



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE UNIONES EMBUTIDAS

CARLOS ARTURO AGUILAR RIOSECO

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

HERNÁN SANTA MARIA OYANEDEL

Santiago de Chile, octubre, 2020.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al equipo de académicos y coordinadores del programa por toda la motivación y conocimientos invaluable entregados durante el desarrollo de los cursos.

Agradezco especialmente a mi profesor supervisor Sr. Hernán Santa María Oyanedel por brindarme la oportunidad de su guía durante el desarrollo de la actividad de graduación y sus importantes y atinentes consejos.

A mi amada señora, hija e hijos.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
INDICE DE TABLAS	iv
INDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	1
Estado del arte y usos de conectores.....	3
Geometría y materialidad de las conexiones	12
Objetivos.....	13
CONSIDERACIONES PARA MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	14
Consideraciones referidas a geometría	14
Consideraciones referidas a las zonas de contacto	14
Representación de no linealidad del material	18
Consideración de no linealidad debida a grandes deformaciones	28
MODELACIÓN DE PROCESO DE APLASTADO DEL TUBO.....	32
Características de modelo – geometría.....	32
Comparación geométrica de modelo numérico y elemento real.....	37
Análisis de tensiones residuales en elemento	42
ANÁLISIS DE ELEMENTO SOMETIDO A TRACCIÓN.....	60
Características de modelo	60
Comparación de resultados numéricos y experimentales	63
Análisis de resultados obtenidos.....	65
CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFIA.....	72
A N E X O S.....	73

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla I-1 Dimensiones de las configuraciones analizadas.....	12
Tabla II-1 Requerimientos para acero ASTM A500.....	18
Tabla III-1 Resultados de tensiones obtenidas en modelaciones numéricas.....	59
Tabla IV-1 Resultados obtenidos en ensayos de unión.....	68

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura I-1: Construcción domos 144 m de diámetro de madera, Brindisi, Italia (ENEL, 2015).....	2
Figura I-2: Construcción de domos estructura metálica Enel, Coronel, Chile. (ENEL, 2015).....	3
Figura I-3: Configuración de W. Bishop – Patente US1026845 – 1912.....	5
Figura I-4: Configuración de F. Newlin – Patente US1070165 – 1913.....	5
Figura I-5: Configuración de F. Baldwin – Patente US1444491 – 1923	6
Figura I-6: Configuración de A. Fentiman – Patente US2931467 – 1960.....	7
Figura I-7: Método fabricación de unión A. Fentiman – Patente US3079681 – 1963	8
Figura I-8: Configuración de Van Vliet – Patente US4355918 – 1982	9
Figura I-9: Configuración de Reynolds – Patente US5956917 – 1999.....	9
Figura I-10: Conector Geométrica – Patente US6237298 – 2001	10
Figura I-11: Configuración genérica conector apernado (Temcor®, 2015).	11
Figura I-12: Configuración genérica conector embutido Geométrica® (ENEL, 2015).	11
Figura II-1: Penetración en método de penalización (Ansys®, 2015).....	16
Figura II-2: <i>Test report</i> para prueba de tracción probeta espécimen 1 (ENEL, 2017).	19
Figura II-3: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 1 (ENEL, 2017).....	20
Figura II-4: <i>Test report</i> para prueba de tracción probeta espécimen 2 (ENEL, 2017).	21
Figura II-5: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 2 (ENEL, 2017).....	22
Figura II-6: <i>Test report</i> para prueba de tracción probeta espécimen 3 (ENEL, 2017).	23
Figura II-7: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 3 (ENEL, 2017).....	24
Figura II-8: <i>Test report</i> para prueba de tracción probeta espécimen 4 (ENEL, 2017).	25
Figura II-9: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 4 (ENEL, 2017).....	26
Figura II-10: Representación No linealidad del material – BISO.....	27
Figura II-11: Tensión-deformación para <i>Bilinear Kinematic Hardening</i> (Ansys ®, 2015).	28
Figura II-12: Newton Raphson para 1 GDL (Ansys ®, 2015).....	29
Figura II-13: Newton Raphson v/s método longitud de arco (Ansys ®, 2015).	30
Figura II-14: Pasos de carga (<i>load steps</i>), subpasos (<i>substeps</i>) y tiempo (<i>time</i>) (Ansys ®, 2015).....	31
Figura III-1: Ejemplo modelo sólido prensa – tubo. Especimen 4.....	32
Figura III-2: Modelo zona de contacto pre y post carga	34
Figura III-3: Geometría del elemento SOLID187 (Ansys ®, 2015).	34
Figura III-4: Geometría del elemento TARGE170 (Ansys ®, 2015).	36
Figura III-5: Geometría del elemento CONTA175 (Ansys ®, 2015).	37
Figura III-6: Vista frontal elemento real espécimen 4.	38
Figura III-7: Vista lateral elemento real espécimen 4.	39
Figura III-8: Medición frontal elemento real espécimen 4.	39

Figura III-9: Medición lateral elemento real espécimen 4.	40
Figura III-10: Modelo tridimensional probeta espécimen 4 - deformada estimada real.	40
Figura III-11: Modelo tridimensional probeta espécimen 4.....	41
Figura III-12: Vista lateral deformada real y modelo numérico	41
Figura III-13: División geométrica tubo base sin mallar ni deformar.....	43
Figura III-14: Subdivisión del elemento mallado.	43
Figura III-15: Especimen 1 – Mallado condición no deformada.	44
Figura III-16: Especimen 1 – Mallado condición no deformada zona de contacto.	45
Figura III-17: Especimen 1 – Mallado condición deformada.	45
Figura III-18: Especimen 1 – Deformación Time 1,0.....	46
Figura III-19: Especimen 1 – Plastic equivalent stress Time 1,0.....	46
Figura III-20: Especimen 1 – Von Mises stress Time 1,0 zona A	47
Figura III-21: Especimen 1 – Von Mises stress Time 1,0 zona B,C y D.....	47
Figura III-22: Especimen 2 – Mallado condición no deformada.	48
Figura III-23: Mallado condición no deformada zona de contacto.....	48
Figura III-24: Especimen 2 – Mallado condición deformada.	49
Figura III-25: Especimen 2 – Deformación Time 1,0.....	49
Figura III-26: Especimen 2 – Plastic equivalent stress Time 1,0.....	50
Figura III-27: Especimen 2 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zona A.....	50
Figura III-28: Especimen 2 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zonas B, C y D.....	51
Figura III-29: Especimen 3 – Mallado condición no deformada	51
Figura III-30: Especimen 3 – Mallado condición no deformada zona de contacto.	52
Figura III-31: Especimen 3 – Mallado condición deformada.	52
Figura III-32: Especimen 3 – Deformación Time 1,0.....	53
Figura III-33: Especimen 3 – Plastic equivalent stress Time 1,0.....	53
Figura III-34: Especimen 3 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zona A.....	54
Figura III-35: Especimen 3 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zonas B,C y D.....	54
Figura III-36: Especimen 4 – Mallado condición no deformada.	55
Figura III-37: Especimen 4 – Mallado condición no deformada zona de contacto.	55
Figura III-38: Especimen 4 – Mallado condición deformada.	56
Figura III-39: Especimen 4 – Deformación Time 1,0.....	56
Figura III-40: Especimen 4 – Plastic equivalent stress Time 1,0.....	57
Figura III-41: Especimen 4 – Tensión de Von Mises Time 1,0 zona A	57
Figura III-42: Especimen 4 – Tensión de Von Mises Time 1,0 zonas B, C y D.....	58
Figura III-43: Especimen 1 – Tensión de Von Mises Time 1,0 vista frontal.....	59
Figura IV-1: Especimen 4 simplificado – mallado sin deformar.	62
Figura IV-2: Especimen 3 simplificado – mallado deformación prensa.....	62
Figura IV-3: Probeta post ensayo de tracción. (ENEL, 2015).	64
Figura IV-4: Deformación axial [0.37 mm] dirección axial – Substep 7.....	66
Figura IV-5: Esfuerzo axial para Substep 7 [tonf/mm ²].	66
Figura IV-6: Esfuerzo axial para Substep 131 [tonf/mm ²].	67
Figura IV-7: Deformación axial [6.61 mm] dirección axial – Substep 131.....	67
Figura IV-8: Montaje de probeta para ensayo real (ENEL, 2015).....	68

RESUMEN

En el actual desarrollo de proyectos *greenfield* y *brownfield* que presentan una necesidad de procesamiento o acopio de grandes cantidades de material y/o combustibles y debido a exigencias medioambientales y a la realidad actual respecto al calentamiento global, una de las necesidades relevantes a considerar es la protección medioambiental tendiente a mitigar la emisión de material particulado a la atmósfera. Dentro de las soluciones que se han utilizado hace algunas décadas están los domos geodésicos cuyas principales ventajas corresponden a su efectividad de resistir las cargas de diseño y su rapidez de fabricación y montaje. Del punto de vista de la eficiencia estructural, presentan relaciones de pesos/área a cubrir muy convenientes respecto a estructuras de acero convencional y además son capaces de cubrir grandes luces sin necesidad de apoyos intermedios. Por otro lado, debido a los desarrollos y avances en el tipo de conexiones desarrolladas por los fabricantes, el montaje se puede realizar en casi cualquier condición climática y sin necesidad de grandes maquinarias.

Respecto al diseño estructural, no existe gran diferencia en cuanto a un diseño de una estructura reticulada en tres dimensiones, es decir, la obtención de los esfuerzos de diseño se puede realizar en casi cualquier software comercial. Algunos de los proveedores de este tipo de estructuras han desarrollado un tipo de unión que ha demostrado ser muy eficiente y se materializa en base a un conector nodal de aluminio que posee ranuras dentro de la cual se insertan tubos con ranuras. La conexión requerirá resistir los esfuerzos a los que será sometida la estructura, pero además es deseable un comportamiento dúctil del conjunto conexión – elemento.

Resulta de interés estudiar el estado de tensiones residuales producto del proceso de fabricación y además la influencia de dichas tensiones en posibles fallas locales de los elementos estructurales y además la influencia en la resistencia final a la tracción y compresión.

ABSTRACT

In the current development of greenfield and brownfield projects that present a need for processing or storing large quantities of material and / or fuels and due to environmental requirements and the current reality regarding global warming, one of the relevant needs to consider is the protection aimed at mitigating the emission of atmospheric pollution. Among the structural solutions that have been used for a few decades are geodesic domes whose main advantages correspond to their effectiveness in resisting design loads and their speed of manufacture and erection. From the point of view of structural efficiency, they have very convenient weight / area ratios compared to conventional steel structures and are also capable of covering large spans without need of intermediate supports. On the other hand, due to the developments and advances in the type of connections developed by the manufacturers, the erection can be carried out in almost any climatic condition and without the need for large machinery. Regarding to the structural design, there is no great difference in terms of a design any three-dimensional reticulated structure, that is, obtaining the design forces can be done in almost any commercial software. Some of the suppliers of this type of structure have developed a type of union that has proven to be very efficient and is materialized based on an aluminum nodal connector that has grooves into which tubes with keys are inserted. The connection will require resisting the stresses to which the structure will be subjected, but a ductile behavior of the connection-element assembly is also desirable. It's interesting study the state of residual stresses resulting from the manufacturing process and also the influence of stresses on possible local failures in the structural elements and also the influence on the final resistance to tension and compression.

INTRODUCCIÓN

El concepto de cúpula o domo ha estado asociado a la construcción desde los albores de la civilización y se vieron reflejados por ejemplo en los iglúes de los esquimales, o en los tholos de Grecia, cuyas construcciones de mayor envergadura datan de aproximadamente al 1250 a.c., Sin embargo, conceptos de domos más similares a la concepción actual con técnicas constructivas modernas, surgieron con el imperio romano cerca del 100 d.c., lográndose cúpulas de cerca de 40 m de diámetro y luego continuaron con el imperio bizantino con cerca del 500 d.c. con cúpulas cerca de 60 m. Desde ahí, distintas culturas han utilizado el concepto tales como los otomanos cerca del 1400 d.c., así también la cultura islámica, ortodoxa concluyendo en el concepto del renacimiento y barroco, las que se pueden asimilar a las técnicas modernas y se puede encontrar obras tales como la cúpula de San Pedro en el Vaticano.

En la actualidad, en los casos en que es necesario realizar la cobertura de grandes superficies y en que además existe la restricción de minimizar apoyos intermedios o simplemente la imposibilidad de disponerlos, la cantidad de opciones dependiendo de la real magnitud de las distancias entre apoyos es bastante limitada. Ejemplos de aplicación en que es necesario realizar coberturas de grandes superficies son variadas. Entre algunos casos, y sin limitarse al ámbito de Chile, se puede mencionar coberturas de sectores de apilamiento de mineral, coberturas de procesamiento de materiales tales como mineral chancado, cemento o carbón. Además, existen aplicaciones arquitectónicas tales como grandes anfiteatros, estadios deportivos, entre otros. En general, en los casos en que es necesario cubrir distancias libres de hasta 45 metros de longitud, los galpones estructurales en base a enrejados o marcos

resultan aún factibles del punto de vista técnico – económico y funcional, sin embargo, sobre dichas longitudes y dependiendo de la configuración estructural y de las condiciones de sitio tales como presencia o no de nieve, presiones efectivas de viento y solicitaciones sísmicas, resulta casi impracticable disponer estructuras en base a marcos o enrejados tradicionales para luces mayores a las mencionadas. Para dichos casos las estructuras geodésicas representan una de las pocas opciones disponibles para cubrir grandes dimensiones. En cuanto a las estructuras geodésicas o domos, existe una amplia variedad de opciones dependiendo también de las condiciones de sitio y longitudes. Dentro de las opciones más comunes y clasificando según la materialidad, se encuentran los basados en elementos estructurales de acero, de aluminio, de madera y también se encuentra bastante desarrollado en cuanto a proyectos construidos los domos de hormigón armado para diámetros de hasta 45 m. En la Figura I-1 se puede apreciar los domos gemelos en la ciudad de Brindisi, Italia, pertenecientes a ENEL. Dichos domos están configurados en base a elementos de madera laminada encolada y conexiones metálicas. En la Figura I-2 se puede apreciar el primero de los dos domos metálicos construidos en 2015 en la ciudad de Coronel, Chile y pertenecientes a la empresa ENEL.



Figura I-1: Construcción domos 144 m de diámetro de madera, Brindisi, Italia (ENEL, 2015).



Figura I-2: Construcción de domos estructura metálica Enel, Coronel, Chile. (ENEL, 2015).

De todas las tecnologías existentes a la fecha, las que presentan mayor flexibilidad en cuanto a costos, plazos de construcción y además flexibilidad para las formas de las superestructuras, corresponde a la de los domos en base a estructura metálica. El material que conforma los miembros en general corresponde a perfiles I o elementos tubulares de aluminio o de acero estructural. En cuanto a los tipos de conectores, existe una amplia gama de posibilidades para cada materialidad, desde uniones apernadas, soldadas y embutidas. Dichas soluciones se han ido perfeccionando a lo largo de tiempo en base a la experiencia y conforme a estudios tanto en laboratorio como de gabinete.

Estado del arte y usos de conectores

Considerando que el método de unión impacta directamente en el plazo total de ejecución del proyecto y en la fiabilidad estructural del mismo, resultan muy relevante para el análisis económico, los rendimientos asociados a materializar dichas uniones en sitio. Además, es importante que el método seleccionado resulte ser homogéneo respecto a la calidad de ejecución de la unión. Lo anterior es muy difícil de lograr con uniones del tipo

soldada, debido a que usualmente el trabajo de montaje se realiza en una condición de altura física con todas las implicancias que ello acarrea, tales como incomodidad del operario por efecto de viento, luz, temperatura, entre otros factores. En el caso de las conexiones apernadas, la homogeneidad de la calidad que se logra en la unión es bastante mayor que las uniones soldadas, pero el tiempo de ejecución y costos en general es bastante elevado. Por los factores anteriormente señalados es que desde la década de 1910 se han diseñado, patentado y efectuado proyectos exitosos con uniones del tipo embutidas, principalmente en Estados Unidos de América. Resulta evidente que el método de diseño, fabricación y calidad de los materiales se han ido perfeccionado, lo que permite contar hoy con una gran cantidad de aplicaciones construidas con buenos resultados de calidad y optimización estructural. Una buena fuente de información corresponde a la disponible en la oficina de patentes de Estados Unidos de América y a continuación se presenta una selección de las conexiones apernadas y embutidas patentadas a la fecha, las que en su mayoría fueron llevadas a la práctica.

En las Figuras I-3 a la I-4, se puede apreciar uniones mixtas (embutidas y apernadas) desarrolladas a comienzos del siglo XX. Dichas conexiones se pensaron principalmente para elementos metálicos relativamente esbeltos y para estructuras de pequeñas dimensiones (no más de 15 metros de luz efectiva). El modelo de Bishop representaba además la complejidad de que cada unión era diferente dependiendo del ángulo que formara la diagonal respecto a los elementos ortogonales.

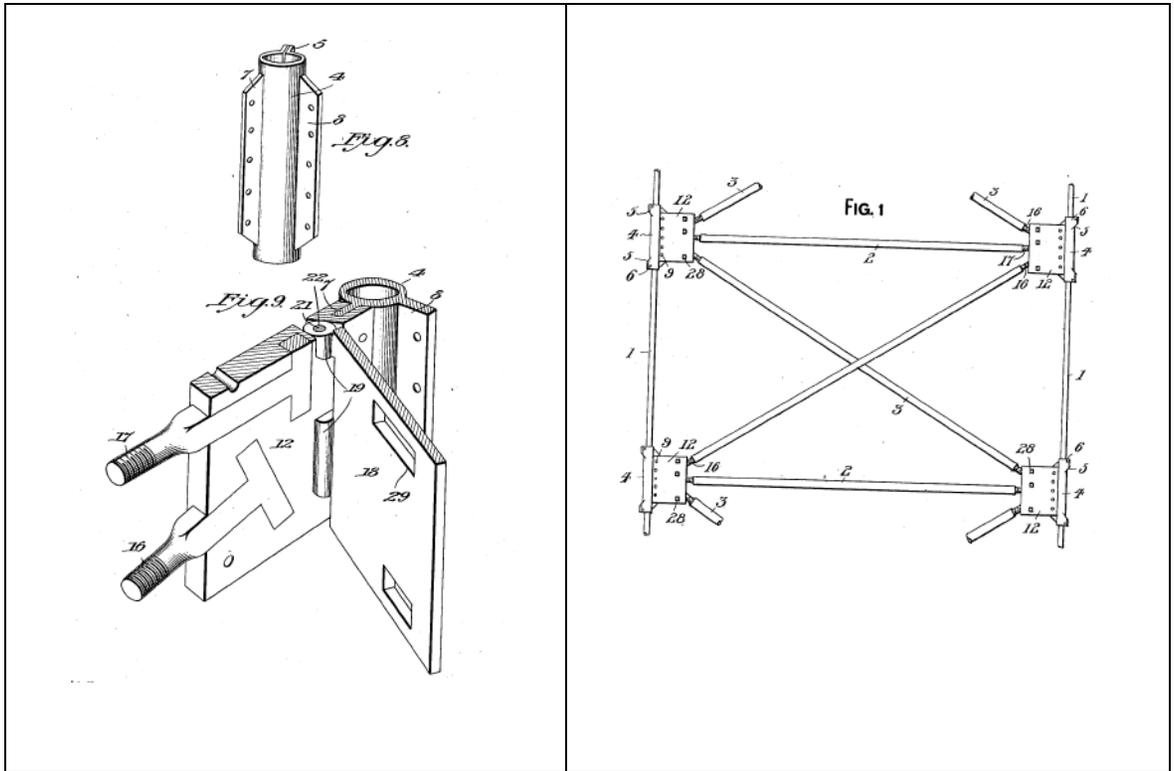


Figura I-3: Configuración de W. Bishop – Patente US1026845 – 1912

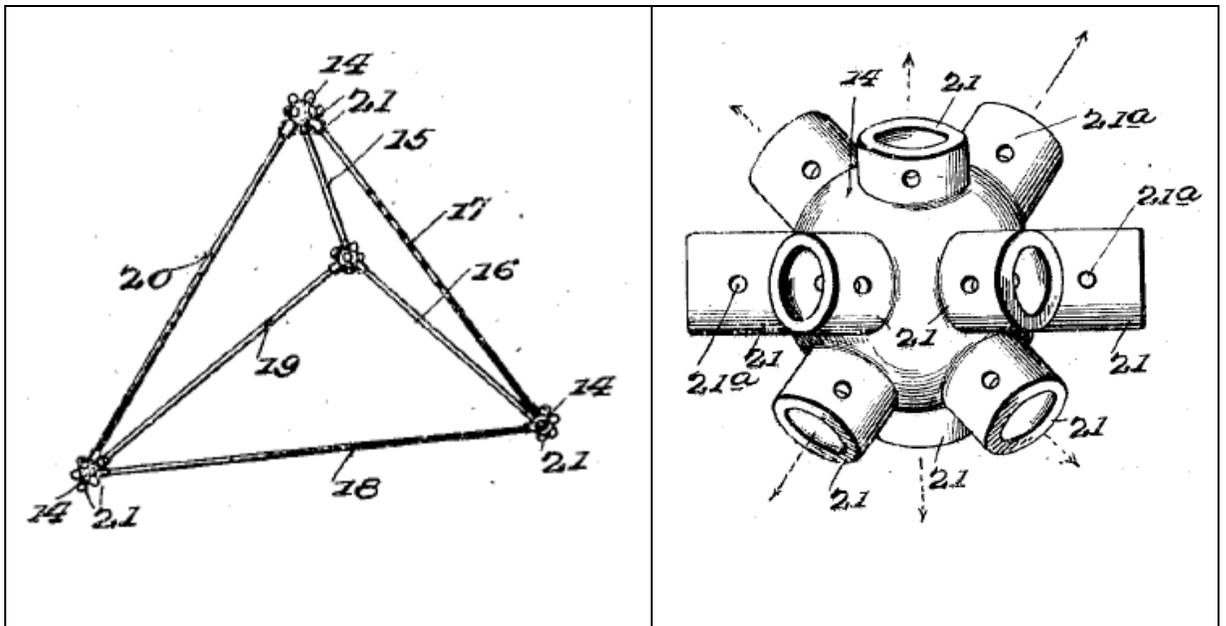


Figura I-4: Configuración de F. Newlin – Patente US1070165 – 1913

Debido a la complicación de tener que generar muchos tipos de uniones diferentes para una misma estructura es que se comenzaron a desarrollar en la segunda década del siglo XX conectores que sirvieran para muchas configuraciones como el modelo de Baldwin patentado en 1923 y que se aprecia en la Figura I-5.

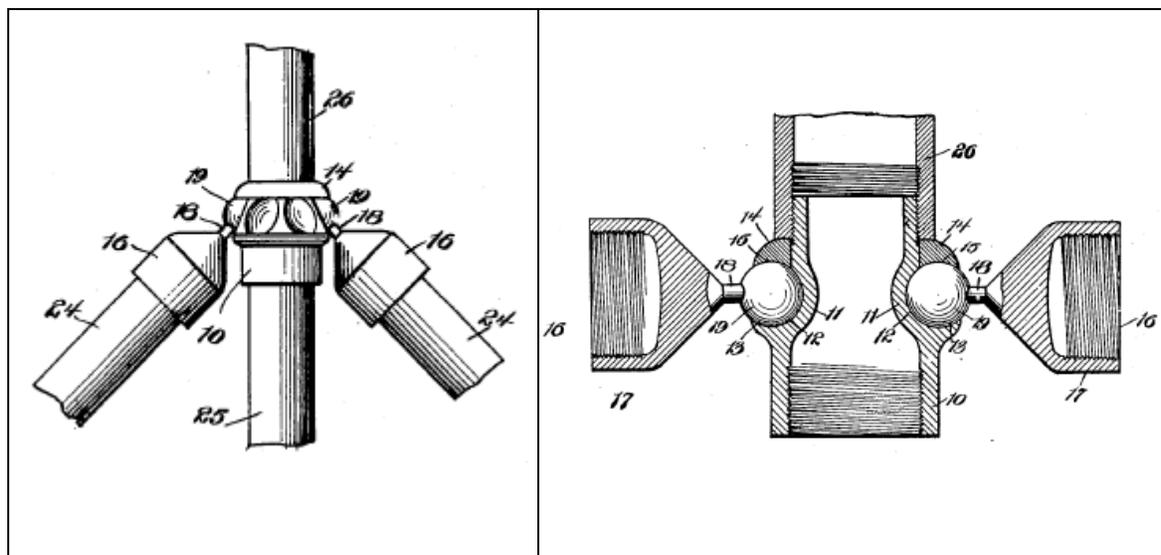


Figura I-5: Configuración de F. Baldwin – Patente US1444491 – 1923

Sin embargo, los primeros desarrollos multipropósito resultaban complejos y costosos de fabricar y montar, además no permitían traspasar un alto porcentaje de las capacidades de carga axial de los perfiles. A partir de la década del 60, Fentiman comienza el desarrollo de uniones embutidas “tipo llave” que permitían poder montar un domo con un número limitado de distintos tipos de conectores. La adaptación en este tipo de conexiones se desarrollaba en los elementos a conectar, los que de todas maneras y en general son todos diferentes para un mismo domo, por lo que no implicaba un aumento sustancial de tiempo y esfuerzo en la fabricación de los miembros, no obstante, generaba una disminución en los costos de fabricación y montaje general y aumentaba la confiabilidad de las conexiones.

En las Figuras I-6, I-7, I-10 e I-12, se puede apreciar el desarrollo de las uniones embutidas tipo llave, mientras que en las Figuras I-8, I-9 e I-11 se aprecian conexiones que si bien son multipropósito (para distintos tipos de elementos y ángulos), poseen elementos del tipo apernados lo que ralentiza y encarece el montaje.

