



Instituto Tecnológico
de Buenos Aires

PROYECTO FINAL - INGENIERÍA MECÁNICA

REDISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE TAPAS DE TERMOTANQUE

Septiembre de 2019

Autor: FEDERICO HOJMAN

Tutor: DR. SEBASTIÁN D'HERS

Índice

1. Introducción	1
1.1. Diseño general de un termostanque	1
1.1.1. Fuentes de energía y geometría	1
1.1.2. Materiales	1
1.1.3. Tapas	3
1.2. Normativa vigente	3
1.2.1. Norma para termostanques a gas	4
1.2.2. Norma para termostanques eléctricos	4
1.3. Propuesta de mejora	4
2. Objetivos	5
3. Método	6
4. Consideraciones sobre las simulaciones	8
4.1. Condiciones de carga	8
4.2. Hipótesis	8
4.3. Resolución de ecuaciones no lineales	9
4.3.1. Ecuaciones	9
4.3.2. Método de Newton-Raphson	10
4.3.3. Método de Load-Displacement-Constraints (LDC)	11
4.4. Movimientos rígidos su fijación	14
5. Propiedades del material	15
5.1. Criterios de falla seleccionados	15
5.1.1. Deformación plástica acumulada	15
5.1.2. Criterio de Goijaerts	16
5.2. Ensayo de tracción	16
5.2.1. Resultados	16
5.3. Simulación del ensayo de tracción	17
5.3.1. Modelado	17
5.3.2. Resultados	18
5.4. Ensayo de embutido tipo Erichsen	19
5.4.1. Resultados	20
5.5. Simulación del ensayo Erichsen	20
5.5.1. Resultados	21
5.6. Resumen	22
6. Ensayos hidráulicos	24
6.1. Envueltas del recipiente	24
6.2. Material	25
6.3. Modelado y condiciones de borde	25
Hipótesis	25

7. Análisis del proceso de estampado actual	26
7.1. Matrices	26
7.2. Simulación del estampado	26
7.2.1. Resultados	28
7.2.2. Conclusiones acerca del estampado actual	30
8. Tapa E.O.S	31
8.1. Resultados de los ensayos hidráulicos	31
8.2. Conformado en frío	32
8.2.1. Presión del prensachapa	32
8.2.2. Resultados del conformado - Espesor 1,4mm	34
8.2.3. Resultados del conformado - Espesor 2,3mm	34
8.2.4. Resultados del conformado - Espesor 3,2mm	35
8.3. Conclusiones sobre el diseño E.O.S	36
8.3.1. Espesor 1,4mm	36
8.3.2. Espesor 1,7mm	36
8.3.3. Espesor 2,3mm	36
8.3.4. Espesor 3,2mm	37
8.3.5. Viabilidad del diseño	37
9. Tapa S.T.Y.X.	38
9.1. Resultados de los ensayos hidráulicos	39
9.2. Resultados del estampado	39
9.2.1. Espesor 1,4mm	39
9.2.2. Espesor 1,7mm	40
9.3. Conformado de los cuellos	41
9.3.1. Resultados del segundo conformado	42
9.4. Conclusiones sobre el diseño S.T.Y.X	43
10. Proceso de corte y tiempos	44
10.1. Propuestas de maquinaria	44
10.1.1. Brazo robot	44
10.1.2. Máquina a medida para el diseño E.O.S	44
10.1.3. Máquina a medida para el diseño S.T.Y.X	45
10.2. Tiempos de corte	46
11. Conclusiones finales	47
A. Presupuestos	48

Índice de figuras

1.1.1. Partes de un tanque de combustión convencional: 1.Tapas 2.Chimenea 3.Cámara de combustión 4.Envuelta	2
1.1.2. Esquema de un tanque de combustión antes de soldar la chimenea. Las superficies en tonos azules están enlosadas, las naranjas no lo están	2
1.1.3. Configuración de los tanques que se fabrican en la actualidad	3
1.1.4. Configuración propuesta	3
4.3.1. Método iterativo full Newton-Raphson para un único grado de libertad. Tomada del libro de Bathe[3]	11
4.3.2. Esquema del comportamiento de una estructura ante el colapso. Tomada de Bathe[3]	12
4.3.3. Interpretación geométrica del método LDC para un grado de libertad. Tomada del libro de Bathe[4]	13
5.2.1. Medidas de las probetas ensayadas	16
5.2.2. Probeta rota	17
5.2.3. Curvas true stress-true strain de las probetas ensayadas	17
5.3.1. Mallado de la probeta simulada	18
5.3.2. Comparación entre la curva ensayada y la simulada	19
5.3.3. Deformación plástica acumulada en la probeta	19
5.3.4. Criterio de Goijaerts en el de tracción	19
5.4.1. Esquema del herramental del ensayo Erichsen	20
5.5.1. Ensayo Erichsen - Mallado y cargas	21
5.5.2. Ensayo Erichsen - Deformación plástica acumulada	22
5.5.3. Criterio de Goijaerts en el ensayo Erichsen	22
7.0.1. Representación de la pieza que se analiza	26
7.1.1. Representación de la herramienta inferior de la matriz de conformado . .	27
7.2.1. Mallado del conjunto de herramientas y blank	27
7.2.2. Deformada del estampado de AD-4838	28
7.2.3. Deformación plástica acumulada del estampado de AD-4838	29
7.2.4. Parámetro de daño de Goijaerts del estampado de AD-4838	30
8.0.1. Representación de la nueva geometría para las tapas	31
8.2.1. Conformado en frío con 8kN de carga de prensachapa	33
8.2.2. Conformado en frío con 40kN de carga en el prensachapa	33
8.2.3. Conformado en frío con 80kN de carga en el prensachapa	33
8.2.4. Deformada de la pieza estampada en chapa de 1,4mm	34
8.2.5. Deformación plástica acumulada en el diseño E.O.S - Espesor 2,3mm . . .	34
8.2.6. Criterio de Giojaerts en el diseño E.O.S - Espesor 2,3mm	35
8.2.7. Deformación plástica acumulada del diseño E.O.S. - Espesor 3,2mm . . .	35
8.2.8. Criterio de Giojaerts en el diseño E.O.S - Espesor 3,2mm	36
9.0.1. Geometría propuesta - diseño S.T.Y.X	38
9.2.1. Deformada del estampado del diseño S.T.Y.X - Espesor 1,4mm	40
9.2.2. Criterio de Goijaerts en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,4mm	40
9.2.3. Deformación plástica acumulada en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,4mm .	41
9.2.4. Criterio de Goijaerts en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,7mm	41
9.2.5. Deformación plástica acumulada en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,7mm .	42

9.3.1.	Herramental (en verde) y pieza (en rojo) del conformado del cuello de 3in	42
9.3.2.	Pieza antes de conformar el cuello de 3in	43
9.3.3.	Tapa con cuello de 3in	43
9.3.4.	Pieza antes de conformar el cuello de 6in	43
9.3.5.	Tapa con cuello de 6in	43
10.1.1.	Esquema del proceso de corte de la máquina a medida	45
A.0.1.	Presupuesto de la maquinaria de corte láser <i>ad hoc</i>	48
A.0.2.	Presupuesto de la celda de corte con brazo robot	49

Índice de tablas

5.3.1.	Puntos utilizados para describir el material	18
8.1.1.	Resultados del ensayo hidráulico para diferentes espesores	32
9.1.1.	Presiones admisibles para diferentes espesores	39
10.2.	Tiempos de corte de las piezas. No considera carga y descarga de la máquina	46

1. Introducción

Una compañía que fabrica termotanques busca mejorar su eficiencia en planta mediante un aumento de la velocidad de proceso y una reducción del stock. Una de las maneras de lograr esto es implementar modificaciones al producto que permitan disminuir los costos y, a su vez, mejorar las prestaciones para el consumidor.

Se pone especial foco en la calidad, de manera que se diseñan los productos para que, tanto durante la operación como la fabricación, la tasa de fallas sea mínima.

1.1. Diseño general de un termotanque

Un termotanque es, esencialmente, un recipiente a presión que contiene agua, la calienta y mantiene a temperatura para su uso. Se encuentra compuesto por tres capas: la exterior, el aislante y la interior. Esta última, llamada también “tanque negro”, es donde el agua se calienta y almacena. El aislante evita las pérdidas de calor y la capa exterior contiene a las otras dos.

Este trabajo se concentra sobre el diseño del tanque negro.

1.1.1. Fuentes de energía y geometría

El diseño de los tanques depende de la fuente de calor que utiliza para calentar el agua.

En la actualidad, se comercializan mayoritariamente dos tipos de termotanque: eléctricos y de combustión.

Los eléctricos utilizan el efecto Joule para generar calor en una resistencia que se encuentra sumergida en el agua. Este tipo de tanque consiste en una envuelta cilíndrica y dos tapas, a las que llamaremos “ciegas”, dado que no poseen un agujero central.

Los tanques de combustión, o de gas, poseen quemadores que toman una mezcla de gas natural o GLP y aire y producen una llama. Esto ocurre dentro de una cámara de combustión que alimenta una chimenea que recorre del tanque desde una tapa hacia la otra. El calor de los gases de combustión se transfiere al agua a través de la pared de la chimenea. La chimenea se encuentra soldada a una tapa del tanque sobre un agujero central. Lo mismo ocurre con la cámara de combustión, en la tapa opuesta. La figura 1.1.1 muestra un esquema de un tanque de gas convencional.

Existe, además, un tipo de tanque de combustión llamado “de condensación” en el que los gases se enfrían al punto en que el agua producida en la combustión condensa dentro de la chimenea. Como el condensado debe extraerse por gravedad, tanto la chimenea como la cámara se sueldan a la tapa inferior. De esta manera, estos tanques tienen una tapa ciega y una con dos uniones.

1.1.2. Materiales

Dado que deben resistir presión y altas temperaturas, incluso de llama directa, los tanques se fabrican en acero. Esto, además, tiene un costo relativamente bajo.

El uso de este material implica que todas las superficies que puedan estar en contacto con el agua deben ser protegidas contra la corrosión. Para esto, se recubren estas superficies con una capa de losa. Este proceso se denomina enlosado (ver figura 1.1.2).

