

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD POR ANÁLISIS DE RIESGO DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA DE IZAJE MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS

Luciano M Sieben y Adriana Pernich

Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, lucianomsieben@gmail.com, apernich@gmail.com, <http://www.uncoma.edu.ar>

Palabras Claves: Curvas de fragilidad, estructura metálica de izaje, modelación soldaduras, discontinuidades en soldaduras.

Resumen. En este trabajo se modela numéricamente una estructura metálica de izaje empleada para la carga y descarga de varillas de bombeo, tuberías de producción y barras de perforación utilizadas en la industria de gas y petróleo. Se toma un diseño estructural típico, fabricado in situ al momento de realizar dichas tareas. Teniendo en cuenta los distintos puntos críticos y las principales discontinuidades que se generan en los cordones de soldadura presentes en la estructura, se realiza un modelado de los cordones, perfecto y con imperfecciones utilizando elementos finitos hexaédricos y tetraédricos. A partir de los resultados obtenidos del modelo perfecto sin imperfecciones se genera un rediseño de la estructura buscando incrementar su resistencia. Finalmente se generan las curvas de fragilidad y se determina si el nuevo diseño produce un incremento en la resistencia de la estructura metálica.

1 INTRODUCCIÓN

La República Argentina cuenta con 5 grandes cuencas de producción de hidrocarburos: Cuenca del Noroeste, Cuenca Cuyana, Cuenca Neuquina, Cuenca Golfo San Jorge y Cuenca Austral. La Cuenca Neuquina comprende un extenso territorio que abarca el centro – norte de la provincia del Neuquén, sector occidental de La Pampa y Rio Negro, y la porción meridional de la provincia de Mendoza. En un gran número de locaciones petroleras dentro de la cuenca de interés, se utiliza para el movimiento de los tubos de perforación, tubos de producción y varillas de bombeo un sistema de izaje. Cuando se presentan inconvenientes en la etapa de fabricación de las partes que conforman las estructuras metálicas se genera un riesgo importante para el personal que lo opera, el cual puede producir accidentes con consecuencias graves y/o fatales.

El objetivo principal del trabajo es estudiar y aplicar el análisis de riesgo a partir de curvas de fragilidad a un diseño preestablecido de un aparato de izaje de barras de perforación, tuberías de producción o varillas de bombeo. Con este fin se tuvieron en cuenta la variabilidad de las cargas que actuarían sobre la estructura en función de los pesos de los paquetes de barras, tuberías o varillas que se suelen izar con el aparejo en estudio. Por otra parte se consideraron factores que afectan la resistencia estructural del aparejo en especial en las zonas de las uniones soldadas las cuales son afectadas por imperfecciones que tienen lugar durante el proceso de soldadura realizado in-situ sin tener las condiciones de un taller metalúrgico. Como aplicación de estas curvas se propone una mejora en el diseño en base a las conclusiones que resulten del estudio.

En el presente trabajo se presenta el diseño preestablecido del aparato de izaje de tuberías, barras o varillas. Luego se presentan los distintos modelos numéricos que se utilizan para contemplar las distintas discontinuidades que son frecuente se presenten en los cordones de soldadura. En este trabajo se consideran las siguientes discontinuidades: socavación o falta de metal de soldadura, falta de fusión, porosidad e inclusiones sólidas ([AWS A3.0-2001, 2001](#)). A continuación se realizan los distintos cálculos numéricos y a partir de ellos se crean las curvas de fragilidad. Finalmente se presentan las conclusiones con las comparaciones entre las distintas curvas de fragilidad y sus correspondientes interpretaciones.

2 CONCEPTO DE CURVA DE FRAGILIDAD

Según [Schultz et al.\(2010\)](#) las curvas de fragilidad son funciones que describen la probabilidad de falla para un rango de cargas a las que una estructura puede estar expuesta. Estas curvas ofrecen una perspectiva más completa y confiable que las probabilidades nominales de fallas basadas en factores de seguridad porque brindan más información sobre la confiabilidad del sistema.

La forma de la curva de fragilidad describe la incertidumbre en la capacidad de la estructura para soportar el esfuerzo producido por una determinada carga, es decir, representa la incertidumbre respecto al valor de la carga que causará la falla en la estructura.

Si la incertidumbre en la capacidad de carga que puede soportar la estructura es baja, la curva de fragilidad tomará la forma de función escalonada. Éste tipo de función indica que la estructura va a fallar a una determinada carga crítica, siendo este tipo de función más apropiada para sistemas frágiles y bien conocidos.

Para estructuras elásticas, poco comprendidas y complejas existe mayor incertidumbre en la capacidad de soportar los esfuerzos generados por una carga determinada. Para estos casos la curva de fragilidad presenta una forma de función “S”. Este tipo de función implica que una estructura sometida a un rango de cargas puede ser evaluada con cierta probabilidad de falla.

3 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura metálica de izaje es utilizada para descargar barras de perforación, tuberías de producción o varillas de bombeo desde los acoplados semirremolques a los caballetes de los equipos de perforación o workover según corresponda. Para proceder con la descarga hacia los caballetes se posicionan en ambos extremos de la tubería estructuras metálicas de izaje y por medio de eslingas de acero se las vincula con la pasteca de una grúa. En la [Figura 1](#) se observa una vista general de la estructura completa de izaje.

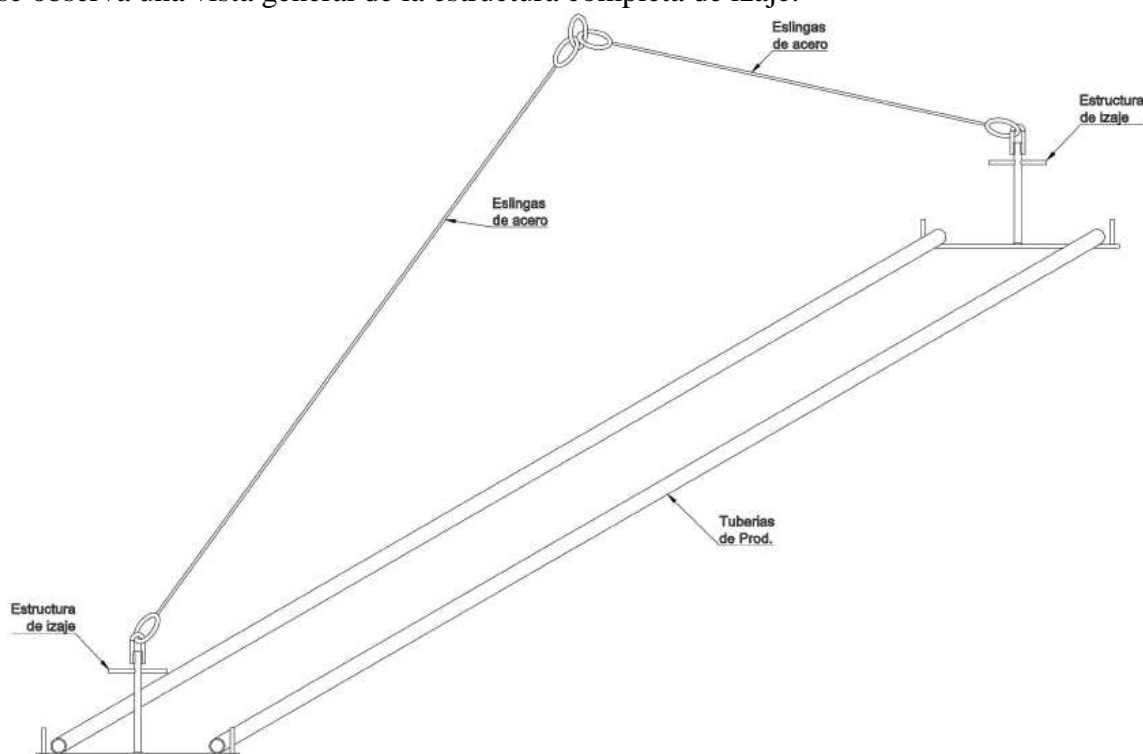


Figura 1: Vista general de la estructura completa de izaje.

La estructura considerada en el presente trabajo en muchas ocasiones suele construirse in-situ, sin tener en cuenta la carga admisible ni máxima que puede soportar la misma.

La estructura en estudio está compuesta principalmente por una barra maciza de acero AISI 1045 de OD (diámetro externo por sus siglas en inglés) 28mm de diámetro y una planchuela de acero AISI 1010 de espesor de 12,5mm. En el extremo superior de la barra de OD 28mm se encuentran soldadas dos barras de acero AISI 1045 de OD 16mm a partir de las cuales se forma un arco que permite el izaje de la estructura. Las barras se encuentran vinculadas mediante 4 cordones de soldadura tipo acampanada en V. En la [Figura 2](#) se observa en detalle la unión soldada en el extremo superior de la estructura entre las dos barras de acero de OD 16mm con la barra de acero de OD 28mm. En el extremo inferior del aparejo de izaje se encuentra la barra maciza de acero de OD 28mm que está vinculada a la planchuela de acero de espesor de 12,5mm a través de 2 soldaduras todo alrededor de la barra en la parte inferior y superior de la unión con la planchuela. En la [Figura 3](#) se observa en detalle la unión soldada en el extremo inferior de la estructura entre la barra de acero de OD 28mm y la planchuela de acero de 12,5mm de espesor. En la [Figura 4](#) y [Figura 5](#) se observan las dimensiones y como está conformada la estructura metálica de izaje.

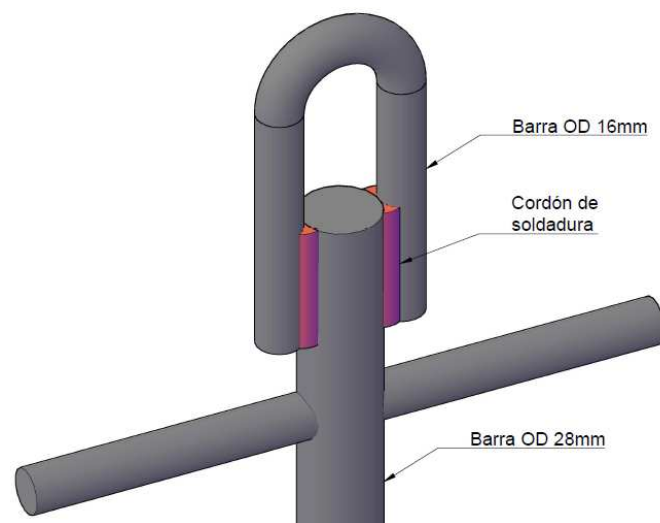


Figura 2: Perspectiva de unión soldada en extremo superior de la estructura entre barras de acero de OD 16mm y Barra de acero de OD 28mm.