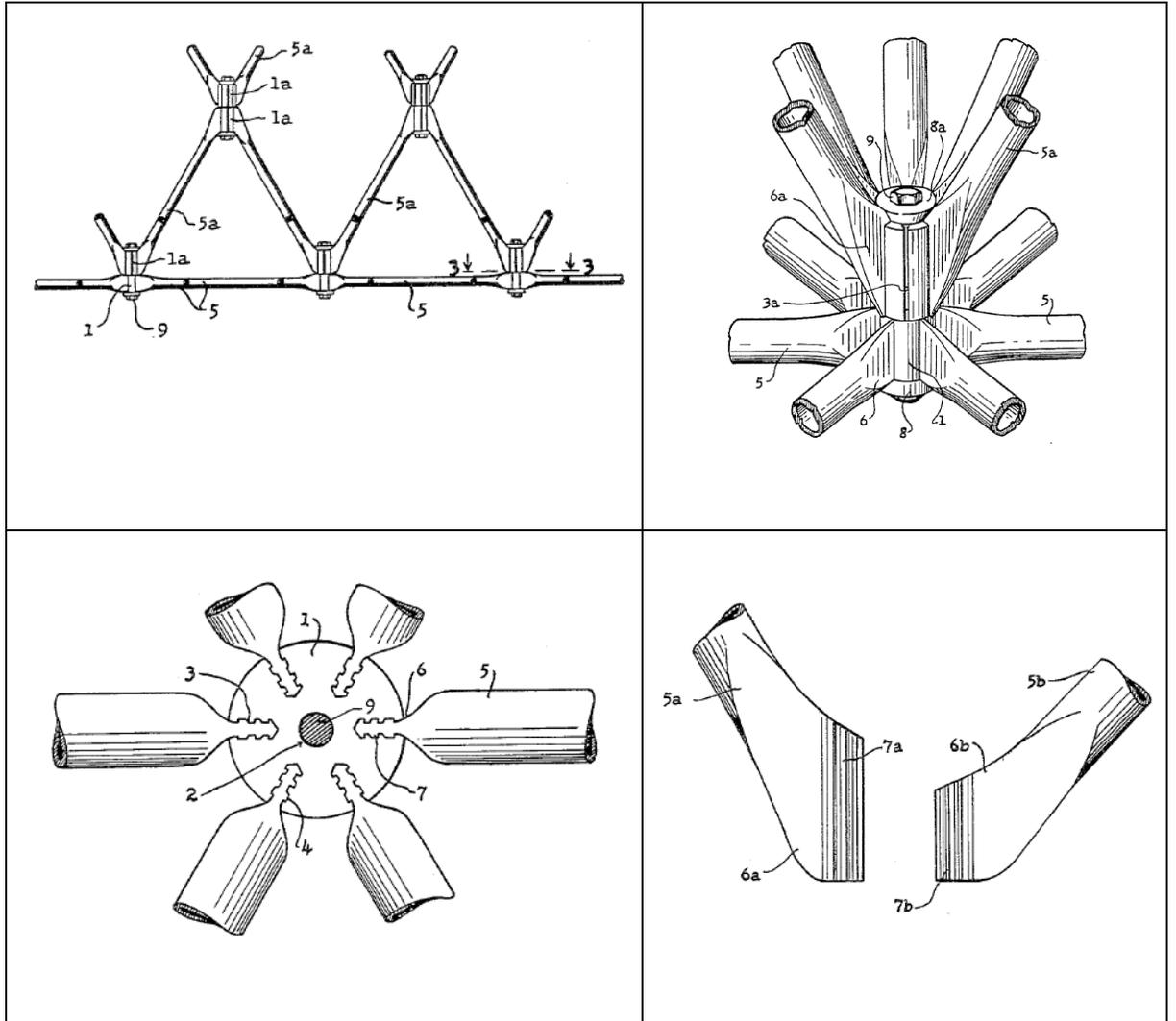


Figura I-6: Configuración de A. Fentiman – Patente US2931467 – 1960

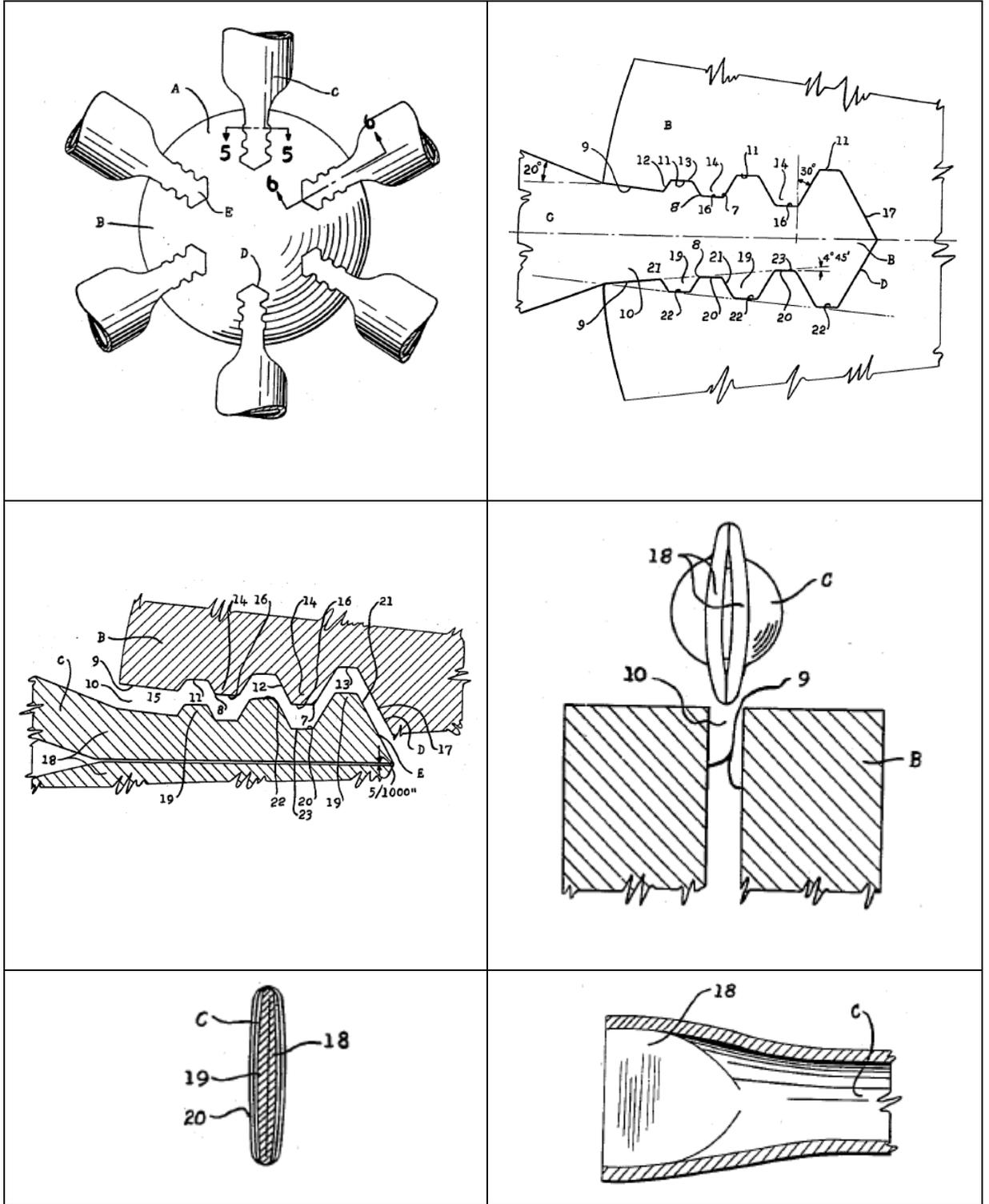


Figura I-7: Método fabricación de unión A. Fentiman – Patente US3079681 – 1963

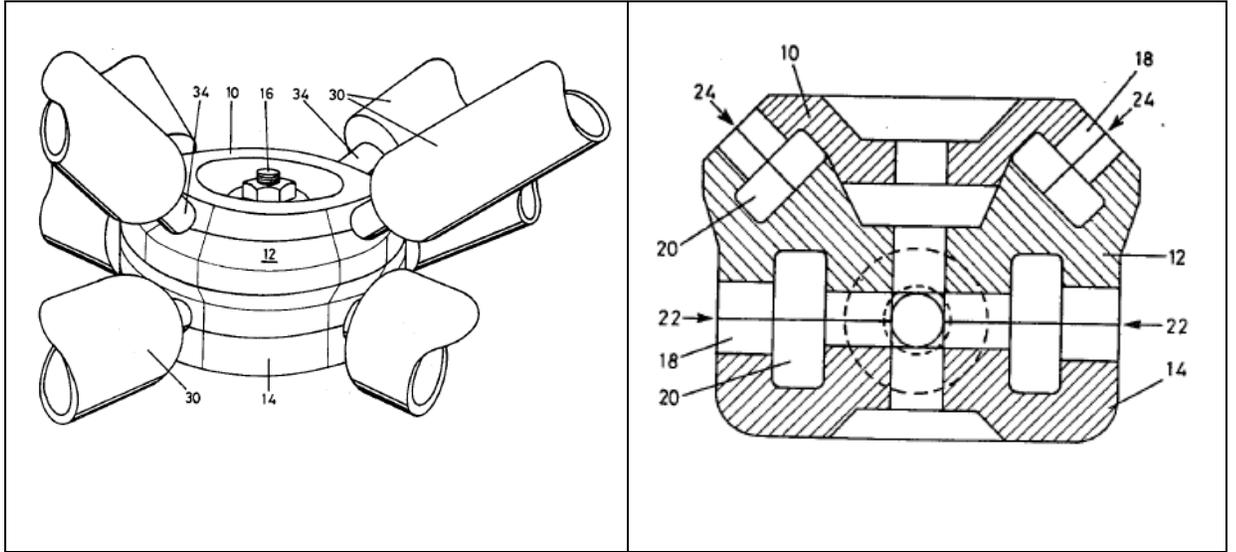


Figura I-8: Configuración de Van Vliet – Patente US4355918 – 1982

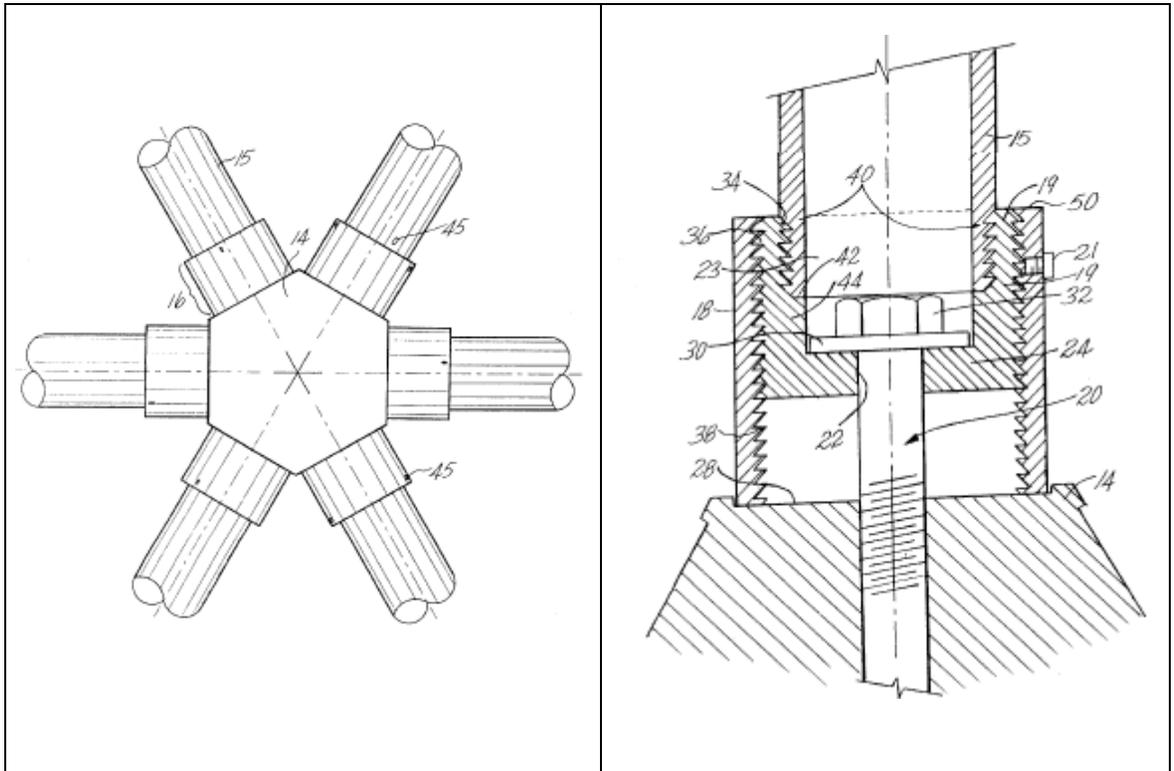


Figura I-9: Configuración de Reynolds – Patente US5956917 – 1999

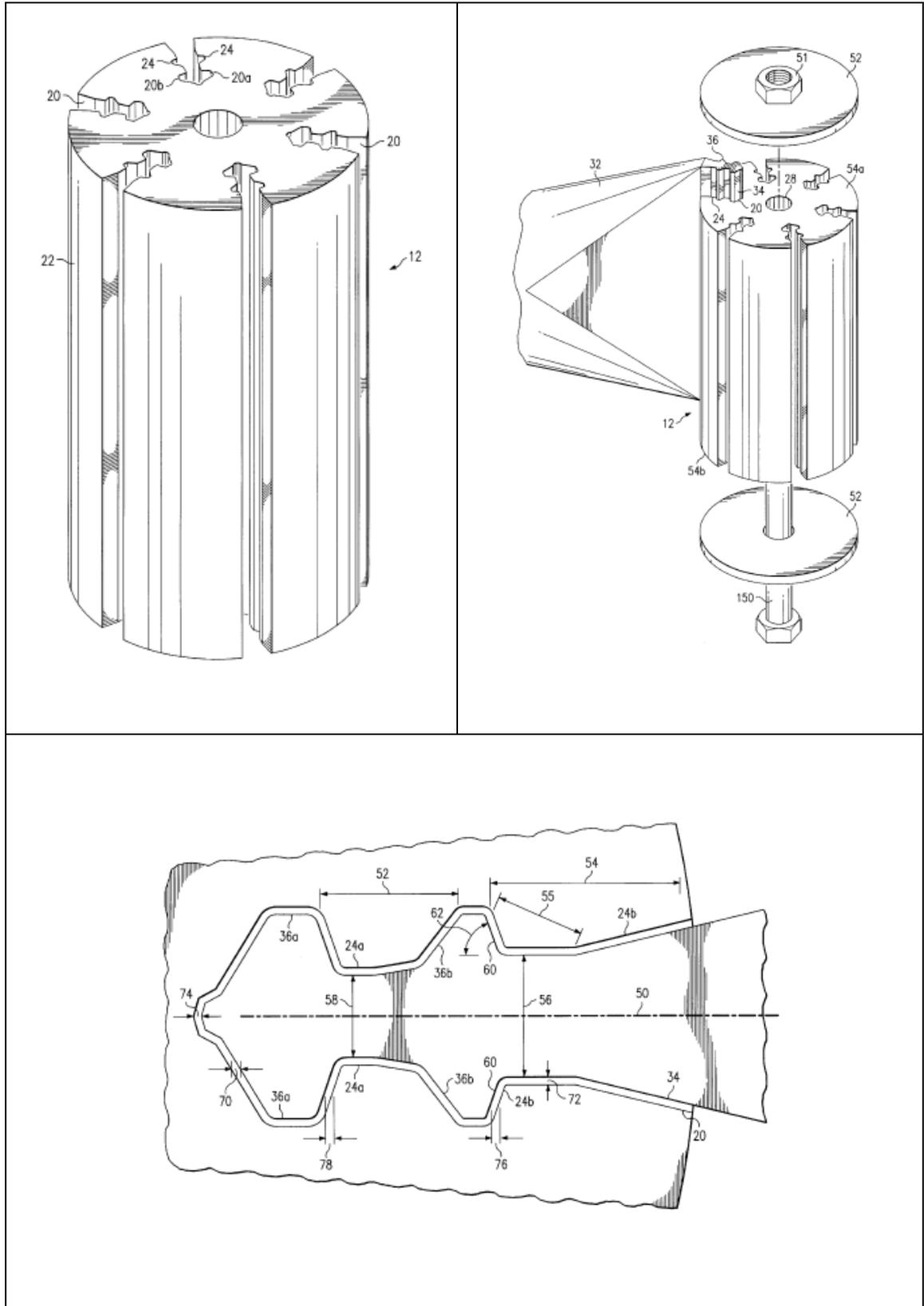


Figura I-10: Conector Geométrica – Patente US6237298 – 2001

En las imágenes I-11 y I-12 se puede apreciar aplicaciones mediante conectores apernados y embutidos respectivamente muy usadas en la actualidad.

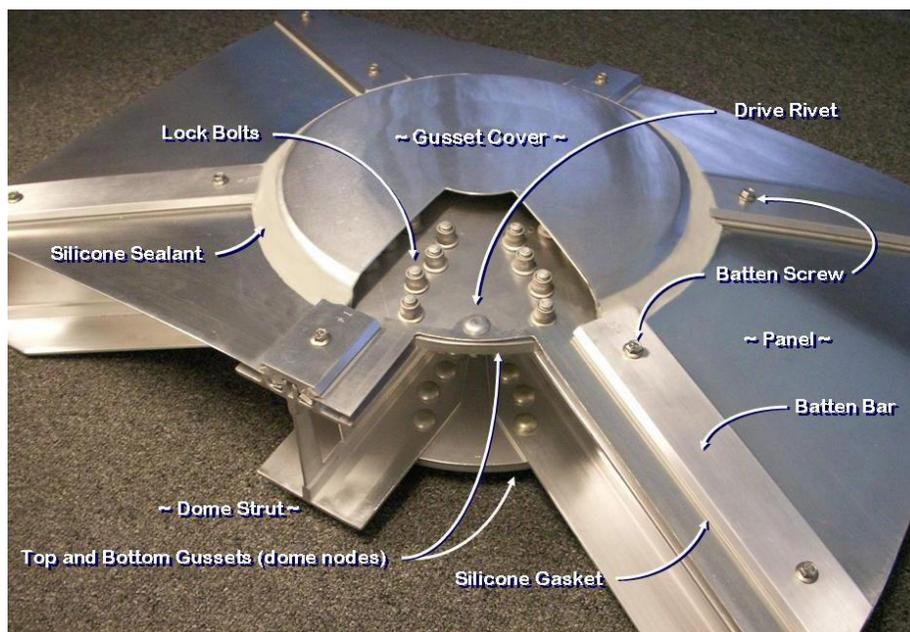


Figura I-11: Configuración genérica conector apernado (Temcor®, 2015).



Figura I-12: Configuración genérica conector embutido Geométrica® (ENEL, 2015).

Geometría y materialidad de las conexiones

De todos los tipos de conexiones utilizados, el presente trabajo abordará el correspondiente al mostrado en la Figura I-12, principalmente por que corresponde al tipo de conector más utilizados desde hace bastantes años y que ha presentado una buena respuesta estructural y durabilidad con muchos proyectos y m² construidos a la fecha. Se realizará el trabajo en base a un estudio particular como referencia en el que se empleó barras de acero estructural ASTM A500 grado B unidos mediante conectores de aluminio extruido con una ranura típica denominada foxtrot. Se han considerado datos de ensayos reales tanto del material base como de configuraciones de uniones. En general para este tipo de proyectos y con el fin de optimizar la fabricación y el montaje, se utiliza una cantidad limitada de diámetros para los elementos prismáticos. Lo usual para un domo de grandes dimensiones es usar entre 4 y 8 distintos tipos de diámetro de tubo base. Luego esos elementos se cortan del largo adecuado y se procede a conformar la unión tipo llave que encajará embutiendo en el conector de aluminio. Para el presente trabajo se utiliza 4 dimensiones utilizadas del proyecto de referencia. En la Tabla I-1 se indica el diámetro y espesor de las configuraciones analizadas.

Tabla 0-1 Dimensiones de las configuraciones analizadas.

Espécimen	Diámetro tubo [mm]	Espesor del tubo [mm]
1 (4,75" x 0,137")	120,7	3,5
2 (3,76" x 0,120")	95,50	3,05
3 (2,875" x 0,104")	73,03	2,64
4 (2,375" x 0,108")	60,3	2,7

Objetivos

El primer objetivo del presente trabajo es simular el proceso de fabricación del tubo, en particular el proceso de aplastado con prensa con el fin de poder cuantificar tensiones residuales. Lo anterior cobra importancia ya que se observó en el proceso de fabricación algunas fallas longitudinales de los sectores cercanos a la zona de aplastado en una cantidad menor de especímenes. Cabe hacer notar que la simulación presentada no corresponde exactamente al proceso de fabricado del tubo real, sino a una aproximación numérica ya que el proceso de fabricación real se encuentra protegido por propiedad intelectual. Se realiza un modelo numérico para cada una las configuraciones descritas en el punto I.2. Para definir los datos de entrada del material se considerará los valores mínimos de fluencia tabulados en la normativa ASTM. Además, se comparará la geometría final luego de realizado el aplastado de la probeta.

El segundo objetivo consiste en utilizar la modelación del objetivo anterior y realizar la simulación simplificada de la prueba de tracción. Se comparará la carga de falla obtenida de los ensayos de probetas y la estimación de carga de falla del modelo numérico.

CONSIDERACIONES PARA MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

En este capítulo se describe las consideraciones adoptadas para la realización de los modelos numéricos que se desarrollaron para el presente estudio. Los modelos fueron desarrollados en el software ANSYS®.

Consideraciones referidas a geometría

Se adopta una modelación con elementos sólidos versus utilización de un modelo de placas. El motivo principal radica en que es necesario representar el aplastamiento de la zona que posteriormente sirve de unión con el conector de acero extruido. Cabe hacer notar que los modos de falla en este tipo de unión de acuerdo con lo observado en ensayos son del tipo dúctil; es decir, se produce una gran deformación elástica y plástica previo a la rotura. Sin embargo, la rotura se puede presentar tanto en la parte aplastada como en la parte no deformada del tubo. Además, se aprecia que en algunos casos se produce un modo de falla de arrancamiento en la zona de interfaz del acero y el aluminio.

Se realiza la modelación de un cuarto de geometría debido a la doble simetría de la configuración lo que resulta importante en cuanto a los tiempos de proceso de los modelos, los que a pesar de dicha optimización y por el uso de elementos sólidos, no linealidad del material, no linealidad de elementos contactos y no linealidad de grandes deformaciones, consumen bastantes recursos.

Se utilizan condiciones de borde coherentes con el proceso de fabricación de la probeta.

Consideraciones referidas a las zonas de contacto

Debido a que el fenómeno modelado corresponde a contacto de distintos cuerpos, se utiliza elementos tipo contacto en las zonas en que se espera se produzca el contacto entre

elementos. En general, se distingue el comportamiento no lineal de una estructura en tres grandes categorías: no linealidad geométrica, no linealidad del material y cambio de estado. Un ejemplo de este último sería el análisis estructural de un arriostramiento del tipo cable, es decir que solamente se puede aceptar el traspaso de fuerzas de tracción del elemento. El caso del contacto de más de dos cuerpos o elementos estructurales también corresponde a una no linealidad de estado.

Uno de los desafíos que supone la utilización de elementos del tipo contacto radica en que a priori no es posible saber las zonas de contacto y el cómo se desarrollan durante la aplicación de carga. Por ese motivo es que para los modelos del presente estudio se considera un área evolvente de todas las posibles regiones de contacto. Mientras mayor sea el área definida, mayor es el costo computacional asociado al proceso para lograr la convergencia, pero a cambio se logra representar un modelo más realista.

En el caso de análisis, la carga corresponde a desplazamiento que se aplicará en un sólido que representa una prensa. Dicha prensa es la que realiza el aplastado de los tubos de distinto diámetro, pero con una única geometría.

A continuación, se realiza una breve descripción de las metodologías de resolución disponibles en el software ANSYS®.

Método de penalización:

El método modela la zona de contacto en base a resortes entre los elementos tipo *Target* y *Conta*. En el caso en estudio que se refiere al contacto entre dos caras de sólidos se podría utilizar este método (que además corresponde al caso por defecto del software) o el de Lagrange aumentada, ya que ambos métodos se basan en “penalizaciones”:

$$F_{\text{normal}} = K_{\text{Normal}} \times \text{Penetración} \quad (0.1)$$

La fuerza de contacto finita F_{normal} , es función de la rigidez de contacto K_{Normal} . Cuanto mayor sea la rigidez de contacto, menor será la penetración X_p , tal como se aprecia en la Figura II-1.

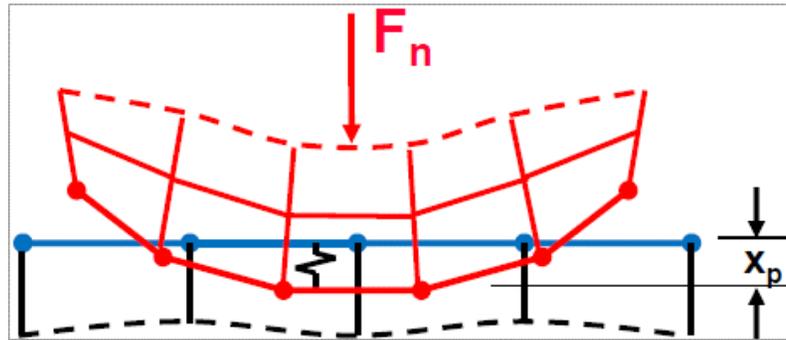


Figura II-1: Penetración en método de penalización (Ansys®, 2015).