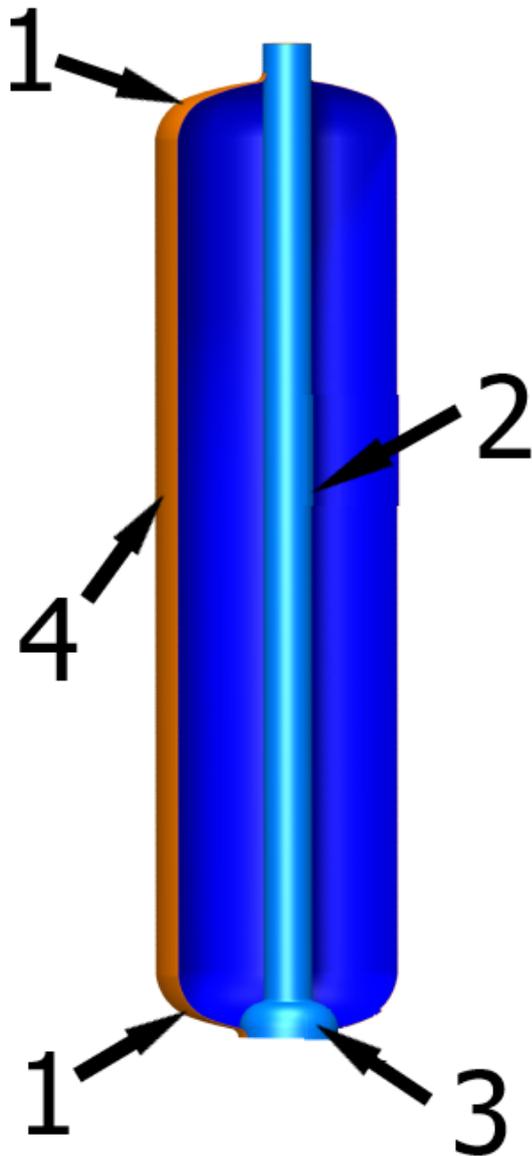


Figura 1.1.1: Partes de un tanque de combustión convencional: 1.Tapas
2.Chimenea 3.Cámara de combustión
4.Envuelta

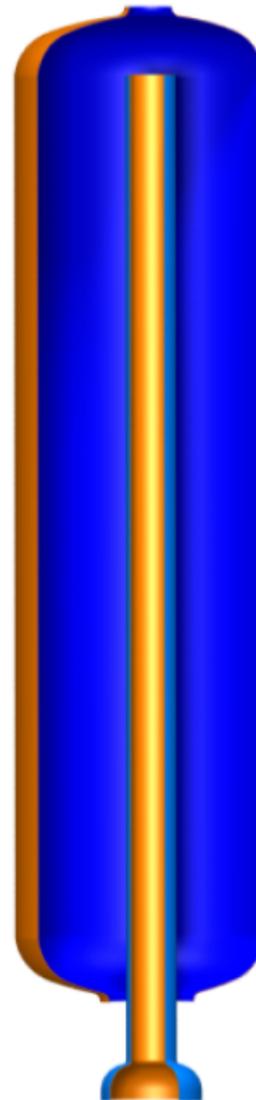


Figura 1.1.2: Esquema de un tanque de combustión antes de soldar la chimenea. Las superficies en tonos azules están enlucadas, las naranjas no lo están

1.1.3. Tapas

Las tapas se fabrican por embutido y, de ser necesario, corte en prensas.

La existencia de diferentes fuentes de energía, diámetros de chimeneas o cámaras y necesidad variable de agujeros en las tapas provoca que existan, para pocos modelos de tanque, un gran número de tapas diferentes. Esto trae aparejados varios problemas como, por ejemplo, la necesidad de producir stocks de tapas antes de ensamblar los tanques, complejidad de montaje y, principalmente, cambios en las matrices de conformado y de corte. Esto último representa largos tiempos muertos en la producción.

Para facilitar el proceso de soldadura y garantizar la estanqueidad del tanque, resulta conveniente utilizar las tapas conformadas con la concavidad hacia abajo tanto en la tapa como en el fondo. Esto hace que la pieza ubicada en el fondo tenga riesgo de colapso si el espesor no es suficiente.

La configuración en la que las tapas reciben la carga en su lado cóncavo resulta más eficiente para resistir presión, pero implica mayor complejidad en el montaje del tanque.

Las figuras 1.1.3 y 1.1.4 muestran las alternativas con mayor claridad.

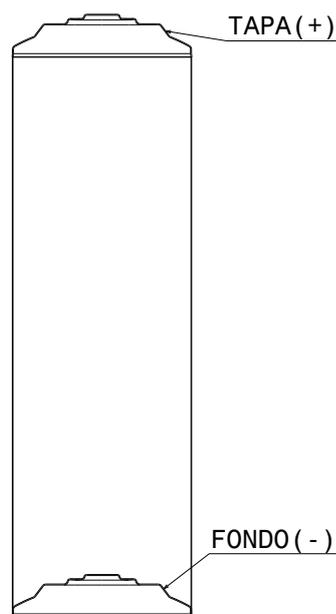


Figura 1.1.3: Configuración de los tanques que se fabrican en la actualidad

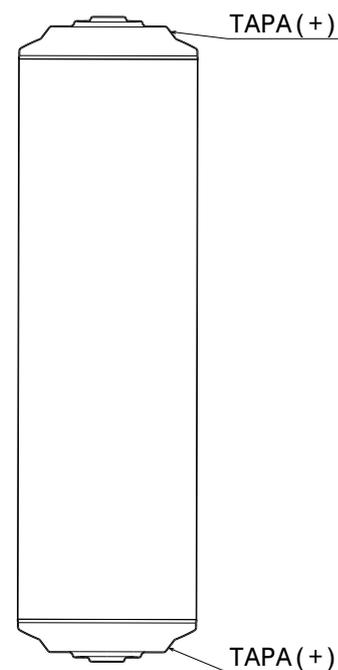


Figura 1.1.4: Configuración propuesta

1.2. Normativa vigente

Los termotanques que se comercializan deben cumplir con las normas que regulan sus especificaciones. Se pone foco sobre aquellos puntos que refieren a las presiones admisibles en los tanques.

1.2.1. Norma para termotanques a gas

Todos los diseños de este trabajo deben cumplir con la norma que reglamenta los termotanques en la argentina, la NAG 314[1]. De esta norma, se toma como referencia de diseño el inciso 7.2.3, que especifica las condiciones que deben cumplirse en los ensayos hidráulicos.

La norma exige que, en la prueba hidráulica:

- Los desplazamientos permanentes longitudinales del tanque δ_L cumplan $\delta_L \leq 0,005 \cdot \bar{D} = 2,58mm$, en donde \bar{D} es el diámetro medio del tanque
- Las deformaciones permanentes transversales del tanque δ_r cumplan $\delta_r \leq 0,002 \cdot \pi \cdot \bar{D} = 2,05mm$

La presión de de la prueba no debe ser menor a 9bar, que corresponde a una presión de trabajo de 4,5bar.

1.2.2. Norma para termotanques eléctricos

Las normas para termotanques eléctricos están orientadas a proteger al usuario del riesgo eléctrico. De esta manera, no se mencionan las condiciones del ensayo hidráulico.

Se considera entonces que, si no se alcanza la falla de la tapa, es condición suficiente.

1.3. Propuesta de mejora

Con el propósito de aumentar la productividad, y teniendo en cuenta los diseños que hoy existen, se propone mantener las chimeneas y cámaras de combustión y concentrar los esfuerzos en un adecuado diseño de la envuelta y las tapas de los tanques.

El diseño se basa en el concepto de la estandarización y busca reemplazar todas las tapas que hoy se utilizan por una pieza embutida única que se adapte a las necesidades particulares mediante operaciones posteriores de corte.

De esta manera, se reduce la cantidad de matrices necesarias y, con un método de corte con control numérico, se puede seleccionar la versión de la pieza a fabricar sin necesidad de producir stocks intermedios o hacer cambios de matrices.

2. Objetivos

Diseñar una pieza única que reemplace las tapas y fondos existentes para reducir la gama de piezas a fabricar y simplificar la producción.

El modelo nuevo debe cumplir con lo siguiente:

- Debe poder fabricarse mediante una operación única de conformado en frío, con un refilado y corte posterior
- Puede funcionar como tapa ciega para tanques eléctricos y tanques de condensación (gas)
- Con el proceso de corte, puede albergar una cámara de combustión de 6in o una chimenea de 3in
 - La soldadura de las cámaras o chimeneas debe hacerse a solape, con un cuello tangente a estas piezas

Es deseable, aunque no necesario, que estos diámetros puedan ser arbitrarios en un rango de 3in a 6in
- Debe tener regiones planas en las que puedan cortarse agujeros para las conexiones de agua, ánodos de sacrificio y/o resistencias eléctricas
- Diámetro externo determinado
- Deben poder superar un ensayo hidráulico de acuerdo a la norma[1]
 - Esto debe hacerse con el menor espesor de chapa posible.
- Todos los espesores de chapa deben conformarse en la misma matriz y prensa, que no debe requerir la capacidad de regular el recorrido.
- Las piezas deben poder fabricarse en un tiempo compatible con la velocidad de línea.

3. Método

Se utiliza un método de diseño mediante el cual se integran, desde la concepción de la pieza, el material, las especificaciones y el proceso de manufactura. De esta manera, se pueden alcanzar relaciones de compromiso entre las prestaciones de la pieza, su costo y la complejidad de su fabricación, de una manera eficiente.

Para esto, se separa el proyecto en etapas. En las primeras, se busca conocer en detalle el material y el proceso de manufactura principal, es decir, el conformado en frío.

En estas etapas, se ensaya el material que se utiliza y se desarrollan los modelos de simulación por elementos finitos necesarios para poder evaluar el diseño de forma completa. Los modelos se simulan utilizando el software comercial ADINA[2].

Probar estos modelos sobre piezas conocidas, y obtener resultados comparables con la realidad, permite utilizarlos sobre los nuevos diseños con mayor seguridad.

Luego se procede a las etapas que son, estrictamente, el diseño de la nueva pieza. Se verifica a cada paso, utilizando los modelos antes mencionados, que las especificaciones se cumplan. A su vez, se analiza la posibilidad de fabricar la pieza y, de modo más general, lo que implica este diseño desde una perspectiva económica.

