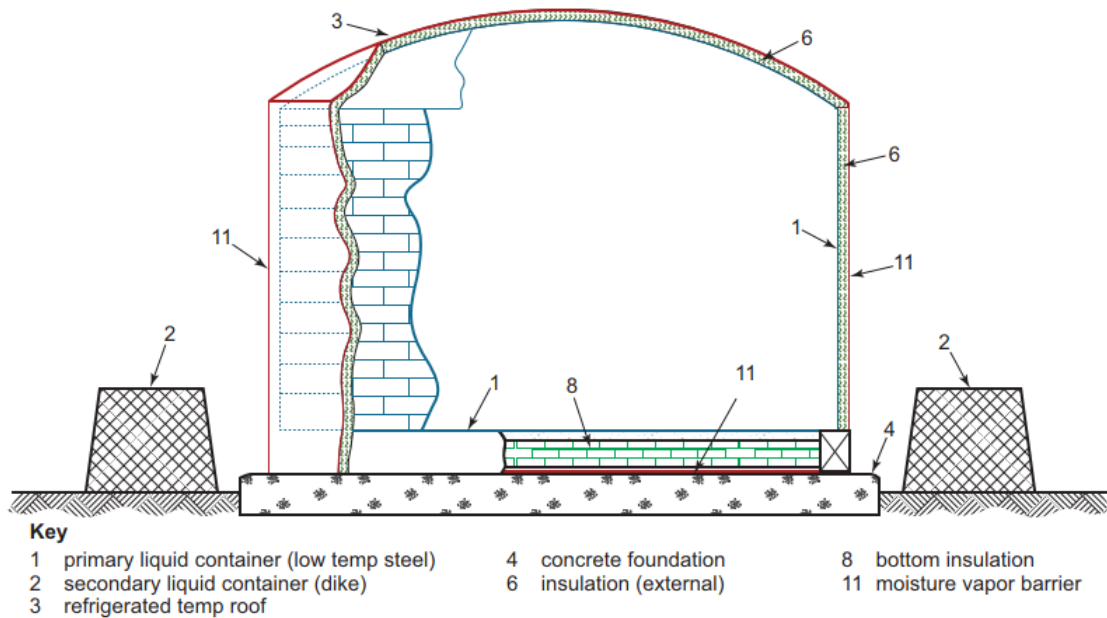


Figura 3.2: Sistema de Tanque de Contención Simple. Pared simple con contenedor primario de acero y aislamiento externo [61].

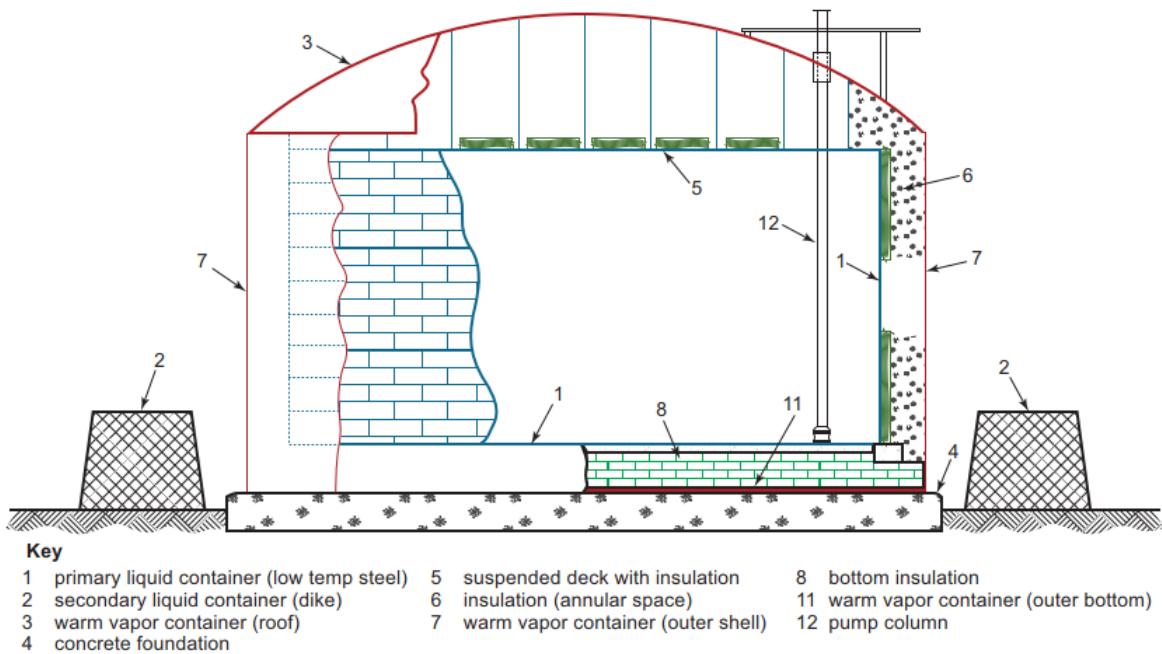


Figura 3.3: Sistema de Tanque de Contención Simple. Doble pared con recipiente primario de acero y recipiente de vapor de acero [61].

Los tanques de pared simple tienen una pared de acero de baja temperatura con aislamiento exterior cubierto por una barrera de vapor. Un tanque de doble pared tiene una pared interior de acero para bajas temperaturas y una pared exterior de acero al carbono con aislamiento intermedio. La pared exterior no está diseñada para soportar el líquido frío, por lo que sigue siendo un sistema de contención simple [62].

El sistema de contención única incorpora un recipiente estanco a los líquidos y otro estanco a los vapores. Puede ser un tanque de pared única estanco a líquidos y vapores o un tanque compuesto por un recipiente interior y otro exterior, diseñado y construido de forma que sólo el recipiente interior sea estanco a los líquidos y contenga el producto líquido [61].

El recipiente primario del líquido deberá ser de metal para baja temperatura o de hormigón pretensado. El recipiente exterior, en el caso de pared doble, está destinado principalmente a retener y proteger el sistema de aislamiento contra la humedad y puede contener la presión de vapor del producto, pero no está diseñado para contener el líquido refrigerado en caso de fuga del recipiente interior. Este depósito exterior deberá ser estanco al vapor. Normalmente es de acero al carbono, y se hará referencia a él en varios contextos como contenedor de vapor de producto caliente [61].

El sistema de tanque de contención simple está rodeado por una contención secundaria (normalmente un dique) que está diseñado para retener el líquido en caso de fuga, logrando de esta forma proteger a las personas expuestas [61].

En tanques de pared simple, se tienen dos opciones para la configuración del aislamiento: cubierta aislante suspendida o aislamiento externo (Figura 3.2). La cubierta aislante suspendida es un sistema en el cual el aislamiento se encuentra suspendido entre el techo del tanque y la cubierta de aislamiento (Figura 3.4). Este tipo de diseño permite una mayor protección térmica del tanque y del contenido almacenado, pues el aislamiento se encuentra alejado de la superficie externa del tanque, lo que permite reducir las pérdidas de calor y mantiene una temperatura más constante en el interior del tanque. Por otro lado, el aislamiento externo es aquel cuyo aislamiento se encuentra ubicado externamente sobre la superficie del tanque. Este tipo de diseño puede ser más sencillo de instalar y mantener, ya que el aislamiento se encuentra directamente en la superficie externa del tanque, lo que facilita su acceso para mantenimiento y reparaciones.

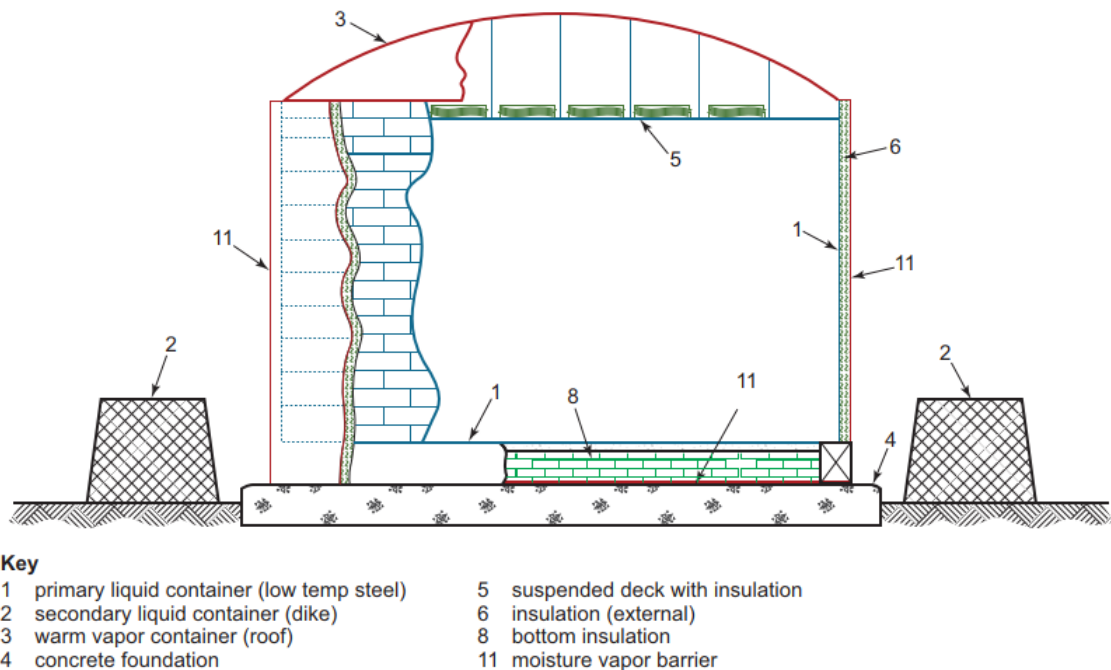


Figura 3.4: Sistema de Tanque de Contención Simple. Pared simple con contenedor primario de acero y aislamiento en cubierta suspendida (alternativa) [61].

En los tanques de pared doble, además del uso de un contenedor de vapor (Figura 3.3), se tiene como alternativa disponible un contenedor de gas de purga (Figura 3.5). El contenedor de vapor se diseña para permitir una liberación controlada del amoníaco en forma de vapor en el caso de que la presión en el interior del tanque supere los niveles de seguridad establecidos. Este tipo de contenedor permite mantener la presión del tanque dentro de rangos seguros y predefinidos, evitando que se acumule una presión excesiva y minimizando el riesgo de fugas o rupturas del recipiente debido a la presión interna. Por otro lado, un contenedor de gas de purga se refiere a un espacio vacío entre la pared interna y externa del tanque, el cual es utilizado para la acumulación de gases producidos por la evaporación del amoníaco refrigerado. Este gas acumulado posteriormente puede ser liberado del tanque a través de un sistema de purga controlada.

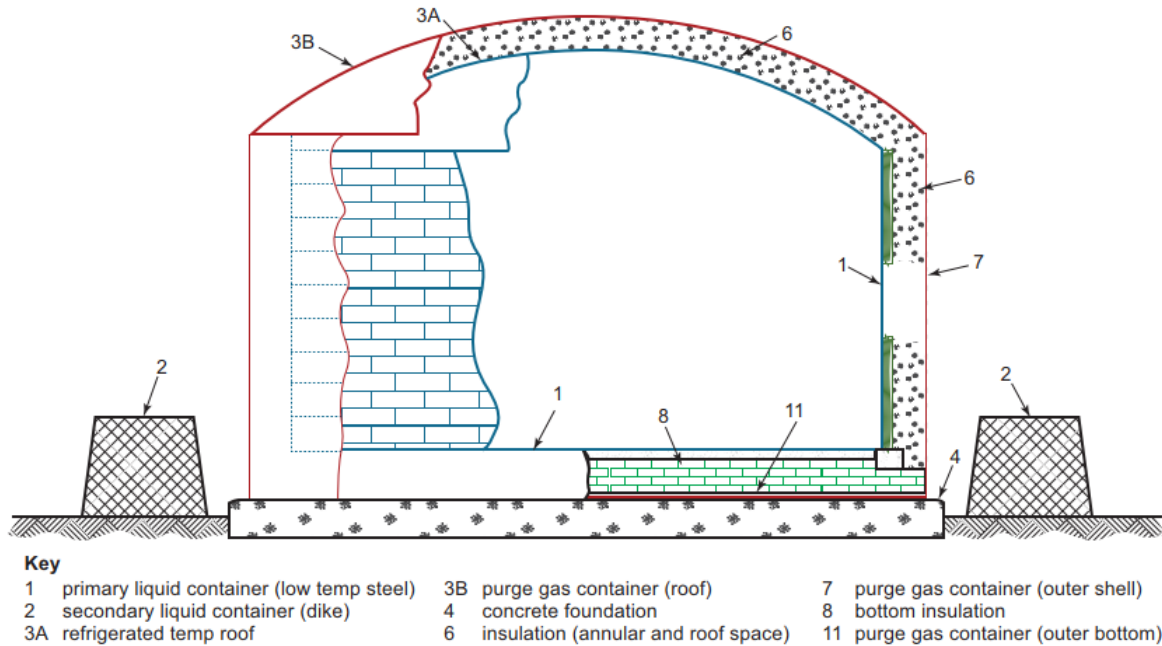


Figura 3.5: Sistema de Tanque de Contención Simple. Doble pared con recipiente primario de acero y contenedor de gas de purga de acero (alternativa) [61].

La densidad del amoníaco líquido será su densidad máxima dentro de la gama de temperaturas de diseño, pero no inferior a 36 [lb-f/ft³] (576,67 [kg/m³]) [59].

3.2. Contenedores primario y secundario

El material normal de construcción para los tanques que almacenan amoníaco es el acero al carbono. El amoníaco reacciona con el cobre y sus aleaciones, especialmente si hay restos de agua, por lo que no deben utilizarse. El tipo de material estándar es el acero al carbono-manganeso, sometido a pruebas de impacto a -40 [°C] o cerca de esta temperatura. Los materiales de construcción para la manipulación de amoníaco deben ser resistentes a las bajas temperaturas y al agrietamiento por corrosión bajo tensión. Los aceros de alto límite elástico son más susceptibles a la corrosión que los de bajo límite elástico, por lo que se puede especificar un límite superior de resistencia. Los aceros austeníticos son resistentes a la fractura frágil a baja temperatura [62].

La metalurgia del acero a utilizar es un factor relevante. El agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) se produce con mayor facilidad cuando no se han aliviado las tensiones y en aceros de alto límite elástico. Las medidas para prevenir el SCC son el alivio de tensiones mediante un tratamiento térmico posterior a la soldadura y el uso de aceros de bajo límite elástico [62].

Se suelen utilizar materiales con un límite elástico mínimo de entre 290 y 360 [MPa]. Para los tanques nuevos, es recomendado usar materiales con un límite elástico mínimo

en la parte inferior del rango mencionado [60].

Como referencia para la selección de materiales, Enaex posee tanques para el almacenamiento refrigerado de amoníaco con capacidad de 10.000 toneladas métricas. Los materiales de sus tanques son acero al carbono ASTM A516 Gr. 70 [63]. Otro material comúnmente utilizado para los tanques es el ASTM A537 Clase 1 [64].

En la construcción se utilizan diversos tipos de materiales de soldadura, pero a menudo con un nivel de resistencia considerablemente superior al del material base. La compatibilidad del nivel de límite elástico entre la soldadura y el material base es un parámetro importante para la resistencia contra el agrietamiento por corrosión bajo tensión del amoníaco [60].

Los materiales para recipientes primarios y secundarios de líquido, techos de temperatura refrigerada (incluyendo los techos interiores de los tanques de doble techo y los techos simples de los tanques con aislamiento exterior del techo) y placas de revestimiento (si son requeridas para la contención de líquidos, en contenedores de hormigón para líquidos primarios o secundarios, cargados en tensión en condiciones de enfriamiento, funcionamiento u otras condiciones de diseño), incluyendo sus penetraciones, tuberías, anclajes, rigidizadores, y fijaciones, se seleccionarán de la Tabla R-1 de la norma API620 (ver Anexo A) y deben ser sometidos a ensayos de energía de impacto Charpy con entalle en V [59].

Anillos de refuerzo para depósitos de líquidos primarios y secundarios

Pueden ser necesarios anillos de refuerzo internos o externos para mantener la redondez cuando el tanque esté sometido a viento, vacío u otras cargas específicas [59].

Los materiales del anillo y la banda de refuerzo asociada deberán seleccionarse de la Tabla R-1 de la norma API620 (ver Anexo A) y ser sometidos a ensayos de energía de impacto Charpy con entalle en V. El anillo rigidizador puede fabricarse a partir de placa utilizando una soldadura intermitente en lados alternos entre el alma y el flange [59].

Anclaje de tanques para contenedores de líquidos primarios y secundarios

El anclaje para los recipientes primarios y secundarios de líquido se diseñará para cumplir los siguientes requisitos [59]:

- El anclaje deberá tener en cuenta el movimiento de la pared y del fondo del tanque provocado por los cambios térmicos.
- El fabricante y el comprador deben considerar la tolerancia de corrosión necesaria si se utilizará un acero al carbono. El material para el anclaje del tanque deberá seleccionarse de la Tabla R-1 de la norma API620 (ver Anexo A).

3.2.1. Requisitos de fabricación para contenedores de líquidos primarios y secundarios y techos de temperatura refrigerada

Lo siguiente se unirá mediante doble soldadura a tope con penetración y fusión completa [59]:

- Juntas longitudinales y circunferenciales del armazón y juntas que unen las placas anulares del fondo. Cuando lo apruebe el comprador, podrán soldarse por un solo lado siempre que se utilice un refuerzo temporal no fusible con penetración completa y fusión completa.
- Juntas que unen secciones de anillos de compresión y secciones de rigidizadores del armazón. Se pueden utilizar barras de refuerzo para estas juntas con penetración completa y detalles de fusión completos.
- Juntas alrededor de la periferia de una placa de inserción del armazón.
- Juntas que conectan la carcasa con el fondo, a menos que se utilice un método de comprobación de fugas; en ese caso, se aceptan soldaduras de filete dobles.
- Juntas que conectan los cuellos de las boquillas a los flanges.
- Las soldaduras a tope en boquillas de tuberías, cuellos de cubiertas y accesorios de tuberías, incluidas las bridas de cuello de soldadura, se realizarán utilizando juntas dobles soldadas a tope. Cuando la accesibilidad no permita el uso de juntas dobles soldadas a tope, se utilizarán juntas soldadas a un solo tope que garanticen una penetración total a través de la raíz de la junta.

Además, todas las soldaduras de filete tendrán un mínimo de dos pasadas [59].

Conexiones y cierres

- Se podrán utilizar flanges deslizantes (Slip On) cuando así lo apruebe específicamente el comprador [59].
- Todas las juntas de soldadura del cuello de la boquilla y del cuello a la pared del tanque deberán tener una penetración completa y una fusión completa [59].
- El material para los flanges de boquillas deberán ser conformes con la Tabla R-1 de la norma API620 (ver Anexo A) [59].
- Las tapas de llenado deberán tener cierres soldados [59].

3.2.2. Tratamiento térmico postsoldadura

Todas las conexiones de las aberturas de los recipientes de líquido primario y secundario se soldarán a la placa de la carcasa o a una placa de inserción engrosada, y el conjunto soldado se someterá a una descarga de esfuerzos antes de su instalación en el tanque. Será obligatorio realizar alivio de tensiones tanto para los componentes primarios como para los secundarios [59].

3.2.3. Piezas sin presión

Las soldaduras de las almohadillas, orejetas de elevación y otras piezas sin presión, así como las orejetas temporales para alineación y andamiaje fijadas a los contenedores de líquidos primarios y secundarios y a los techos de temperatura refrigerada, se realizarán cumpliendo íntegramente un procedimiento de soldadura cualificado de acuerdo con la norma API620 [59].

Se retirarán las fijaciones para el montaje y se esmerilará cualquier saliente significativo de metal de soldadura hasta obtener un contorno liso, tras lo cual se procederá a un examen con partículas magnéticas. Cuando se efectúen reparaciones en recipientes primarios y secundarios de líquidos, se examinará la zona mediante el método de partículas magnéticas [59].

3.3. Contenedor de vapor de producto caliente

Los siguientes se consideran componentes del recipiente de vapor de producto caliente [59]:

- Techos sobre cubiertas suspendidas.
- Revestimientos exteriores de sistemas de tanques de contención simples de doble pared con tanques interiores de tapa abierta.
- Fondos exteriores de sistemas de tanques de contención simples de doble pared con tanques interiores de tapa abierta.
- Los revestimientos metálicos de los recipientes de hormigón para líquidos secundarios cuando los revestimientos actúen como recipientes de vapor de producto caliente, pero no se exigen para la contención secundaria de líquidos.

Componentes internos

En base a la temperatura de diseño (-33 [°C]), los materiales de los componentes situados dentro del recipiente de vapor de producto caliente, pero no soldados directamente a este, deberán ajustarse según la Tabla R-1 de la norma API620 (ver Anexo A) [59].

Diseño

Se debe considerar que los recipientes de vapor caliente deben tener un espesor nominal mínimo de 3/16 pulgadas, exceptuando los revestimientos de pared metálicos para recipientes de hormigón, que tendrán un espesor nominal mínimo de 0,12 pulgadas [59].

Soldaduras de contenedores de vapor de productos calientes

Los revestimientos de pared metálicos para contenedores de vapor de productos calientes hechos de hormigón se soldarán a tope con penetración parcial o total o se soldarán solapados a placas de empotramiento. Las soldaduras de filete para los revestimientos de pared soldados a solapa serán de dos pasadas como mínimo, excepto en el caso de los revestimientos de pared de menos de 3/16 pulgadas, los cuales podrán ser de una sola pasada [59].

Piezas sin presión

Cuando se retiren las fijaciones, los salientes significativos de metal de soldadura se esmerilarán hasta obtener un contorno liso, tras lo cual se procederá a un examen visual. Las reparaciones efectuadas tras la retirada de las fijaciones temporales irán seguidas de un examen visual [59].

3.4. Tuberías

Todas las tuberías conectadas externamente a los recipientes de líquido y vapor (esto es aplicado a los componentes del sistema de tanques fijados y situados dentro de los contenedores de líquido y vapor, pero excluyendo las paredes del contenedor), dentro de los límites siguientes se construirán en conformidad con los requisitos mínimos de diseño que propone la norma ASME B31.3, pero utilizando las tensiones admisibles de la Tabla 5-1 (ver Anexo C) [59].

1. La cara del primer flange en conexiones bridadas.
2. La primera junta roscada de la tubería fuera de la pared del tanque en las conexiones de tubería roscada.
3. La primera junta circunferencial en las conexiones de tuberías con extremos soldados que no tengan un flange situado cerca del tanque.

3.5. Esfuerzos

El esfuerzo de tracción máximo admisible se tomará de la Tabla 5-1 de la norma API620 (ver Anexo C). Los esfuerzos máximos admisibles a partir de cargas de cálculo combinadas con cargas de viento o sísmicas no superarán el 133 % de la tensión admisible para la condición de carga de diseño; excepto en los casos que se indican en el Anexo L de la norma API620, en los que este esfuerzo no superará el 80 % del límite elástico mínimo especificado (para aceros al carbono) [59].

3.5.1. Cargas de diseño y combinaciones de carga

En el diseño de los contenedores y los cimientos se tendrán en cuenta los siguientes tipos de cargas de diseño [61]:

- Cargas normales:
 1. Cargas sísmicas (OBE).
 2. Cargas de desmantelamiento.
 3. Cargas inducidas por asentamientos diferenciales previstos.
- Cargas anormales:
 1. Cargas basadas en una evaluación de riesgos, por ejemplo: incendio, onda de presión, proyectil externo, etc. (cuando lo especifique el comprador).
 2. Cargas sísmicas (SSE y ALE)

Los estudios de peligrosidad sísmica son necesarios para determinar los movimientos sísmicos del terreno para el diseño de sistemas de tanque-fluido-fundación. Se requiere un espectro de respuesta específico para cada lugar exigido por normativas locales [61].

Se deben realizar combinaciones de cargas de diseño que se utilizarán en el análisis y diseño de los contenedores. Las combinaciones de carga dependen del tipo de material del contenedor, y como se utilizarán contenedores metálicos, se debe seguir la normativa API620 [61].

3.5.2. Combinación de cargas de diseño para tanques de doble pared

Los recipientes interior y exterior se diseñarán para las combinaciones de carga más críticas según el listado que se muestra a continuación [59]:

1. $D_L + P_g + P_t$
2. $D_L + W_L + 0.7P_g$
3. $D_L + W_L + 0.4P_v$
4. $D_L + P_v + 0.4(L_r \text{ o } S)$
5. $D_L + 0.4P_v + (L_r \text{ o } S)$
6. $D_L + 0.7P_g + P_t + E + 0.1S$
7. $D_L + H_t$
8. $D_L + L_s$
9. $D_L + L_p + P_g + P_t$

Siendo

- D_L : Carga muerta. Peso del tanque o del componente de este, incluido cualquier aislamiento, revestimiento o protección contra la corrosión salvo indicación contraria.
- P_g : Presión de diseño del recipiente de líquido secundario.
- P_l : Altura de líquido en el recipiente de líquido secundario determinada a partir de la capacidad máxima de funcionamiento normal del recipiente de líquido primario.
- E : Carga sísmica ALE (Aftershock Level Earthquake), incluida una carga de nieve del 10 %.
- P_v : Presión máxima de vacío parcial.
- W_L : Carga del viento.
- L_r : Carga viva mínima del tejado, 20 [lb/ft²] (98 [Pa]) en el área horizontal proyectada del tejado.
- S : Carga de nieve en suelo según norma ASCE 7.
- H_t : Carga debida a la realización de las pruebas hidrostáticas y neumáticas.

3.6. Funcionamiento

3.6.1. Niveles y volúmenes de líquidos

Se incluirá en la altura del tanque un francobordo nominal de 300 [mm] (12 [in]) por encima del nivel de líquido de diseño para evitar el sobrellenado y permitir el libre flujo de vapor por debajo de la cubierta durante el venteo. Puede ser necesario aumentar la altura del tanque para cumplir los requisitos de francobordo sísmico [61].

Responsabilidades del comprador [61]:

- Determinar el margen de protección contra sobrellenado en función de la altura y volumen del tanque o los tiempos de viaje entre el nivel máximo de funcionamiento normal y el nivel de líquido de diseño, a fin de permitir la parada del proceso antes de que se alcance el nivel de líquido de diseño.
- Determinar y especificar el nivel mínimo de funcionamiento normal. Este nivel puede determinarse como el nivel mínimo para el reinicio de la bomba, o puede ser el nivel mínimo de bombeo, incluyendo tasas de bombeo reducidas.. El nivel mínimo de funcionamiento normal deberá ser no menos de 150 [mm] (6 [in]) para mantener la temperatura de funcionamiento del tanque.

3.6.2. Criterios de rendimiento

Funcionamiento normal

El recipiente primario de líquido deberá contener el líquido en todas las cargas y condiciones normales de funcionamiento [61].

Respecto al recipiente primario de vapor, este deberá ser estanco al vapor durante el funcionamiento normal, y además tener una capacidad de presión adecuada por encima de la presión normal de funcionamiento para evitar el venteo en esas condiciones [61].

Condiciones anormales y de emergencia

El recipiente primario de líquido deberá estar diseñado para poder mantener la contención total del líquido en condiciones anormales y de emergencias. No obstante, si por cualquier condición imprevista se produce una fuga del contenedor primario, el contenedor secundario de líquido (el dique) contendrá el líquido. Este recipiente de líquido secundario deberá estar dimensionado para contener la capacidad máxima de líquido del recipiente de líquido primario [61].

La separación entre los sistemas de tanques de almacenamiento de amoníaco refrigerado deberá ser suficiente para cumplir estos requisitos.

Velocidad de ebullición

El sistema de aislamiento del tanque limitará la velocidad de ebullición por debajo del índice requerido por el diseño de la planta o del índice máximo especificado por el comprador. El índice de evaporación, que normalmente se especifica en porcentaje diario de la capacidad máxima de líquido suponiendo un producto puro, se basará en las condiciones climáticas especificadas para el proyecto respectivo. Las condiciones climáticas que se deben tener en cuenta en la determinación del índice de evaporación son: temperatura media diaria más alta, ausencia de viento y efectos de la radiación solar [61].

Vuelco

Para los productos almacenados sujetos a condiciones de vuelco, el sistema de tanques deberá proporcionar un medio para evitarlas, lo que se logrará mediante una gestión activa del líquido almacenado. La gestión activa incluye el control de las temperaturas, densidades y la mezcla del líquido mediante un llenado superior e inferior adecuado o mediante recirculación. Si se produjera un vuelco, un sistema de medición de la densidad deberá monitorear esta propiedad en toda la altura del líquido y emitir una alarma cuando se aproximen las condiciones de vuelco previstas [61].

Temperatura de diseño

Las temperaturas mínimas de diseño de los componentes del sistema de tanques deben cumplir las siguientes condiciones [61]:

- Para los recipientes de líquido primarios y secundarios y las líneas de procesos que transporten líquido o gas, la temperatura no debe ser superior a la temperatura de ebullición del producto puro a presión atmosférica (ver Anexo D). Las condiciones de diseño como la introducción de producto subenfriado, pueden requerir una temperatura de diseño inferior.
- Para techos de temperatura refrigerada, la temperatura debe ser igual a la temperatura de diseño del contenedor de líquido primario.
- Para los recipientes de vapor de producto caliente, la temperatura debe ser igual a la temperatura ambiente media más baja de un día reducida en -15 [°C] a menos que se realice un análisis térmico.
- Para las zonas locales del recipiente de vapor de producto caliente (por ejemplo, las conexiones de la pieza de distancia térmica de la boquilla de proceso con el recipiente de vapor) que están sometidas a temperaturas inferiores a las condiciones ambientales, la temperatura deberá ser determinada teniendo en cuenta este efecto de enfriamiento local.
- Para las penetraciones, tuberías, anclajes, refuerzos y accesorios soldados directamente a recipientes de líquido, vapor o gas de purga, la temperatura se definirá según los requisitos indicados previamente en esta lista, según corresponda.

Movimientos diferenciales

El diseño del sistema del tanque deberá prever los movimientos diferenciales entre los componentes del tanque resultantes de las temperaturas diferenciales de diseño y de montaje versus la temperatura de funcionamiento. Los componentes a los que se restrinja el movimiento diferencial libre se diseñarán de modo que incorporen la flexibilidad adecuada para mantener la integridad estructural [61].