Si bien posee una tasa alta de convergencia, tiene asociada una mayor imprecisión ya que las penetraciones en general son elevadas, pero teóricamente posee un grado de convergencia mayor. La constante a declarar por el usuario “FKN” define la fuerza de contacto. Además, existe la opción de definir distintas configuraciones de separación o “gap” entre los elementos *Target* y *Conta* que también influyen en la rigidez, por lo tanto, en el traspaso de fuerzas. El algoritmo necesita determinar las rigideces de contacto (normal y tangencial) y la penetración dependerá de estos valores. En el caso de valores altos de rigidez, se disminuye la penetración, pero puede ocasionar dificultades de convergencia.

Idealmente, para un K_{Normal} infinito, uno obtendría una penetración cero. Esto no es numéricamente posible con los métodos basados en penalizaciones, pero mientras x_p sea pequeño o insignificante, los resultados de la solución se pueden considerar razonablemente precisos.

Método multiplicador de Lagrange

Este método tiene la posibilidad de establecer un límite de la penetración (en el caso normal) o del deslizamiento (en el caso tangencial) y de esa manera calcular las tensiones de contacto. El método consiste en agregar un grado de libertad extra (presión de contacto) para satisfacer la compatibilidad de contacto. Por lo tanto, en lugar de resolver la fuerza de contacto en función de la rigidez y la penetración, la fuerza se resuelve explícitamente como un GDL adicional.

$$F_{\text{normal}} = \text{GDL} \quad (0.2)$$

Dentro de las características de este método, se puede enumerar:

- No requiere determinar rigidez de contacto.
- Conceptualmente existe penetración cero.
- Implica mayores requerimientos computacionales.

Debido a las restricciones impuestas, las presiones de contacto corresponden a las físicamente necesarias tal que se impida la penetración de los cuerpos. Se debe configurar correctamente la condición de apertura inicial y condiciones de deslizamiento. Lo anterior se configura mediante las variables TOLN que corresponde a la máxima penetración permitida y FTOL que corresponde a la máxima fuerza permitida.

Método de Lagrange aumentado

Corresponde a un proceso iterativo del método de penalización. Es más preciso que el método de penalización toda vez que posee herramientas para control de penetración, pero implica un mayor costo de procesamiento.

Si la penetración en una iteración excede la máxima permitida, la rigidez de contacto para cada elemento será aumentada mediante multiplicadores de Lagrange. En efecto, la

diferencia entre este método y el de penalización radica en que la rigidez se va actualizando para cada elemento de contacto. Lo anterior se repite hasta que la penetración sea menor que la permitida.

La principal diferencia entre los métodos de penalización pura y de Lagrange aumentada es que esta última aumenta el cálculo de la fuerza normal:

$$\text{Método de penalización: } F_{\text{normal}} = K_{\text{Normal}} \times \text{Penetración} \quad (0.3)$$

$$\text{Lagrange aumentada. } F_{\text{normal}} = K_{\text{Normal}} \times \text{Penetración} + \lambda \quad (0.4)$$

Representación de no linealidad del material

Los modelos numéricos consideran la no linealidad del material, mediante una representación simplificada bilineal.

Referido a la no linealidad del material, el acero utilizado para la fabricación de los tubos cumple con el estándar ASTM A500 grado B. La Tabla II-1 da cuenta de los requerimientos mínimo para el ensayo de tensión.

Tabla 0-1 Requerimientos para acero ASTM A500.

Round Structural Tubing				
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Tensile strength, min, psi (MPa)	45 000 (310)	58 000 (400)	62 000 (427)	58 000 (400)
Yield strength, min, psi (MPa)	33 000 (228)	42 000 (290)	46 000 (317)	36 000 (250)
Elongation in 2 in. (50.8 mm), min, % ^P	25 ^A	23 ^B	21 ^C	23 ^B
Shaped Structural Tubing				
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
Tensile strength, min, psi (MPa)	45 000 (310)	58 000 (400)	62 000 (427)	58 000 (400)
Yield strength, min, psi (MPa)	39 000 (269)	46 000 (317)	50 000 (345)	36 000 (250)
Elongation in 2 in. (50.8 mm), min, % ^P	25 ^A	23 ^B	21 ^C	23 ^B

Se desarrollaron pruebas de laboratorio del acero de las piezas a modelar de acuerdo con la normativa ASTM A370 “*Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*” y consideraron la utilización de un cupón o probeta plana para ensayo de tracción. En las secciones II.3.1 a II.3.4 se muestran los resultados de los cuatro especímenes ensayados.

Resultados en cupones espécimen 1 - tubo 120.7mm x 3.5 mm



TEST REPORT

No. : TJIN1795005673ML
Date : Jun 09, 2017
Page: 1 of 2

CUSTOMER NAME: HUADIAN HEAVY MACHINERY CO., LTD.
ADDRESS: No.8 Jingshun Road Baichen Hi-Tech Industrial Park, Tianjin, China.

Sample Name : CIRCULAR TUBING
Product Specification : 120.7X3.5mm
Material and Mark : ASTM A500 GRADE B
Heat No. : 60410255
Other Information : Sample No.: 255-1
Supplier: QINGDAO REHOND PRECISION TUBE CO., LTD
Project: Bocamina South Dome in Chile

Above information and sample(s) was/were submitted and confirmed by the client. SGS, however, assumes no responsibility to verify the accuracy, adequacy and completeness of the sample information provided by client.

Quantity : 1
Date of Receipt : May 08, 2017
Testing Start Date : May 08, 2017
Testing End Date : May 11, 2017
Test result(s) : For further details, please refer to the following page(s)
(Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested)

Signed for
SGS-CSTC Standards Technical
Services(Tianjin) Co., Ltd

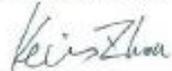

Kevin Zhou
Authorized signatory

Figura II-2: *Test report* para prueba de tracción probeta espécimen 1 (ENEL, 2017).

No. : TJIN1705005673ML

Date : Jun 09, 2017

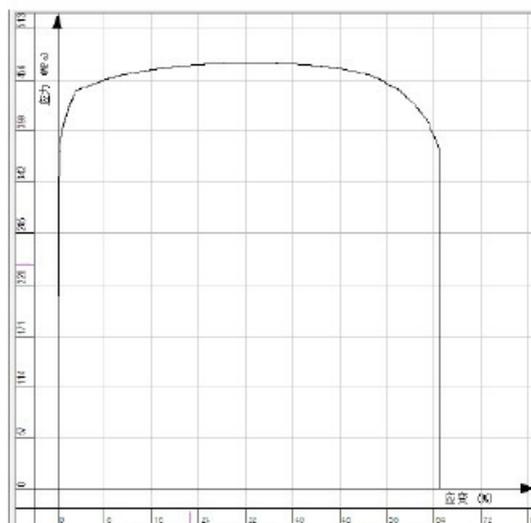
Page: 2 of 2

Test item: Tensile Test

Test Method: ASTM A370-17

Test item	Specimen type	Tensile strength (R_m) (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation after fracture(A) $L_0 = 50.8\text{mm}$ (%)	Conclusion
Req.	-----	≥ 400	≥ 290	≥ 20	-----
1	Tubular Strip specimen	475	371	31.5	Pass

Note: The results comply with the requirement of ASTM A500/A500M-03GradeB.



***** End of report*****

Figura II-3: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 1 (ENEL, 2017).

Resultados en cupones espécimen 2 - tubo 95.50mm x 3.05 mm

TEST REPORT

No. : TJIN1705005271ML

Date : Jun 09, 2017

Page: 1 of 2

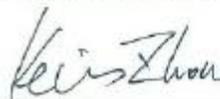
CUSTOMER NAME: HUADIAN HEAVY MACHINERY CO., LTD.
 ADDRESS: No.8 Jingshun Road Beichen Hi-Tech Industrial Park, Tianjin, China.

Sample Name : CIRCULAR TUBING
 Product Specification : 3.760"X0.120"
 Material and Mark : ASTM A500 GRADE B
 Heat No. : 70701441
 Other Information : Sample No.:95X3.0-2
 Supplier: QINGDAO REHOND PRECISION TUBE CO., LTD
 Project: Bocamina South Dome in Chile

Above information and sample(s) was/were submitted and confirmed by the client. SGS, however, assumes no responsibility to verify the accuracy, adequacy and completeness of the sample information provided by client.

Quantity : 1
 Date of Receipt : May 02, 2017
 Testing Start Date : May 02, 2017
 Testing End Date : May 08, 2017
 Test result(s) : For further details, please refer to the following page(s)
 (Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested)

Signed for
 SGS-CSTC Standards Technical
 Services(Tianjin) Co., Ltd



Kevin Zhou
 Authorized signatory

Figura II-4: *Test report* para prueba de tracción probeta espécimen 2 (ENEL, 2017).

TEST REPORT

No. : TJIN1705005271ML

Date : Jun 09, 2017

Page: 2 of 2

Test item: Tensile Test

Test Method: ASTM A370-17

Test item	Specimen type	Tensile strength (R_m) (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation after fracture(A) $L_0=50.8\text{mm}$ (%)	Conclusion
Req.	-----	≥ 400	≥ 290	≥ 19	-----
1	Tubular Strip specimen	508	409	26.5	Pass

Note: The results comply with the requirement of ASTM A500/A500M-13GradeB.

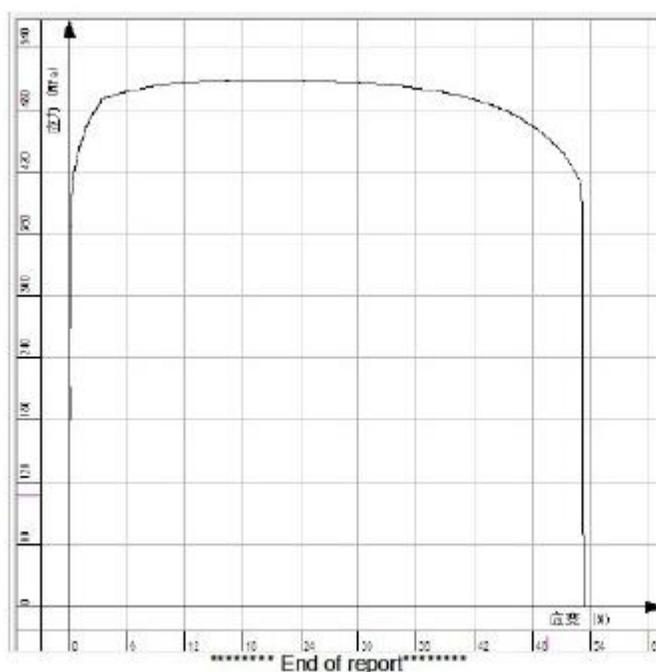


Figura II-5: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 2 (ENEL,

2017).

Resultados en cupones espécimen 3 - tubo 73.03mm x 2.64 mm

TEST REPORT

No. : TJIN1705006984ML

Date : Jun 07, 2017

Page: 1 of 2

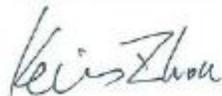
CUSTOMER NAME: HUADIAN HEAVY MACHINERY CO., LTD.
 ADDRESS: No.8 Jingshun Road Beichen Hi-Tech Industrial Park, Tianjin, China.

Sample Name : CIRCULAR TUBING
 Product Specification : 2.875"X0.108"
 Material and Mark : ASTM A500 GRADE B
 Heat No. : 70406310
 Other Information : Sample no.:310-1
 Supplier: QINGDAO REHOND PRECISION TUBE CO., LTD
 Project: Bocamina South Dome in Chile

Above information and sample(s) was/were submitted and confirmed by the client. SGS, however, assumes no responsibility to verify the accuracy, adequacy and completeness of the sample information provided by client.

Quantity : 1
 Date of Receipt : May 31, 2017
 Testing Start Date : May 31, 2017
 Testing End Date : Jun 07, 2017
 Test result(s) : For further details, please refer to the following page(s)
 (Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested)

Signed for
 SGS-CSTC Standards Technical
 Services(Tianjin) Co., Ltd



Kevin Zhou
 Authorized signatory

Figura II-6: *Test report* para prueba de tracción probeta espécimen 3 (ENEL, 2017).

TEST REPORT

No. : TJIN1705006984ML

Date : Jun 07, 2017

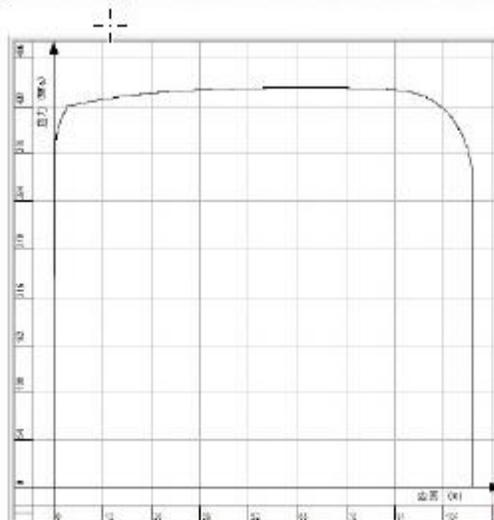
Page: 2 of 2

Test item: Tensile Test

Test Method: ASTM A370-17

Test item	Specimen type	Tensile strength (R_m) (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation after fracture(A) $L_0=50\text{mm}$ (%)	Conclusion
Req.	-----	≥ 400	≥ 290	≥ 19	-----
1	Tubular Strip specimen	454	376	35.0	Pass

Note: The results comply with the requirement of ASTM A500/A500M-03GradeB.



***** End of report*****

Figura II-7: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 3 (ENEL, 2017).

Resultados en cupones espécimen 4 - tubo 60.3mm x 2.7 mm

TEST REPORT

No. : TJIN1705005247ML

Date : Jun 09, 2017

Page: 1 of 2

CUSTOMER NAME: HUADIAN HEAVY MACHINERY CO., LTD.
 ADDRESS: No.8 Jingshun Road Beichen Hi-Tech Industrial Park, Tianjin, China.

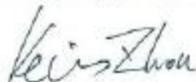
Sample Name : CIRCULAR TUBING
 Product Specification : 2.375"X0.108"
 Material and Mark : ASTM A500 GRADE B
 Heat No. : 60709359
 Other Information : Sample No..60X2.75-1
 Supplier: QINGDAO REHOND PRECISION TUBE CO., LTD
 Project : Bocamina South Dome in Chile

Above information and sample(s) was/were submitted and confirmed by the client. SGS, however, assumes no responsibility to verify the accuracy, adequacy and completeness of the sample information provided by client.

 Quantity : 1
 Date of Receipt : May 02, 2017
 Testing Start Date : May 02, 2017
 Testing End Date : May 08, 2017
 Test result(s) : For further details, please refer to the following page(s)
 (Unless otherwise stated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested)

Signed for
 SGS-CSTC Standards Technical
 Services(Tianjin) Co., Ltd

+



Kevin Zhou

Authorized signatory

Figura II-8: *Test report* para prueba de tracción probeta espécimen 4 (ENEL, 2017).

TEST REPORT

No. : TJIN1705005247ML

Date : Jun 09, 2017

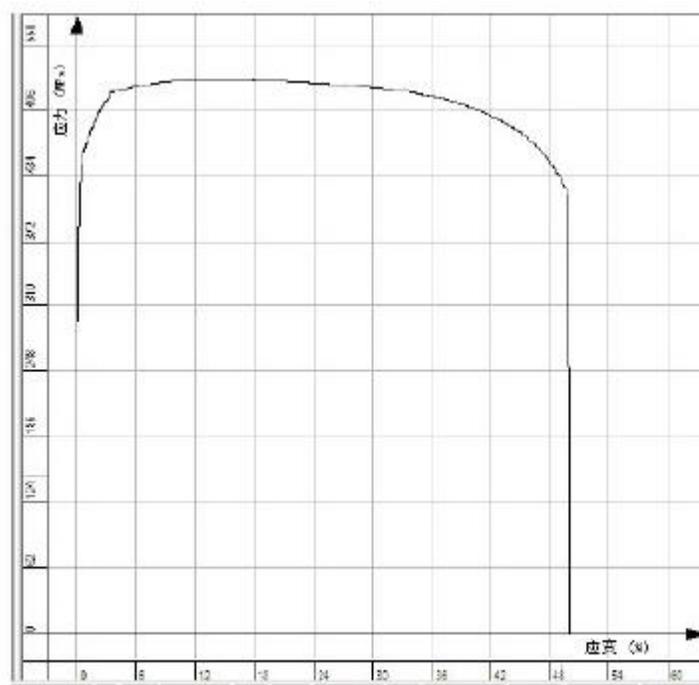
Page: 2 of 2

Test item: Tensile Test

Test Method: ASTM A370-17

Test item	Specimen type	Tensile strength (R_m) (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation after fracture(A) $L_0 = 50.8\text{mm}$ (%)	Conclusion
Req.	-----	≥ 400	≥ 290	≥ 19	-----
1	Tubular Strip specimen	525	443	27.5	Pass

Note: The results comply with the requirement of ASTM A500/A500M-13GradeB.



***** End of report*****

Figura II-9: Curva tensión-deformación prueba de tracción probeta espécimen 4 (ENEL,

2017).

Para los modelos realizados en el presente estudio se considera la representación de la no linealidad del material mediante una curva bilineal que el programa Ansys® denomina BISO (*Bilinear kinematic hardening*). El tensor de tensión para el endurecimiento cinemático bilineal evoluciona de modo que la curva de tensión efectiva versus la tensión efectiva es bilineal. La pendiente inicial de la curva es el módulo de elasticidad del material y más allá del límite de fluencia se desarrolla el módulo tangente (el que no puede ser mayor que el módulo elástico). El presente estudio consideró el uso de una tensión de fluencia de $2900 \frac{kgf}{cm^2}$, un módulo de elasticidad $E=2 \cdot 10^6 \frac{kgf}{cm^2}$ y un módulo de elasticidad tangente $E_T=1 \cdot 10^5 \frac{kgf}{cm^2}$. Los valores anteriores se representan en la Figura II-10.

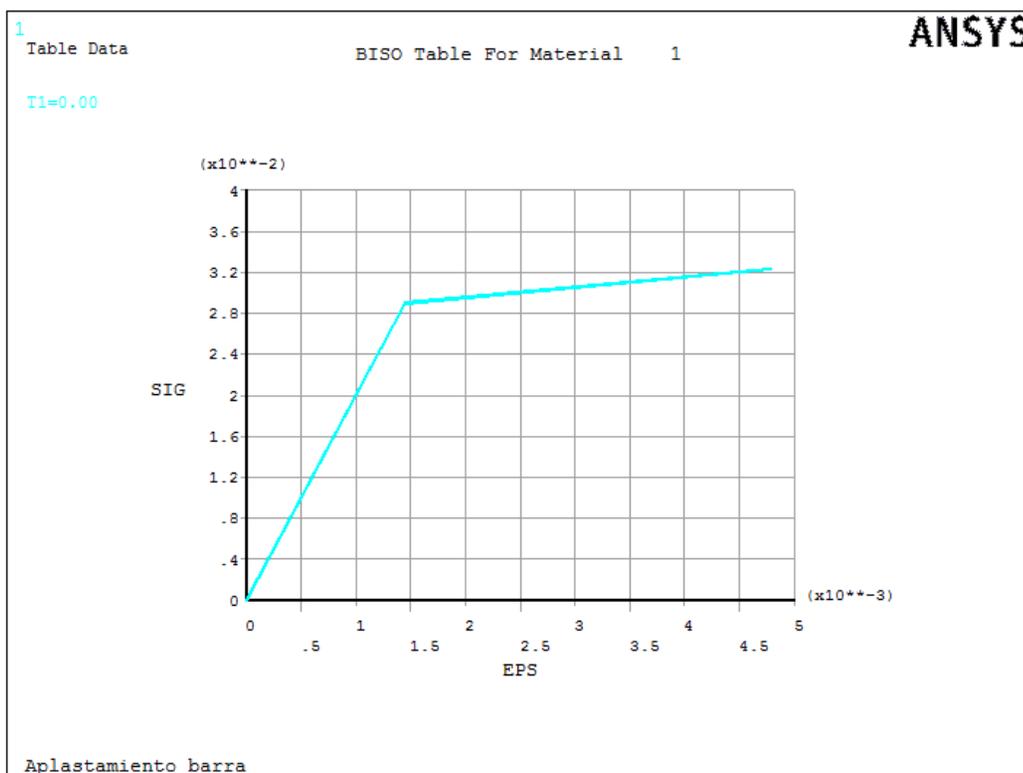


Figura II-10: Representación No linealidad del material – BISO

En el caso de cargas cíclicas, el modelo bilineal establece una relación tensión deformación como se muestra en la Figura II-11. No obstante lo anterior, en el presente trabajo no se modeló el comportamiento ante cargas cíclicas.

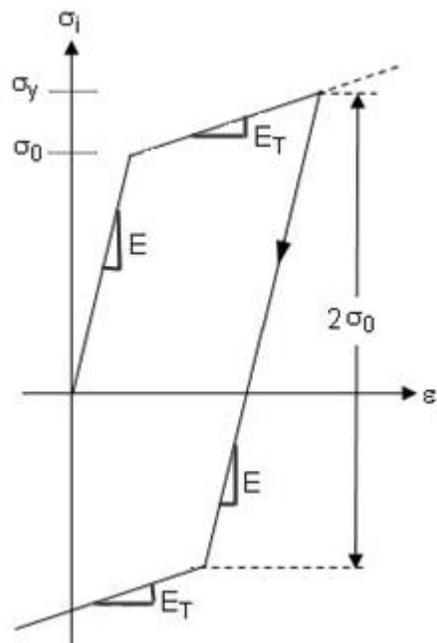


Figura II-11: Tensión-deformación para *Bilinear Kinematic Hardening* (Ansys ®, 2015).

Los modelos de endurecimiento asumen un criterio de fluencia de Von Mises, a menos que se defina un criterio de fluencia anisotrópico de Hill.

Consideración de no linealidad debida a grandes deformaciones

Debido a que las grandes deformaciones son inherentes al caso en estudio, es necesario activar dicha opción en el software. Lo anterior se realiza con la opción NLGEOM ON de Ansys. El programa utiliza el enfoque de Newton-Raphson para resolver problemas no lineales de grandes deformaciones. Para aquello, la carga se subdivide en una serie de

incrementos de carga que se pueden aplicar en varios subpasos de carga. En la Figura II-12 se muestra el uso de iteraciones de equilibrio de Newton-Raphson en un análisis no lineal simplificado de un solo grado de libertad:

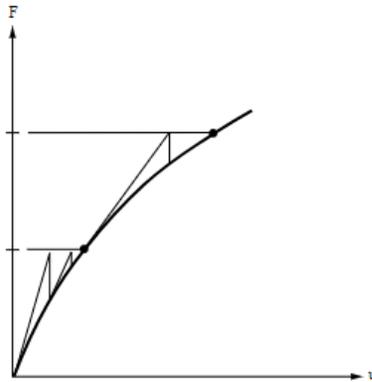


Figura II-12: Newton Raphson para 1 GDL (Ansys ®, 2015).

Antes de cada solución, el método de Newton-Raphson evalúa el vector de carga (diferencia entre cargas aplicadas y resultantes de tensiones en el elemento). El algoritmo realiza una solución lineal y verifica la convergencia. Si los criterios de convergencia no se cumplen, el vector de carga se reevalúa, la matriz de rigidez se actualiza y se obtiene una nueva solución. Este procedimiento es iterativo continúa hasta que el problema converge.

Se pueden activar varias funciones de recuperación y mejora de la convergencia, como la búsqueda de líneas de convergencia, activar un paso de carga automático (en que el algoritmo determina la magnitud de la carga a aplicar) e incluso un método de bisección para ayudar a que el problema converja. Para todos los casos, si no se puede lograr la convergencia, el algoritmo intentará resolver con un paso de carga más pequeño.

Adicionalmente el algoritmo dispone de la opción de activar el método de longitud de arco, el que hace que las iteraciones de equilibrio de Newton-Raphson converjan a lo largo de un arco. Lo anterior a menudo evita divergencias. Este método de iteración se representa esquemáticamente a la derecha de la Figura II-13 y a la izquierda el método tradicional.

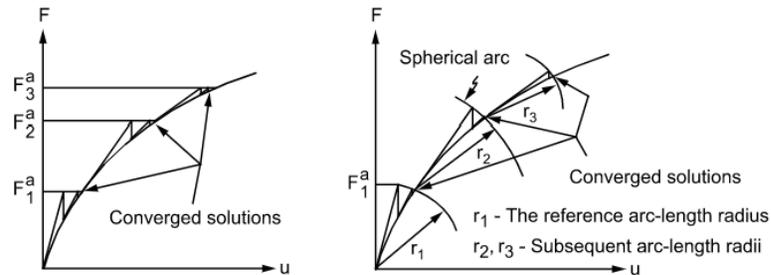


Figura II-13: Newton Raphson v/s método longitud de arco (Ansys ®, 2015).

En general un análisis no lineal se organiza en tres niveles de operación:

- El nivel superior: Consiste en los pasos de carga que se definen explícitamente en un intervalo de tiempo. Se asume que las cargas varían linealmente dentro de los pasos de carga para análisis estáticos.
- Nivel intermedio: Dentro de cada paso de carga se puede indicar al programa que realice varias soluciones (subpasos o pasos de tiempo) para aplicar la carga gradualmente.
- Nivel inferior: En cada subpaso, el programa realiza una serie de iteraciones de equilibrio para obtener una solución convergente.

En la Figura II-14 se pueden apreciar los pasos y subpasos de carga que utiliza el algoritmo.