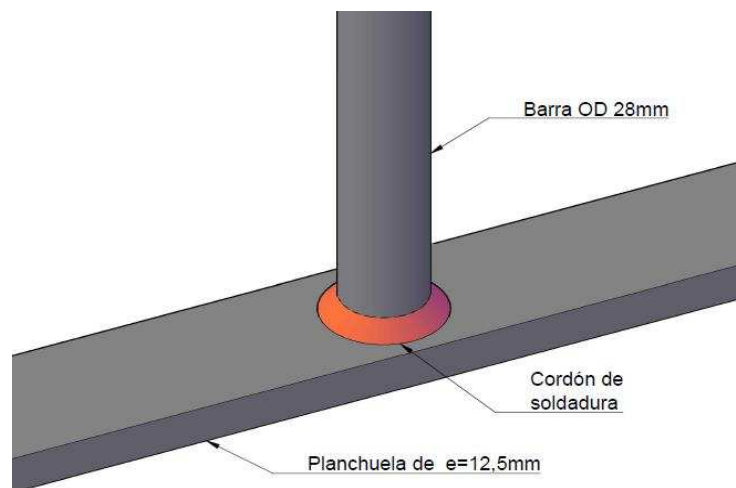


Figura 3: Perspectiva de unión soldada en extremo inferior de la estructura entre barra de acero de OD 28mm y planchuela de acero de espesor 12,5mm.

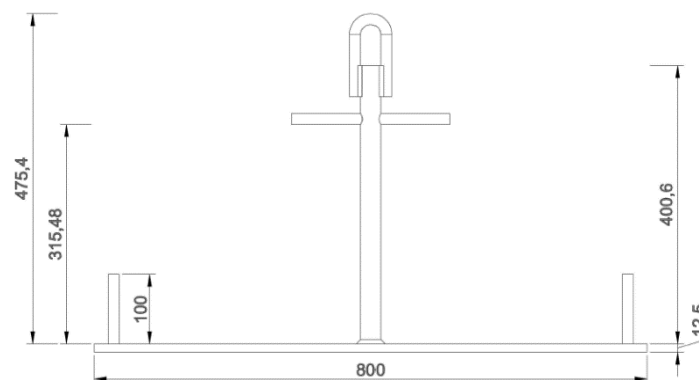


Figura 4: Dimensiones generales de estructura metálica.

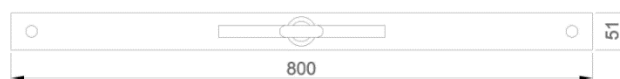


Figura 5: Dimensiones generales de estructura metálica.

La estructura está constituida por los siguientes materiales:

- Barra de 28mm y 16mm de diámetros: Acero SAE 1045 con un contenido de 0,45% de carbono (0,3 – 0,43%).
- Planchuela de acero de 12,5mm de espesor: Acero SAE 1010 con un contenido de 0,10%
- Soldaduras: generadas a partir de método de soldadura SMAW (soldadura por arco eléctrico) con electrodos E7018-1.

Se considera para todos los materiales un módulo de Young $E = 210000$ MPa, tensión de fluencia $\sigma_y = 180$ MPa y tensión de rotura $\sigma_r = 320$ MPa (SAE J1397, 1992).

4 MODELO NUMÉRICO

En la generación de los modelos se buscó reproducir distintas discontinuidades en los cordones de soldadura que producen variaciones en la resistencia de la estructura de izaje. Las discontinuidades que se consideraron para realizar los modelos son las siguientes: socavación o falta de metal de soldadura, falta de fusión, porosidad e inclusiones sólidas

En todos los modelos se consideran a las discontinuidades en la dirección más desfavorable o que mayores cambios presenten en la distribución de tensiones.

Se utilizaron elementos tetraédricos y hexaédricos de interpolación lineal para el mallado de los distintos sólidos que componen los modelos. El comportamiento del material es lineal elástico.

Los distintos tipos de elementos fueron utilizados teniendo en cuenta la geometría del sólido y según como éstos se ajustaban a la misma. Es debido a esto que no hay homogeneidad en la utilización de un solo tipo de elemento en todos los modelos generados.

Para la modelación se empleó el programa de elementos finitos para propósitos generales Abaqus (Hibbit et al., 1998).

Los modelos generados para el extremo superior de la estructura metálica de izaje con un diseño preestablecido son nombrados Modelo “G” y los modelos generados para el extremo inferior de la misma son nombrados Modelo “P”. El Modelo “A” corresponde al rediseño realizado en la zona del aparejo de izaje que resulte como limitante en la resistencia.

En el caso que las uniones soldadas son perfectas sin discontinuidades los modelos son nombrados M1. Los modelos con discontinuidades son nombrados de la siguiente forma:

- M2: Falta de fusión.
- M3: Socavación o falta de metal de soldadura.
- M4: Porosidad.
- M5: Inclusión sólida.

Inicialmente las discontinuidades que se modelaron con elementos finitos presentaban una distribución asimétrica imposibilitando utilizar la hipótesis de simetría. Luego de realizar simulaciones en forma iterativa con el objetivo de determinar la posición de las discontinuidades que sea más desfavorable, se obtuvieron modelos con discontinuidades distribuidas en forma simétrica. A fin de simplificar el proceso de modelado, se descartó la posibilidad de utilizar la hipótesis de simetría.

4.1 Falta de fusión

Éste tipo discontinuidad produce una fusión deficiente en la interfaz cordón de soldadura – metal base a partir de la cual se puede considerar que el cordón de soldadura se encuentra interrumpido.

Para los modelos numéricos que tienen en cuenta esta discontinuidad se considera arbitrariamente un faltante de cordón de soldadura de 2mm de espesor.

En la [Figura 6](#) se observan vistas en perspectiva del modelo con falta de fusión en el cordón de soldadura del extremo superior del aparejo de izaje G – M2.

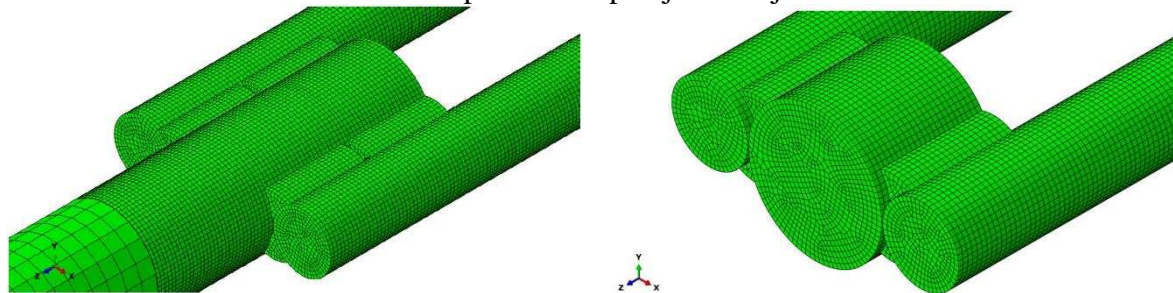


Figura 6: Vistas en perspectiva de las uniones soldadas del modelo G – M2 con falta de fusión.

4.2 Socavación o falta de metal de soldadura

Se interpreta a la socavación como una falta de material de aporte en el cordón. Esto se puede entender como una disminución en el espesor normal del cordón.

Para el diseño de los modelos numéricos se redujo el espesor normal o raíz de la unión soldada para lograr un comportamiento compatible.

En la [Figura 7](#) se observa una vista frontal y en perspectiva del modelo con socavación o falta de metal de soldadura del extremo superior del aparejo de izaje G – M3:

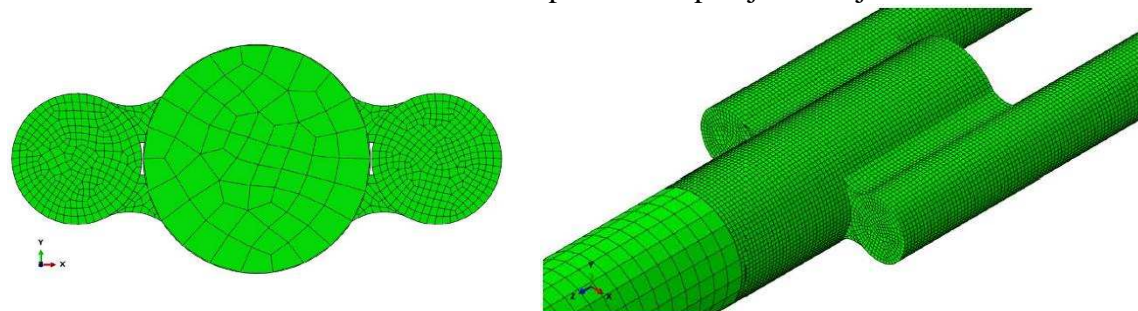


Figura 7: Vista frontal y en perspectiva de las uniones soldadas del modelo G – M3 con presencia de Socavación.

4.3 Porosidad

En los cordones de soldadura se pueden apreciar poros uniformemente distribuidos, formando nidos, alineados o con una geometría alargada. A los efectos de la generación de los modelos numéricos se considera arbitrariamente un único poro por cordón de soldadura y estos se encuentran en el centro de los cordones de soldadura.

En los modelos de elementos finitos los poros se crearon con geometría hexaédrica de 1mm de lado. Esto se debe a que la geometría real del poro es aleatoria y se buscó representar el faltante de material de cierto volumen.

En la [Figura 8](#) se observan vistas en perspectiva del modelo con poros distribuidos en forma uniforme en los cordones de soldadura del extremo superior del aparejo de izaje G – M4:

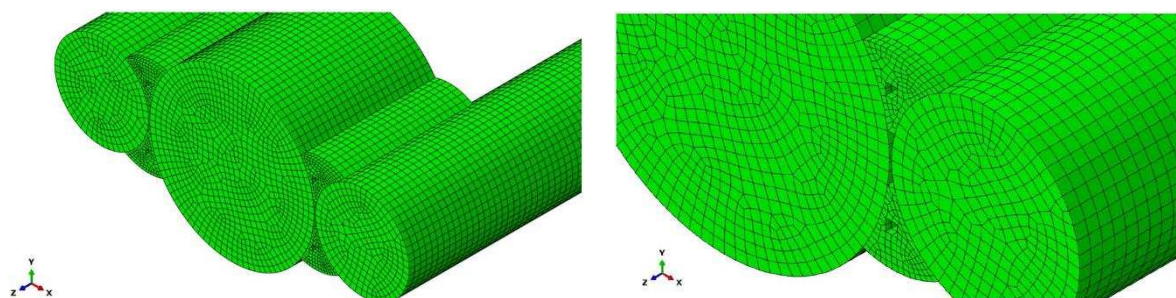


Figura 8: Vistas en perspectiva de las uniones soldadas del modelo G – M4 con porosidad.

