LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE BASTIDORES Y TRAILER DE VEHICULOS DE TRANSPORTE, CONSTRUIDOS EN NUESTRO PAIS. APLICACION DE NORMAS INTERNACIONALES

Héctor Sanzi[(1)], Eduardo Asta[(2)].
[(1)] Ingeniero Aeronáutico
Tecsa Ingeniería, CABA Buenos Aires Argentina.
Grupo GIIE. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo. Buenos Aires Argentina.
[(2)] Ingeniero Aeronáutico
Consultec, CABA Buenos Aires Argentina.
Grupo de Investigación Mecánica de la Fractura. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo. Buenos Aires Argentina.
tecsaing@tecsaing.com.ar.

RESUMEN

En nuestro país, el parque automotor para el transporte de tanques cisternas para almacenamiento de petróleo y sus derivados o de carga en general, carece de reglas de aplicación de carácter nacional, para el diseño y fabricación de su estructura portante. Los elementos estructurales y uniones soldadas, ya sean del tipo penetración o filete, deben ser diseñadas adecuadamente de manera tal de responder a las diferentes acciones estáticas y dinámicas, que le impone el vehiculo en su rodaje.

A estas premisas y criterios de diseño, deben sumarse los procedimientos de soldadura normalizados y calificados, a fin de garantizar un estándar de calidad en la fabricación, que asegure junto con un adecuado programa de calidad, la integridad estructural y los márgenes de seguridad que este tipo de estructura requiere.

Hoy en la actualidad las herramientas de cálculo avanzado, como el método de elementos finitos, permiten verificar en forma detallada y completa, la integridad de estas estructuras y en acuerdo con los códigos de aplicación utilizados para tal fin. El presente trabajo establece un procedimiento para el diseño y cálculo de estructuras soldadas vehiculares, sobre la base de normas y códigos internacionales que puedan ser utilizados como base para el desarrollo de una normativa nacional.

ABSTRACT

In our country, the number of vehicles to transport tanks for petroleum and its derivatives or load, lack of rules of national application for the design and manufacture of its structure. The structural elements and welded joints, whether penetration or fillet type, must be properly designed so as to respond to different static and dynamic actions imposed by vehicle in your shooting.

Today now advanced calculation tools such as finite element method, allow a detailed check and complete integrity of these structures, in accordance with the application code used for this purpose. This work establishes a procedure for calculation and design of welded structures based on vehicle standards and codes that can be used as a basis for the development of national legislation.

INTRODUCCION

En nuestro país, el parque automotor para el transporte de tanques cisternas para almacenamiento de petróleo y sus derivados o de carga en general, carece de reglas de aplicación de carácter nacional, para el diseño y fabricación de su estructura portante.

Para este tipo de estructura, tanto los elementos estructurales como sus uniones soldadas, deben ser diseñadas adecuadamente de manera tal de responder a las diferentes acciones estáticas y dinámicas que le impone el vehiculo en su rodaje.

Dichas condiciones de diseño, en particular para las soldaduras, abarca a las uniones de penetración y a las del tipo filete.

A las premisas y criterios de diseño para las uniones soldadas, deben incorporarse los procedimientos de soldadura normalizados y calificados, a fin de garantizar un estándar de calidad en la fabricación, que asegure junto con un adecuado programa de calidad, la integridad estructural y los márgenes de seguridad requeridos por este tipo de estructura.

Es fundamental lograr una evaluación adecuada de la estructura, asegurando su integridad a lo largo de la vida útil.

La utilización de la Simulación Computacional, mediante el planteo de modelos de Elementos Finitos, proporciona una herramienta ingenieril adecuada y capaz de asegurar una correcta evaluación de la integridad estructural.

Mediante la aplicación de estas técnicas de evaluación, se evitarían costos adicionales o riesgos estructurales y humanos, innecesarios en la etapa de diseño.

El procedimiento de integridad estructural, debe contemplar:

- Evaluación y Criterios de Aceptación de elementos estructurales
- Diseño y Fabricación de uniones soldadas
- Análisis de Fatiga
- Criterios de Inspección

Es de suma prioridad, que dicho procedimiento, se incorpore a las normas vigentes de aplicación para el diseño, el cual podría ser considerado como la base para la normalización de la homologación de vehículos de transporte de carga, por el Instituto Argentino de Normalización y certificación IRAM.