MODELACIÓN DE PROCESO DE APLASTADO DEL TUBO

Tal como se ha mencionado en los puntos anteriores, para los modelos se ha utilizado el software ANSYS® en la modalidad APDL (*ANSYS parametric design language*), de esta manera todos los datos de geometría, mallado, solución y postproceso ingresan al software mediante una línea de comandos parametrizados. Dichas líneas de comando se detallan en los ANEXOS del presente documento.

Características de modelo – geometría.

Para el caso de estudio y debido a que es necesario representar el fenómeno de aplastamiento de la zona unión es que se ha utilizado elementos tipo sólido. Debido a las características se ha optado por el elemento SOLID187 de la biblioteca de elementos de Ansys®. En la Figura III-1 se aprecia el modelo sólido en que se representa la tubería a ser aplastada y una prensa teórica (no necesariamente el proceso real se utiliza un elemento con la misma geometría).

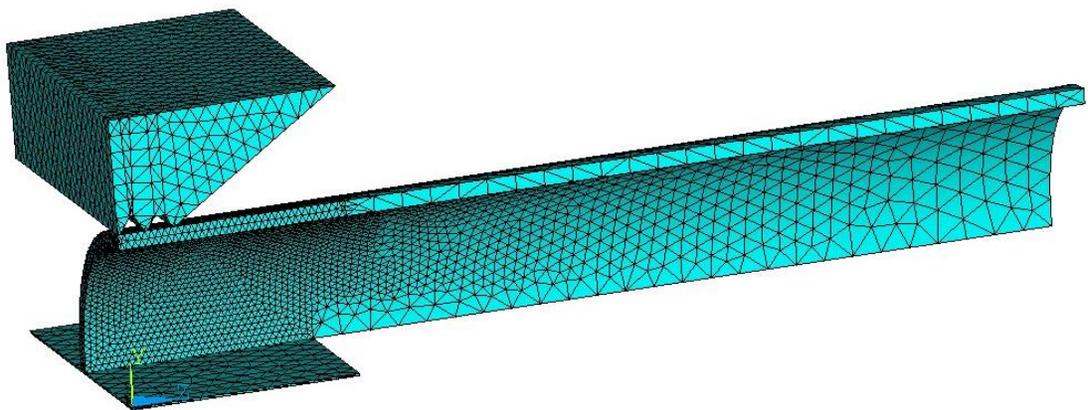


Figura III-1: Ejemplo modelo sólido prensa – tubo. Espécimen 4

El modelo APDL es paramétrico, por lo que el modelo base se puede aplicar a otras configuraciones variando diámetro, espesor del tubo, largo, mallado, etc. Además, se puede variar parámetros mecánicos y otros asociados al control de convergencia tales como pasos y subpasos de carga.

Geometría zona de aplastamiento (prensa)

Una de las dificultades de la modelación numérica que se generó en el presente trabajo tiene relación con simular de manera aproximada pero representativa el proceso de fabricación del tubo. El primer acercamiento que se realizó consistió en simular el aplastamiento sin considerar la geometría irregular de la prensa. Luego de que dicha modelación tuvo convergencia para la máxima deformación que corresponde aproximadamente a 0,5 diámetros de tubo, se procedió a generar una aproximación de la geometría adecuada de la prensa para obtener la configuración de la ranura o llave de conexión mediante el aplastamiento del material. Cabe mencionar que el tipo de conector o forma de la prensa es la misma independiente del diámetro y espesor del tubo, de otra manera el sistema de montaje sería muy poco efectivo ya que se debería tener muchas piezas diferentes. En la práctica, un pequeño número de tipos de conectores es suficiente para montar estructuras de grandes dimensiones de manera rápida y eficaz. En la Figura III-2, se puede apreciar el modelo de prensado sin deformar a la izquierda. A la derecha de la misma Figura se aprecia la probeta deformada.

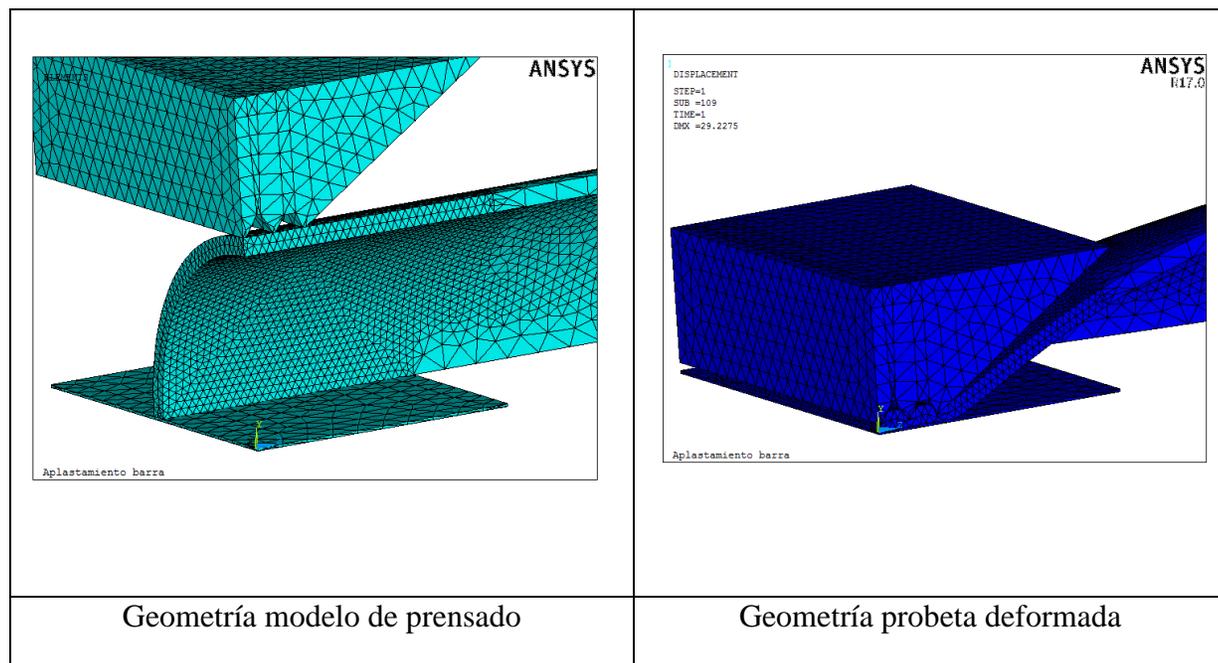


Figura III-2: Modelo zona de contacto pre y post carga

Elemento SOLID187

El elemento SOLID187 es un elemento tridimensional de orden superior de 10 nodos. SOLID187 tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático y está orientado y adaptado para modelar mallas irregulares. En la Figura III-3 se aprecia la formulación y nodos de interpolación posibles para SOLID187.

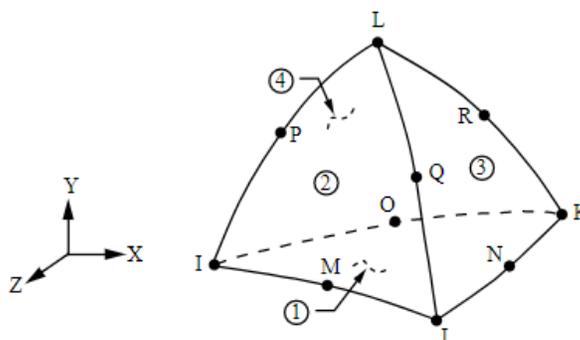


Figura III-3: Geometría del elemento SOLID187 (Ansys ®, 2015).

Cada uno de los 10 nodos posee tres grados de libertad y corresponde a las traslaciones en las direcciones nodales x, y, z. El elemento posee opciones de plasticidad, hiperelasticidad, *creep*, grandes deformaciones, entre otras opciones. También posee capacidad de formulación mixta para simular deformaciones de materiales elastoplásticos casi incompresibles y materiales hiperelásticos totalmente incompresibles.

En cuanto al tipo de mallado, ANSYS ® dispone de la opción de realizar uno del tipo mapeado o controlado por el usuario (*mapped mesh*) y también está disponible la opción de un automallado (*free mesh*). Ambos son admitidos por el elemento SOLID 187, pero se optó por este último debido a que permite una mejor optimización en las zonas de contacto, mientras que en las zonas alejadas del contacto el mallado se utiliza elementos de mayor tamaño.

Elemento TARGE170

El elemento TARGE170 se utiliza para representar diversas superficies objetivo 3-D para los elementos de contacto asociados. Es compatible con los elementos de tipo contacto CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 y CONTA177. Los propios elementos de contacto se asocian a los elementos sólidos, tipo Shell o líneas que describen el límite de un cuerpo deformable y están potencialmente en contacto con la superficie objetivo definida por el elemento TARGE170. En la Figura III-4 se aprecia la formulación esquemática del elemento TARGE170 en función del tipo de elemento contacto que se utilice.

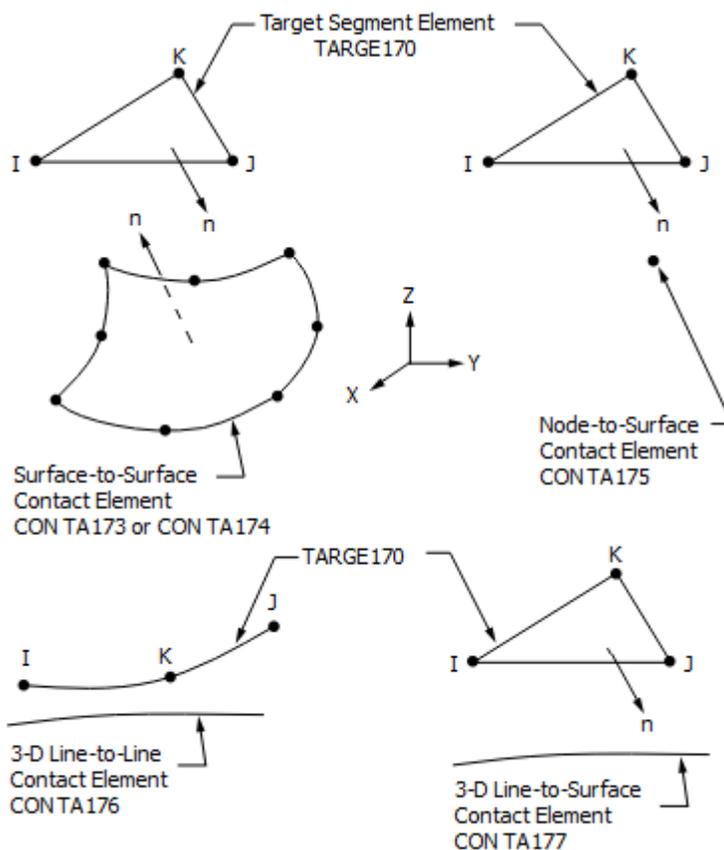


Figura III-4: Geometría del elemento TARGE170 (Ansys®, 2015).

Se puede imponer cualquier desplazamiento traslacional o rotacional, temperatura, voltaje y potencial magnético en el elemento objetivo, así como también fuerzas, momentos y desplazamientos.

Para superficies objetivo rígidas, resulta relativamente fácil modelar inclusive formas y geometrías complejas, por lo que en el caso en estudio se aprovechará dicha condición asignando una rigidez alta para el elemento tipo prensa.

Elemento CONTA175

El elemento CONTA175 se puede usar para representar contacto y/o deslizamiento entre dos superficies (o entre un nodo y una superficie, o entre una línea y una superficie) en 2-D o 3-D. Este elemento se puede asociar a elementos sólidos, tipo *beam* y también tipo *Shell*.

El contacto ocurre cuando la superficie del elemento intenta penetrar en el elemento Target (TARGE169, TARGE170). Admite fricción de Coulomb, fricción por esfuerzo de corte, fricción definida por el usuario e interacción de contacto definida por el usuario. Este elemento también permite la separación del contacto unido para simular la delaminación. En la Figura III-5 se puede apreciar la formulación del elemento CONTA175:

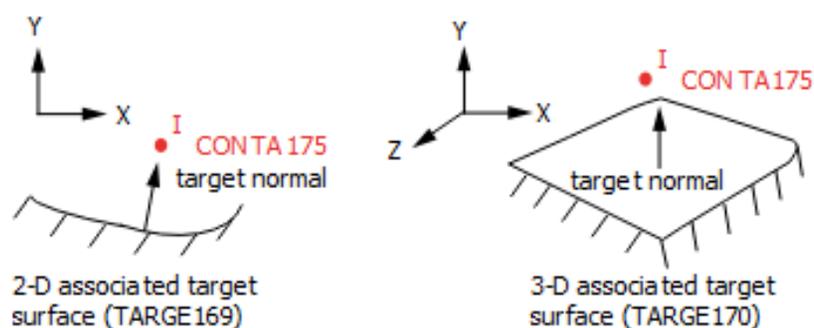


Figura III-5: Geometría del elemento CONTA175 (Ansys ®, 2015).

Comparación geométrica de modelo numérico y elemento real

Tal como se ha recalcado, en el presente trabajo se realizan suposiciones del proceso de fabricación ya que dicho proceso se encuentra protegido por patentes vigentes. De todas maneras y dado que el objetivo primordial es analizar el estado tensional post fabricación,

no se considera eventuales procesos que eventualmente se realizan en la realidad tales como aplicación lenta de cargas, conformado en caliente, entre otros. En las Figuras III-6 a la III-9, se aprecia un elemento real deformado. Para una probeta real, dichas deformaciones se midieron y se parametrizaron con software CAD, lo que se ve reflejado en la Figura III-10.

Obtención de geometría real

Se realiza una medición del tubo deformado del espécimen 4 (2,375" x 0,108"), realizando una segmentación de grillas separadas a 20 mm cada una. Ver Figuras III-6 a III-9.



Figura III-6: Vista frontal elemento real espécimen 4.



Figura III-7: Vista lateral elemento real espécimen 4.



Figura III-8: Medición frontal elemento real espécimen 4.



Figura III-9: Medición lateral elemento real espécimen 4.

De esta manera se genera mediante el uso de CAD 3D un modelo representativo tridimensional del espécimen 4, el que se muestra en la Figura III-10.

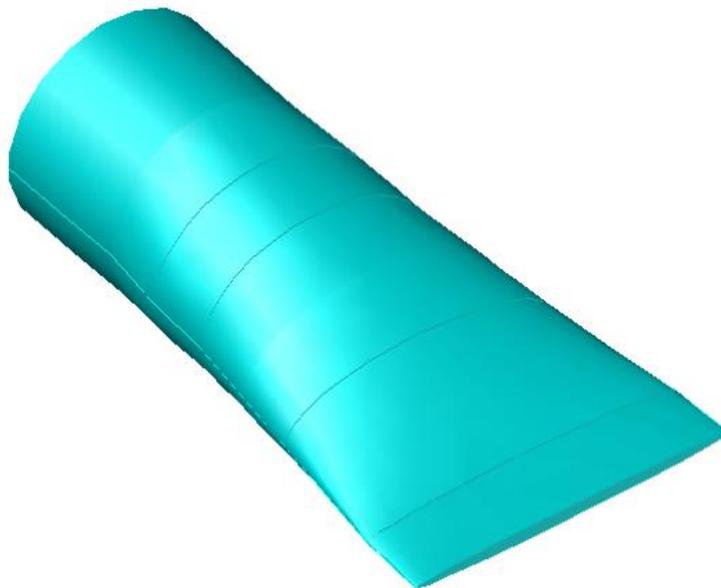


Figura III-10: Modelo tridimensional probeta espécimen 4 - deformada estimada real.

Por otro lado, mediante el modelo numérico y para el mismo diámetro, espesor y propiedades mecánicas se obtiene una condición deformada que es bastante asimilable a la obtenida en la probeta real. La modelación del proceso de prensado se aprecia en la Figura III-11 y la comparación entre la deformada real representada en Autocad 3D y la numérica, se aprecia en la Figura III-12.

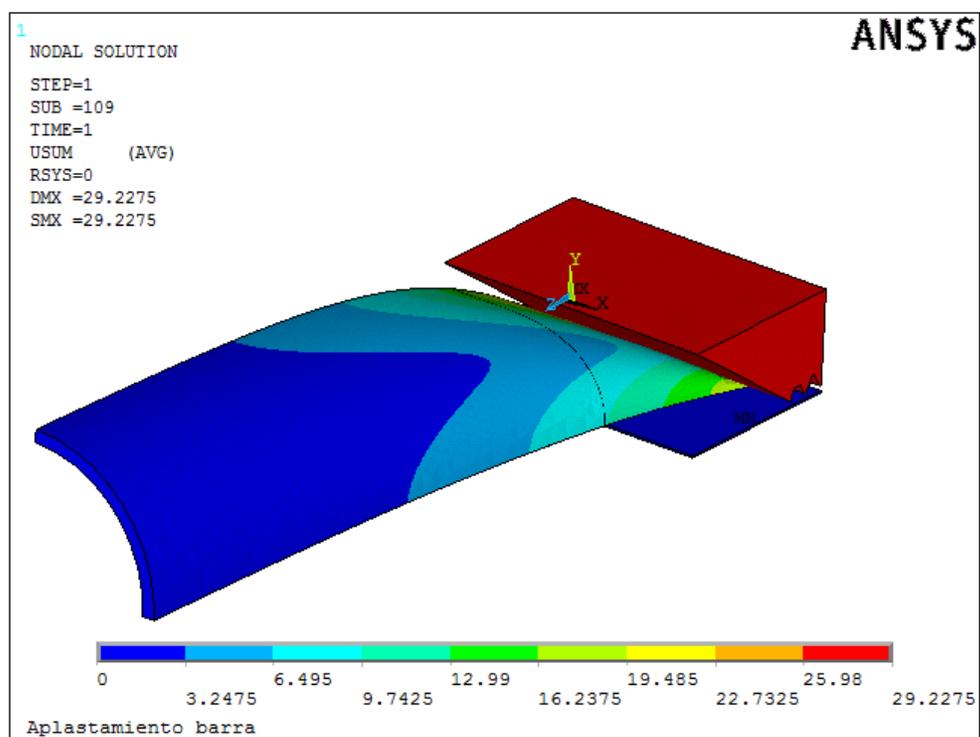


Figura III-11: Modelo tridimensional probeta espécimen 4

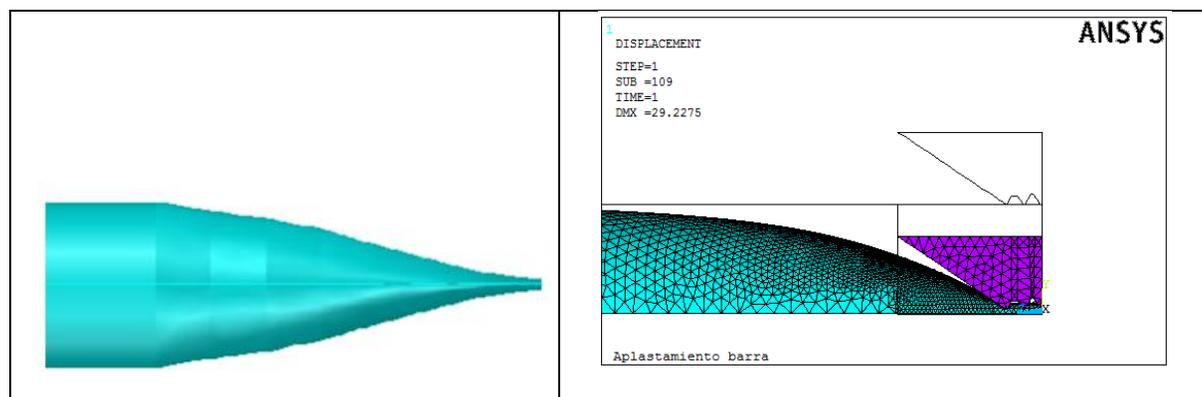


Figura III-12: Vista lateral deformada real y modelo numérico

Si bien, la representación en CAD se basa en extrapolar deformadas de puntos discretos, el ejercicio realizado entrega una descripción cualitativa en cuanto a que el fenómeno se representa de manera adecuada.

Análisis de tensiones residuales en elemento

En la presente sección se presenta los resultados de análisis de los modelos y el estudio respecto a las tensiones residuales que se aprecian durante y luego del conformado del tubo. Lo anterior es relevante ya que, si bien todos los ensayos de tracción de los elementos y uniones resultaron satisfactorios, en casos mínimos y posterior a su fabricación (incluso luego de montados) existió fisuración longitudinal de tubos en la zona de mayor curvatura. Por lo anterior resulta relevante estudiar el estado tensional residual de los elementos. Todos los modelos que se presentan están parametrizados en unidades tonf – mm. Para el acero en el que se materializaron los elementos, los valores tabulados corresponden a una tensión de fluencia de 0,029 tonf/mm² y una tensión de rotura a 0,04 tonf/mm². Se presentan los resultados relevantes obtenidos para cada uno de los modelos. Se utiliza gráficos de tensiones de Von Mises en unidades de tonf/mm².

El modelo parametrizado del tubo se ha dividido en dos sectores. En la Figura III-13 se aprecia en color verde las zonas alejadas de las máximas deformaciones en las que se espera tensiones bajas, por lo que el mallado es menor, es decir se usa elementos de mayor tamaño. En cambio la zona de color magenta corresponde al sector en que se impondrá la deformación y contacto. Por lo tanto en dicha zona se espera una alta concentración de tensiones y principalmente plastificación, por lo que se dispone de un mallado más fino.

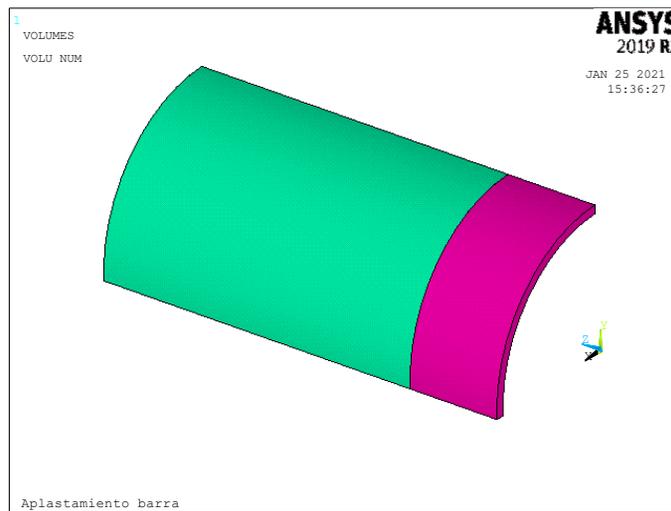


Figura III-13: División geométrica tubo base sin mallar ni deformar.

Con el fin de poder comprar y tabular resultados se han establecido zonas a tabular. La zona A coincide con el sector magenta de la Figura III-13 y es la zona en que se aprecia aplastamiento y por ende plastificación elevada. Las zonas B y C corresponden a sectores en que en sitio se apreciaron algunas fisuras longitudinales en una mínima cantidad de elementos (menos del 0,1%). En la zona D en general no se aprecian fallas.



Figura III-14: Subdivisión del elemento mallado.

Las Figuras que se presentan a continuación para cada modelo serán:

- Mallado para condición no deformada.
- Mallado zona de contacto
- Mallado condición deformada
- Condición deformada para el último paso de carga
- Esfuerzo plástico equivalente
- Tensiones de Von Mises para zona A (referida a Figura III-14)
- Tensiones de Von Mises para zonas B, C y D (referida a Figura III-14)

Espécimen 1 (4,75" x 0,137")

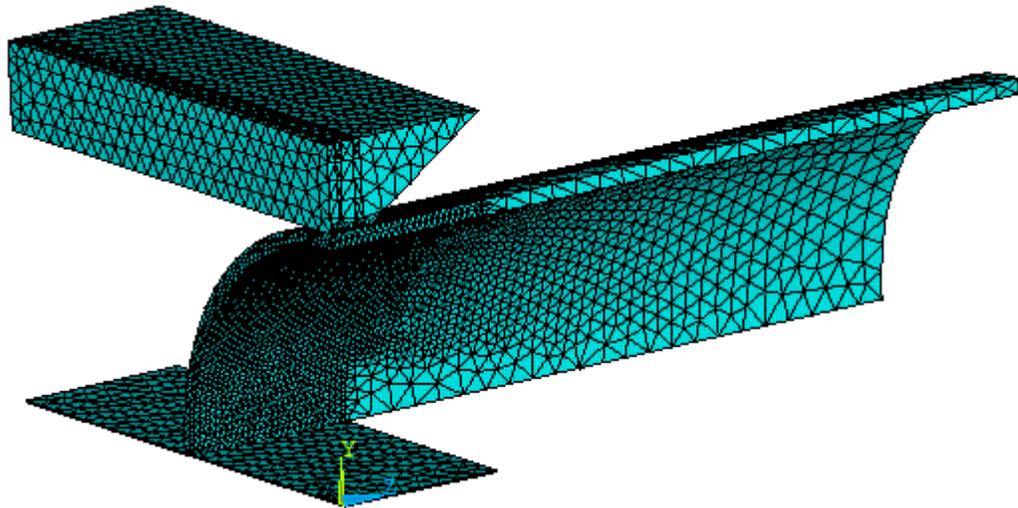


Figura III-15: Espécimen 1 – Mallado condición no deformada.