4.4 Inclusiones sólidas

El mecanismo y las razones por la cual se forman las inclusiones sólidas en los cordones de soldadura difieren de los que generan los poros. A los efectos de la generación de los modelos numéricos se considera arbitrariamente una única inclusión sólida por cordón de soldadura y estas se encuentran en el centro de los cordones de soldadura.

En los modelos de elementos finitos las inclusiones sólidas se crearon con geometría hexaédrica de 1mm de lado. Esto se debe a que la geometría real de la inclusión sólida es aleatoria y se buscó representar la inclusión de un material de cierto volumen.

En la Figura 9 se observan vistas en perspectiva del modelo con inclusiones sólidas distribuidas en forma uniforme en los cordones de soldadura del extremo superior del aparejo de izaje G – M5:

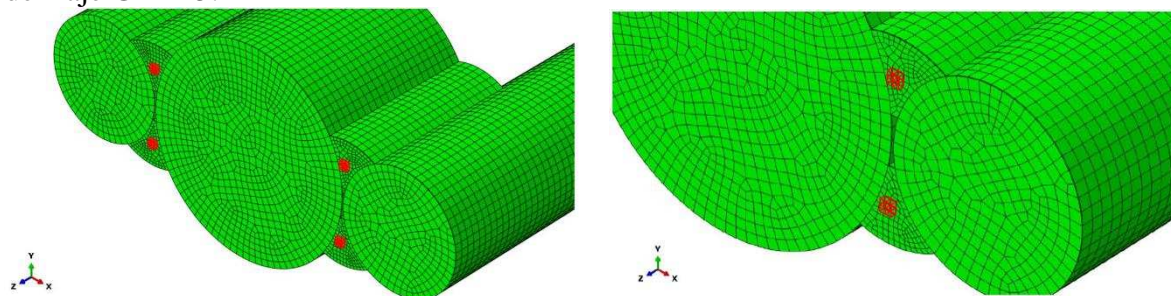


Figura 9: Vistas en perspectiva de las uniones soldadas del modelo G – M5 con inclusiones sólidas.

5 CÁLCULO DE MODELOS NUMÉRICOS

En esta sección se desarrollan los temas vinculados al cálculo de los distintos modelos considerados y a la obtención de las curvas de fragilidad para los mismos a partir de los cálculos numéricos realizados con Abaqus.

5.1 Modelo G

El Modelo “G” comprende la zona superior de la estructura metálica de izaje. En el mismo se puede observar la barra de acero de OD 28mm y dos barras de acero de OD 16mm vinculadas a la anterior mediante cuatro cordones de soldadura de 6mm de raíz. En la Figura 10 se observan las dimensiones del Modelo “G” y como se encuentra conformado el mismo:

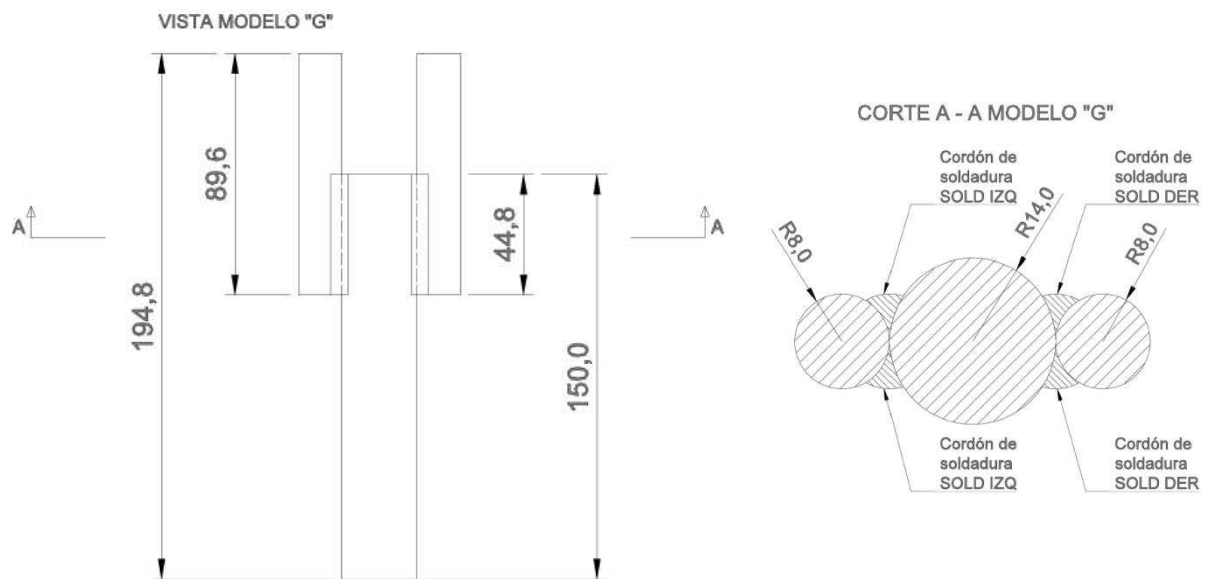


Figura 10: Vista frontal y Corte A – A del Modelo “G”.

El modelo en estudio está compuesto en su totalidad por elementos finitos hexaédricos. Parte de la barra de OD 28mm posee elementos finitos hexaédricos de 4mm de lado, mientras que el resto del modelo posee elementos de 1mm de lado. En la [Figura 11](#) se observa la distribución de los elementos correspondientes al Modelo “G”:

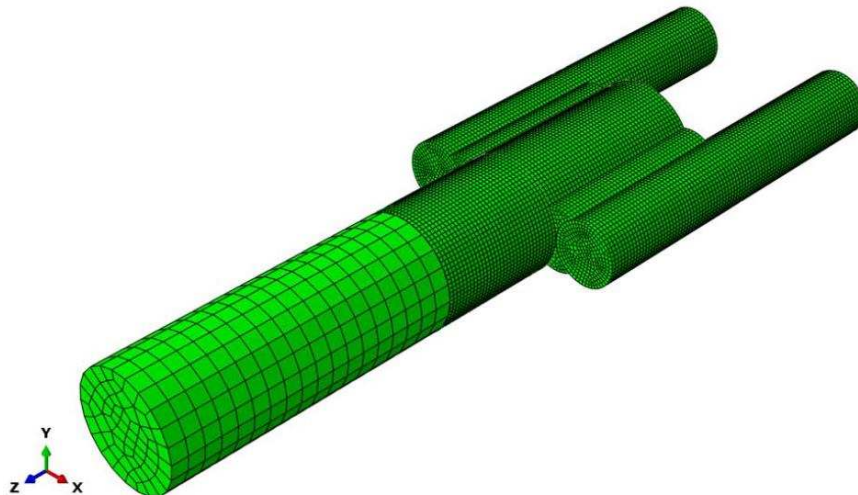


Figura 11: Distribución de elementos finitos en Modelo “G”.

La distribución de elementos que se realiza en el sólido tiene como objetivo reducir el número de los mismos en las zonas donde las variaciones de los esfuerzos son leves y de esta forma disminuir el tiempo de cálculo.

Para la creación de los modelos numéricos se imponen restricciones de tipo “Tie” en las superficies comunes al metal base y de aporte.

La condición de contorno establecida para este modelo tiene en cuenta que las barras de OD 16mm conforman en el modelo real un gancho a partir del cual se iza el elemento estructural. Considerando lo anterior se establece que los extremos libres de las barras de acero se encuentran empotradas, es decir, tanto el desplazamiento como el giro en los tres ejes principales se encuentra restringido.

Las cargas que se utilizan para evaluar los modelos numéricos están establecidas en función de los pesos de las barras de perforación, tuberías de producción y varillas de

bombeo. Las mismas se encuentran aplicadas en el extremo libre de la barra de OD 28mm. Se consideran a las cargas distribuidas uniformemente en el área de la sección transversal. Se utiliza como carga tipo 1 tubería de producción de 2 3/8" de 8,5m que tiene un peso de 500N (110,2 lb). Los valores de cargas definidos son los siguientes:

$$\begin{aligned}c_1 &= 3000\text{N}(\text{equivalente a 6 tuberías de prod.}) \\c_2 &= 6000\text{N}(\text{equivalente a 12 tuberías de prod.}) \\c_3 &= 8000\text{N}(\text{equivalente a 16 tuberías de prod.})\end{aligned}$$

El área en la cual se aplican las cargas anteriores es:

$$A = \frac{\pi * OD^2}{4} = 615,75\text{mm}^2$$

Entonces las presiones que se utilizaran para evaluar los distintos modelos numéricos correspondientes al Modelo G son las siguientes:

$$C_1 = 4,87\text{N/mm}^2 \quad C_2 = 9,74\text{N/mm}^2 \quad C_3 = 12,98\text{N/mm}^2$$

Teniendo en cuenta las principales discontinuidades que se presentan en los cordones de soldadura, a continuación se enumeran los modelos numéricos a evaluar con las presiones antes calculadas:

- G – M1: modelo perfecto sin discontinuidades en los cordones de soldadura del extremo superior del aparejo de izaje.
- G – M2: modelo con la falta de fusión entre el cordón de soldadura y el metal base en el extremo superior del aparejo de izaje.
- G – M3: modelo con socavación o falta de metal de soldadura en el extremo superior del aparejo de izaje.
- G – M4: modelo con porosidad en el metal de soldadura en el extremo superior del aparejo de izaje.
- G – M5: modelo con inclusiones solidas en el metal de soldadura en el extremo superior del aparejo de izaje.