En este trabajo se describen los alcances y procedimiento, que forman parte de un Programa de Evaluación de la Integridad de Estructuras Portantes para vehículos de transporte de carga en general, tales como:

- ✓ Trailer para el transporte de carga y Bastidores de vehículos Utilitarios y Rurales, Figura 1

- ✓ Tanques Cisternas para el transporte de fluidos, Figura 2

u otros utilizados para tal fin.

Figura 1. Trailer para el transporte de carga y Bastidores de vehículos Utilitarios y Rurales

Figura 2. Tanques Cisternas para el transporte de fluidos

ANALISIS DE INTEGRIDAD DE LA ESTRUCTURA PORTANTE

Nuestro país no posee una normativa para el cálculo de integridad de la estructura portante del equipo rodante, para equipos de transporte de carga.

Por tal motivo, y ante la necesidad de contar con un análisis adecuado y seguro, presentamos a continuación un procedimiento de “Evaluación” y “Aceptación”, para su estudio, con el objetivo que sea incorporado en una normativa de aplicación nacional.

Procedimiento de Evaluación

Los estados de carga y sus combinaciones, presentes en un equipo de transporte de carga, utilizados para el cálculo de integridad estructural, como así también, los criterios de aceptación, lineamientos generales y alcances, pueden ser tomados de la norma americana “Specification DOT, Cargo Tank Motor Vehicle” [1] .

Esta norma, utilizada para el diseño de Tanques Cisternas de Carga, presenta un procedimiento de evaluación de integridad de la estructura portante del equipo rodante, incluyendo todos los elementos soportes y el tanque contenedor de presión o cisterna, donde se combinan, los estados de cargas estáticos y dinámicos, que simula el vehículo en su rodaje sobre rutas convencionales.

Como herramienta de cálculo para el uso en la ingeniería, la norma recomienda como alternativa de análisis, la utilización de la Simulación Computacional, a través del planteo de modelos completos y detallados tridimensionales de elementos finitos. En las Figuras 3 y 4, se muestran diferentes modelos utilizados para el caso de tanques cisternas y de carga general, conformado este último, por dos vigas principales y longitudinales. Esta herramienta de cálculo permite obtener resultados con un alto grado de exactitud.

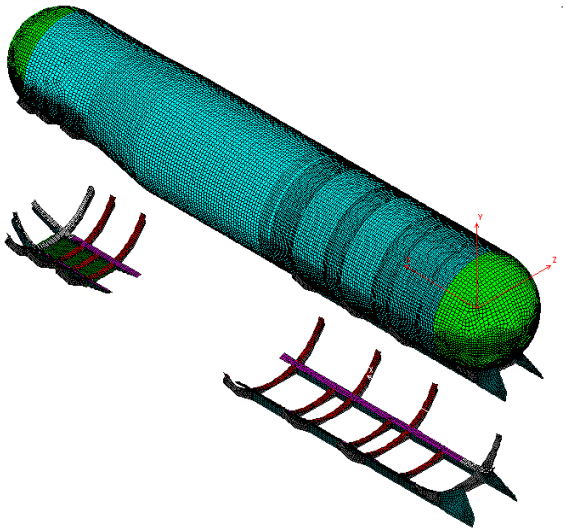

Figura 3. Modelo de Elementos Finitos utilizado para Tanques Cisternas para el transporte de fluidos

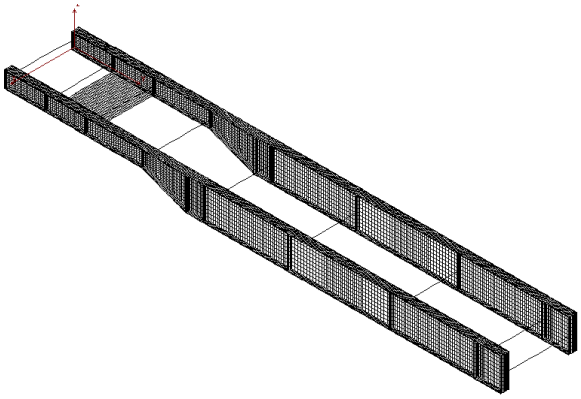

Figura 4. Modelo de Elementos Finitos utilizado para el transporte de carga y Bastidores de vehículos Utilitarios y Rurales

Para el análisis de integridad, los estados de cargas dinámicos son incorporados a través de factores de cargas, tomados en las tres direcciones y combinados entre si, de tal manera de simular las distintas situaciones extremas del movimiento y rodaje del vehículo.