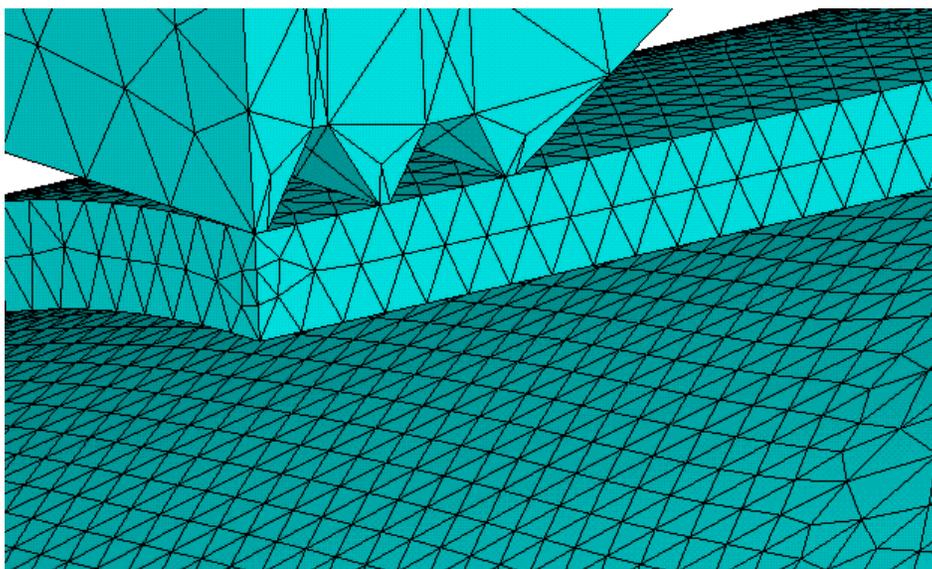


Figura III-16: Espécimen 1 – Mallado condición no deformada zona de contacto.

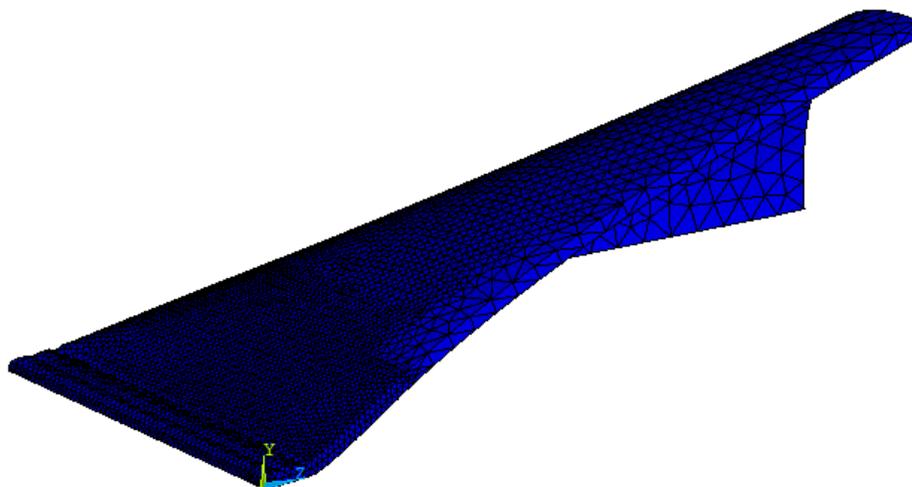


Figura III-17: Espécimen 1 – Mallado condición deformada.

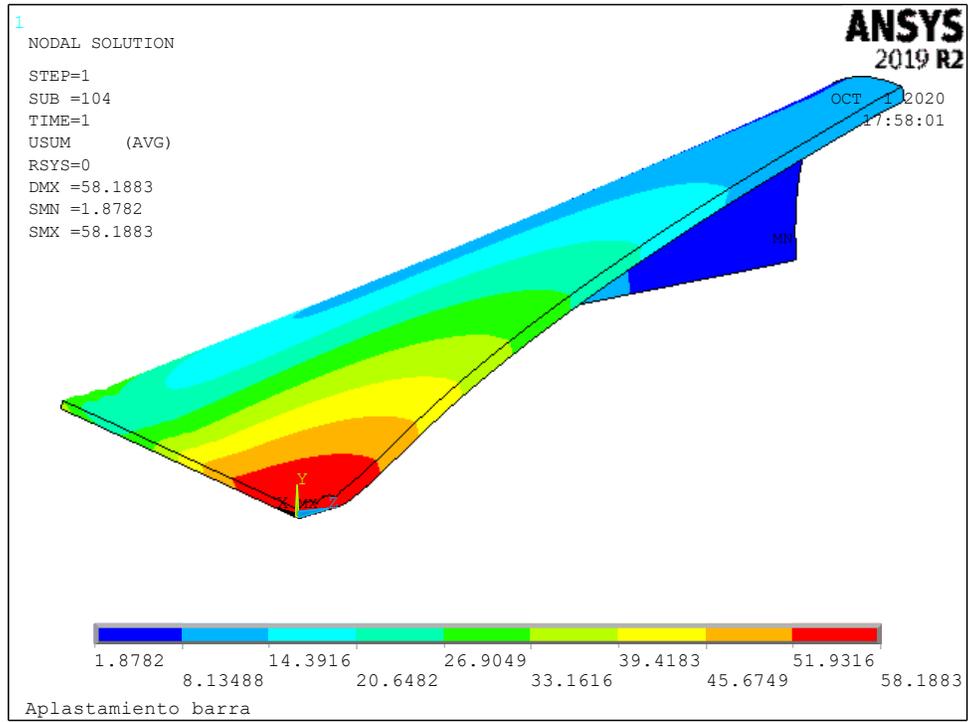


Figura III-18: Espécimen 1 – Deformación Time 1,0

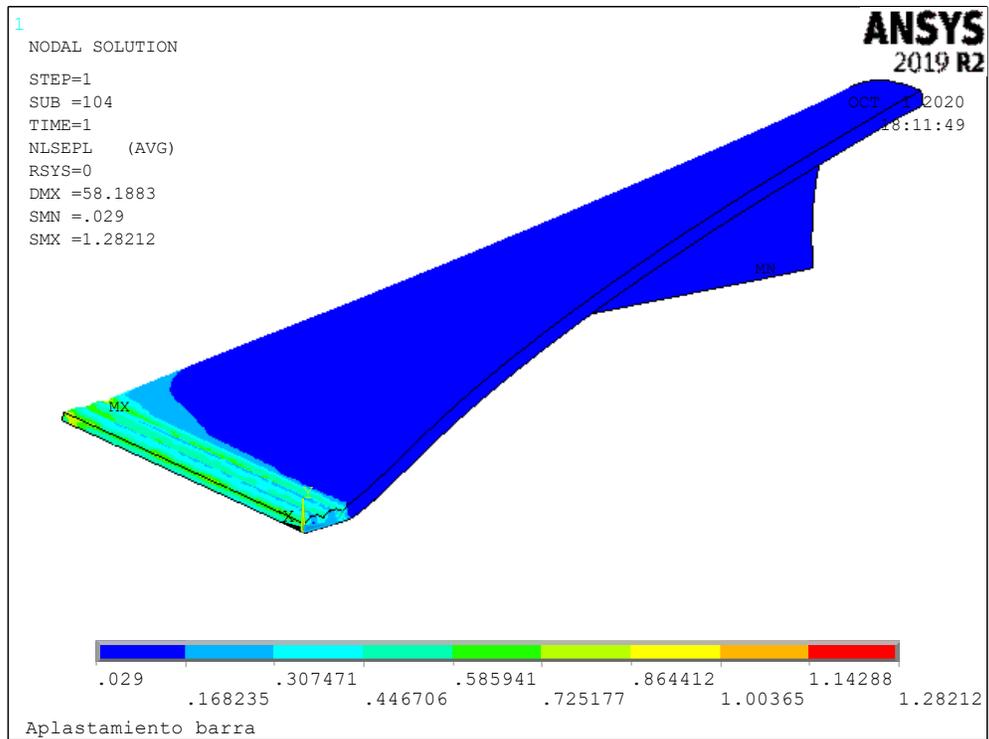


Figura III-19: Espécimen 1 – Plastic equivalent stress Time 1,0

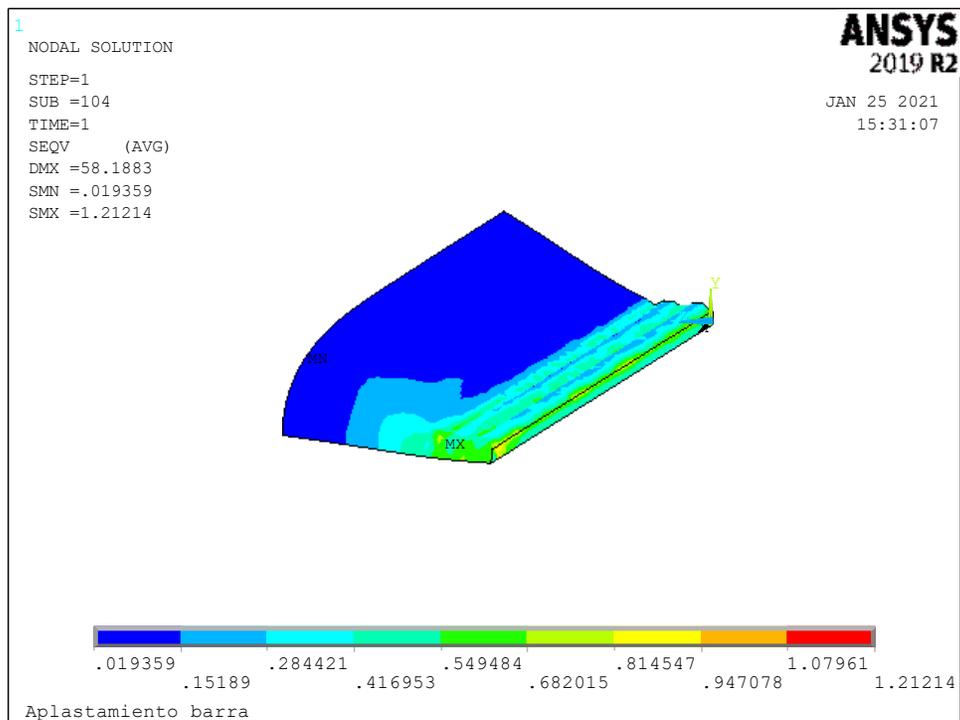


Figura III-20: Espécimen 1 – Von Mises stress Time 1,0 zona A

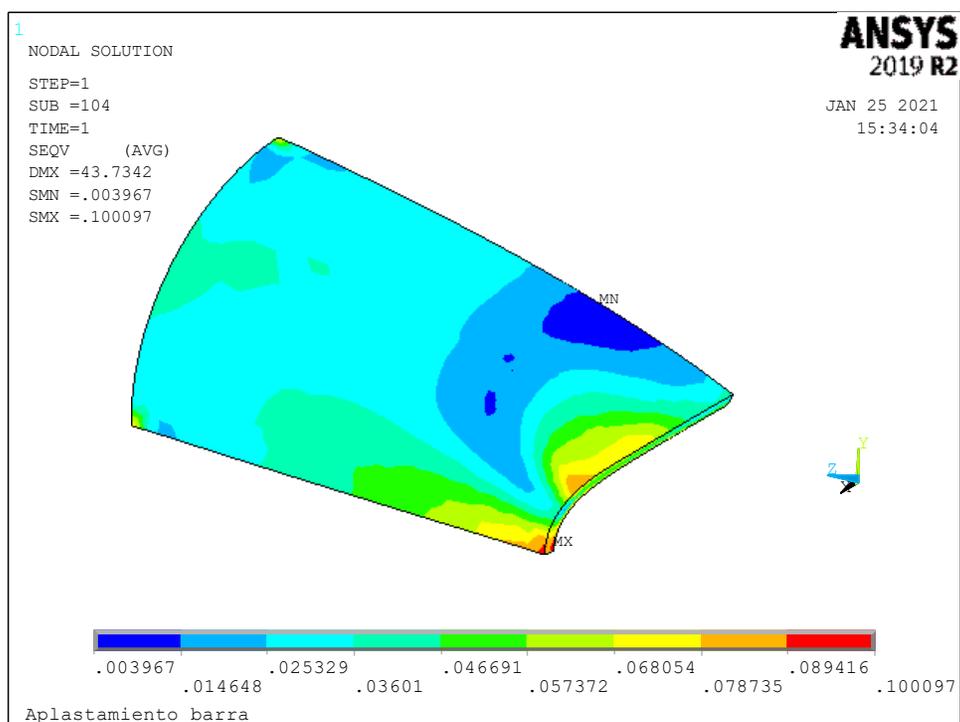


Figura III-21: Espécimen 1 – Von Mises stress Time 1,0 zona B,C y D

Espécimen 2 (3,76" x 0,120")

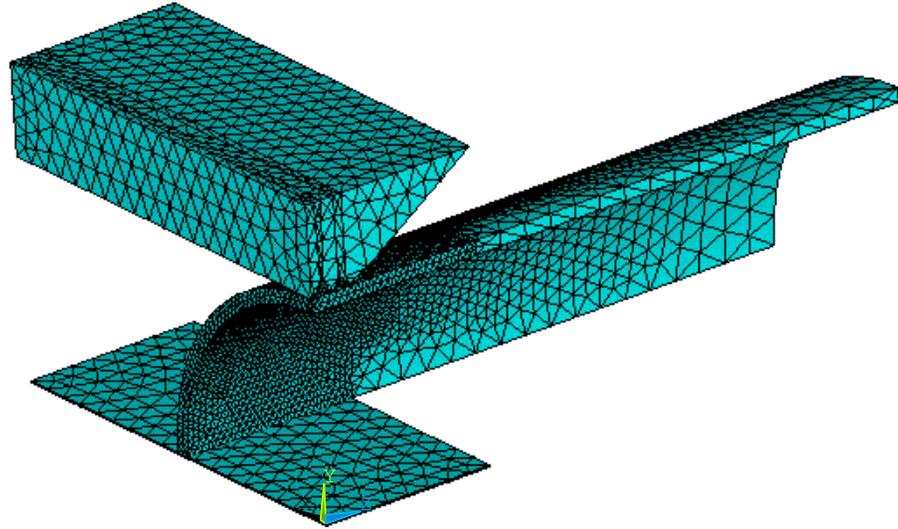


Figura III-22: Espécimen 2 – Mallado condición no deformada.

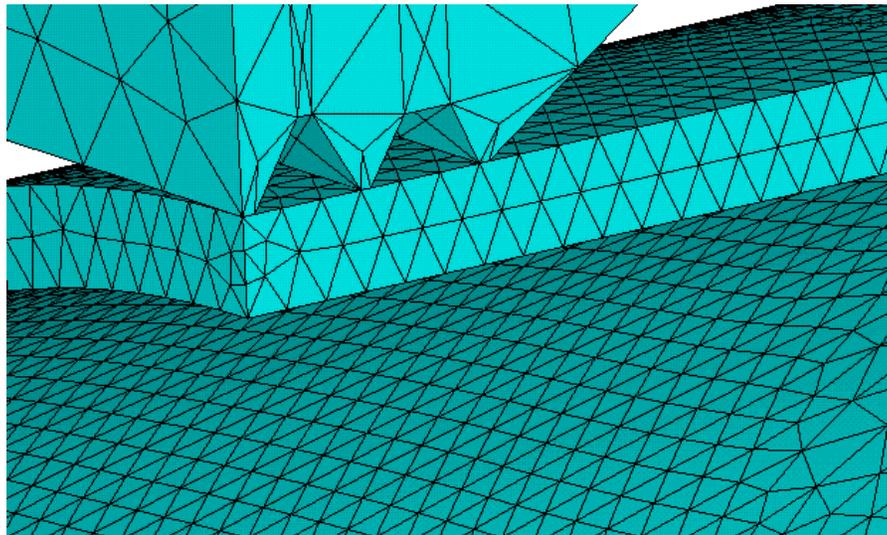


Figura III-23: Mallado condición no deformada zona de contacto.

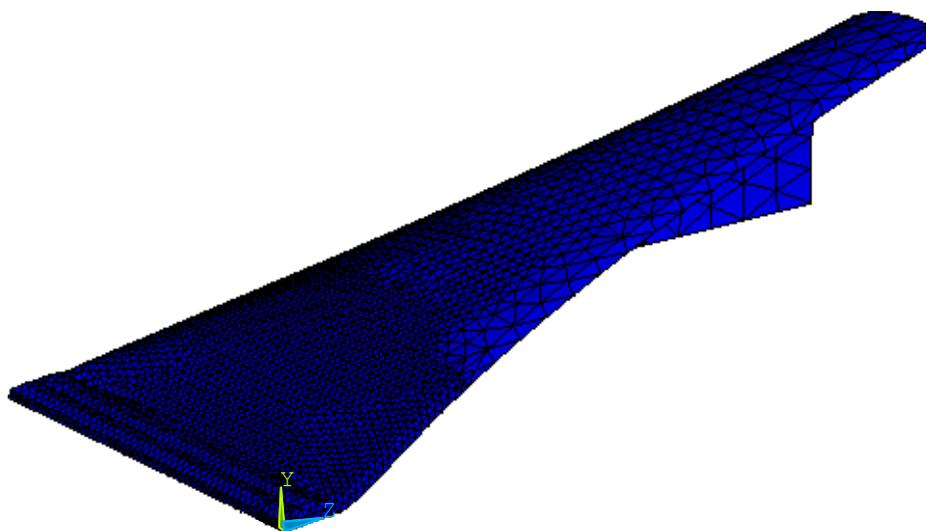


Figura III-24: Espécimen 2 – Mallado condición deformada.

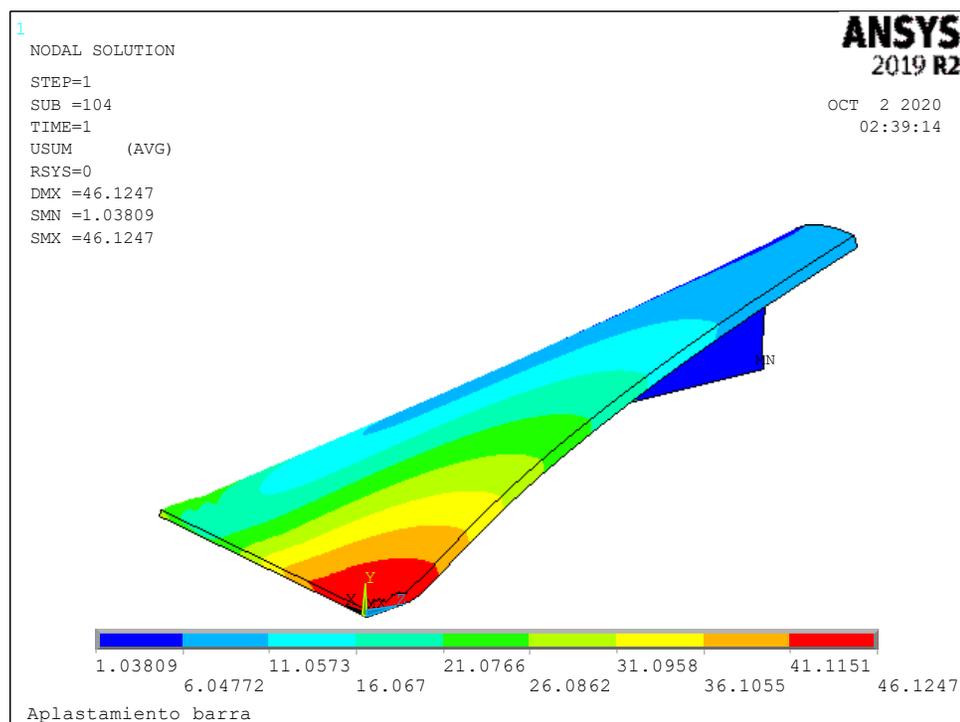


Figura III-25: Espécimen 2 – Deformación Time 1,0

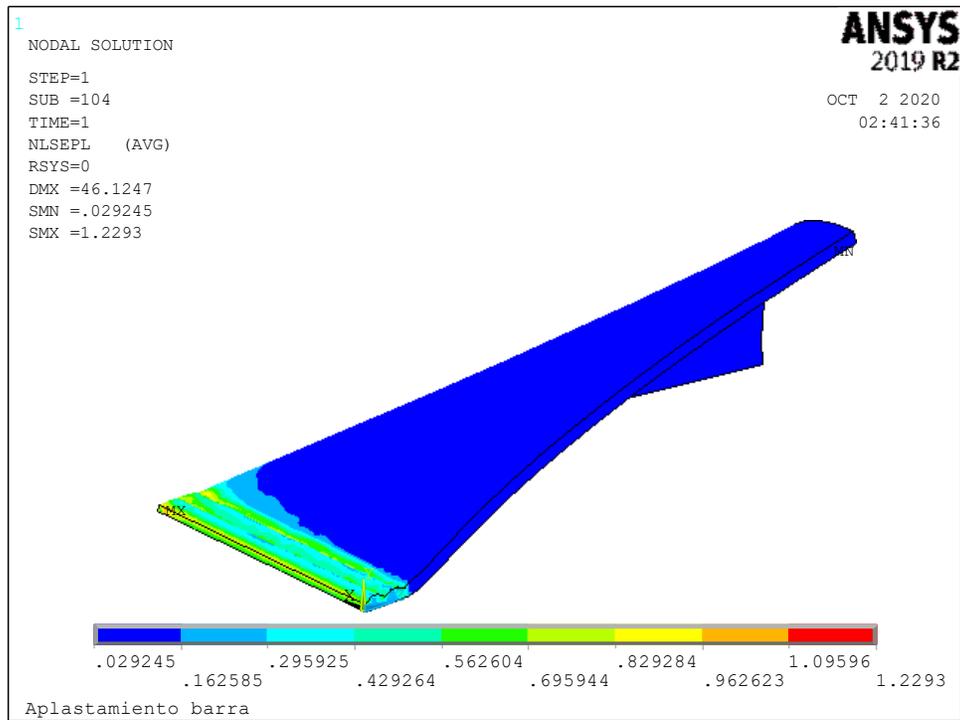


Figura III-26: Espécimen 2 – Plastic equivalent stress Time 1,0

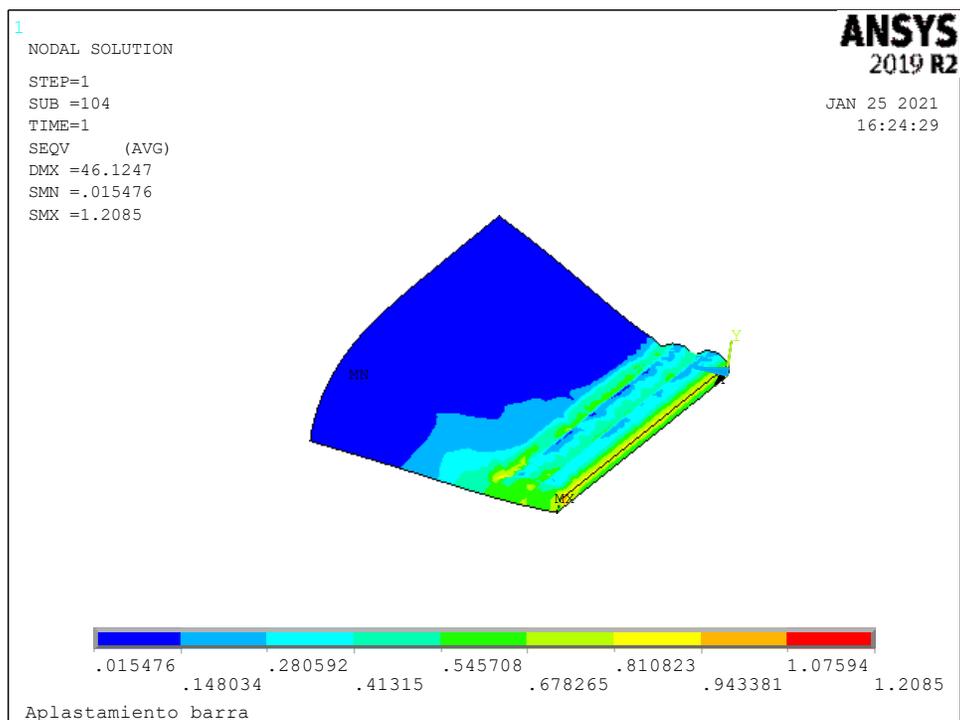


Figura III-27: Espécimen 2 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zona A

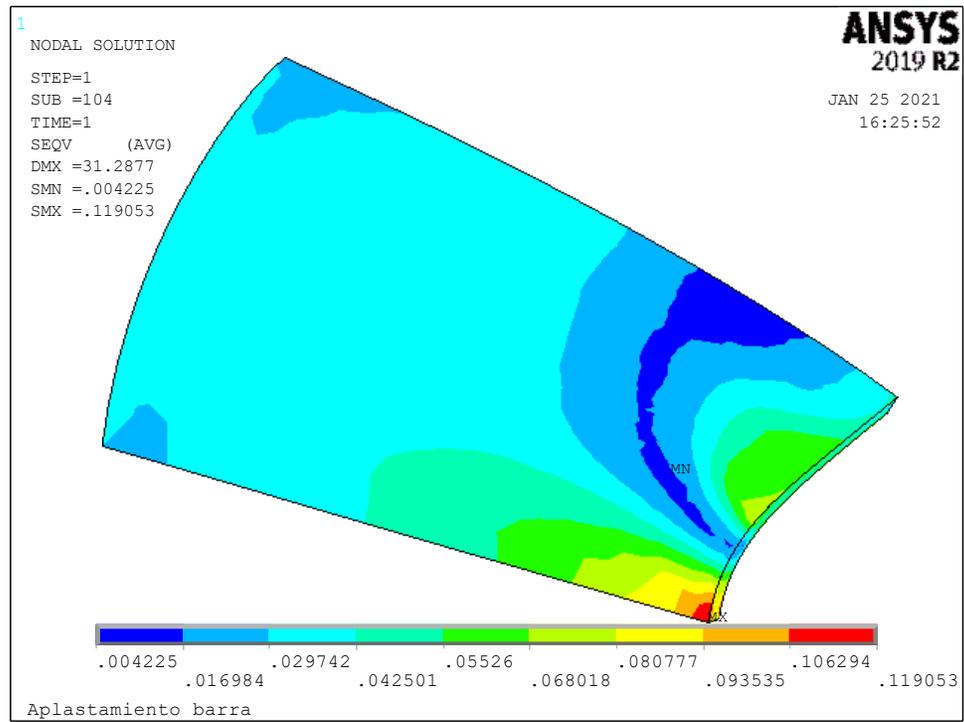


Figura III-28: Espécimen 2 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zonas B, C y D

