



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD PARA UNA
ESTRUCTURA TRANSPORTADORA.**

TESIS

Que para obtener el grado de:
**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN ESTRUCTURAS**

Presenta:

Edgar Isael Sánchez Campos

Asesor:

Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado

Puebla, Puebla.

Diciembre 2017



BUAP

Oficio No. 4005/2017

C. Edgar Isael Sánchez Campos
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Análisis de confiabilidad para una estructura transportadora.** Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Asesor al Dr. Joaquín Lozano Mercado.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, noviembre 13 de 2017.

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. Dr. Joaquín Lozano Mercado, Asesor del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/MCF/sco*

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610


Puebla, Puebla. A 14 de Noviembre de 2017.

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e

En atención a su oficio No. 4005/2017 en el que usted me nombra asesor de tesis:
Análisis de confiabilidad para una estructura transportadora. Que presenta el
pasante de la maestría en Ingeniería con opción terminal en Estructuras, Edgar Isael
Sánchez Campos, Matrícula: 214470346; me permito informar a usted que después
de haber revisado la tesis correspondiente, no existe inconveniente alguno en
autorizar la impresión de la misma

Lo que hago de su conocimiento, para los efectos académicos a que haya lugar.

Atentamente


Dr. José Joaquín Daniel Lozano Mercado
Asesor de Tesis

C.c.p. Interesado

Nota: este oficio deberá venir con el Vo.Bo. del coordinador de la Maestría.



CONTENIDO

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	1
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Objetivo General.....	2
1.5 Objetivos Específicos.....	2
1.6 Metodología.....	3

Capítulo 2. Teoría de confiabilidad

2.1 Introducción.....	5
2.2 Conceptos de probabilidad empleados en un análisis de confiabilidad.....	6
2.2.1 Probabilidad.....	6
2.2.2 Variable aleatoria.....	7
2.2.3 Histograma.....	7
2.2.4 Función de densidad de probabilidades (FDP).....	7
2.2.5 Función de distribución acumulada (FDA).....	7
2.2.6 Mediana.....	8
2.3 Confiabilidad Estructural.....	8

2.4 Variables involucradas en el modelo general.....	12
2.5 Variables involucradas en el modelo propuesto.....	12
2.5.1 Variables de carga.....	12
2.5.2 Variables de resistencia.....	14
2.5.3 Esfuerzos y desplazamientos en la estructura transportadora.....	14
2.6 Método de Simulación de Monte Carlo.....	15

Capítulo 3. Modelado y simulación

3.1 Antecedentes generales de la estructura transportadora.....	18
3.2 Consideraciones realizadas sobre los parámetros estructurales.....	19
3.2.1 Materiales.....	19
3.2.2 Cargas en la estructura y desplazamientos máximos.....	19
3.3 Análisis estructural.....	19
3.4 Desarrollo de la estructura transportadora por el M.E.F.....	21
3.4.1 Resultados de desplazamientos y esfuerzos en la estructura.....	23
3.4.2 Desplazamientos operación normal.....	24
3.4.3 Desplazamientos operación ascenso.....	25
3.4.4 Desplazamientos operación descenso.....	26

3.4.5	Esfuerzos operación normal.....	27	
3.4.6	Esfuerzos operación 14° ascenso.....	30	
3.4.7	Esfuerzos operación 14° descenso.....	33	
3.5	Propiedades mecánicas de los materiales.....	35	
3.6	Resumen de resultados para los desplazamientos máximos.	35	
3.7	Resumen de resultados para esfuerzos de tensión en la estructura.....	35	
3.8	Análisis de confiabilidad estructural.....	37	
3.8.1	Histograma y curva o función de ajuste.....	37	
3.8.2	Funciones de densidad de probabilidades (FDP).....	37	
3.8.3	Curva de función de distribución acumulada (FDA).....	37	
3.8.4	Resumen estadístico y de percentiles.....	38	
3.8.5	Tabla de resultados para esfuerzos con un porcentaje de probabilidad del 95%.....	41	
3.8.6	Medias de distribución para la FDP de Carga.....	41	
3.8.7	Función de densidad de probabilidades de la Resistencia del material.....	43	
3.9	Probabilidad de falla para la estructura transportadora.....	44	
Capítulo 4.			
Conclusiones y recomendaciones.....			46
Referencias.....			48
Apéndice A.....			50

RESUMEN

En este trabajo de investigación se presenta una metodología para la evaluación de la confiabilidad estructural para una canastilla transportadora, para ello se desarrolló un modelo basado en el Método de los Elementos Finitos con ayuda del programa Abaqus, y un modelo estadístico generado a partir de las variables de carga y resistencia con la simulación de Monte Carlo.

Esta investigación tiene como objetivo presentar el uso de una metodología probabilística, para la obtención de los valores de esfuerzos en una estructura, por medio de los modelos antes mencionados, la estructura para este análisis es una canastilla transportadora, que estará sometida a cargas gravitacionales en diferentes posiciones, como son ángulos de ascenso y descenso a 14° de inclinación y operación normal con un ángulo de 0° . Los resultados numéricos obtenidos de ambos modelos muestran que esta metodología es capaz de definir probabilísticamente el nivel de la confiabilidad estructural para la canastilla transportadora.

ABSTRACT

In this research work, a methodology for the evaluation of the structural reliability for a conveyor hanger is presented, for which a model based on the Finite Element Method was developed with the help of the Abaqus program, and a statistical model generated from the load and resistance variables with the Monte Carlo simulation.

This research aims to present the use of a probabilistic methodology, to obtain the stress values in a structure, by means of the models mentioned above, the structure for this analysis is a conveyor hanger, which will be subject to gravitational loads in Different positions, such as angles of ascent and descent to 14 ° inclination and normal operation with an angle of 0 °. The numerical results obtained from both models show that this methodology is able to probabilistically define the level of structural reliability for the conveyor.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación.

En la actualidad el ingeniero civil dedicado al proyecto estructural requiere de herramientas aplicables al análisis de estructuras o sistemas complejos, con la finalidad de validar sus resultados y generar diseños más realistas para poder tener una idea más tangible del comportamiento estructural, nosotros pensamos que con el presente trabajo podemos dar una alternativa de ayuda para ser considerada en el proyecto desarrollado por los ingenieros diseñadores de estructuras, o por lo menos se encuentren informados del uso de algunas herramientas de análisis, basadas en probabilidad, simulaciones y que pueden ser aprovechadas para el análisis de confiabilidad.

1.2 Planteamiento del problema.

Tener los valores de las variables de una manera no determinista, que son consideradas en el diseño y revisión estructural, es decir desde un enfoque probabilístico (Funciones de Densidad) en cuanto a cargas y resistencias de los materiales, podrían ser bastante útiles para prevenir alguna falla y tener un mejor conocimiento del comportamiento estructura.

En este trabajo se obtendrán los valores de esfuerzos en una estructura de acero cuya función es transportar carrocerías automotrices, para desarrollar un análisis de confiabilidad estructural y obtener el porcentaje de confiabilidad con el que contara la estructura en operación.

1.3 Hipótesis.

El análisis probabilístico proporciona los conceptos y las herramientas necesarias y aplicables para determinar el nivel de confiabilidad de una canastilla transportadora fabricada de acero.

1.4 Objetivo General.

Determinar la probabilidad de falla para una canastilla transportadora de carrocerías, tomando en consideración los diferentes valores probables que pueden tener las cargas y resistencias.

1.5 Objetivos Específicos.

- Se desarrollará un modelo matemático de la estructura para su análisis por el Método de los Elementos Finitos.
- Se obtendrán esfuerzos de tensiones debido a diferentes condiciones de trabajo por parte de la estructura, para determinar su seguridad estructural.
- Identificar los principales puntos críticos del sistema estructural.
- Determinar la distribución de probabilidades para los valores de los esfuerzos, en los elementos principales de la canastilla transportadora, para pronosticar los valores de los esfuerzos, con un porcentaje de probabilidad del 95%.
- Presentar una metodología para el análisis probabilístico aplicado en la canastilla transportadora.

- Obtener los parámetros necesarios para realizar el análisis de confiabilidad.
- Obtener por medio de un análisis probabilístico y condiciones críticas de operación de la estructura transportadora, el factor de seguridad y el porcentaje de confiabilidad estructural del modelo.

1.6 Metodología.

- Se revisará la literatura técnica e histórica disponible sobre los temas de probabilidad y de confiabilidad estructural.
- Con el Software Abaqus, que tiene la capacidad necesaria para realizar el modelo matemático y el análisis por el Método de los Elementos Finitos para la estructura, se obtendrá una serie de esfuerzos que se generan en los puntos críticos de la canastilla transportadora, producidos por la posición de la carrocería.
- Se analizarán los efectos de las cargas gravitacionales para la creación de un modelo matemático.
- Se indicará los pasos a seguir para el análisis probabilístico de la canastilla transportadora por medio del método de Monte Carlo.
- Con los resultados generados por el software Abaqus y el método probabilístico Monte Carlo, en el Software @Risk se determinará las graficas para su estudio de la confiabilidad de la canastilla transportadora.

- Por medio del Método de los Elementos Finitos y el análisis probabilísticos, se indicará el grado de confiabilidad estructural de la canastilla transportadora.

CAPÍTULO 2

TEORÍA DE CONFIABILIDAD

2.1 Introducción.

La Teoría de la Confiabilidad, aplicada inicialmente a procesos industriales de producción en serie, fue adaptada en 1960 al campo de la Ingeniería Estructural con objeto de elaborar métodos que permitiesen determinar los niveles de seguridad de los Sistemas Estructurales, en base a un tratamiento racional de las incertidumbres existentes en los mismos. Momento a partir del cual esta área de investigación ha experimentado un fuerte impulso, y las bases teóricas desarrolladas han pasado de ser un tema de investigación académica a un conjunto de metodologías con un amplio rango de aplicación práctica.

El análisis de una estructura puede ser tan simple como complejo, vista de un modo simplista, se puede reducir a cumplir positivamente con la relación $\text{cargas} < \text{resistencias}$. En razón a lo anterior es posible definir a la seguridad estructural como el cociente de las resistencias entre cargas. Cuando el resultado de este cociente es menor que 1 ($\text{cargas} > \text{resistencias}$), puede decirse que la estructura no es capaz de soportar las acciones a las que está o podrá estar expuesta a lo largo de su vida útil. Cuando dicho valor es igual a 1 ($\text{cargas} = \text{resistencias}$) se dice que la estructura se encuentra en un estado incipiente de falla, ya que ante cualquier incremento de las cargas, la estructura llegaría a la falla. Por último en el caso donde la relación sea mayor que 1 ($\text{cargas} < \text{resistencias}$), podrá decirse que la estructura es confiable, dado que tiene un nivel de seguridad (Meli Piralla, 2008).

Por lo anterior bastaría que toda estructura tenga que cumplir con un factor de seguridad mayor que la unidad (1), para garantizar su seguridad, pero también resultaría muy importante determinar el nivel de seguridad que haga a una estructura confiable. En realidad existen incertidumbres en cargas y resistencias que según su nivel de incertidumbre, serán factores para determinar un factor de seguridad mejor razonado para la estructura. El análisis de confiabilidad estructural basado en la teoría de las probabilidades es el que se encarga de la seguridad en condiciones de incertidumbre de las estructuras.

Una interesante frase y muy instructiva debido a que destaca el hecho de que siempre estamos trabajando con variables aleatorias que tienen cierto grado de incertidumbre, atribuible a un antiguo presidente de la prestigiosa asociación escocesa de Ingenieros Estructurales:

“El diseño estructural es el arte de usar materiales que en realidad no conocemos para formar estructuras que en realidad no podemos analizar, de manera que resistan cargas que en realidad no podemos evaluar, todo esto en modo tal que el público no se dé cuenta de nuestra ignorancia”.

2.2 Conceptos de probabilidad empleados en un análisis de confiabilidad.

2.2.1 Probabilidad.

Se define como la cuantificación de las posibilidades de que un hecho ocurra (Víctor, A. V. 2016).

2.2.2 Variable aleatoria.

Se define como aquella cuyo valor no puede ser fijado con precisión en el momento de tomar una decisión. Las probabilidades de que una variable tome diferentes valores están descritas por una función de distribución de probabilidades o función de densidad de probabilidades.

2.2.3 Histograma.

Es el que permite representar la magnitud de las frecuencias de cada uno de los intervalos mediante rectángulos, barras o prismas cuyo largo es el valor de la frecuencia, mientras el ancho es la amplitud de clase determinado por los límites reales de clase.

2.2.4 Función de densidad de probabilidades (FDP).

Es una función matemática real, la cual permite calcular el valor de la probabilidad de que ocurra un evento propio del espacio muestral de un experimento; en otras palabras, permite establecer las probabilidades de que se den los diferentes valores de un variables aleatoria. Así de manera concreta, FDP se define como un espacio de probabilidad y un espacio medible.

2.2.5 Función de distribución acumulada (FDA).

Es la grafica que permite establecer los valores acumulados de frecuencias de manera porcentual, se fundamenta en los datos que se van acumulando conforme se recorren los intervalos.

2.2.6 Mediana.

De manera concreta, la media o promedio representa el valor más representativo de una colección de datos teniendo a ubicarse al centro de la misma, cuyo valor permite establecer el equilibrio en cuanto a las diferencias existentes con el resto de los valores (Víctor, A. V. 2016).

2.3 Confiabilidad Estructural.

La confiabilidad de los sistemas estructurales puede definirse como la probabilidad de que la estructura bajo consideración tenga un comportamiento apropiado a lo largo de su tiempo de vida útil. Se entiende por vida útil de una estructura el periodo de tiempo a partir de su puesta en servicio, durante el que debe mantener unas condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptable. Durante este tiempo se requerirá una conservación normal adecuada sin operaciones de rehabilitación.

Los métodos de confiabilidad se usan para estimar la probabilidad de que la estructura bajo consideraciones no cumpla los requisitos impuestos por los estados límite o modos de fallo. Los análisis de confiabilidad se aplican a modelos en que la información que se dispone no es generalmente completa. Por tanto, el valor de confiabilidad que proporcionan no es un valor absoluto sino una estimación o medida nominal de la confiabilidad. Sin embargo, si la confiabilidad se estima para estructuras diferentes, usando el mismo nivel de información y los mismos modelos matemáticos, entonces podemos realizar comparaciones muy útiles de los niveles de confiabilidad de la estructura. El diseño posterior de nuevas estructuras puede desarrollarse mediante métodos probabilísticos si se usan modelos e información similares a los usados para las estructuras existentes de las que se sabe que tienen comportamientos satisfactorios. Si los métodos probabilísticos se usan para diseñar estructuras de las que no se conozcan

estructuras existentes similares, el diseñador debe ser muy cuidadoso y verificar, en todo lo que sea posible, los modelos usados.

La confiabilidad estimada se puede usar como una medida de la seguridad de una estructura un proceso de toma de decisiones, por ejemplo, en el proceso de diseño. Se puede introducir un determinado nivel de confiabilidad como una restricción en un proceso de diseño óptimo en el que se trate de obtener la mayor utilidad (análisis costo-beneficio) teniendo en cuenta todos los posibles costos y beneficios a lo largo de toda la vida útil o esperada de la estructura.

Para poder estimar la confiabilidad estructural usando conceptos probabilísticos es necesario introducir variables aleatorias y definir los estados límites de la estructura. Una representación se muestra en la figura 2.1, en las que las dos variables, R y S, se ubican en el mismo eje de las abscisas y sus respectivas distribuciones de probabilidades en las ordenadas, si la media de la resistencia es muy superior a la de la acción, para que ocurra una falla debe presentarse un valor de acción muy arriba de la cola superior de su distribución de probabilidades, simultáneamente a la ocurrencia de un valor muy bajo en la cola inferior de su distribución de probabilidades. Para una forma dada en la distribución de probabilidades de ambas variables, la probabilidad de falla es proporcional al área sombreada en la figura 2.1 (Meli Piralla, 2008).

A la probabilidad de que la estructura no falle, $1 - P_f$, se le llama *confiabilidad* de la estructura y el término confiabilidad estructural se ha adoptado para indicar el estudio con bases probabilistas de la seguridad de las estructuras, el cual lleva a la determinación racional de los factores de seguridad que deben adoptarse en el diseño. (Meli Piralla, 2008).

Para mostrar como la probabilidad de falla representa un indicador más racional de condiciones inseguras que el factor de seguridad, se presentan algunos ejemplos. De hecho, para los dos casos de carga y resistencia en la figura 2.2, el factor de seguridad F_s es el mismo, pero la probabilidad de falla es muy diferente. Entonces, el mismo factor de seguridad se puede asociar con una amplia gama de confiabilidad, mostrando así ser una medida inconsistente de seguridad. (Ruselli, 2008).