Se procede a realizar los cálculos numéricos de los distintos modelos sometidos a las presiones previamente establecidas utilizando el software de elementos finitos. En la [Figura 12](#) se observan los resultados obtenidos luego de realizar la simulación numérica correspondiente al modelo perfecto sin discontinuidades en los cordones de soldadura del extremo superior del aparejo de izaje sometido a la carga C1 G – M1 – C1:

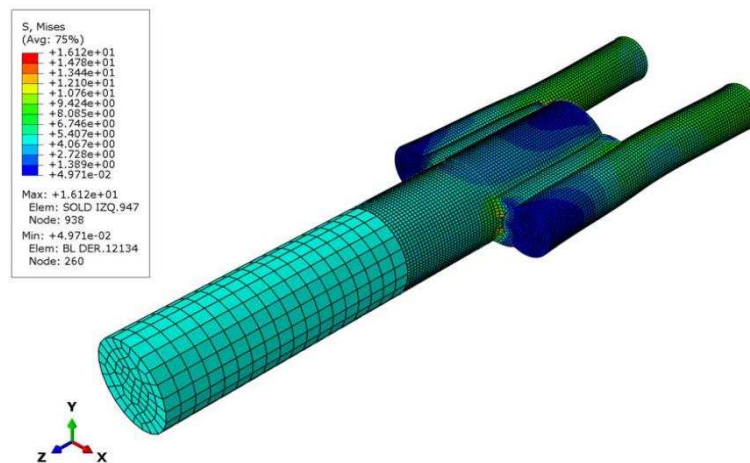


Figura 12: Resultado obtenidos para el Modelo G – M1 – C1.

El valor de interés para este trabajo es la máxima tensión de Von Mises y cual es la zona en la cual tiene lugar. En la [Tabla 1](#) se muestran los resultados obtenidos para los modelos con las distintas discontinuidades planteadas:

	G-M1-C1	G-M1-C2	G-M1-C3
S Mises [Mpa]	16.12	32.24	42.97
Zona Max. S Mises	SOLD IZQ	SOLD IZQ	SOLD IZQ
	G-M2-C1	G-M2-C2	G-M2-C3
S Mises [Mpa]	16.21	32.41	43.2
Zona Max. S Mises	SOLD DER	SOLD DER	SOLD DER
	G-M3-C1	G-M3-C2	G-M3-C3
S Mises [Mpa]	17.22	34.44	45.9
Zona Max. S Mises	SOLD IZQ	SOLD IZQ	SOLD IZQ
	G-M4-C1	G-M4-C2	G-M4-C3
S Mises [Mpa]	16.12	32.45	42.98
Zona Max. S Mises	SOLD IZQ	SOLD IZQ	SOLD IZQ
	G-M5-C1	G-M5-C2	G-M5-C3
S Mises [Mpa]	16.12	32.24	42.96
Zona Max. S Mises	SOLD IZQ	SOLD IZQ	SOLD IZQ

Tabla 1: Resultados de simulaciones para el Modelo “G”

A partir los resultados obtenidos anteriormente se construyen curvas de tendencia para cada uno de los modelos numéricos establecidos para el Modelo “G”. Estas curvas vinculan las cargas utilizadas en las simulaciones con las máximas tensiones de Von Mises obtenidas como resultado de las simulaciones.

Se construye una muestra representativa de 30 valores de carga obtenidos aleatoriamente con una carga límite inferior de 31500 N y una carga límite superior de 33500 N. Estos límites adoptados se deben a que conociendo las curvas de tendencia de cada uno de los modelos y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales se puede obtener en este caso la carga a partir de la cual se alcance la tensión de fluencia en el acero. Con la carga límite inferior en ninguno de los modelos se alcanza la tensión de fluencia y con la carga límite superior se alcanza en todos los modelos la tensión de fluencia.

A partir de las curvas de tendencia creadas para los modelos G – M1 a G – M5 se obtiene para cada una de las cargas de la muestra representativa la máxima tensión de Von Mises que se va a presentar el modelo.

Como cada modelo numérico presenta un comportamiento y una distribución de tensiones

distinto al resto de los modelos cuando se los somete a cada una de las cargas perteneciente a la muestra representativa, se establece la probabilidad de alcanzar la tensión de fluencia en los modelos G – M1 a G – M5 para cada una de las cargas.

Luego de obtener para cada una de las 30 cargas la máxima tensión de Von Mises, se seleccionan aquellos mínimos valores de carga que presentan una probabilidad del 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de que la máxima tensión que se presente en los modelos supere la tensión de fluencia σ_y . En la [Tabla 2](#) se detallan los valores antes mencionados. En negrita se observan los valores de tensión de Von Mises que superan la tensión de fluencia del material.

Carga [N]	G-M1	G-M2	G-M3	G-M4	G-M5	Prob. $\sigma_y < S_{mis}$ [%]
	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	
31524	170.24	170.25	179.70	170.27	170.25	0
31530	170.27	170.28	179.74	170.31	170.28	0
31611	170.71	170.72	180.20	170.74	170.72	20
33326	179.97	179.98	189.97	180.00	179.98	40
33330	179.99	179.99	190.00	180.03	180.00	60
33354	180.12	180.13	190.13	180.16	180.13	100
33473	180.77	180.77	190.81	180.80	180.77	100

Tabla 2: Resumen de cargas con probabilidad de $\sigma_y < S_{mis}$

En la [Figura 13](#) se observa la nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$.

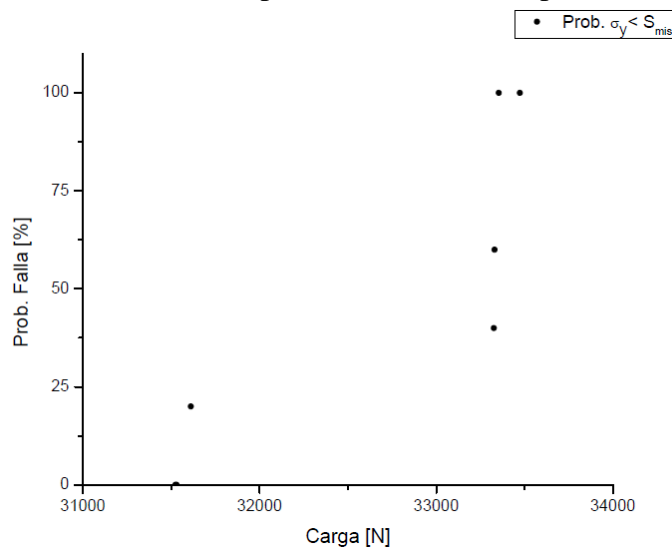


Figura 13: Nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$

A partir de los resultados obtenidos resumidos en la tabla anterior se pueden construir las curvas de fragilidad asociadas al Modelo “G”. En el presente trabajo se opta por realizar una interpolación lineal entre los resultados obtenidos y de este modo obtener una curva que describa el comportamiento de las curvas de fragilidad. En la [Figura 14](#) se observa la curva de fragilidad asociada a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$

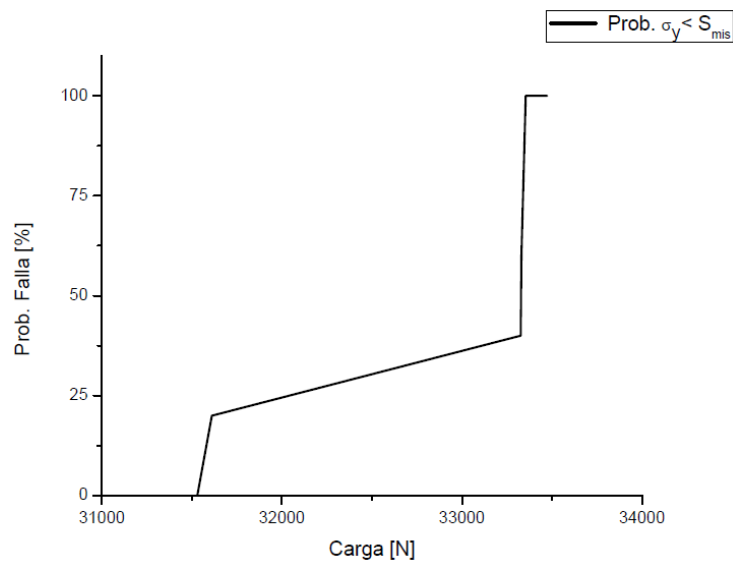


Figura 14: Curva de fragilidad asociada a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$.

5.2 Modelo P

El Modelo “P” comprende la zona inferior de la estructura de izaje. En el mismo se puede observar la barra de acero de OD 28mm y la planchuela de acero de 12,5mm de espesor y se encuentran vinculadas a partir de dos cordones de soldadura tipo filete todo alrededor de la barra de acero de OD 28mm.

La planchuela de acero posee un agujero de ID 22mm a través del cual se inserta la barra de acero de OD 28mm a la cual se le realiza una reducción de diámetro pasando de 28mm a 22mm. La altura de la reducción de diámetro es de 6,5mm. Las soldaduras tipo filete todo alrededor se encuentran una por encima de la planchuela y la otra en la cavidad que se presenta entre la barra de acero de OD 28mm y la planchuela. Ambos cordones tienen 6mm de raíz.

En la [Figura 15](#) se observan las vistas laterales y superiores y un corte del Modelo “P” en las cuales se detallan las dimensiones del mismo:

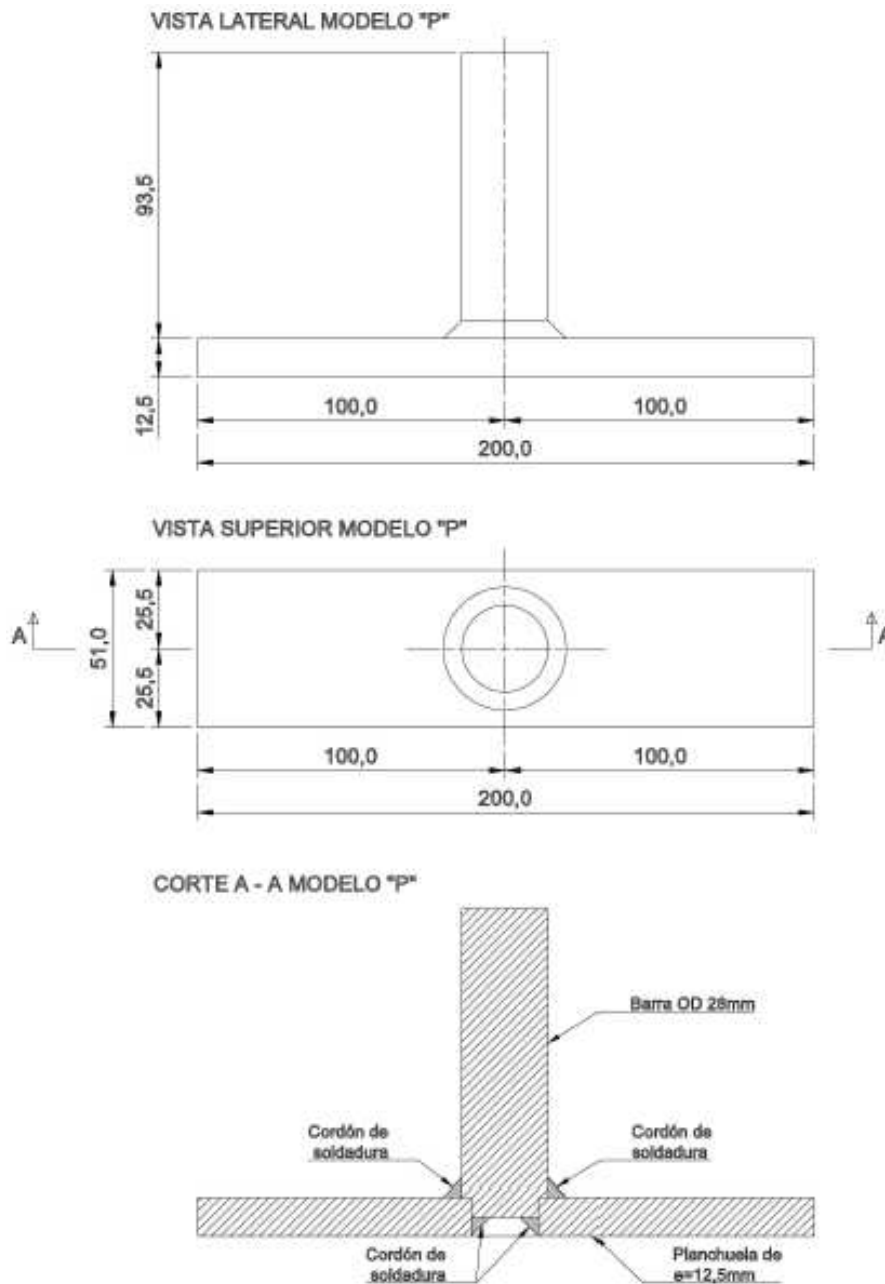


Figura 15: Vista frontal, superior y Corte A – A del Modelo “P”

El modelo en estudio está compuesto por elementos finitos hexaédricos y tetraédricos. La barra de OD 28mm posee elementos finitos hexaédricos de 4mm de lado en las zonas donde no se presentan grandes cambios en la distribución de tensiones para disminuir los tiempos de cálculo del software. En las zonas de contacto con cordones de soldadura se utilizaron elementos hexaédricos de 1mm de lado.

Para el mallado de la planchuela de 12,5mm de espesor se utilizaron elementos finitos hexaédricos y tetraédricos. En la zona de contacto con los cordones de soldadura se generó una malla de elementos hexaédricos de 1mm de lado para que sea congruente con el tipo y dimensión de elemento utilizado en el mallado de los cordones de soldadura y barra de OD 28mm. El mallado restante de la planchuela de 12,5mm de espesor esta generado con elementos finitos tetraédricos que varían gradualmente desde 1mm a 4mm de lado desde el interior de la planchuela hacia las aristas de la misma. En la [Figura 16](#) se observa la

distribución de los elementos del Modelo “P”.

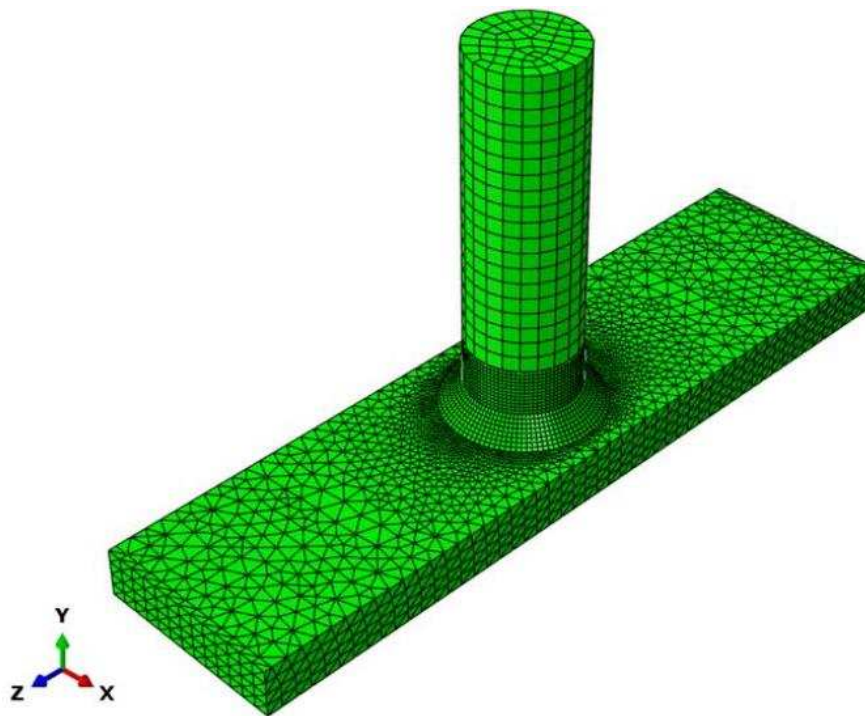


Figura 16: Distribución de elementos finitos en Modelo “P”.

Para la creación de los modelos numéricos se imponen restricciones de tipo “Tie” en las superficies comunes al metal base y de aporte.

La condición de contorno establecida para este modelo tiene en cuenta que el extremo libre de la barra de OD 28mm se encuentra empotrada imposibilitando el giro y desplazamiento.

Las cargas que se utilizan para evaluar los modelos numéricos están establecidas en función de los pesos de las barras de perforación, tuberías de producción y varillas de bombeo. Las mismas se encuentran aplicadas en los extremos libres de la planchuela de acero de 12,5mm de espesor.

Se utiliza como carga tipo 1 varilla de bombeo de 1 1/8” de 9,14m (30ft) que tiene un peso de 461,7N (103,8 lb). Debido al modo de uso de la estructura se establece que cada extremo de la misma está sometido al esfuerzo de media varilla de bombeo.

Debido a que el software de cálculo no permite establecer cargas lineales en aristas de sólidos se establece un área en los extremos libres de las planchuela de 102mm² en el cual se aplican presiones.

A continuación se detallan las presiones C1, C2 y C3 para el Modelo “P”:

$$C1 = 8,03 \text{ N/mm}^2 \quad C2 = 14,05 \text{ N/mm}^2 \quad C3 = 18,06 \text{ N/mm}^2$$

Teniendo en cuenta las principales discontinuidades que se presentan en los cordones de soldadura, a continuación se enumeran los modelos numéricos a evaluar con las presiones antes calculadas:

- P – M1: modelo perfecto sin discontinuidades en los cordones de soldadura del extremo inferior del aparejo de izaje.
- P – M2: modelo con la falta de fusión entre el cordón de soldadura y el metal base en el extremo inferior del aparejo de izaje.

- P – M3: modelo con socavación o falta de metal de soldadura en el extremo inferior del aparejo de izaje.
- P – M4: modelo con porosidad en el metal de soldadura en el extremo inferior del aparejo de izaje.
- P – M5: modelo con inclusiones solidas en el metal de soldadura en el extremo inferior del aparejo de izaje.

Se procede a realizar los cálculos numéricos de los distintos modelos utilizando el software de elementos finitos. En la [Figura 17](#) se observan los resultados obtenidos luego de realizar la simulación numérica correspondiente al modelo perfecto sin discontinuidades en los cordones de soldadura del extremo inferior del aparejo de izaje sometido a la carga C1 P – M1 – C1:

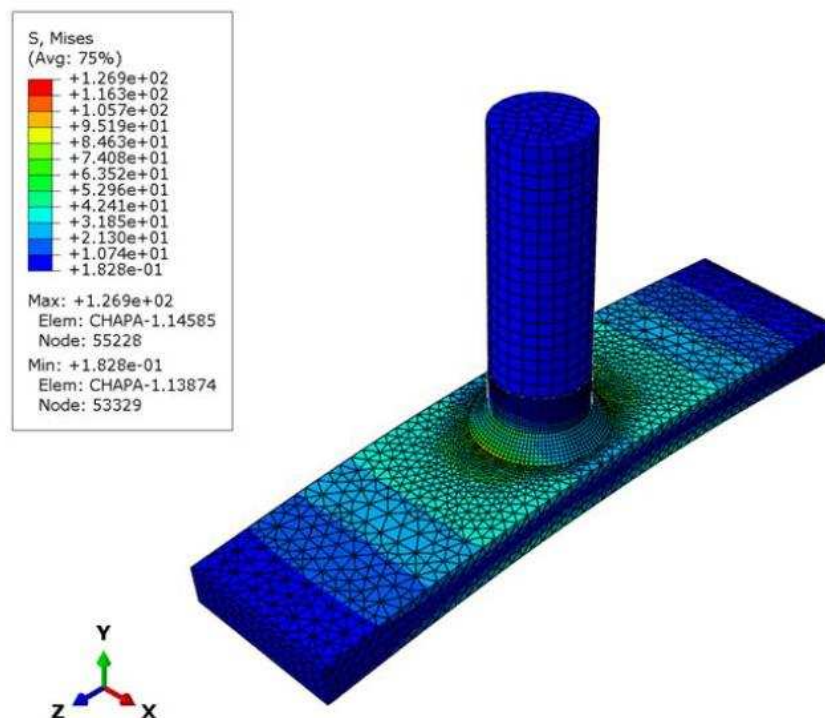


Figura 17: Resultado obtenido para el Modelo P – M1 – C1.

Al igual que en el Modelo G, el valor de interés es la máxima tensión de Von Mises y la zona del modelo donde se presenta la misma. En la [Tabla 3](#) se muestran los resultados obtenidos para los modelos con las distintas discontinuidades planteadas

	P-M1-C1	P-M1-C2	P-M1-C3
S Mises [Mpa]	126.9	222.0	285.3
Zona Max. S Mises	CHAPA	CHAPA	CHAPA
	P-M2-C1	P-M2-C2	P-M2-C3
S Mises [Mpa]	125.4	219.3	281.3
Zona Max. S Mises	CHAPA	CHAPA	CHAPA
	P-M3-C1	P-M3-C2	P-M3-C3
S Mises [Mpa]	104.0	182.0	233.9
Zona Max. S Mises	CHAPA	CHAPA	CHAPA
	P-M4-C1	P-M4-C2	P-M4-C3
S Mises [Mpa]	125.4	219.4	282.0
Zona Max. S Mises	CHAPA	CHAPA	CHAPA
	P-M5-C1	P-M5-C2	P-M5-C3
S Mises [Mpa]	125.5	219.6	282.3
Zona Max. S Mises	CHAPA	CHAPA	CHAPA

Tabla 3: Resultados de simulaciones para el Modelo “P”.