Espécimen 3 (2,875" x 0,108")

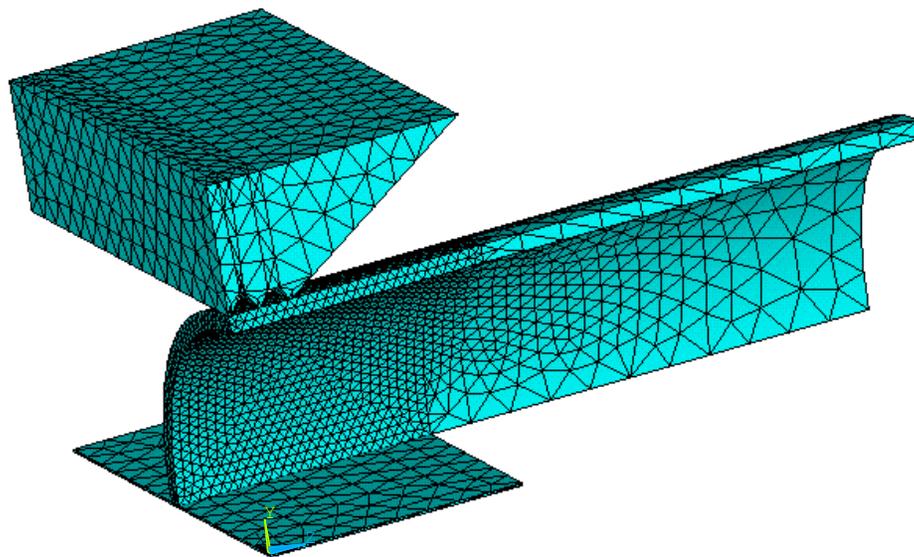


Figura III-29: Espécimen 3 – Mallado condición no deformada

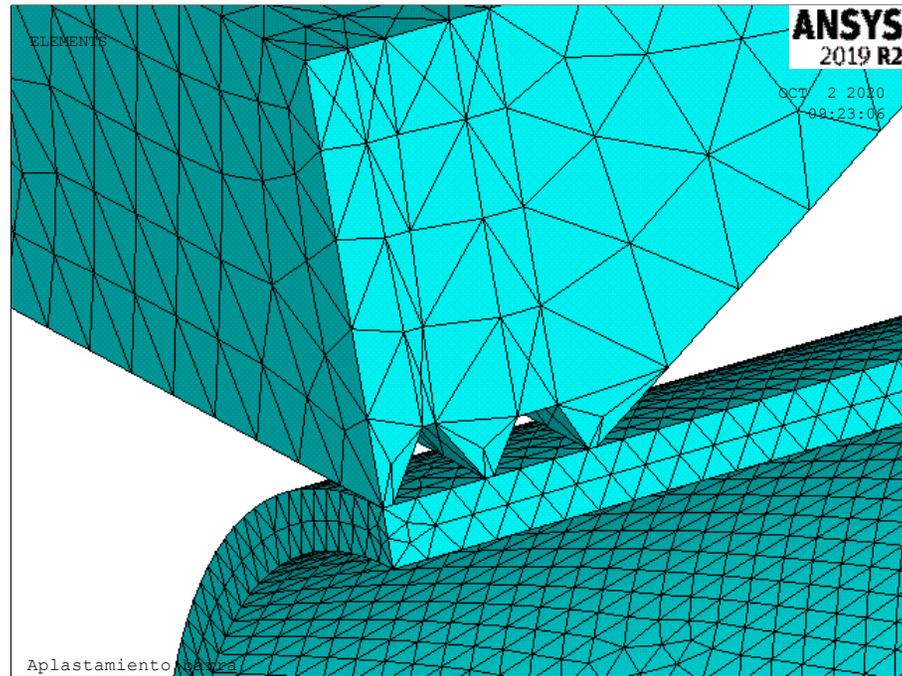


Figura III-30: Espécimen 3 – Mallado condición no deformada zona de contacto.

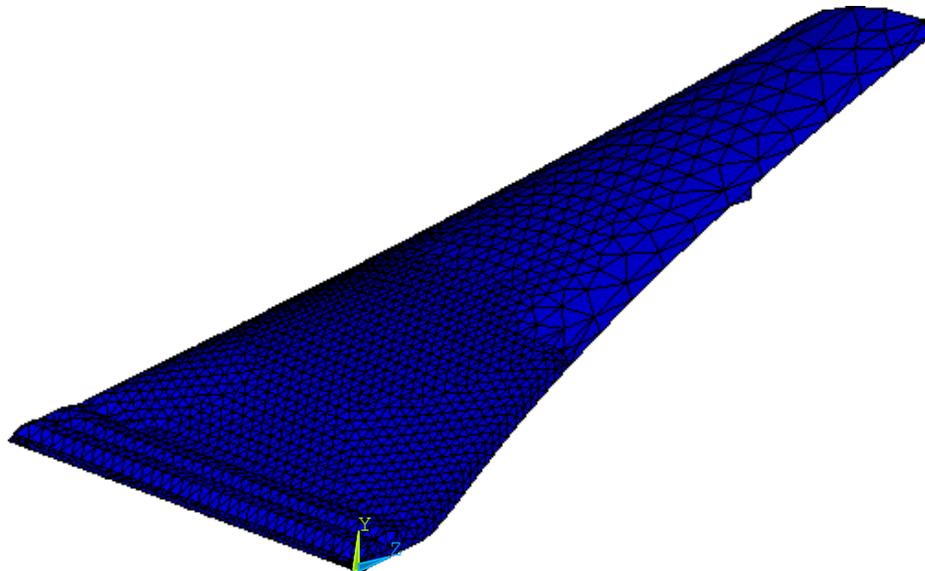


Figura III-31: Espécimen 3 – Mallado condición deformada.

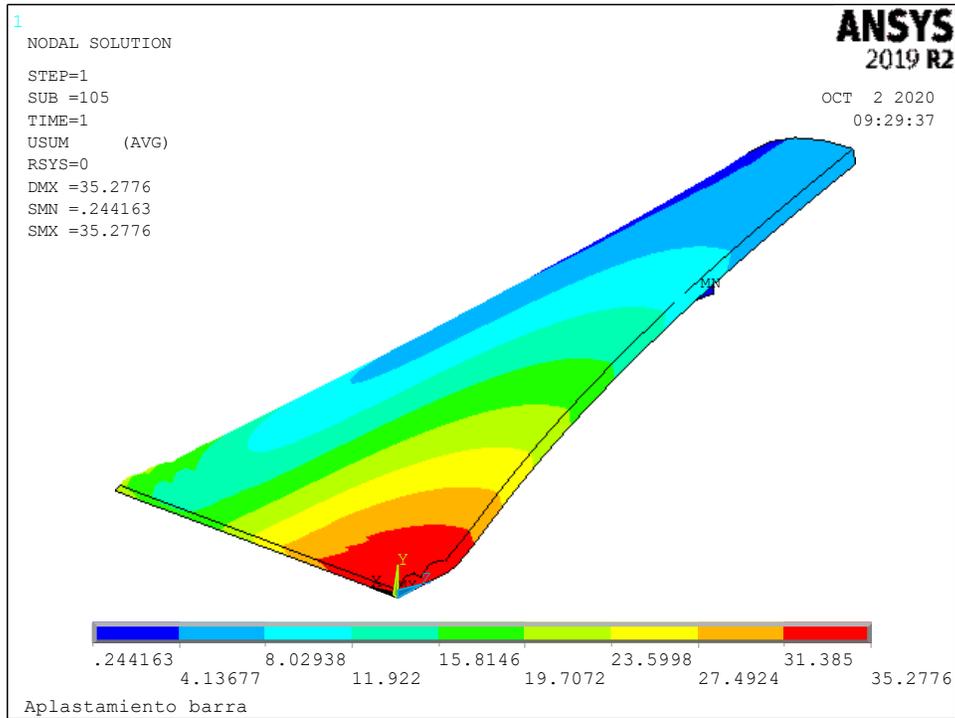


Figura III-32: Espécimen 3 – Deformación Time 1,0

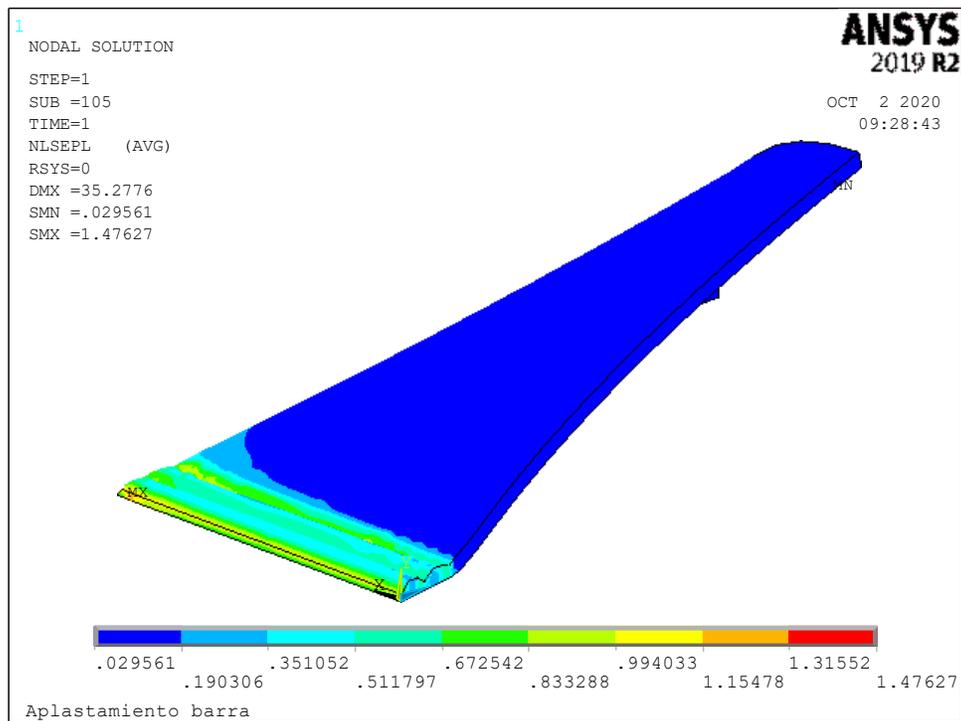


Figura III-33: Espécimen 3 – Plastic equivalent stress Time 1,0

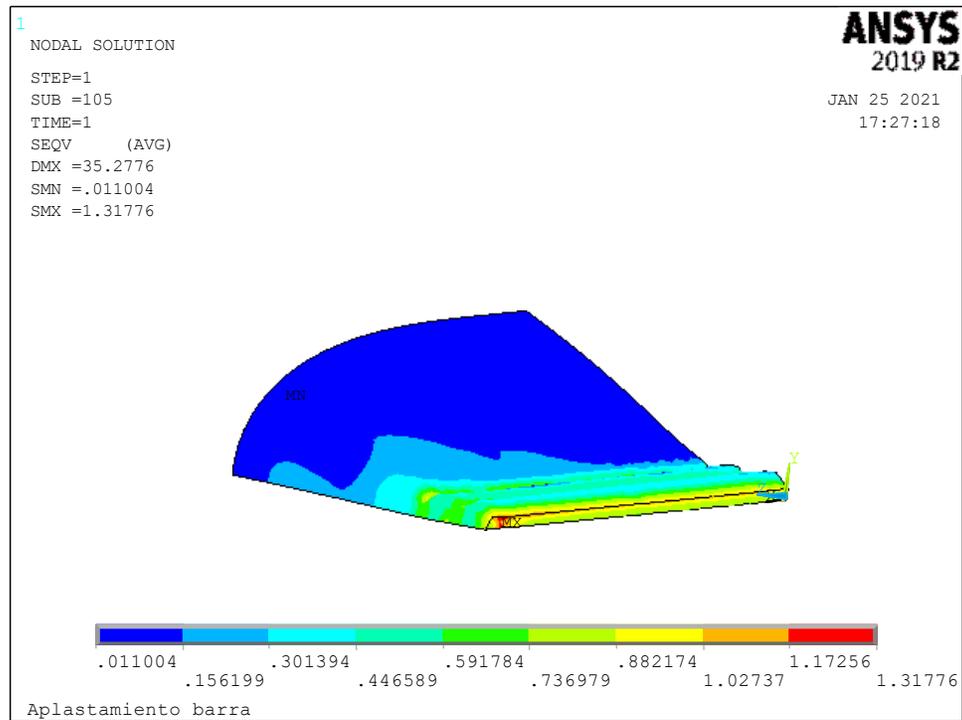


Figura III-34: Espécimen 3 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zona A

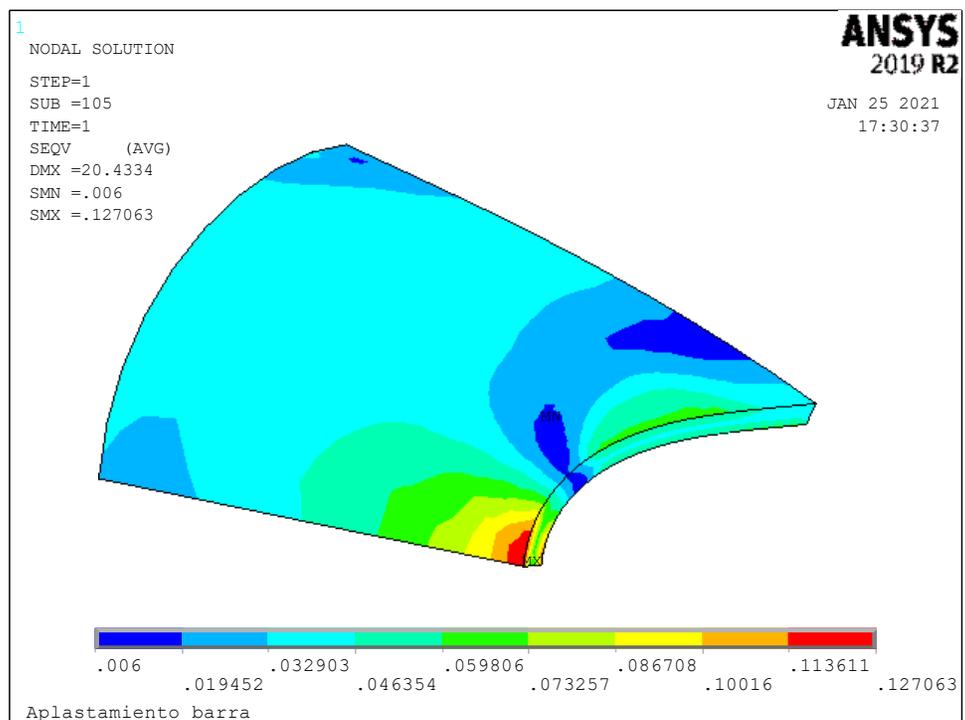


Figura III-35: Espécimen 3 – Tensión de Von Mises stress Time 1,0 Zonas B,C y D

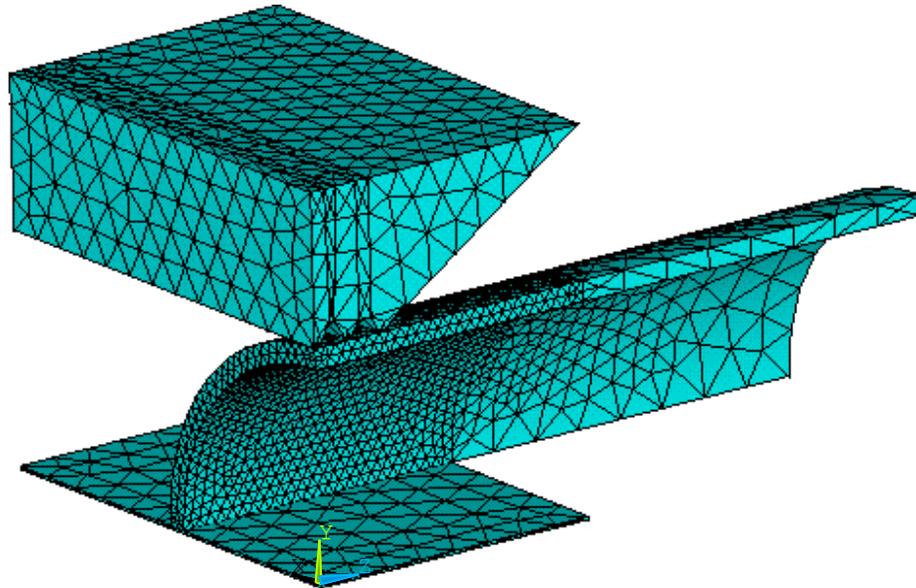
Espécimen 4 (2,375" x 0,108")

Figura III-36: Espécimen 4 – Mallado condición no deformada.

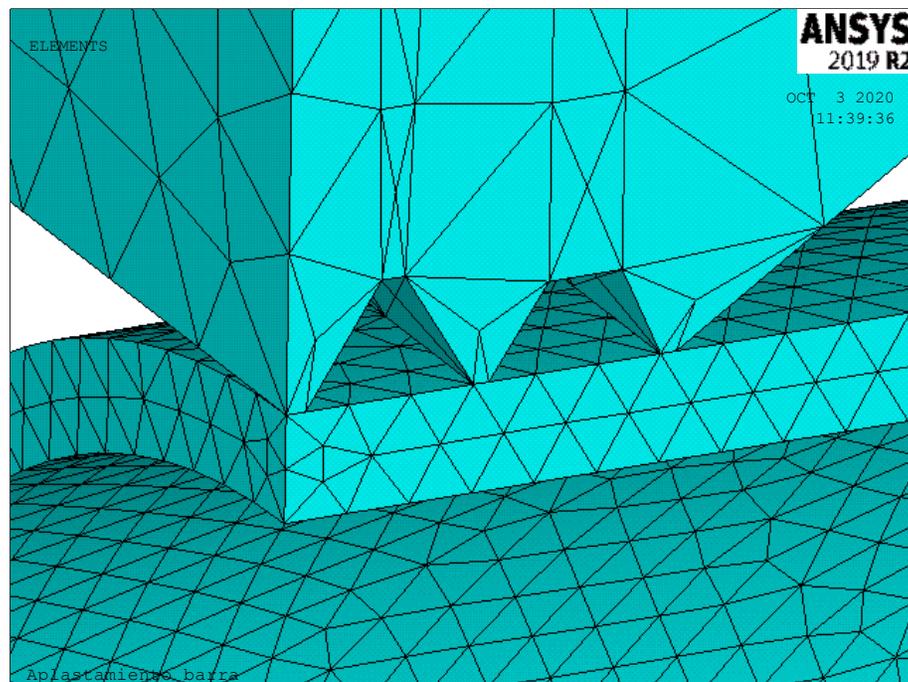


Figura III-37: Espécimen 4 – Mallado condición no deformada zona de contacto.

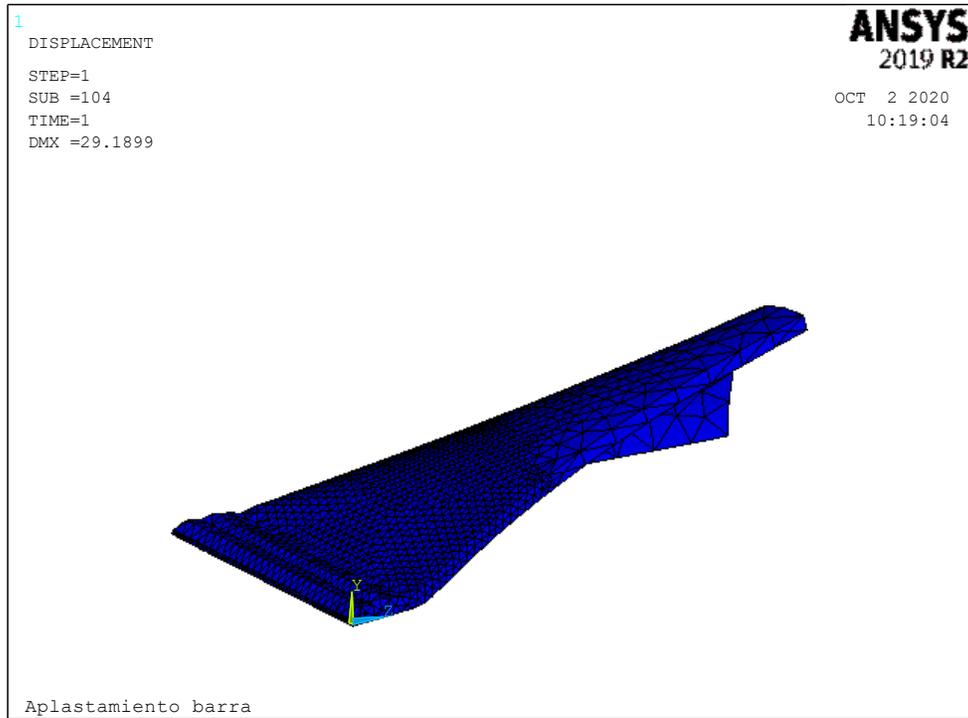


Figura III-38: Espécimen 4 – Mallado condición deformada.

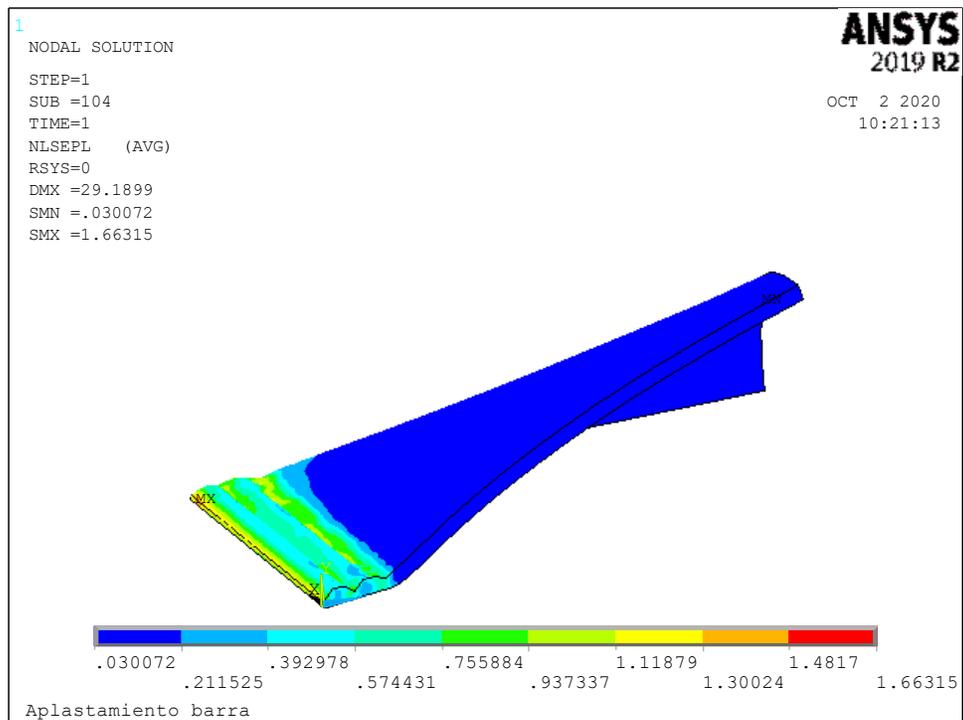


Figura III-39: Espécimen 4 – Deformación Time 1,0.

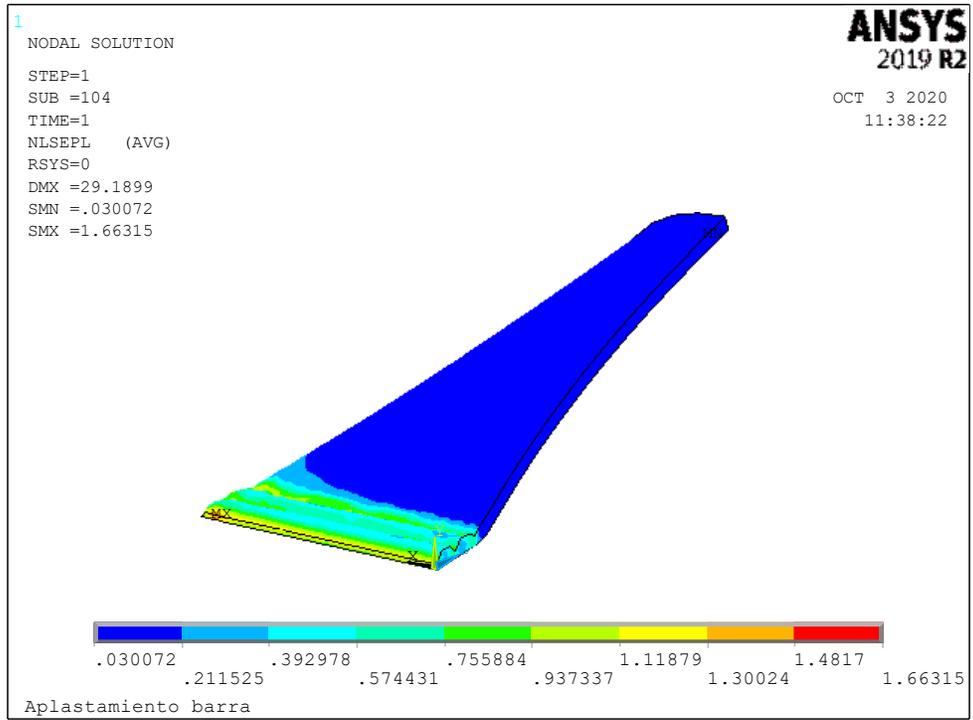


Figura III-40: Espécimen 4 – Plastic equivalent stress Time 1,0.