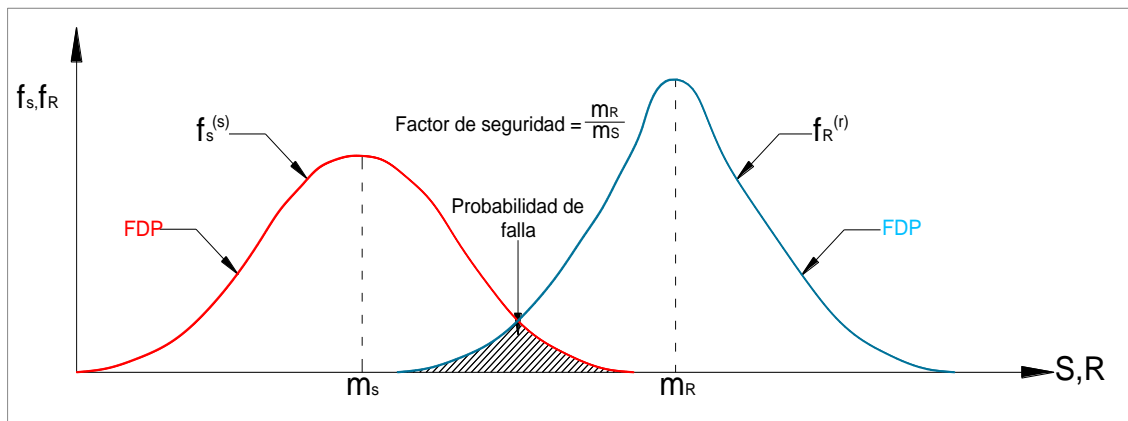


Figura 2.1. Representación del problema de seguridad estructural con dos variables (Meli Piralla, 2008).

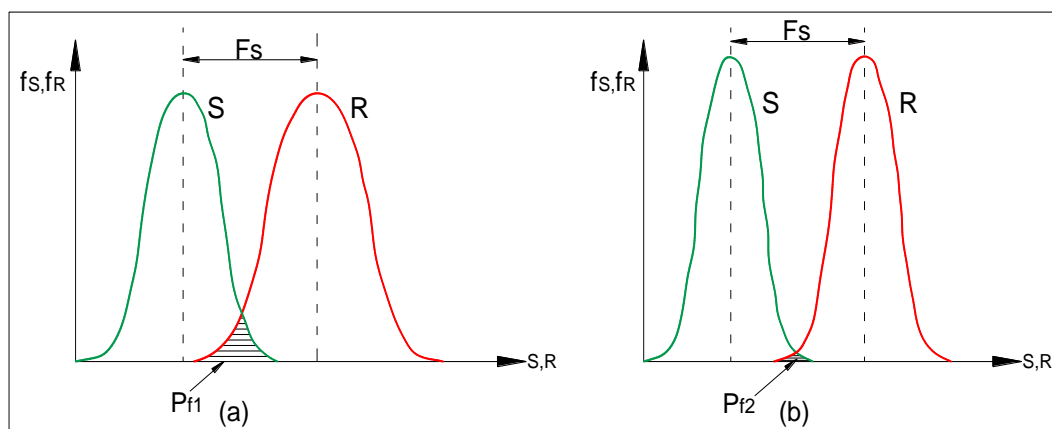


Figura 2.2

Comparación entre margen de seguridad y factor de seguridad (Ruselli, 2008).

Para apreciar los beneficios de considerar la probabilidad de falla para el análisis de confiabilidad, se muestra otro ejemplo en la figura 2.3, se presentan dos casos: el primero tiene un factor de seguridad de 1.4 y menor incertidumbre, debido a una desviación estándar más pequeña; el segundo caso tiene un factor de seguridad de 1.8 pero mayor incertidumbre, ya que tiene una desviación estándar más grande. (Ruselli, 2008).

Desde un punto de vista determinista, parecería que en el caso de $F_s = 1.8$ es más seguro, Sin embargo, cuando se comparan los valores de probabilidad de falla, el caso aparentemente más seguro tiene una mayor probabilidad de falla, demostrando que el análisis determinista no siempre es el enfoque más recomendable para tomar una decisión definitiva. (Ruselli, 2008).

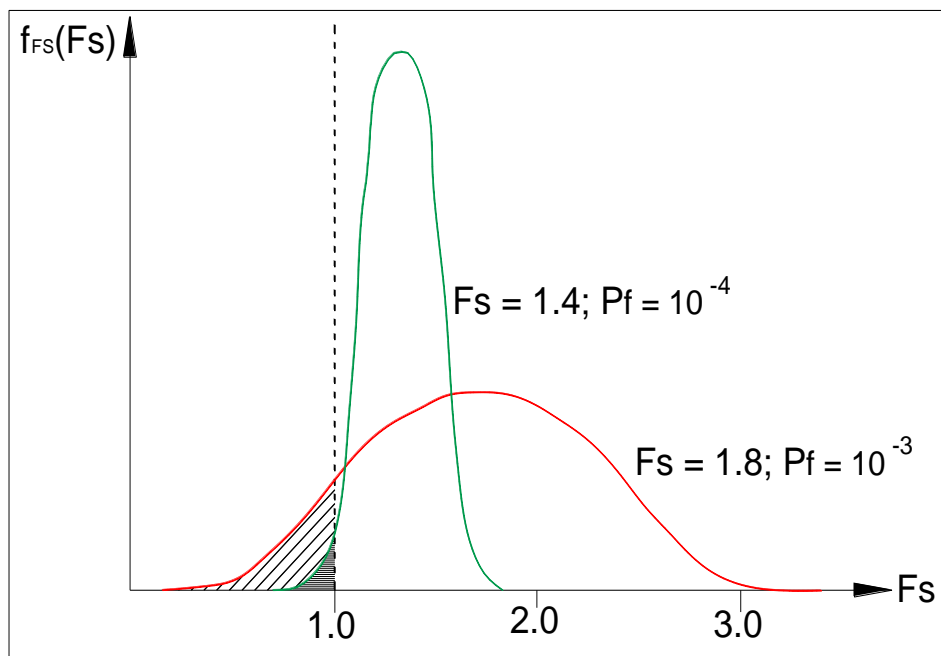


Figura 2.3

Factor de seguridad y probabilidad de falla para diferentes valores de FS
(Ruselli, 2008).

2.4 Variables involucradas en un modelo general.

Para lograr llegar a los valores de confiabilidad estructural en algún elemento que integra a la canastilla transportadora, se tendrá que evaluar primeramente los parámetros que originan las cargas y resistencias, las cargas pueden variar debido al peso propio de la canastilla, el peso de la carrocería y su posición en su operación de trabajo, la velocidad con la que se desplaza la canastilla y en cuanto a resistencia pueden existir variables en las propiedades del material.

2.5. Variables involucradas en el modelo propuesto.

Las variables que se tomaran en cuenta para este trabajo son: peso propio de la estructura transportadora y el peso de la carrocería que transporta, así como también las propiedades del material y sus defectos. Las dispersiones de estas variables se presentan mediante funciones de distribución de probabilidades.

Los valores de los esfuerzos para los diferentes elementos estructurales que integran la canastilla transportadora se determinaron a partir de un modelo numérico, y aplicándole las cargas a que está sometida, es decir la carga muerta y la carga viva.

2.5.1 Variables de carga.

Para nuestra estructura transportadora los principales componentes de las cargas serán la carga viva y la carga muerta. En el caso de las cargas muertas es el peso propio, este componente de la carga muerta se considera como una variable aleatoria. La carga viva también se considera como una variable aleatoria y es provocada por el peso de la carrocería

vehicular en sus diferentes modos de operar como puede ser: operación normal, ascenso a 14° y descenso a 14° de inclinación, figuras 2.2 y 2.3.

Aplicando estas cargas a nuestra estructura se determinan los desplazamientos en los diferentes elementos estructurales que la componen, así como también esfuerzos en diferentes puntos o elementos de la estructura.

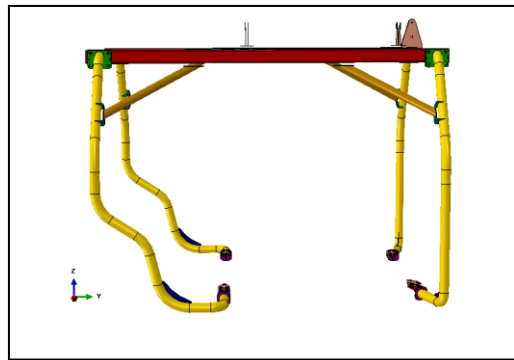


Figura 2.2.

Operación normal de canastilla transportadora

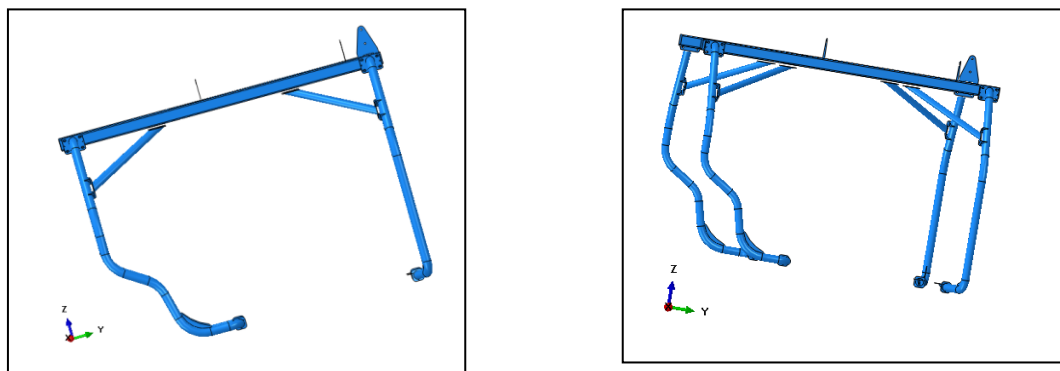


Figura 2.3

Operación ascenso y descenso a 14° de canastilla transportadora

2.5.2 Variables de resistencia.

La resistencia está en función de las propiedades del material, como el esfuerzo de cedencia σ_y y el modulo de Young E , en donde se encuentran considerados los defectos del material, por tanto, la ecuación que describe a la resistencia es de la siguiente forma:

$$R = f(\sigma_y, E) \quad (2.1)$$

Donde σ_y y E tienen valores dispersos descritos por funciones de distribución.

2.5.3 Esfuerzos y desplazamientos en la estructura transportadora.

Con los datos mencionados se obtuvieron los desplazamientos y esfuerzos en los diferentes elementos que componen la estructura transportadoras, para cada diferente caso, los resultados se pueden observar en el siguiente capítulo.

Posteriormente, con la ayuda del software @Risk se realiza el análisis estadístico con los resultados expuestos de los esfuerzos, para determinar los ajustes de las distribuciones de los datos de acuerdo con el criterio Chi-cuadrada que usa el software. Por lo que para cada parámetro se obtuvo la función de distribución de probabilidades que mejor se ajustaba a los datos analizados que caracteriza a los esfuerzos en la estructura transportadora. Con forme lo anterior los esfuerzos tienen la siguiente forma:

$$\sigma_{ET} = f(n, a, d) \quad (2.2)$$

Donde: n , a y d es el tipo de operación o inclinación con la que se desplaza la estructura, para cada tipo de operación y para cada elemento estructural se realizo el ajuste para los esfuerzos obtenidos, el primer ajuste se realizo

para una operación normal o a 0° de inclinación posteriormente dos ajustes en ascenso y descenso a 14° de inclinación para cada elemento principal de la estructura.

Finalmente se obtienen las funciones de densidad de probabilidades (FDP) para determinar el valor de los esfuerzos más probables, por medio de la curva u ojiva de función de distribución acumulada (FDA), la ojiva establecer la frecuencia acumulada relativa que representa la proporción porcentual de datos (esfuerzos) que se van acumulando conforme se recorren los intervalos.

2.6 Método de Simulación de Monte Carlo.

La simulación representa hoy en día una de las herramientas didácticas y de cálculo más importantes de la estadística. Puede verse como una reproducción numérica o representación de un fenómeno del mundo real, se emplea para dar solución a prácticamente cualquier tipo de problema, ya sea aleatorio o determinístico. Una característica distintiva es el empleo de números aleatorios, y suele llamárseles métodos de Monte Carlo, en referencia con el casino de Monte Carlo, en Mónaco.

La aplicación de las técnicas de la simulación de Monte Carlo a problemas de confiabilidad estructural es relativamente reciente, y solo ha tenido aplicación práctica con la aparición de potentes ordenadores.

Generalmente los métodos de simulación de Monte Carlo son los más costosos desde el punto de vista computacional; sin embargo, son los más seguros para la evaluación de la confiabilidad o la probabilidad de fallo de un sistema, siempre que se disponga de un generador de números aleatorios de calidad.

Los métodos de Monte Carlo tienen la ventaja de que utilizan de forma directa experimentos para obtener la información probabilística del sistema en estudio, incluso en aquellos problemas cuyas ecuaciones no pueden resolverse fácilmente. La aplicación principal de estos métodos es la de obtener soluciones de referencia y comprobar los resultados obtenidos mediante otros métodos.

El método de Monte Carlo más sencillo consiste en desarrollar un muestreo aleatorio en el espacio de variables aleatorias, que puede ser el espacio físico o el espacio normal estandarizado. Para cada muestra de las variables aleatorias de las entradas del sistema se obtienen las salidas. Entonces se evalúa la función de estado límite para concluir si la configuración considerada está en el dominio seguro o en el dominio de fallo. Este proceso se repite un número adecuado de veces y el cálculo de los fallos permite estimar la probabilidad de fallo. Esta probabilidad de fallo estimada se aproxima a un valor “exacto” cuando el número de ciclos tiende a infinito. Es por ello que a estos métodos se les llama “exactos”, aunque realmente lo que se obtiene en la práctica son estimaciones.

En resumen, el método básico de simulación de Monte Carlo consta de los siguientes pasos:

1. Definir el problema en función de todas las variables aleatorias.
2. Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
3. Generar valores de las variables aleatorias a partir de números aleatorios distribuidos uniformemente e independientemente, de acuerdo a su función de densidad.

4. Evaluar el problema de forma determinista para cada conjunto de realizaciones de todas las variables aleatorias. Calcular el valor de la función de estado límite determinando si existe fallo o no. En este trabajo se considera que existe fallo cuando la función de estado límite corresponde a un modo de fallo de la estructura que se esté analizando toma un valor de $g(x) \leq 0$.
5. Extraer la información probabilística repitiendo los pasos 3 y 4 para un número suficiente de muestras y realizaciones de las variables aleatorias. La probabilidad de fallo se determina como el cociente entre el número de casos de fallo, N_f respecto al número total realizadas de N .
6. Calcular la media, desviación estándar y ojiva de percentiles acumulados

Para nuestro caso se procederá partiendo de la función $g(x)$, que es una función de varias variables ($M = R - S$) en este caso $g(x)$, puede ser evaluada solo numéricamente a través de un análisis estructural como el Método de los Elementos Finitos para el establecimiento de variables de entrada para realizar múltiples análisis (un análisis/resultado por cada conjunto de variables de entrada), y entonces calcula el número de veces que falla y el número de veces en que no falla.

CAPÍTULO 3

MODELADO Y SIMULACIÓN

3.1 Antecedentes generales de la estructura transportadora.

La funciones principales de la estructura es la de soportar y transportar la carrocería para un vehículo de producción en serie. El sistema estructural principal se conforma por un arreglo de perfiles tubulares circulares y rectangulares conectados por medio de placas de extremo y tornillería como se puede ver en la figura 3.1.

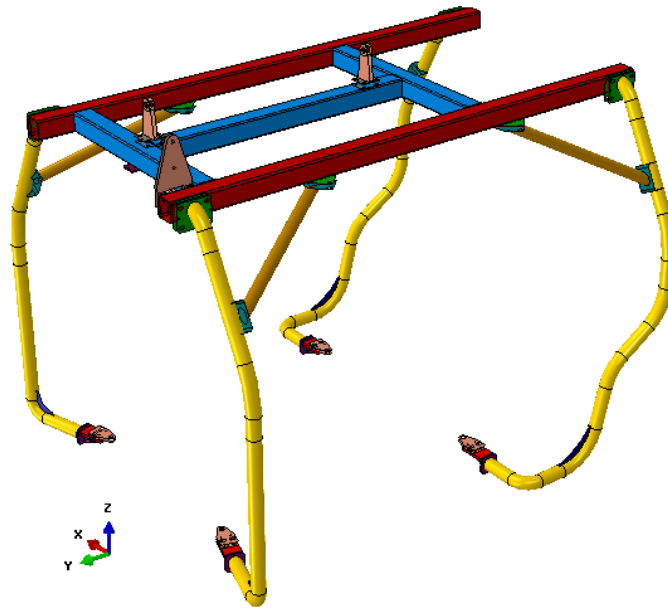


Figura 3.1

Estructura transportadora

El medio de soporte de la estructura transportadora con respecto a la línea de arrastre y transporte es a través de dos arandelas en la parte superior y ésta a su vez soporta las carrocerías por cuatro puntos de apoyo, mismos que son de nivelación regulable por medio de tornillos de precisión.