El proyecto se divide en las siguientes partes:

1. Desarrollo de un modelo del material utilizado
 - 1.1. Se realiza un ensayo de tracción deformación de nueve probetas para obtener la tensión de fluencia y la curva de tensión-deformación del material utilizado en el estampado.
 - 1.2. Se simula un ensayo de tracción con una probeta igual a la ensayada físicamente. Con esto se determinan los parámetros del material a utilizar en las simulaciones posteriores.
 - 1.3. Se realiza un ensayo de embutido tipo Erichsen para obtener la deformación máxima de falla del material y la carga necesaria.
 - 1.4. Se simula el ensayo Erichsen para obtener información acerca de los límites de conformado del material.
 - 1.5. Se define un criterio de falla para el material en régimen plástico. Si se supera el valor de falla, se considera que el estampado no es seguro.
2. Evaluación de la pieza existente (AD-4838) y su fabricación:
 - 2.1. Modelado del estampado:
 - 2.1.1. Se reconstruye la matriz a partir de la geometría final de la pieza
 - 2.1.2. Se simula el proceso de estampado y se analizan los resultados
3. Diseño de una nueva pieza
 - 3.1. Se propone un diseño tentativo que cumple las restricciones geométricas
 - 3.2. Se simulan las pruebas hidráulicas
 - 3.3. Se modifica el diseño para poder cumplir la presión de ensayo
 - 3.4. Se simula el proceso de conformado en frío

- 3.5. Se modifican las matrices para que el conformado no provoque la falla del material
- 3.6. Análisis tentativo del proceso de fabricación de la nueva pieza
 - 3.6.1. Proceso de estampado
 - 3.6.2. Proceso de corte para conexiones
 - 3.6.3. Tiempos aproximados de corte

4. Consideraciones sobre las simulaciones

En este trabajo, la herramienta principal de cálculo es la simulación por el método de elementos finitos.

En esta sección se trata con las hipótesis que se toman, así como detalles sobre las estrategias de cálculo y modelado que deben utilizarse para obtener resultados que representen la realidad.

4.1. Condiciones de carga

En este análisis se trata, principalmente, con dos tipos de cargas:

1. Cargas de presión estática

- Es el caso de las pruebas hidráulicas, que es la primera verificación que se hace sobre cada diseño

La carga es de tipo *tracker*, es decir, cambia su dirección con la deformación de la pieza para mantenerse normal a su superficie

2. Solicitaciones que surgen del contacto

- Es el caso de las pruebas de conformado

4.2. Hipótesis

En todas las simulaciones se consideran las siguientes hipótesis:

- Material isótropo y homogéneo
- Formulación de grandes desplazamientos
- Formulación de grandes deformaciones
 - Material con descripción multi-lineal en la región plástica
 - Endurecimiento isótropo
- Contacto *node-to-segment* en las simulaciones de estampado y ensayo Erichsen
- Se desprecian los efectos dinámicos

Se hace referencia a la variable tiempo t . Esta debe ser interpretada como un recurso que permite aplicar cargas de manera progresiva, pero sin significado físico. En un análisis dinámico, en cambio, la velocidad de aplicación de las cargas afecta los resultados.

4.3. Resolución de ecuaciones no lineales

El método de elementos finitos permite calcular, de manera discreta, el campo de desplazamientos de una estructura \mathbf{U} , dada una matriz de rigidez \mathbf{K} y un vector de cargas aplicadas \mathbf{R} . En las situaciones que se modelan en este estudio es necesario recurrir a la forma general de los elementos finitos, que es no lineal.

Esto implica que

- La matriz \mathbf{K} es función de los desplazamientos
- Las cargas aplicadas pueden variar con el tiempo y con los desplazamientos
- Las condiciones de borde pueden cambiar con el tiempo, esto se da, en particular, en los casos de contacto

A continuación se hace una breve introducción a cuáles son las ecuaciones a resolver y los métodos utilizados para hacerlo. No debe perderse de vista que los resultados buscados son campo de desplazamientos y la deformación plástica del material.

Se toma como referencia el libro de Bathe[3].

4.3.1. Ecuaciones

Se construye sobre el principio de trabajos virtuales. Este indica que el trabajo de los esfuerzos internos en un cuerpo debe ser idéntico al trabajo externo, es decir, el de las fuerzas que actúan sobre él. En la ecuación 4.3.1 se muestra el equilibrio de los trabajos virtuales.

$$\int_V B^T \sigma dV = {}^t F = {}^t R \quad (4.3.1)$$

La matriz B , conocida como la matriz de deformación-desplazamientos es el resultado de la diferenciación y el reordenamiento de la matriz de polinomios interpoladores del campo de desplazamientos, N .

Se parte de que para todo tiempo t debe cumplirse el equilibrio entre las cargas externas aplicadas sobre la estructura ${}^t \mathbf{R}$ y los esfuerzos internos ${}^t \mathbf{F}$. En el tiempo t se conocen todos los valores de desplazamientos y cargas externas. La ecuación 4.3.2 expresa este equilibrio en forma vectorial.

$${}^t \mathbf{R} - {}^t \mathbf{F} = 0 \quad (4.3.2)$$

Como se conocen estos vectores en el tiempo t , se busca resolver para el caso $t + \Delta t$.

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F} = 0 \quad (4.3.3)$$

Dado que se conoce el vector ${}^t \mathbf{F}$ se toma

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{F} = {}^t \mathbf{F} + \mathbf{F} \quad (4.3.4)$$

En donde \mathbf{F} representa el incremento en los esfuerzos nodales debido al incremento en los desplazamientos \mathbf{U} .

Puede aproximarse el valor de \mathbf{F} en función de \mathbf{U} como

$$\mathbf{F} \simeq {}^t \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (4.3.5)$$

En donde ${}^t \mathbf{K}$ es la matriz tangente. Su definición se muestra en la ecuación 4.3.6.

$${}^t \mathbf{K} = \frac{\partial {}^t \mathbf{F}}{\partial {}^t \mathbf{U}} \quad (4.3.6)$$

Al reemplazar 4.3.5 y 4.3.4 en 4.3.3 se obtiene la ecuación 4.3.7.

$${}^t \mathbf{K} \mathbf{U} \simeq {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^t \mathbf{F} \quad (4.3.7)$$

Para resolver estas ecuaciones se utilizan métodos iterativos. El superíndice a derecha, entre paréntesis, indica el número de iteración. Se toma también $i = 1, 2, 3, \dots$

4.3.2. Método de Newton-Raphson

Se desarrolla este método con cierto grado de detalle, dado que es el utilizado con mayor frecuencia.

Se considera, por el momento, que las cargas externas son independientes de los desplazamientos. Esto no vale, por ejemplo, para el caso de los ensayos hidráulicos. Sin embargo, esta hipótesis permite un desarrollo claro del método.

Se toma una función $f(U^*)$, donde U^* es la solución de equilibrio, tal que

$$f(U^*) = 0 \quad (4.3.8)$$

$$f(U^*) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}(U^*) \quad (4.3.9)$$

Supongamos que se conoce el vector de desplazamientos del tiempo $t + \Delta t$ en la iteración $(i - 1)$ que llamamos ${}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^{(i-1)}$. Recordando que las cargas son independientes de los desplazamientos, puede desarrollarse un polinomio de Taylor de primer orden:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \right] \Bigg|_{t+\Delta t \mathbf{U}^{(i-1)}} (\mathbf{U}^* - {}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^{(i-1)}) = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i-1)} \quad (4.3.10)$$

Por lo visto en 4.3.6, se tiene

$${}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i-1)} = \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \right] \Bigg|_{t+\Delta t \mathbf{U}^{(i-1)}} \quad (4.3.11)$$

Se tiene entonces un vector de cargas desequilibradas $\Delta \mathbf{R}^{(i-1)}$ y uno de incrementos en los desplazamientos $\Delta \mathbf{U}^{(i)}$ tales que

$$\Delta \mathbf{R}^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i-1)} \quad (4.3.12)$$

$$\Delta \mathbf{U}^{(i)} = (\mathbf{U}^* - {}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^{(i-1)}) \quad (4.3.13)$$

y, a su vez,

$$\Delta \mathbf{R}^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(i-1)} \Delta \mathbf{U}^{(i)} \quad (4.3.14)$$

Se obtienen, finalmente, los desplazamientos de la forma

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}^{(i)} \quad (4.3.15)$$

La ecuación 4.3.2 indica las condiciones iniciales del método iterativo para cada paso de tiempo Δt .

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(0)} = {}^t\mathbf{U}; \quad {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(0)} = {}^t\mathbf{F}; \quad {}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{(0)} = {}^t\mathbf{K} \quad (4.3.16)$$

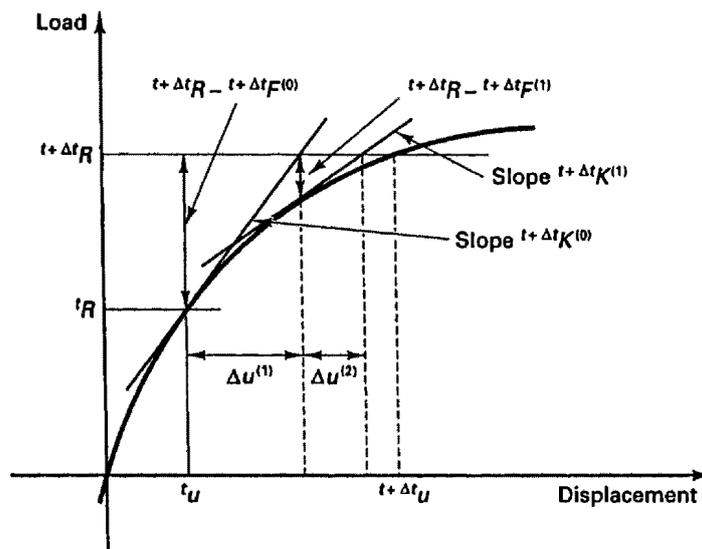


Figura 4.3.1: Método iterativo full Newton-Raphson para un único grado de libertad. Tomada del libro de Bathe[3]

Se completa el proceso iterativo cuando se alcanza un valor suficientemente bajo de $\Delta\mathbf{R}^{(i-1)}$ o $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$. Esta condición se define mediante las tolerancias. Estos son parámetros sobre los que se trabaja, dado que tolerancias muy permisivas pueden llevar a resultados incorrectos y, si son muy estrechas, la convergencia se hace dificultosa y lenta.