Es decir, la norma plantea un estudio cuasi-estático de la estructura como se presenta a continuación, a saber:

Condición Operativa Normal Acelerada

Estado de carga 1: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección longitudinal x 0.35g
Estado de carga 2: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección lateral x 0.2g
Estado de carga 3: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección vertical x 0.35g
Estado de carga 4: Presión interior de diseño e hidrostática

Condición Operativa Normal Frenada

Estado de carga 1: Peso Propio (Tanque+Producto) frenada en la dirección longitudinal x (-0.35g)
Estado de carga 2: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección lateral x 0.2g
Estado de carga 3: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección vertical x 0.35g
Estado de carga 4: Presión interior de diseño e hidrostática

Condición de Impacto o Choque

Estado de carga 1: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección longitudinal x 2g
Estado de carga 2: Presión interior de diseño e hidrostática

Condición Operativa Normal Extrema Aceleración Doble longitudinal

Estado de carga 1: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección longitudinal x 2x0.35g
Estado de carga 2: Presión interior de diseño e hidrostática

Condición Operativa Normal Extrema Aceleración Doble vertical

Estado de carga 1: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección vertical x 2x0.35g
Estado de carga 2: Presión interior de diseño e hidrostática

Condición Operativa Normal Extrema Aceleración Doble lateral

Estado de carga 1: Peso Propio (Tanque+Producto) acelerado en la dirección lateral x 2x0.2g
Estado de carga 2: Presión interior de diseño e hidrostática

Para tanques cisterna sometidos a cargas de presión y/o temperatura variables en el tiempo, la norma no incluye un análisis de fatiga. De considerar necesaria su incorporación, el análisis debe ser encarado a través de los lineamientos dados por la norma americana ASME Sección XII [2]. En este caso se debe utilizar las cargas dinámicas o factores de carga cuasi-estáticos que presenta dicha norma, muy similares a los usados en la norma DOT [1].

En todos los casos, el diseño debe considerar los requerimientos de máxima carga para el transporte y lineamientos generales, dadas por las normas y regulaciones nacionales.

Criterios de Aceptación

Los criterios de aceptación, dependiendo del tipo de estructura y tipo de metodología de cálculo utilizada, se resumen a continuación, a saber:

Tanque cisterna para el transporte de fluidos

Las pautas de diseño del tanque contenedor de almacenamiento de producto, se basa en los lineamientos dados por el Código ASME Sección VIII División 1 [3].

A partir del planteo de un modelo computacional de elementos finitos, Figura 3, y en acuerdo con la norma "Specification DOT, Cargo Tank Motor Vehicle" [1], para las condiciones operativas normales de servicio, es aceptable la utilización del Criterio de Clasificación de Tensiones del Código ASME Sección VIII División 2 Apéndice 4 [4].

El valor de la tensión admisible utilizada para la condición operativa normal, salvo indicación por el contrario o requerimiento particular, es la tensión "Sm" de la División 1, mientras que para la condición de impacto, se toma el 75% de la tensión de rotura.

Adicionalmente la norma DOT [1], permite incrementar la tensión de rotura en un 20%, por lo cual la tensión admisible, para tanques construidos de acero al carbono, se incrementa en el mismo porcentaje.

Para el caso de elementos estructurales, como vigas de refuerzo o apoyo del tanque, cunas, soportes y rigidizadores en general, se utiliza el criterio ASD o LFRD del Código de la American Institute of Steel Construction AISC [5], donde se verifica en forma separada y combinada los efectos de flexión, axial y corte, incluyendo pandeo global y local.

Estructura Portante conformada principalmente por vigas

A partir del planteo de un modelo computacional de elementos finitos, como el mostrado en la Figura 4, donde se incluyen elementos estructurales, soportes, cunas y rigidizadores, se utilizan los Criterios de Aceptación ASD o LFRD para el análisis del Código de la American Institute of Steel Construction AISC [5], donde se verifica en forma separada y combinada los efectos de flexión, axial y corte, incluyendo pandeo global y local.

Para estructuras adicionales incorporadas a la estructura portante, tales como jaulas, iso-contenedores, cajas, etc, se aplican los mismos criterios de evaluación y aceptación.