Asentamiento de cimientos

Los siguientes componentes se deberán diseñar para los asentamientos [61]:

1. Sistema de aislamiento del fondo.
2. Contenedores de líquido primarios y secundarios metálicos o de hormigón.
3. Sistema de postensado.
4. Accesorios del tanque, incluidas las tuberías de conexión.
5. Pilotes u otros sistemas de soporte estructural.

Protección contra la congelación del suelo

Cuando la congelación del líquido en el suelo bajo los cimientos del tanque sea posible y pueda causar el levantamiento del suelo, el diseño de los cimientos del tanque incluirá un medio para mantener el suelo a una temperatura superior a 0 [°C], o proporcionará unos cimientos elevados para separar el efecto refrigerante del tanque del suelo de apoyo [61].

Comportamiento sísmico

Los sistemas de tanques se diseñarán para los tres niveles de movimiento sísmico siguientes [61]:

1. Terremoto en funcionamiento base (OBE): El sistema de tanques deberá diseñarse para continuar operando durante y después del evento OBE.
2. Terremoto de parada segura (SSE): El sistema de tanques estará diseñado para que no se produzca una pérdida de la capacidad de contención del contenedor primario y será posible aislar y mantener el sistema de tanques durante y después del evento SSE.
3. Terremoto de nivel réplica (ALE): El sistema de tanques, mientras esté sometido a ALE, deberá prever que no haya pérdida de capacidad de contención del contenedor secundario mientras contenga el volumen del contenedor primario al nivel máximo de funcionamiento normal.

Además de las reglas del Anexo L en la norma API 620, el diseño deberá cumplir los requisitos de los códigos de construcción locales aplicables [61].

3.7. Diseño de la fundación

Los sistemas de tanques se instalarán sobre fundaciones diseñadas para transmitir todas las cargas a estratos de suelo portantes adecuados. Los tipos aceptables de sistemas de soporte de cimentación consisten en cimentaciones de balsa o estera, cimentaciones de pilotes (es decir, pilotes en H de acero, pilotes de hormigón in situ o pilotes de hormigón pretensado prefabricados) y cimentaciones elevadas apoyadas en pozos perforados o paredes verticales. El capítulo 10 de la norma ACI 376 establece los requisitos para el diseño de cimentaciones [61].

Los sistemas de apoyo de los cimientos se determinan mediante una investigación geotécnica detallada del emplazamiento de los sistemas de tanques. El alcance y los detalles de la investigación del suelo serán especificados por ingenieros geotécnicos cualificados [61].

Los materiales de construcción y el tipo de cimentación se deben diseñar para resistir adecuadamente las condiciones de temperatura de funcionamiento y de emergencia [61].

Los cimientos deberán mantener su integridad en condiciones normales de funcionamiento. Un método para mantener la integridad de la cimentación es utilizar el calentamiento de la base de la cimentación para las cimentaciones de esteras apoyadas en el terreno en las que se produciría la congelación del subsuelo en condiciones normales de carga. En los casos en que los métodos de calentamiento de la base no sean viables, se considerarán cimentaciones elevadas con un espacio de aire adecuado entre la parte inferior de la cimentación y el terreno [61].

Anclaje

El anclaje de los tanques de contención metálicos primarios o secundarios deberá tener en cuenta lo siguiente [61]:

- Movimiento diferencial entre el anclaje y la conexión al contenedor.
- Esfuerzos locales en la conexión con el contenedor.
- Resistencia diferencial a lo largo de la longitud del anclaje debido a los efectos térmicos y a los materiales de soldadura.
- Detalles de conexión cuando el anclaje atraviesa un límite de contención.

Una de las decisiones cruciales que deben tomarse al diseñar tanques para almacenar amoníaco refrigerado es el tipo de contención, que puede ser de pared simple o doble. La elección depende de varios factores, como el entorno en el que se ubicará el tanque, las regulaciones y normativas aplicables, y el nivel de seguridad requerido.

Los tanques de pared doble generalmente se consideran más seguros debido a que su diseño proporciona una barrera adicional contra derrames y fugas. Sin embargo, también pueden ser más costosos y complejos de construir en comparación con los tanques de pared simple. Por lo tanto, para seleccionar el tipo de tanque adecuado, es esencial realizar una evaluación completa de los riesgos, costos y requisitos específicos del proyecto para garantizar una solución óptima en términos de seguridad, confiabilidad y cumplimiento normativo.

El diseño y la construcción de los tanques son procesos altamente especializados y se debe tener en cuenta los requisitos específicos de geometría y construcción para cada componente. Estos requisitos se establecen para poder garantizar la seguridad operativa, proteger el medio ambiente y mantener las condiciones operacionales del amoníaco. La selección cuidadosa de materiales y técnicas de construcción es esencial para garantizar la eficiencia y confiabilidad a lo largo de la vida útil del tanque.

Considerar y evaluar distintos criterios y situaciones de rendimiento, incluyendo condiciones de emergencia, es fundamental para garantizar la seguridad y la integridad de los tanques, pues una fuga de amoníaco puede ser una falla catastrófica. Por lo mismo, también se deben realizar estrictos procedimientos de examen e inspección.

3.8. Selección de configuración

3.8.1. Especificaciones

En la Tabla 3.1 se indican las especificaciones seleccionadas para las distintas componentes:

Tabla 3.1: Selección de especificaciones para tanques [59].

Componente	Especificación	Descripción
Aislamiento	ASTM C549	Especificación estándar para aislamiento de perlita
Placas de contenedor primario y secundario	ASTM A516 Gr. 70	Acero Grado Estructural
Contenedores de vapor de producto caliente	ASTM A516 Gr. 70	Acero Grado Estructural
Tuberías	ASTM A333 Gr. 6	Tubería de acero al carbono de baja temperatura (sin costura)
Fittings	ASTM A420	Accesorios de tubería de baja temperatura
Miembros estructurales	ASTM A36	Acero Grado Estructural
Piezas forjadas	ASTM A350	Piezas forjadas de acero al carbono y de baja aleación
Pernos	ASTM A320 Gr. L7	Perno hexagonal pesado

3.8.2. Características

1. Aislamiento ASTM C549: Perlita como material termoaislante. Densidad a granel: 32-176 [kg/m³]. En el Anexo F se indica la resistencia térmica según la densidad y temperatura media. Como referencia, los tableros aislantes a base de perlita de Johns Manville “Fesco”, que cumplen la norma ASTM C728 “Standard Specification for Perlite Thermal Insulation Board”, se venden a partir de 3/4” de espesor [65].

Como alternativa, se puede evaluar el uso de aislamiento térmico de fibra mineral

ASTM C764, o aislamiento térmico de vidrio celular ASTM C552 [61].

2. Acero ASTM A516 Gr. 70: Acero al carbono - manganeso. Capacidad para resistir elevadas presiones a diferentes temperaturas, presenta buenos niveles de soldabilidad y resiliencia [66]. Según la tabla del Anexo B, el rango de espesor considerado hace que la placa requiera determinados tratamiento térmicos.
 - Resistencia a la tracción: 485 – 620 [Mpa].
 - Límite elástico mínimo: 260 [Mpa].
3. Tubería ASTM A333 GR. 6: Tubería de acero al carbono para servicios de baja temperatura por encima de -45 [°C] [67].
 - Espesor de la pared: SCH STD, SCH 40, SCH 80, SCH XS a SCH 160, SCH XXS.
 - Diámetros exteriores: NPS 1/8 de pulgada a NPS de 24 pulgadas
 - Rango de longitud: 20 [ft] a 40 [ft].
 - Límite elástico mínimo: 240 [Mpa]
 - Resistencia a la tracción: 415 [Mpa].
4. Fittings ASTM A420: Accesorios de tuberías hechos de acero al carbono y aleado para servicios de bajas temperaturas [68]. Por su límite elástico de 240 [Mpa], se preferirán los grados WPL3 y WPL6.
5. Miembros estructurales ASTM A36: Acero estructural al carbono - manganeso de mediana resistencia y buenas propiedades de soldabilidad. Presenta un esfuerzo de fluencia de 250 [MPa] (36 [ksi]) y un esfuerzo mínimo tracción de 400 a 550 [MPa] (58 a 80 [ksi]) [69]. Su uso es para componentes estructurales generales, tales como barras rectangulares, barras cuadradas, barras circulares, perfiles de acero como canales, ángulos, vigas en H y vigas en I [70].
6. Piezas forjadas ASTM A350: cubre las bridas forjadas o laminadas en anillo de acero al carbono y de baja aleación, los accesorios forjados y las válvulas destinadas principalmente a servicios de baja temperatura [71]. El grado sugerido es LF2 [39]. En el Anexo G se indican las normas dimensionales a utilizar.
7. Pernos ASTM A320 Gr. L7: Diámetros de hasta 2-1/2 [in]. Este grado está diseñado para servicios de hasta -101 [°C] y tiene un valor mínimo de impacto Charpy de 20 [lbf-ft] a esta temperatura. Posee un esfuerzo de tracción mínimo de 862 [Mpa] [72].

La elección del material es un aspecto crucial en el diseño y construcción de tanques. La selección de especificaciones presentada en la Tabla 3.1 implica principalmente como material el acero al carbono-manganeso. Esta es una elección razonable y adecuada para tanques de almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado, pues se trata de un servicio de baja temperatura y de un producto corrosivo. Este tipo de acero ofrece varias

ventajas clave, como resistencia y durabilidad a bajas temperaturas, compatibilidad con el producto y buena soldabilidad, lo que lo convierte en una opción confiable [73]. Es fundamental seguir prácticas adecuadas de fabricación, inspección y mantenimiento para poder asegurar la integridad y confiabilidad de los tanques a lo largo de su vida útil, lo cual permite un funcionamiento seguro y eficiente.

3.9. Aplicación de normativa nacional

Considerando el rango de toneladas de 5.000 a 50.000 toneladas especificado al inicio de esta sección, y a partir del Decreto 43, “Aprueba el reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas”, el almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado se debe realizar en un área exclusiva para ello. Esta área debe poseer un sistema de detección automático para el producto y acciones de control en caso de fuga [56].

Para los gases tóxicos, el Artículo 158 del Decreto 43 presenta las distintas distancias de seguridad que deben poseer los tanques [56], por lo que en este caso, como los tanques se estiman desde 5.000 toneladas, y la densidad del amoníaco líquido a presión atmosférica es $696 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ [2], se requieren $7.184 \text{ [m}^3\text{]}$ de capacidad, lo cual es mucho mayor a $400 \text{ [m}^3\text{]}$, por lo que el decreto 43 exigiría que la distancia entre tanques sea de por lo menos 30 [m] entre sí.

Es importante destacar que del Decreto 43 se puede rescatar información general respecto a condiciones de seguridad, pero el alcance exige tan solo 30 [m] de distancia entre tanques, lo cual podría no ser suficiente para considerarse seguro. Por lo tanto, se debe estar al corriente con nuevas normativas nacionales que puedan surgir eventualmente y que sí especifiquen condiciones respecto a tanques de amoníaco refrigerado de gran escala.

3.10. Fallas a prevenir

A continuación se indican algunas de las fallas a prevenir en el almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado:

- Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC): fenómeno que puede producirse en metales expuestos a una combinación de esfuerzos de tensión y ambiente corrosivo. En determinadas circunstancias, el entorno corrosivo desestabiliza la capa protectora de óxido, sin provocar una corrosión general. Esta desestabilización es suficiente para impedir la reformación del óxido tras una grieta, provocada por un esfuerzo [60].

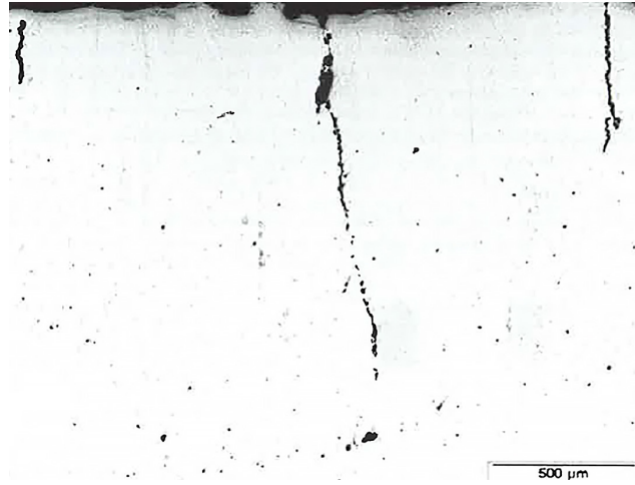


Figura 3.6: Sección transversal de grieta causada por SCC [60].

El amoníaco líquido en presencia de oxígeno puede provocar la SCC en los aceros al carbono. Los niveles de tensión necesarios para iniciar este tipo de fisuración son elevados y no se experimentan durante las operaciones normales. Sin embargo, los niveles de tensión residual de la soldadura en materiales de resistencia media y alta o en soldaduras con una resistencia superior, junto con las tensiones aplicadas, pueden ser suficientes para iniciar una SCC si el oxígeno está presente en cantidades suficientes [60].

La puesta en servicio y, en particular, la nueva puesta en servicio es un período crítico para la ocurrencia de este fenómeno. No obstante, debe tenerse en cuenta que los tamaños críticos de los defectos pueden variar de un tanque a otro debido a las variaciones en las propiedades de resistencia y tenacidad a la fractura de los materiales de las soldaduras y las placas, las tensiones aplicadas y los niveles de tensión residual [60].

La SCC en tanques de almacenamiento de amoníaco totalmente refrigerados es el principal mecanismo de degradación interna que debe tenerse en cuenta a la hora de planificar y ejecutar un programa de inspección [60].

- Liberación de amoníaco por sobrellenado: Esta situación de riesgo potencial se debe principalmente al desbordamiento de amoníaco líquido, a través de las tuberías de entrada [74]. El fallo debido a la carga hidrostática causada por el sobrellenado se elimina mediante dos alarmas de nivel independientes [75].
- Liberación de amoníaco por sobrepresurización: La sobrepresión provoca la rotura del cuerpo del tanque y, por tanto, puede causar una explosión y grandes daños. La sobrepresión se produce principalmente por una caída repentina de la presión barométrica, el bloqueo del conducto de salida de vapor o el vuelco [74]. Se instalan dobles válvulas de seguridad para proteger el tanque de posibles fallos debidos a la sobrepresurización [75].

- Liberación de amoníaco debido a una presurización insuficiente: Las unidades de almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado son tanques de paredes delgadas, por ello, cuando el tanque se somete a vacío en situaciones de subpresión se crea un escenario potencialmente catastrófico. La subpresión en los tanques de almacenamiento puede producirse cuando el caudal de salida supera al de entrada o cuando la presión barométrica aumenta bruscamente [74]. Se hace uso de una válvula de alivio de vacío para proteger el tanque contra estas fallas [75].
- Liberación de amoníaco por rotura del conducto de carga de entrada o salida [74].
- Defectos originales de soldadura: El Anexo R de la norma API620 plantea requisitos para la inspección de las soldaduras mediante pruebas radiográficas y magnéticas, de modo de garantizar que la calidad de las soldaduras sea la requerida. La calidad y la integridad de las soldaduras antes de la primera puesta en marcha son vitales para la vida futura de un tanque de amoníaco líquido refrigerado, especialmente en situaciones de iniciación y propagación de SCC debido a las características del producto. Las tensiones residuales y los concentradores de dureza locales deben minimizarse mediante procedimientos de soldadura y tratamientos térmicos apropiados [60].
- Corrosión externa: La corrosión externa del tanque debida a las condiciones atmosféricas se evita mediante una pintura adecuada y/o la aplicación de un aislamiento que contenga una membrana de vapor que reduzca la entrada de humedad atmosférica. El techo puede ser atacado externamente por la corrosión general, especialmente en los casos en que el aislamiento está dentro del tanque y, en consecuencia, el techo tiende a estar cerca de la temperatura atmosférica. Es por esto que el techo debe inspeccionarse periódicamente y, cuando sea posible, repararse sin interrumpir el servicio. Es importante tener en cuenta el estado y la integridad del aislamiento y la membrana de vapor en todas las zonas del tanque como parte de la evaluación general de la inspección [60].
- Falla en instrumentos de seguridad: la falla en elementos tales como válvula de seguridad de presión, transmisor de presión o transmisor de nivel, puede generar desconocimiento de las condiciones actuales de operación del tanque o generar situaciones no deseadas, por lo que se podría producir una fuga, explosión, u otros eventos catastróficos.

Siguiendo el esquema de la Figura 3.7 como referencia, las fallas que se pueden presentar para algunos instrumentos se muestran en la Tabla 3.2:

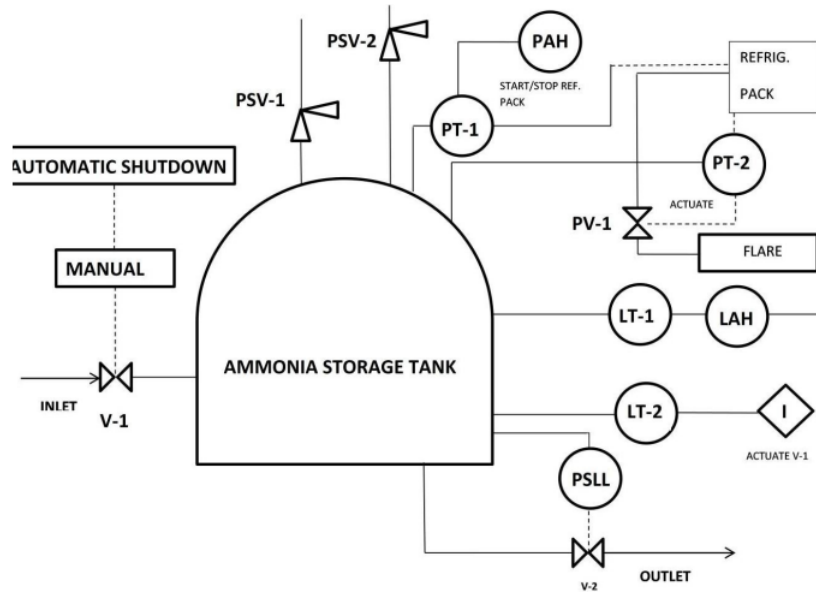


Figura 3.7: Unidad de almacenamiento de amoníaco [74].

Tabla 3.2: Fallas en instrumentos de seguridad de unidad de almacenamiento de amoníaco [74].

Instrumento	Falla
Válvula controlada por presión (PV)	Falla en abrirse a determinada presión
Transmisor de presión (PT)	No hace funcionar paquete de refrigeración a determinada presión
	Falla en apagar paquete de refrigeración a determinada presión
Transmisor de nivel (LT)	No indica correctamente el nivel de líquido ni hace sonar la alarma
	No indica el nivel de líquido ni acciona la válvula de entrada
Válvula reguladora de caudal (V)	Falla en cerrarse automáticamente
	Falla en cerrarse manualmente
Válvula de seguridad de presión (PSV)	Falla en abrirse a determinada presión
Presostato de baja presión (PSLL)	No se acciona la válvula de salida para cerrarse.

En 1987, el Complejo de Fertilizantes de PIC en Shuaiba publicó un estudio de riesgos

para averiguar la tasa de liberación de amoníaco de los tanques de almacenamiento (refrigerado) en caso de fallo y el análisis de sus consecuencias. Dichos tanques iban desde las 23.000 a las 30.000 toneladas de capacidad, siendo dos de ellos tanques verticales de pared simple, y el otro de integridad doble [75]. Las probabilidades de ocurrencia resultantes de cada evento se muestran en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Probabilidades de falla en tanque almacenador de amoníaco refrigerado [75].

Evento del tanque	Probabilidad por año
Falla primaria (defectos de material, diseño incorrecto, corrosión, falla en soporte, etc.)	1×10^{-7}
Sobrepresurización	5×10^{-18}
Colapso por vacío	1×10^{-15}
Explosión interna	3×10^{-10}
Sobrellenado	3×10^{-10}

Se puede observar que el evento de mayor probabilidad (aunque remota) es una falla primaria del tanque. Esta se puede deber a una falla en la carcasa por corrosión, mal diseño, especificación incorrecta del material, etc. También puede ocurrir debido a una falla en el sistema de soporte, por ejemplo, una falla en la base de concreto, expansión de hielo entre la base y el tanque, entre otras [75].

Es fundamental realizar un análisis de riesgo para identificar los peligros del proceso relacionado al almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado, de modo de poder identificar las causas posibles, desarrollar estrategias para abordar estos riesgos e instalar todas las medidas de protección necesarias para evitar o minimizar las consecuencias si se llegara a producir un accidente. Las inspecciones, la supervisión continua de los riesgos, las medidas de mitigación proactivas, el seguimiento de las normas y regulaciones de seguridad establecidas para el manejo y mantenimiento de estos tanques, y la comunicación de riesgos entre los involucrados en una planta pueden evitar que se produzcan accidentes.

3.11. Análisis de esfuerzos

La seguridad y la integridad de los tanques de almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado son aspectos cruciales en su diseño y fabricación. Para asegurar que los tanques operen de manera confiable y sin riesgos, es fundamental realizar un riguroso análisis de esfuerzos siguiendo las pautas establecidas por los estándares de diseño aplicables a la estructura en cuestión, como lo es la norma API 620 en este caso. En el análisis que se presenta en esta sección se evaluará cómo distintas condiciones operativas y las cargas internas y externas implicadas influyen en la estructura del tanque.

Es importante destacar que un análisis de esfuerzos detallado de un tanque API 620 es un proceso complejo que requiere conocimientos técnicos especializados en ingeniería mecánica y estructural, así como una comprensión profunda de la norma API 620 y sus requisitos.

Placas de revestimiento

Esfuerzo admisible de tracción [59]:

$$S_{ts} = \text{Mín}(0, 3F_u; 0, 6F_y) \text{ [psi]} \quad (3.1)$$

Siendo

F_u = Resistencia a la tensión, obtenido de la Tabla 5-1 de la norma API620 (ver Anexo C). $F_u = 70.000$ [psi] para la especificación ASTM A516 Gr. 70.

F_y = Resistencia a la fluencia, obtenido de la Tabla 5-1 de la norma API620 (ver Anexo C). $F_y = 38.000$ [psi] para la especificación ASTM A516 Gr. 70.

Por lo tanto:

$$S_{ts} = \text{Mín}(0, 3 \cdot 70.000; 0, 6 \cdot 38.000) = \text{Mín}(21.000; 22.800) = 21.000 \text{ [psi]} \quad (3.2)$$

Para paredes laterales cilíndricas de un tanque vertical [59]:

- Fuerza unitaria meridional (longitudinal):

$$T_1 = \frac{R_c}{2} \left(P + \frac{W + F}{A_t} \right) \text{ [lbf/in]} \quad (3.3)$$

- Fuerza unitaria latitudinal (circunferencial):

$$T_2 = PR_c \text{ [lbf/in]} \quad (3.4)$$

Siendo

R_c = Radio del tanque [in].

$P = P_g + P_l$ = Presión total (presión interna de diseño P_g + presión de carga del líquido P_l) [psi].

W = Peso total de la parte del tanque y su contenido [lbf].

F = Suma de las componentes verticales de las fuerzas presentes [lbf].

A_t = Sección transversal del tanque [in²].

$$A_t = \pi R_c^2 \quad (3.5)$$

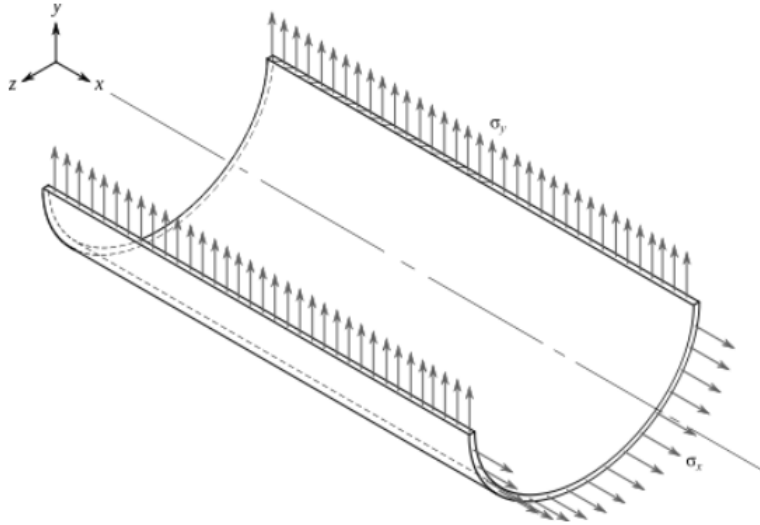


Figura 3.8: Diagrama de esfuerzos longitudinales (σ_x) y circunferenciales (σ_y) [76].

Cálculo del espesor necesario del revestimiento [59]:

$$t = \frac{\text{Máx}(T1, T2)}{S_{ts}E} + c \text{ [in]} \quad (3.6)$$

Siendo

E = Eficiencia de la unión de la soldadura de la carcasa (ver Anexo K).

c = Tolerancia de corrosión [in].

Esfuerzo máximo de compresión sobre pared cilíndrica

Esfuerzo de compresión para una combinación de carga axial T_1 :

$$S_{cc} = \frac{T_1}{t - c} \leq S_{cs} \text{ [psi]} \quad (3.7)$$

El esfuerzo de compresión longitudinal máximo admisible, S_{cs} , se determina como [59]:

- Para $(t - c)/R < 0,00667$:

$$s_{cs} = 1.800.000 \frac{t - c}{R} \text{ [psi]} \quad (3.8)$$

- Para $0,00667 < (t - c)/R < 0,0175$:

$$s_{cs} = 10.150 + 277.400 \frac{t - c}{R} \text{ [psi]} \quad (3.9)$$

- Para $(t - c)/R > 0,0175$:

$$s_{cs} = 15.000 \text{ [psi]} \quad (3.10)$$

Siendo

t = Espesor de la pared [in].

c = tolerancia de corrosión [in].

R = Radio de la pared [in].

Esfuerzo máximo de membrana de la placa de revestimiento en condiciones de operación

Esfuerzo máximo de la membrana para T_2 :

$$S_{ms} = \frac{T_2}{(t - c)E} \text{ [psi]} \quad (3.11)$$

Si $S_{ms} > 0,1F_u$, entonces las soldaduras a tope deberán ser examinadas en su totalidad mediante un examen radiográfico (ver Anexo H) [59].

Placa de fondo y placa anular

- Placa de fondo: El espesor requerido se determina mediante la suma del espesor mínimo, 0,25 [in], y la tolerancia de corrosión de la placa de fondo [59].
- Placa anular: El espesor requerido igualmente se determina sumando el espesor mínimo de 0,25 [in] y la tolerancia de corrosión. El espesor de las placas de fondo anular no será inferior a los espesores indicados en el Anexo I. Por otro lado, el esfuerzo de diseño se calcula como [59]:

$$S_d = \frac{2,6DHG}{t} \text{ [psi]} \quad (3.12)$$

Siendo

D = Diámetro nominal del tanque [ft].

H = Altura de diseño del líquido [ft].

G = Peso específico de diseño del contenido líquido, 0,696 [-] para el amoníaco líquido refrigerado a presión atmosférica y -33 [°C] [2].

t = Espesor de diseño de la primera capa sin tener en cuenta la corrosión [in].

Por otro lado, la anchura mínima de la placa anular se determina como [59]:

$$L_{min} = \frac{390t_b}{\sqrt{HG}} \text{ [in]} \quad (3.13)$$

Siendo

t_b = Espesor nominal de la placa anular [in].

Esfuerzo de compresión carcasa-membrana

Esfuerzo máximo de compresión longitudinal en la carcasa, σ_c [77]:

1. Para tanque auto-anclado:

Si $J \leq 0,785$

$$\sigma_c = (w_t(1 + 0,4A_v) + \frac{1,273M_{rw}}{D^2}) \frac{1}{12t_s} \text{ [psi]} \quad (3.14)$$

Si $0,785 < J \leq 1,54$

$$\sigma_c = \left(\frac{w_t(1 + 0,4A_v) + w_a}{0,607 - 0,18667J^{2,3}} - w_a \right) \frac{1}{12t_s} \text{ [psi]} \quad (3.15)$$

Siendo

J = Relación de anclaje. Sigue criterios del Anexo J, y se obtiene como:

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2[w_t(1 - 0,4A_v) + w_a - F_p w_{int}]} \quad (3.16)$$

w_t = Peso del tanque y del techo actuando en la base de la carcasa.

$$w_t = \frac{W_s}{\pi D} + w_{rs} \text{ [lbf/ft]} \quad (3.17)$$

Donde

- W_s = Peso total de la carcasa del tanque y sus accesorios [lbf].
- w_{rs} = Carga del tejado que actúa sobre la carcasa, incluido el 10 % de la carga de nieve de diseño equilibrado del tejado, S_b [lbf/ft].

A_v = Parámetro de aceleración vertical del terremoto.

$$A_v = 0,47S_{DS} \text{ [-]} \quad (3.18)$$

Donde

- S_{DS} = Parámetro de aceleración de la respuesta espectral a periodos cortos ($T = 0,2$ segundos) según norma ASCE 7 [-].

M_{rw} = Momento sísmico de vuelco en la base del tanque.

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \text{ [lbf-ft]} \quad (3.19)$$

Donde

- A_i = Coeficiente de aceleración del espectro de respuesta de diseño impulsivo.

$$A_i = S_{DS} \frac{I}{R_{wi}} [-] \quad (3.20)$$

- I = Factor de importancia. Lo define el comprador mediante la Tabla del Anexo L [-].
- R_{wi} = Factor de reducción de la fuerza para el modo impulsivo. 3,5 para tanques auto-anclados y 4 para tanques anclados mecánicamente [-].
- W_i = Parte impulsiva efectiva del peso del líquido.