La figura 4.3.1 muestra, de manera gráfica, este proceso para un único grado de libertad. En la práctica, la curva es más compleja y menos suave.

Existen casos en los que la curva es tal que existen variaciones del signo de la derivada $\left[\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{U}}\right]$. Esto dificulta la convergencia del método. Para estas situaciones, se puede aplicar el método de *LDC*, que se describe a continuación.

4.3.3. Método de Load-Displacement-Constraints (LDC)

Existen casos en los que cargas decrecientes producen desplazamientos crecientes. En la práctica, esto ocurre en los momentos en que las estructuras pandean o colapsan.

El método de Newton-Raphson, antes esta situación, no converge a la curva de equilibrio, sino que alcanza un punto de la curva en la que la relación entre cargas y desplazamientos vuelve a ser positiva.

Los casos de colapso resultan importantes en este estudio, dado que es uno de los posibles modos de falla de las tapas de los tanques.

La figura 4.3.2 muestra una curva para un grado de libertad en el que ocurre el colapso estructural. El punto A corresponde, físicamente, al momento en el que ocurre el colapso y la estructura se vuelve inestable. En este punto la matriz de rigidez es singular, es decir, la matriz tangente que utiliza el método de Newton-Raphson resulta nula. La solución que se alcanza, si la solución converge, es la del punto B. Esto resulta en una curva que no representa la realidad, que se indica en línea punteada.

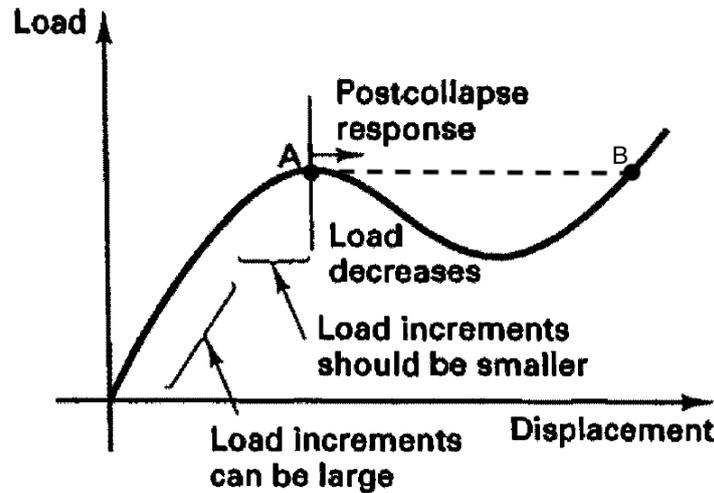


Figura 4.3.2: Esquema del comportamiento de una estructura ante el colapso. Tomada de Bathe[3]

Se utiliza entonces el método de *Load-Displacement-Constraint*. Este consiste en aplicar las cargas sobre la estructura mediante un multiplicador escalar λ que ajusta las cargas de referencia \mathbf{R} de forma proporcional. Este multiplicador puede aumentar o disminuir respecto al paso temporal anterior. El vector \mathbf{R} es constante en el tiempo. El equilibrio se muestra en la ecuación 4.3.17.

$${}^{t+\Delta t}\lambda \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = 0 \tag{4.3.17}$$

Las incógnitas de este método son el vector de desplazamientos incrementales $\mathbf{U}^{(i)}$ y el incremento del multiplicador $\lambda^{(i)}$, que puede ser positivo o negativo. En las ecuaciones 4.3.18, 4.3.19 y 4.3.20 se definen estas variables. Nótese entonces que, para cada paso, se tienen $n + 1$ incógnitas, que resuelven los desplazamientos de n grados de libertad.

$$\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i)} - {}^t\mathbf{U} \tag{4.3.18}$$

$$\lambda^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda^{(i)} - {}^t\lambda \tag{4.3.19}$$

$$\Delta\lambda^{(i)} = \lambda^{(i)} - \lambda^{(i-1)} \tag{4.3.20}$$

Se toma la matriz ${}^\tau\mathbf{K}$, que es similar a la matriz ${}^t\mathbf{K}$, descrita anteriormente. El superíndice τ indica que se trata de la matriz tangente de un paso de tiempo convergido anterior, que no necesariamente es t .

Se tiene entonces que

$$\tau \mathbf{K} \Delta \mathbf{U}^{(i)} = ({}^{t+\Delta t} \lambda^{(i-1)} + \Delta \lambda^{(i)}) \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i-1)} \quad (4.3.21)$$

Como se menciona antes, se tiene una incógnita más que en el método de Newton-Raphson. Debe agregarse entonces una ecuación que relacione el multiplicador de cargas con los desplazamientos.

Como caso particular, se tiene el método de longitud de arco esférico (spherical constant arc length), en el que se define la longitud de arco Δl , como se muestra en la ecuación 4.3.22. Se utiliza el parámetro β para que todos los términos sean adimensionales.

$$(\lambda^{(i)})^2 + \frac{\mathbf{U}^{(i)T} \mathbf{U}^{(i)}}{\beta} = (\Delta l)^2 \quad (4.3.22)$$

Se varían simultáneamente Δl y \mathbf{U} hasta alcanzar el equilibrio en cada paso de tiempo. Geométricamente puede pensarse que, desde un punto conocido, se presupone que la solución de equilibrio del paso temporal siguiente se encuentra dentro de una esfera (o círculo, en el caso sencillo de un grado de libertad) de radio Δl . Esto se muestra de forma esquemática en la figura 4.3.3.

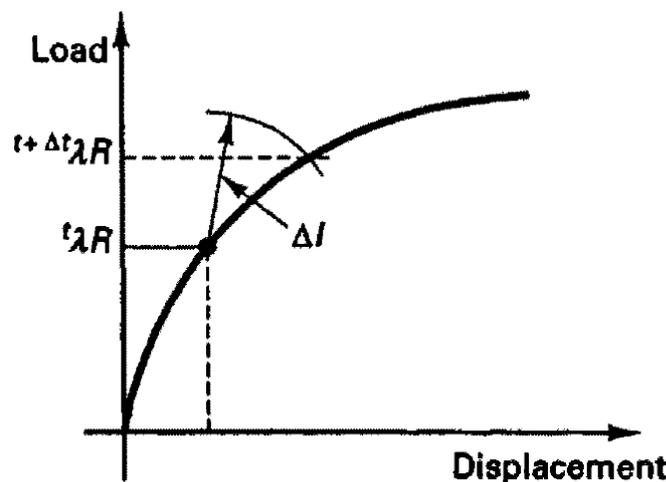


Figura 4.3.3: Interpretación geométrica del método LDC para un grado de libertad. Tomada del libro de Bathe[4]

Los algoritmos de elementos finitos controlan de manera automática los valores de Δl y del paso temporal, dado que la convergencia es muy sencilla en algunas regiones de la curva carga desplazamiento y muy compleja en la región de colapso de las estructuras.

Es importante destacar el hecho de que la carga se aplique de forma proporcional al vector de cargas de referencia. Esto implica que, en un caso de cargas combinadas en el que se produce el colapso, se conoce el multiplicador λ pero no se puede distinguir si la falla es provocada por alguna de las cargas en particular. Esto obliga a simular cada una de estas cargas o diferentes combinaciones de ellas para poder obtener información detallada con este método.

En el caso que se trata en este trabajo se tiene la ventaja de que, por ser cargas de presión hidrostática de un fluido, se cumple de forma natural que todas las cargas deben variar de forma proporcional.

4.4. Movimientos rígidos su fijación

Tanto en el proceso de estampado como en el ensayo Erichsen, las herramientas de conformado y la chapa pueden moverse libremente en la dirección normal a la superficie de la chapa. Cuando se habla de direcciones libres, quiere decir que puede moverse la pieza sin deformarla. A estos movimientos se los llama rígidos.

En la práctica, la chapa está apoyada sobre la matriz, pero no tiene fijación alguna. Las matrices está restringidas por los actuadores.

El método de elementos finitos no tiene la posibilidad de representar esta situación, dado que, al tener movimientos rígidos, la solución pierde unicidad. Físicamente, puede pensarse que una dirección libre produce un desplazamiento infinito, o indeterminado, con una fuerza infinitesimal.

Para evitar este problema, se sujeta a las piezas que tienen direcciones rígidas con elementos resorte en las direcciones en las que, en la práctica, se pueden mover libremente.

Estos resortes son, idealmente, de rigidez nula, por lo que se utiliza una rigidez baja. Los límites de esta rigidez, o constante del resorte, están dados por el mal condicionamiento numérico que pueden provocar en el modelo.

En las piezas deformables, las cargas generadas al desplazar los resortes deforman la estructura. Esta deformación no tiene significado físico alguno y puede afectar notoriamente los resultados, incluso al punto en que la solución diverge por la distorsión de la malla. Por este motivo, los resortes que están acoplados a estructuras deformables se ubican en puntos en los que se sabe que los desplazamientos son pequeños y se les asigna la rigidez más baja posible.

En la práctica, el valor de las rigideces se elige teniendo en cuenta lo explicado antes y en función de los resultados que producen. Se parte de un valor de $1 \frac{N}{mm}$ y se ajusta para cada simulación.

5. Propiedades del material

Para poder desarrollar un modelo que represente la realidad, es fundamental conocer en detalle el material con que se está trabajando. Estrictamente, se trata de acero 1010 de grado comercial. Esto implica una elevada variabilidad en las propiedades del material.