A partir los resultados obtenidos anteriormente se construyen curvas de tendencia para cada uno de los modelos numéricos establecidos para el Modelo “P”. Estas curvas vinculan las cargas utilizadas en las simulaciones con las máximas tensiones de Von Mises obtenidas como resultado de las simulaciones.

Se construye una muestra representativa de 30 valores de carga obtenidos aleatoriamente con una carga límite inferior de 1100 N y una carga límite superior de 1450 N. Estos límites adoptados se deben a que conociendo las curvas de tendencia de cada uno de los modelos y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales se puede obtener en este caso la carga a partir de la cual se alcance la tensión de fluencia en el acero. Con la carga límite inferior en ninguno de los modelos se alcanza la tensión de fluencia y con la carga límite superior se alcanza en todos los modelos la tensión de fluencia.

Además se construye una segunda muestra representativa de 30 valores de cargas obtenidos aleatoriamente pero en este caso la carga límite inferior es de 2000 N y con esta carga ningún modelo alcanza la tensión de rotura. La carga límite superior es de 2550 N y con esta carga todos los modelos alcanzan la tensión de rotura.

A partir de las curvas de tendencia creadas para los modelos P – M1 a P – M5 se obtiene para cada una de las cargas de las muestras representativas la máxima tensión de Von Mises que se va a presentar el modelo.

Como cada modelo numérico presenta un comportamiento y una distribución de tensiones distinto al resto de los modelos cuando se los somete a cada una de las cargas perteneciente a las muestras representativas, se establece la probabilidad de alcanzar la tensión de fluencia y de rotura en los modelos P – M1 a P – M5 para cada una de las cargas.

Luego de obtener para cada una de las cargas la máxima tensión de Von Mises, se seleccionan aquellos mínimos valores de carga que presentan una probabilidad del 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de que la máxima tensión que se presente en los modelos supere la tensión de fluencia σ_y y de rotura σ_r .

En la [Tabla 4](#) y [Tabla 5](#) se detallan los valores antes mencionados. En **negrita** se observan los valores de tensión de Von Mises que superan la tensión de fluencia del material.

Carga [N]	P-M1	P-M2	P-M3	P-M4	P-M5	Prob. $\sigma_y < S_{mis}$ [%]
	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	
1150	178.14	175.72	146.05	176.07	176.18	0
1161	179.84	177.40	147.45	177.75	177.87	0
1170	181.23	178.78	148.59	179.13	179.24	20
1175	182.01	179.54	149.23	179.89	180.01	40
1176	182.16	179.69	149.35	180.05	180.16	60
1188	184.02	181.53	150.88	181.88	182.00	80
1418	219.65	216.67	180.09	217.10	217.24	100
1430	221.51	218.50	181.61	218.93	219.08	100

Tabla 4: Resumen de cargas con probabilidad de $\sigma_y < S_{mis}$.

Carga [N]	P-M1	P-M2	P-M3	P-M4	P-M5	Prob. $\sigma_r < S_{mis}$ [%]
	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	
2040	316.00	311.71	259.08	312.32	312.53	0
2053	318.01	313.70	260.73	314.31	314.52	0
2067	320.18	315.84	262.51	316.46	316.66	20
2089	323.59	319.20	265.30	319.83	320.03	40
2092	324.05	319.66	265.68	320.29	320.49	60
2096	324.67	320.27	266.19	320.90	321.11	80
2521	390.50	385.21	320.17	385.97	386.22	100
2540	393.45	388.11	322.58	388.87	389.13	100

Tabla 5: Resumen de cargas con probabilidad de $\sigma_r < S_{mis}$.

En la **Figura 18** se observa la nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y la nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_r < S_{mis}$. A partir de los resultados obtenidos resumidos en la tabla anterior se pueden construir las curvas de fragilidad asociadas al Modelo “P”. En el presente trabajo se opta por realizar una interpolación lineal entre los resultados obtenidos y de este modo obtener una curva que describa el comportamiento de las curvas de fragilidad. En la **Figura 19** se observa la curva de fragilidad asociada a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y la curva de fragilidad asociada a la probabilidad de que $\sigma_r < S_{mis}$.

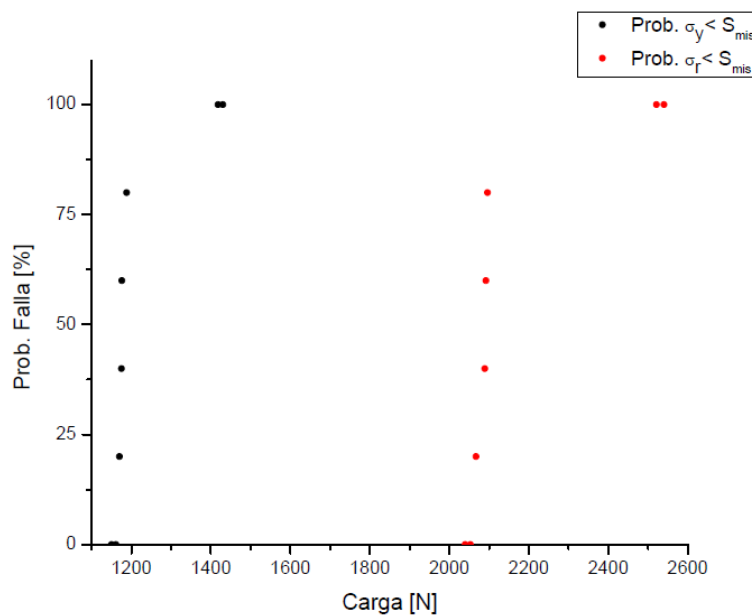


Figura 18: Nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y $\sigma_r < S_{mis}$.

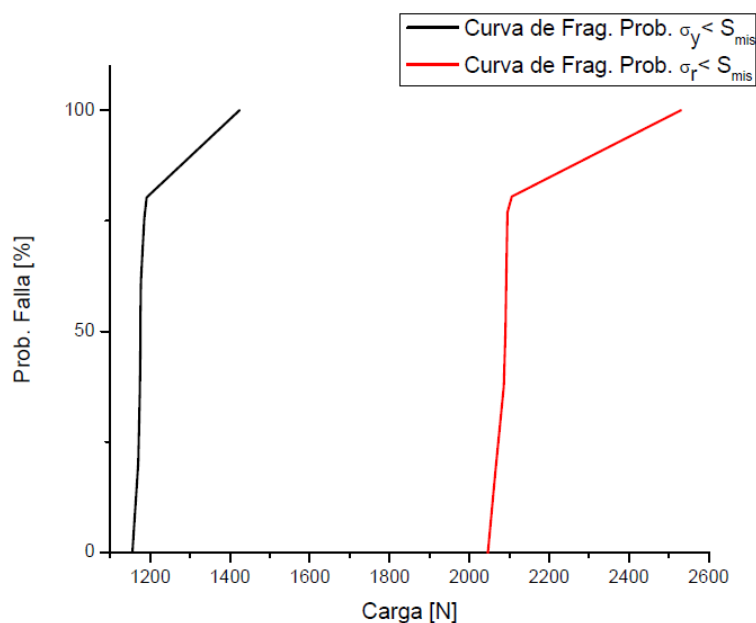


Figura 19: Curvas de fragilidad asociadas a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y $\sigma_r < S_{mis}$.

5.3 Modelo A

Realizando un análisis sobre las curvas de fragilidad obtenidas para los Modelos “G” y “P” se observa claramente que la unión que establece la carga máxima que soporta la estructura es la que se presenta en el Modelo “P”.

Teniendo como base el Modelo “P” se crea el Modelo “A”. Para el diseño del mismo se tuvieron en cuenta los siguientes puntos:

- Incrementar la longitud total de cordón de soldadura manteniendo los 6mm de raíz.
- Minimizar los esfuerzos combinados en las uniones soldadas.
- Diseño práctico para la fabricación de la estructura metálica teniendo como base el diseño inicial del Modelo “P”.
- Cumplir con lineamientos establecidos en [Trogia \(2007\)](#), [CIRSOC 301\(2005\)](#) y [CIRSOC 304\(2007\)](#).

Al igual que el Modelo “P”, el Modelo “A” comprende la zona inferior de la estructura de izaje. El principal cambio que presenta frente al Modelo “P” es la inclusión de dos chapas de refuerzo tipo cartela con una geometría de triángulo rectangular con sus catetos de 60mm y un espesor de 8mm. Las mismas transfieren los esfuerzos desde la planchuela de acero de 12,5mm de espesor a la barra de acero de OD 28mm mediante cordones de soldadura de 6mm de raíz y 40mm de longitud.

A diferencia con el Modelo “P”, en el Modelo “A” la planchuela de acero de 12,5mm de espesor no posee un agujero a través del cual pasa la barra de acero de OD 28mm evitando el debilitamiento que se genera en la estructura en esa zona en particular. Simplemente la barra se encuentra apoyada en la planchuela.

En la [Figura 20](#) se observan las dimensiones y cambios que se realizaron sobre el Modelo “P” resultando en el Modelo “A”:

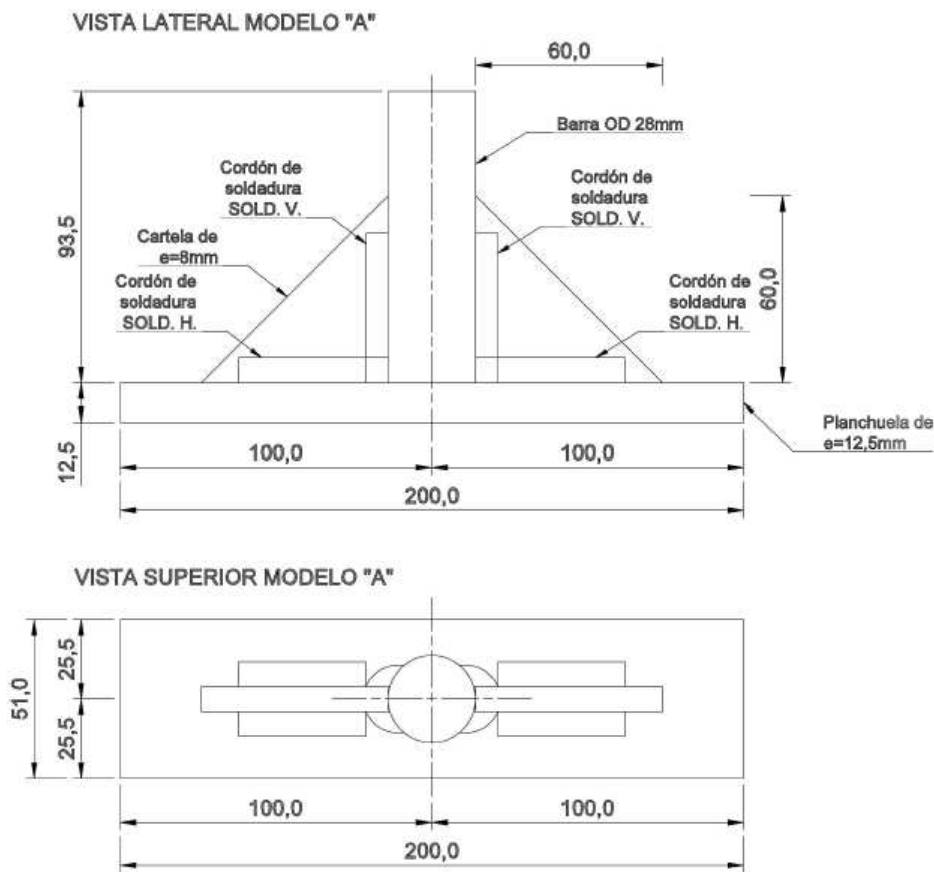


Figura 20: Vista frontal y lateral del Modelo "A"

El modelo en estudio está compuesto en su integridad por elementos finitos hexaédricos. La barra de OD 28mm, los cordones de soldadura y las chapas triangulares de refuerzo poseen elementos finitos hexaédricos de 1mm de lado.