Si $D/H \geq 1$, 333:

$$W_i = \frac{\tanh(0,866 \frac{D}{H})}{0,866 \frac{D}{H}} W_p \text{ [lbf]} \quad (3.21)$$

Si $D/H < 1$, 333:

$$W_i = (1 - 0,218 \frac{D}{H}) W_p \text{ [lbf]} \quad (3.22)$$

- W_p = Peso total del producto [lbf].
- X_i = Altura desde el fondo de la carcasa del tanque hasta el centro de acción de la fuerza sísmica lateral relacionada con la fuerza impulsiva del líquido para el momento de la pared anular.
- Si $D/H \geq 1$, 3333:

$$X_i = 0,375H \text{ [ft]} \quad (3.23)$$

- Si $D/H < 1$, 3333:

$$X_i = (0,5 - 0,094 \frac{D}{H}) H \text{ [ft]} \quad (3.24)$$

- X_s = Altura desde el fondo del tanque hasta su centro de gravedad [ft].
- W_r = Peso total de la cubierta fija del tanque, incluidos el armazón, cualquier accesorio permanente y el 10 % de la carga de nieve de diseño equilibrada de la cubierta, S_b [lbf].
- X_r = Altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad de los accesorios del techo [ft].
- A_c = Parámetro de aceleración del espectro de respuesta de diseño convectivo:

Si $T_C \leq T_L$:

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{1}{T_C} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i [-] \quad (3.25)$$

Si $T_C > T_L$:

$$A_c = K S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_C^2} \right) \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i [-] \quad (3.26)$$

- T_L = Periodo de transición dependiente de la región para movimientos del terreno de mayor duración [s]. Obtenido de norma ASCE 7.

– T_C = Periodo natural de agitación:

$$T_C = K_s \sqrt{D} \text{ [s]} \quad (3.27)$$

- K_s = Factor de agitación obtenido de Figura EC.6 de la norma API650 para la relación D/H (ver Anexo M) [-].
- D = Diámetro nominal del tanque [ft].
- K = Coeficiente para ajustar la aceleración espectral de 5% a 0,5% de amortiguación. 1,5 salvo indicación contraria [-].
- S_{D1} = Parámetro de aceleración de la respuesta espectral a periodos de un segundo según norma ASCE 7 [-].
- R_{wc} = Coeficiente de reducción de fuerzas para el modo convectivo. Se considera $R_{wc} = 2$ tanto para tanque auto-anclado como para tanque anclado mecánicamente [-].

- W_c = Parte convectiva efectiva (agitación) del peso del líquido.

$$W_c = 0,230 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3,67H}{D}\right) W_p \text{ [lbf]} \quad (3.28)$$

- X_c = Altura desde la parte inferior de la carcasa del tanque hasta el centro de acción de la fuerza sísmica lateral relacionada con la fuerza convectiva del líquido para el momento de la pared anular.

$$X_c = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3,67H}{D} - 1\right)}{\frac{3,67H}{D} \sinh\left(\frac{3,67H}{D}\right)}\right] H \text{ [ft]} \quad (3.29)$$

t_s = Espesor de la carcasa inferior menos la tolerancia de corrosión [in].

w_a = Fuerza de resistencia al levantamiento en la región anular.

$$w_a = 7,9 t_a \sqrt{F_y H G} \leq 1,28 H D G (1 - A_v) \text{ [lbf/ft]} \quad (3.30)$$

Donde

- t_a = espesor del anillo inferior bajo la carcasa necesario para proporcionar la fuerza de resistencia para el autoanclaje (excluida la tolerancia a la corrosión).

F_p = Razón entre la presión de funcionamiento normal y la presión de diseño, con un valor mínimo de 0,4.

w_{int} = Carga diseñada de levantamiento debido a la presión de diseño por unidad de longitud circunferencial [lbf/ft].

2. Para tanque anclado mecánicamente ($J > 1,54$):

$$\sigma_c = (w_t (1 + 0,4 A_v) + \frac{1,273 M_{rw}}{D^2}) \frac{1}{12 t_s} \text{ [psi]} \quad (3.31)$$

El esfuerzo de compresión longitudinal admisible para carcasa-membrana se calcula como:

Si $GHD^2/t_s^2 = 0,696HD^2/t_s^2 \geq 10^6$:

$$F_c = \frac{10^6 t_s}{D} \text{ [psi]} \quad (3.32)$$

Si $GHD^2/t_s^2 = 0,696HD^2/t_s^2 < 10^6$:

$$F_c = \frac{10^6 t_s}{2,5D} + 600\sqrt{GH} < 0,5F_y \text{ [psi]} \quad (3.33)$$

Finalmente, si $\sigma_c < F_c$, entonces el tanque es estable por sismo.

Esfuerzo dinámico del aro líquido

Los esfuerzos dinámicos de tracción de aro debidos al movimiento sísmico del líquido se determinarán mediante las siguientes ecuaciones [77]:

Fuerza impulsiva en la carcasa del tanque N_i :

- Si $D/H > 1,33$:

$$N_i = 4,5A_iGDH\left[\frac{Y}{H} - 0,5\left(\frac{Y}{H}\right)^2\right]\tanh\left(0,866\frac{D}{H}\right) \text{ [lbf/in]} \quad (3.34)$$

- Si $D/H < 1,33$ e $Y \geq 0,75D$:

$$N_i = 2,77A_iGD^2\left[\frac{Y}{0,75D} - 0,5\left(\frac{Y}{0,75D}\right)^2\right] \text{ [lbf/in]} \quad (3.35)$$

- Si $D/H < 1,33$ e $Y < 0,75D$:

$$N_i = 1,39A_iGD^2 \text{ [lbf/in]} \quad (3.36)$$

Para todas las proporciones de D/H , la fuerza convectiva en la carcasa del tanque, N_c , se calcula como:

$$N_c = \frac{0,98A_cGD^2 \cosh\left[\frac{3,68(H-Y)}{D}\right]}{\cosh\left[\frac{3,68H}{D}\right]} \text{ [lbf/in]} \quad (3.37)$$

Siendo

Y = Distancia de la superficie del líquido al punto de análisis (Positivo hacia abajo) [ft].

H = Altura del producto líquido [ft].

Fuerza hidrostática debido a presión del producto N_h :

$$N_h = 2,6(H - 1)DG \text{ [lbf/in]} \quad (3.38)$$

Esfuerzo combinado total en la envoltura:

$$\sigma_T = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (A_v N_h / 2,5)^2}}{t} \text{ [psi]} \quad (3.39)$$

Siendo

t = Espesor del anillo de la carcasa en consideración (incluyendo corrosión) [in].

El esfuerzo permitido se determina como [59]:

$$S_a = \text{Min}(0,8F_y E; 1,33S_d) \text{ [psi]} \quad (3.40)$$

Siendo

E = Eficiencia de la junta, obtenida de Anexo K [-].

F_y = Resistencia a la fluencia mínima de la capa exterior, obtenido de Anexo C o Anexo N [psi].

S_d = Esfuerzo de diseño del producto, obtenido de Anexo N [psi]. Si bien no se encuentra la especificación ASTM A516 Gr. 70 en la tabla del Anexo N, la A516M Gr. 485 posee las mismas propiedades químicas y mecánicas, por lo que permite obtener el valor de S_d .

Technical Details:		
Heat Treatment: Normalized, Quenched, Tempered, HIC, Impact Test...(Optional if not provided in rules)		
Chemical Composition(%):		
Grade/ Material	Element	Composition(Max-A, Min-I)
A516 Grade 485/ A516 Gr485	C	0.27
	Mn	0.85-1.20
	Si	0.15-0.40
	P	0.035
	S	0.035
Mechanical Properties(Mpa)		
Grade/ Material	Tensile Test	Ksi/MPa
A516 Grade 485/ A516 Gr485	Tensile Strength	70-90/485-620
	Yield Strength	38/260
	Elongation	17%
	Impact Test(if any)	

Figura 3.9: Propiedades ASTM A516m Gr. 485 [78].

Technical Details:		
Heat Treatment: Normalized, Quenched, Tempered, HIC, Impact Test...(Optional if not provided in rules)		
Chemical Composition(%):		
Grade/ Material	Element	Composition(Max-A, Min-I)
A516 Grade 70/ A516 Gr70	C	0.27
	Mn	0.85-1.20
	Si	0.15-0.40
	P	0.035
	S	0.035
Mechanical Properties(Mpa)		
Grade/ Material	Tensile Test	Ksi/MPa
A516 Grade 70/ A516 Gr70	Tensile Strength	70-90/485-620
	Yield Strength	38/260
	Elongation	17%
	Impact Test(if any)	

Figura 3.10: Propiedades ASTM A516 Gr. 70 [79].

Se debe cumplir:

$$\sigma_T < S_a \quad (3.41)$$

Placa del techo

Fuerza unitaria longitudinal [59]:

$$T_1 = \frac{R_s}{2} \left(P + \frac{W + F}{A_t} \right) \text{ [lbf/in]} \quad (3.42)$$

Fuerza unitaria circunferencial [59]:

$$T_2 = R_s P - T_1 \text{ [lbf/in]} \quad (3.43)$$

Espesor de la placa del techo (esférico) en condiciones de operación [59]:

$$t = \frac{Máx(T1, T2)}{S_{ts}E} + c \text{ [in]} \quad (3.44)$$

Siendo

R_s = Radio del techo [in]

P = Presión total (presión interna de diseño P_g + presión de carga del líquido P_l) [psi].

W = Peso de la placa del techo [lbf].

F = Suma de las componentes verticales de las fuerzas presentes [lbf].

A_t = Superficie de la placa del techo [in²].

S_{ts} = Esfuerzo admisible (ver Anexo C). 21.000 para la especificación ASTM A516 Gr. 70 [psi].

E = Eficiencia de la junta de la placa del techo, obtenida de la Tabla 5-2 de la norma API 620 (ver Anexo K) [-].

c = Tolerancia de corrosión [in].

Con el objetivo de aplicar el análisis de esfuerzo presentado a un caso de ejemplo, se propone el uso de las variables de la Tabla 3.4 para un tanque cuyo material del fondo, cuerpo y techo sigue la especificación ASTM A516 Gr. 70.

Tabla 3.4: Variables consideradas para análisis de esfuerzo de ejemplo [76].

$H = 52$ [ft]	$F = 0$ [lbf]	$M_{rw} = 9.300.000$ [lbf-ft]
$D = 49$ [ft]	$S_{ts} = 21.000$ [psi]	$w_{int} = 4,3$ [lbf/ft]
$G = 0,696$ [-]	$E = 1$ [-]	$t_s = 0,275$ [in]
$c = 0,0591$ [in]	$F_u = 70.000$ [psi]	$A_i = 0,125$ [-]
$P = 14,5$ [psi]	$F_y = 38.000$ [psi]	$A_c = 0,0026$ [-]
$W_{cuerpo} = 370.000$ [lbf]	$t_b = 0,3091$ [in]	$A_v = 0,188$ [-]
$R = 294$ [in]	$t_a = 0,314$ [in]	$S_d = 25.000$ [psi]
$A_t = 271.546,70$ [in ²]	$W_s = 100.000$ [lbf]	$W_{techo} = 56.000$ [lbf]

Los esfuerzos obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 3.5: Resultados análisis placas de revestimiento laterales.

T_1	2.331,80 [lbf/in]
T_2	4.263,00 [lbf/in]
t	0,26 [in]

Tabla 3.6: Resultados análisis esfuerzo máximo de compresión sobre pared cilíndrica.

S_{cc}	11.486,69 [psi]
S_{cs}	1.242,86 [psi]

En este caso, el esfuerzo de compresión longitudinal es mayor al admisible ($S_{cc} > S_{cs}$).

Tabla 3.7: Resultados análisis esfuerzo máximo de membrana de la placa de revestimiento en condiciones de operación.

S_{ms}	21.000 [psi]
$0,1F_u$	7.000 [psi]

Como $S_{ms} > 0,1F_u$, entonces las soldaduras a tope deberán ser examinadas en su totalidad mediante un examen radiográfico.

Tabla 3.8: Resultados análisis diseño placa anular.

S_d	17.591,99 [lbf/in ²]
t_b	0,31 [in]
L_{min}	20,04 [in]

Tabla 3.9: Resultados análisis esfuerzo de compresión carcasa-membrana.

J	1,05 [-]
σ_c	2.024,10 [psi]
GHD^2/t_s^2	1.149.051,13 [ft ³ /in ²]
F_c	5.612,25 [psi]

Como $\sigma_c < F_c$, entonces el tanque es estable por sismo.

Tabla 3.10: Resultados análisis esfuerzo dinámico del aro líquido.

N_i	239,49 [lbf/in]
N_c	0,17 [lbf/in]
N_h	4.522,19 [lbf/in]
$\sigma_T (+)$	17.956,82 [psi]
$\sigma_T (-)$	14.931,84 [psi]
$1,33S_d$	33.250 [psi]
$0,9F_y$	34.200 [psi]
S_a	33.250 [psi]

Se cumple $\sigma_T < S_a$.

Tabla 3.11: Resultados análisis placa del techo.

T_1	2.161,82 [psi]
T_2	2.101,19 [psi]
t	0,16 [in]

El análisis de esfuerzos de esta sección se realizó a partir de cargas longitudinales, circunferenciales y por los efectos de un sismo. Los componentes analizados presentan distintos requisitos geométricos y esfuerzo admisible. Cabe destacar la existencia de Intergraph TANK, que es un software para el diseño y análisis de grandes tanques de almacenamiento, el cual utiliza los códigos de diseño API620 y API650 (entre otros),

por lo que permite implementar el análisis presentado en esta sección de manera precisa y completa.

Capítulo 4

Transporte

Esta sección se centra en tuberías que transportan amoníaco líquido no refrigerado (a temperatura mayor a 0 [°C]) dentro de una planta de producción y/o almacenamiento de amoníaco líquido. Según la norma ASME B31.3, el amoníaco corresponde a un servicio de categoría M, lo cual se traduce en que la posible exposición del personal se considera importante y una sola exposición a una mínima cantidad de un fluido tóxico (como es el amoníaco), causada por una fuga, puede producir daños irreversibles graves a las personas por inhalación o por contacto corporal, aún cuando se tomen medidas de restauración inmediatamente [80].



Figura 4.1: Tuberías de amoníaco [81].

4.1. Condiciones y criterios de diseño

4.1.1. Condiciones de diseño

Presión y temperatura de diseño

La presión de diseño no debe ser inferior a la presión alcanzada en la condición más severa de presiones y temperaturas coincidentes (mínimas o máximas), interna o externa, previstas durante el funcionamiento. La condición más severa demanda el mayor espesor y clasificación para la tubería. Por su lado, la temperatura de diseño corresponderá a la temperatura del fluido, si no, su uso debe ser verificado por cálculos de transferencia de calor confirmados por pruebas o mediciones experimentales [80].

Efectos ambientales

- Calentamiento de un fluido estático en un componente de tuberías (por ejemplo, fluido atrapado en válvulas de doble asiento) provoca su expansión, y por ende, se debe considerar en el diseño poder soportar o aliviar los aumentos de presión excesivos correspondientes [80].
- Las condiciones de temperaturas ambiente bajas influyen en el análisis de esfuerzo por desplazamiento [80].

Efectos dinámicos

En la etapa de diseño de tuberías se debe considerar los siguientes fenómenos para minimizar sus efectos [80]:

1. Cargas por impacto y choque.
2. Cargas del viento (en tuberías expuestas).
3. Cargas de terremotos.
4. Vibraciones.
5. Reacciones por descarga o descenso de fluidos.
6. Cargas vivas (por el peso del producto transportado).
7. Cargas muertas (por el peso de los componentes de la tubería y otras cargas superpuestas de forma permanente sobre esta).
8. Cargas térmicas debido a restricciones (por restricciones o anclajes que evitan una expansión y contracción térmicas libres de la tubería).
9. Cargas debido a gradientes de temperatura (debido a flujo alto de calor por un tubo relativamente grueso o por el flujo bifásico estratificado que causa una curvatura en la línea).

10. Cargas debido a diferencias en las características de expansión térmica (por combinación de materiales con coeficientes de expansión térmica diferente, por ejemplo, en tuberías recubiertas).
11. Efectos de apoyo, anclaje y movimientos finales (resultado de la flexibilidad y/o expansión térmica de equipos, soportes o anclajes y del asentamiento, u oscilación del viento).
12. Efectos de ductilidad reducida (por proceso de soldadura, tratamiento térmico, bajas temperaturas operativas, entre otros).
13. Fatiga (por cambios de presión cíclica, ciclos térmicos y otras cargas cíclicas).

Por lo tanto, el diseño del sistema de tuberías debe tener en cuenta esfuerzos por cargas sostenidas y ocasionales.

4.1.2. Criterios de diseño

Las condiciones de presión-temperatura determinarán el mayor espesor de pared o la clasificación más alta del componente. Si se conectan dos flujos de amoníaco que operan en condiciones de presión-temperatura diferentes, la válvula que los segrega se debe clasificar para el flujo de condición más severa [80].

Lo fundamental es tener en cuenta la necesidad de protección debido al tipo de fluido con el que se trabaja.

Esfuerzos permisibles

- Tensión: los esfuerzos básicos admisibles en la tensión para metales y esfuerzos de diseño para materiales de empernado se encuentran en las Tablas A-1 (Figura 4.2) y A-2 (Figura 4.3) de la norma ASME B31.3 [80].
- Corte y fricción: los esfuerzos de corte admisibles deben ser 0,8 veces el esfuerzo admisible básico en la tensión que se tabula en las Tablas A-1 o A-2. El esfuerzo de fricción admisible debe ser, por otro lado, 1,60 veces ese valor [80].
- Compresión: los esfuerzos admisibles de compresión no deben ser superiores a los esfuerzos admisibles básicos en tensión. Se debe considerar la estabilidad estructural [80].

Tabla A-1 Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales¹

Los números en paréntesis se refieren a las Notas para las Tablas del Apéndice A; las especificaciones son ASTM a menos que se especifique de otra forma

Material	N.º de especific.	N.º P o N.º S (5)	Grado	Notas	Temp. mín. °F (6)	Mín. esfuerzo especificado, ksi		Esfuerzo permitido básico, S, ksi (1), a temperatura de metal, °F						
						Tensión	Elasticidad	Temp. mín. a 100	200	300	400	500	600	650
Fundiciones de hierro (2)														
Gris	A 48	...	20	(8e)(48)	-20	20	...	2,0	2,0	2,0	2,0	...	...	...

Figura 4.2: Encabezado Tabla A-1 ASME B31.3 [80].

Tabla A-2 Valores de esfuerzo de diseño para materiales de tornillería¹

Números en paréntesis se refieren a Notas para las Tablas del Apéndice A; las especificaciones son ASTM

Material	N.º especific.	Grado	Intervalo tamaño, diám., pulg.	Notas	Temp. mín., °F (6)	Mín. esfuerzo especificado, ksi		Temp. mín. a 100	200	300	400	500	600
						Tensión	Elasticidad						
Acero carbono													
...	A 675	45	...	(8f)(8g)	-20	45	22,5	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
...	A 675	50	...	(8f)(8g)	-20	50	25	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
...	A 675	55	...	(8f)(8g)	-20	55	27,5	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
...	A 307	B	...	(8f)(8g)	-20	60	...	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	...

Figura 4.3: Encabezado Tabla A-2 ASME B31.3 [80].

En la Tabla A-1, es de suma importancia darle atención a la columna que indica N.ºP o N.ºS. En esta columna se asignan se asignan Números P o Números S y Números de Grupos para así agrupar metales con base, generalmente, en la composición, soldabilidad y propiedades mecánicas, hasta donde sea posible. Se requiere el uso del Código ASME Sec. IX, QW-420.2 para establecer los requisitos de calificación de soldadura [80].

Respecto a la columna “Temp mín. °F”, el uso de un material a una temperatura mínima de diseño por debajo de -20 [°F] (-29 [°C]) se establece en otras partes del Código ASME B31.3. En particular, para aceros al carbono con una letra en la columna de Temp. Mín., la temperatura mínima se define mediante la curva correspondiente de la Figura 4.4 [80].

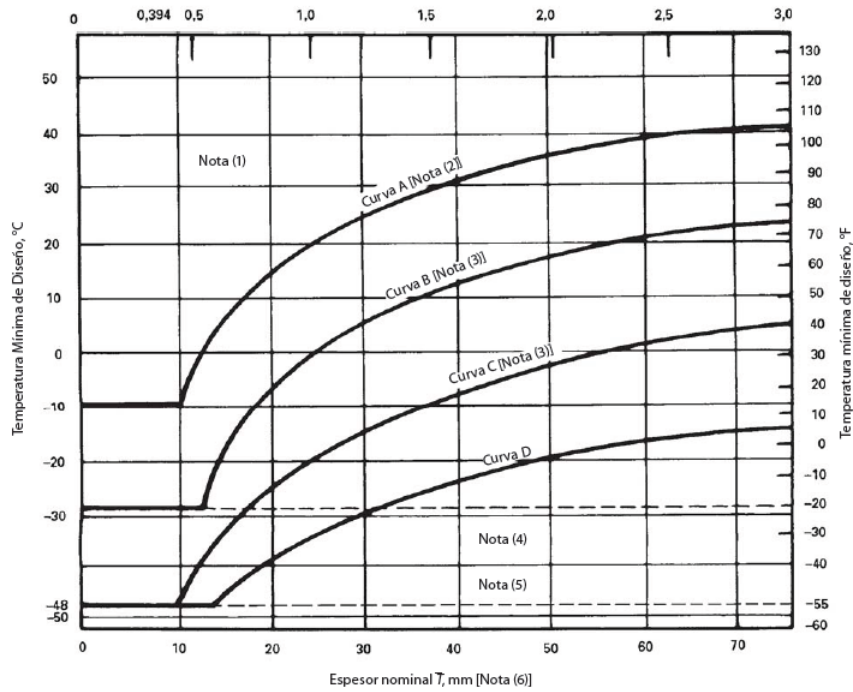


Figura 4.4: Curvas Figura 323.2.2A: Temperaturas mínimas para materiales de acero al carbono sin pruebas de impacto [80].

El uso de cualquier otro límite para los esfuerzos debe ser justificado si el mismo no está en concordancia con las Tablas A1 y A2 de la norma ASME B31.3 [80].

Las juntas de soldadura longitudinal lineal o en espiral requieren el uso de un factor de calidad según se indica en la Tabla A-1B (Figura 4.5) de la norma ASME B31.3 [80].

Tabla A-1B Factores de calidad básicos para juntas longitudinales soldadas en tuberías, tubos y accesorios, E_j
 Estos factores de calidad son determinados de acuerdo con el párrafo 302.3.4(a). Vea también párrafo 302.3.4(b) y Tabla 302.3.4 para factores de calidad incrementados aplicables a casos especiales. Las especificaciones, excepto API, son ASTM.

N.º espec.	Clase (o tipo)	Descripción	E_j (2)	Notas Apéndice A
Acero carbono				
API 5L	...	Tubería sin costura	1,00	...
		Tubería soldada por resistencia eléctrica	0,85	...
		Tubería soldada por fusión eléctrica, doble tope, cordón recto o en espiral	0,95	...
		Soldada a tope en horno	0,60	...

Figura 4.5: Encabezado Tabla A-1B ASME B31.3 [80].

Se deben establecer límites de esfuerzos que sean ocasionados por cargas sostenidas y deformaciones por desplazamiento [80]:

- Esfuerzos por presión interna: el espesor de pared del componente de tubería (incluyendo refuerzos) debe cumplir requisitos de esfuerzos.
- Esfuerzos por presión externa: el espesor de pared del componente de tubería y sus medios para obtener la rigidez deben cumplir los requisitos de esfuerzos.

- Esfuerzos por cargas sostenidas: la suma de los esfuerzos longitudinales en cualquier componente de un sistema de tuberías, ocasionados por cargas sostenidas, tales como presión y peso no debe exceder el esfuerzo permitido básico a la temperatura máxima esperada durante el ciclo de desplazamiento bajo análisis, obtenido de la Tabla A-1 de la norma ASME B31.3 (ver Figura 4.2).
- Esfuerzo permitido por desplazamiento: el esfuerzo por desplazamiento no debe exceder el esfuerzo permitido por desplazamiento.

Por otro lado, también deben ser establecidos límites para esfuerzos generados por cargas ocasionales en operación. La suma de los esfuerzos longitudinales ocasionados por cargas sostenidas (tales como presión y peso) y de los esfuerzos producidos por cargas ocasionales (tales como vientos o sismos), puede ser equivalente a 1,33 veces el esfuerzo básico permitido indicado en las Tablas A-1 y A-2 de la norma ASME B31.3 (Figuras 4.2 y 4.3) [80].

Tolerancias

Para determinar el espesor de pared mínimo que se requiere para un componente de tubería, es necesario incluir tolerancias por corrosión, por erosión y por profundidad del hilo de rosca o de ranura [80].

Respecto a la resistencia mecánica, de ser necesario, el espesor de pared deberá ser aumentado para así evitar el exceso de esfuerzo, el daño, colapso, o deformaciones ocasionados por cargas sobrepuestas por soportes, acumulación, transporte, manejo, entre otras causas. Sin embargo, si el aumento de espesor pudiera ocasionar aumentos excesivos de esfuerzos locales o el riesgo de fractura frágil, o no es factible su aumento, la resistencia que se requerirá debe obtenerse mediante otros medios, como uso de soportes, apoyos u otros medios, sin aumentar el espesor de la pared. Se debe tener especial consideración en la resistencia mecánica que poseerán las conexiones de tubos pequeños a tuberías o equipos [80].

Por último, no se permiten tolerancias para variaciones de presión y temperatura [82].

4.2. Diseño

Los estándares dimensionales para los componentes mostrados en la Tabla 4.1 se considerarán aceptables para el uso en los intervalos de presión y temperatura del amoníaco líquido [80]:

Tabla 4.1: Estándares dimensionales para componentes de tuberías [39] [80].

Componente	Norma dimensional	Descripción
Tuberías	ASME B36.10M	Tubería de acero forjado sin costura y soldada
Fittings	ASME B16.9	Accesorios de acero forjado, soldados a tope en fábrica
	ASME B16.11	Accesorios forjados, con conexión soldable y roscada
Flanges	ASME B16.5	Bridas y accesorios bridados
Válvulas	ASME B16.34	Válvulas bridadas, roscadas y soldadas
	ASME B16.10	Dimensiones de válvulas cara a cara y extremo a extremo

4.3. Requisitos para componentes metálicos de tuberías

Tubería

No se utilizarán tuberías con especificación ASTM A134 (hecho con lámina ASTM A285) y tampoco ASTM A139 [80].

Las tuberías utilizadas en sistemas no refrigerados deben ser como mínimo de ASTM A53 Grado B sin soldadura o soldadas por resistencia eléctrica. Las juntas de los tubos deben ser roscadas, soldadas o bridadas. Los tubos deben ser como mínimo Schedule 40 cuando las juntas sean soldadas o soldadas y bridadas. La tubería debe ser al menos Schedule 80 cuando las juntas sean roscadas [83].

Accesorios metálicos

Una selección e instalación incorrecta de los accesorios de tubería puede implicar un riesgo de fallo importante del sistema de tuberías. Los accesorios estarán diseñados para una presión no inferior a la presión máxima a la que estarán sometidos en servicio [84].

Se prohíbe el uso de [82]:

- Fittings MSS SP-43 'CR'.
- Stub end tipo C.
- Accesorios de hierro fundido, excepto dúctil.

- Codos mitrados con ángulo mayor a $22,5^\circ$.
- Codos corrugados.

Válvulas metálicas

Las válvulas se utilizan para controlar el caudal de amoníaco. Para evitar fugas, deben instalarse a una distancia adecuada de los depósitos, en la primera brida o junta soldada fuera de estos [85].

No se utilizarán válvulas de bonetes roscados [80].

Se debe dar especial consideración al diseño de las válvulas a fin de prevenir fugas por el vástago hacia el ambiente [80].

Bridas y empaquetaduras

No deberá ser utilizado [80]:

- Bridas deslizantes con soldadura simple.
- Bridas de junta expandida.
- Bridas deslizantes utilizadas como bridas de traslape.
- Bridas metálicas roscadas, excepto aquellas que utilizan anillos de lentes o empaquetaduras similares y aquellas utilizadas en tuberías con revestimientos, en donde el revestimiento se extiende sobre la cara de la empaquetadura.

Las caras de la brida deben ser apropiadas para el servicio pretendido, así como para la empaquetadura y el empernado usados [80].

Las empaquetaduras deben elegirse de modo que la carga de asentamiento requerida sea compatible con la cara y clase de la brida, la resistencia de esta última y su empernado [80]. Este componente se utiliza para proporcionar un sellado hermético y fiable entre dos componentes acoplados. Los materiales de las empaquetaduras de bridas para amoníaco se deben elegir para que sean fuertes, duraderos y resistentes a deformarse o reaccionar con el estado líquido de la aplicación [86].

Empernado

El empernado (incluye pernos, pernos pasantes, espárragos, pernos guías, tuercas y arandelas) seleccionado debe ser adecuado para asentar la empaquetadura y mantener hermética la unión bajo todas las condiciones de diseño [80].

Empernado con límite de elasticidad mínimo especificado no mayor de 207 [MPa] (30 [ksi]) no debe ser utilizado para juntas bridadas bajo el estándar ASME B16.5 con Clase

400 y superior, ni para juntas bridadas que usan empaquetaduras metálicas, a menos que los cálculos correspondientes muestren una resistencia que permita mantener la hermeticidad de la junta [80].

Empernado de acero al carbono puede usarse con empaquetaduras no metálicas en juntas bridadas con calificación ASME B16.5, Clase 300 e inferiores para temperaturas del metal de los pernos desde -29 [°C] a 204 [°C], inclusive. Si estos pernos están galvanizados, se deben utilizar tuercas hexagonales gruesas, roscadas según sea la necesidad [80].

Cualquier empernado que cumpla con los requisitos previos puede usarse con cualquier combinación de material de brida y cara [80].

Por último, los agujeros roscados para el empernado para componentes de tubería metálica de retención de presión deben tener la profundidad suficiente para permitir que el enganche de las roscas sea, al menos, $7/8$ veces el diámetro nominal de la rosca [80].

4.4. Requisitos para juntas metálicas de tuberías

Se prohíbe el uso de las siguientes uniones [80]:

- Juntas de soldadura por encastre $>$ NPS 2.
- Juntas calafateadas.
- Uniones por soldadura fuerte (brazing) y blanda (soldering).
- Juntas adhesivas.
- Juntas expandidas.
- Juntas roscadas.
- Juntas tipo campana.