El modelo de material puede dividirse en dos grandes enfoques:

1. Compatibilidad entre el modelo y la realidad de la curva $\sigma - \varepsilon$
2. Definición de criterios de falla y sus valores admisibles.
 - A través de ensayos físicos y simulaciones de ellos, se obtiene la información necesaria para poder modelar el material, que se utiliza luego en las simulaciones de operación y conformado.
 - Se hacen, sobre muestras de chapa tomadas de planta, dos tipos de ensayo: de tracción y de embutido tipo Erichsen.
 - El ensayo de tracción se utiliza, principalmente, relevar la curva $\sigma - \varepsilon$. La simulación de este ensayo se ajusta hasta que las curvas son compatibles.
 - El ensayo Erichsen provee información acerca del estado del material en el momento de la falla cuando se someten las muestras a un proceso de embutido profundo.
 - Se aplican los criterios de falla a estos ensayos para obtener valores de referencia, que luego fijan los valores admisibles en un proceso industrial

5.1. Criterios de falla seleccionados

Se toman dos criterios de falla para este trabajo:

1. Criterio de deformación plástica acumulada máxima
2. Criterio de Goijaerts[5]

5.1.1. Deformación plástica acumulada

La deformación plástica acumulada, $\bar{\varepsilon}_p$, es el parámetro que normalmente se toma para evaluar procesos de conformado. La variable se define, en su forma analítica, en la expresión 5.1.1.

$$\bar{\varepsilon}_p = \int_0^{t_{final}} \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{p_{ij}} \cdot d\varepsilon_{p_{ij}}} \quad (5.1.1)$$

Como el método que se utiliza es discreto, se define el incremento de deformación plástica acumulada $\Delta\bar{\varepsilon}_p$ en función del incremento del tensor de tensiones plástico en cada paso de tiempo $\Delta\varepsilon^p$. Esto se muestra en la expresión 5.1.2.

$$\Delta\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta\varepsilon_p \cdot \Delta\varepsilon_p} \quad (5.1.2)$$

Se calcula, entonces, el valor de la deformación plástica acumulada, en su forma discreta (5.1.3). En este caso, n indica en número de paso de tiempo.

$$\bar{\varepsilon}_p = \sum_{n=1}^{n=n(t_{final})} (\Delta \bar{\varepsilon}_p)_n \quad (5.1.3)$$

5.1.2. Criterio de Goijaerts

Este criterio, adaptado del criterio de Oyane y presentado por A.M. Goijaerts et al.[5], contempla el efecto de la tensión y la deformación plástica. Fue verificado para ensayos de *blanking* y de tracción de chapa. El criterio toma como referencia el parámetro de daño C , que se calcula de la forma 5.1.4:

$$\int_{\varepsilon_y}^{\bar{\varepsilon}_{pf}} \left(1 + A_G \cdot \frac{\sigma_H}{\sigma_{VM}} \right) \cdot \bar{\varepsilon}_p^{B_G} d\bar{\varepsilon}_p = C \quad (5.1.4)$$

- Se toman los valores de $A_G = 3,9$ y $B_G = 0,63$ del estudio de Goijaerts[5]
- C es el parámetro de daño.

5.2. Ensayo de tracción

En el centro de materiales del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (CEMAT) se ensayan[6] en la máquina de tracción Instron 3382 nueve probetas de chapa cortadas a 0° , 45° y 90° de la dirección de laminación para evaluar la anisotropía del material. La figura 5.2.1 muestra las medidas de las probetas ensayadas y la figura 5.2.2 muestra una de las probetas rotas.

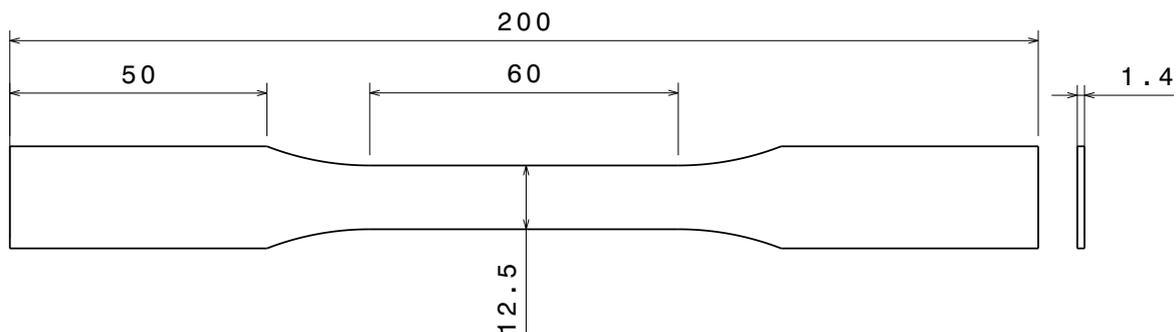


Figura 5.2.1: Medidas de las probetas ensayadas

5.2.1. Resultados

Se confeccionan, a partir de los datos obtenidos en los ensayos, las curvas *true stress-true strain* de las tres direcciones y se superponen para su correcto análisis. La figura 5.2.3 muestra que no hay variaciones apreciables con la dirección, por lo que se concluye que se trata de un material isótropo.



Figura 5.2.2: Probeta rota

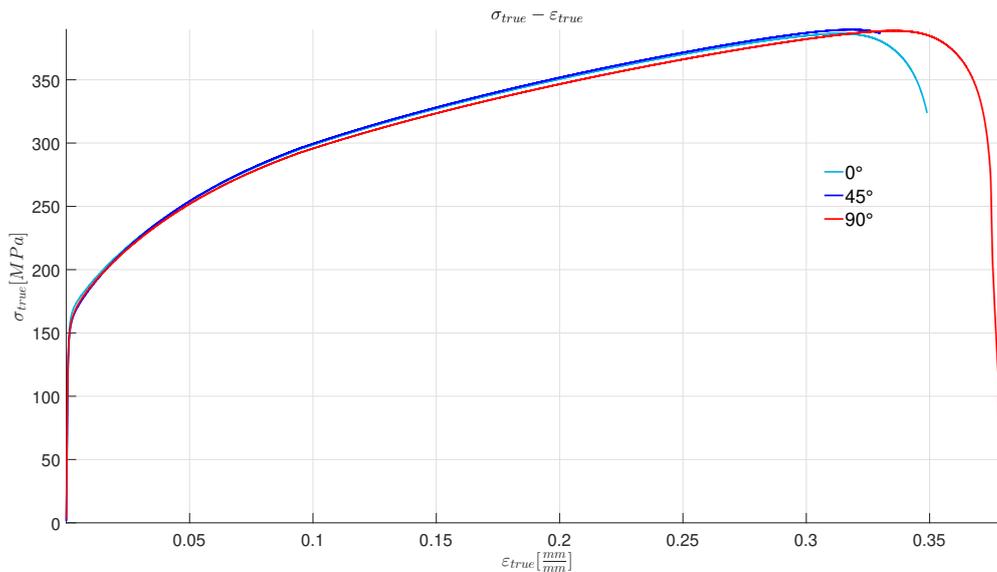


Figura 5.2.3: Curvas true stress-true strain de las probetas ensayadas

5.3. Simulación del ensayo de tracción

Se simula un ensayo de tracción de iguales características al que se ejecuta sobre las muestras de chapa. De esta manera, se calibra el material que luego se utiliza en las demás simulaciones.

5.3.1. Modelado

Para este material se tomaron las siguientes hipótesis:

- Material isótropo y homogéneo
- Descripción multilineal en la región plástica

Se toma un módulo de elasticidad $E = 207GPa$ y un coeficiente de Poisson $\nu = 0,33$. En la tabla 5.3.1 se muestran los puntos utilizados para describir el material. Estos valores corresponden a puntos de las curvas relevadas durante los ensayos, seleccionados para ajustar el material simulado al real. Los datos deben ser tratados como puntos de una curva $\sigma - \epsilon$ ingenieril.

$\varepsilon[\frac{mm}{mm}]$	$\sigma[MPa]$
0,0	0,0
$7,9 \cdot 10^{-4}$	164,0
0,03	230,0
0,1	275,0
0,25	293,0
0,36	295,1
0,4	290,0

Tabla 5.3.1: Puntos utilizados para describir el material

Una vez definido el material, se hace una malla de elementos H8 que representa la probeta. Se desplaza levemente un nodo central para condicionar el inicio de la estricción. Esto se muestra en la figura 5.3.1. Se restringe completamente un extremo y se impone un desplazamiento de 32mm sobre el otro, valor que surge de los ensayos reales como límite aproximado de rotura.

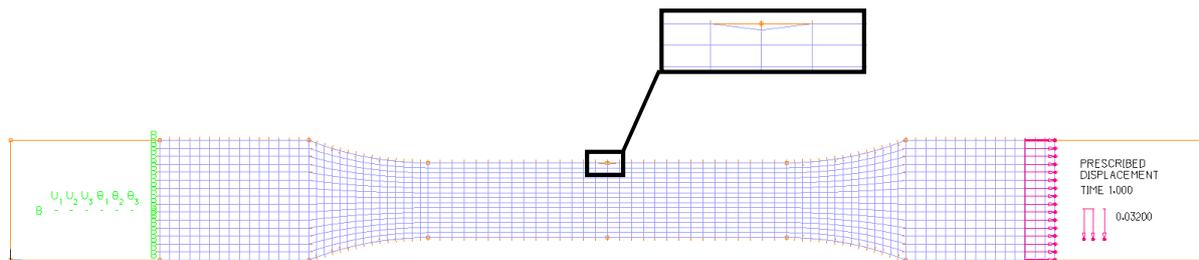


Figura 5.3.1: Mallado de la probeta simulada

5.3.2. Resultados

La figura 5.3.2 muestra la comparación entre las curvas $\sigma - \varepsilon$ ingenieriles obtenidas por ensayo y simulación.

Este resultado valida el modelo de material y fija una deformación media de rotura en tracción de aproximadamente $0,35 \frac{mm}{mm}$. A partir de este punto, las curvas dejan de coincidir. Esto se debe a que el mecanismo de rotura real, es decir, la separación de la probeta en dos piezas, no puede ser representado por el método de simulación. Se considera que el modelo es satisfactorio.

La figura 5.3.3 muestra la deformación plástica acumulada en la probeta cuando se alcanza la elongación de rotura. La figura 5.3.4 muestra el valor del parámetro C en la misma situación. Se obtiene un valor máximo de $C_{traccion} = 2,7353$.