3.2 Consideraciones realizadas sobre los parámetros estructurales.

3.2.1 Materiales.

- Acero A36, A53 y 1045
- Módulo de Poisson= 0.3

3.2.2 Cargas en la estructura y desplazamientos máximos.

- Peso propio de la estructura transportadora: 320 kg
- Peso de Carrocería transportada: 450 kg
- El desplazamiento máximo aceptable es de 13mm
- Factor de seguridad 1.5 en la fatiga de esfuerzos

3.3 Análisis estructural.

Para el análisis estructural empleado en la canastilla transportadora está basado en el Método de los Elementos Finitos (M.E.F.) y fue realizado dentro de la plataforma del Software Abaqus.

Se realizó un análisis Lineal Estático para determinar desplazamientos y esfuerzos en los elementos estructurales de la canastilla, los elementos estructurales están modelados como elementos Shell, esto comprende tubos y placas, los pernos de conexión fueron considerados como elementos rígidos.

El cuerpo de la carrocería está modelado como una masa equivalente en el centro de gravedad de la estructura, esta masa se conecta a los soportes como se puede ver en la figura 3.2.

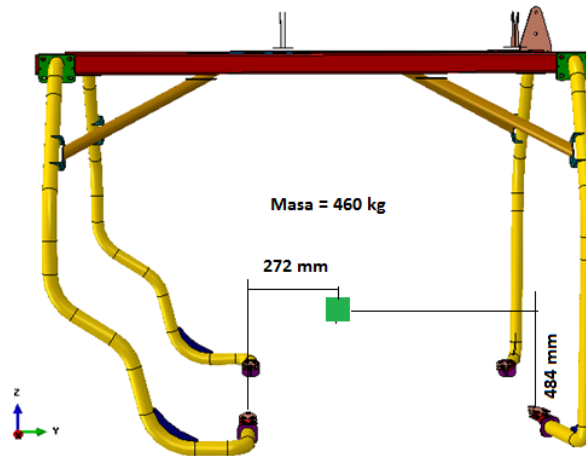


Figura 3.2. Ubicación del centro gravitacional del cuerpo de la carrocería

Se pueden observar en la figura 3.3 la ubicación de los elementos estructurales principales como: tubos cuadrados, soportes delanteros y traseros, tubos circulares y soportes superiores que componen la estructura.

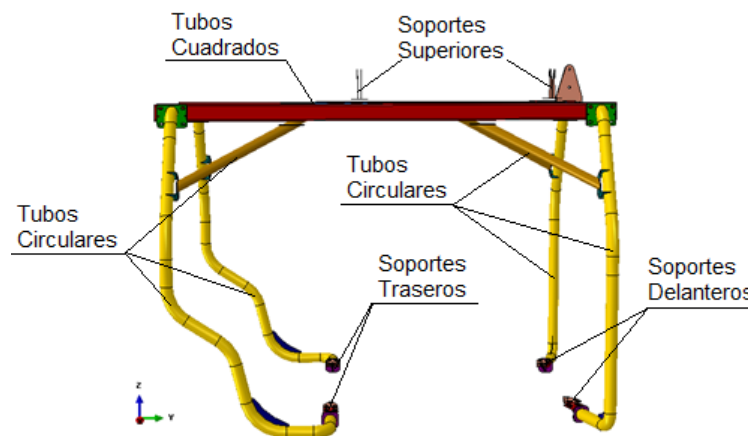


Figura 3.3. Elementos estructurales principales

Las restricciones a los movimientos o condiciones de frontera se pueden observar en la figura 3.4, son dos articulaciones y están ubicadas en los soportes superiores de la estructura.

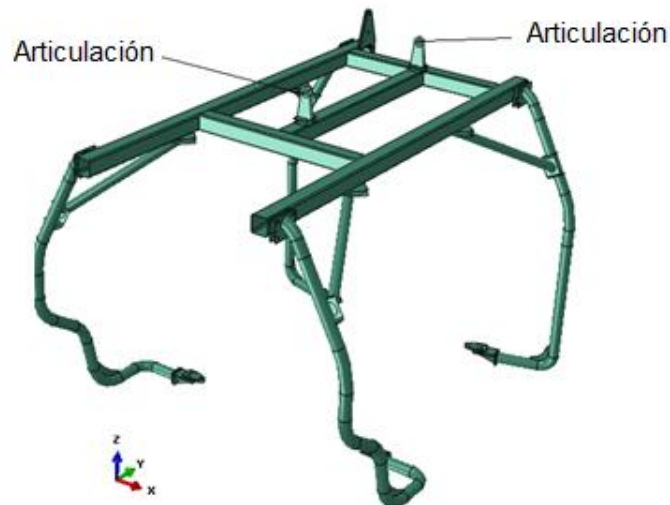


Figura 3.4
Condiciones de frontera

3.4 Desarrollo de la estructura transportadora por el M.E.F.

El programa Abaqus cuenta con los siguientes pasos para el desarrollo de este método:

1. Módulo Part. Se dibuja o importa la geometría general de la estructura.
2. Módulo Property. Esta opción presentamos las características de los materiales.

3. Módulo Assembly. Integramos en uno solo, todos los elementos estructurales de nuestro modelo.
4. Módulo Step. Se elije el tipo de análisis por realizar, que en este caso será el análisis estático lineal.
5. Módulo Load. Se aplicaron las cargas muertas y vivas, las cargas muertas las contribuyen el peso propio de la estructura transportadora, las cargas vivas las diferentes posiciones de la carrocería en su operación como son: operación normal, ascenso y descenso con 14° de inclinación también en este modulo se definieron las condiciones de frontera, para este caso fueron dos articulaciones.
6. Módulo Mesh. Toda la estructura ya integrada y determinada por elementos Shell, se procedió a darles una malla tipo triangular para todos sus elementos estructurales, como se indica en la figura 3.5.
7. Módulo Job. En este modulo se ejecuto el análisis posterior a los 6 pasos anteriormente señalados.
8. Módulo Visualización. En este modulo se presentan los resultados para la estructura trasportadora, como son desplazamientos y el valor de esfuerzos en los diferentes elementos estructurales.

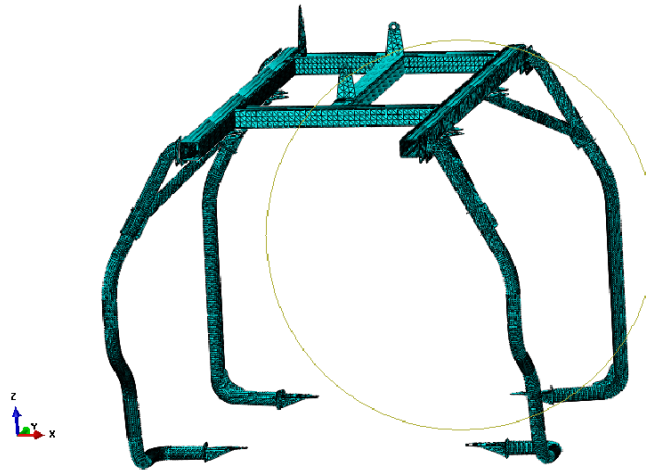


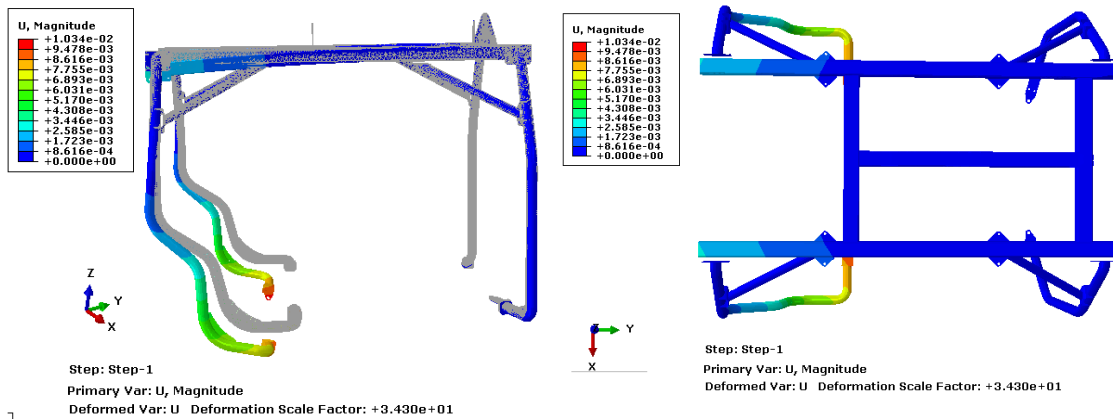
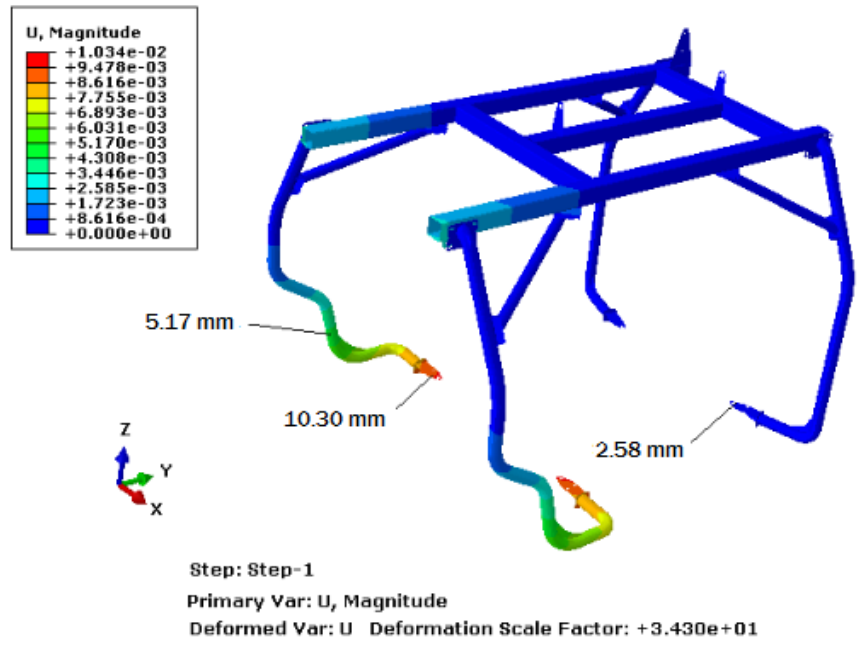
Figura 3.5

Malla para todos los elemento estructurales tipo Shell

3.4.1 Resultados de desplazamientos y esfuerzos en la estructura.

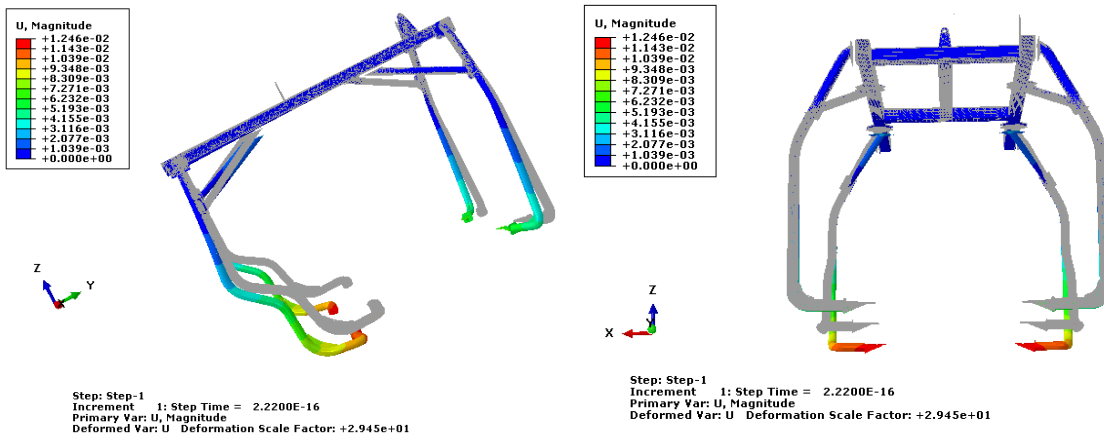
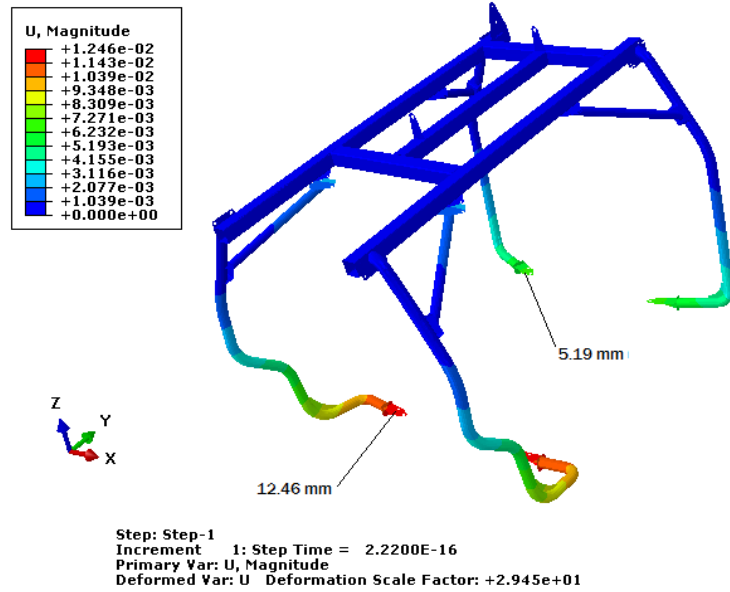
En el modulo de visualización del programa Abaqus, se pueden ver los valores de los desplazamientos y esfuerzo representados por colores según sea su magnitud, como se puede observar en las siguientes figuras.

3.4.2 Desplazamientos operación normal.



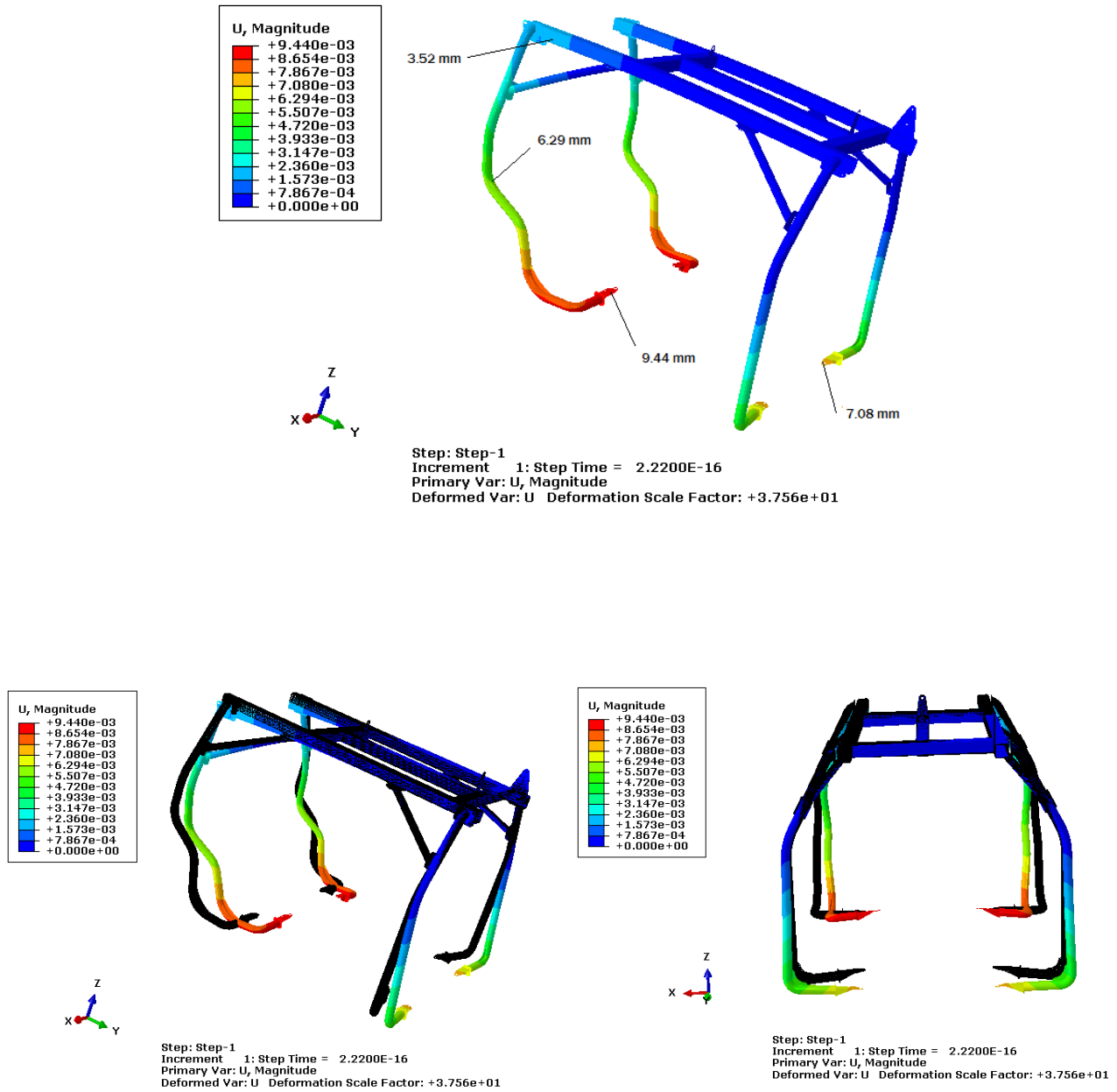
Figuras 3.6
 Desplazamientos (mm) operación horizontal