Para el mallado de la planchuela de 12,5mm de espesor se generaron elementos finitos hexaédricos. En la zona de contacto de los cordones de soldadura la malla de elementos es de 1mm de lado para que la misma coincida con el mallado de los cordones de soldadura. El mallado restante de la planchuela está generado con elementos finitos que varían gradualmente desde 1mm a 4mm de lado desde el interior de la planchuela hacia las aristas de la misma.

En la [Figura 21](#) se observa la distribución de los elementos del modelo numérico:

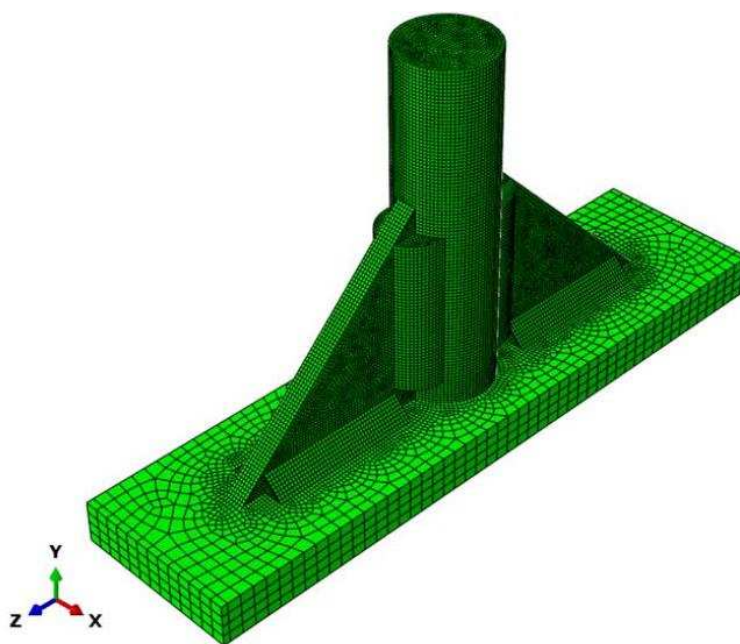


Figura 21: Distribución de elementos finitos en Modelo "A".

Para la creación de los modelos numéricos se imponen restricciones de tipo "Tie" en las superficies comunes al metal base y de aporte.

La condición de contorno establecida para este modelo es coincidente con la generada para el Modelo "P", es decir, que el extremo libre de la barra de acero de OD 28mm se encuentra empotrada.

Las cargas utilizadas para evaluar los modelos numéricos correspondiente al Modelo "A" son coincidentes con las que se utilizaron para evaluar el Modelo "P". De este modo se pueden comparar en forma directa las curvas de fragilidad obtenidas para ambos modelos y establecer si el rediseño de la estructura genera un efecto positivo en el comportamiento de la misma bajo carga.

Teniendo en cuenta las principales discontinuidades que se presentan en los cordones de soldadura, a continuación se enumeran los modelos numéricos a evaluar con las presiones previamente establecidas:

- A – M1: modelo perfecto sin discontinuidades en los cordones de soldadura del extremo inferior rediseñado del aparejo de izaje.
- A – M2: modelo con la falta de fusión entre el cordón de soldadura y el metal base en el extremo inferiorrediseñado del aparejo de izaje.
- A – M3: modelo con socavación o falta de metal de soldaduraen el extremo inferiorrediseñado del aparejo de izaje.
- A – M4: modelo con porosidad en el metal de soldaduraen el extremo inferiorrediseñado del aparejo de izaje.
- A – M5: modelo con inclusiones solidas en el metal de soldadura en el extremo inferior rediseñado del aparejo de izaje.

Se procede a realizar los cálculos numéricos de los distintos modelos utilizando el software de elementos finitos. En la Figura 22 se observan los resultados obtenidos luego de realizar la simulación numérica correspondiente al modelo perfecto sin discontinuidades en los cordones de soldadura del extremo inferior rediseñado del aparejo de izaje sometido a la carga C1 A – M1 – C1:

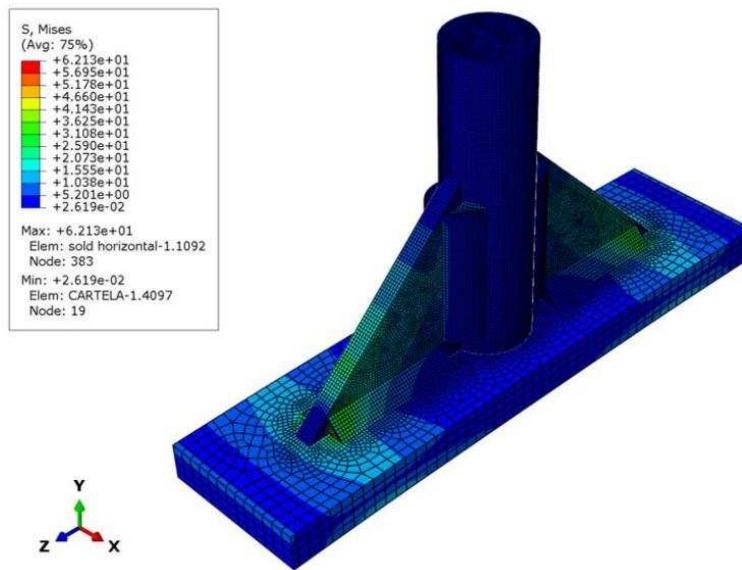


Figura 22: Resultado obtenidos para el Modelo A – M1 – C1.

La máxima tensión de Von Mises y la zona del modelo donde tiene lugar son los aspectos de principal interés. En la **Tabla 6** se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones para los modelos numéricos con las distintas discontinuidades planteadas.

	A-M1-C1	A-M1-C2	A-M1-C3
S Mises [Mpa]	62.1	108.7	139.7
Zona Max. S Mises	SOLD. H.	SOLD. H.	SOLD. H.
	A-M2-C1	A-M2-C2	A-M2-C3
S Mises [Mpa]	62.7	109.8	141.2
Zona Max. S Mises	SOLD. H.	SOLD. H.	SOLD. H.
	A-M3-C1	A-M3-C2	A-M3-C3
S Mises [Mpa]	77.2	135.2	173.7
Zona Max. S Mises	SOLD. H.	SOLD. H.	SOLD. H.
	A-M4-C1	A-M4-C2	A-M4-C3
S Mises [Mpa]	63.5	111.1	142.8
Zona Max. S Mises	SOLD. H.	SOLD. H.	SOLD. H.
	A-M5-C1	A-M5-C2	A-M5-C3
S Mises [Mpa]	63.4	111	142.7
Zona Max. S Mises	SOLD. H.	SOLD. H.	SOLD. H.

Tabla 6: Resultados de simulaciones para el Modelo “A”.

A partir los resultados obtenidos anteriormente se construyen curvas de tendencia para cada uno de los modelos numéricos establecidos para el Modelo “A”. Estas curvas vinculan las cargas utilizadas en las simulaciones con las máximas tensiones de Von Mises obtenidas como resultado de las simulaciones.

Se construye una muestra representativa de 30 valores de carga obtenidos aleatoriamente con una carga límite inferior de 3750 N y una carga límite superior de 4700 N. Estos límites adoptados se deben a que conociendo las curvas de tendencia de cada uno de los modelos y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales se puede obtener en este caso la carga a partir de la cual se alcance la tensión de fluencia en el acero. Con la carga límite inferior en ninguno de los modelos se alcanza la tensión de fluencia y con la carga límite superior se alcanza en todos los modelos la tensión de fluencia.

Además se construye una segunda muestra representativa de 30 valores de cargas

obtenidos aleatoriamente pero en este caso la carga límite inferior es de 6600 N y con esta carga ningún modelo alcanza la tensión de rotura. La carga límite superior es de 8400 N y con esta carga todos los modelos alcanzan la tensión de rotura.

A partir de las curvas de tendencia creadas para los modelos A – M1 a A – M5 se obtiene para cada una de las cargas de las muestras representativas la máxima tensión de Von Mises que se va a presentar el modelo.

Como cada modelo numérico presenta un comportamiento y una distribución de tensiones distinto al resto de los modelos cuando se los somete a cada una de las cargas perteneciente a las muestras representativas, se establece la probabilidad de alcanzar la tensión de fluencia y de rotura en los modelos A – M1 a A – M5 para cada una de las cargas.

Luego de obtener para cada una de las cargas la máxima tensión de Von Mises, se seleccionan aquellos mínimos valores de carga que presentan una probabilidad del 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de que la máxima tensión que se presente en los modelos supere la tensión de fluencia σ_y y de rotura σ_r .

En la [Tabla 7](#) y [Tabla 8](#) se detallan los valores antes mencionados. En negrita se observan los valores de tensión de Von Mises que superan la tensión de fluencia del material.

Carga [N]	A-M1	A-M2	A-M3	A-M4	A-M5	Prob. $\sigma_y < S_{mis}$ [%]
	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	
3751	144.04	145.54	179.30	147.41	147.41	0
3754	144.15	145.66	179.44	147.53	147.53	0
3833	147.19	148.72	183.22	150.64	150.64	20
4587	176.14	177.98	219.26	180.27	180.27	60
4649	178.52	180.38	222.22	182.71	182.71	80
4689	180.06	181.93	224.13	184.28	184.28	100
4690	180.10	181.97	224.18	184.32	184.32	100

Tabla 7: Resumen de cargas con probabilidad de $\sigma_y < S_{mis}$.