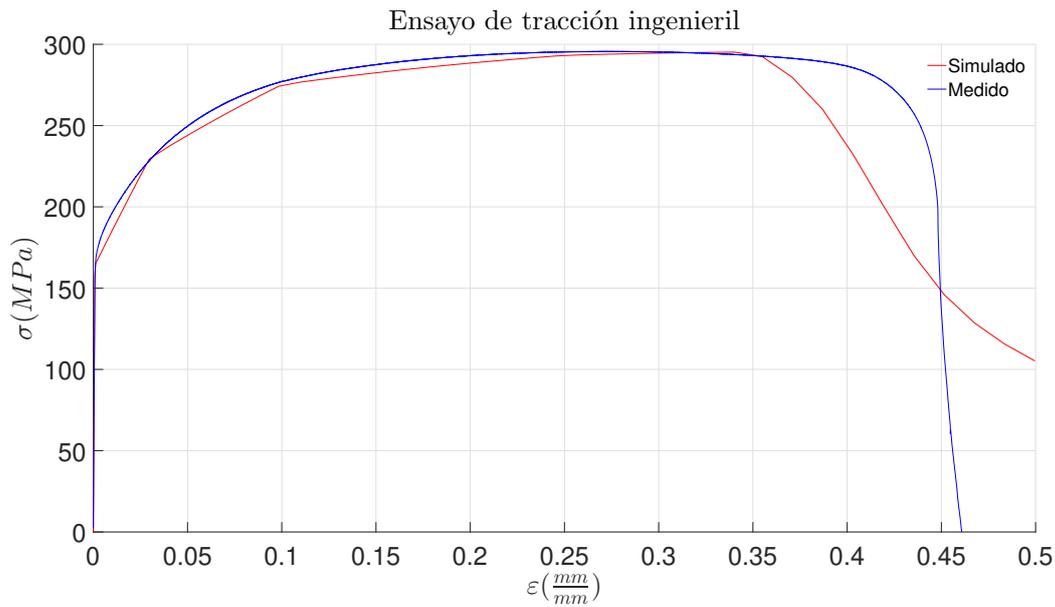


Figura 5.3.2: Comparación entre la curva ensayada y la simulada

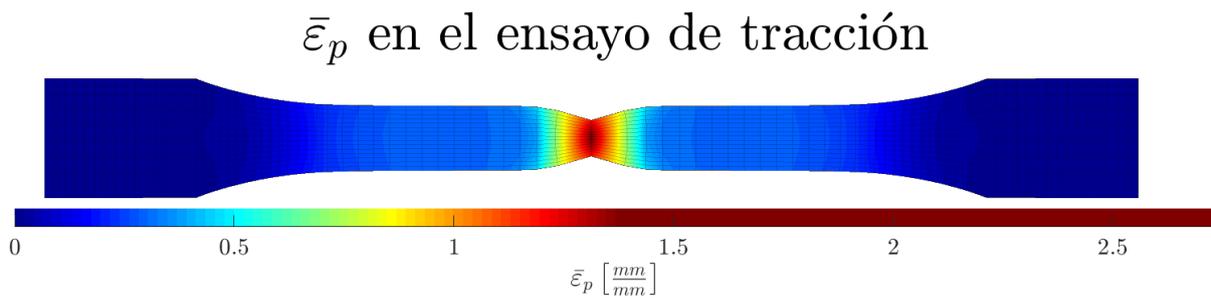


Figura 5.3.3: Deformación plástica acumulada en la probeta

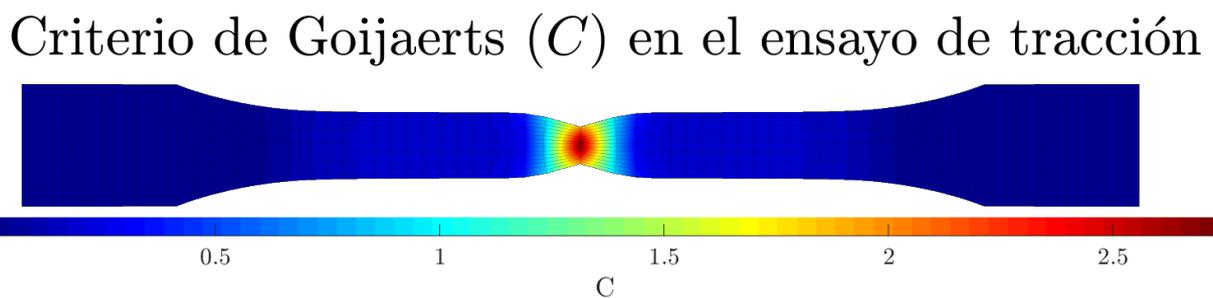


Figura 5.3.4: Criterio de Goijaerts en el de tracción

5.4. Ensayo de embutido tipo Erichsen

Para poder evaluar el límite de conformado del material, se hace un ensayo de embutido tipo Erichsen[7] sobre la misma chapa que se ensaya a tracción.

Se ensayan tres probetas circulares de 75mm de diámetro y 1,4mm de espesor. Estas son tomadas entre dos dados y luego embutidas por un punzón esférico. Se mide el desplazamiento del punzón y la fuerza que se ejerce para alcanzar la rotura de la probeta.

La figura 5.4.1 muestra un esquema del ensayo.

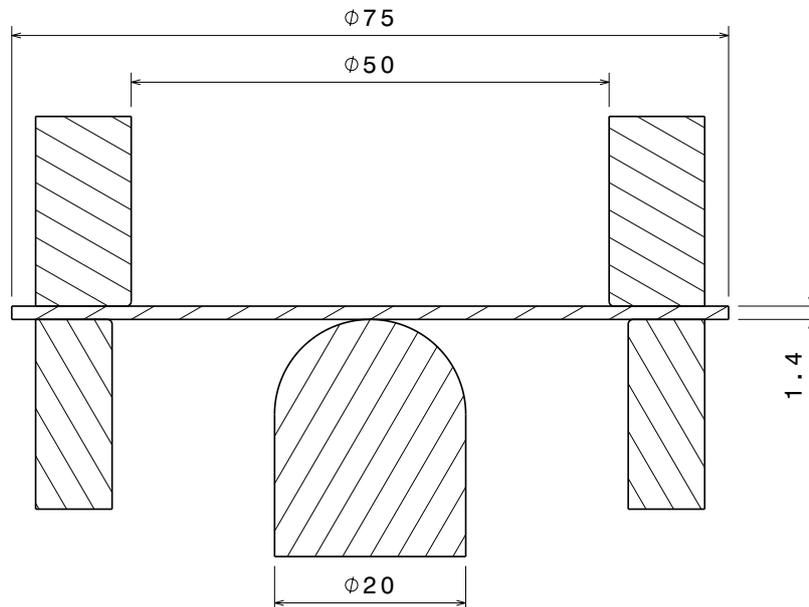


Figura 5.4.1: Esquema del herramental del ensayo Erichsen

5.4.1. Resultados

Se obtiene un valor promedio de desplazamiento (o flecha) de 16,433mm y una carga en el punzón promedio de 24,09kN.

5.5. Simulación del ensayo Erichsen

Utilizando el modelo del material, se busca obtener, mediante simulación, información sobre la deformación plástica acumulada por el material que produce la rotura en un proceso de embutido. Este valor, a causa de los efectos triaxiales, no es necesariamente igual a la deformación de rotura en un ensayo de tracción.

La figura 5.5.1 indica el mallado, las partes del herramental y los desplazamientos impuestos utilizados en la simulación.

- A es el punzón
- B es el prensachapa
- C es la contramatriz (fija)
- D es la muestra de chapa

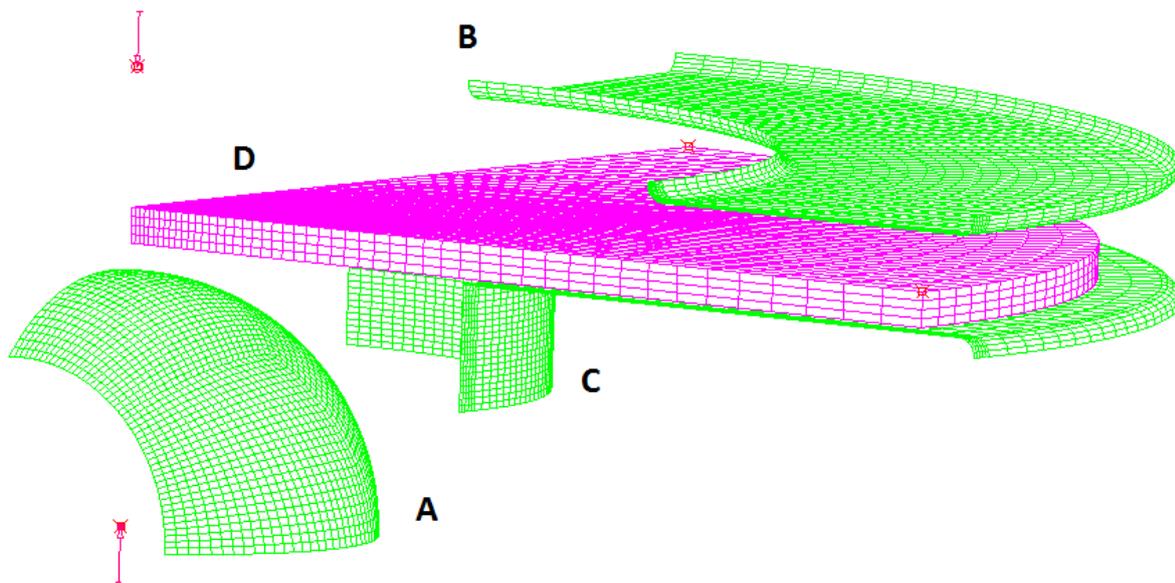


Figura 5.5.1: Ensayo Erichsen - Mallado y cargas

Se simula de la siguiente manera:

- Se malla el herramental con elementos cáscara de 4 nodos (verde)
 - se considera a estas piezas completamente rígidas
- Se malla la muestra de chapa con elementos H8 (rosa)
- Se cierra el prensa-chapa sobre la chapa
- Se impone la flecha promedio sobre el punzón para producir el embutido

Nótese que se toman dos planos de simetría, que producen un cuarto de la geometría. Esto se hace para disminuir la potencia de cálculo necesaria sin perder la posibilidad de evaluar eventuales pandeos o colapsos.