DISEÑO Y FABRICACION DE UNIONES SOLDADAS

El diseño de uniones soldadas debe ser interpretado no solamente como parte de un diseño mecánico o estructural, sino de considerar y pensar desde el principio en términos de una estructura soldada como concepto de ingeniería.

En general el diseño de uniones soldadas relaciona tres aspectos básicos: mecánicos, condiciones de operación y metalúrgicos.

El esquema que se muestra en la Figura 5 permite resumir conceptualmente los aspectos del diseño de las uniones soldadas.

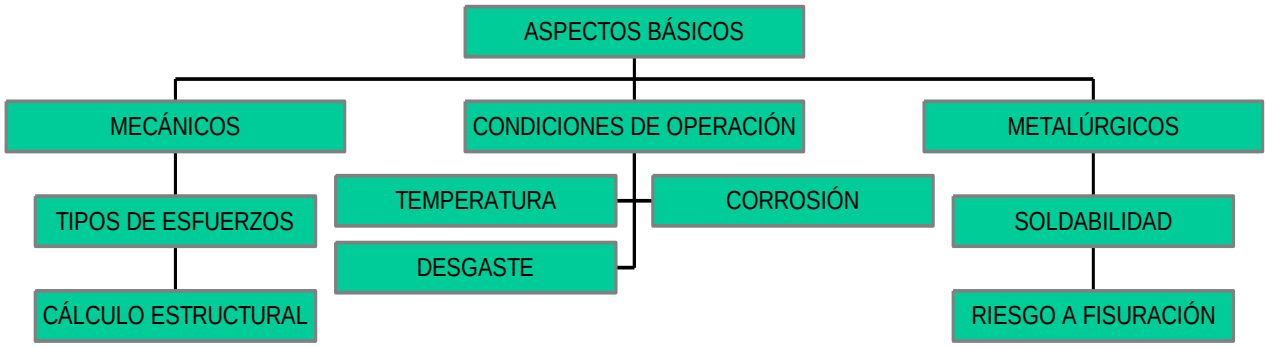

Figura 5. Aspectos básicos del diseño de las uniones soldadas

En estructuras de acero vehiculares, como las que plantea este trabajo, hay sin duda dos aspectos de diseño de las uniones soldadas que predominan, el mecánico y el metalúrgico. El mecánico está asociado tanto a solicitaciones estáticas como dinámicas mientras que el metalúrgico a la soldabilidad de los aceros estructurales que deberán ser seleccionados para este tipo de estructuras.

En uniones a tope, con igualación de espesores respecto del material base a unir o juntas de penetración completa (JPC), las reglas del cálculo estructural de la soldadura son las aplicadas para los materiales base del componente o estructura en términos de sección resistente y utilizando las herramientas y especificaciones indicadas por los códigos de diseño correspondientes.

Para este tipo de uniones la soldadura debe verificar un comportamiento igual al material base de manera tal que la misma pueda ser considerada como un continuo y no como una perturbación o singularidad en la estructura.

Por su parte en las uniones denominadas de filete (F) o en las juntas de penetración parcial (JPP) , con o sin refuerzo de filete, el cálculo para establecer las dimensiones de las mismas tiene características particulares que permiten pensar el diseño como estructura soldada y poder realizar una adecuada optimización estructural.

Este último concepto resulta de singular importancia en virtud que permite lograr diseños de uniones soldadas más económicos aplicando la mínima cantidad de material de aporte necesaria.

Consideraciones bajo cargas estáticas

Como se ha señalado en los párrafos anteriores, en el caso de las uniones a tope, la sección resistente de soldadura cumple las mismas condiciones que las secciones resistentes de los materiales a unir, también conocido como criterio de igualación de resistencia.

Cuando el componente o la estructura metálica está sometido a cargas estáticas, únicamente, el criterio para el diseño, tomado como límite estructural, se encuentra basado para muchos códigos en el criterio de fluencia donde la tensión de fluencia (σy), afectada por un determinado margen de seguridad o coeficiente de seguridad (n) se transforma en una tensión admisible (σa), siendo esta última el límite de diseño fijado para el cálculo estructural.

Este criterio de diseño también se lo denomina convencional o por tensión admisible (DTA o ADS la sigla en inglés).