3.4.3 Desplazamientos operación ascenso.



Figuras 3.7
 Desplazamientos (mm) operación 14° ascenso

3.4.4 Desplazamientos operación descenso.



Figuras 3.8
 Desplazamientos (mm) operación 14° descenso

3.4.5 Esfuerzos operación normal.

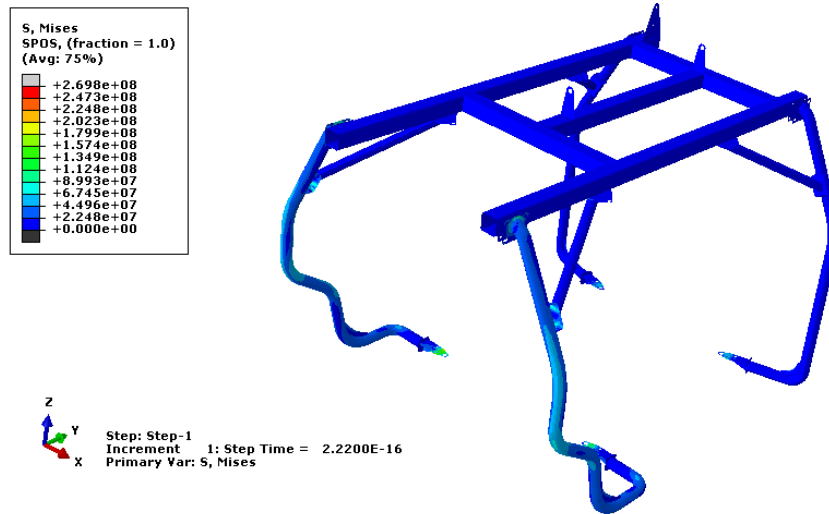


Figura 3.9. Esfuerzos Operación horizontal (Pa)

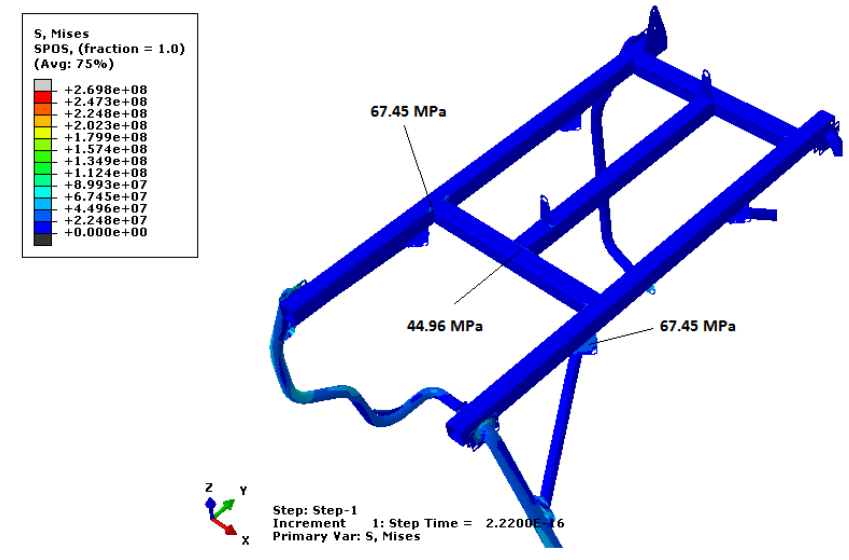


Figura 3.10. Esfuerzos en los tubos cuadrados (Pa)

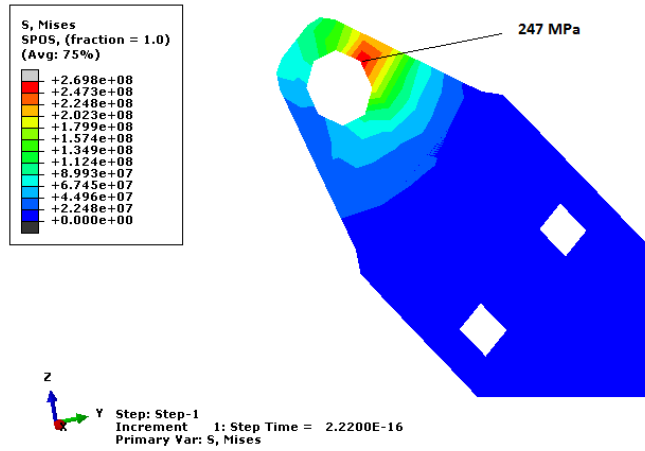


Figura 3.11. Esfuerzos en los soportes traseros (Pa)

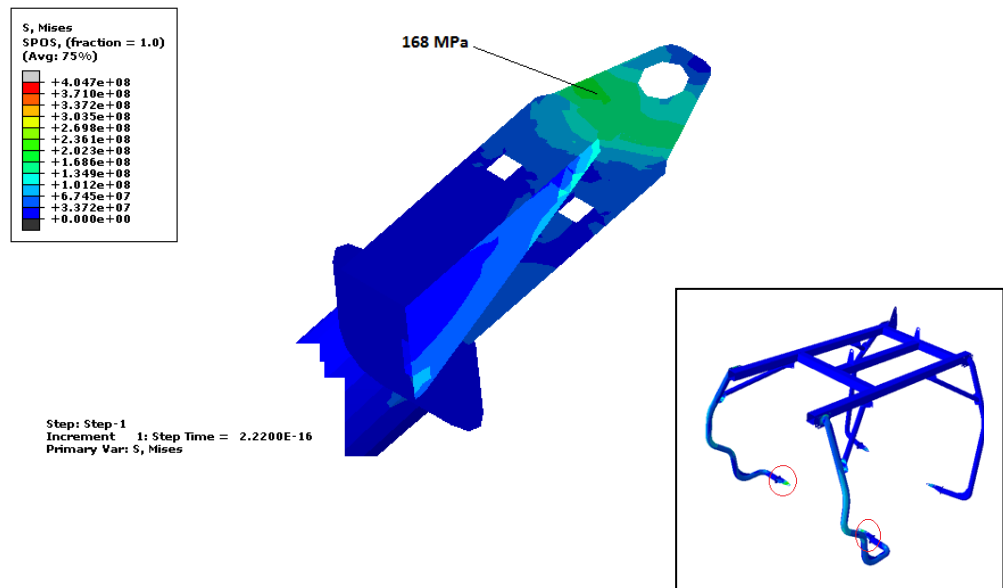


Figura 3.12

Esfuerzos en los soportes traseros (Pa)

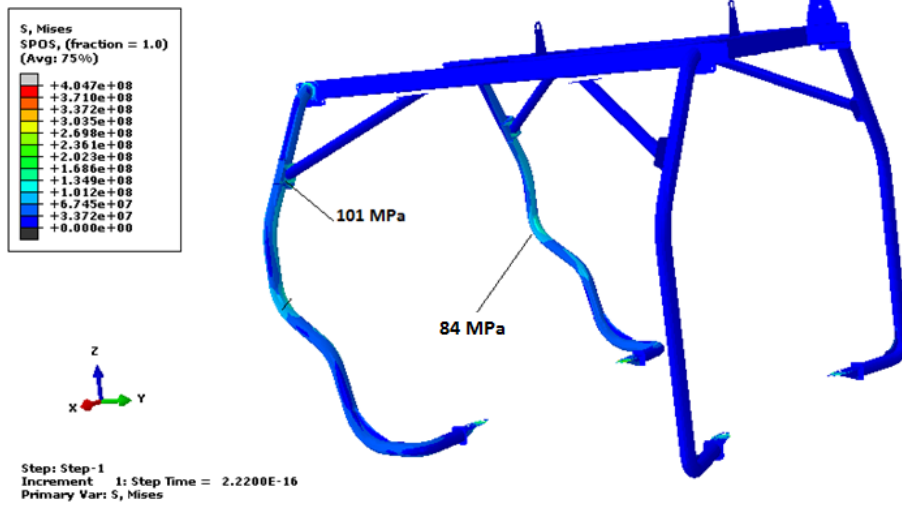


Figura 3.13

Esfuerzos en los tubos circulares (Pa)

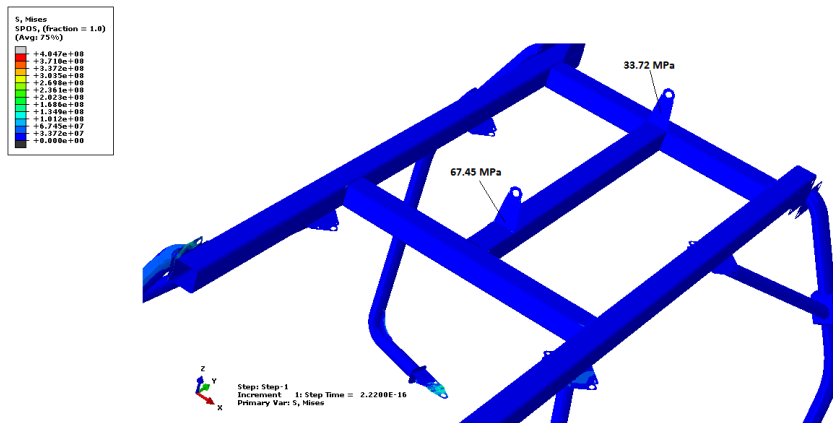


Figura 3.14.

Esfuerzos en soportes superiores (Pa)

3.4.6 Esfuerzos operación 14° ascenso.

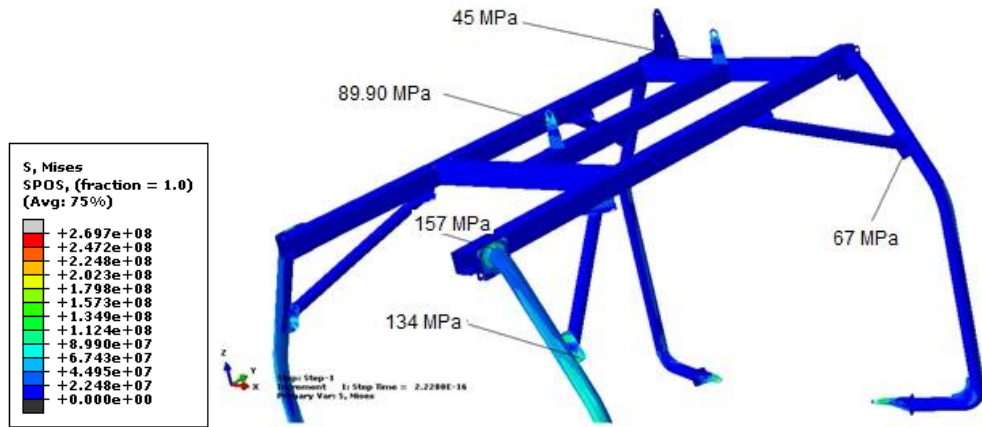


Figura 3.15. Esfuerzos en soportes superiores (Pa)

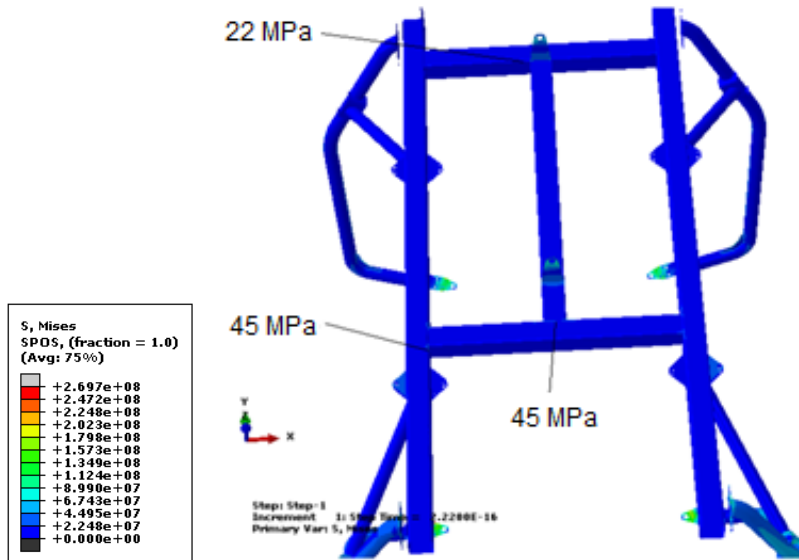


Figura 3.16. Esfuerzos en los tubos cuadrados (Pa)

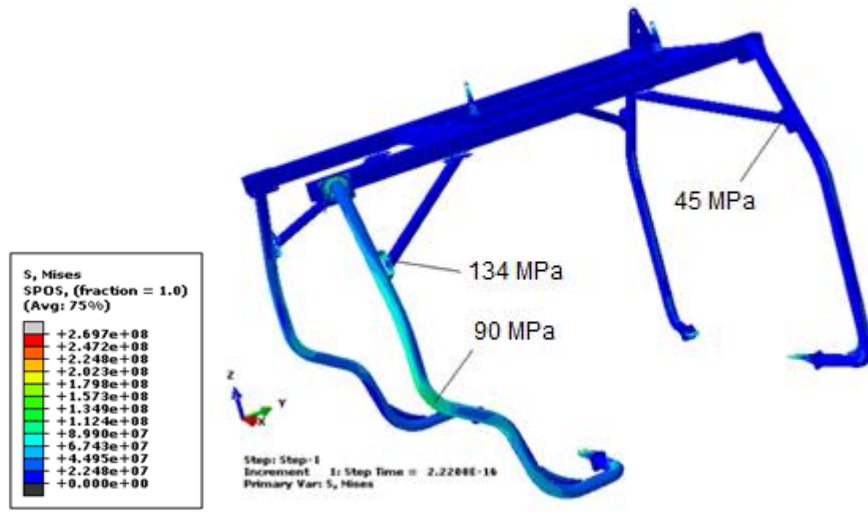


Figura 3.17

Esfuerzos en tubos circulares (Pa)

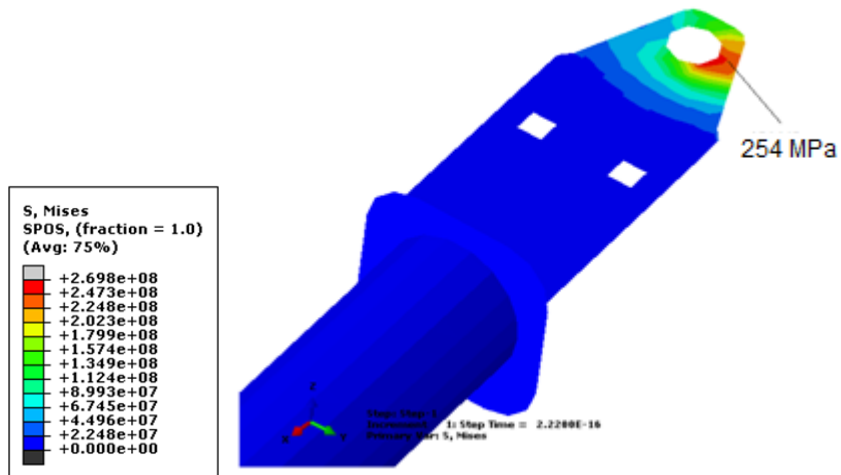


Figura 3.18

Esfuerzos en los soportes traseros (Pa)

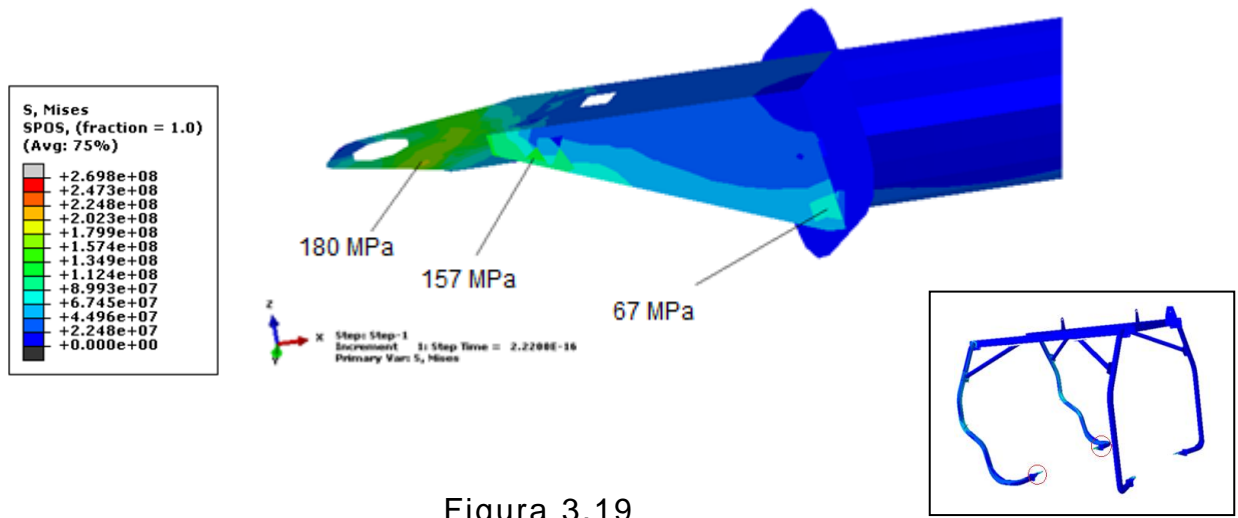


Figura 3.19

Esfuerzos en los soportes traseros (Pa)