Las juntas de tubería deben seleccionarse para materiales adecuados de tuberías y el servicio de amoníaco, teniendo en cuenta la hermeticidad y la resistencia mecánica de la junta en las condiciones esperadas de operación y prueba en términos de presión, temperatura y cargas externas [80].

Juntas soldadas

Como el amoníaco líquido puede ocasionar corrosión por hendidura, las juntas con soldadura por encastre deberían evitarse [80].

La soldadura de filete se puede utilizar para unir anexos estructurales y de refuerzo, para complementar la resistencia de las soldaduras principales o reducir su intensificación de esfuerzos, y para evitar el desmontaje de uniones [80].

Uniones bridadas

Cuando están empernadas bridas de diferentes clases, la clasificación de la junta no debe exceder la brida de menor clasificación. El torque del empernado debe ser tal que no se impongan cargas excesivas sobre la brida de menor clasificación de modo de obtener una junta hermética [80].

Si se une por empernado una brida metálica a una no metálica, ambas deben ser de cara plana. Se prefiere en este caso el uso de una empaquetadura de cara completa. Si se usara una empaquetadura que se extiende solamente hasta el borde interior de los pernos, el torque de empernado debe ser limitado con el objetivo de que la brida no metálica no se sobrecargue [80].

Juntas para tubería

Al seleccionar y aplicar accesorios de tubo ensanchados, no ensanchados y de compresión, se debe considerar los posibles efectos adversos en las uniones causados, por ejemplo, por montaje y desmontaje, vibración, choque, expansión y contracción térmica [80].

Los accesorios recién mencionados que sean utilizados en las juntas deben ser los adecuados para el tubo calibrado en el cual se usarán (considerando el máximo y mínimo espesor de pared) y se deben usar dentro de los límites de presión-temperatura de los accesorios y juntas [80].

Juntas especiales

Por último, en el caso de otro tipo de uniones no mencionadas hasta ahora, como juntas tipo prensaestopa, se deben proporcionar interbloques mecánicos y soldados para evitar la separación de cualquier junta usada para un servicio de amoníaco [80].

Finalmente, se puede observar que en el transporte de amoníaco líquido se aplican ciertas restricciones relacionadas con el uso de juntas por temas de seguridad, de modo de prevenir fugas. En particular, el diseño de juntas metálicas tiene un enfoque en la hermeticidad y resistencia mecánica. La seguridad debe ser una prioridad absoluta en el transporte de amoníaco líquido para evitar incidentes que puedan poner en peligro la salud pública y el medio ambiente.

4.5. Flexibilidad y soporte de tuberías

4.5.1. Flexibilidad

Se requiere evitar que las contracciones y expansiones térmicas o los movimientos de soportes y conexiones de tuberías causen: fallas en la tubería o los soportes debido a sobrecarga o fatiga, fugas en las juntas, y esfuerzos perjudiciales en tuberías y válvulas

o en equipos conectados a la tubería, como resultado de fuerzas y momentos excesivos en la tubería [80].

Propiedades

1. Datos de expansión térmica

- Valores para el intervalo de esfuerzos: Los valores de los desplazamientos térmicos que se utilizan en la determinación de las deformaciones totales por desplazamiento para calcular el intervalo de los esfuerzos, se determinan como la diferencia algebraica, a partir de las Tablas C-1 (Anexo Ñ) y C-3 (Anexo O) de la norma ASME B31.3, entre su valor a la temperatura máxima y a la temperatura mínima del metal para el ciclo térmico bajo análisis [80].
- Valores para reacciones: Los valores de los desplazamientos térmicos que se utilizan en la determinación de los esfuerzos totales de desplazamiento para el cálculo de las reacciones en los soportes y equipos conectados, se determinan como la diferencia algebraica entre el valor a la temperatura máxima (o mínima) para el ciclo térmico analizado y el valor a la temperatura esperada durante la instalación [80].

2. Módulo de elasticidad: se determinará mediante el uso de la Tabla C-6 de la norma ASME B31.3 [80].

Tabla C-6 Módulo de elasticidad para metales, unidades en sistema de medidas de los Estados Unidos

Material	<i>E</i> = módulo de elasticidad, Msi (psi x 10 ⁶) a temperatura listada									
	-425	-400	-350	-325	-200	-100	70	200	300	400
Metales ferrosos										
Hierro fundido gris	...	...	...	...	...	...	13,4	13,2	12,9	12,6
Acero al carbono, C ≤ 0,3%	31,9	...	...	31,4	30,8	30,2	29,5	28,8	28,3	27,7
Acero al carbono, C > 0,3%	31,7	...	...	31,2	30,6	30,0	29,3	28,6	28,1	27,5
Aceros al carbono-molibdeno	31,7	...	...	31,1	30,5	29,9	29,2	28,5	28,0	27,4

Figura 4.6: Extracto de Tabla C-6 ASME B31.3: Módulo de elasticidad para metales [80].

3. Relación de Poisson: puede considerarse como 0,3 para toda temperatura y para todos los metales [80].
4. Flexibilidad y factores de intensificación de esfuerzos: el factor de flexibilidad k y el factor de intensificación de esfuerzos i que se indican en el Apéndice D de la norma ASME B31.3 (ver Figura 4.7), deberán usarse para los cálculos de flexibilidad [80].

APÉNDICE D

FACTORES DE FLEXIBILIDAD Y DE INTENSIFICACIÓN DE ESFUERZO

Tabla D300¹ Factor de flexibilidad, k , y Factor de intensificación de esfuerzo, i

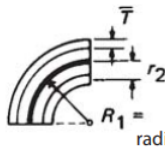
Descripción	Factor de flexibilidad, k	Factor de intensificación de esfuerzo [Notas (2) y (3)]		Característica de flexibilidad, h	Figura/gráfica
		Fuera de plano, i_o	Dentro del plano, i_i		
Codo soldado o tubería curvada [Notas (2), (4)-(7)]	$\frac{1,65}{h}$	$\frac{0,75}{h^{3/2}}$	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	

Figura 4.7: Extracto de Apéndice D ASME B31.3: Factores de flexibilidad y de intensificación de esfuerzos [80].

5. Dimensiones: Los espesores nominales y diámetros externos de tuberías y accesorios deben ser utilizados en los cálculos de flexibilidad [80].

A partir de estos requisitos, se concluye que es prioritario prevenir los fenómenos de desplazamientos térmicos y diseñar el sistema de tuberías de modo que se tenga la flexibilidad suficiente para evitar fallas. Esto permitirá mantener la integridad y seguridad del sistema, evitando posibles fallas o daños que podrían resultar de las tensiones inducidas por los cambios de temperatura en las tuberías.

4.5.2. Soporte

Los soportes de las tuberías deben ser tales que no puedan dañarlas. Esto significa, por ejemplo, que la resistencia restante de los soportes debe ser suficiente cuando falle uno de ellos. También significa que los soportes no deben tener bordes afilados. Además, los soportes no deben permitir la posibilidad de que se acumule agua de lluvia o condensado [40].

El diseño de las estructuras y elementos de soporte debe estar basado en todas las cargas que se transmiten a tales soportes cuando actúan de forma simultánea, incluyendo efectos del peso, cargas introducidas por presiones y temperaturas de servicio, vibración, viento, terremotos, impacto y deformaciones por desplazamiento [80].

La distribución y el diseño de la tubería y sus elementos de soporte tienen como objetivo evitar: esfuerzos en la tubería sobre lo permitido, fugas en las juntas, empujes y momentos excesivos en equipos conectados, esfuerzos excesivos (o restricciones) en los elementos de soporte, resonancia por vibraciones impuestas o inducidas por el fluido, interferencia excesiva con la expansión y contracción térmica de la tubería (la cual de otra forma es adecuadamente flexible), y desenganche accidental de la tubería de sus soportes [80].

Materiales

- Los soportes permanentes y sujeciones deben ser de un material apropiado para las condiciones del amoníaco líquido [80].
- Se puede usar hierro fundido, dúctil y maleable para rodillos, bases de rodillos, bases de anclaje y otros elementos de soporte sometidos principalmente a cargas de compresión. No se recomienda el hierro fundido si la tubería puede estar sometida a cargas de tipo impacto resultantes de pulsaciones o vibraciones. El hierro dúctil y maleable se puede usar para abrazaderas de tuberías y vigas, pletinas de soportes colgantes, sujetadores, piezas de fijación y anillos giratorios [80].
- Los accesorios soldados o adheridos a la tubería deben ser de un material compatible con el tubo y el amoníaco [80].

Roscas

Las roscas de tornillo deben seguir el estándar ASME B1.1 a menos que se requieran otras roscas para ajuste bajo cargas pesadas. Los tensores y tuercas de ajuste deben tener la longitud total de las roscas internas usadas. Cualquier ajuste roscado deberá contar con una contratuerca, a menos que quede asegurado por otros medios [80].

Accesorios

- Anclajes y guías: Un elemento de soporte usado como un anclaje deberá estar diseñado para mantener esencialmente una posición fija [80].

Para proteger los terminales u otras partes (más débiles) del sistema, se deben proporcionar sujeciones (por ejemplo, anclajes y guías) y así poder controlar el movimiento o la expansión en aquellas partes del sistema diseñadas para absorberlas [80].

Es importante destacar que las guías de tubería, sujeciones y anclajes deberán cumplir con las normas EJMA (Standard of the Expansion Joint Manufacturer's Association) [80].

- Soportes no extensibles (que no sean los anclajes y guías): Los elementos de soporte deben ser diseñados para permitir el movimiento libre de la tubería causado por la expansión y contracción térmica [80].

Soportes colgantes incluyen abrazaderas de tubería y vigas, sujetadores, piezas de fijación, barras, cintas, cadenas y otros dispositivos, los cuales deben estar en proporción para todas las cargas que se requieran. [80].

Respecto a soportes deslizantes, estos y las piezas de fijación deben ser diseñados para poder resistir las fuerzas producto de la fricción además de las cargas impues-

tas por los apoyos. Las dimensiones del soporte deberán permitir el movimiento esperado de la tubería soportada [80].

- Soportes elásticos: deben diseñarse de manera que apliquen una fuerza de soporte, en el punto de fijación del tubo, igual a la carga presente, según lo determinen los cálculos de balance de peso. Se debe contar con los medios para evitar el desalineamiento, el pandeo o las cargas excéntricas de los resortes, y para evitar el desenganche accidental de la carga [80].

En sitios sometidos a movimientos considerables por cambios térmicos, es ventajoso el uso de soportes de suspensión de resorte con soporte constante, pues brindan una fuerza esencialmente uniforme a lo largo del intervalo de carrera [80].

Se deben proporcionar los medios para evitar el sobreesfuerzo de los soportes de suspensión de resorte debido a deflexiones excesivas, por lo que es recomendado que todos los ganchos de resorte cuenten con indicadores de posición [80].

- Soportes de contrapeso: Los contrapesos deben contar con topes para limitar la carrera. Además, los pesos deberán estar bien ajustados [80].
- Soportes hidráulicos: Una disposición que utilice un cilindro hidráulico se podrá usar para entregar una fuerza constante de soporte. En tal caso, se deberá contar dispositivos de seguridad y topes para soportar la carga en caso de falla hidráulica [80].

Anexos estructurales

Los anexos externos e internos utilizados para tubería deberán estar diseñados de modo que no causen un aplastamiento indebido del tubo, esfuerzos locales excesivos por doblado o gradientes térmicos perjudiciales en la pared del tubo [80].

- Accesorios no integrales: incluyen abrazaderas, eslingas, horquillas, pernos tipo U, silletas, cintas y chavetas. Son aquellos en los que la reacción entre el tubo y el accesorio se da por contacto [80].
- Accesorios integrales: incluyen tapones, orejas, zapatas, placas y ganchos angulares, fundidos o soldados al tubo. Se deben considerar los esfuerzos localizados inducidos por la soldadura de un accesorio integral a la tubería. La soldadura debe ser proporcionada de manera que los esfuerzos de corte sean a lo más 0,80 veces el esfuerzo admisible básico en la tensión tabulado en las Tablas A-1 o A-2 de la norma ASME B31.3 (ver Figuras 4.2 y 4.3) [80].

El diseño de los soportes en un sistema de tuberías de amoníaco líquido debe tener en cuenta distintos factores para asegurar un funcionamiento óptimo y seguro de las tuberías. Los soportes son elementos esenciales para mantener las tuberías en su lugar, resistir cargas y permitir movimientos controlados, evitando daños y desalineamientos.

4.6. Materiales

El diseñador debe verificar que los materiales sean apropiados en todo el intervalo de temperatura operativa para el servicio de amoníaco líquido [80].

En la mayoría de los casos, el material de construcción es el acero al carbono. Sin embargo, se tiende a utilizar acero inoxidable por su buena resistencia a la corrosión en este servicio cuando, por ejemplo, se sustituyen partes de tuberías existentes. En consecuencia, el costo total de mantenimiento (por ejemplo, arenado, pintado, retirada o reinstalación de aislamiento) e inspección de una tubería de acero inoxidable puede ser menor que el de una tubería de acero al carbono [40], esto debido a su menor susceptibilidad a problemas relacionados con la corrosión. Esto puede resultar en una vida útil prolongada y menos interrupciones para el mantenimiento y las reparaciones.

Las tuberías de acero al carbono sobre la superficie suelen llevar un revestimiento/-pintura en la superficie exterior para protegerlas de la corrosión. El revestimiento suele consistir en una pintura epoxi en varias capas. Además de la pintura, puede utilizarse un revestimiento protector, como por ejemplo, una cinta Denso. Hay que tener en cuenta que las líneas con una temperatura variable son potencialmente más susceptibles a la corrosión externa. Las piezas de las tuberías de acero inoxidable no suelen revestirse; sin embargo, cuando la tubería puede estar expuesta a determinados productos químicos, como los cloruros en zonas costeras, puede ser necesario revestir también la tubería de acero inoxidable [40], en tal caso, se puede considerar el uso de productos de revestimiento como los de SilcoTek: Silconert o Dursan, que mejoran las características físicas para fortalecer la resistencia a la desecación, la adsorción y la corrosión. Silconert es un recubrimiento a base de silicio que ha sido adoptado a una amplia gama de industrias; beneficiando a aplicaciones analíticas, de petróleo/gas, refinerías y muestreo de procesos, siendo resistentes a la mayoría de los productos químicos, pero con una resistencia limitada frente a los ácidos. Por otro lado, Dursan consiste en un revestimiento patentado a base de carbono, resistente a la abrasión, duradero, inerte y resistente a la corrosión, que es más duro que el acero y muy resistente al ataque de ácidos y bases [87].

Las tuberías enterradas de acero al carbono deben revestirse para controlar la corrosión externa. Los revestimientos típicos son los materiales bituminosos, el polietileno (extruido) y el poliuretano. Además, la protección catódica es esencial para la protección eficaz contra la corrosión de las tuberías subterráneas (y sumergidas). El principio del método consiste en disminuir el potencial eléctrico del elemento que debe protegerse. Como resultado, la reacción anódica del hierro a los iones de hierro se suprime en una medida insignificante. El elemento a proteger actúa como cátodo bajo la influencia de una “corriente de protección” eléctrica. En la interfaz suelo-aire, las tuberías de acero al carbono enterradas presentan problemas de corrosión similares a los de las tuberías de acero al carbono en superficie. Se debe utilizar una envoltura de tubería en esa interfaz para evitar la corrosión externa [40].

Se aplica aislamiento cuando se tiene el amoníaco a temperaturas bajo cero, con el

objetivo de reducir la transferencia de calor, manteniendo la temperatura del líquido dentro de los límites seguros, y también para proteger a las personas del contacto directo con bajas temperaturas (que podría causar “quemaduras de hielo”, lo cual puede resultar en daño a la estructura de las células de la piel [88]). La humedad dentro y debajo del aislamiento puede causar corrosión externa de las tuberías de acero al carbono [40]. Dentro de los materiales usados para aislamiento en tuberías de refrigeración con amoníaco se encuentran el poliestireno expandido, poliuretano y el isocianurato [89].

Debe evitarse el contacto directo entre una tubería de acero inoxidable y una estructura de soporte de acero al carbono para evitar la corrosión del soporte [40].

Todos los elementos de construcción de la tubería, como válvulas, bridas y juntas, deben ser adecuados para la presión de funcionamiento máxima admisible más las fuerzas externas. Todos los elementos externos deben ser de acero al carbono o acero inoxidable, no permitiéndose materiales que contengan cobre (como aleaciones de latón o bronce) [40].

Como ejemplo, en la Figura 4.8 se indican materiales de construcción utilizados en las líneas de amoníaco líquido en distintos países de la Unión Europea.

Belgium	Pipeline 1 and 2	Carbon steel TTSt35 (very fine grain), and stainless steel 1.4541
Germany	Pipeline 1 and 2	Carbon steel (not further specified)
	Pipeline 3	Carbon steel, H52-3 (similar to TSTE 355 or ASTM A 537)
Italy	Pipeline 1	API 5L GrB, fully killed, Charpy V tested at -45°C
Netherlands	Pipeline 1	Carbon steel ASTM333 Gr6, and stainless steel ASTM312 TP304L
	Pipeline 2	ASTM A312 TP 304L (is Symbol AISI 304L, is Number 1.4306)
Poland	Pipeline 1	Carbon steel (no type specified)
	Pipeline 2, 3, 4 and 5	Carbon steel type 18G2A and API 5L GrB seamless
Portugal	Pipeline 1	A 333 Gr.6 / TT st.35 / A333 Gr.1
Spain	Pipeline 1	A 333 Gr.6
	Pipeline 2	ASTM A 333 Gr.6
	Pipeline 3 and 4	ASTM A 333 Gr.6 and St-35
U.K.	Pipeline 1, 2, 3, 4 and 5	LT50 (a type of CS) and sometimes also SS (type not specified)
	Pipeline 6 and 7	Carbon steel (12" line) and stainless steel (3" line) ; not further specified

Figura 4.8: Materiales de construcción utilizados en las líneas de amoníaco líquido en varios Estados miembros de la UE [40].

Por último, no se utilizará hierro dúctil en partes sometidas a presión a temperaturas por debajo de -29 [°C]. Se puede utilizar hierro dúctil austenítico, excepto para partes contenedoras de presión. El estaño y el plomo se utilizarán solo como revestimientos [80].

4.7. Fabricación de tuberías metálicas

Soldadura

Los electrodos de soldadura y metales de aporte, incluidos los insertos consumibles, deben cumplir con los requisitos del Código de Recipientes a Presión y Calderas ASME, Sección II, Parte C [80].

No se utilizarán anillos de respaldo hendidos. Por otro lado, los anillos de respaldo removibles e insertos consumibles se pueden utilizar sólo cuando su aplicabilidad haya sido comprobada mediante una calificación pertinente del procedimiento de soldadura a realizar [80].

El análisis químico nominal del metal de soldadura a utilizar debe ser similar al análisis químico nominal de los principales elementos de aleación del metal base [80].

Prealemtamiento de metales

Se utiliza el prealemtamiento, junto con el tratamiento térmico, con el objetivo de minimizar los efectos dañinos de la alta temperatura y de los gradientes térmicos severos inherentes a la soldadura [80].

Entre otros factores, la temperatura de prealemtamiento depende del grupo de metal base y del espesor nominal de pared, como se puede ver en la Figura 4.9.

Tabla 330.1.1 Temperaturas de prealemtamiento

Metal base N.º P o N.º S [Nota (1)]	Análisis del metal de soldadura N.º A [Nota (2)]	Grupo de metal base	Espesor nominal de la pared		Mín. resistencia a la tensión especificada, metal base		Temperatura mínima			
			mm	pulg.	MPa	ksi	Requerida		Recomendada	
							°C	°F	°C	°F
1	1	Acero al carbono	< 25	< 1	≤ 490	≤ 71	...	...	10	50
			≥ 25	≥ 1	Todos	Todos	...	...	79	175
			Todos	Todos	> 490	> 71	...	...	79	175

Figura 4.9: Extracto de Tabla 330.1.1 norma Asme B31.3 [80].

Tratamiento térmico de metales

Los tratamientos térmicos se utilizan con el objetivo de prevenir o aliviar los efectos dañinos de la alta temperatura y de los gradientes severos de temperatura propios del proceso de soldadura, así como para aliviar los esfuerzos residuales creados por el doblado y el formado [80].

El tratamiento térmico estará acorde con los grupos de materiales e intervalos de

espesores de la Tabla 331.1.1 de la norma ASME B31.3, como se muestra en la Figura 4.10:

Tabla 331.1.1 Requisitos de tratamiento térmico

Metal base N.º P o N.º S [Nota (1)]	Análisis del metal de soldadura N.º A [Nota (2)]	Grupo de metal base	Espesor nominal de la pared		Mín. resistencia a la tensión especificada, metal base		Rango de temperatura del metal		Tiempo de retención			Dureza Brinell, máx. [Nota (4)]
			mm	pulg.	MPa	ksi	°C	°F	Pared nominal [Nota (3)]		Tiempo min., horas	
									min/mm	h/pulg.		
1	1	Acero al carbono	≤ 20	≤ ¾	Todos	Todos	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
			> 20	> ¾	Todos	Todos	593-649	1.100-1.200	2.4	1	1	...
3	2, 11	Aceros aleados Cr ≤ 1½%	≤ 20	≤ ¾	≤ 490	≤ 71	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
			> 20	> ¾	Todos	Todos	593-718	1.100-1.325	2.4	1	1	225
			Todos	Todos	> 490	> 71	593-718	1.100-1.325	2.4	1	1	225
4 [Nota (5)]	3	Aceros aleados, ½% < Cr ≤ 2%	≤ 13	≤ ½	≤ 490	≤ 71	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
			> 13	> ½	Todos	Todos	704-746	1.300-1.375	2.4	1	2	225
			Todos	Todos	> 490	> 71	704-746	1.300-1.375	2.4	1	2	225
5A, 5B, 5C [Nota (5)]	4, 5	Aceros aleados (214% ≤ Cr ≤ 10%) ≤ 3% Cr y ≤ 0,15% C ≤ 3% Cr y ≤ 0,15% C > 3% Cr o > 0,15% C	≤ 13	≤ ½	Todos	Todos	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
			> 13	> ½	Todos	Todos	704-760	1.300-1.400	2.4	1	2	241
			Todos	Todos	Todos	Todos	704-760	1.300-1.400	2.4	1	2	241
6	6	Aceros de alta aleación martensíticos A 240 Gr. 429	Todos	Todos	Todos	Todos	732-788	1.350-1.450	2.4	1	2	241
			Todos	Todos	Todos	Todos	621-663	1.150-1.225	2.4	1	2	241
7	7	Aceros de alta aleación ferríticos	Todos	Todos	Todos	Todos	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
8	8, 9	Aceros de alta aleación austeníticos	Todos	Todos	Todos	Todos	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
9A, 9B	10	Aceros de aleación de níquel	≤ 20	≤ ¾	Todos	Todos	Ninguno	Ninguno	...	...	...	...
			> 20	> ¾	Todos	Todos	593-635	1.100-1.175	1.2	½	1	...
10	...	Acero de aleación de cromo-cobre	Todos	Todos	Todos	Todos	760-816 [Nota (6)]	1.400-1.500 [Nota (6)]	1.2	½	½	...

Figura 4.10: Extracto de Tabla 331.1.1 norma Asme B31.3 [80].

Al unir componentes mediante soldadura, el espesor a utilizar para aplicar las disposiciones del tratamiento térmico de esta tabla será el del componente de mayor espesor medido en la unión [80].

En algunos casos, las prácticas básicas pueden requerir modificaciones para adaptarse a las condiciones de servicio [80].

Se puede concluir que la soldadura requiere ciertas precauciones adicionales, como el precalentamiento y el tratamiento térmico, para garantizar que las soldaduras sean confiables y duraderas, especialmente cuando se maneja amoníaco líquido, que es una sustancia peligrosa.

Doblado y formado de metales

Es posible doblar la tubería y formar los componentes por medio de cualquier método en frío o en caliente que sea apropiado para el material, el servicio de amoníaco líquido y la severidad del proceso de doblado o formado. La superficie terminada debe estar libre de grietas y, esencialmente, libre de bucles. El espesor después del doblado o formado no debe ser menor que aquel requerido por el diseño [80].

4.8. Selección de especificaciones para sistemas de tuberías

En las Tablas 4.2 y 4.3 se indican los componentes más comunes de los sistemas de tuberías que cumplen las normas mínimas para sistemas de amoníaco no refrigerado [39].

Tabla 4.2: Especificaciones técnicas para tuberías de amoníaco líquido no refrigerado [39].

Especificación ASTM/API	Resistencia a la tracción	Clase de tubería (Sch)	Factor de calidad
ASTM A53, Grado B, Soldadura por resistencia eléctrica	60.000 [psi] 413,69 [Mpa]	40 & 80	85 %
ASTM A53, Tipo S, Sin costura	70.000 [psi] 483,33 [Mpa]	40 & 80	100 %
ASTM A106, Grado B, Sin costura	60.000 [psi] 413,69 [Mpa]	40 & 80	100 %
ASTM A106, Grado C, Sin costura	70.000 [psi] 483,33 [Mpa]	40 & 80	100 %
API 5L, Grado B, Soldadura por resistencia eléctrica	60.000 [psi] 413,69 [Mpa]	40 & 80	85 %

Los aceros de la Tabla 4.2 poseen un porcentaje de carbono inferior al 0,3 %, por lo que se clasifican como aceros bajo en carbono. Estos tiene una buena soldabilidad. Muchas de las técnicas de soldadura por fusión y de estado sólido se pueden utilizar para unir piezas mecánicas que están hechas de acero con bajo contenido de carbono. La soldadura por fusión como soldadura por arco de metal protegido (SMAW), la soldadura por gas inerte de metal (MIG), la soldadura por gas inerte de tungsteno y la soldadura por gas se utilizan comúnmente para soldar acero con bajo contenido de carbono. La soldadura MIG es el tipo más utilizado para tuberías de acero de bajo carbono porque ofrece alta precisión y velocidad al unir metales, y tiende a mostrar las mejores propiedades mecánicas de la zona de soldadura [90].

Tabla 4.3: Especificaciones técnicas para componentes de tuberías de amoníaco líquido no refrigerado [39].

Componente	Especificación ASTM	Clase de presión o Rating
Accesorios roscados y soldados por encastre	A105 (Acero al carbono forjado)	Clase 2000 y mayor
Accesorios soldados a tope	A234 Grado WPB	Schedule 40 & 80
Accesorios roscados de hierro maleable negro	A197*	Clase 300 y mayor
Flanges	A105 (Acero al carbono forjado)	Clase 300 y mayor
Válvulas	A395 (Hierro dúctil)	-
Pernos de brida	A193 Grado B7	-
Tuercas hexagonales de brida	A194 Grado 2H	-
Boquillas de estampación sin costura	A234 Grado WPB	Schedule 40 & 80

Respecto a los accesorios de hierro maleable negro, se debe limitar su aplicación:

- Los accesorios de hierro maleable que se pueden utilizar son los codos, tees, cruces, codos reductores de 90°, codos de calle de 90° y acoples reductores de clase 300 y superior [39].
- No se deben utilizar tapones y bushing reductor de hierro maleable (sólo disponibles en la clase de presión 150) [39].
- No se deben soldar accesorios de hierro maleable. El uso de estos accesorios se implementa mediante uniones roscadas [39].
- En el caso particular de servicio de amoníaco refrigerado a baja temperatura, no se deben usar accesorios de hierro maleable [39].

Por último, respecto a accesorios, flanges, válvulas y otros componentes, las uniones deben ser de acero con asiento de acero [39].

A partir de las condiciones de operación, el material seleccionado para la tubería y la mayoría de sus componentes es el acero al carbono. Ya sea para tuberías sobre la superficie o enterradas, es necesario el uso de revestimiento para la protección contra corrosión externa. El uso de aislamiento se considera cuando se transporta amoníaco refrigerado (a temperatura menores a 0 [°C]), con el objetivo de conservar la temperatura

del fluido y proteger de quemaduras a los operarios que puedan tener contacto con la tubería. Por último, se debe destacar la prohibición de materiales que contengan cobre, pues este reacciona con el amoníaco.

El diseño de las tuberías se realiza considerando la condición más severa de operación. A partir de ahí, una selección adecuada de componentes es fundamental para garantizar la integridad y confiabilidad de los sistemas de tuberías, y así reducir riesgo de fallas, fugas y accidentes graves.

4.9. Aplicación de normativa nacional

Como se mencionó previamente, es el Decreto 298, emitido por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, aquel que regula el transporte de sustancias peligrosas mediante el Reglamento para el Transporte de Sustancias Peligrosas por Calles y Caminos, pero no abarca el uso de tuberías.

Por otro lado, el Decreto 594 “Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo” del Ministerio de Salud indica que en aquellos lugares de trabajo donde se almacenen, fabriquen o manipulen productos tóxicos o corrosivos, de cualquier naturaleza, los pisos deberán ser de material resistente a éstos, impermeables y no porosos, de tal manera que faciliten una limpieza oportuna y completa. Dichos lugares deberán tener 2 casilleros individuales por cada empleado, separados e independientes, uno destinado a la ropa de trabajo y el otro a la vestimenta habitual. En tal caso, será responsabilidad del empleador hacerse cargo del lavado de la ropa de trabajo y adoptar las medidas que impidan que el trabajador la saque del lugar de trabajo [91].

Es relevante estar al tanto de las nuevas normas nacionales que puedan surgir en los próximos años para regular el transporte de amoníaco líquido mediante tuberías, puesto que el único decreto que trata específicamente sobre el transporte, lo hace considerando mediante calles o caminos. Estas pueden estar basadas en algunas de las normativas mencionadas en las Tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6.

4.10. Fallas a prevenir

A continuación, se mencionan algunas de las fallas que se deben prevenir en el transporte de amoníaco líquido mediante sistemas de tuberías, basado en incidentes históricos:

- Sobrepresión: un aumento excesivo de la presión puede provocar fugas, rupturas o explosiones, especialmente en una pieza de tubería previamente dañada mecánicamente (Kansas, 1973) [40].
- Corrosión externa: ocurre cuando el metal de la tubería se ve deteriorado producto

de la acción de agentes corrosivos presentes en el entorno, y puede provocar la formación de agujeros o grietas en la tubería, lo que resulta en fugas del amoníaco. Se han reportado casos de corrosión externa como consecuencia de daños mecánicos en el revestimiento de la tubería e interferencias en la protección catódica (Texas, 1975). También se ha dado el caso de corrosión externa debida a la entrada imprevista de agua (de lluvia) en la superficie de la tubería (Inglaterra, 1981) [40].