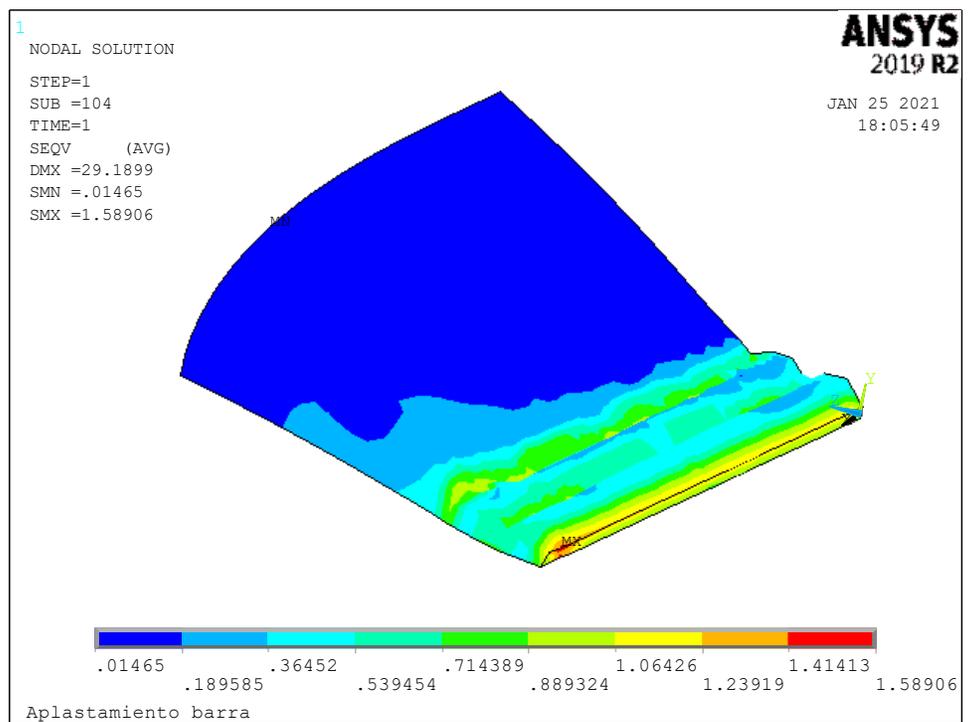


Figura III-41: Espécimen 4 – Tensión de Von Mises Time 1,0 zona A

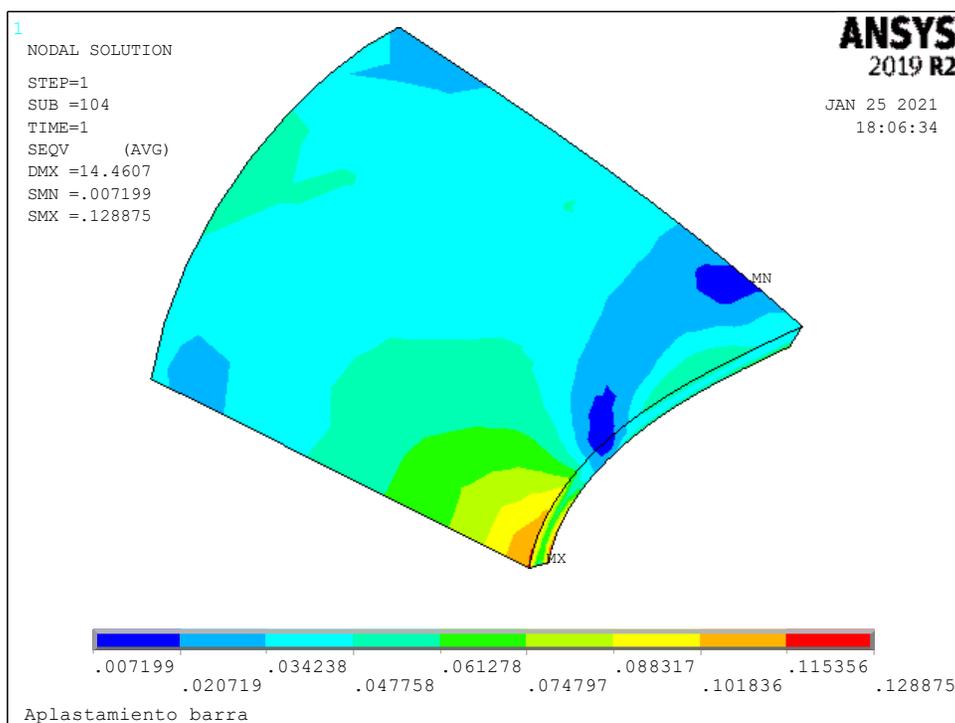


Figura III-42: Espécimen 4 – Tensión de Von Mises Time 1,0 zonas B, C y D

Los resultados dan cuenta de que además de la esperable tensión de aplastamiento y plastificación de la zona de contacto, en las zonas alejadas (zona D) la tensión de Von Mises es menor a la tensión de fluencia que es igual a $0,029 \frac{tonf}{mm^2}$, mientras que en zonas en que se produce mayor curvatura, la tensión es bastante mayor, superando incluso en algunos puntos la tensión de rotura a $0,04 \frac{tonf}{mm^2}$. Lo anterior no implica necesariamente una falla, dado que por tratarse de zonas con alta curvatura, dichos esfuerzos en general se concentran en puntos muy pequeños y en fibras extremas. Se puede apreciar aquello de mejor manera en una vista frontal tal como la de la Figura III-43. Además, la tensión de rotura real del material en promedio corresponde a $0,047 \frac{tonf}{mm^2}$.

Tabla 0-1 Resultados de tensiones obtenidas en modelaciones numéricas

	Tensión Von Mises [tonf/mm ²]				Plastic eq. Stress [tonf/m ²]
	A	B	C	D	
1 (4,75" x 0,137")	0.2844	0.0681	0.0574	0.0253	0.4467
2 (3,76" x 0,120")	0.2805	0.0297	0.0680	0.0297	0.4292
3 (2,875" x 0,108")	0.3013	0.0329	0.0598	0.0329	0.3510
4 (2,375" x 0,108")	0.3645	0.0342	0.0613	0.0342	0.3929

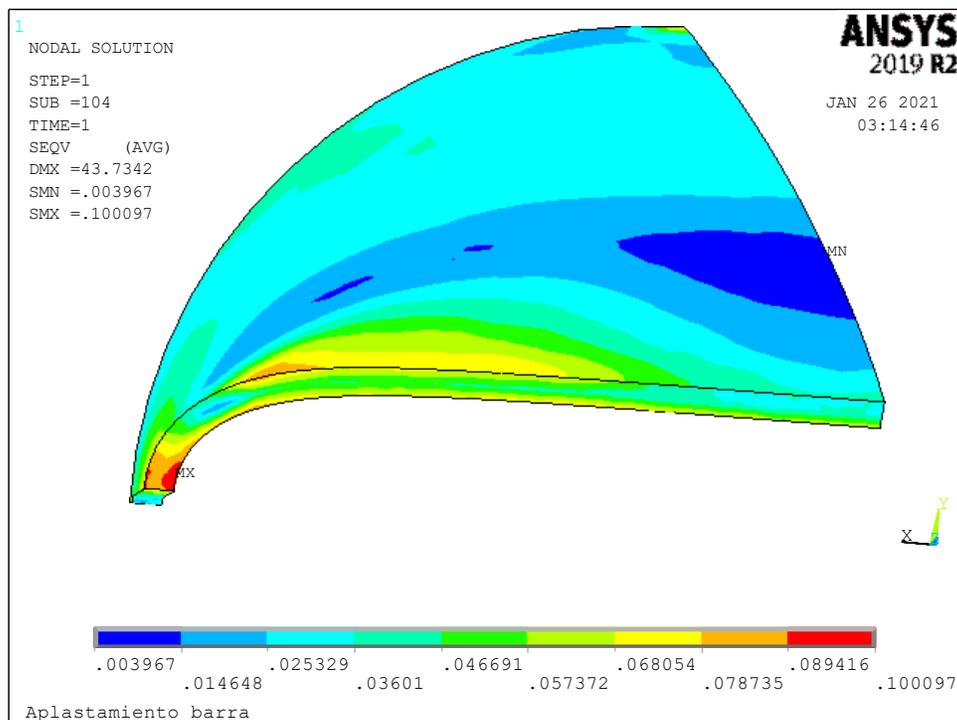


Figura III-43: Especimen 1 – Tensión de Von Mises Time 1,0 vista frontal.

ANÁLISIS DE ELEMENTO SOMETIDO A TRACCIÓN

Respecto a los elementos tubulares que se analizan en el presente estudio, en la práctica luego de ser montados serán sometidos a esfuerzos debido a las distintas solicitaciones, tales como peso propio, viento, sismo y sobrecarga de uso. Debido a la estructuración y tipo de unión, los elementos transmiten principalmente cargas de tracción y compresión, pero debido a que la unión no es perfectamente rotulada, también se transmiten algunos esfuerzos de momentos flectores. Sin embargo, dichas fuerzas no son de gran magnitud y el tipo de unión puede resistirlas (el criterio de diseño establece que la conexión resiste para su eje fuerte un momento equivalente al momento que genera la fluencia en la sección bruta). Dicha capacidad está directamente relacionada con el par tracción – compresión que se genera en la unión para su eje fuerte, por lo que las fuerzas resistentes de momento flector dependen también de la efectividad para resistir tracción y compresión de la llave de unión. En el presente capítulo se estudiará el comportamiento de la carga de tracción y en particular se visualizará la distribución de los esfuerzos de axiales en el elemento prismático ya deformado.

Características de modelo

Se utiliza como base el espécimen 3 simplificado. Dicha simplificación de la geometría inicial es necesaria ya que se debe realizar la simulación de aplastamiento (modelo de prensa), para luego guardar dicha geometría y tensiones residuales en un archivo, para finalmente cargarlas en un nuevo post proceso en el que se aplica la carga de tracción a la probeta deformada y tensionada dentro de un nuevo análisis no lineal (del material y de grandes deformaciones), por lo que los recursos computacionales requeridos son excepcionalmente altos. Para realizar lo anterior, el software ANSYS® permite para ciertas condiciones reiniciar un análisis después de que se haya completado el proceso inicial existiendo dos opciones principales de reinicio. Algunos casos en los que se requiere un reinicio del proceso se listan a continuación:

- Caso en que se deben agregar más pasos de carga al análisis
- Para recuperar un fallo de convergencia en un análisis no lineal.

- Análisis de perturbación lineal.
- Reinicio análisis modal.
- En el caso de haber condiciones de carga adicionales en un análisis estático lineal o porciones adicionales de una curva de carga tiempo historia en un análisis transiente. Este último caso es el que corresponde al presente estudio.

Las opciones principales de reinicio disponibles en software Ansys® en su modo APDL son:

- Reinicio de análisis modal:

Aplica a resolución de problemas de valores y vectores propios y permite adicionar grados de libertad aprovechando los datos ya procesados.

- Reinicio Multicuadro:

Corresponde al método utilizado en el presente estudio y de manera general un análisis de este tipo debe cumplir los siguientes requisitos:

- El tipo de análisis debe ser estático, armónico o transiente.
- Se debe haber completado al menos una iteración en la ejecución inicial.
- La ejecución inicial no debería haberse detenido de manera anormal (por ejemplo, aborto a nivel de sistema operativo).

El reinicio de multicuadro, permite guardar información de análisis en muchos subpasos durante una ejecución, y luego reiniciar la ejecución en uno de esos subpasos.

Al reiniciar un trabajo se utiliza el comando ANTYPE para especificar el punto de reinicio y el tipo de reinicio. Se puede continuar el trabajo desde el punto de reinicio (haciendo las correcciones necesarias), o terminar un paso de carga en el punto de reinicio (volver a escalar toda la carga) y continuar con el siguiente paso de carga.

En el caso de estudio, resulta necesario modificar las condiciones de borde y cargas previo al reinicio.

Como primer paso se realiza un modelo de aplastamiento de la tubería, sin considerar la llave de conexión, tal como se aprecia en la Figura IV-1. Se modela de esta manera con el fin de optimizar el tiempo de proceso, lo que se estima no afectará mayormente los resultados asociados a las tensiones axiales. En la Figura IV-2, se aprecia la deformación axial luego de aplicada una deformación longitudinal.

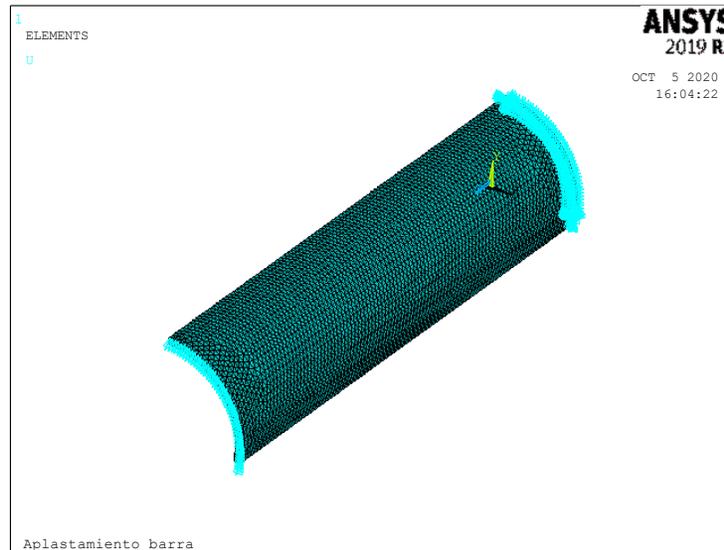


Figura IV-1: Especimen 4 simplificado – mallado sin deformar.

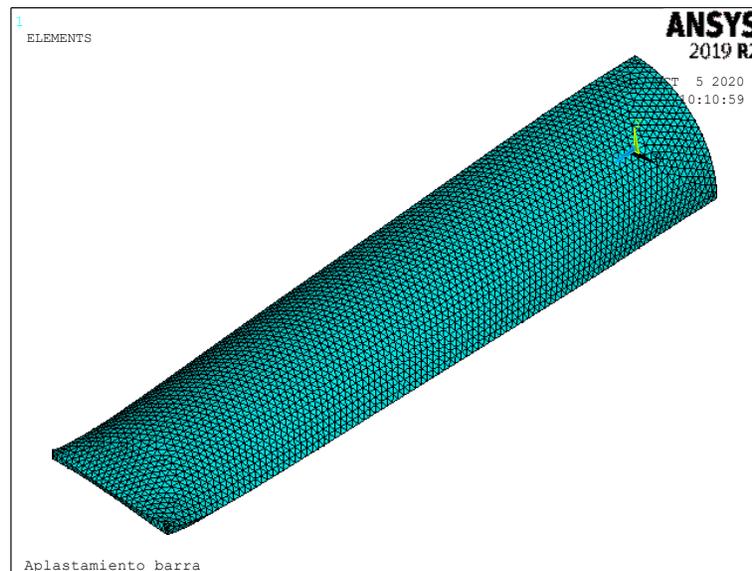


Figura IV-2: Especimen 3 simplificado – mallado deformación prensa.

Posteriormente, al modelo que ya contiene la deformación y esfuerzos producto del prensado, se le impondrá una deformación en el eje longitudinal (Eje Z) de 10 mm. Para aquello es necesario cargar la geometría y datos guardados reiniciando de esta manera el pre-proceso mediante la siguiente línea de comandos:

```
/PREP7
```

```
UPGEOM,1,1,100,file,rst
```

```
LSREAD,1
```

El archivo que contiene los datos guardados se denomina “file.rst”.

Comparación de resultados numéricos y experimentales

Uno de los objetivos del presente estudio, corresponde a establecer si el proceso de aplastado genera tensiones residuales tales que puedan implicar sobretensión al trabajar la barra a tracción o compresión. Lo particularmente estudiado corresponde a la influencia para una posterior carga de tracción. Para aquello, se estima la carga admisible por el método de tensiones admisible (ASD). Además, se estima la carga que inicia la fluencia y la carga de rotura teórica en función de la sección bruta. Lo que se aprecia en los ensayos de tracción de probetas es que la falla es del tipo dúctil. En general la rotura se produce en el miembro y posterior a grandes deformaciones. En la Figura IV-3 se puede apreciar el comportamiento anteriormente descrito.



Figura IV-3: Probeta post ensayo de tracción. (ENEL, 2015).

Los parámetros de cálculo para la estimación de las cargas de fluencia y rotura mediante el método de tensiones admisibles se describen a continuación.

$\Omega=1.67$ Factor de seguridad para elemento sometido a tracción según AISC-360.

$\sigma_y = 290 \text{ MPa}$ Tensión de fluencia.

$\sigma_u = 400 \text{ MPa}$ Tensión de rotura.

$A_g = 0.905 \text{ in}^2$ Sección bruta del tubo.

$$T_{\text{adm}} = \frac{A_g \cdot \sigma_y}{\Omega} = 10.34 \text{ tonf} \quad \text{Carga admisible.} \quad (0.1)$$

$$T_{\text{ult}} = \frac{A_g \cdot \sigma_u}{\Omega} = 14.27 \text{ tonf} \quad \text{Carga de rotura de diseño.} \quad (0.2)$$

$$T_y = A_g \cdot \sigma_y = 17.26 \text{ tonf} \quad \text{Carga que inicia fluencia.} \quad (0.3)$$

$$T_u = A_g \cdot \sigma_u = 23.83 \text{ tonf} \quad \text{Carga de rotura.} \quad (0.4)$$

La simulación considerará aplicar una deformación axial suficiente para alcanzar la tensión de rotura en gran parte de la sección.

Teóricamente, la deformación que se apreciará cuando inicie la fluencia se estima de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 L &= 250 \text{ mm.} && \text{Largo no deformado de la sección prismática.} \\
 E &= 2 \cdot 10^6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} && \text{Módulo de Young del acero.} \\
 \delta &= \frac{T_y \cdot L}{A_g \cdot E} = 0.363 \text{ mm.} && \text{Deformación al inicio de la fluencia.} \quad (0.3)
 \end{aligned}$$

Análisis de resultados obtenidos

Se aplica una deformación axial (eje Z) de 10 mm para la tubería previamente aplastada. La deformación que inicia la fluencia corresponde al subpaso de carga 7, lo que se aprecia en la Figura IV-4. Su esfuerzo axial asociado es variable según la zona de la sección, pero un valor representativo a considerar corresponde a $2489 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$, mientras que la tensión de fluencia corresponde a $2900 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$, lo que se aprecia en la Figura IV-5.

La tensión de rotura que corresponde a $4000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ aproximadamente, se inicia en el subpaso de carga 131, lo que se aprecia en la Figura IV-6 y su deformación asociada corresponde a 6.61 mm, lo que se aprecia en la Figura IV-7.

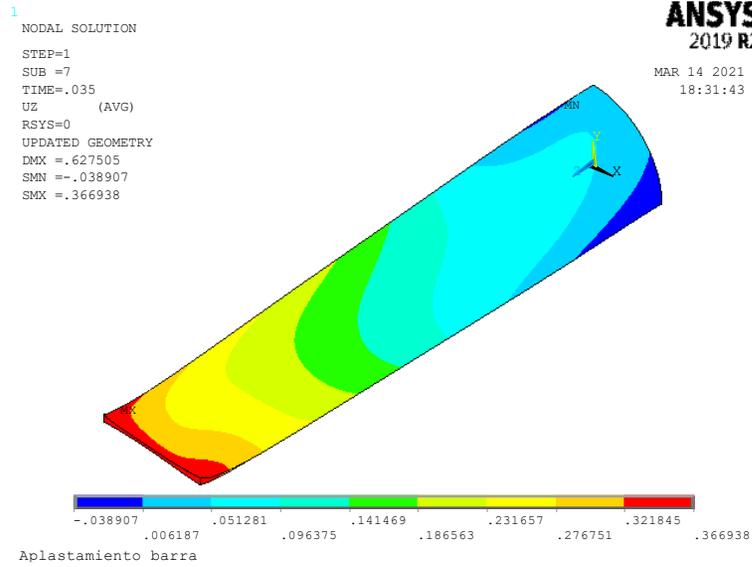


Figura IV-4: Deformación axial [0.37 mm] dirección axial – Substep 7.

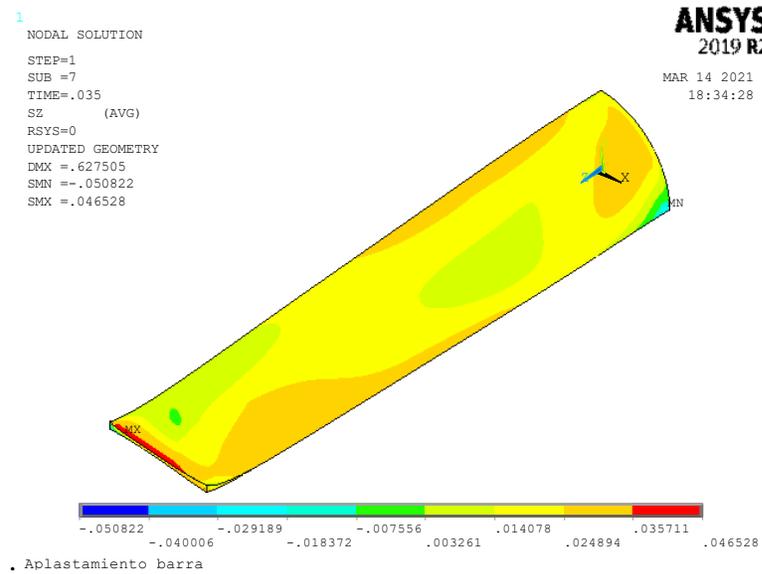


Figura IV-5: Esfuerzo axial para Substep 7 [tonf/mm²].

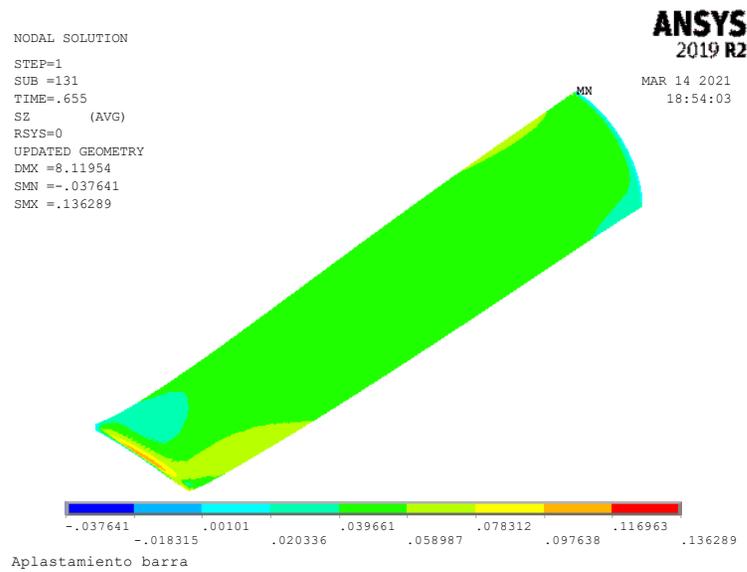


Figura IV-6: Esfuerzo axial para Substep 131 [tonf/mm²].

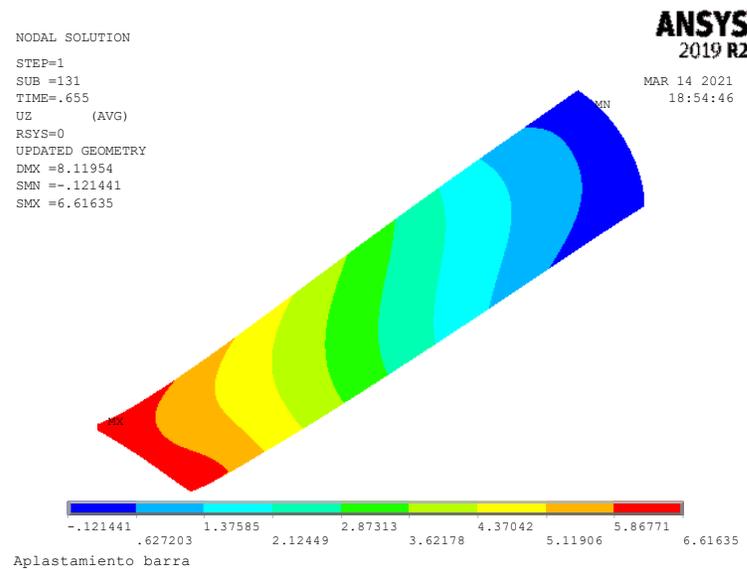


Figura IV-7: Deformación axial [6.61 mm] dirección axial – Substep 131.

En la Figura IV-8 se aprecia una probeta de ensayo real y posteriormente una tabla con los resultados obtenidos en un set de pruebas. El archivo completo con los ensayos realizados se encuentra disponibles en los Anexos.



Figura IV-8: Montaje de probeta para ensayo real (ENEL, 2015).