5.5.1. Resultados

Se obtiene una carga en el punzón de 17,23kN. Si bien este valor difiere del obtenido en los ensayos, se lo considera aceptable, dada la variabilidad de la materia prima.

El resultado que se busca obtener es la deformación plástica acumulada que produce la rotura. En la figura 5.5.2 se muestra la chapa deformada y la deformación plástica acumulada. La figura 5.5.3 muestra el valor de C al final del ensayo. La figura muestra que la deformación plástica máxima que produce la rotura es de $0,8433 \frac{mm}{mm}$. Se obtiene un valor máximo de $C_{Erichsen} = 1,5945$.

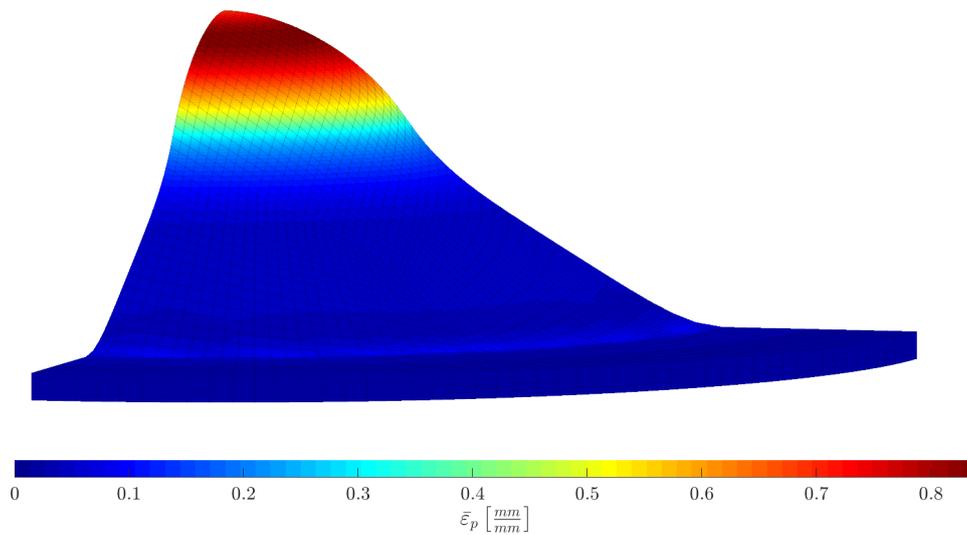
$\bar{\varepsilon}_p$ en el ensayo Erichsen

Figura 5.5.2: Ensayo Erichsen - Deformación plástica acumulada
Criterio de Goijaerts (C) en el ensayo Erichsen

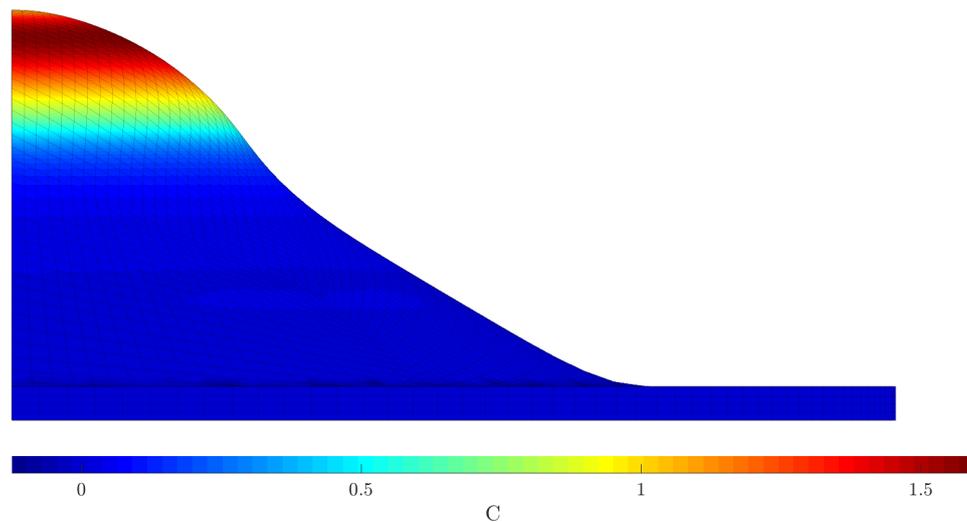


Figura 5.5.3: Criterio de Goijaerts en el ensayo Erichsen

5.6. Resumen

De los ensayos y sus simulaciones se obtiene un modelo del material que se considera suficiente para seguir con el análisis.

De los valores que se obtienen de cada criterio de falla en el ensayo Erichsen, y con la consideración de que estos corresponden a la rotura del material, se aceptan como admisibles para una aplicación industrial de conformado en frío:

- $\bar{\varepsilon}_p \leq 0,6 \frac{mm}{mm}$
- $C_{admisible} \leq 1,2$

Es importante notar que estos límites se fijan a partir del ensayo Erichsen únicamente, dado que el ensayo uniaxial no es comparable con el proceso que se busca analizar. Al estar estos valores límite definidos, y para dar mayor claridad a los gráficos, se utiliza en este trabajo una escala fija para cada parámetro. Para la deformación plástica, se representa el intervalo $[0; 0, 6]$. Para el criterio C, se toma el intervalo $[-1, 2; 1, 2]$. Los valores que se encuentran fuera de estos límites se indican con el color de fondo de escala.

6. Ensayos hidráulicos

Se simula un ensayo hidráulico sobre cada configuración y espesor de tapa para determinar la presión máxima a la que pueden ser sometidas las piezas en un ensayo hidráulico.

El cliente busca que sus productos puedan certificarse con una presión de ensayo determinada, a la que llamaremos P_{max} . Por este motivo, se evalúan las tapas a esta presión. Se ensayan también a 9 bar, dado que es la presión mínima que exige la norma para tanques de gas.

En esta etapa se diseñan también las envueltas para los tanques, dado que es fundamental minimizar los desplazamientos permanentes que estas puedan tener durante el ensayo.

6.1. Envueltas del recipiente

Se mantiene el diseño original de envuelta. Este consiste en una superficie cilíndrica del mismo acero con que se fabrican las tapas.

Se toma el espesor necesario para obtener un coeficiente de seguridad a la fluencia $F = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}} = 1$ durante los ensayos hidráulicos. Esto implica que se conoce el espesor mínimo de chapa para obtener deformaciones plásticas nulas durante el ensayo. El propósito de esto es dar margen a que la tapa pueda deformarse más.

La tensión de Von Mises σ_{VM} surge del estado de tensión de un recipiente cilíndrico de pared delgada sometido a presión interna.

Se tiene entonces que

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2}{2}} \quad (6.1.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot r}{e} \quad (6.1.2)$$

$$\sigma_z = \frac{P \cdot r}{2 \cdot e} \quad (6.1.3)$$

$$\sigma_r = P \quad (6.1.4)$$

En donde P es la presión interna, r es el radio medio y e es el espesor de chapa.

Como no hay deformación plástica, los desplazamientos en el material serán menores a los correspondientes a una deformación de 0,2%, es decir, pequeños. Se le da el mismo tratamiento a las chimeneas, en el caso de los tanques de gas. Se independiza así la deformación de la tapa de las que puedan sufrir la chimenea o envuelta, dado que el riesgo de incumplir la norma radica en el diseño de las tapas. Esto permite hacer los ensayos exclusivamente sobre ellas, considerando que la chimenea y envuelta son una condición de borde.

La hipótesis de que la chimenea y la envuelta son condiciones de borde se verifica mediante la comparación de ensayos hidráulicos: en un caso, se fija la tapa con condiciones de borde y, en el otro, se analiza la geometría completa del tanque. Las diferencias son menores al 1%, tanto en deformaciones como en desplazamientos.

6.2. Material

Las tapas y envueltas de los tanques son enlosados para evitar la corrosión. En el proceso en que se cuece el esmalte se mantienen temperaturas superiores a los 800 °C. Esto provoca una profunda relajación de tensiones. Por este motivo, para los ensayos hidráulicos se considera que pueden desprejarse las tensiones residuales que ocurren durante el proceso de estampado.

6.3. Modelado y condiciones de borde

Para simular los ensayos hidráulicos se toman las siguientes hipótesis:

Hipótesis

- Se parte de la geometría final deseada, no de la obtenida en una simulación de estampado.
- El material se encuentra sin tensiones residuales
- Las deformaciones longitudinales de la envuelta y chimenea son independientes de la tapa por lo visto en
 - La soldadura entre la envuelta o chimenea y la tapa se considera, para estos ensayos, una restricción total de los desplazamientos y giros.

Se hace un mallado con elementos cáscara lineales de cuatro nodos.

En el caso de la configuración tapa, se impone gradualmente la carga de presión y luego se descarga, tanto para identificar potenciales puntos de falla como para medir los desplazamientos, dado que es requisito cumplir con las exigencias de la norma.

Es necesario evaluar el caso de la configuración fondo o (-) mediante un análisis de colapso. Esto se hace utilizando el método de LDC que se explica en la sección 4.3.3.

7. Análisis del proceso de estampado actual

Para verificar el modelo, se toma como referencia una de las piezas que se fabrican en la actualidad, que se muestra esquemáticamente en la figura 7.0.1.

Esta pieza es seleccionada porque tiene una tasa de falla durante el conformado superior a las demás tapas de la línea. De esta manera, al analizarla, se obtiene información acerca de una pieza que se encuentra en el entorno de los límites aceptables de fabricación y se la toma como *benchmark*. Se considera que un diseño nuevo que presente menor riesgo de falla será aceptable para la línea de producción.

Esta tapa se fabrica a partir de un *blank* cuadrado mediante un proceso de conformado en frío.