Las abrazaderas de tuberías pueden desempeñar un papel importante en la corrosión de las tuberías. Este fenómeno puede producirse debido a la entrada de agua de lluvia o condensado en el espacio entre la tubería y la abrazadera. El aislamiento térmico entre una tubería fría y su abrazadera de soporte reducirá la posibilidad de que se forme un punto frío en la estructura de soporte y de que ésta se corroa [40].



Figura 4.11: Corrosión externa bajo las abrazaderas de tuberías [40].

Las juntas soldadas y sus zonas afectadas por el calor también son más vulnerables a la corrosión que el resto de la tubería. La causa suele ser que la conservación de esta zona de soldadura es de menor calidad que la pintura/revestimiento del resto de la tubería, que se ejecuta en el taller [40].

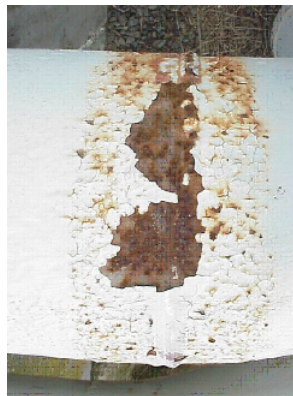


Figura 4.12: Corrosión en uniones soldadas [40].

- Trabajos de mantenimiento inadecuados: se han producido fugas de amoníaco por trabajos de mantenimiento en componentes del sistema, por ejemplo, en válvulas (Algoña, 2021) [40].
- Daño físico: dependiendo de la ubicación de la tubería, esta puede verse afectada por factores externos que causen daño físico.

Por ejemplo, en el caso de tramos vulnerables de tuberías cercanos a carreteras, estos deben protegerse con una barrera física (de choque). Las tuberías situadas en zanjas cerca de carreteras (públicas), así como las situadas en alcantarillas, pueden protegerse también, en caso necesario, con una barrera física. Además, se puede instalar una jaula de protección [40].



Figura 4.13: Ejemplo de barrera de seguridad de acero a lo largo de una carretera [40].



Figura 4.14: Ejemplo de barrera de seguridad con construcción de jaula, que protege tuberías en una alcantarilla [40].

Por otro lado, las tuberías subterráneas pueden sufrir daños por diversas actividades, como excavaciones (excavación, pilotaje, etc.) y fuerzas físicas (por camiones, vías férreas y vías navegables). Para prevenir esto, entre las medidas a considerar se

encuentran implementar una profundidad de entierro suficiente (en la Unión Europea, la profundidad típica es de 1,5 metros), o el uso de sistemas de marcadores de línea, que permitirá una visión adecuada de la vía, lo que minimizará los clásicos incidentes de daños a la tubería por equipos agrícolas y de excavación [40].

- Agrietamiento por fatiga del metal: El agrietamiento por fatiga en tuberías ocurre cuando se forman grietas debido a la acumulación de tensiones cíclicas en el material de la tubería, que puede ocurrir por vibraciones, variaciones en el caudal, oscilaciones térmicas, entre otros. Si se combina la fatiga con daños mecánicos previos en la tubería, es más probable que ocurra una falla (Kansas, 2004) [40].
- Falla en la costura: se refiere a un defecto o debilidad en la unión de las partes de una tubería fabricada mediante soldadura. Si ocurre una falla en la costura de soldadura, se puede ver comprometida la integridad estructural de la tubería y causar problemas como fugas o incluso rupturas (Kansas, 2006) [40].
- Corrosión interna: el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) es un fenómeno que puede producirse en metales expuestos a una combinación de esfuerzo y ambiente corrosivo, y causar fallas catastróficas. El amoníaco líquido en presencia de oxígeno puede provocar el agrietamiento por corrosión bajo tensión en aceros al carbono. Los niveles de tensión necesarios para iniciar dicha fisuración son elevados, sin embargo, los niveles de tensión residual de soldadura en materiales de resistencia alta y media o soldaduras con una resistencia excesiva, junto con las tensiones aplicadas, pueden ser suficientes para iniciar el SCC si el oxígeno está presente en cantidades suficientes [40].
- Choque hidráulico: se define como un aumento repentino y localizado de la presión en tuberías o equipos como consecuencia de un cambio rápido en la velocidad de un flujo. Este aumento brusco de la presión puede provocar fallos catastróficos en tuberías, válvulas y otros componentes [92].
- Vibraciones excesivas: las vibraciones excesivas debidas a una maquinaria mal alineada, desequilibrada o demasiado caliente pueden provocar el fallo prematuro de las tuberías y otros componentes del sistema [93].

Por otro lado, en el caso del transporte de amoníaco líquido refrigerado, se debe tener en consideración las siguientes fallas:

- Falla por ciclo de congelación-descongelación imprevisto en el espacio anular que contiene agua de una tubería de amoníaco de doble pared (Texas, 1969) [40].
- Formación de hielo: El funcionamiento de una tubería de amoníaco a temperaturas bajo cero conlleva el riesgo de formación de hielo, especialmente si el amoníaco está a -33 [°C] o si la tubería no está aislada. La formación de hielo hará que la línea se vuelva más pesada, lo que aumentará la carga sobre los soportes de las tuberías. Además, existe la posibilidad de que la formación de hielo sea tal que los equipos situados en la línea, como las válvulas de aislamiento, se congelen. Esta puede ser una situación no deseada porque el equipo puede quedar inoperativo. En tal caso,

se debe aplicar un aislamiento estanco al vapor adecuado o instalar un sistema de calefacción en los lugares críticos (calefacción eléctrica o de vapor) [40].

- Si el aislamiento es defectuoso o incompleto, no se evitará la condensación (en unidades de refrigeración con amoníaco) y la corrosión no sólo se producirá, sino que posiblemente se acelerará [93].
- Corrosión bajo aislamiento (CUI): Este fenómeno es cualquier tipo de corrosión que se produce en las tuberías debido a la presencia de humedad dentro o debajo del sistema de aislamiento. Se desarrolla cuando el metal está expuesto al agua durante un periodo de tiempo y es posible bajo todo tipo de materiales aislantes. La entrada de agua líquida puede deberse al agua de lluvia o a sistemas de diluvio, al vertido de líquidos de proceso o a la condensación; y puede penetrar a través del revestimiento o cubierta del aislamiento como consecuencia de una mala instalación o daños durante el servicio o simplemente debido a su deterioro gradual. Dependiendo de las propiedades del material aislante y de la temperatura de funcionamiento, el agua puede quedar retenida y el sistema de aislamiento puede saturarse, lo que, además de la corrosión, puede provocar una pérdida de rendimiento térmico y/o acústico [94].

Al implementar tuberías de amoníaco líquido, es necesario tomar en cuenta los posibles riesgos asociados al transporte de este producto debido a sus características tóxicas y corrosivas. Para prevenir fallas, las cuales pueden generar accidentes catastróficos, conviene identificar las posibles causas asociadas, con el objetivo de utilizar todas las medidas de protección necesarias para evitarlas, otorgando seguridad y confiabilidad al sistema. Es fundamental tener el enfoque de conseguir una operación segura, así como métodos óptimos de inspección y detección de fugas. Los sistemas de refrigeración, por la naturaleza de sus operaciones, incluyen fallas potenciales adicionales.

4.11. Análisis de esfuerzos

El análisis de esfuerzos en tuberías que se presenta en esta sección se realiza conforme a la norma ASME B31.3, e implica la evaluación de cómo las cargas, las presiones internas y externas, las temperaturas y otros factores afectan la integridad estructural de las tuberías utilizadas para el transporte de amoníaco líquido. Este análisis es esencial para asegurar la confiabilidad y la integridad de las tuberías en entornos industriales críticos, como es la aplicación estudiada en este trabajo de título.

Esfuerzos permitidos

Esfuerzo permitido por desplazamiento [80]:

$$S_A = f(1, 25S_c + 0, 25S_h) \text{ [ksi]} \quad (4.1)$$

Siendo

f : factor de reducción de esfuerzos por efectos cíclicos [-].

Fig. 302.3.5 Factor del intervalo de esfuerzos, f

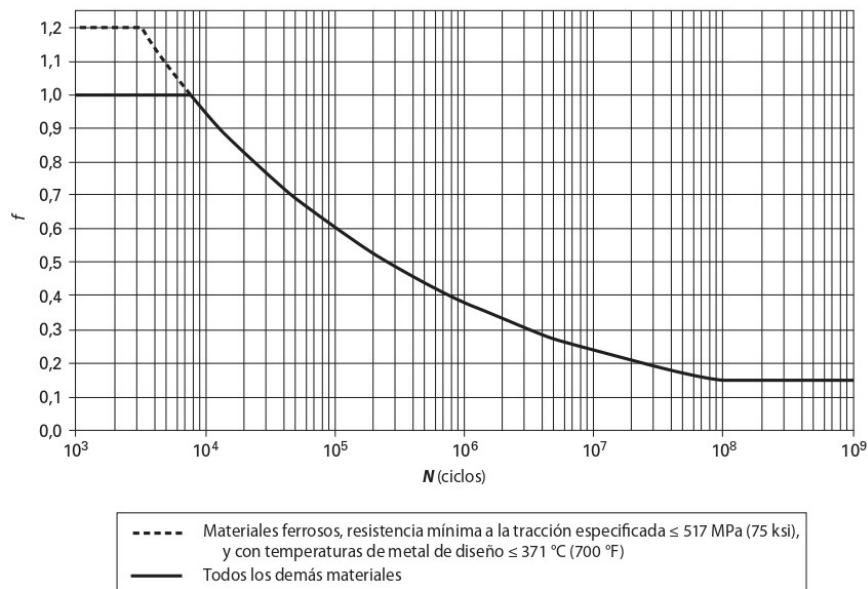


Figura 4.15: Factor del intervalo de esfuerzos, f [80].

Y se debe cumplir [80]:

$$f = 6,0(N)^{-0,2} \leq f_m \tag{4.2}$$

Donde

- N : número equivalente de ciclos de desplazamiento completo durante la vida en servicio esperada del sistema de tuberías [-].
- f_m : valor máximo del factor de intervalo de esfuerzos; 1,2 para materiales ferrosos con una resistencia específica mínima a la tensión < 517 MPa (75 ksi) y una temperatura del metal < 371 [°C]. Si no se cumplen estas condiciones, $f_m = 1,0$ [-].

S_c : esfuerzo permisible a la temperatura mínima esperada, obtenido de la Tabla A-1 de la norma ASME B31.3 (ver Figura 4.16) [ksi].

S_h : esfuerzo permisible a la temperatura máxima esperada, obtenido de la Tabla A-1 de la norma ASME B31.3 (ver Figura 4.16) [ksi].

Tabla A-1 Esfuerzos permitidos básicos en tensión para metales¹ (cont.)

Los números en paréntesis se refieren a las Notas para las Tablas del Apéndice A; las especificaciones son ASTM a menos que se especifique de otra forma.

Material	N.º de especific.	N.º Po N.º S (5)	Grado	N.º UNS	Notas	Temp. mín., °F (6)	Mín. esfuerzo especificado, ksi		Temp. mín. a 100	200	300
							Tensión	Elasticidad			
...	A 53	1	B	K03005	(57)(59)	B	60	35	20,0	20,0	20,0
...	A 106	1	B	K03006	(57)	B	60	35	20,0	20,0	20,0

Figura 4.16: Esfuerzos permitidos básicos en tensión para aceros especificados, S_c y S_h [80].

Esfuerzos de flexibilidad

Esfuerzos por desplazamiento [80]:

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} < S_A \text{ [psi]} \quad (4.3)$$

Siendo

S_b : esfuerzo por flexión resultante.

Para codos, curvas mitradas y conexiones a ramal de salida de tamaño completo (extremos 1, 2 y 3), según las Figuras 4.17 y 4.18 [80]:

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} \text{ [psi]} \quad (4.4)$$

Donde

- i_i : factor de intensificación de esfuerzos en plano del Apéndice D norma ASME B31.3 (ver Figura 4.7) [-].
- M_i : momento de flexión en plano [lbf-in].
- i_o : factor de intensificación de esfuerzos fuera de plano del Apéndice D norma ASME B31.3 (ver Figura 4.7) [-].
- M_o : momento de flexión fuera de plano [lbf-in].
- Z : módulo de sección de tubería [in³].

$$D_{int} = D_{ext} - 2T, \text{ Diámetro interior [in]} \quad (4.5)$$

$$I = \frac{\pi}{64}(D_{ext}^4 - D_{int}^4), \text{ Momento de inercia [in}^4] \quad (4.6)$$

$$R = \frac{D_{ext}}{2}, \text{ Radio [in]} \quad (4.7)$$

$$Z = \frac{I}{R} \text{ [in}^3\text{]} \quad (4.8)$$

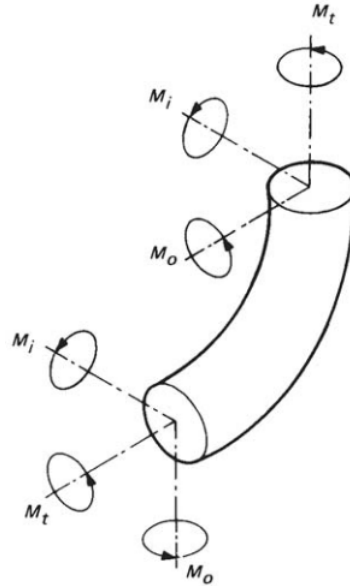


Figura 4.17: Esquema para Momentos en curvas [80].

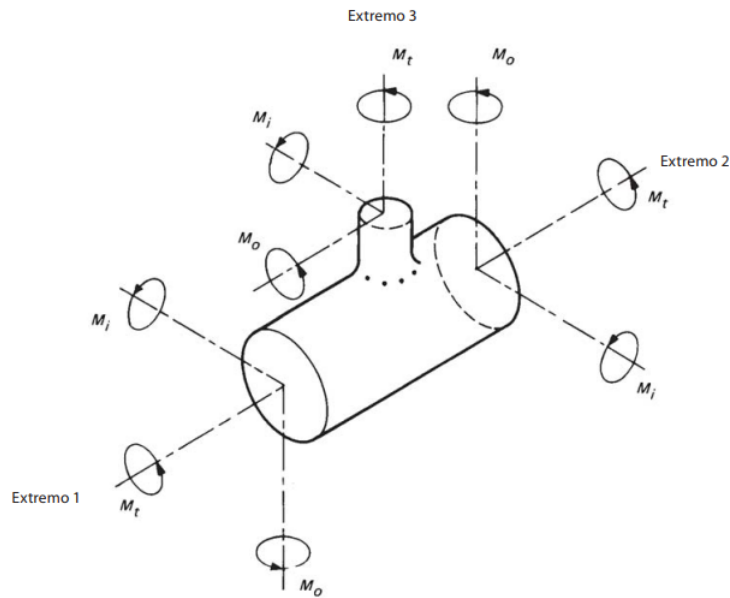


Figura 4.18: Esquema para Momentos en conexiones a ramal [80].

Para conexiones a ramal con reducción [80]:

- Para cabezal (Extremos 1 y 2 Figura 4.18)

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} \text{ [psi]} \quad (4.9)$$

- Para ramal (Extremo 3 Figura 4.18)

$$S_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z_e} \text{ [psi]} \quad (4.10)$$

Siendo

i_i : factor de intensificación de esfuerzos en plano del Apéndice D norma ASME B31.3 (ver Figura 4.7) [-].

i_o : factor de intensificación de esfuerzos fuera de plano del Apéndice D norma ASME B31.3 (ver Figura 4.7) [-].

Z_e : módulo efectivo de sección de ramal [in^3].

$$Z_e = \pi r_2^2 T_S \text{ [in}^3\text{]} \quad (4.11)$$

Donde

- r_2 : radio medio de la sección transversal del ramal [in].
- T_S : espesor de pared de ramal efectivo, $T_S = \text{Mín}(\bar{T}_h; i_i \bar{T}_b)$ [in].
- \bar{T}_h : espesor del tramo coincidente de tubería en T o cabezal exclusivo de elementos de refuerzo [in].
- \bar{T}_b : espesor del ramal de tubería [in].

S_t : esfuerzo por torsión [80].

$$S_t = \frac{M_t}{2Z} \text{ [psi]} \quad (4.12)$$

Donde

- M_t : momento torsional [lbf-in].
- Z : módulo de sección de tubería [in^3].

Reacciones

Para condiciones de desplazamiento extremo en un sistema de tuberías de dos anclajes sin sujeción intermedia (sistema simple), R_m corresponde a la fuerza o momento de reacción instantáneo máximo calculado a la temperatura máxima o mínima del metal, y se calcula como [80]:

$$R_m = R \left(1 - \frac{2C}{3}\right) \frac{E_m}{E_a} \quad (4.13)$$

Siendo

R : fuerza o momento de reacción (obtenidos de análisis de flexibilidad).

C : factor de contracurvatura intencional que varía de 0 en ausencia de contracurvatura, a 1 para una contracurvatura del 100 %.

E_m : módulo de elasticidad a temperatura máxima o mínima de metal (ver Figura 4.6).

E_a : módulo de elasticidad de referencia a 21 [°C] (ver Figura 4.6).

Por otro lado, para condición original, R_a es la fuerza o momento de reacción instantáneo calculados a la temperatura a la cual se ensambla las tuberías [80].

$$R_a = \text{Max}(CR, C_1R) \quad (4.14)$$

Siendo

C_1 : factor de relajación o autocurvatura; usar cero si C_1 es negativo [80].

$$C_1 = 1 - \frac{S_h E_a}{S_e E_m} \quad (4.15)$$

Para una temperatura de diseño de 26 [°C], interpolando en la Tabla C-6 de la norma ASME B31.3 (Fila Acero al carbono, $C \leq 0,3\%$, ver Figura 4.6), se tiene que $E_m = 29,45$ [Msi]. Con la temperatura de referencia mencionada de 21 [°C], se tiene un valor de $E_a = 29,5$ [Msi]. Luego, como $S_h = S_c = 60$ [ksi], se obtiene:

$$C_1 = 1 - \frac{29,5}{29,45} = -0,0017 \rightarrow 0 \quad (4.16)$$

Además, conociendo E_m y E_a , se puede simplificar la ecuación 4.13 como:

$$R_m = R \left(1 - \frac{2C}{3}\right) \frac{29,45}{29,5} = 0,998R \left(1 - \frac{2C}{3}\right) \quad (4.17)$$

Análisis de cargas sostenidas

Esfuerzo por cargas sostenidas, tales como presión y peso, S_L [80]:

$$S_L = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2S_t)^2} \text{ [psi]} \quad (4.18)$$

Se debe cumplir [80]:

$$S_L < S_h \quad (4.19)$$

$$S_L + S_{occ} < 1,33S_h \quad (4.20)$$

Donde

- S_{occ} : suma de los esfuerzos ocasionales, tales como vientos o sismos [ksi].

S_a corresponde al esfuerzo por fuerza longitudinal sostenida [80].

$$S_a = \frac{I_a F_a}{A_p} \text{ [psi]} \quad (4.21)$$

Siendo

I_a : índice de fuerza longitudinal sostenida. En ausencia de datos más aplicables, $I_a = 1,00$ [-].

F_a : fuerza longitudinal por cargas sostenidas, por ejemplo, presión y peso [lbf]. Incluye la fuerza sostenida debido a presión, que es $P_j A_f$ a menos que el sistema de tuberías incluya una junta de expansión que no esté diseñada para soportar esta fuerza por sí misma, donde P_j es la presión operativa interna para la condición considerada, $A_f = \pi d^2/4$, y d es el diámetro interno de la tubería si se considera el espesor de la tubería menos las tolerancias aplicables.

A_p : sección transversal de la tubería, se consideran las dimensiones nominales menos las tolerancias [in^2].

$$A_p = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \text{ [in}^2\text{]} \quad (4.22)$$

El término S_b corresponde al esfuerzo por momentos de doblado sostenidos [80].

$$S_b = \frac{\sqrt{(I_i M_i)^2 + (I_o M_o)^2}}{Z} \text{ [psi]} \quad (4.23)$$

Siendo

I_i : índice de momento planar sostenido. En la ausencia de datos más aplicables, $I_i = \text{Máx}(0,75i_i; 1,00)$ [-].

M_i : momento planar debido a cargas sostenidas, por ejemplo, presión y peso [lbf-in].

I_o : índice de momento no planar sostenido. En la ausencia de datos más aplicables, I_o se considera como valor el más grande entre $I_o = \text{Máx}(0,75i_o; 1,00)$ [-].

M_o : momento no-planar debido a cargas sostenidas, por ejemplo, presión y peso [lbf-in].

Z : módulo de sección sostenido. Se calcula usando las dimensiones nominales de las tuberías menos las tolerancias [in^3].

Por último, S_t corresponde al esfuerzo por momento torsional sostenido [80].

$$S_t = \frac{I_t M_t}{2Z} \text{ [psi]} \quad (4.24)$$

Siendo

I_t : índice de momento torsional sostenido. En la ausencia de datos más aplicables, I_t se considera como 1,00 [-].

M_t : momento torsional debido a cargas sostenidas, por ejemplo, presión y peso [lbf-in].

Para aplicar el análisis de esfuerzo presentado se propone un caso de ejemplo a continuación.

Si en la ecuación 4.1, $f = 1$, y considerando una temperatura de servicio fija aproximada de 26 [°C] (para una presión de bombeo de 10 [bar], ver Tabla 2.1), entonces $S_c = S_h = 60$ [ksi]. Por lo tanto, el esfuerzo permitido por desplazamiento, S_A resulta:

$$S_A = 1 \cdot (1,25 \cdot 60 + 0,25 \cdot 60) = 90 \text{ [ksi]} \quad (4.25)$$

Para evaluar los esfuerzos, se utilizará el ramal de una unión en T (Figura 4.19), utilizando los datos geométricos de las Tablas 4.4 y 4.5:

Tabla D300¹ Factor de flexibilidad, k , y Factor de intensificación de esfuerzo, i


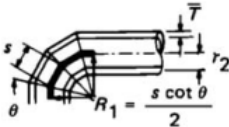
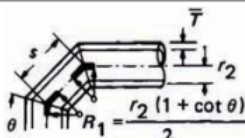
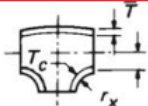
Descripción	Factor de flexibilidad, k	Factor de intensificación de esfuerzo [Notas (2) y (3)]		Característica de flexibilidad, h	Figura/gráfica
		Fuera de plano, i_o	Dentro del plano, i_i		
Codo soldado o tubería curvada [Notas (2), (4)-(7)]	$\frac{1,65}{h}$	$\frac{0,75}{h^{3/2}}$	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{\bar{T}R_1}{r_2^2}$	
Curva mitrada con las secciones cercanas $s < r_2(1 + \tan \theta)$ [Notas (2), (4), (5), (7)]	$\frac{1,52}{h^{3/2}}$	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{\cot \theta}{2} \left(\frac{s\bar{T}}{r_2^2} \right)$	
Curva mitrada sencilla, o mitrada con las secciones muy separadas $s \geq r_2(1 + \tan \theta)$ [Notas (2), (4), (7)]	$\frac{1,52}{h^{3/2}}$	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{1 + \cot \theta}{2} \left(\frac{\bar{T}}{r_2} \right)$	
Unión en T soldada cumpliendo con ASME B16.9 [Notas (2), (4), (6), (8), (9)]	1	$\frac{0,9}{h^{3/2}}$	$\frac{3}{4}i_o + \frac{1}{4}$	$3,1 \frac{\bar{T}}{r_2}$	

Figura 4.19: Unión en T considerada para ejemplo [80].

Tabla 4.4: Datos geométricos ramal.

$D_{ext,b}$	6 [in]
\bar{T}_b	0,28 [in]
$r_{2,b}$	2,86 [in]
T_{si}	0,32 [in]
Z_e	2,89 [in ²]

Tabla 4.5: Datos geométricos cabezal.

$D_{ext,h}$	8 [in]
\bar{T}_h	0,32 [in]
r_{2h}	3,84 [in]
h	0,26 [-]
i_i	1,91 [-]
i_o	2,21 [-]
I_i	1,43 [-]
I_o	1,66 [-]
I_a	1 [-]
I_t	1 [-]
A_{fb}	4,27 [in ²]

Para el análisis de esfuerzos por desplazamiento, los datos de momentos son los que se muestran en la Tabla 4.6, mientras que para el análisis de esfuerzos por cargas sostenidas se utilizarán los datos de la Tabla 4.7:

Tabla 4.6: Momentos para cálculo de esfuerzos por desplazamiento.

M_i	80.000 [lbf-in]
M_o	72.000 [lbf-in]
M_t	32.000 [lbf-in]

Tabla 4.7: Fuerza, momentos y presión interna para cálculo de esfuerzos por cargas sostenidas.

F_a	5 [lbf]
M_t	71 [lbf-in]
M_i	300 [lbf-in]
M_o	203 [lbf-in]
P_j	145 [psi]

Los resultados del análisis de esfuerzos por desplazamiento en el ramal se muestran en la Tabla 4.8

Tabla 4.8: Esfuerzos por desplazamiento en ramal.

S_b	76.178,58 [psi]
S_t	2.327,00 [psi]
S_E	76.320,61 [psi]

Se puede concluir que el esfuerzo por desplazamiento es menor al esfuerzo permitido ($S_E < S_A$).

Los esfuerzos resultantes debido a cargas sostenidas se muestran en la Tabla 4.9

Tabla 4.9: Esfuerzos por cargas sostenidas en ramal.

S_a	124,12 [psi]
S_t	5,16 [psi]
S_b	188,44 [psi]
S_L	312,73 [psi]

En este caso, también se cumple la condición de esfuerzo permisible, pues $S_L < S_h$.

El análisis de esfuerzos realizado requirió la consideración de esfuerzos por desplazamiento y por cargas sostenidas. Cabe destacar que las ecuaciones presentadas en esta sección son utilizadas como base en programas computacionales como CAESAR II y Autopipe, dedicados al análisis de esfuerzos en tuberías.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de título se realizó un análisis técnico mediante el establecimiento de requisitos de diseño y selección de especificaciones para el almacenamiento de amoníaco líquido en tanques cilíndricos verticales (en estado refrigerado) y el transporte de este producto (no refrigerado) mediante tuberías, siguiendo normativas nacionales e internacionales. Estos requisitos se propusieron para poder establecer seguridad operativa, proteger el medio ambiente y mantener las condiciones operacionales del amoníaco, pues este es un producto altamente tóxico y corrosivo. La selección cuidadosa de materiales y técnicas de construcción es esencial para garantizar la eficiencia y confiabilidad a lo largo de la vida útil de las estructuras.

Existen distintos formatos para el almacenamiento de amoníaco, según se realice de forma presurizada o refrigerada, siendo la segunda opción la que permite almacenar una mayor cantidad y la más segura. En el caso del transporte, este se puede realizar mediante tuberías, ferrocarriles, camiones y buques, dependiendo de la distancia entre producción y consumo.

Los requisitos de diseño para tanques de almacenamiento fueron establecidos utilizando principalmente la norma API620 “Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks”. Por otro lado, para los requisitos de diseño de sistema de tuberías se hizo uso de la norma ASME B31.3 “Tuberías de procesos”.

El almacenamiento de amoníaco fue considerado en su estado líquido refrigerado a presión atmosférica y -33 [°C]. El transporte de amoníaco mediante tuberías se consideró a una presión de 10 [bar] y temperatura de 26 [°C], lo cual lo mantiene en estado líquido. Si se consideran distintas condiciones termodinámicas para almacenamiento y transporte, como en este trabajo, es fundamental realizar un diseño que garantice la seguridad para esta conexión tanque-tuberías.

Las normas nacionales entregan información para la identificación de riesgos y requisitos de seguridad. Respecto a las normativas nacionales aplicables al almacenamiento y transporte del amoníaco, se puede concluir lo siguiente:

- La norma NCh382 categoriza al amoníaco como un gas tóxico.

- La norma NCh2190 establece requisitos de seguridad para identificar los riesgos que poseen las sustancias peligrosas, incluyendo requisitos acerca de las características de las marcas, rótulos y etiquetas, uso de ellos, excepciones en el uso y los lugares en que se deben colocar. Esta norma es aplicable a la manipulación y almacenamiento en tránsito de sustancias peligrosas por vía terrestre y para el comercio tanto de importación como de exportación.
- La norma NCh1411/4 trata acerca de identificación de riesgos de materiales, siendo aplicable a toda instalación que fabrique, almacene, o use materiales que presente riesgos (excluyendo el transporte de productos peligrosos). Según esta norma, la descripción de peligros del amoníaco anhidro corresponde a gas a alta presión, tóxico, corrosivo e inflamable.
- En el almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado se debe tener en consideración el Decreto 43 del Ministerio de Salud, el cual regula las condiciones de seguridad para el almacenamiento de sustancias peligrosas. Este decreto exige que la distancia entre tanques sea de por lo menos 30 [m] entre sí. Además, se deberá contar con un sistema de detección de fugas.
- El Decreto 298, emitido por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, regula el transporte de sustancias peligrosas mediante el Reglamento para el Transporte de Sustancias Peligrosas por Calles y Caminos, pero no incluye el uso de tuberías.
- El Decreto 594 del Ministerio de Salud indica que en aquellos lugares de trabajo donde se almacenen, fabriquen o manipulen productos tóxicos o corrosivos (como lo es una planta de amoníaco), de cualquier naturaleza, los pisos deberán ser de material resistente a éstos, impermeables y no porosos, para facilitar una limpieza oportuna y completa. Se deberá tener 2 casilleros individuales por trabajador, separados e independientes, uno destinado a la ropa de trabajo y el otro a la vestimenta habitual. El empleador debe hacerse cargo del lavado de la ropa de trabajo y adoptar las medidas que impidan que el trabajador la saque del lugar de trabajo.
- El hecho de que el amoníaco sea un gas tóxico, muy reactivo y corrosivo, genera la necesidad de tener aspectos de seguridad en cuenta debido al peligro al que se ven expuestas las personas y el impacto medioambiental que podría causar una eventual fuga de este compuesto. Se debe estar al corriente con nuevas normativas nacionales que puedan surgir eventualmente y que sí especifiquen condiciones respecto al transporte mediante tuberías y a los nuevos usos del amoníaco.