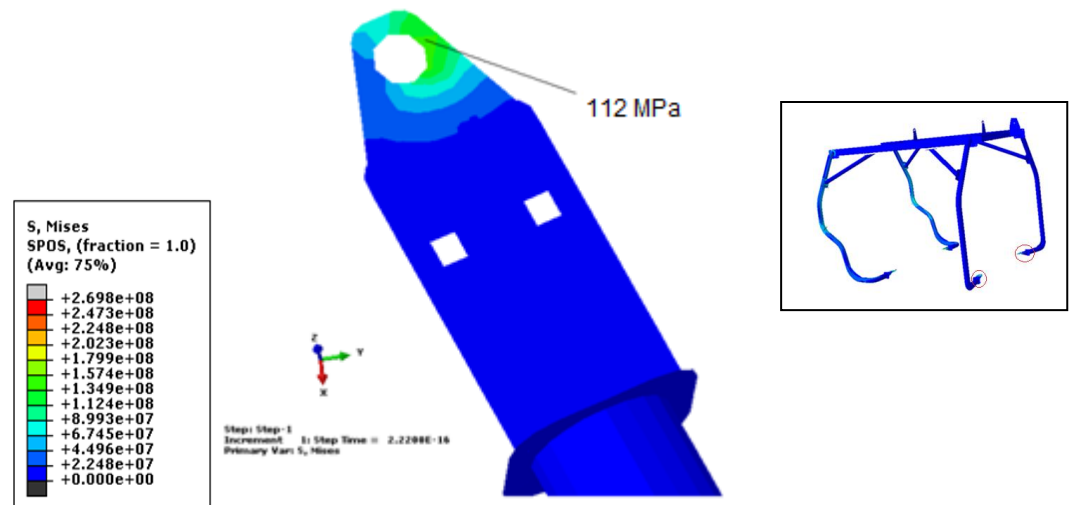


Figura 3.20

Esfuerzos en los soportes delanteros (Pa)

3.4.7 Esfuerzos operación 14° descenso.

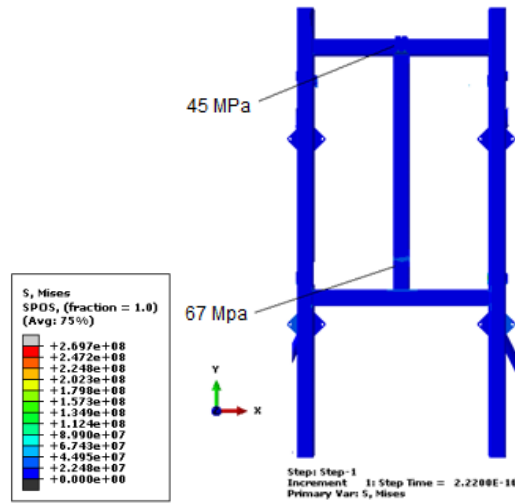


Figura 3.21 Esfuerzos en soportes superiores (Pa)

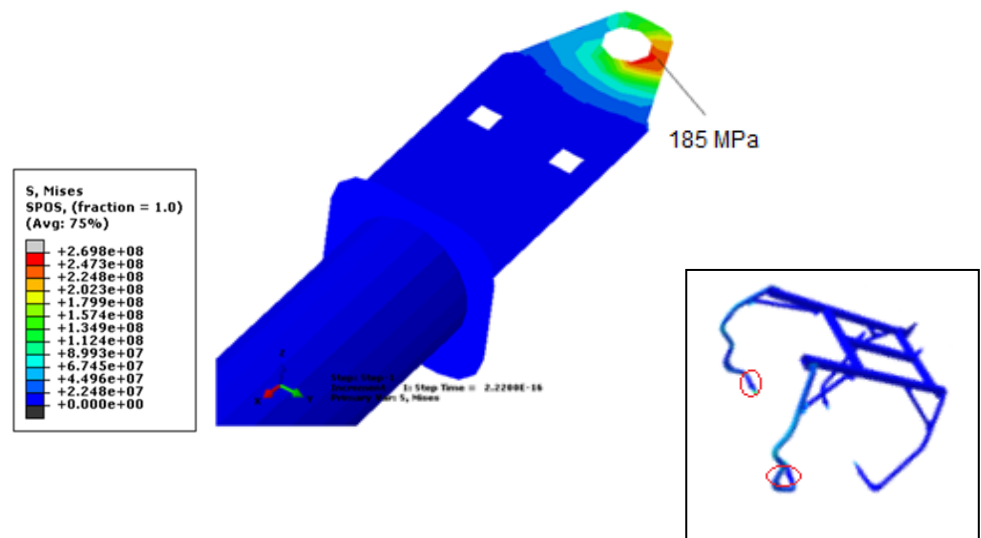


Figura 3.22

Esfuerzos en los soportes traseros (Pa)

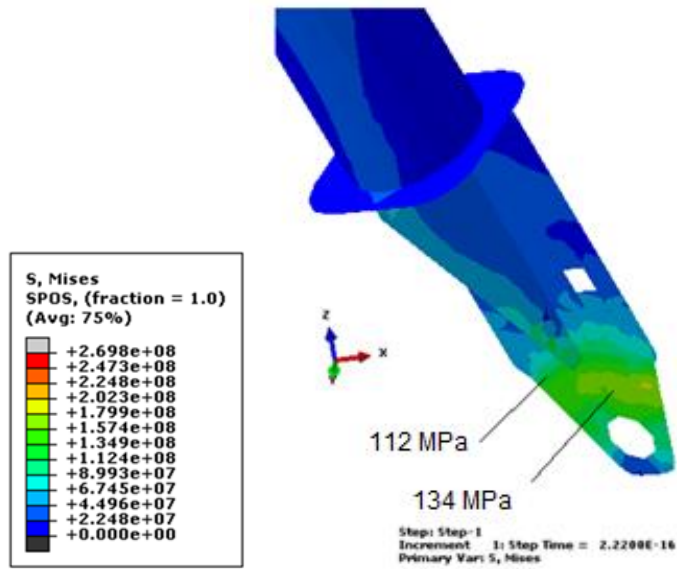


Figura 3.23

Esfuerzos en los soportes traseros (Pa)

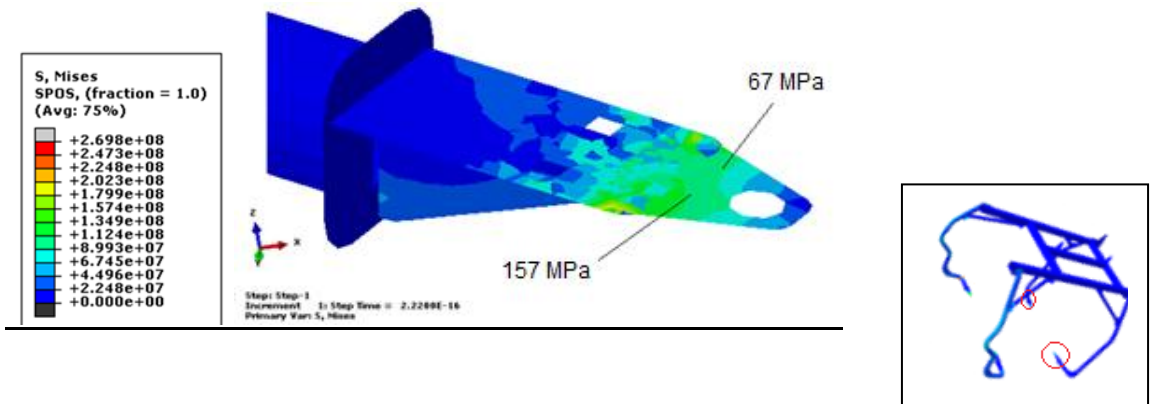


Figura 3.24

Esfuerzos en los soportes delanteros (Pa)

3.5 Propiedades mecánicas de los materiales.

Tabla 3.1. Esfuerzos permisibles

SECCIÓN	MATERIAL	Fy* (MPa)	Esfuerzos permisibles (MPa)
TUBOS CIRCULARES	A53	201	134
TUBOS CUADRADOS	A36	250	167
SOPORTES SUPERIORES	A36	250	167
SOPORTES DELANTEROS	A36	250	167
SOPORTES POSTERIORES	1045	310	207

* Valor mínimo garantizado del esfuerzo de fluencia

3.6 Resumen de resultados para los desplazamientos máximos.

Tabla 3.2. Desplazamiento máximos.

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN (mm)				
SECCIÓN	DESPLAZAMIENTO PERMISIBLE	OPERACIÓN HORIZONTAL	OPERACIÓN EN ASCENSO (14°)	OPERACIÓN EN DESCENSO (14°)
TUBOS CIRCULARES	13.0	5.17	5.19	6.29
TUBOS CUADRADOS	13.0	4.3	3.11	3.52
SOPORTES	13.0	10.3	12.46	9.44

3.7 Resumen de resultados para esfuerzos de tensión en la estructura.

Tabla 3.3. Operación normal

Esfuerzos en Tubos Cuadrados (MPa)	Esfuerzos en Soportes Traseros (MPa)	Esfuerzos en Soportes Delanteros (MPa)	Esfuerzos en Tubos Circulares (MPa)	Esfuerzos en Soportes Superiores (MPa)
67.45	247.30	168.60	101.20	67.45
50.24	224.80	134.90	84.10	47.20
44.96	202.30	101.20	70.20	40.60
40.28	179.90	67.45	67.45	38.40
30.40	157.90	60.25	60.22	35.49
27.11	134.90	53.41	59.20	33.70
26.30	112.40	49.11	44.87	
24.50	89.93	40.98	40.20	
23.04	67.45	39.22	37.80	
22.40	44.96	35.4	35.10	
	22.48	33.72	33.72	

Tabla 3.4. Operación 14° Ascenso

Esfuerzos en Tubos Cuadrados	Esfuerzos en Soportes Traseros	Esfuerzos en Soportes Delanteros	Esfuerzos en Tubos Circulares	Esfuerzos en Soportes Superiores
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
44.95	254.00	112.40	134.90	89.90
43.25	224.00	100.11	112.40	80.11
35.22	202.30	89.93	89.90	72.23
30.58	179.90	70.21	67.43	67.43
29.60	157.40	67.45	60.07	60.00
25.11	134.90	60.52	57.14	56.32
22.48	112.40	50.02	50.42	47.22
	89.93	44.96	44.95	44.95
	67.45	40.80	35.80	33.21
	44.96	35.41	25.41	29.54
	22.48	22.48	22.48	22.40

Tabla 3.5. Operación 14° Descenso

Esfuerzos en Tubos Cuadrados	Esfuerzos en Soportes Traseros	Esfuerzos en Soportes Delanteros	Esfuerzos en Tubos Circulares	Esfuerzos en Soportes Superiores
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
44.95	185.00	157.40	65.22	67.43
33.20	157.40	134.90	59.20	44.95
30.10	134.90	112.40	50.22	33.20
25.30	112.40	89.90	45.22	30.10
22.48	89.93	67.45	40.50	25.30
	67.45	44.96	35.11	22.48
	44.96	38.55	28.66	
	40.11	32.70	26.33	
	36.10	29.65	25.30	
	28.96	22.48		
	22.48			

3.8 Análisis de confiabilidad estructural.

El análisis de confiabilidad estructural está basado en la información de los esfuerzos de las tablas anteriores, para cada elemento estructural como soportes traseros, tubos circulares etc. Usando la simulación de Monte Carlo que consiste en generar un número posible de escenarios mediante el programa @Risk que presenta una serie de gráficos de probabilidad que sirven para el análisis y niveles de confiabilidad para los resultados, en este caso esfuerzos.

3.8.1 Histograma y curva o función de ajuste.

El primer paso para realizar el análisis estadístico es determinar el histograma con los datos de esfuerzos para cada elemento estructural y sus variantes de operación, también se define la función de ajuste que mejor se adapte a la distribución del histograma correspondiente, para el caso de los esfuerzos en los soportes traseros en operación horizontal, la función de ajuste fue al de Weibull, como se muestra en la figura 3.25.

3.8.2 Funciones de densidad de probabilidades (FDP).

Después de elegir la función de ajuste se procede a realizar la simulación con determinado número de iteraciones, para obtener la curva de función de distribución acumulada, los estadísticos como son la media y la desviación estándar, se puede observar en la figura 3.26 y anexo A para todos los elementos estructurales.

3.8.3 Curva de función de distribución acumulada (FDA).

En la grafica de función acumulada producto de la simulación, se puede observar el porcentaje de probabilidad que tiene cada valor de los esfuerzos

que se generan en determinado elemento estructural, para los esfuerzos en los soportes traseros en operación normal se tiene lo siguiente: para un nivel de confiabilidad del 95% se observa un valor de 261.50 MPa, ver figuras 3.27 y anexo A para todos los elementos estructurales.

3.8.4 Resumen estadístico y de percentiles.

En estas tablas se puede apreciar la información utilizada para la simulación y los valores estadísticos que se generaron como: media, desviación estándar, percentiles, etc. Estos datos se puede ver en las imagen 3.28 y anexo A para todos los elementos estructurales.

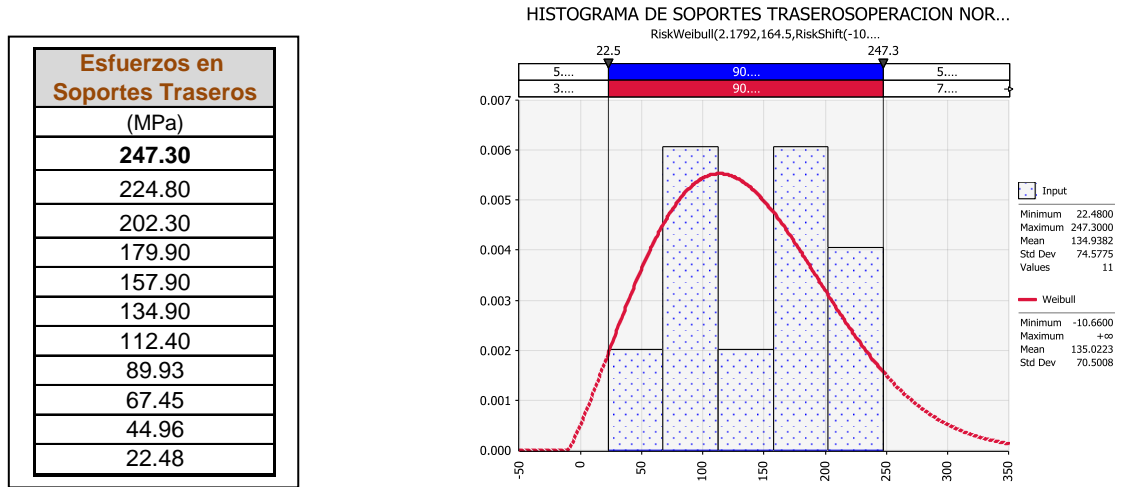


Figura 3.25

Histograma de esfuerzos en (MPa), de soportes traseros operación horizontal.

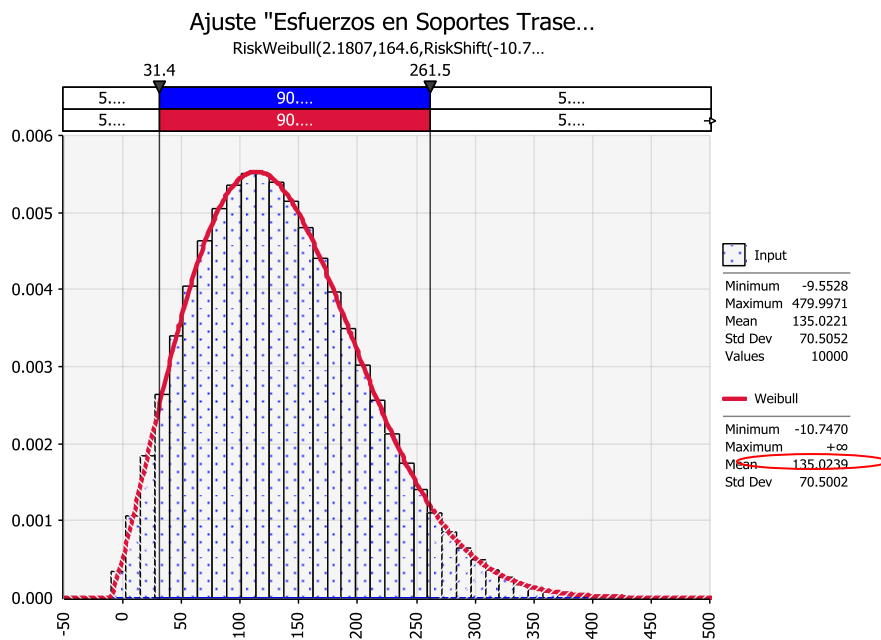


Figura 3.26

FDP de los esfuerzos en (MPa), de soportes traseros operación horizontal, después de la simulación.