Carga [N]	P-M1	P-M2	P-M3	P-M4	P-M5	Prob. $\sigma_r < S_{mis}$ [%]
	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	S Mis [Mpa]	
6690	256.90	259.57	319.78	262.92	262.92	0
6694	257.05	259.73	319.97	263.07	263.07	0
6753	259.32	262.02	322.79	265.39	265.39	20
8200	314.88	318.16	391.96	322.26	322.26	60
8305	318.91	322.23	396.98	326.39	326.39	80
8340	320.26	323.59	398.65	327.76	327.76	100
8345	320.45	323.79	398.89	327.96	327.96	100

Tabla 8: Resumen de cargas con probabilidad de $\sigma_r < S_{mis}$.

En la [Figura 23](#) se observan la nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y la nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_r < S_{mis}$. A partir de los resultados obtenidos resumidos en la tabla anterior se pueden construir las curvas de fragilidad asociadas al Modelo “A”. En el presente trabajo se opta por realizar una interpolación lineal entre los resultados obtenidos y de este modo obtener una curva que describa el comportamiento de las curvas de fragilidad. En la [Figura 24](#) se observan la curva de fragilidad asociada a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y la curva de fragilidad asociada a la probabilidad de que $\sigma_r < S_{mis}$.

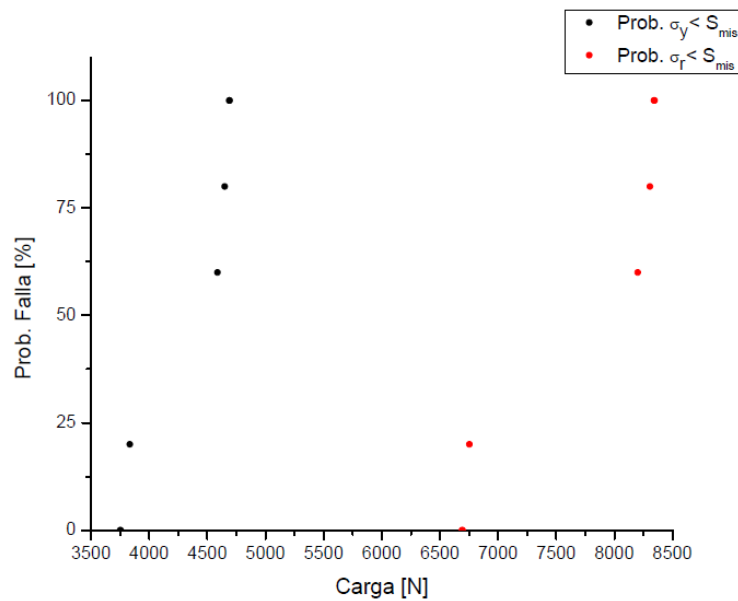


Figura 23: Nube de puntos asociados a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y $\sigma_r < S_{mis}$.

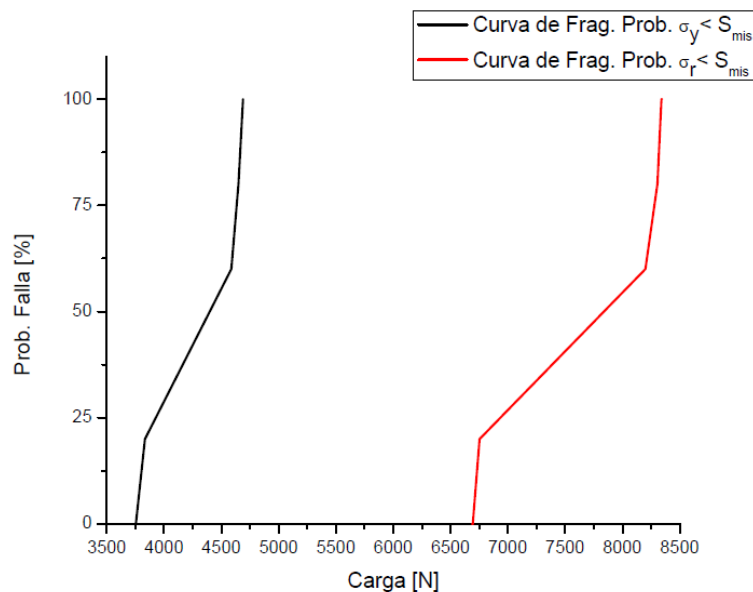


Figura 24: Curvas de fragilidad asociadas a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ y $\sigma_r < S_{mis}$.

6 CONCLUSIONES

Realizando un breve análisis de riesgo de la estructura metálica de izaje se identificaron dos uniones críticas. Estas uniones se encuentran descripta por el Modelo “G” y el Modelo “P”.

Por medio de la comparación entre las curvas de fragilidad generadas para los modelos antes mencionados se puede establecer rápidamente cuál de las uniones va a ser la limitante de carga para el uso de la estructura. En la Figura 25 se realiza la comparación entre las curvas de fragilidad obtenidas para el Modelo “G” y el Modelo “P”:

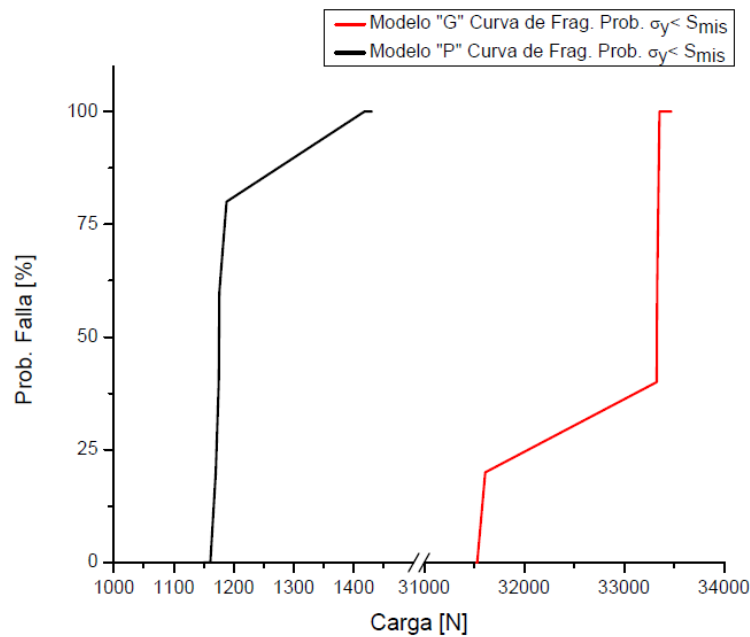


Figura 25: Curvas de fragilidad asociadas a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ para los Modelos "G" y "P".

En la figura anterior se puede observar claramente que la unión crítica se presenta en la zona inferior de la estructura metálica de izaje, es decir, en la zona que se encuentra descrita por el Modelo "P". Esta gran diferencia de resistencia entre ambas uniones se puede explicar por la gran robustez y mayor longitud de soldadura que se presenta en la unión soldada del extremo superior de la estructura.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, se establece el Modelo "A" el cual presenta un mejoramiento en el diseño de la zona inferior de la estructura de izaje utilizando como base el Modelo "P". Esta mejora en el diseño se verifica en la Figura 26 en la cual se puede observar la comparación entre las curvas de fragilidad del Modelo "P" y el Modelo "A".

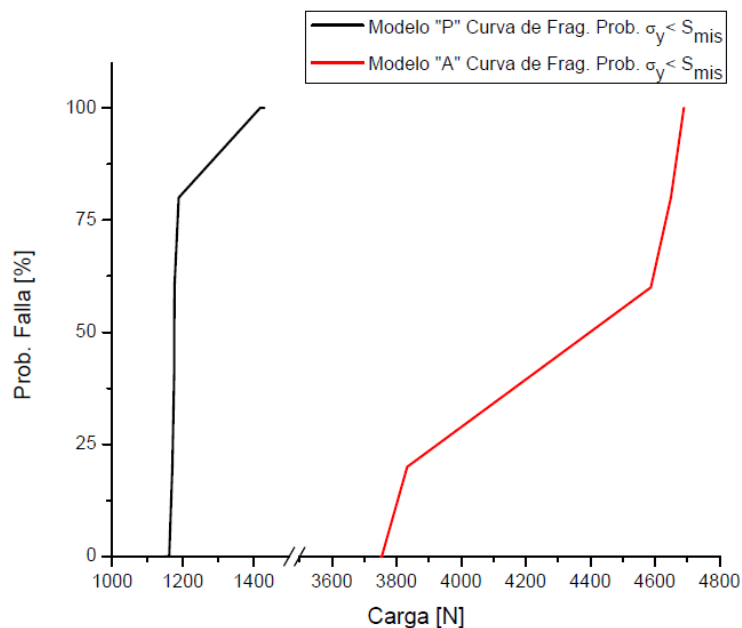


Figura 26: Curvas de fragilidad asociadas a la probabilidad de que $\sigma_y < S_{mis}$ para los Modelos "P" y "A".

A partir del análisis de una estructura metálica de izaje con un diseño simple se demuestra que la conformación de curvas de fragilidad es una herramienta de gran interés para utilizarse en el estudio de estructuras masivas y de gran complejidad tanto para establecer cronogramas de mantenimiento preventivo como para producir cambios en los diseños de dichas estructuras. Las curvas de fragilidad permiten establecer el comportamiento de las estructuras tomando en cuenta la variabilidad de las cargas a las cuales se someten así como también la variabilidad que se puede presentar en la resistencia de los materiales o imperfecciones constructivas con gran probabilidad de ocurrencia.

REFERENCIAS

AWS A3.0-2001, Standard Welding Terms and Definitions, *American Welding Society*, 2001.

CIRSOC 301, *Reglamento Argentino de Estructuras de Acero*, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2005.

CIRSOC 304, *Reglamento Argentino para la Soldadura de Estructuras en Acero*, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles, Buenos Aires, 2007.

Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. 1998, *Abaqus Theory Manual*, Abaqus, Abaqus Version 6.6-4, 1998.

SAE J1397, *Estimated Mechanical Properties and Machinability of Steel Bars*, SAE International, 1992.

Trogia, G., *Estructuras Metálicas: Proyecto por Estados Límites*, Universita Libros, 7^o Edición, 2007.

Schultz, M.T., Gouldby, B.P., Simm, J.D., Wibowo, J. L., *Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability*, US Army Corps of Engineers, 2010.