Dependiendo de varios factores, como el entorno en el que se ubicará el tanque, las regulaciones y normativas aplicables, y el nivel de seguridad requerido, se debe tomar como decisión inicial el tipo de contención, que puede ser de pared simple o doble. Los tanques de pared doble se consideran más seguros debido a que su diseño proporciona una barrera adicional contra derrames y fugas, aunque esto mismo los hace ser más costosos y complejos de construir respecto a los tanques de pared simple.

El diseño y la construcción de los tanques son procesos altamente especializados y se debe tener en cuenta los requisitos específicos de geometría y construcción para cada componente.

Se deben considerar distintas situaciones de operación, especialmente condiciones de emergencia, para garantizar la seguridad y la integridad de los tanques, de modo de prevenir fallas catastróficas. Por lo mismo, también se deben realizar estrictos procedimientos de examen e inspección.

La selección de especificaciones realizada para tanques de almacenamiento implica principalmente como material el acero al carbono-manganeso, la cual es una elección que se justifica debido a que se trata de un servicio de baja temperatura y de un producto corrosivo. Para el componente principal de un tanque, que corresponde a los revestimientos, se seleccionó la especificación ASTM A516 Gr. 70, mientras que el aislamiento es de perlita, que sigue el estándar ASTM C549. Se destaca que no se permiten materiales que contengan cobre.

Es fundamental realizar un análisis de riesgo para las instalaciones implicadas en el proceso de almacenamiento de amoníaco líquido refrigerado con el objetivo de prevenir fallas. Dentro de las causas posibles de fallas se encuentran el agrietamiento por corrosión bajo tensión, la sobrepresurización, la presurización insuficiente, la rotura del conducto de carga, la corrosión externa, el sobrellenado, los defectos originales de soldadura y la falla en instrumentos de seguridad.

El análisis de esfuerzos para tanques de amoníaco se realiza principalmente a partir de fuerzas longitudinales y circunferenciales, y esto se puede abordar con mayor rapidez y precisión utilizando el software Intergraph tank. Cada componente presenta distintos requisitos geométricos y esfuerzo aceptable. Para un análisis más extenso, se deben considerar situaciones de sismos, viento, nieve, entre otras.

Respecto al transporte de amoníaco líquido mediante sistemas de tuberías, la condición más severa es la que demanda el mayor espesor y clasificación para la tubería. El diseño del sistema debe tener en cuenta esfuerzos por cargas sostenidas y ocasionales.

Existen distintas restricciones relacionadas con el uso de componentes por temas de seguridad, con el objetivo de prevenir fugas. La seguridad debe ser una prioridad absoluta en el transporte de amoníaco líquido para evitar incidentes que puedan poner en peligro la salud pública y el medio ambiente. Las limitaciones incluyen el material de tuberías (no usar ASTM A134 ni ASTM A139); se prohíbe el uso de distintos accesorios como codos corrugados, bridas roscadas cónicas, bridas de junta expandida, válvulas de bonetes roscados, entre otros. También existen prohibiciones sobre el uso de ciertas juntas metálicas, como las juntas calafateadas, juntas expandidas, juntas roscadas, entre otras.

Un sistema de tuberías se debe diseñar con el requisito de que tenga la flexibilidad

suficiente para evitar fallas, lo que permitirá mantener la integridad y seguridad del sistema ante situaciones como las tensiones inducidas por los cambios de temperatura en las tuberías o sobrecarga.

Los soportes son elementos que permiten mantener las tuberías en su lugar, resistir cargas y permitir movimientos controlados, evitando daños, desalineamientos y esfuerzos excesivos. Dependiendo del tipo de soporte, se deben establecer requisitos particulares por su modo de operar.

El material de construcción seleccionado para la tubería y la mayoría de sus componentes es igualmente el acero al carbono, aunque para válvulas se propuso hierro dúctil ASTM A395. Se puede considerar el uso de acero inoxidable en casos de reemplazo de partes ya existentes, con el objetivo de lograr un menor costo de mantenimiento. Se necesita el uso de revestimiento para la protección contra corrosión externa tanto en tuberías sobre la superficie (pintura epoxi y cinta Denso) o enterradas (materiales bituminosos, polietileno o poliuretano). Se hace uso de de aislamiento cuando se transporta amoníaco refrigerado (a temperatura menores a 0 [°C]), para conservar la temperatura del fluido y proteger de quemaduras a los trabajadores. Se prohíbe el uso de materiales que contengan cobre, pues este reacciona con el amoníaco.

En la identificación de fallas que se deben evitar en sistemas de tuberías de amoníaco líquido, para así tener un sistema seguro y de alta confiabilidad, se encuentran la sobrepresión, corrosión externa (debajo de las abrazaderas y en juntas soldadas son más vulnerables), daño físico, mantenimiento inadecuado, agrietamiento por fatiga, falla en la costura de soldadura, corrosión interna, choque hidráulico y vibraciones excesivas. Los sistemas de refrigeración con amoníaco incluyen fallas adicionales.

El estudio de esfuerzos requiere considerar esfuerzos por desplazamiento (debido a flexión y torsión) y por cargas sostenidas (principalmente efectos de la presión y el peso). Para analizar con mayor detalle el comportamiento de tuberías, se recomienda el uso de programas como CAESAR II y Autopipe.

Bibliografía

- [1] ASTDR, “Resumen de Salud Pública - Amoníaco (Ammonia),” Mayo 2016. Disponible en línea: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs126.html.
- [2] ABS, CE-DELFT y ARCSILEA, “Potential of Ammonia as fuel in shipping,” Septiembre 2022.
- [3] Fürstenberg Maritime Advisory, Global Maritime Forum, Nordic Innovation, “No-GAPS: Nordic Green Ammonia Powered Ships,” 2021.
- [4] International Energy Agency, “The role of Low-Carbon fuels in the clean energy transitions of the power sector,” 2021.
- [5] GIZ, “Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización,” Octubre 2022.
- [6] Hydrogen Council, “A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness,” 2021.
- [7] International Energy Agency, “Ammonia Technology Roadmap, towards more sustainable nitrogen fertiliser production,” Octubre 2021.
- [8] Enaex, “MEMORIA ANUAL INTEGRADA 2022 ENAEX S.A.,” 2022. Disponible en línea: https://www.cmfchile.cl/sitio/aplic/serdoc/ver_sgd.php?s567=3b4579a32dcf4141936d4da9327947d3VFdwQmVVMTZRVEJOUkVVd1RVUIJNazVuUFQwPQ==&secuencia=-1&t=1690242551.
- [9] The Royal Society, “Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store,” 2020.
- [10] F. Williams, “Overview of the conventional Haber-Bosch process (under Creative Common Licence CC BY-SA 4.0),” 2010.
- [11] S.Ghavam, M. Vahdati, I. Wilson y P. Styring, “Sustainable Ammonia Production Processes,” 2021.
- [12] Alfa Laval, Hafnia, Haldor Topsoe, Vestas, Siemens Gamesa, “Ammonfuel: An industrial view of ammonia as a marine fuel,” 2020.
- [13] D. R. MAcFarlane, P. V. Cherepanov, J. Choi, B. H. Suryanto, R. Y. Hodgetts, J. M. Bakker, F. M. Ferrero Vallana y A. N. Simonov, “A Roadmap to the Ammonia Economy,” 2020.
- [14] H. Shen, C. Choi, J. Masa, X. Li, J. Qiu, Y. Jung y Z. Sun, “Electrochemical ammonia synthesis: Mechanistic understanding and catalyst design,” 2021.
- [15] IRENA y AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, “INNOVATION OUTLOOK

RENEWABLE AMMONIA,” 2022.

- [16] A. Ahmed, R. Nikdalila, C. Quentin, S. Shahriar, K. Jung H. y A. Abul K., “Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review,” 2016.
- [17] Redacción Opportimes, “Los precios del maíz y fertilizantes, ¿por qué siguen altos?,” noviembre 2022. Disponible en línea: <https://www.opportimes.com/los-precios-del-maiz-y-fertilizantes-por-que-siguen-altos/>.
- [18] IHS Markit, “Industrial uses of Ammonia and its Derivatives,” julio 2018. Disponible en línea: <https://ihsmarkit.com/research-analysis/industrial-ammonia-derivatives.html>.
- [19] C. Prof. Egenhofer, L. Dr. Schrefler, V. Rizos, F. Infelise, G. Dr. Luchetta, F. Dr. Simonelli, W. Stoefs, J. Timini y L. Colantoni, “Composition and Drivers of Energy Prices and Costs in Energy Intensive Industries: The Case of Ceramics, Flat Glass and Chemical Industries,” 2014.
- [20] Indura, “Catálogo de Industriales, Amoníaco”. Disponible en línea: <http://www.indura.cl/Mobile/CL/6025241/amoniac/5>.
- [21] Ministerio de Energía, “NATIONAL GREEN HYDROGEN STRATEGY,” Noviembre 2020.
- [22] Enaex, “HyEx - Enaex Chile,” 2022. Disponible en línea: <https://www.enaex.com/cl/es/hyex/>.
- [23] Gobierno de Chile, “Chile’s Green Hydrogen Strategy and investment opportunities,” Junio 2021.
- [24] AustriaEnergy, “Hidrógeno Verde,” 2021. Disponible en línea en: <https://www.austriaenergy.com/es/hidrogeno-verde/>.
- [25] H₂Chile, “H₂ Magallanes: Nuevo proyecto de hidrógeno verde en Chile,” Diciembre 2021. Disponible en línea en: <https://h2chile.cl/h2-magallanes-nuevo-proyecto-de-hidrogeno-verde-en-chile/>.
- [26] Ministerio de Energía, “El más grande de Chile: Ministro Jobet anuncia nuevo proyecto de hidrógeno verde en Magallanes,” Diciembre 2021. Disponible en línea: <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/el-mas-grande-de-chile-ministro-jobet-anuncia-nuevo-proyecto-de-hidrogeno-verde-en-magallanes>.
- [27] Port of Rotterdam, “Feasibility study development 200-500 MW of green hydrogen in Chile,” Mayo 2022. Disponible en línea: <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/feasibility-study-development-200-500-mw-of-green-hydrogen-in-chile/>.
- [28] Statkraft, “Hidrógeno verde: ¿Qué es y cuál es su rol en la transición energética?,” Disponible en línea: <https://www.statkraft.cl/nuestros-proyectos/proyectos-solares/hidrogeno-verde-que-es-y-cual-es-su-rol-en-la-transicion-energetica/>.
- [29] B. Shiozawa, “A Deep Dive into SIP “Energy Carriers” Ammonia Combustion Research (second half),” Octubre 2020. Disponible en línea: <https://www.ammoniae.org/articles/a-deep-dive-into-sip-energy-carriers-ammonia-combustion-research>

h-second-half/.

- [30] T. Brown, “GenCell launches commercial alkaline fuel cell using cracked ammonia fuel,” 2018. Disponible en línea: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/gencell-launches-commercial-alkaline-fuel-cell-using-cracked-ammonia-fuel/>.
- [31] Siemens, Engie, Ecuity y STFC, “Ammonia to Green Hydrogen Project,” 2020.
- [32] M. Aziz, A. Wijayanta y A. Nandiyanto “Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization,” 2020.
- [33] IRENA, “A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050,” 2021.
- [34] DNV GL, “Ammonia as a Marine Fuel,” 2020.
- [35] T. P. Hignett, “Transportation and Storage of Ammonia,” 1985.
- [36] Mackinaw Associates, “Super-Safe Large Anhydrous Ammonia Tanks: New Designs for Ammonia Storage Safety Prevention Design for Populated Environments,” 2008.
- [37] R. Pattabathula, “Ammonia Storage Tanks,” Disponible en línea: <https://ammoniaknowhow.com/ammonia-storage-tanks/>.
- [38] A. O. Gezerman, “Industrial Scale Ammonia Pipeline Transfer System and Exergy Analysis,” 2020.
- [39] Minnesota Department of Agriculture, “Anhydrous Ammonia System Piping Requirements”.
- [40] Fertilizers Europe, “Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines,” 2013.
- [41] Minnesota Department of Agriculture, “Federal Hazardous Materials Transportation Regulations,” Disponible en línea: <https://www.mda.state.mn.us/federal-hazardous-materials-transportation-regulations>.
- [42] M. Goff y B. Veath, “Distribution of Ammonia as an Energy Carrier,” Noviembre 2020.
- [43] Wärtsilä, “Cargo tank of gas carrier,” Disponible en línea: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/cargo-tank-of-gas-carrier>.
- [44] DNV GL, “LNG containment systems: Finding the way for Type A,” Disponible en línea: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/LNG-containment-systems-finding-the-way-for-Type-A.html>.
- [45] Marine Insight, “Understanding The Design of Liquefied Gas Carriers,” Enero 2021. Disponible en línea: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>.
- [46] Ingeniero Marino, “Tipos de tanques en buques gaseros,” Disponible en línea: <https://ingenieromarino.com/tipos-de-tanques-en-buques-gaseros-sistemas-de-contencion/>.
- [47] Korean Register, “Guidelines for Selection of Metallic Materials of Containment System for Alternative Fuels for Ships,” 2022.

- [48] Liquefied Gas Carrier, “Cargo Containment Systems in Liquefied Gas Carriers,” Disponible en línea: <http://www.liquefiedgascarrier.com/cargo-containment-systems.html>.
- [49] J. Egerer, V. Grimm, K. Niazmand y P. Runge, “The economics of global green ammonia trade – “Shipping Australian wind and sunshine to Germany”,” Marzo 2023. Disponible en línea: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923000260#b0070>.
- [50] Ministerio de Salud, “Resolución 408 EXENTA APRUEBA LISTADO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS PARA LA SALUD,” Mayo 2016. Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090269>.
- [51] Instituto Nacional de Normalización, “NCH382, Sustancias peligrosas - Terminología y clasificación general,” 1998.
- [52] Instituto Nacional de Normalización, “Transporte de sustancias peligrosas - Distintivos para identificación de riesgos,” 2003.
- [53] Instituto Nacional de Normalización, “Prevención de riesgos - Parte 4: Identificación de riesgos de materiales,” 1978.
- [54] Minera San Gerónimo, “CURSO SOBRE MANEJO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS EN FAENA LAMBERT,” Agosto 2011. Disponible en línea: <https://sangeronimo.net/2011/08/25/curso-sobre-manejo-de-sustancias-peligrosas-en-faena-lambert/>.
- [55] Indura, “Amoniaco HDS,” 2016.
- [56] Ministerio de Salud, “DECRETO 43 APRUEBA EL REGLAMENTO DE ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS,” Marzo 2016. Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1088802>
- [57] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, «Decreto 298: REGLAMENTA TRANSPORTE DE CARGAS PELIGROSAS POR CALLES Y CAMINOS,» Julio 2022 . Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=12087>.
- [58] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Subsecretaria de Transportes y Empresa portuaria de Chile, “Resolución 96 ACTUALIZA Y MODIFICA REGLAMENTO DE MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO DE CARGAS PELIGROSAS EN RECINTOS PORTUARIOS,” Enero 1997. Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=60403>.
- [59] American Petroleum Institute, “Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks,” 12th Ed, Octubre 2013.
- [60] Fertilizers Europe, “GUIDANCE FOR INSPECTION OF ATMOSPHERIC, REFRIGERATED AMMONIA STORAGE TANKS,” 2008.
- [61] American Petroleum Institute, “Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage,” 1st Ed, Agosto 2010.
- [62] Hazard Identification, Assessment and Control, “Lees’ Loss Prevention in the Process Industries,” 3rd Ed, 2005.
- [63] Superintendencia del Medio Ambiente, “Informe de fiscalización ambiental DFZ-

2018-2426-II-RCA,” Junio 2019.

- [64] GNFC, “Technical Specifications for 10,000 MT Capacity Ammonia Storage Tank”.
- [65] Johns Maville, “FESCO Board”. Disponible en línea: <https://www.jm.com/en/commercial-roofing/roofing-insulation-and-cover--boards/fesco-board/>.
- [66] CGA, “Ficha Técnica Aceros Grado Estructural A516”.
- [67] Octal, “ASTM A333 Grado 6, 8 Tuberia,” Disponible en línea: <https://www.octalacero.com/astm-a333-tuberia>.
- [68] Hebei Metals Industrial Limited, “ASTM A420 Carbon & Alloy Steel Pipe Fittings for Low-Temperature Service,” Disponible en línea: <http://www.metalspiping.com/astm-a420.html>.
- [69] K pfer, “CONSTRUCCIÓN MECÁNICA, BARRAS ASTM A36,” Disponible en línea: https://drive.google.com/file/d/1S1QxhuNORr-FqXXrIYltm3_1EdxGYR_p/view?usp=sharing.
- [70] Eagle Steel, “Carbon Steel Grades - A36 Steel”.
- [71] Hebei Metals Industrial Limited, “ASTM A350 Carbon and Low-Alloy Steel Forgings,” Disponible en línea: <http://www.metalspiping.com/astm-a350.html>.
- [72] Europer, “Ficha Técnica Pernos ASTM A320 L7”.
- [73] Worldsteel Association, “Carbon-Manganese (CMn)”. Disponible en línea: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/carbon-manganese-cmn/>.
- [74] A. Roy, P. Srivastava y S. Sinha, “Dynamic failure assessment of an ammonia storage unit: A case study,” Marzo 2015.
- [75] F. Al-Abdulally, S.Al-Shuwaib y B. Gupta, “Hazard Analysis and Safety Considerations in Refrigerated Ammonia Storage,” Abril 1987.
- [76] L. Martinez, “APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620”, 2018.
- [77] American Petroleum Institute, “Welded Tanks for Oil Storage,” 12th Ed, Marzo 2013.
- [78] TJC IRON&STEEL CO., “ASTM A516/ A516M Grade 485 Pressure Vessel Steel Plate,” Disponible en línea: https://www.tjsteel.com/e_productshow/?312-ASTM-A516-A516M-Grade-485-Pressure-Vessel-Steel-Plate-312.html.
- [79] TJC IRON&STEEL CO., “A516M Grade 70 Pressure Vessel Steel Plate,” Disponible en línea: https://www.tjsteel.com/e_productshow/?308-ASTM-A516-A516M-Grade-70-Pressure-Vessel-Steel-Plate-308.html.
- [80] The American Society of Mechanical Engineers, “ASME B31.3 - Tuberías de proceso”, 2010.
- [81] Covert Engineers. Inc., “Ammonia Piping Failure Analysis”. Disponible en línea: <https://covertengineers.com/ammonia-piping-failure-analysis/>.
- [82] C. Becht IV, “ASME B31.3 Process Piping Course”.

- [83] Responsible AG, “Anhydrous Ammonia,” Febrero 2016.
- [84] Illinois Administrative Code, “Ill. Admin. Code tit. 8 § 215.45, ” Mayo 2023. Disponible en línea: <https://casetext.com/regulation/illinois-administrative-code/title-8-agriculture-and-animals/part-215-anhydrous-ammonia-low-pressure-nitrogen-solutions-equipment-containers-and-storage-facilities/subpart-a-anhydrous-ammonia-equipment-containers-and-storage-facilities/section-21545-piping-tubing-and-fittings>.
- [85] Neer Enterprises, “About Ammonia Valves and Fittings,” Disponible en línea: <https://www.neerenterprise.biz/blog/about-ammonia-valves-and-fittings>.
- [86] Tubes & Valves, “Ammonia FLANGE GASKET,” Disponible en línea: <https://tubesandvalves.com/ammonia-valves/ammonia-flange-gasket>.
- [87] O’Brien Corporation, “SELECTION GUIDE Sample Transport Tubing,” Mayo 2017. Disponible en línea: <https://www.obcorp.com/-/media/ametekobrien/documents/literature/specs/qlt-selguidesamprtrans.pdf?la=en&revision=dded444e-1001-48a9-a4ac-719e7c71112a>.
- [88] P. Reema, “Everything You Need to Know About Ice Burn,” Junio 2021. Disponible en línea: https://www.healthline.com/health/ice-burn#_noHeaderPrefixedContent.
- [89] R. Simha, “Insulation for Ammonia Refrigeration,” Julio 2020.
- [90] I .Qays, “Investigation of mechanical properties of low carbon steel weldments for different welding processes,” Julio 2022.
- [91] Ministerio de Salud, “APRUEBA REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS Y AMBIENTALES BASICAS EN LOS LUGARES DE TRABAJO,” Abril 2000. Disponible en línea: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>.
- [92] Industrial Fire World, “Hydraulic Shock Risk Threatens Ammonia Refrigeration Units,” Abril 2015. Disponible en línea: <https://www.industrialfireworld.com/531638/industry-news-1>.
- [93] BERG, “Common Hazards of Industrial Ammonia Refrigeration, ” Disponible en línea: <https://berg-group.com/blog/common-hazards-of-industrial-ammonia-refrigeration/>.
- [94] Armacell, “Corrosion Under Insulation, ” 2019.
- [95] University of Technology - IRAQ, “FUNDAMENTALS OF WELDING”.
- [96] INDURA, “Manual de sistemas y materiales de soldadura”.
- [97] Lincoln Electric, “Fusión de soldadura frente a penetración de soldadura,” Disponible en línea: <https://www.lincolnelectric.com/es-MX/Welding-and-Cutting-Resource-Center/Process-and-Theory/Weld-Fusion-vs-Weld-Penetration>.
- [98] ESDEP Course, “Lecture 11.2.2: Welded Connections - Basis for Weld Calculation,” Disponible en línea: <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg11/10220.htm>.
- [99] Pearson Highered, “Advanced Welding Symbols”.

- [100] Bihler, “SOLDADURA POR RESISTENCIA COMO COMPETENCIA FUNDAMENTAL,” Disponible en línea: <https://www.bihler.de/es/produkte/schweisstechnik/schweissverfahren.html>.
- [101] American Society for Testing and Materials, “Standard Specification for Perlite Loose Fill Insulation,” 1995.

Anexos

Anexo A. Tabla R-1 API 620: Normas para materiales a temperatura de producto.

Table R-1—Standards for Product Temperature Materials (see Note 2)

Component	Materials	Notes
Plate	Refer to R.2.2.2	1
Pipe	ASTM A333 (seamless only) ASTM A671 Class 22 in Grades CC60, CC65, CC70, CD70, and CD80, with Supplementary Requirement S2	3 3 and 9
Pipe fittings	ASTM A420	3
Structural members	Plate or pipe as listed above	4
	Structural shapes	5
	ASTM A36	6
	ASTM A992	
	ASTM A131 Grades D and E	
	ASTM A633 Grade A	
	CSA G40.21 Grades 38WT, 44WT, and 50WT	
	ISO 630 S275 and S355 in Quality D	7, 8
EN 10025-2 S275 in Quality J2	7, 8	
EN 10025-2 S355 in Quality J2 and K2	7, 8	
Forgings	ASTM A350	3
Bolts	ASTM A320 Grade L7	3
	A-193 Class 1: Grades B8 and B8M	
	A-193 Class 2: Grades B8 and B8M	
	A-276 Type 304, 304L, 316, and 316L (Condition A, B, or S)	
	A-479 Type 304, 304L, 316, and 316L (Condition A, S1, or S2)	
NOTE 1 See R.2.2.4.		
NOTE 2 Type 304, 304L, 316, or 316L stainless steel material, as permitted in Table Q-1 may be used at the maximum allowable stress values permitted by Table Q-3. Impact tests of this material are not required. Welding procedures shall be qualified in accordance with the more restrictive requirements of R.4.2 and Q.4.4 as applicable to the base materials and welding material. The limitations on cold finishing of ASTM A276 and A479 in Table Q-1 need not be applied.		
NOTE 3 See R.2.2.3.		
NOTE 4 Plate or pipe materials to be made into a structural member shall conform to the impact testing requirements of R.2.2.5.		
NOTE 5 Structural shapes shall be normalized, if necessary, to meet the required minimum Charpy V-notch impact values of R.2.2.5.		
NOTE 6 The steel shall be made with fine grain practice, and manganese content shall be in the range of 0.80 % to 1.20 % by ladle analysis.		
NOTE 7 Minimum Mn to be 0.80 %.		
NOTE 8 These grades require supplementary impact testing at the design metal temperature notwithstanding any impact testing at any other warmer temperature that may be mandated in the national specification.		
NOTE 9 ASTM A671 pipe impact testing temperature and acceptance criteria shall conform to R.2.2.3.3(b).		

Figura A.1: Normas para materiales a temperatura de producto [59].

Anexo B. Tabla 4-1 API 620: Requisitos mínimos de las especificaciones de placa que deben utilizarse para las temperaturas de diseño del metal.

Table 4-1—Minimum Requirements for Plate Specifications to be Used for Design Metal Temperatures

Design Metal Temperature (See 4.2.1)	Plate Thickness Including Corrosion Allowance (in.)	Permissible Specifications		
		Specification	Grade/Class	Special Requirements (in Addition to 4.2.3)
65°F and warmer	$\leq 3/4$	Any listed in 4.2.3	—	None
	≤ 1	ASTM A36	—	None
	> 1	G40.21	38W, 44W, 50W	Note 1
25°F and warmer	$\leq 1/2$	Any listed in 4.2.3	—	None
	≤ 1	ASTM A36	—	Note 5
		ASTM A131	B	None
		CSA G40.21	38W, 44W, 50W	None
-5°F and warmer	$\leq 1/2$	ASTM A131	B	None
		CSA G40.21	38W, 44W, 50W	None
	$> 1/2$	ASTM A516	55, 60, 65, 70	Note 1
		ASTM A537	Class 1	None
		ASTM A537	Class 2	Note 6
		ASTM A573	58, 65, 70	Note 1
		ASTM A662	B and C	Note 1
		CSA G40.21	38W, 44W, 50W	Note 2
		ISO 630	S275, S355 Quality D	Notes 1 and 2
		EN 10025	S275, S355 Quality J2	Notes 1 and 2
-35°F and warmer	$\leq 1/2$	ASTM A516	55, 60, 65, 70	None
		ASTM A573	58, 65, 70	None
		ASTM A662	B and C	None
		CSA G40.21	38W, 44W, 50W	Note 2
		ISO 630	S275, S355 Quality D	Note 2
		EN 10025	S275, S355 Quality J2, K2	Note 2
	≤ 1	ASTM A516	55, 60, 65, 70	Note 3
		ASTM A537	Class 1	None
		ASTM A537	Class 2	Note 6
		ASTM A573	58	Note 3
		ASTM A633	C and D	None
		ASTM A662	B and C	Note 3
		ASTM A737	B	None
		ASTM A841	Classes 1, 2 (Grades A and B)	Notes 4 and 6
		CSA G40.21	38W, 44W, 50W	Notes 2 and 3
		ISO 630	S275, S355 Quality D	Notes 2 and 3
		EN 10025	S275, S355 Quality J2, K2	Notes 2 and 3

Figura B.1: Requisitos mínimos de las especificaciones de placa que deben utilizarse para las temperaturas de diseño del metal [59].

Table 4-1—Minimum Requirements for Plate Specifications to be Used for Design Metal Temperatures (Continued)

Design Metal Temperature (See 4.2.1)	Plate Thickness Including Corrosion Allowance (in.)	Permissible Specifications		
		Specification	Grade/Class	Special Requirements (in Addition to 4.2.3)
	<p align="center">> 1</p>	ASTM A516	55, 60, 65, 70	Notes 3 and 4
		ASTM A537	Class 1	Note 4
		ASTM A537	Class 2	Notes 4 and 6
		ASTM A573	58	Notes 3 and 4
		ASTM A633	C and D	Note 4
		ASTM A662	B and C	Notes 3 and 4
		ASTM A737	B	Note 4
		ASTM A841	Classes 1, 2 (Grades A and B)	Notes 4 and 6
		CSA G40.21	38W, 44W, 50W	Notes 2, 3, and 4
		ISO 630	S275, S355 Quality D	Notes 2, 3, and 4
		EN 10025	S275, S355 Quality J2, K2	Notes 2, 3, and 4
NOTE 1 All plates over 1 ¹ / ₂ in. thick shall be normalized.				
NOTE 2 The steel shall be killed and made with fine-grain practice.				
NOTE 3 The plates shall be normalized or quench tempered (see 4.2.4.2).				
NOTE 4 Each plate shall be impact tested in accordance with 4.2.5.				
NOTE 5 The manganese content shall be within the range of 0.80 % to 1.20 %.				
NOTE 6 See Section 4.2.6.				

Figura B.2: Requisitos mínimos de las especificaciones de placa que deben utilizarse para las temperaturas de diseño del metal (continuación) [59].

Anexo C. Tabla 5-1 API 620: Valores de tensión máxima admisible para tracción simple.

Table 5-1—Maximum Allowable Stress Values for Simple Tension

Specification (See Note 1)	Grade/Class	Notes	Specified Minimum		Maximum Allowable Tensile Stress for Tension, S_{TS} (lb/in. ² , See Notes 2 and 3)
			Tensile Strength (lb/in. ²)	Yield Point (lb/in. ²)	
Plates					
ASTM A36	—	4	58,000	36,000	16,000
ASTM A131	A	4, 5, and 6	58,000	34,000	15,200
ASTM A131	B	4	58,000	34,000	16,000
ASTM A131	CS	4	58,000	34,000	16,000
ASTM A283	C	4 and 5	55,000	30,000	15,200
ASTM A283	D	4, 5, and 6	60,000	33,000	15,200
ASTM A285	C	5	55,000	30,000	16,500
ASTM A516	55	—	55,000	30,000	16,500
ASTM A516	60	—	60,000	32,000	18,000
ASTM A516	65	—	65,000	35,000	19,500
ASTM A516	70	—	70,000	38,000	21,000
ASTM A537	Class 1	7	70,000	50,000	21,000
ASTM A537	Class 2	7	80,000	60,000	24,000
ASTM A573	58	4	58,000	32,000	16,000
ASTM A573	65	4	65,000	35,000	18,000
ASTM A573	70	4	70,000	42,000	19,300
ASTM A633	C and D	4 and 7	70,000	50,000	19,300
ASTM A662	B	—	65,000	40,000	19,500
ASTM A662	C	7	70,000	43,000	21,000
ASTM A737	B	7	70,000	50,000	21,000
ASTM A841	Class 1 (Grades A and B).	7	70,000	50,000	21,000
ASTM A841	Class 2 (Grades A and B).	7	80,000	80,000	24,000
CSA G40.21	38W and 38WT	4	60,000	38,000	16,500
CSA G40.21	44W and 44WT	4	64,000	44,000	17,700
CSA G40.21	50W and 50WT	4	65,000	50,000	18,000
ISO 630	S275 Quality C, D	4	59,500	37,000	16,400
ISO 630	S355 Quality C, D	4	68,100	48,500	18,800
EN 10025	S275 Quality J0, J2	4	59,500	37,000	16,400
EN 10025	S355 Quality J0, J2, K2	4	68,100	48,500	18,800
Pipe					
Seamless					
API Spec 5L	B	—	60,000	35,000	18,000
ASTM A33	B	—	60,000	35,000	18,000

Figura C.1: Valores de tensión máxima admisible para tracción simple [59].