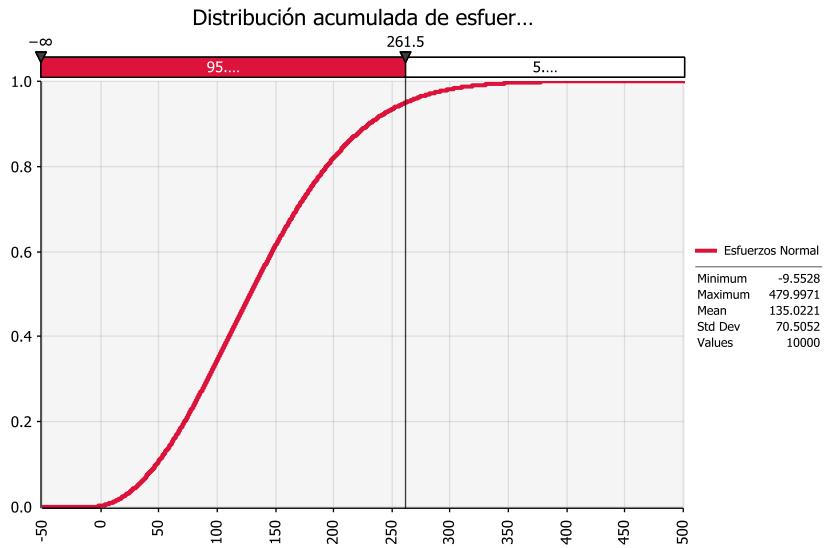


Figura 3.27

FDA de los esfuerzos en (MPa), de soportes traseros operación horizontal.

Summary Statistics for Esfuerzos		
Statistics		Percentile
Minimum	-9.55	5% 31.43
Maximum	480.00	10% 47.90
Mean	135.02	15% 60.79
Std Dev	70.51	20% 71.97
Variance	4970.980733	25% 82.20
Skewness	0.520731623	30% 91.82
Kurtosis	3.060637698	35% 101.11
Median	128.36	40% 110.20
Mode	116.53	45% 119.25
Left X	31.43	50% 128.36
Left P	5%	55% 137.70
Right X	261.45	60% 147.36
Right P	95%	65% 157.54
Diff X	230.02	70% 168.45
Diff P	90%	75% 180.44
#Errors	0	80% 193.97
Filter Min	Off	85% 210.00
Filter Max	Off	90% 230.53
#Filtered	0	95% 261.45

Figura 3.28

Datos estadísticos y percentiles, generados por la simulación.

3.8.5 Tabla de resultados para esfuerzos con un porcentaje de probabilidad del 95%.

A continuación se presentan los resultados de la simulación, obteniendo el valor o magnitud del esfuerzo más probable (95%) para los diferentes elementos estructurales, como se indica en la tabla 3.6, en esta tabla también se puede observar el valor de 261.45 MPa que se determinó anteriormente como ejemplo del proceso y de la misma forma se obtuvieron todos los valores que alimentan esta tabla.

Tabla 3.6. Resultados obtenidos después de la simulación.

Tabla de resultados para esfuerzos con un porcentaje de probabilidad del 95%	Esfuerzos en Tubos Cuadrados	Esfuerzos en Soportes Traseros	Esfuerzos en Soportes Delanteros	Esfuerzos en Tubos Circulares	Esfuerzos en Soportes Superiores
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Operación Horizontal	74.52	261.45	142.80	103.16	62.28
Operación 14° Ascenso	48.73	257.68	115.60	138.48	89.85
Operación 14° Descenso	46.86	200.00	169.00	77.82	64.20

3.8.6 Medias de distribución para la FDP de Carga.

De las distribuciones calculadas anteriormente o (FDP) para esfuerzos con un porcentaje de probabilidad del 95%, se obtuvieron también sus medias y a todos los promedios se le realizó el ajuste de distribuciones, para determinar la distribución final que le corresponde a cada elemento estructural de la canastilla transportadora. En la tabla 3.7 se puede observar los resultados de las medias y en la figura 3.29 se ilustran los ajustes probabilísticos.

Las medias de los esfuerzos obtenidos son los que van a alimentar los datos de la Carga, en el modelo de la canastilla, para determinar la probabilidad de falla en la estructura.

Tabla 3.7. Resultados de las Medias de distribución para la Carga.

Tabla de resultados para las MEDIAS de esfuerzos	Esfuerzos en Tubos Cuadrados	Esfuerzos en Soportes Traseros	Esfuerzos en Soportes Delanteros	Esfuerzos en Tubos Circulares	Esfuerzos en Soportes Superiores
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Operación Horizontal	35.66	135.02	67.88	55.47	42.12
Operación 14° Ascenso	32.99	135.50	63.11	63.72	54.84
Operación 14° Descenso	29.46	78.05	67.98	41.75	34.78

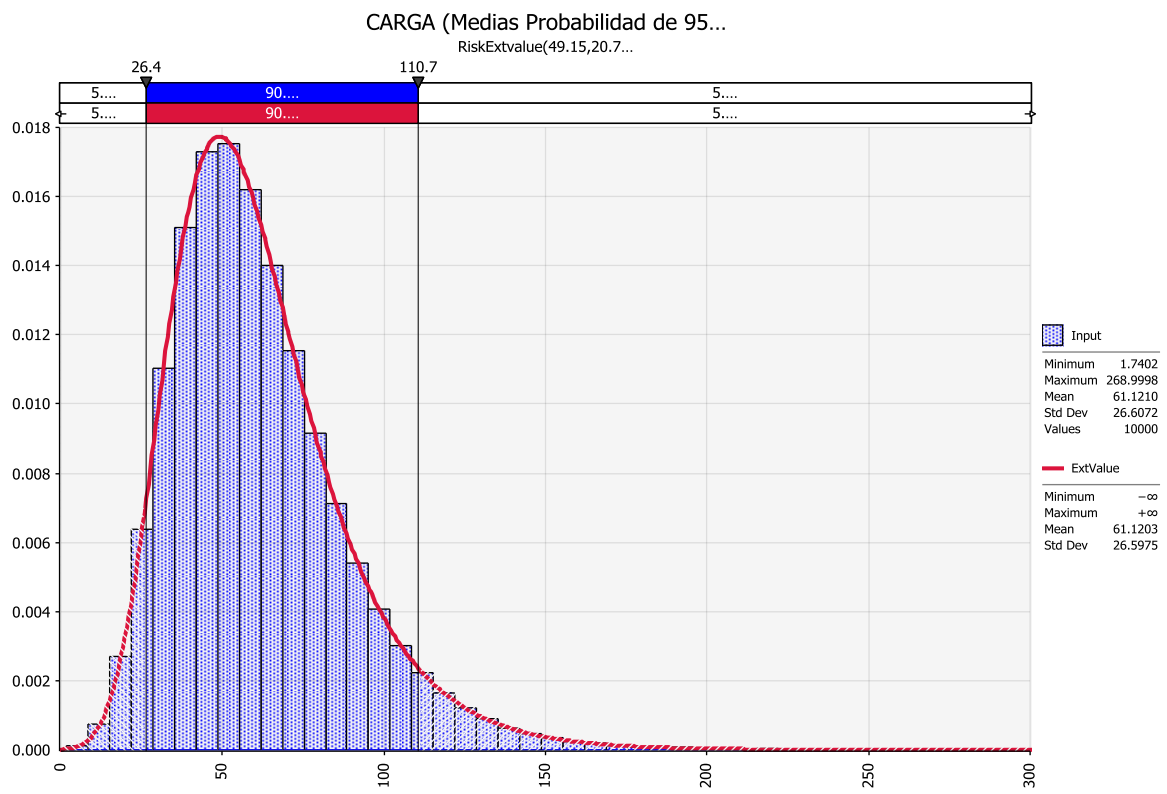


Figura 3.29

FDP de los esfuerzos en (MPa), valores de las Medias para los valores de Carga.

3.8.7 Función de densidad de probabilidades de la Resistencia del material.

Para determinar la distribución probabilística final que le corresponde a la Resistencia del material, se tomaron en cuenta los valores de los esfuerzos permisibles para los materiales como: A53, A36 y 1045 que se indican en la tabla 3.1, son estos valores los que alimentaran los datos de la Resistencia, como se observa en la figura 3.30.

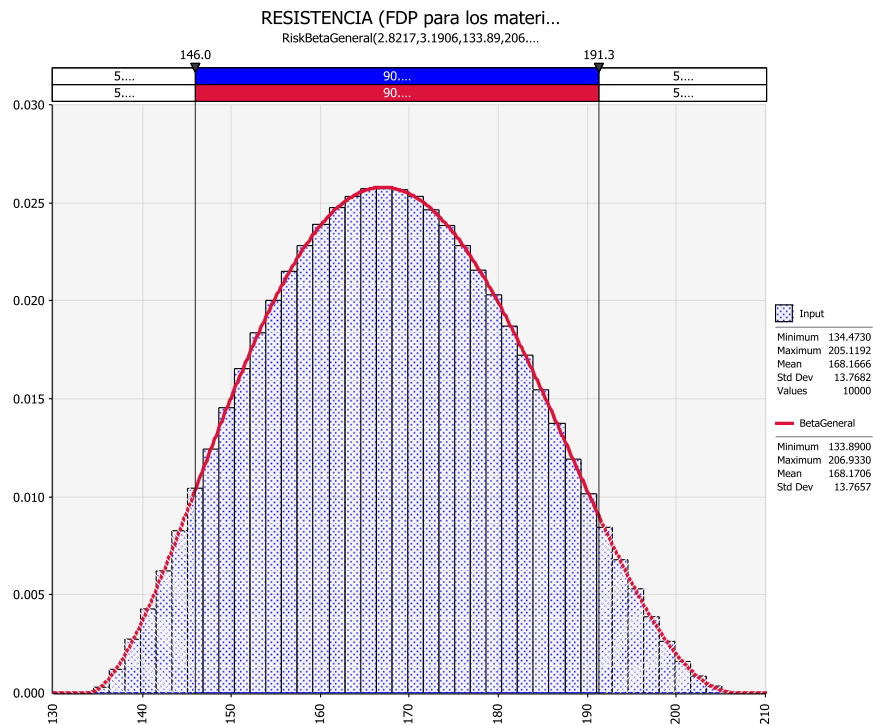


Figura 3.30

FDP de la resistencia del material Acero A53, A36 y 1045 en (MPa).

3.9 Probabilidad de falla para la estructura transportadora.

Para determinar la probabilidad de falla se tomo en cuenta dos variables, la primera es el efecto de las cargas representadas por los valores de los esfuerzos indicados en la tabla 3.7, y la segunda variable es la resistencia y se representa por los valores de la tabla 3.1.

Para obtener la probabilidad de falla se cumplió con los siguientes incisos:

- a) Para determinar la variable que representa el efecto de las cargas, se obtuvo de los valores de la tabla 3.7, la función de densidad de probabilidad (FDP) para estos valores, como se ve en la figura 3.29.
- b) Para determinar la variable de resistencia se realizó también una función de densidad de probabilidad (FDP) para el material, como se muestra en la figura 3.30, alimentada por los valores de la tabla 3.1.
- c) En la figura 3.31 se puede observar el traslape (P_f) o margen de seguridad de las FDP correspondientes a carga y resistencia, como se indico en el capítulo 2, a la probabilidad a que una estructura no falle se le llama *confiabilidad estructural* y está dada por $1 - P_f$, donde $P_f = 0.015$ (1.5%) por lo tanto el nivel de **confiabilidad de la canastilla transportadora es de 0.985 ó el 98.5% y una probabilidad de falla del 1.5%**.
- d) El factor de seguridad central está definido por la relación de la media de la resistencia $m_r = 168.16$ MPa entre la media carga $m_s = 61.12$ MPa, siendo: **$F_s = 2.75$** , los valores de las medias se pueden ver en la figura 3.31.

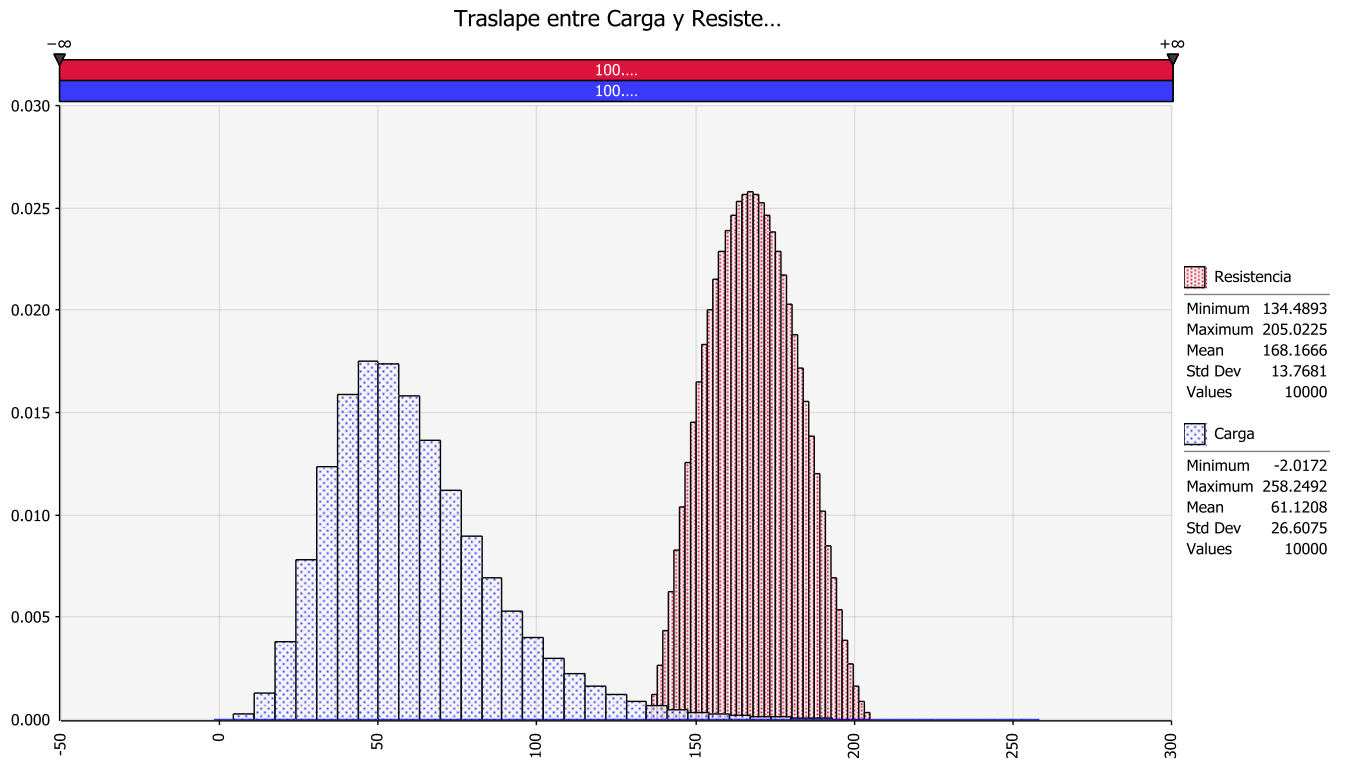


Figura 3.31

Probabilidad de falla, diferencia entre esfuerzos y resistencia.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determino la probabilidad de falla para la canastilla transportadora por medio de un análisis de confiabilidad estructural con la metodología presentada, se realizo de forma práctica, con un modelo de la canastilla transportadora, por medio (M.E.F.), con ayuda del programa Abaqus, el cual permite resolver problemas de ingeniería muy complejos en forma relativamente sencilla, también se realizo un análisis estadístico con la ayuda del programa @Risk que contiene sofisticadas funciones para la especificación y ejecución de simulaciones de modelos. Este programa respalda las técnicas de la simulación de Monte Carlo y se pueden generar distribuciones de posibles resultados, los resultados de las distribuciones de salida se pueden presentar en gráficos como: histogramas curvas acumulativas, etc.

En cuanto a resultados obtenidos finalmente se puede verificar lo siguiente:

1. Se obtuvieron los valores de desplazamientos y esfuerzos para los diferentes modos de operación de la estructura, que sirvieron para compararlos con los valores permisibles y ubicar los puntos críticos. El desplazamiento máximo es de 12.46 mm menor al permisible y ocurre en el soporte trasero en operación de ascenso a 14° de inclinación, el valor máximo del esfuerzo a tensión se ubica en los soportes traseros con un valor de 247.30 MPa en operación normal y

254.00 MPa en operación de ascenso a 14°, ambos valores son mayores al permisible de 207.00 MPa, por lo que es un zona critica.