Un criterio de diseño y cálculo menos conservativo que el método de diseño por tensión admisible es el método de diseño por factor de carga y resistencia (DFR o LRFD la sigla en inglés) utilizado ampliamente en los códigos como el de la AISC (USA) [5], Eurocode3 (Unión Europea) [6], CIRSOC 301 (Argentina) [7], entre otros.

En dicho criterio la resistencia de diseño (FR) de los elementos estructurales y consecuentemente de las uniones soldadas, deberá ser el valor más bajo o límite inferior calculado mediante la siguiente expresión:

$$F_R = \phi\, F_{BM}\, A_{BM} \qquad (1)$$

$$F_R = \phi\, F_S\, A_S \qquad (2)$$

Siendo:

F_{BM} Resistencia nominal a la tracción del material base
F_S Resistencia nominal a la tracción del metal de aporte
A_{BM} Area de la sección del material base
A_S Area de la sección de soldadura
ϕ Factor de resistencia

Dependiendo del código, norma o reglamento utilizado para el diseño y cálculo, el factor ϕ, en función del tipo de soldadura y tensión actuante, puede variar entre 0,7 y 0,95.

Diseño de filetes

El diseño de las juntas a filete, a diferencia de las denominadas juntas a tope, donde las condiciones para el diseño mecánico de éstas se encuentran implícitas en el cálculo de los componentes o partes estructurales que constituye la estructura soldada, la soldadura de filete tiene su particular forma para el cálculo. .

La evaluación de las tensiones en una junta de filete, ya sea aplicando el criterio

ADS o LFRD para ele análisis, es compleja pero resulta aceptable para los cálculos, comprobado desde el punto de vista empírico, considerar como tensión límite sobre el área resistente del filete, a la tensión de corte en el sentido longitudinal del mismo.

Esta definición de calcular el filete con dicha tensión, es independiente de la dirección y sentido de los esfuerzos actuantes sobre el mismo.

Los códigos estructurales establecen control sobre estos aspectos geométricos del filete. En el control geométrico del filete se utilizan plantillas goniométricas, usualmente llamadas catetómetros, que permiten controlar en filetes terminados, el tamaño del cateto.

Otro aspecto importante es controlar la penetración del filete o fusión del vértice, así como la fusión sobre los lados del filete, esto se puede realizar con cupones de trabajo o en una calificación por medio de una sección de filete con preparación macrográfica.

En los códigos, como AWSD1.1 [8] o en el Reglamento CIRSOC 304 [9], se debe verificar una compatibilidad entre el tamaño de cateto calculado y el espesor del metal base debiendo en caso de ser necesario ajustar el tamaño al mínimo requerido por el código.

La tabla 1 muestra el mínimo tamaño de cateto requerido para filetes estructurales según AWS D1.1 [8] y CIRSOC 304 [9].

Espesor del material base [mm]	Tamaño mínimo de cateto [mm]
$t \leq 6$	3
$6 \leq t \leq 12$	5
$12 \leq t \leq 20$	6
$20 < t$	8

Tabla 1. Tamaño mínimo de cateto en función del espesor del material base

Consideraciones bajo carga cíclica

En otro orden si el componente o estructura se encuentra sometido a cargas dinámicas cíclicas, el diseño de la unión soldada deberá efectuarse bajo el criterio de fatiga.

Las estructuras vehiculares de transporte están normalmente sometidas a un proceso de fatiga de alto número de ciclos (HCF, sigla del inglés). La fatiga HCF ocurre bajo un comportamiento lineal-elástico del campo de tensiones y deformaciones.

El proceso cíclico de iniciación de la fisura por fatiga representa hasta un 90% de los ciclos hasta alcanzar el tamaño crítico que provoca la rotura. Sin embargo esta forma tradicional del diseño por HCF presupone que con tensiones aplicadas por debajo del límite de fatiga del material podemos tener una vida indefinidamente larga.

Lamentablemente este criterio no se cumple en todos los casos debido a que muchas de las estructuras y/o componentes presentan defectos tipo fisuras con

origen en la fabricación (por ejemplo soldaduras) o que pueden ser desarrolladas como daños, durante la etapa primaria del servicio.

De esta forma gran parte de la vida aparece ocupada por el proceso de propagación o crecimiento de fisura por fatiga, la cual es analizada con una metodología basada en la mecánica de la fractura.