Table 5-1—Maximum Allowable Stress Values for Simple Tension (Continued)

Specification (See Note 1)	Grade/Class	Notes	Specified Minimum		Maximum Allowable Tensile Stress for Tension, S_T (lbf/in. ² , See Notes 2 and 3)
			Tensile Strength (lbf/in. ²)	Yield Point (lbf/in. ²)	
ASTM A106	B	—	60,000	35,000	18,000
ASTM A106	C	—	70,000	40,000	21,000
ASTM A333	1	—	55,000	30,000	16,500
ASTM A333	3	—	65,000	35,000	19,500
ASTM A333	6	—	60,000	35,000	18,000
ASTM A524	I	—	60,000	35,000	18,000
ASTM A524	I1	—	55,000	30,000	16,500
Electric-fusion Welded					
ASTM A134	A283 Grade C	4, 5, and 9	55,000	30,000	12,100
ASTM A134	A285 Grade C	5 and 9	55,000	30,000	13,200
ASTM A139	B	9	60,000	35,000	14,400
ASTM A671	CA55	9	55,000	30,000	13,200
ASTM A671	CC60	9	60,000	32,000	14,400
ASTM A671	CC65	9	65,000	35,000	15,600
ASTM A671	CC70	9	70,000	38,000	16,800
ASTM A671	CD70	7 and 9	70,000	50,000	16,800
ASTM A671	CD80	7 and 9	80,000	60,000	19,200
ASTM A671	CE55	9	55,000	30,000	13,200
ASTM A671	CE60	9	60,000	32,000	14,400
Forgings					
ASTM A105	—	—	60,000	30,000	18,000
ASTM A181	I	—	60,000	30,000	18,000
ASTM A181	II	—	70,000	36,000	21,000
ASTM A350	LF1	—	60,000	30,000	18,000
ASTM A350	LF2	—	70,000	36,000	21,000
ASTM A350	LF3	—	70,000	40,000	21,000
Castings and Bolting					
ASTM A27	60-30	10	60,000	30,000	14,400
ASTM A193	B7	11	125,000	105,000	24,000
ASTM A307	B for flanges and pressure parts	11 and 12	55,000	—	8,400
ASTM A307	B for structural parts.	11	55,000	—	15,000
ASTM A320	bolting L7	11	125,000	105,000	24,000

Figura C.2: Valores de tensión máxima admisible para tracción simple (continuación) [59].

Table 5-1—Maximum Allowable Stress Values for Simple Tension (Continued)

Specification (See Note 1)	Grade/Class	Notes	Specified Minimum		Maximum Allowable Tensile Stress for Tension, S_{TS} (lbf/in. ² , See Notes 2 and 3)
			Tensile Strength (lbf/in. ²)	Yield Point (lbf/in. ²)	
Structural Shapes Resisting Internal Pressure					
ASTM A36	—	4 and 6	58,000	36,000	15,200
ASTM A131	A	4 and 6	58,000	34,000	15,200
ASTM A633	A	4	63,000	42,000	17,400
ASTM A992	—	4 and 6	65,000	50,000	15,200
CSA G40.21	38W and 38WT	4 and 6	60,000	38,000	15,200
CSA G40.21	44W and 44WT	4 and 6	64,000	44,000	15,200
CSA G40.21	50W and 50WT	4 and 6	65,000	50,000	15,200
ISO 630	E275 Quality B, C, D	4 and 6	59,500	37,000	15,200
ISO 630	S355 Quality B, C, D	4 and 6	68,100	48,500	15,200
EN 10025	S275 Quality JR, J0, J2	4 and 6	59,500	37,000	15,200
EN 10025	S355 Quality JR, J0, J2, K2	4 and 6	68,100	48,500	15,200
NOTE 1 All pertinent modifications and limitations of specifications required by 4.2 through 4.6 shall be complied with.					
NOTE 2 Except for those cases where additional factors or limitations are applied as indicated by references to Notes 4, 6, 10, and 12, the allowable tensile stress values given in this table for materials other than bolting steel are the lesser of (a) 30% of the specified minimum ultimate tensile strength for the material or (b) 60 % of the specified minimum yield point.					
NOTE 3 Except when a joint efficiency factor is already reflected in the specified allowable stress value, as indicated by the references to Note 10, or where the value of N determined in accordance with 5.5.3.3. is less than the applicable joint efficiency given in Table 5-2 (and, therefore, effects a greater reduction in allowable stress than would the pertinent joint efficiency factor, if applied), the specified stress values for welds in tension shall be multiplied by the applicable joint efficiency factor, E , given in Table 5-2.					
NOTE 4 Stress values for structural quality steels include a quality factor of 0.92.					
NOTE 5 Plates and pipe shall not be used in thickness greater than $3/4$ in.					
NOTE 6 Stress values are limited to those for steel that has an ultimate tensile strength of only 55,000 lbf/in. ² .					
NOTE 7 Less than or equal to $2^{1/2}$ in. thickness.					
NOTE 8 Less than or equal to $1^{1/2}$ in. thickness.					
NOTE 9 Stress values for fusion-welded pipe include a welded-joint efficiency factor of 0.80 (see 5.23.3). Only straight-seam pipe shall be used; the use of spiral-seam pipe is prohibited.					
NOTE 10 Stress values for castings include a quality factor of 0.80.					
NOTE 11 See 5.6.					
NOTE 12 Allowable stress based on Section VIII of the ASME <i>Boiler and Pressure Vessel Code</i> multiplied by the ratio of the design stress factors in this standard and Section VIII of the ASME <i>Code</i> , namely 0.30/0.25.					

Figura C.3: Valores de tensión máxima admisible para tracción simple (continuación) [59].

Anexo D. Tabla A.1 API625: Propiedades físicas de gases.

Table A.1—Physical Properties of Gases (SI)

Gas	Chemical Formula	Molecular Weight	Boiling Point at 1 atm (°C)	Specific Heat (CP) (Mass) at conditions defined above (kJ/kg °C)	Critical Temp (°C)	Critical Pressure (kPa abs)	Vapor Density at Conditions defined above (kg/m ³)	Vapor Density at (1 atm) Boiling Point (kg/m ³)	Liquid Density at (1 atm) Boiling Point (kg/m ³)	Gas/Liquid Ratio (15.6 °C 1 atm/ boiling point)	Heat of Vaporization at (1 atm) Boiling Point (kJ/kg)	Flammability Limits (LFL/UFL)
Air		28.95		0.99			1.22					
Argon	Ar	39.95	-185.83	0.52	-122.5	4895.2	1.69	5.75	1389.79	823	162.12	—
Nitrogen	N ₂	28.01	-195.72	1.04	-147.0	3399.8	1.18	4.60	804.62	680	199.45	—
Oxygen	O ₂	32.00	-183.00	0.91	-118.6	5042.8	1.35	4.46	1145.5	847	213.88	—
Methane	CH ₄	16.04	-161.61	2.23	-82.6	4594.6	0.68	1.81	423.54	624	509.16	5.0/15.0
Ethylene	C ₂ H ₄	28.05	-103.67	1.55	9.2	5040.0	1.19	2.08	566.58	475	486.37	2.7/36.0
Ethane	C ₂ H ₆	30.07	-88.61	1.73	32.2	4871.1	1.28	2.05	545.44	426	490.09	3.0/12.5
Propylene	C ₃ H ₆	42.08	-47.24	1.49	91.8	4609.8	1.81	2.34	608.55	337	443.34	2.0/11.1
Propane	C ₃ H ₈	44.10	-42.03	1.49	96.7	4247.1	1.81	2.40	581.32	322	428.45	2.0/9.5
Anhydrous Ammonia	NH ₃	17.03	-33.41	2.10	132.3	11,348.7	0.73	0.88	673.59	928	1376.76	15.0/28.0
Iso-butane	C ₄ H ₁₀	58.12	-11.54	1.66	134.7	3639.7	2.53	2.81	593.65	235	367.97	1.8/8.4
1-Butene	C ₄ H ₈	56.11	-6.32	1.50	146.4	4023.1	2.44	2.65	622.97	256	398.68	1.6/10.0
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54.09	-4.4	1.49	151.7	4326.4	2.35	2.54	650.2	277	417.75	2.0/12.0
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.12	-0.27	1.66	152.0	3796.2	2.53	2.69	601.50	238	390.54	1.9/8.5

Figura D.1: Propiedades físicas de gases [61].

Anexo E. Conceptos de soldadura utilizados.

- Soldadura a tope: En este tipo de unión, las piezas se encuentran en el mismo plano y se unen por sus bordes [95].

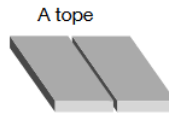


Figura E.1: Unión a tope [96].

- Doble soldadura a tope: Cuando la soldadura a tope se ha realizado por ambos lados de la junta.
- Fusión de la soldadura: La fusión del metal de aportación y el metal base (sustrato), o solo del metal base, lo que da como resultado la coalescencia [97].
- Penetración de soldadura: La distancia que se extiende la fusión hacia el metal base o el paso anterior desde la superficie fundida durante la soldadura [97].

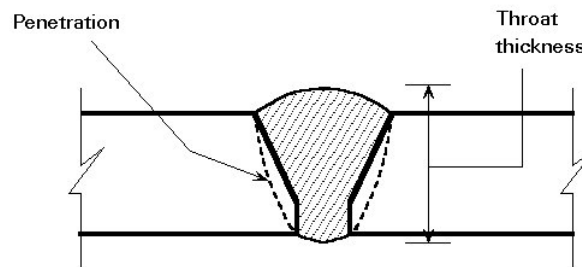


Figura E.2: Soldadura a tope con penetración completa [98].

- Soldadura de filete: se utiliza para rellenar los bordes de las chapas creados por uniones en esquina, solapadas y en T [95].

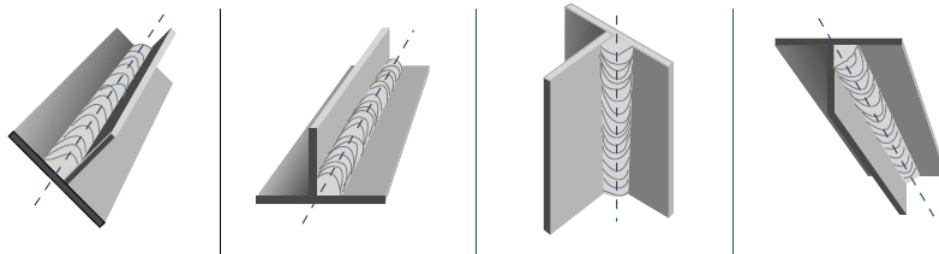


Figura E.3: Uniones de filete [96].

- Soldadura intermitente: Aquella con espacios sin soldar a lo largo de la longitud [95].



Figura E.4: Soldadura intermitente [99].

- Soldadura solapada: Unión soldada que consta de dos partes superpuestas. Las piezas se presionan una contra otra tras calentar suficientemente la zona de unión [100].



Figura E.5: Soldadura solapada [100].

Anexo F. Resistencia térmica ASTM C549.

Density, lb/ft ³ (kg/m ³)	All Types		
	Thermal Resistance for 1-in. (0.0254-m) Thickness, h-ft ² ·°F/Btu (m ² ·K/W) ^A		
	Mean Temperature, ° F (°C)		
	40 (4)	75 (24)	105 (41)
2.0–4.1 (32.0–65.6)	4.3–3.9 (0.78–0.69)	3.7–3.3 (0.65–0.58)	3.7–3.2 (0.65–0.56)
4.1–7.4 (65.6–118.4)	3.9–3.3 (0.69–0.58)	3.3–2.8 (0.58–0.49)	3.2–2.7 (0.56–0.47)
7.4–11.0 (118.4–176.0)	3.3–2.9 (0.58–0.51)	2.8–2.4 (0.49–0.42)	2.7–2.4 (0.47–0.42)

^A The thermal values in this table are given at 1 in. (0.0254 m) of thickness with a gradient of 50°F (10°C). Test data that cover the thickness range from 1 to 6 in. (0.0254 to 0.1524 m) show that thermal resistance per inch of thickness is essentially linear with respect to thickness. Test values do not deviate on the low side from the value in the table by more than 5 %.

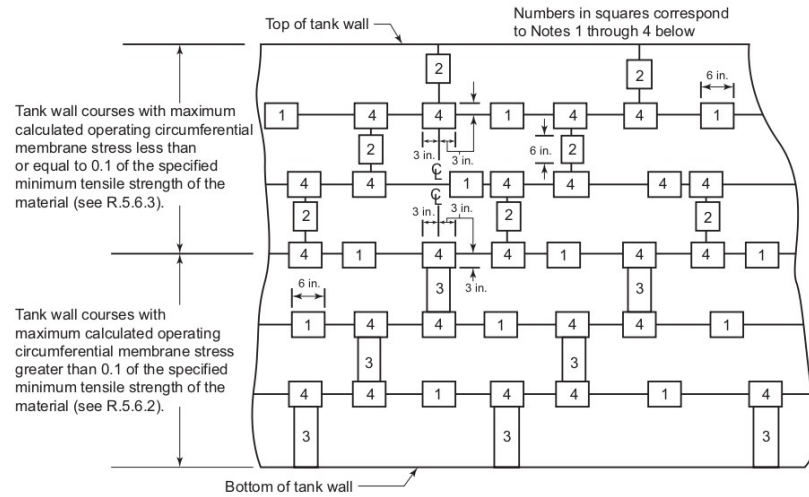
Figura F.1: Resistencia térmica ASTM C549 [101].

Anexo G. Estándares dimensionales para piezas forjadas ASTM A350.

The Dimensional Standards for ASTM A350 Forgings	
ASME B16.5	Steel Pipe Flanges and Flanged Fittings
ASME B16.9	Factory-Made Wrought Steel Butt-Welding Fittings
ASME B16.11	Forged Steel Fittings, Socket-Welding and Threaded
ASME B16.34	Valves-Flanged, Threaded, and Welding End
ASME B16.47	Large Diameter Steel Flanges
API 600	Steel Gate Valves with Flanged or Butt-Welding Ends
API 602	Compact Design Carbon Steel Gate Valves for Refinery Use
API 605	Large Diameter Carbon Steel Flanges

Figura G.1: Estándares dimensionales para piezas forjadas ASTM A350 [71].

Anexo H. Requisitos de examen radiográfico/ultrasonico para uniones de juntas soldadas a tope en contenedores de liquidos primarios y secundarios.



- NOTE 1 One circumferential spot examination shall be performed in the first 10 ft for each welding operator of each type and thickness. After the first 10 ft, without regard to the number of welders, one circumferential spot examination shall be performed between each longitudinal joint on the course below.
- NOTE 2 One longitudinal spot examination shall be performed in the first 10 ft for each welder or welding operator of each type and thickness. After the first 10 ft, without regard to the number of welders, one longitudinal spot examination shall be performed in each longitudinal joint.
- NOTE 3 Longitudinal joints shall be 100 % examined.
- NOTE 4 All intersections of joints shall be examined.
- NOTE 5 This figure depicts a condition wherein the applicable longitudinal stress perpendicular to all circumferential welds is less than or equal to 0.1 times the minimum specified tensile strength (see R.5.6.3).

Figure R-2—Radiographic/Ultrasonic Examination Requirements for Butt-welded Shell Joints in Primary and Secondary Liquid Containers

Figura H.1: Requisitos de examen radiográfico/ultrasonico para uniones de juntas soldadas a tope en contenedores de liquidos primarios y secundarios [59].

Anexo I. Requisitos de espesor de la placa anular inferior.

Table R-6—Thickness Requirements^a for the Annular Bottom Plate (in.)

Nominal Thickness of First Shell Course (in.)	Design Stress ^b in First Shell Course (lb/in. ²)			
	≤ 20,000	22,000	24,000	26,000
≤ 0.75	1/4	1/4	1/4	1/4
> 0.75 to 1.00	1/4	1/4	1/4	5/16
> 1.00 to 1.25	1/4	1/4	5/16	3/8
> 1.25 to 1.50	1/4	9/32	3/8	7/16

^a The thicknesses and width (see R.3.4.1) are based on the foundation providing a uniform support under the full width of the annular plate. Unless the foundation is properly compacted, particularly at the inside of a concrete ringwall, settlement will produce additional stresses in the annular plate.

^b The stress shall be calculated using the formula $(2.6D)(HG)/t$, where D = nominal diameter of the tank, in ft; H = maximum filling height of the tank for design, in ft; G = design specific gravity; and t = design thickness of the first shell course, excluding corrosion allowance, in inches.

Figura I.1: Requisitos de espesor de la placa anular inferior [59].

Anexo J. Criterios de la relación de anclaje.

Table E.6—Anchorage Ratio Criteria

Anchorage Ratio J	Criteria
$J \leq 0.785$	No calculated uplift under the design seismic overturning moment. The tank is self-anchored.
$0.785 < J \leq 1.54$	Tank is uplifting, but the tank is stable for the design load providing the shell compression requirements are satisfied. Tank is self-anchored.
$J > 1.54$	Tank is not stable and cannot be self-anchored for the design load. Modify the annular ring if $L < 0.035D$ is not controlling or add mechanical anchorage.

Figura J.1: Criterios de la relación de anclaje [77].

Anexo K. Eficiencias máximas admisibles para uniones soldadas por arco.

Table 5-2—Maximum Allowable Efficiencies for Arc-welded Joints

Type of Joint	Limitations	Basic Joint Efficiency (%)	Radiographed (See Note 1)	Maximum Joint Efficiency (%; see Note 2)
Butt joints, attained by double-welding or other means approved by the Purchaser, that will obtain the quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces that agrees with the requirements of Paragraph UW-35 in Section VIII of the ASME Code; welds using metal backing strips that remain in place are excluded.	None, for all double-welded joints, except for roofs above liquid level.	85	Spot Full (see Note 3)	85 100
	Roofs above liquid level.	70	Spot Full (see Note 3)	70 85 100
Single-welded butt joint with backing strip or equivalent other than those included above.	Longitudinal or meridional circumference or latitudinal joints between plates not more than 1 ¹ / ₄ in. thick; nozzle attachment welding without thickness limitation.	75	Spot Full (see Note 3)	75 85
	Roofs above liquid level.	70	Spot Full (see Note 3)	70 75 85
Single-welded butt joint without backing strip.	Nozzle attachment welding.	70	—	70
Double full-fillet lap joint (see Note 4).	Longitudinal or meridional joints and equivalent (see Note 5) circumferential or latitudinal joints between plates not more than 3 ³ / ₈ in. thick; joints of this type shall not be used for longitudinal or meridional joints that the provisions of 5.12.2 require to be butt-welded.	70	—	70
	Other circumferential or latitudinal joints between plates not more than 5 ¹ / ₈ in. thick.	65	—	65
Single full-fillet lap joint (see Note 4).	Longitudinal or meridional joints and circumferential or latitudinal joints between plates not more than 3 ³ / ₈ in. thick; joints of this type shall not be used for longitudinal or meridional joints that the provisions of 5.12.2 require when the thinner plate joined exceeds 1 ¹ / ₄ in.	35	—	35
Single full-fillet lap joints for head-to-nozzle joints	For attachment of heads convex to pressure not more than 5 ¹ / ₈ in. required thickness, only with use of the fillet weld on the inside of the nozzle.	35	—	35
Nozzle-attachment fillet welds	Attachment welding for nozzles and their reinforcements.		(Included in the strength factors in 5.16.8.3)	
Plug welds (see 5.24.5)	Attachment welding for nozzle reinforcements (see Note 6).	80	—	80
NOTE 1 See 5.26 and 7.15 for examination requirements.				
NOTE 2 Regardless of any values given in this column, the efficiency for lap-welded joints between plates with surfaces of double curvature that have a compressive stress across the joint from a negative value of P_c or other external loading may be taken as unity; such compressive stress shall not exceed 700 lbf/in. ² . For all other lap-welded joints, the joint efficiency factor must be applied to the allowable compressive stress, S_{ca} . The efficiency for full-penetration butt-welded joints, which are in compression across the entire thickness of the connected plates, may be taken as unity.				
NOTE 3 All main butt-welded joints (see 5.26.4.2) shall be completely radiographed or ultrasonically examined as specified in 5.26 and nozzle and reinforcement attachment welding shall be examined by the magnetic-particle method as specified in 7.15.2.				
NOTE 4 Thickness limitations do not apply to flat bottoms supported uniformly on a foundation.				
NOTE 5 For the purposes of this table, a circumferential or latitudinal joints shall be considered subject to the same requirements and limitations as are longitudinal or meridional joints when such a circumferential or latitudinal joint is located (a) in a spherical, tori spherical or ellipsoidal shape or in any other surface of double curvature, (b) at the junction between a conical or dished roof (or bottom) and cylindrical sidewalls, as considered in 5.12.3 or (c) at a similar juncture at either end of a transition section or reducer as shown in Figure 5-9.				
NOTE 6 The efficiency factors shown for fillet welds and plug welds are not to be applied to the allowable shearing stress values shown in Table 5-3 for structural welds.				

Figura K.1: Eficiencias máximas admisibles para uniones soldadas por arco [59].

Anexo L. Factor de importancia.

Table E.5—Importance Factor (I) and Seismic Use Group Classification

Seismic Use Group	I
I	1.0
II	1.25
III	1.5

Figura L.1: Factor de importancia [77].

Anexo M. Factor de agitación.

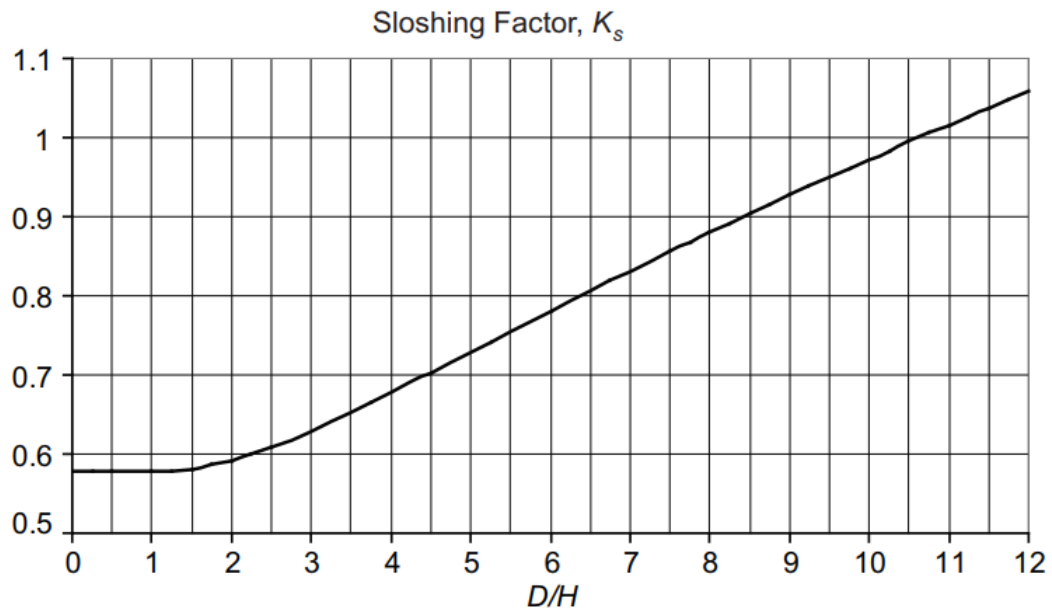


Figure EC.6—Sloshing Factor, K_s

Figura M.1: Factor de agitación [77].

Anexo N. Materiales de las placas y esfuerzos admisibles.

Table 5.2a—Permissible Plate Materials and Allowable Stresses (SI)

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness t mm	Minimum Yield Strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress S_d MPa	Hydrostatic Test Stress S_t MPa
ASTM Specifications						
A283M	C		205	380	137	154
A285M	C		205	380	137	154
A131M	A, B		235	400	157	171
A36M	—		250	400	160	171
A131M	EH 36		360	490 ^a	196	210
A573M	400		220	400	147	165
A573M	450		240	450	160	180
A573M	485		290	485 ^a	193	208
A516M	380		205	380	137	154
A516M	415		220	415	147	165
A516M	450		240	450	160	180
A516M	485		260	485	173	195
A662M	B		275	450	180	193
A662M	C		295	485 ^a	194	208
A537M	1	$t \leq 65$	345	485 ^a	194	208
		$65 < t \leq 100$	310	450 ^b	180	193

Figura N.1: Materiales de las placas y esfuerzos admisibles [77].

Table 5.2a—Permissible Plate Materials and Allowable Stresses (SI) (Continued)

Plate Specification	Grade	Nominal Plate Thickness t mm	Minimum Yield Strength MPa	Minimum Tensile Strength MPa	Product Design Stress S_d MPa	Hydrostatic Test Stress S_t MPa
A537M	2	$t \leq 65$	415	550 ^a	220	236
		$65 < t \leq 100$	380	515 ^b	206	221
A633M	C, D	$t \leq 65$	345	485 ^a	194	208
		$65 < t \leq 100$	315	450 ^b	180	193
A737M	B		345	485 ^a	194	208
A841M	Class 1		345	485 ^a	194	208
A841M	Class 2		415	550 ^a	220	236

Figura N.2: Materiales de las placas y esfuerzos admisibles (continuación) [77].

Anexo Ñ. Datos de expansión térmica total para metales.

Tabla C-1 Expansión térmica total para metales, unidades en el sistema de medidas de los Estados Unidos
Expansión térmica lineal total desde 70 °F hasta la temperatura indicada en la Tabla, pulgadas/100 pies

Temp., °F	Metal										
	Acero carbono-carbono-molibdeno bajo cromo hasta de 3 Cr-Mo	5Cr-Mo hasta 9Cr-Mo	Acero inoxidable austenítico 18Cr-8Ni	12 Cr, 17 Cr, 27 Cr	25 Cr-20 Ni	UNS N04400 67Ni-30Cu	3½Ni	Cobre y aleación de cobre	Titanio Gr. 1,2,3,7, 11,12,16,17	Titanio Gr. 9	UNS N10675
-450	...	...	...	...	...	...	...	-3,93	...	...	...
-425	...	...	...	...	...	...	...	-3,93	...	...	...
-400	...	...	...	...	...	...	...	-3,91	...	...	...
-375	...	...	...	...	...	...	...	-3,87	...	...	...
-350	...	...	...	...	...	...	...	-3,79	...	...	...
-325	-2,37	-2,22	-3,85	-2,04	...	-2,62	-2,25	-3,67	...	...	...
-300	-2,24	-2,10	-3,63	-1,92	...	-2,50	-2,17	-3,53	...	...	...
-275	-2,11	-1,98	-3,41	-1,80	...	-2,38	-2,07	-3,36	...	...	...
-250	-1,98	-1,86	-3,19	-1,68	...	-2,26	-1,96	-3,17	...	...	...
-225	-1,85	-1,74	-2,96	-1,57	...	-2,14	-1,86	-2,97	...	...	...
-200	-1,71	-1,62	-2,73	-1,46	...	-2,02	-1,76	-2,76	...	...	...
-175	-1,58	-1,50	-2,50	-1,35	...	-1,90	-1,62	-2,53	...	...	...
-150	-1,45	-1,37	-2,27	-1,24	...	-1,79	-1,48	-2,30	...	...	...
-125	-1,30	-1,23	-2,01	-1,11	...	-1,59	-1,33	-2,06	...	...	...
-100	-1,15	-1,08	-1,75	-0,98	...	-1,38	-1,17	-1,81	...	...	...
-75	-1,00	-0,94	-1,50	-0,85	...	-1,18	-1,01	-1,56	...	...	...
-50	-0,84	-0,79	-1,24	-0,72	...	-0,98	-0,84	-1,30	...	...	...
-25	-0,68	-0,63	-0,98	-0,57	...	-0,77	-0,67	-1,04	...	...	...
0	-0,49	-0,46	-0,72	-0,42	...	-0,57	-0,50	-0,77	...	...	...
25	-0,32	-0,30	-0,46	-0,27	...	-0,37	-0,32	-0,50	...	...	...
50	-0,14	-0,13	-0,21	-0,12	...	-0,20	-0,15	-0,22	...	...	...
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,23	0,22	0,34	0,20	0,32	0,28	0,23	0,34	0,20	0,20	0,20
125	0,42	0,40	0,62	0,36	0,58	0,52	0,42	0,63	0,35	0,35	0,40
150	0,61	0,58	0,90	0,53	0,84	0,75	0,61	0,91	0,50	0,50	0,60
175	0,80	0,76	1,18	0,69	1,10	0,99	0,81	1,20	0,60	0,65	0,75
200	0,99	0,94	1,46	0,86	1,37	1,22	1,01	1,49	0,70	0,80	0,90
225	1,21	1,13	1,75	1,03	1,64	1,46	1,21	1,79	0,85	0,95	1,10
250	1,40	1,33	2,03	1,21	1,91	1,71	1,42	2,09	1,00	1,10	1,30
275	1,61	1,52	2,32	1,38	2,18	1,96	1,63	2,38	1,15	1,25	1,45
300	1,82	1,71	2,61	1,56	2,45	2,21	1,84	2,68	1,30	1,40	1,60
325	2,04	1,90	2,90	1,74	2,72	2,44	2,05	2,99	1,45	1,55	1,80
350	2,26	2,10	3,20	1,93	2,99	2,68	2,26	3,29	1,60	1,70	2,00
375	2,48	2,30	3,50	2,11	3,26	2,91	2,47	3,59	1,75	1,85	2,20
400	2,70	2,50	3,80	2,30	3,53	3,25	2,69	3,90	1,90	2,00	2,40
425	2,93	2,72	4,10	2,50	3,80	3,52	2,91	4,21	2,05	2,15	2,60
450	3,16	2,93	4,41	2,69	4,07	3,79	3,13	4,51	2,20	2,30	2,80
475	3,39	3,14	4,71	2,89	4,34	4,06	3,35	4,82	2,35	2,45	3,00
500	3,62	3,35	5,01	3,08	4,61	4,33	3,58	5,14	2,50	2,60	3,20
525	3,86	3,58	5,31	3,28	4,88	4,61	3,81	5,45	2,65	2,75	3,40
550	4,11	3,80	5,62	3,49	5,15	4,90	4,04	5,76	2,80	2,90	3,60

Figura Ñ.1: Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales [80].