2. Con la simulación de Monte Carlo y la función de distribución de probabilidades para los valores de esfuerzos, fue posible obtener resultados más realistas con un porcentaje de probabilidad de ocurrencia del 95% para la estructura transportadora, como se indica en la tabla 3.6.
3. La probabilidad de falla sucederá cuando los esfuerzos producidos por las cargas, superen la resistencia del material o el esfuerzo de fluencia, es de **Pf = 1.5%**, por lo que el nivel de confiabilidad de la canastilla transportadora es de **98.5%**, este resultado corresponde a un nivel elevado de confiabilidad.
4. Tomando en cuenta que la probabilidad de falla (Pf) representa un indicador más racional de condiciones inseguras que el factor de seguridad, para nuestro análisis resulto un factor de seguridad **Fs = 2.75**.

Por último se recomienda para futuros trabajos relacionados a este, se tome en cuenta la variable velocidad dentro de los modelos de análisis, debido a que la estructura transportadora está sometida a esta variable dentro de su operación.

REFERENCIAS

Bresler, T. B., & Scalzi B. J. (1973). *Diseño de Estructuras de Acero*
México: Limusa/Wiley.

Crespo Villalaz, C. (2008). *Vías de Comunicación* México: Limusa.

González Cuevas, O. (2005). *Aspectos Fundamentales del Concreto reforzado* México: Limusa.

Guzmán, E. M. (2014). *Apuntes de la clase de Estructuras de Concreto*
México: UNAM.

Meli Piralla, R. (2008). *Diseño de Estructuras* México: Limusa.

Nieves Hurtado, A. (2010). *Probabilidad y estadística para ingenieros*
México: Mc Graw Hill.

Nilson H, A. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto* Colombia: Mc Graw Hill.

Orozco Zepeda, F de J (2006). *Temas Fundamentales del Concreto Presforzado.* México: IMCYC.

Russelli, Consolata. (2008). *Probabilistic methods applied to the bearing capacity problem.* Universidad de Stuttgart, Alemania.

Víctor, A. V. (2016). *Probabilidad y estadística* México: Grupo Editorial Patria.

APÉNDICE A

Summary Statistics for Esfuerzos en Tubos Cuadrado			
Statistics		Percentile	
Minimum	21.54361679	5%	22.56124105
Maximum	363.9953072	10%	23.04073703
Mean	35.66399073	15%	23.49521351
Std Dev	21.93973023	20%	23.96559482
Variance	481.3517626	25%	24.47076272
Skewness	4.428802716	30%	25.02652601
Kurtosis	33.84297659	35%	25.64849122
Median	28.12123756	40%	26.35424204
Mode	23.17734824	45%	27.16941303
Left X	22.56124105	50%	28.12123756
Left P	5%	55%	29.25302924
Right X	74.5340378	60%	30.61933975
Right P	95%	65%	32.30685127
Diff X	51.97279676	70%	34.44570011
Diff P	90%	75%	37.23585062
#Errors	0	80%	41.0646737
Filter Min	Off	85%	46.64026227
Filter Max	Off	90%	55.74950438
#Filtered	0	95%	74.5340378

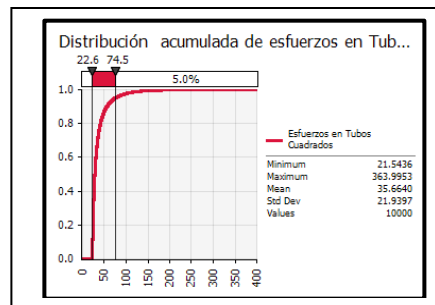
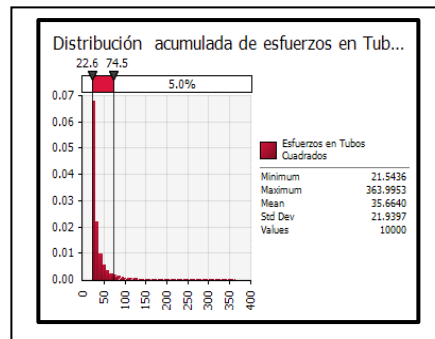


Figura A1. Esfuerzos en Tubos Cuadrados Operación Horizontal.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Trasero			
Statistics		Percentile	
Minimum	-9.71	5%	31.43
Maximum	501.90	10%	47.90
Mean	135.03	15%	60.80
Std Dev	70.52	20%	71.98
Variance	4973.263464	25%	82.19
Skewness	0.523546838	30%	91.83
Kurtosis	3.078893297	35%	101.10
Median	128.36	40%	110.19
Mode	109.30	45%	119.23
Left X	31.43	50%	128.36
Left P	5%	55%	137.69
Right X	261.49	60%	147.36
Right P	95%	65%	157.54
Diff X	230.07	70%	168.46
Diff P	90%	75%	180.44
#Errors	0	80%	193.98
Filter Min	Off	85%	210.00
Filter Max	Off	90%	230.51
#Filtered	0	95%	261.49

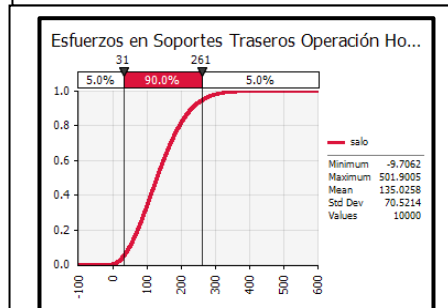
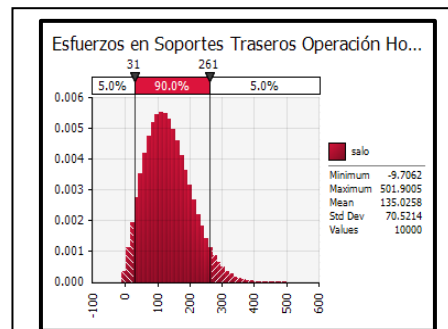


Figura A2. Esfuerzos en Soportes Traseros Operación Horizontal.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Delant			
Statistics		Percentile	
Minimum	30.31	5%	32.23
Maximum	393.72	10%	34.26
Mean	67.88	15%	36.41
Std Dev	37.55	20%	38.69
Variance	1410.147408	25%	41.11
Skewness	1.985748582	30%	43.70
Kurtosis	8.785724565	35%	46.49
Median	56.35	40%	49.50
Mode	30.49	45%	52.76
Left X	32.23	50%	56.35
Left P	5%	55%	60.30
Right X	142.80	60%	64.73
Right P	95%	65%	69.75
Diff X	110.57	70%	75.54
Diff P	90%	75%	82.39
#Errors	0	80%	90.77
Filter Min	Off	85%	101.58
Filter Max	Off	90%	116.81
#Filtered	0	95%	142.80

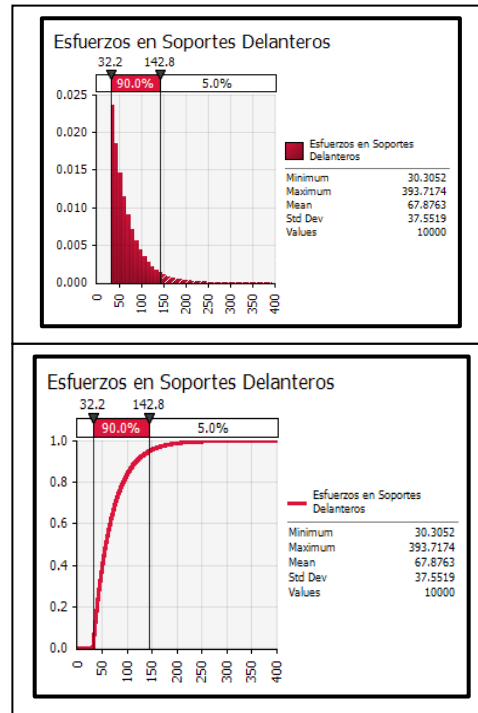


Figura A3. Esfuerzos en Soportes Delanteros Horizontal.

Summary Statistics for Esfuerzos en Tubos Circulares			
Statistics		Percentile	
Minimum	31.55	5%	32.77
Maximum	254.86	10%	34.06
Mean	55.47	15%	35.43
Std Dev	23.91	20%	36.88
Variance	571.6283272	25%	38.43
Skewness	1.985721339	30%	40.07
Kurtosis	8.778804222	35%	41.85
Median	48.12	40%	43.76
Mode	31.66	45%	45.84
Left X	32.77	50%	48.12
Left P	5%	55%	50.64
Right X	103.17	60%	53.46
Right P	95%	65%	56.66
Diff X	70.40	70%	60.34
Diff P	90%	75%	64.70
#Errors	0	80%	70.04
Filter Min	Off	85%	76.91
Filter Max	Off	90%	86.61
#Filtered	0	95%	103.17

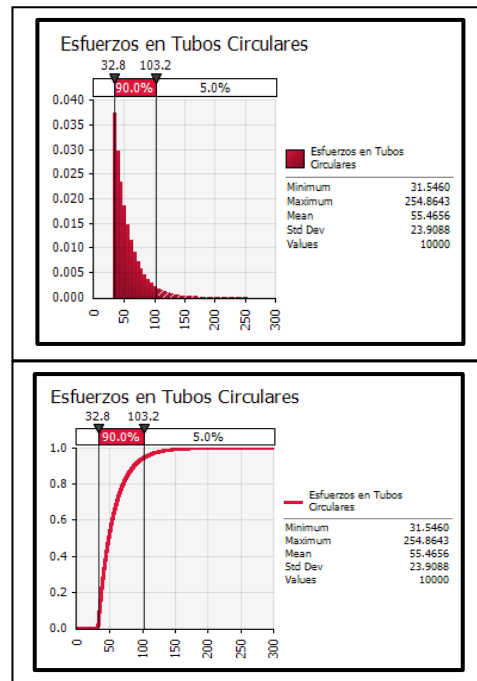


Figura A4. Esfuerzos en Tubos Circulares Operación Horizontal.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Superiores			
Statistics		Percentile	
Minimum	32.02	5%	32.53
Maximum	190.89	10%	33.08
Mean	42.13	15%	33.66
Std Dev	10.17	20%	34.27
Variance	103.4288234	25%	34.92
Skewness	2.187806536	30%	35.62
Kurtosis	12.52141487	35%	36.37
Median	39.02	40%	37.18
Mode	32.07	45%	38.06
Left X	32.53	50%	39.02
Left P	5%	55%	40.09
Right X	62.29	60%	41.28
Right P	95%	65%	42.63
Diff X	29.75	70%	44.18
Diff P	90%	75%	46.03
#Errors	0	80%	48.28
Filter Min	Off	85%	51.19
Filter Max	Off	90%	55.28
#Filtered	0	95%	62.29

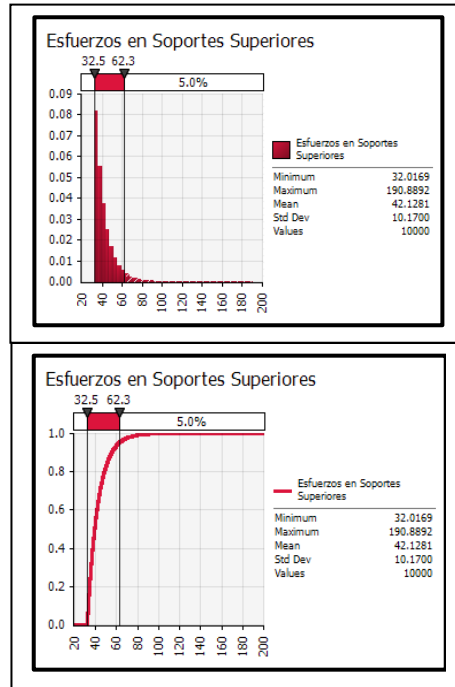


Figura A5. Esfuerzos en Soportes Superiores Horizontal.

Summary Statistics for Esfuerzos en Tubos Cuadrado			
Statistics		Percentile	
Minimum	13.40033541	5%	21.9771108
Maximum	130.3437024	10%	23.71073776
Mean	33.00078428	15%	24.98527875
Std Dev	8.472278508	20%	26.06644976
Variance	71.77950312	25%	27.04980398
Skewness	1.234874953	30%	27.97716987
Kurtosis	6.73425836	35%	28.87826663
Median	31.61026867	40%	29.77352814
Mode	29.50580841	45%	30.67899532
Left X	21.9771108	50%	31.61026867
Left P	5%	55%	32.58402933
Right X	48.73637271	60%	33.61788609
Right P	95%	65%	34.73954974
Diff X	26.75926191	70%	35.98247664
Diff P	90%	75%	37.39700825
#Errors	0	80%	39.06864839
Filter Min	Off	85%	41.15205959
Filter Max	Off	90%	44.00239871
#Filtered	0	95%	48.73637271

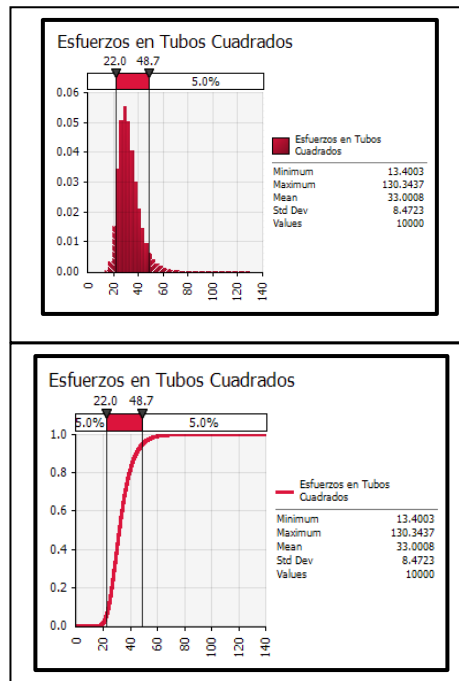


Figura A6. Esfuerzos en Tubos Cuadrados Operación Ascenso 14°.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Traseros			
Statistics		Percentile	
Minimum	-109.54	5%	20.59
Maximum	478.85	10%	44.55
Mean	135.51	15%	61.02
Std Dev	72.15	20%	74.26
Variance	5206.250244	25%	85.76
Skewness	0.182291623	30%	96.18
Kurtosis	3.065505113	35%	105.92
Median	133.34	40%	115.25
Mode	132.45	45%	124.33
Left X	20.59	50%	133.34
Left P	5%	55%	142.42
Right X	257.66	60%	151.72
Right P	95%	65%	161.40
Diff X	237.07	70%	171.69
Diff P	90%	75%	182.87
#Errors	0	80%	195.45
Filter Min	Off	85%	210.27
Filter Max	Off	90%	229.16
#Filtered	0	95%	257.66

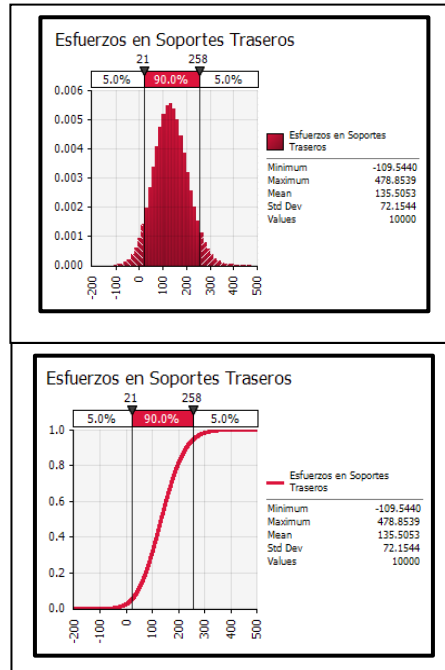


Figura A7. Esfuerzos en Soportes Traseros Operación Ascenso 14°.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Delant			
Statistics		Percentile	
Minimum	3.013673346	5%	25.64615265
Maximum	236.6918464	10%	31.39891527
Mean	63.11471268	15%	35.72213687
Std Dev	28.15102324	20%	39.43766973
Variance	792.4801095	25%	42.83096785
Skewness	0.991074229	30%	46.04909422
Kurtosis	4.582212959	35%	49.19329777
Median	58.70416094	40%	52.30784328
Mode	50.12844104	45%	55.46104944
Left X	25.64615265	50%	58.70416094
Left P	5%	55%	62.08358522
Right X	115.6166778	60%	65.65901753
Right P	95%	65%	69.51872683
Diff X	89.9705252	70%	73.7708662
Diff P	90%	75%	78.57361492
#Errors	0	80%	84.20594083
Filter Min	Off	85%	91.14058335
Filter Max	Off	90%	100.4722395
#Filtered	0	95%	115.6166778

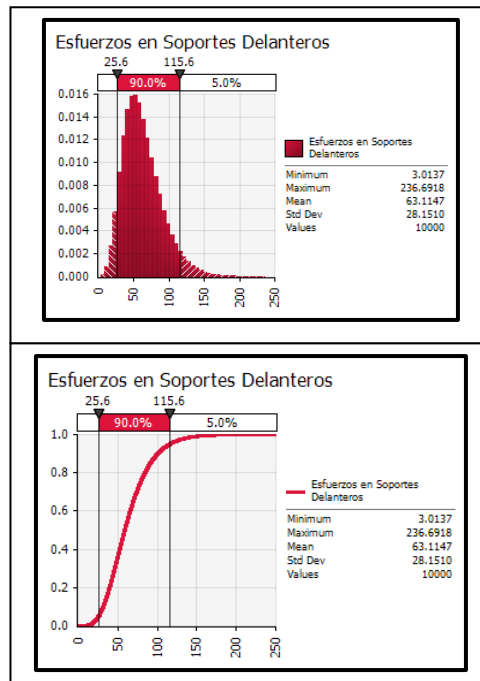


Figura A8. Esfuerzos en Soportes Delanteros Operación Ascenso 14°.