Tabla 0-1 Resultados obtenidos en ensayos de unión

id	Tipo	Diámetro externo [in]	Espesor [in]	Tipo Ranura	Tipo conector	Carga teórica de rotura [tonf]	Carga de ensaye [tonf]
BN-P1	IT1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	16.159
BN-P2	IT1	2 3/8	0.104	foxtrot	9sf-01	14.1	17.799
2BN-P1	2T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	21.707
2BN-P2	2T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	20.599
3BN-P1	3T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	21.584
3BN-P2	3T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	21.45

Se puede apreciar de la tabla, que la carga promedio de rotura correspondió a 19.9 tonf, lo que equivale a un 40% sobre la carga teórica estimada. Lo anterior, se ve reflejado en los ensayos de miembro – conexión y se atribuye principalmente a la gran deformación plástica que puede lograr la probeta, incluso generando una forma aplanada tal como se aprecia en la Figura IV-3, además de que la carga teórica incluye el factor de seguridad establecido por el código de diseño. Se ha podido establecer un comportamiento similar entre el ensayo real y la modelación numérica hasta el nivel de fluencia. Respecto a las deformaciones obtenidas para la rotura, en general los resultados promedios observados en ensayos corresponden a un rango entre 9 y 11 mm, versus los 6,6 establecidos en la modelación.

CONCLUSIONES

En base a las modelaciones numéricas realizadas y los respectivos resultados, se pudo observar que es factible realizar modelaciones de uniones complejas, simulando inclusive su proceso constructivo e incorporando luego la secuencia de carga, con el fin de analizar las tensiones de trabajo de una manera más realista. Dicho procedimiento es aplicable a otros tipos de elementos conformados que luego sean sometidos a estados de carga que generan tensiones que se adicionan a las tensiones residuales del proceso de fabricación. Un ejemplo típico sería un elemento tipo canal conformado en frío, o en general cualquier perfil estructural conformado en frío.

Respecto a los puntos específicos analizados en el presente estudio, se puede comentar y concluir lo siguiente:

- La simulación con elementos finitos sólidos que incluye las no linealidades del material, grandes deformaciones y de elementos de contacto, logra reflejar el proceso constructivo del tipo de uniones analizadas. Lo anterior se aprecia comparando el perfil que se conforma, por lo que del punto de vista de simulación física el modelo se considera adecuado. Por lo anterior, el procedimiento podría ser aplicable para realizar mejoras (por ejemplo, simular aplicación de temperatura exógena en la zona de aplastamiento con el fin de minimizar la generación de tensiones residuales).
- El modelo, además de generar un perfil que físicamente es similar respecto a la probeta original, presenta una correlación adecuada respecto a los esfuerzos que se observan en ensayos. Se aprecia que la zona de contacto supera con creces la tensión de fluencia, lo que era de esperar ya que de esta manera se logra generar la llave de resistencia de la unión mediante plastificación. No obstante, se observa que las tensiones residuales son relativamente bajas en el resto de tubo.

- Para el modelo de tracción, que considera las tensiones residuales del proceso de fabricación, y al imponer una deformación cercana a la que genera la fluencia, se observa que, en gran parte del elemento resistente las tensiones se distribuyen de manera homogénea. Por lo anterior, el modelo también refleja que el comportamiento del tipo de unión y tal como se observó en los ensayos, posee un comportamiento del tipo dúctil.
- Para el modelo de tracción, se pudo apreciar que las deformaciones axiales obtenidas para la rotura, en el modelo numérico son entre un 36 – 67% menores que las obtenidas en ensayos reales. Lo anterior se puede atribuir a que el tipo de unión real presenta un pequeño *gap* que facilita el montaje. Además, el corte tensional en el modelo numérico se ha realizado de manera aproximada y no se ha considerado mecanismos de distribución de esfuerzo.

Se puede concluir que la metodología de uniones embutidas, se presenta como un tipo de unión adecuada para estructuras tipo enrejadas tridimensionales o estereométricas, tanto para cargas normales como eventuales. Resulta de especial interés, para un país de alta sismicidad como Chile, que el comportamiento sea del tipo dúctil. Además, y para otras configuraciones extrapolables, resulta interesante estudiar el comportamiento para ciclos de carga y descarga del mismo tipo de uniones.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION (2010), Specification for Structural Steel Buildings, AISC 360 -10, Chicago, IL, USA.

AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION (2016), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC 341-16, Chicago, IL, USA.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (2017), Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures-ASCE/SEI 7-16, Reston, VA, USA.

Zienkiewicz (1977) The Finite Element Method, McGraw-Hill Company, London,UK.

Kohnke P, Ph.D (1999) ANSYS Theory Reference, Ansys, Inc. Canonsburg,PA, USA

ANEXOS

Anexo A : Códigos apdl entrada ansys

Modelo Prensa:

```

finish
/clear
/title, Aplastamiento barra
/PREP7 !ABRE PREPROCESO
ANTYPE,STATIC !ANALISIS ESTÁTICO
C***
C***DEFINICION DE PARAMETROS GEOMETRICOS
C***
!Unidades tonnef mm

!*****
!*****PARÁMETROS GEOMÉTRICOS*****
!*****
Dtub=120.7 ! Diámetro tubo
etub=3.50 ! Espesor del tubo
Ltub=1.5*Dtub ! Largo del tubo
DDD=40
FACT=0.8
!*****
!*****

DELTA=(0.48*Dtub)

!*****

!*****GEOMETRÍA TUBO*****
k,1,0,0,0
k,2,0,0,Ltub
CIRCLE,1, Dtub/2
CIRCLE,1, (Dtub/2)-(etub)
AL,1,2,3,4
AL,5,6,7,8
ASBA,1,2
L,1,2
VDRAG,3,,,,,9
!*****PROPIEDADES DEL
MATERIAL*****
MT=1
Fy=0.029 !TENSIÓN DE FLUENCIA (tonnef/MM2)
ES=20
!DEFINICION DE ELEMENTOS
!PARA LAS BARRAS DE ACERO, ELEMENTO TIPO 1, SOLID186
ET,1,SOLID187 !ELEMENTO TIPO SOLID185

```

```

MP,EX,1,ES          !
MP,NUXY,1,0.3      !
TB,BISO,1          !DEFINICION DE CURVA BILINEAL PARA
ELEMENTO 1(ACERO)
TBDAT,1,Fy,MT
ET,2,SOLID187      !ELEMENTO TIPO SOLID187
MP,EX,2,4*ES      !MODULO DE YOUNG
MP,PRXY,2,0.3     !MODULO DE POISSON
!DEFINICIÓN DE ELEMENTOS TIPO CONTACTO
ET,6,170 !elemento targe170
ET,7,174 !elemento conta175
KEYOPT,7,1,0 ! SE DEJA FUERA TEMPERATURA
KEYOPT,7,3,1 !aUGMENTED LAG=0; pENALTY=1; MULTIPOINT =2 ;
LAGR+MULTIP=3; PURE LAGR=4
!*****GEOMETRÍA*****
PRENSA*****
k,19,0,Dtub/2,0
WPROTA,,,90
WPOFFS,0,-Dtub/2,1*Dtub
RECTNG,0,-DDD,0,-20.0
VEXT,11,,, -Dtub,,
!VSYMM,X, NV1, NV2, NINC, KINC, NOLEM, IMOVE
VSYMM,Y,2
!*****MALLADO DEL
MODELO*****
MAT,1
WPOFFS,-DDD
WPROTA,,,90
VSBW,1
WPOFFS,,Dtub/2
WPROTA,,90
VSBW,4
VSBW,5
!Seleccion Tubo
VSEL,S,,,1
VSEL,A,,,4
VSEL,A,,,6
VSEL,A,,,7
WPOFFS,Dtub
WPROTA,,,90
VSBW,ALL
VSEL,S,,,9
VSEL,A,,,10
VSEL,A,,,13
VSEL,A,,,14
VDELE,ALL

```

```

ALLSEL
VPLOT
VSEL,S,,12
VSEL,A,,8
VSEL,A,,2
VDELE,ALL
ALLSEL
VPLOT
RECTNG,0,-0.4,0,DDD
VEXT,4,,Dtub,,
ALLSEL
VPLOT
K,109,0,(Dtub/2),0
K,110,0,(Dtub/2),0.5
K,111,0,(Dtub/2)+2.9689,2.4
K,112,0,(Dtub/2)+2.9689,3.0
K,113,0,(Dtub/2),4.8
K,114,0,(Dtub/2),5.2
K,115,0,(Dtub/2)+2.2539,6.7
K,116,0,(Dtub/2)+2.2539,8.5768
K,117,0,(Dtub/2),9.6
K,118,0,(Dtub/2),10
K,119,0,(Dtub/2)+20,2.005
K,120,0,(Dtub/2)+20,3.7226
K,121,0,(Dtub/2)+20,6.7
K,122,0,(Dtub/2)+20,8.5768
A,109,110,111,119,33
A,111,112,120,119
A,112,113,114,115,121,120
A,115,116,122,121
A,116,117,118,32,122
ASEL,S,,55
ASEL,A,,56
ASEL,A,,57
ASEL,A,,58
ASEL,A,,59
!CREA AREA 55
VEXT,ALL,,Dtub,,
ALLSEL
!RECTANGULO COMPLETO 3; 2 ES LA PRENSA
VDELE,3
!*****
!mallado zona de contacto
VSEL,S,,5
!VSEL,A,,8
MSHKEY,0

```

```

MSHAPE,1,3D
ESIZE,2*FACT,
VMESH,ALL
!mallado resto tubo
VSEL,S,,11
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3D
ESIZE,8*FACT,
VMESH,ALL
!mallado prensa prensa
TYPE,2
MAT,2
VSEL,S,,2
VSEL,A,,4
VSEL,A,,6
VSEL,A,,7
VSEL,A,,8
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3D
ESIZE,6*FACT,
VMESH,ALL
!mallado prensa tubo mirror imaginario
MAT,2
VSEL,S,,1
!VSEL,A,,3
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3D
ESIZE,7*FACT,
VMESH,ALL
allsel
! DEFINICIÓN DE ELEMENTOS TIPO CONTACTO
! SE USARÁ UN CONTACTO TIPO RÍGIDO - FLEXIBLE
! TARGET(6) DEBE SER LA SUPERFICIE RIGIDA, 6= target, 7=conta
! CONTA(7) SE DEBE ASIGNAR A LA SUPERFICIE DEFORMABLE
!*****TARGE ZONA PRENSA*****
TYPE,6
!PRENSA PARTE SUPERIOR
ALLSEL
ASEL,S,,61
ASEL,A,,62
ASEL,A,,67
ASEL,A,,71
ASEL,A,,72
ASEL,A,,73
ASEL,A,,77
ASEL,A,,82

```

```

ASEL,A,,,81
ASEL,A,,,83
NSLA,S,1 ! SELECCIONA NODOS DEL AREA
!CM,PRESASUP,NODE      ! SE NOMBRA ESTE GRUPO DE NODOS
ESLN,S,0 !Selecciona elementos conectados a los nodos seleccionados.
ESURF,,
!*****TARGE ZONA mirror tubo imaginario*****
TYPE,6
!PRENSA PARTE SUPERIOR
ALLSEL
ASEL,S,,,7
NSLA,S,1 ! SELECCIONA NODOS DEL AREA
CM,PRESASUP,NODE      ! SE NOMBRA ESTE GRUPO DE NODOS
ESLN,S,0 !Selecciona elementos conectados a los nodos seleccionados.
ESURF
!*****CONTA ZONA TUBO EXTERIOR*****
!TUBO PARTE SUPERIOR
ALLSEL
ASEL,S,,,23
!ASEL,A,,,24
NSLA,S,1 ! SELECCIONA NODOS DEL AREA
CM,TUBOSUP,NODE      ! SE NOMBRA ESTE GRUPO DE NODOS
TYPE,7
ESLN,S,0
R,7
R,7,3,0.001
R,7,4,1
ESURF
!TUBO PARTE inferior en contacto con tubo mirror
ALLSEL
ASEL,S,,,27
NSLA,S,1 ! SELECCIONA NODOS DEL AREA
ESLN,S,0
TYPE,7
ESURF,,TOP
ESEL,ALL
!*****CONDICIONES DE BORDE*****
WPOFFS,,1.5*Dtub
nsel,s,loc,Z,0.99*Ltub,3000
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
!PRENSA SUPERIOR
DA,60,UX,0,1
DA,66,UX,0,1
DA,70,UX,0,1
DA,76,UX,0,1

```

```

DA,80,UX,0,1
DA,55,UX,0,1
DA,56,UX,0,1
DA,57,UX,0,1
DA,58,UX,0,1
DA,59,UX,0,1
DA,65,UZ,0,1
DA,83,UZ,0,1
!PRENSA IM INFERIOR
DA,31,UX,0,1
DA,31,UY,0,1
DA,31,UZ,0,1
!SIMETRÍA VERTICAL
DA,41,UX,0,1
DA,50,UX,0,1
!SIMETRÍA HORIZONTAL
DA,3,UY,0,1
DA,1,UY,0,1
!EXTREMO TUBO
DA,10,UZ,0,1
allsel
finish
!*****
/solu
!*****
antype,STATIC
CUTCONTROL,PLSLIMIT,0.95
NLGEOM,ON
AUTOTS,ON      ! Auto time-search on
!LNSRCH,ON
time,1         ! Sets time at end of run to 1 sec
!autots,on     ! Auto time-stepping on
PREDICT,ON
!NROPT,FULL
NSUBST,100,400,100
outr,all,all   ! Write all output
neqit,40       ! Max number of iterations
!*****
!RMODIF,7,4,1
ASEL,S,,64
ASEL,A,,69
ASEL,A,,75
ASEL,A,,79
ASEL,A,,84
ALLSEL
DA,61,UY,-DELTA,1

```

DA,62,UY,-DELTA,1
 DA,67,UY,-DELTA,1
 DA,71,UY,-DELTA,1
 DA,72,UY,-DELTA,1
 DA,73,UY,-DELTA,1
 DA,77,UY,-DELTA,1
 DA,82,UY,-DELTA,1
 DA,81,UY,-DELTA,1
 DA,83,UY,-DELTA,1
 LSWRITE,1
 LSSOLVE,1,1

Modelo Tracción:

```

finish
/clear
/title, Tracción
/PREP7 !ABRE PREPROCESO
ANTYPE,STATIC !ANALISIS ESTÁTICO
C***
C***DEFINICION DE PARAMETROS GEOMETRICOS
C***
!Unidades tonnef mm

!*****
!*****
!*****PARÁMETROS GEOMÉTRICOS*****
!*****

Dtub=73.03 ! Diámetro tubo
etub=2.64 ! Espesor del tubo
Ltub=250 ! Largo del tubo
DDD=40
!*****
!*****

!DELTA=(0.5*Dtub)+(0.05*etub)
DELTA=(0.48*Dtub)

!*****

!*****GEOMETRÍA*****
TUBO*****
k,1,0,0,0
k,2,0,0,Ltub
CIRCLE,1,Dtub/2,,90

```

```

CIRCLE,1, (Dtub/2)-(etub),,,90
L,4,6
L,3,5
AL,1,2,3,4
L,1,2
VDRAG,1,,,,,5
!*****PROPIEDADES DEL
MATERIAL*****
MT=1
Fy=0.029 !TENSIÓN DE FLUENCIA
ES=20
!DEFINICION DE ELEMENTOS
!PARA LAS BARRAS DE ACERO, ELEMENTO TIPO 1, SOLID186
ET,1,SOLID187          !ELEMENTO TIPO SOLID187
MP,EX,1,ES          !
MP,NUXY,1,0.3          !
TB,BISO,1          !DEFINICION DE CURVA BILINEAL PARA
ELEMENTO 1(ACERO)
TBDAT,1,Fy,MT
ET,2,SOLID187          !ELEMENTO TIPO SOLID185
MP,EX,2,4*ES          !MODULO DE YOUNG (KG/MM2)
MP,PRXY,2,0.3          !MODULO DE POISSON
!*****
!mallado
VSEL,S,,1
MSHKEY,0
MSHAPE,1,3D
ESIZE,2.5,
VMESH,ALL
ASEL,S,,1
NSLA
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
ALLSEL
!*****CONDICIONES DE BORDE*****
!D,1,UX,0
!D,1,UY,0
!D,1,UZ,0
D,5,UY,0
D,3,UX,0
!D,6,UZ,0
finish

!*****
/solu

```

```

!*****
antype,STATIC
CUTCONTROL,PLSLIMIT,0.95
NLGEOM,ON
AUTOTS,ON      ! Auto time-search on
!LNSRCH,ON
time,1         ! Sets time at end of run to 1 sec
!autots,on     ! Auto time-stepping on
PREDICT,ON
!NROPT,FULL
NSUBST,100,400,100
outres,all,all ! Write all output
neqit,40       ! Max number of iterations
!*****

```

D,48,UY,-36.15

D,248,UY,0
D,249,UY,-1.2467
D,250,UY,-2.4919
D,251,UY,-3.7342
D,252,UY,-4.9721
D,253,UY,-6.2043
D,254,UY,-7.4292
D,255,UY,-8.6455
D,256,UY,-9.8516
D,257,UY,-11.046
D,258,UY,-12.228
D,259,UY,-13.396
D,260,UY,-14.548
D,261,UY,-15.683
D,262,UY,-16.799
D,263,UY,-17.896
D,264,UY,-18.973
D,265,UY,-20.027
D,266,UY,-21.057
D,267,UY,-22.064
D,268,UY,-23.044
D,269,UY,-23.998
D,270,UY,-24.923
D,271,UY,-25.82
D,272,UY,-26.686
D,273,UY,-27.522
D,274,UY,-28.325
D,275,UY,-29.095
D,276,UY,-29.832

D,277,UY,-30.533
D,278,UY,-31.199
D,279,UY,-31.829
D,280,UY,-32.421
D,281,UY,-32.976
D,282,UY,-33.492
D,283,UY,-33.969
D,284,UY,-34.407
D,285,UY,-34.804
D,286,UY,-35.161
D,287,UY,-35.477
D,288,UY,-35.751
D,289,UY,-35.984
D,290,UY,-36.175
D,291,UY,-36.324
D,292,UY,-36.43
D,293,UY,-36.494

LSWRITE,1
LSSOLVE,1,1

```
!*****  
/PREP7  
UPGEOM,1,1,100,file,rst  
!*****  
*****
```

LSREAD,1
time,1 ! Sets time at end of run to 1 sec

D,48,UY,0
D,248,UY,0
D,249,UY,0
D,250,UY,0
D,251,UY,0
D,252,UY,0
D,253,UY,0
D,254,UY,0
D,255,UY,0
D,256,UY,0
D,257,UY,0
D,258,UY,0
D,259,UY,0
D,260,UY,0
D,261,UY,0
D,262,UY,0

D,263,UY,0
D,264,UY,0
D,265,UY,0
D,266,UY,0
D,267,UY,0
D,268,UY,0
D,269,UY,0
D,270,UY,0
D,271,UY,0
D,272,UY,0
D,273,UY,0
D,274,UY,0
D,275,UY,0
D,276,UY,0
D,277,UY,0
D,278,UY,0
D,279,UY,0
D,280,UY,0
D,281,UY,0
D,282,UY,0
D,283,UY,0
D,284,UY,0
D,285,UY,0
D,286,UY,0
D,287,UY,0
D,288,UY,0
D,289,UY,0
D,290,UY,0
D,291,UY,0
D,292,UY,0
D,293,UY,0

D,3,UX,0
D,5,UY,0
DA,6,UZ,0.3

NSUBST,100,400,100
outres,all,all ! Write all output
neqit,40 ! Max number of iterations

/solu
!autots,on ! Auto time-stepping on
!PREDICT,ON

```
!NROPT,FULL
!NSUBST,30,100,30
!outres,all,all ! Write all output
!neqit,400 ! Max number of iterations
```

```
LSWRITE,2
LSSOLVE,2,2
```

Anexo B : Ensayos uniones

15-217A RESULTADOS PRIMER ENSAYO.

TRACCIÓN.

Id	Tipo	Diámetro externo (inch)	Espesor (inch)	Ranura	Tipo de conector	Carga a resistir (ton)	Carga real (ton)	Colada
BN-P1	IT1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	16.159	1507147590 5038330
BN-P2	IT1	2 3/8	0.104	foxtrot	9sf-02	14.1	17.799	1507147590 5038302
BN-P3	IT3	2 7/8	0.104	foxtrot	6sf-01	17.3	25.403	559232011 5038330
BN-P4	IT4	2 7/8	0.104	foxtrot	9sf-02	17.3	24.889	559232011 5038302
BN-P5	IT5	3 ½	0.104	foxtrot	6sf-01	21.1	29.450	559232011 5038330
BN-P6	IT6	3 ½	0.104	foxtrot	9sf-02	21.1	29.272	559232011 5038302
BN-P7	IT7	3 ¾	0.120	foxtrot	6sf-01	26.1	34.220	A507766 5038330
BN-P8	IT8	3 ¾	0.120	foxtrot	9sf-02	26.1	33.809	A507766 5038302
BN-P9	IT8	3 ¾	0.120	foxtrot	9sf-02	26.1	34.430	A507766 5038302
BN-P10	IT9	4 ¾	0.134	foxtrot	6sf-01	37.0	44.131	1511348012 5038330
BN-P11	IT9	4 ¾	0.134	foxtrot	6sf-01	37.0	44.000	1511348012 5038330
BN-P12	IT10	4 ¾	0.134	foxtrot	9sf-02	37.0	42.915	1511348012 5038302
BN-P13	IT10	4 ¾	0.134	foxtrot	9sf-02	37.0	41.452	1511348012 5038302

FLEXIÓN.

Id	Tipo	Diámetro externo (inch)	Espesor (inch)	Ranura	Tipo de conector	Carga a resistir (ton)	Carga real (ton)	Colada
BN-P14	IF4	4 3/4	0.134	foxtrot	6sf-01	5.2	7.989	1511348012 5038330

15-217A RESULTADOS SEGUNDO ENSAYO.

TRACCIÓN.

Id	Tipo	Diámetro externo (inch)	Espesor (inch)	Ranura	Tipo de conector	Carga a resistir (ton)	Carga real (ton)	Colada
BN-P1	2T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	21.707	1520598012 5038330
BN-P2	2T1	2 3/8	0.104	foxtrot	9sf-02	14.1	20.599	1520598012 5038420
BN-P3	2T3	2 7/8	0.104	foxtrot	6sf-01	17.3	26.337	559232011 5038330
BN-P4	2T4	2 7/8	0.104	foxtrot	9sf-02	17.3	24.213	559232011 5038420
BN-P5	2T5	3 ½	0.104	foxtrot	6sf-01	21.1	32.093	559232011 5038330
BN-P6	2T5	3 ½	0.104	foxtrot	6sf-01	21.1	31.660	559232011 5038330
BN-P7	2T6	3 ½	0.104	foxtrot	9sf-02	21.1	30.118	559232011 5038420
BN-P8	2T6	3 ½	0.104	foxtrot	9sf-02	21.1	29.835	559232011 5038420
BN-P9	2T7	3 ¾	0.120	foxtrot	6sf-01	26.1	33.957	A507766 5038330
BN-P10	2T7	3 ¾	0.120	foxtrot	6sf-01	26.1	35.480	A507766 5038330
BN-P11	2T8	3 ¾	0.120	foxtrot	9sf-02	26.1	34.821	A507766 5038420
BN-P12	2T9	4 ¾	0.134	foxtrot	6sf-01	37.0	53.267	A511808 5038330
BN-P13	2T10	4 ¾	0.134	foxtrot	9sf-02	37.0	46.693	A511808 5038420

FLEXIÓN.

Id	Tipo	Diámetro externo (inch)	Espesor (inch)	Ranura	Tipo de conector	Carga a resistir (ton)	Carga real (ton)	Colada
BN-P14	2F3	3 3/4	0.104	foxtrot	6sf-01	2.9	6.592	A507766 5038330

15-217A RESULTADOS TERCER ENSAYO.

TRACCIÓN.

Id	Tipo	Diámetro externo (inch)	Espesor (inch)	Ranura	Tipo de conector	Carga a resistir (ton)	Carga real (ton)	Colada
3BN-P1	3T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-01	14.1	21.5836	1511346012 5038330
3BN-P2	3T1	2 3/8	0.104	foxtrot	6sf-02	14.1	21.4498	1511346012 5038330
3BN-P3	3T2	2 3/8	0.104	foxtrot	9sf-01	14.1	19.9017	1511346012 5038420
3BN-P4	3T2	2 3/8	0.104	foxtrot	9sf-02	14.1	19.4417	1511346012 5038420
3BN-P5	3T3	2 7/8	0.104	foxtrot	6sf-01	17.3	26.6467	1531360012 5038330
3BN-P6	3T3	2 7/8	0.104	foxtrot	6sf-01	17.3	26.5265	1531360012 5038330
3BN-P7	3T4	2 7/8	0.104	foxtrot	9sf-02	17.3	25.3244	1531360012 5038420
3BN-P8	3T4	2 7/8	0.104	foxtrot	9sf-01	17.3	25.0378	1531360012 5038420
3BN-P9	3T5	3 ½	0.104	foxtrot	6sf-02	21.1	31.6680	1508210940 5038330
3BN-P10	3T6	3 ½	0.104	foxtrot	9sf-02	21.1	31.4861	1508210940 5038420
3BN-P11	3T7	3 ¾	0.120	foxtrot	6sf-01	26.1	33.6702	A507766 5038330
3BN-P12	3T8	3 ¾	0.120	foxtrot	9sf-02	26.1	32.8732	A507766 5038420
3BN-P13	3T9	4 ¾	0.134	foxtrot	6sf-01	37.0	50.1023	A511808 5038330
3BN-P14	3T10	4 ¾	0.134	foxtrot	9sf-02	37.0	47.7563	A511808 5038420

FLEXIÓN.

Id	Tipo	Diámetro externo (inch)	Espesor (inch)	Ranura	Tipo de conector	Carga a resistir (ton)	Carga real (ton)	Colada
3BN-P15	3F1	2 7/8	0.104	foxtrot	6sf-01	1.8	5.2567	153136002 5038330
3BN-P16	3F2	3 ½	0.104	foxtrot	6sf-01	2.2	5.5638	559232011 5038330