**Tabla C-1 Expansión térmica total para metales,
unidades en el sistema de medidas de los Estados Unidos (cont.)**
Expansión térmica lineal total desde 70 °F hasta la temperatura indicada en la Tabla, pulgadas/100 pies

Metal										
Aluminio	Hierro fundido gris	Bronce	Latón	70Cu-30Ni	UNS N08XXX Serie Ni-Fe-Cr	UNS N06XXX Serie Ni-Cr-Fe	UNS N06035 Serie Ni-Cr-Mo	UNS N06200 Ni-Cr-Mo	Hierro dúctil	Temp, °F
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-450
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-425
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-400
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-375
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-350
-4,68	...	-3,98	-3,88	-3,15	...	...	...	...	...	-325
-4,46	...	-3,74	-3,64	-2,87	...	...	...	...	...	-300
-4,21	...	-3,50	-3,40	-2,70	...	...	...	...	...	-275
-3,97	...	-3,26	-3,16	-2,53	...	...	...	...	...	-250
-3,71	...	-3,02	-2,93	-2,36	...	...	...	...	...	-225
-3,44	...	-2,78	-2,70	-2,19	...	...	...	...	-1,51	-200
-3,16	...	-2,54	-2,47	-2,12	...	...	...	...	-1,41	-175
-2,88	...	-2,31	-2,24	-1,95	...	...	...	...	-1,29	-150
-2,57	...	-2,06	-2,00	-1,74	...	...	...	...	-1,16	-125
-2,27	...	-1,81	-1,76	-1,53	...	...	...	...	-1,04	-100
-1,97	...	-1,56	-1,52	-1,33	...	...	...	...	-0,91	-75
-1,67	...	-1,32	-1,29	-1,13	...	...	...	...	-0,77	-50
-1,32	...	-1,25	-1,02	-0,89	...	...	...	...	-0,62	-25
-0,97	...	-0,77	-0,75	-0,66	...	...	...	...	-0,46	0
-0,63	...	-0,49	-0,48	-0,42	...	...	...	...	-0,23	25
-0,28	...	-0,22	-0,21	-0,19	...	...	...	...	-0,14	50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
0,46	0,21	0,36	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,25	0,21	100
0,85	0,38	0,66	0,64	0,56	0,52	0,48	0,44	0,46	0,39	125
1,23	0,55	0,96	0,94	0,82	0,76	0,70	0,65	0,66	0,57	150
1,62	0,73	1,26	1,23	1,07	0,99	0,92	0,86	0,87	0,76	175
2,00	0,90	1,56	1,52	1,33	1,23	1,15	1,06	1,08	0,94	200
2,41	1,08	1,86	1,83	1,59	1,49	1,38	1,27	1,28	1,13	225
2,83	1,27	2,17	2,14	1,86	1,76	1,61	1,49	1,49	1,33	250
3,24	1,45	2,48	2,45	2,13	2,03	1,85	1,70	1,70	1,53	275
3,67	1,64	2,79	2,76	2,40	2,30	2,09	1,91	1,90	1,72	300
4,09	1,83	3,11	3,08	2,68	2,59	2,32	2,13	2,11	1,93	325
4,52	2,03	3,42	3,41	2,96	2,88	2,56	2,35	2,32	2,13	350
4,95	2,22	3,74	3,73	3,24	3,18	2,80	2,57	2,53	2,36	375
5,39	2,42	4,05	4,05	3,52	3,48	3,05	2,79	2,73	2,56	400
5,83	2,62	4,37	4,38	...	3,76	3,29	3,01	2,94	2,79	425
6,28	2,83	4,69	4,72	...	4,04	3,53	3,24	3,15	3,04	450
6,72	3,03	5,01	5,06	...	4,31	3,78	3,46	3,37	3,28	475
7,17	3,24	5,33	5,40	...	4,59	4,02	3,69	3,59	3,54	500
7,63	3,46	5,65	5,75	...	4,87	4,27	3,92	3,80	3,76	525
8,10	3,67	5,98	6,10	...	5,16	4,52	4,15	4,02	3,99	550

Figura Ñ.2: Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales (continuación) [80].

**Tabla C-1 Expansión térmica total para metales,
unidades en el sistema de medidas de los Estados Unidos (cont.)**
Expansión térmica lineal total desde 70°F hasta la temperatura indicada en la Tabla, pulgadas/100 pies

Temp., °F	Metal										
	Acero carbono-carbono-molibdeno bajo cromo hasta de 3 Cr-Mo	5Cr-Mo hasta 9Cr-Mo	Acero inoxidable austenítico 18Cr-8Ni	12 Cr, 17 Cr, 27 Cr	25 Cr-20 Ni	UNS N04400 67Ni-30Cu	3½Ni	Cobre y aleación de cobre	Titanio Gr. 1,2,3,7, 11,12,16,17	Titanio Gr. 9	UNS N10675
575	4,35	4,02	5,93	3,69	5,42	5,18	4,27	6,07	2,95	3,10	3,80
600	4,60	4,24	6,24	3,90	5,69	5,46	4,50	6,09	3,10	3,30	4,00
625	4,86	4,47	6,55	4,10	5,96	5,75	4,74	...	3,25	...	4,20
650	5,11	4,69	6,87	4,31	6,23	6,05	4,98	...	3,40	...	4,40
675	5,37	4,92	7,18	4,52	6,50	6,34	5,22	...	3,60	...	4,65
700	5,63	5,14	7,50	4,73	6,77	6,64	5,46	...	3,80	...	4,90
725	5,90	5,38	7,82	4,94	7,04	6,94	5,70	...	3,95	...	5,10
750	6,16	5,62	8,15	5,16	7,31	7,25	5,94	...	4,10	...	5,30
775	6,43	5,86	8,47	5,38	7,58	7,55	6,18	...	4,30	...	5,50
800	6,70	6,10	8,80	5,60	7,85	7,85	6,43	...	4,50	...	5,70
825	6,97	6,34	9,13	5,82	8,15	8,16	6,68	...	...	...	5,90
850	7,25	6,59	9,46	6,05	8,45	8,48	6,93	...	...	...	6,10
875	7,53	6,83	9,79	6,27	8,75	8,80	7,18	...	...	...	6,30
900	7,81	7,07	10,12	6,49	9,05	9,12	7,43	...	...	...	6,50
925	8,08	7,31	10,46	6,71	9,35	9,44	7,68	...	...	...	6,70
950	8,35	7,56	10,80	6,94	9,65	9,77	7,93	...	...	...	6,90
975	8,62	7,81	11,14	7,17	9,95	10,09	8,17	...	...	...	7,10
1000	8,89	8,06	11,48	7,40	10,25	10,42	8,41	...	...	...	7,30
1025	9,17	8,30	11,82	7,62	10,55	10,75	...	...	...	...	7,50
1050	9,46	8,55	12,16	7,95	10,85	11,09	...	...	...	...	7,70
1075	9,75	8,80	12,50	8,18	11,15	11,43	...	...	...	...	7,90
1100	10,04	9,05	12,84	8,31	11,45	11,77	...	...	...	...	8,10
1125	10,31	9,28	13,18	8,53	11,78	12,11	...	...	...	...	8,30
1150	10,57	9,52	13,52	8,76	12,11	12,47	...	...	...	...	8,50
1175	10,83	9,76	13,86	8,98	12,44	12,81	...	...	...	...	8,75
1200	11,10	10,00	14,20	9,20	12,77	13,15	...	...	...	...	9,00
1225	11,38	10,26	14,54	9,42	13,10	13,50	...	...	...	...	9,20
1250	11,66	10,53	14,88	9,65	13,43	13,86	...	...	...	...	9,40
1275	11,94	10,79	15,22	9,88	13,76	14,22	...	...	...	...	9,65
1300	12,22	11,06	15,56	10,11	14,09	14,58	...	...	...	...	9,90
1325	12,50	11,30	15,90	10,33	14,39	14,94	...	...	...	...	10,10
1350	12,78	11,55	16,24	10,56	14,69	15,30	...	...	...	...	10,50
1375	13,06	11,80	16,58	10,78	14,99	15,66	...	...	...	...	10,80
1400	13,34	12,05	16,92	11,01	15,29	16,02	...	...	...	...	11,10
1425	...	...	17,30	...	...	...	...	...	...	...	11,50
1450	...	...	17,69	...	...	...	...	...	...	...	11,90
1475	...	...	18,08	...	...	...	...	...	...	...	12,30
1500	...	...	18,47	...	...	...	...	...	...	...	12,70

NOTA GENERAL: para referencias de Código utilizadas en este Apéndice vea párrafo 319.3.1. Estos datos se deben utilizar cuando no hay disponibilidad de datos más relevantes. La responsabilidad de verificar que los materiales seleccionados son los adecuados para el servicio especificado y las temperaturas esperadas es del diseñador.

Figura Ñ.3: Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales (continuación) [80].

**Tabla C-1 Expansión térmica total para metales,
unidades en el sistema de medidas de los Estados Unidos (cont.)**
Expansión térmica lineal total desde 70 °F hasta la temperatura indicada en la Tabla, pulgadas/100 pies

Metal										
Aluminio	Hierro fundido gris	Bronce	Latón	70Cu-30Ni	UNS N08XXX Serie Ni-Fe-Cr	UNS N06XXX Serie Ni-Cr-Fe	UNS N06035 Serie Ni-Cr-Mo	UNS N06200 Ni-Cr-Mo	Hierro dúctil	Temp., °F
8,56	3,89	6,31	6,45	...	5,44	4,77	4,39	4,24	4,22	575
9,03	4,11	6,64	6,80	...	5,72	5,02	4,62	4,46	4,44	600
...	4,34	6,96	7,16	...	6,01	5,27	4,86	4,68	4,66	625
...	4,57	7,29	7,53	...	6,30	5,53	5,09	4,91	4,90	650
...	4,80	7,62	7,89	...	6,58	5,79	5,33	5,13	5,14	675
...	5,03	7,95	8,26	...	6,88	6,05	5,58	5,36	5,39	700
...	5,26	8,28	8,64	...	7,17	6,31	5,82	5,59	5,60	725
...	5,50	8,62	9,02	...	7,47	6,57	6,06	5,83	5,85	750
...	5,74	8,96	9,40	...	7,76	6,84	6,31	6,06	6,10	775
...	5,98	9,30	9,78	...	8,06	7,10	6,56	6,30	6,35	800
...	6,22	9,64	10,17	...	8,35	...	6,81	6,54	6,59	825
...	6,47	9,99	10,57	...	8,66	...	7,06	6,78	6,85	850
...	6,72	10,33	10,96	...	8,95	...	7,31	7,02	7,09	875
...	6,97	10,68	11,35	...	9,26	...	7,57	7,29	7,35	900
...	7,23	11,02	11,75	...	9,56	...	7,82	7,51	7,64	925
...	7,50	11,37	12,16	...	9,87	...	8,08	7,76	7,86	950
...	7,76	11,71	12,57	...	10,18	...	8,34	8,01	8,11	975
...	8,02	12,05	12,98	...	10,49	...	8,60	8,26	8,35	1000
...	...	12,40	13,39	...	10,80	...	8,87	8,52	...	1025
...	...	12,76	13,81	...	11,11	...	9,13	8,77	...	1050
...	...	13,11	14,23	...	11,42	...	9,40	9,02	...	1075
...	...	13,47	14,65	...	11,74	...	9,67	9,28	...	1100
...	...	...	...	...	12,05	...	9,94	9,53	...	1125
...	...	...	...	...	12,38	...	10,21	9,79	...	1150
...	...	...	...	...	12,69	...	10,48	10,05	...	1175
...	...	...	...	...	13,02	...	10,75	10,30	...	1200
...	...	...	...	...	13,36	...	...	...	...	1225
...	...	...	...	...	13,71	...	...	...	...	1250
...	...	...	...	...	14,04	...	...	...	...	1275
...	...	...	...	...	14,39	...	...	...	...	1300
...	...	...	...	...	14,74	...	...	...	...	1325
...	...	...	...	...	15,10	...	...	...	...	1350
...	...	...	...	...	15,44	...	...	...	...	1375
...	...	...	...	...	15,80	...	...	...	...	1400
...	...	...	...	...	16,16	...	...	...	...	1425
...	...	...	...	...	16,53	...	...	...	...	1450
...	...	...	...	...	16,88	...	...	...	...	1475
...	...	...	...	...	17,25	...	...	...	...	1500

Figura Ñ.4: Tabla C-1 ASME B31.3: Expansión térmica total para metales (continuación) [80].

Anexo O. Coeficientes térmicos para metales.

Tabla C-3 Coeficientes térmicos para metales, unidades en medidas de los Estados Unidos
 Coeficientes medios de expansión térmica lineal desde 70 °F hasta temperatura indicada en la Tabla, micropulgada/pulgada °F

Temp., °F	Metal										
	Acero carbono- carbono-molibdeno bajo cromo hasta de 3 Cr-Mo	5Cr-Mo hasta 9Cr-Mo	Acero inoxidable austenítico 18Cr-8Ni	12 Cr, 17 Cr, 27 Cr	25 Cr-20 Ni	UNS N04400 67Ni-30Cu	3½Ni	Cobre y aleación de cobre	Titanio Gr. 1,2,3,7, 11,12,16,17	Titanio Gr. 9	UNS N10675
-450	...	...	...	...	...	...	...	6,30	...	...	...
-425	...	...	...	...	...	...	...	6,61	...	...	...
-400	...	...	...	...	...	...	...	6,93	...	...	...
-375	...	...	...	...	...	...	...	7,24	...	...	...
-350	...	...	...	...	...	...	...	7,51	...	...	...
-325	5,00	4,70	8,15	4,30	...	5,55	4,76	7,74	...	...	...
-300	5,07	4,77	8,21	4,36	...	5,72	4,90	7,94	...	...	...
-275	5,14	4,84	8,28	4,41	...	5,89	5,01	8,11	...	...	...
-250	5,21	4,91	8,34	4,47	...	6,06	5,15	8,26	...	...	...
-225	5,28	4,98	8,41	4,53	...	6,23	5,30	8,40	...	...	...
-200	5,35	5,05	8,47	4,59	...	6,40	5,45	8,51	...	...	...
-175	5,42	5,12	8,54	4,64	...	6,57	5,52	8,62	...	...	...
-150	5,50	5,20	8,60	4,70	...	6,75	5,59	8,72	...	...	...
-125	5,57	5,26	8,66	4,78	...	6,85	5,67	8,81	...	...	...
-100	5,65	5,32	8,75	4,85	...	6,95	5,78	8,89	...	...	...
-75	5,72	5,38	8,83	4,93	...	7,05	5,83	8,97	...	...	...
-50	5,80	5,45	8,90	5,00	...	7,15	5,88	9,04	...	...	...
-25	5,85	5,51	8,94	5,05	...	7,22	5,94	9,11	...	...	...
0	5,90	5,56	8,98	5,10	...	7,28	6,00	9,17	...	...	...
25	5,96	5,62	9,03	5,14	...	7,35	6,08	9,23	...	...	...
50	6,01	5,67	9,07	5,19	...	7,41	6,16	9,28	...	...	...
70	6,07	5,73	9,11	5,24	...	7,48	6,25	9,32	4,60	4,70	5,70
100	6,13	5,79	9,16	5,29	...	7,55	6,33	9,39	4,70	4,70	5,70
125	6,19	5,85	9,20	5,34	...	7,62	6,36	9,43	4,70	4,75	5,75
150	6,25	5,92	9,25	5,40	...	7,70	6,39	9,48	4,70	4,80	5,80
175	6,31	5,98	9,29	5,45	...	7,77	6,42	9,52	4,70	4,80	5,80
200	6,38	6,04	9,34	5,50	8,79	7,84	6,45	9,56	4,70	4,80	5,80
225	6,43	6,08	9,37	5,54	8,81	7,89	6,50	9,60	4,75	4,85	5,85
250	6,49	6,12	9,41	5,58	8,83	7,93	6,55	9,64	4,80	4,90	5,90
275	6,54	6,15	9,44	5,62	8,85	7,98	6,60	9,68	4,80	4,90	5,90
300	6,60	6,19	9,47	5,66	8,87	8,02	6,65	9,71	4,80	4,90	5,90
325	6,65	6,23	9,50	5,70	8,89	8,07	6,69	9,74	4,80	4,95	5,95
350	6,71	6,27	9,53	5,74	8,90	8,11	6,73	9,78	4,80	5,00	6,00
375	6,76	6,30	9,56	5,77	8,91	8,16	6,77	9,81	4,80	5,00	6,05
400	6,82	6,34	9,59	5,81	8,92	8,20	6,80	9,84	4,80	5,00	6,10
425	6,87	6,38	9,62	5,85	8,92	8,25	6,83	9,86	4,80	5,05	6,10
450	6,92	6,42	9,65	5,89	8,92	8,30	6,86	9,89	4,80	5,10	6,10
475	6,97	6,46	9,67	5,92	8,92	8,35	6,89	9,92	4,85	5,10	6,15
500	7,02	6,50	9,70	5,96	8,93	8,40	6,93	9,94	4,90	5,10	6,20
525	7,07	6,54	9,73	6,00	8,93	8,45	6,97	9,97	4,90	5,10	6,25
550	7,12	6,58	9,76	6,05	8,93	8,49	7,01	9,99	4,90	5,10	6,30

Figura O.1: Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales [80].

Tabla C-3 Coeficientes térmicos para metales, unidades en medidas de los Estados Unidos (cont.)
 Coeficientes medios de expansión térmica lineal desde 70 °F hasta temperatura indicada en la Tabla, micropulgada/pulgada °F

Metal										
Aluminio	Hierro fundido gris	Bronce	Latón	70Cu-30Ni	UNS N08XXX Serie Ni-Fe-Cr	UNS N06XXX Serie Ni-Cr-Fe	UNS N06035 Serie Ni-Cr-Mo	UNS N06200 Ni-Cr-Mo	Hierro dúctil	Temp., °F
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-450
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-425
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-400
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-375
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-350
9,90	...	8,40	8,20	6,65	...	...	...	...	...	-325
10,04	...	8,45	8,24	6,76	...	...	...	...	...	-300
10,18	...	8,50	8,29	6,86	...	...	...	...	...	-275
10,33	...	8,55	8,33	6,97	...	...	...	...	...	-250
10,47	...	8,60	8,37	7,08	...	...	...	...	...	-225
10,61	...	8,65	8,41	7,19	...	...	...	...	4,65	-200
10,76	...	8,70	8,46	7,29	...	...	...	...	4,76	-175
10,90	...	8,75	8,50	7,40	...	...	...	...	4,87	-150
11,08	...	8,85	8,61	7,50	...	...	...	...	4,98	-125
11,25	...	8,95	8,73	7,60	...	...	...	...	5,10	-100
11,43	...	9,05	8,84	7,70	...	...	...	...	5,20	-75
11,60	...	9,15	8,95	7,80	...	...	...	...	5,30	-50
11,73	...	9,23	9,03	7,87	...	...	...	...	5,40	-25
11,86	...	9,32	9,11	7,94	...	...	...	...	5,50	0
11,99	...	9,40	9,18	8,02	...	...	...	...	5,58	25
12,12	...	9,49	9,26	8,09	...	...	...	...	5,66	50
12,25	...	9,57	9,34	8,16	...	7,13	6,68	6,90	5,74	70
12,39	...	9,66	9,42	8,24	...	7,20	6,71	6,90	5,82	100
12,53	...	9,75	9,51	8,31	...	7,25	6,74	6,90	5,87	125
12,67	...	9,85	9,59	8,39	...	7,30	6,76	6,90	5,92	150
12,81	...	9,93	9,68	8,46	...	7,35	6,79	6,90	5,97	175
12,95	5,75	10,03	9,76	8,54	7,90	7,40	6,82	6,90	6,02	200
13,03	5,80	10,05	9,82	8,58	8,01	7,44	6,85	6,90	6,08	225
13,12	5,84	10,08	9,88	8,63	8,12	7,48	6,88	6,90	6,14	250
13,20	5,89	10,10	9,94	8,67	8,24	7,52	6,90	6,90	6,20	275
13,28	5,93	10,12	10,00	8,71	8,35	7,56	6,93	6,90	6,25	300
13,36	5,97	10,15	10,06	8,76	8,46	7,60	6,96	6,90	6,31	325
13,44	6,02	10,18	10,11	8,81	8,57	7,63	6,99	6,90	6,37	350
13,52	6,06	10,20	10,17	8,85	8,69	7,67	7,01	6,90	6,43	375
13,60	6,10	10,23	10,23	8,90	8,80	7,70	7,04	6,90	6,48	400
13,68	6,15	10,25	10,29	...	8,82	7,72	7,07	6,90	6,57	425
13,75	6,19	10,28	10,35	...	8,85	7,75	7,10	6,91	6,66	450
13,83	6,24	10,30	10,41	...	8,87	7,77	7,13	6,93	6,75	475
13,90	6,28	10,32	10,47	...	8,90	7,80	7,15	6,94	6,85	500
13,98	6,33	10,35	10,53	...	8,92	7,82	7,18	6,96	6,88	525
14,05	6,38	10,38	10,58	...	8,95	7,85	7,21	6,97	6,92	550

Figura O.2: Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales (continuación) [80].

Tabla C-3 Coeficientes térmicos para metales, unidades en medidas de los Estados Unidos (cont.)
 Coeficientes medios de expansión térmica lineal desde 70 °F hasta temperatura indicada en la Tabla, micropulgada/pulgada °F

Temp., °F	Metal										
	Acero carbono-carbono-molibdeno bajo cromo hasta de 3 Cr-Mo	5Cr-Mo hasta 9Cr-Mo	Acero inoxidable austenítico 18Cr-8Ni	12 Cr, 17 Cr, 27 Cr	25 Cr-20 Ni	UNS N04400 67Ni-30Cu	3½Ni	Cobre y aleación de cobre	Titanio Gr. 1,2,3,7, 11,12,16,17	Titanio Gr. 9	UNS N10675
575	7,17	6,62	9,79	6,09	8,93	8,54	7,04	10,1	4,90	5,15	6,30
600	7,23	6,66	9,82	6,13	8,94	8,58	7,08	10,04	4,90	5,20	6,30
625	7,28	6,70	9,85	6,17	8,94	8,63	7,12	...	4,90	...	6,35
650	7,33	6,73	9,87	6,20	8,95	8,68	7,16	...	4,90	...	6,40
675	7,38	6,77	9,90	6,23	8,95	8,73	7,19	...	4,95	...	6,40
700	7,44	6,80	9,92	6,26	8,96	8,78	7,22	...	5,00	...	6,40
725	7,49	6,84	9,95	6,29	8,96	8,83	7,25	...	5,00	...	6,45
750	7,54	6,88	9,99	6,33	8,96	8,87	7,29	...	5,00	...	6,50
775	7,59	6,92	10,02	6,36	8,96	8,92	7,31	...	5,05	...	6,50
800	7,65	6,96	10,05	6,39	8,97	8,96	7,34	...	5,10	...	6,50
825	7,70	7,00	10,08	6,42	8,97	9,01	7,37	...	...	...	6,50
850	7,75	7,03	10,11	6,46	8,98	9,06	7,40	...	...	...	6,50
875	7,79	7,07	10,13	6,49	8,99	9,11	7,43	...	...	...	6,50
900	7,84	7,10	10,16	6,52	9,00	9,16	7,45	...	...	...	6,50
925	7,87	7,13	10,19	6,55	9,05	9,21	7,47	...	...	...	6,50
950	7,91	7,16	10,23	6,58	9,10	9,25	7,49	...	...	...	6,50
975	7,94	7,19	10,26	6,60	9,15	9,30	7,52	...	...	...	6,50
1000	7,97	7,22	10,29	6,63	9,18	9,34	7,55	...	...	...	6,50
1025	8,01	7,25	10,32	6,65	9,20	9,39	...	...	...	...	6,55
1050	8,05	7,27	10,34	6,68	9,22	9,43	...	...	...	...	6,60
1075	8,08	7,30	10,37	6,70	9,24	9,48	...	...	...	...	6,60
1100	8,12	7,32	10,39	6,72	9,25	9,52	...	...	...	...	6,60
1125	8,14	7,34	10,41	6,74	9,29	9,57	...	...	...	...	6,60
1150	8,16	7,37	10,44	6,75	9,33	9,61	...	...	...	...	6,60
1175	8,17	7,39	10,46	6,77	9,36	9,66	...	...	...	...	6,60
1200	8,19	7,41	10,48	6,78	9,39	9,70	...	...	...	...	6,60
1225	8,21	7,43	10,50	6,80	9,43	9,75	...	...	...	...	6,65
1250	8,24	7,45	10,51	6,82	9,47	9,79	...	...	...	...	6,70
1275	8,26	7,47	10,53	6,83	9,50	9,84	...	...	...	...	6,70
1300	8,28	7,49	10,54	6,85	9,53	9,88	...	...	...	...	6,70
1325	8,30	7,51	10,56	6,86	9,53	9,92	...	...	...	...	6,75
1350	8,32	7,52	10,57	6,88	9,54	9,96	...	...	...	...	6,80
1375	8,34	7,54	10,59	6,89	9,55	10,00	...	...	...	...	6,90
1400	8,36	7,55	10,60	6,90	9,56	10,04	...	...	...	...	7,00
1425	...	...	10,64	...	...	...	...	...	...	...	7,10
1450	...	...	10,68	...	...	...	...	...	...	...	7,20
1475	...	...	10,72	...	...	...	...	...	...	...	7,30
1500	...	...	10,77	...	...	...	...	...	...	...	7,40

NOTA GENERAL: para referencias de Código utilizadas en este Apéndice vea párrafo 319.3.1. Estos datos se deben utilizar cuando no hay disponibilidad de datos más relevantes. La responsabilidad de verificar que los materiales seleccionados son los adecuados para el servicio especificado y las temperaturas esperadas es del diseñador.

Figura O.3: Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales (continuación) [80].

Tabla C-3 Coeficientes térmicos para metales, unidades en medidas de los Estados Unidos (cont.)
 Coeficientes medios de expansión térmica lineal desde 70 °F hasta temperatura indicada en la Tabla, micropulgada/pulgada °F

Metal										
Aluminio	Hierro fundido gris	Bronce	Latón	70Cu-30Ni	UNS N08XXX Serie Ni-Fe-Cr	UNS N06XXX Serie Ni-Cr-Fe	UNS N06035 Serie Ni-Cr-Mo	UNS N06200 Serie Ni-Cr-Mo	Hierro dúctil	Temp., °F
14,13	6,42	10,41	10,64	...	8,97	7,88	7,24	6,99	6,95	575
14,20	6,47	10,44	10,69	...	9,00	7,90	7,26	7,01	6,98	600
...	6,52	10,46	10,75	...	9,02	7,92	7,29	7,03	7,02	625
...	6,56	10,48	10,81	...	9,05	7,95	7,32	7,05	7,04	650
...	6,61	10,50	10,86	...	9,07	7,98	7,35	7,07	7,08	675
...	6,65	10,52	10,92	...	9,10	8,00	7,38	7,09	7,11	700
...	6,70	10,55	10,98	...	9,12	8,02	7,40	7,12	7,14	725
...	6,74	10,57	11,04	...	9,15	8,05	7,46	7,14	7,18	750
...	6,79	10,60	11,10	...	9,17	8,08	7,46	7,17	7,22	775
...	6,83	10,62	11,16	...	9,20	8,10	7,49	7,19	7,25	800
...	6,87	10,65	11,22	...	9,22	...	7,51	7,22	7,27	825
...	6,92	10,67	11,28	...	9,25	...	7,54	7,24	7,31	850
...	6,96	10,70	11,34	...	9,27	...	7,57	7,27	7,34	875
...	7,00	10,72	11,40	...	9,30	...	7,60	7,30	7,37	900
...	7,05	10,74	11,46	...	9,32	...	7,62	7,32	7,41	925
...	7,10	10,76	11,52	...	9,35	...	7,65	7,35	7,44	950
...	7,14	10,78	11,57	...	9,37	...	7,68	7,38	7,47	975
...	7,19	10,80	11,63	...	9,40	...	7,71	7,40	7,50	1000
...	...	10,83	11,69	...	9,42	...	7,74	7,43	...	1025
...	...	10,85	11,74	...	9,45	...	7,76	7,46	...	1050
...	...	10,88	11,80	...	9,47	...	7,79	7,48	...	1075
...	...	10,90	11,85	...	9,50	...	7,82	7,51	...	1100
...	...	10,93	11,91	...	9,52	...	7,85	7,53	...	1125
...	...	10,95	11,97	...	9,55	...	7,88	7,55	...	1150
...	...	10,98	12,03	...	9,57	...	7,90	7,58	...	1175
...	...	11,00	12,09	...	9,60	...	7,93	7,60	...	1200
...	...	...	...	...	9,64	...	...	...	...	1225
...	...	...	...	...	9,68	...	...	...	...	1250
...	...	...	...	...	9,71	...	...	...	...	1275
...	...	...	...	...	9,75	...	...	...	...	1300
...	...	...	...	...	9,79	...	...	...	...	1325
...	...	...	...	...	9,83	...	...	...	...	1350
...	...	...	...	...	9,86	...	...	...	...	1375
...	...	...	...	...	9,90	...	...	...	...	1400
...	...	...	...	...	9,94	...	...	...	...	1425
...	...	...	...	...	9,98	...	...	...	...	1450
...	...	...	...	...	10,01	...	...	...	...	1475
...	...	...	...	...	10,05	...	...	...	...	1500

Figura O.4: Tabla C-3 ASME B31.3: Coeficientes térmicos para metales (continuación) [80].