Por su parte los efectos geométricos de los elementos estructurales tienen un efecto directo sobre el comportamiento a la fatiga para un determinado acero, este efecto se determina en el cálculo por medio del factor de entalla (Kt).

En las normas para el cálculo o en los códigos estructurales, aparecen tablas o bibliotecas de valores Kt para diferentes formas de entalla.

Fabricación

La realización de las soldaduras en producción, requieren para estructuras vehiculares de transporte el seguimiento de un código constructivo (AWS D1.1 [8] o el Reglamento CIRSOC 304 [9]), el cual fije las pautas para la elaboración por escrito y como parte de la documentación de ingeniería, de las especificaciones de procedimientos de soldadura (EPS) y la calificación de los mismos con la consiguiente elaboración de los registros de calificación de dichos procedimientos (RCP).

Cada EPS deberá definir claramente el diseño de la junta, en relación con el diseño y cálculo de la unión soldada, el o los procesos de soldadura a aplicar junto con el tipo de consumible, en función del acero estructural que se ha seleccionado y los parámetros operativos típicos, además de otros parámetros que hacen a la soldabilidad del material base o a cubrir el aspecto metalúrgico.

Por su parte, la metodología de fabricación debe también considerar la necesidad de trabajar con soldadores u operadores calificados.

Inspección

Finalmente la aplicación de un código o normativa específica para la fabricación de estructuras soldadas en acero para uso en transporte vehicular de fluidos y gases combustibles debe contemplar la elaboración de un plan de inspección de las soldaduras que incluya tanto inspección visual como no destructiva, con el correspondiente criterio de aceptación, para las posibles discontinuidades encontradas.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un procedimiento de integridad, que forma parte de un Programa de Evaluación de la Integridad de Estructuras Portantes de Vehículos para el Transporte de Carga, el cual podría ser considerado para su incorporación, como base de diseño y fabricación, para la normalización de la homologación de vehículos de transporte de carga, por el Instituto Argentino de Normalización y certificación IRAM.

Dicho procedimiento debe contemplar:

- Evaluación y Criterios de Aceptación de elementos estructurales

- Diseño y Fabricación de uniones soldadas
- Análisis de Fatiga
- Inspección

Desde el punto de vista del diseño y la fabricación de las estructuras soldadas de acero para aplicaciones de este tipo de vehículos, es necesario adecuarse a normas y/o códigos específicos que determinan particularidades para el diseño de las uniones soldadas, tanto bajo condiciones de carga estática como dinámica y cíclica.

En el presente trabajo se han mencionado normas de aplicación de uso internacional, que pueden ser utilizadas para su incorporación, considerando las características particulares y estado de nuestras rutas.

Además dichas normativas tienen la finalidad de estandarizar procedimientos de soldadura, garantizar la calidad del producto a través de la calificación de los métodos para al inspección y el control de calidad. De esta forma se establece también, de manera estandarizada, el criterio de aceptación de discontinuidades que permita garantizar la integridad estructural de las soldaduras.

La utilización de la Simulación Computacional, mediante el planteo de modelos de Elementos Finitos, proporciona una herramienta ingenieril adecuada y capaz de asegurar una correcta evaluación de la integridad estructural. Mediante la aplicación de estas técnicas de evaluación se evitarían costos adicionales o riesgos estructurales y humanos, innecesarios en la etapa de diseño.

Sin dudas que estas prácticas normalizadas permiten no solo asegurar la calidad y seguridad de operación del producto, sino también optimizar el diseño y la fabricación, resultando en una mejora notable en la relación de costos.

REFERENCIAS

[1] "Specification DOT, Cargo Tank Motor Vehicle", Edición 2010

[2] Código ASME Sección XII, Edición 2010, Add. 2011

[3] Código ASME Sección VIII División 1 Edición 2010, Add. 2011

[4] Código ASME Sección VIII División 2 Edición 2010, Add. 2011

[5] AISC Specification for Structural Steel Buildings, ANSI-AISC 360-10, 2010

[6] Eurocode 3, EN 1993: Design of Steel Structures, European Committee for Standardization (CEN), 2004

[7] CIRSOC 301-2005, Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios

[8] Structural Welding Code- Steel, AWS D1.1, American Welding Society. 2010

[9] Reglamento Argentino para la Soldadura de Estructuras Soldadas en Acero, CIRSOC 304, CIRSOC-INTI, 2007