Summary Statistics for Esfuerzo en Tubos Circulares		
Statistics		Percentile
Minimum	10.33	5%
Maximum	395.41	10%
Mean	63.71	15%
Std Dev	38.40	20%
Variance	1474.458837	25%
Skewness	1.932510639	30%
Kurtosis	8.987689022	35%
Median	53.58	40%
Mode	36.26	45%
Left X	23.50	50%
Left P	5%	55%
Right X	138.47	60%
Right P	95%	65%
Diff X	114.97	70%
Diff P	90%	75%
#Errors	0	80%
Filter Min	Off	85%
Filter Max	Off	90%
#Filtered	0	95%

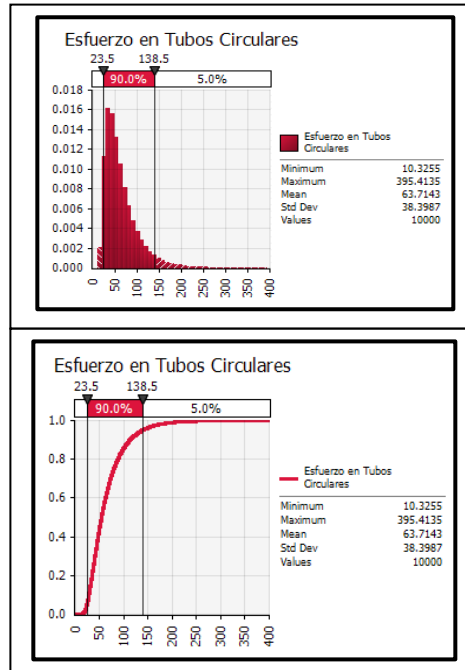


Figura A9. Esfuerzos en Tubos Circulares Operación Ascenso 14°.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Superiores		
Statistics		Percentile
Minimum	-17.36	5%
Maximum	154.53	10%
Mean	54.84	15%
Std Dev	20.66	20%
Variance	426.9061642	25%
Skewness	0.187630385	30%
Kurtosis	3.072757046	35%
Median	54.20	40%
Mode	54.46	45%
Left X	21.97	50%
Left P	5%	55%
Right X	89.86	60%
Right P	95%	65%
Diff X	67.89	70%
Diff P	90%	75%
#Errors	0	80%
Filter Min	Off	85%
Filter Max	Off	90%
#Filtered	0	95%

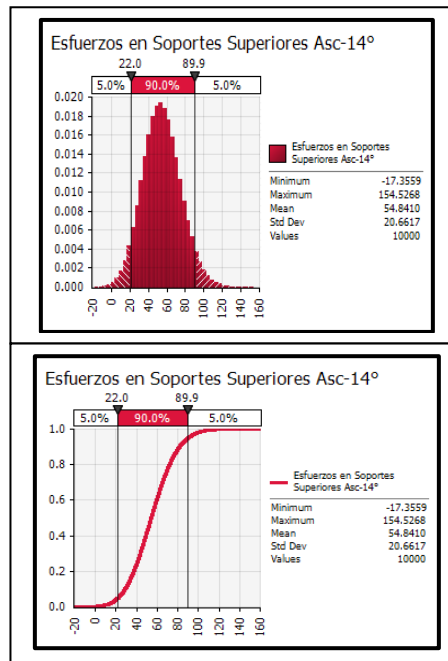


Figura A10. Esfuerzos en Soportes Superiores Operación Ascenso 14°.

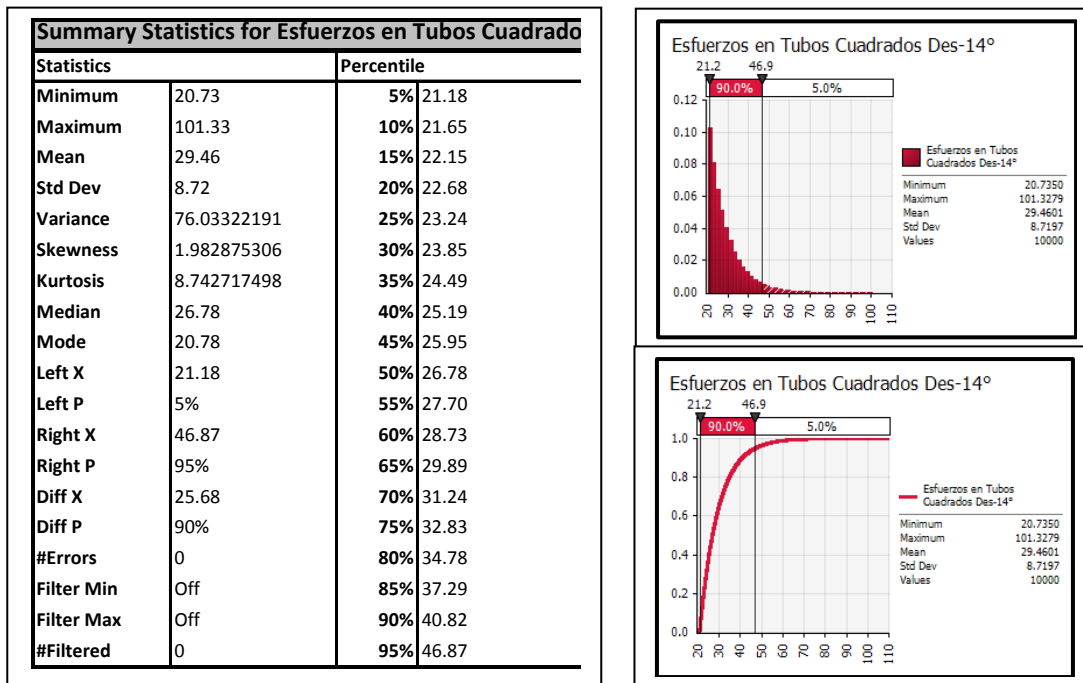


Figura A11. Esfuerzos en Tubos Cuadrados Operación Descenso 14°.

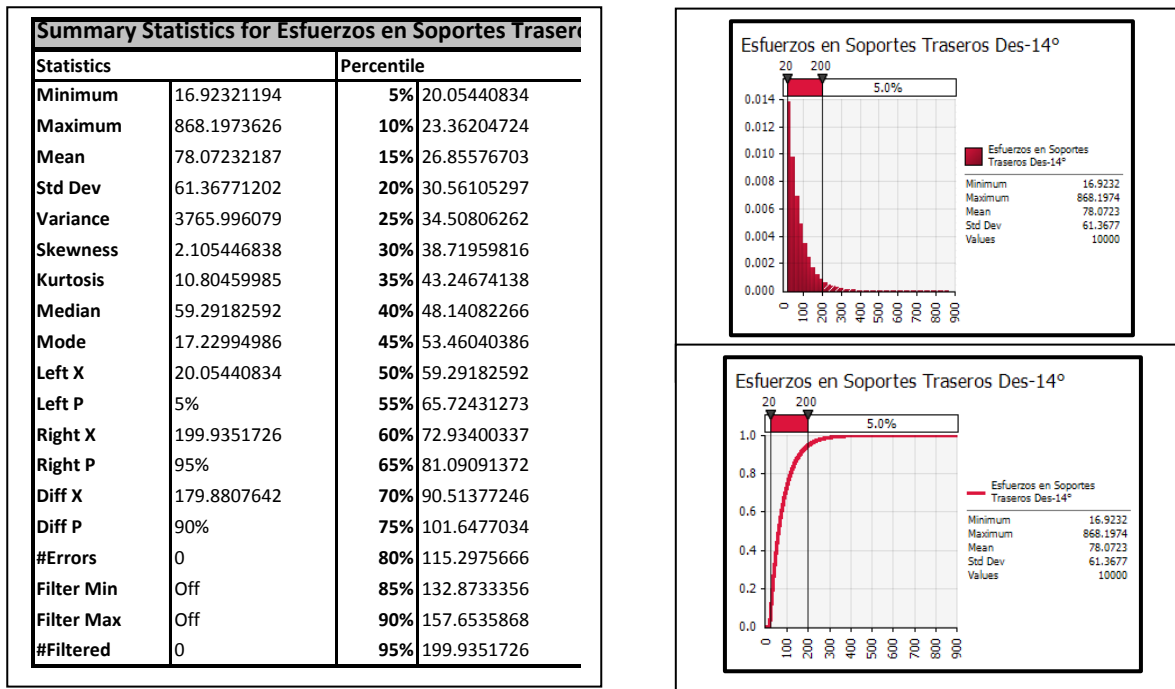


Figura A12. Esfuerzos en Soportes Traseros Operación Descenso 14°.

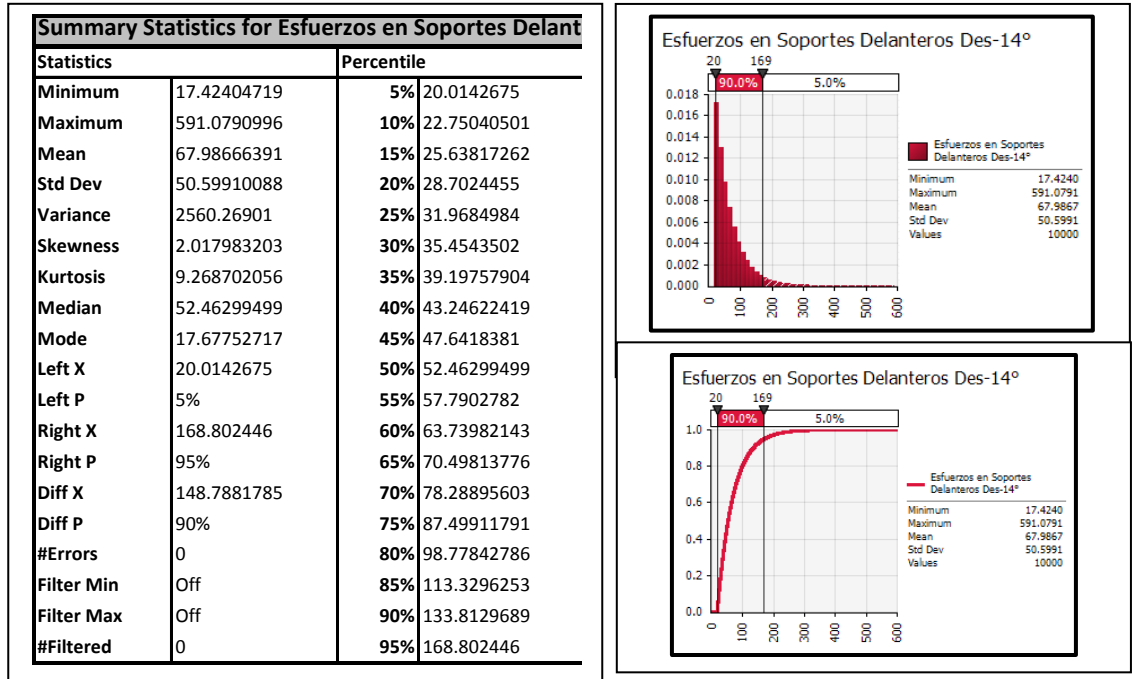


Figura A13. Esfuerzos en Soportes Delanteros Operación Descenso 14°.

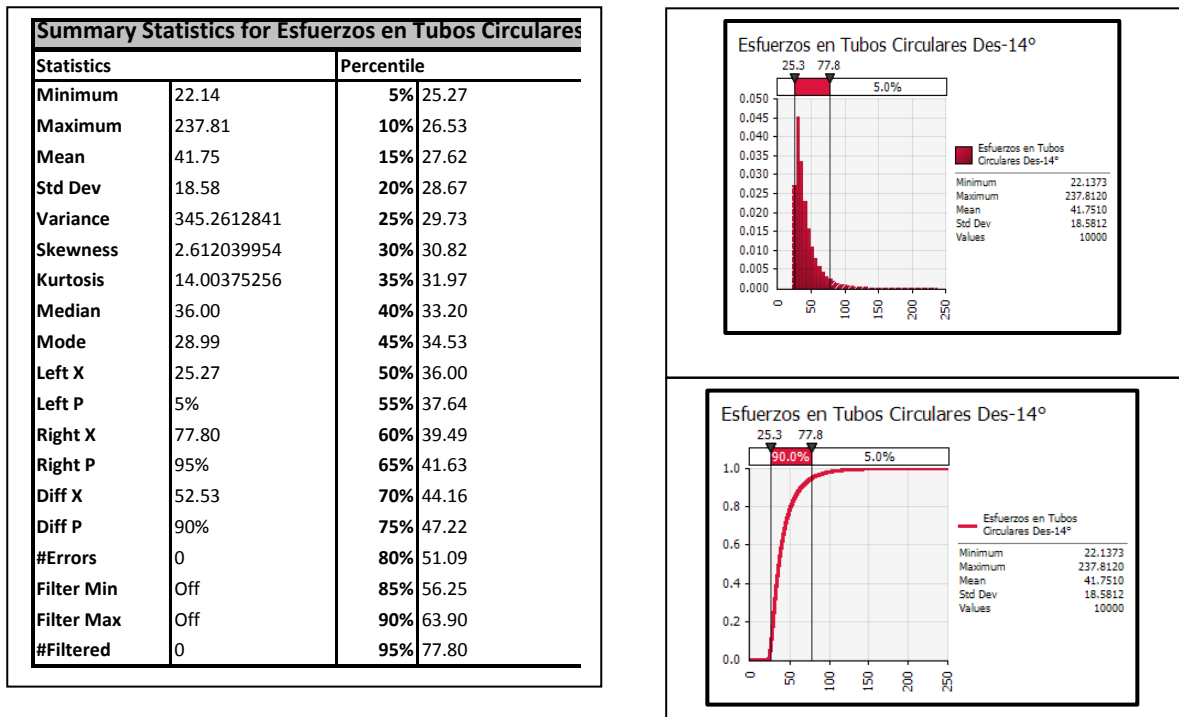


Figura A14. Esfuerzos en Tubos Circulares Operación Descenso 14°.

Summary Statistics for Esfuerzos en Soportes Superiores		
Statistics		Percentile
Minimum	20.02	5% 20.78
Maximum	163.78	10% 21.57
Mean	34.78	15% 22.42
Std Dev	14.75	20% 23.31
Variance	217.6816815	25% 24.27
Skewness	1.985860013	30% 25.28
Kurtosis	8.787341761	35% 26.38
Median	30.25	40% 27.56
Mode	20.09	45% 28.84
Left X	20.78	50% 30.25
Left P	5%	55% 31.81
Right X	64.22	60% 33.54
Right P	95%	65% 35.51
Diff X	43.44	70% 37.79
Diff P	90%	75% 40.48
#Errors	0	80% 43.78
Filter Min	Off	85% 48.03
Filter Max	Off	90% 54.01
#Filtered	0	95% 64.22

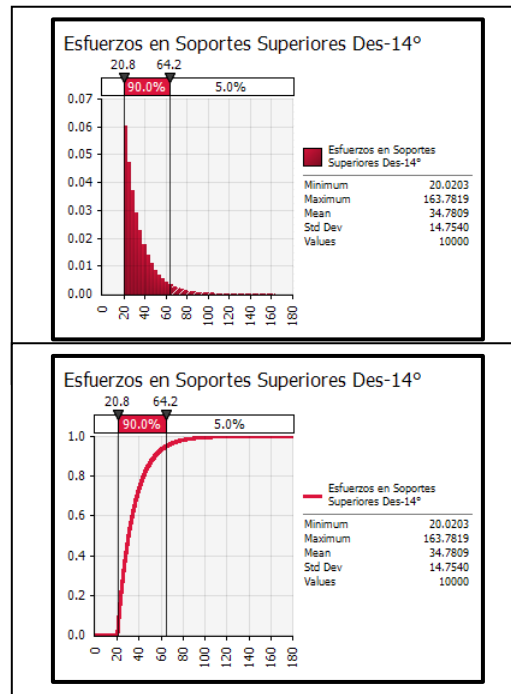


Figura A15. Esfuerzos en Soportes Superiores Operación Descenso.