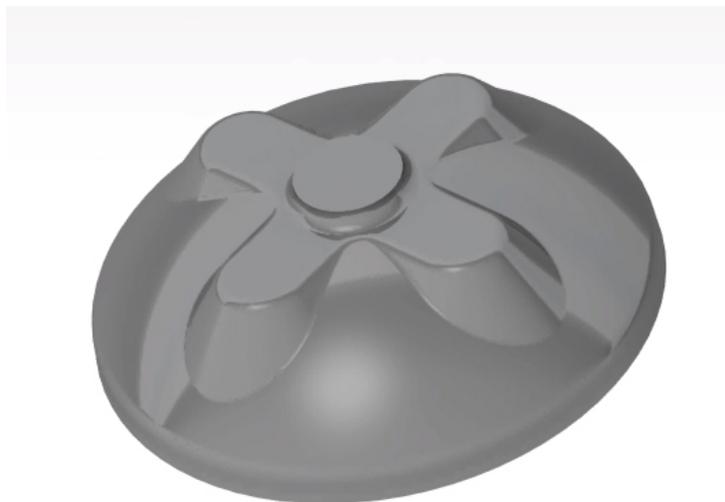


Figura 7.0.1: Representación de la pieza que se analiza

7.1. Matrices

Se toma la superficie exterior de la tapa y se le da el espesor deseado. En este caso, se toma una matriz para una chapa de 1,4mm.

Se diseña la matriz para el caso de huelgo nulo.

La figura 7.1.1 muestra la herramienta inferior de la matriz.

7.2. Simulación del estampado

Al igual que en la simulación del ensayo Erichsen, se mallan las herramientas con elementos cáscara de 4 nodos y la chapa con hexaedros de 8 nodos.

Las herramientas se consideran completamente rígidas.

La malla de la chapa es regular y muy fina. De esta manera se puede detectar el arrugado localizado de la chapa.

La figura 7.2.1 muestra la malla de las herramientas en verde y la de la chapa en rosa.

Se cierran las matrices mediante imposición de un desplazamiento sobre la matriz superior. La matriz se desplaza hasta alcanzar el huelgo nulo. La chapa tiene un espesor inicial de 1,4mm.

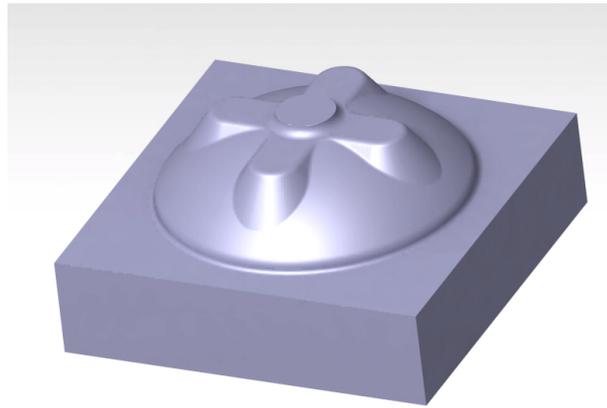


Figura 7.1.1: Representación de la herramienta inferior de la matriz de conformado

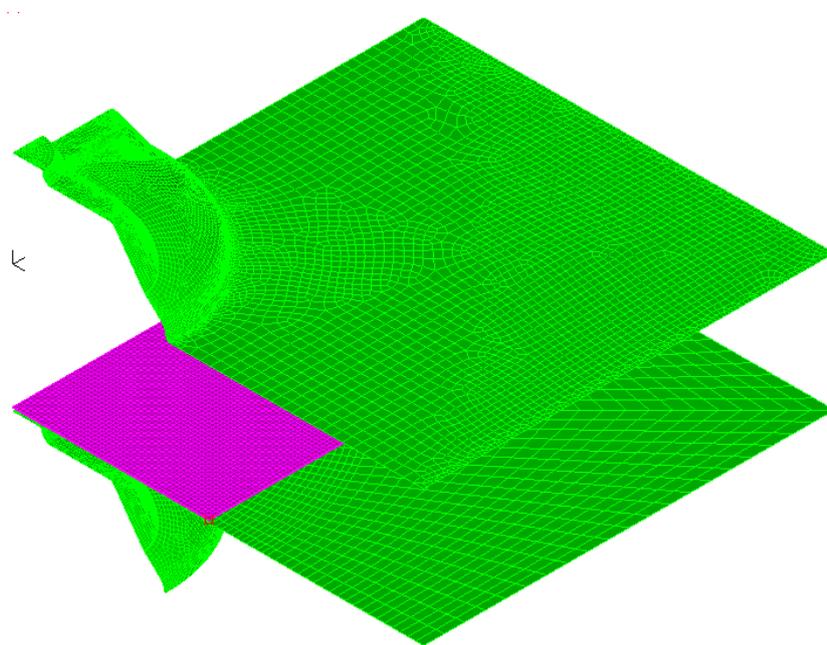


Figura 7.2.1: Mallado del conjunto de herramientas y blank

Se impone una fuerza sobre el prensa-chapa para que presione el *blank* contra la matriz superior. Esto evita deslizamientos de la chapa entre las matrices y controla arrugas. La fuerza que ejerce el prensa-chapa es la necesaria para controlar numéricamente el problema y no un valor informado por el cliente.

En el proceso de diseño de la nueva pieza se investiga la carga del prensa-chapa, dado que el resultado del conformado es sensible a esta variable. Es también importante este valor porque es una de las características que debe exigirse a la prensa en donde se vayan a fabricar las piezas.

Se toman las siguientes condiciones de borde:

- Se toma simetría en dos planos: se representa un cuarto de la geometría
- La matriz inferior se encuentra fija en todas las direcciones

- La herramienta superior se encuentra sujeta a un nodo mediante *rigid-links*. Este nodo, a su vez, se encuentra restringido en todas las direcciones, excepto la vertical.
 - Se restringe la dirección vertical del nodo con un elemento resorte
- El prensa-chapa se sujeta igual que la herramienta superior, a un nodo diferente.
- La dirección vertical de la chapa se restringe con un resorte ubicado en el punto que coincide con el centro de la pieza. Se elige este punto porque es el que tiene el menor desplazamiento.

7.2.1. Resultados

Mediante inspección visual de la deformada (figura 7.2.2), se observan arrugas localizadas alrededor de los refuerzos. Esto es compatible con lo que ocurre durante el proceso real. La posición o forma final de estas arrugas es sensible del método de cálculo, pero su presencia indica que ocurren pandeos localizados en la pieza durante su fabricación.

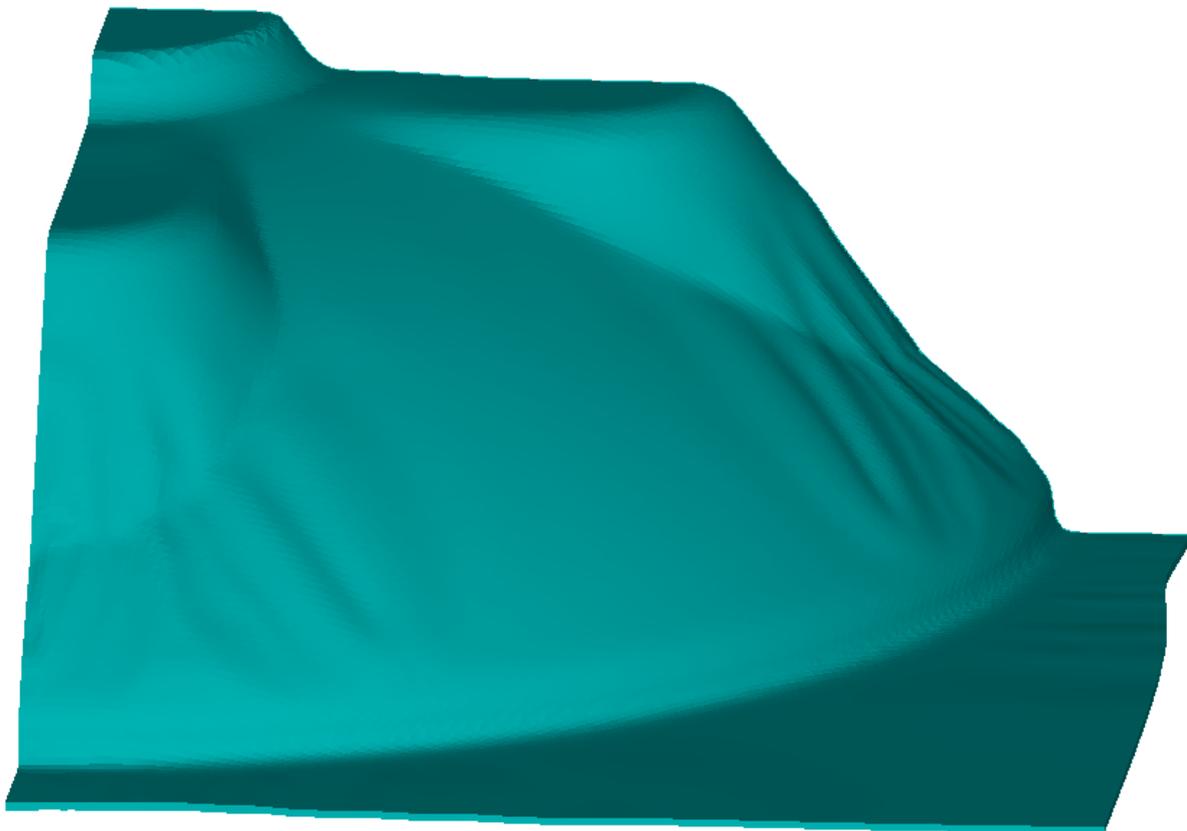


Figura 7.2.2: Deformada del estampado de AD-4838

La figura 7.2.3 muestra la deformación plástica acumulada en la pieza. Es notable que en el borde superior, donde se ubica la chimeneas, la deformación supera ampliamente la admisible. Este fenómeno está relacionado al método con que se construyeron las matrices utilizadas para simular. Estas se diseñaron a partir de un modelo de la pieza final, provisto

por el cliente. Como este tramo se corta para insertar la chimenea, no se considera esto un problema, salvo que se produzcan fisuras durante la fabricación. Esto último no ocurre.

De todas maneras, en otras zonas se excede el valor de $\bar{\varepsilon}_p = 0,6 \frac{mm}{mm}$, es decir que esta pieza, de acuerdo al criterio de deformación plástica acumulada, falla. Al calcular el parámetro de Goijaerts, que se muestra en la figura 7.2.4, los elementos de esta zona se descartan, dado que inducen a valores del criterio de falla que no son realistas.

En este proceso, se obtiene un criterio de Goijaerts máximo de $C = 1,227$.

$\bar{\varepsilon}_p$ en el estampado actual

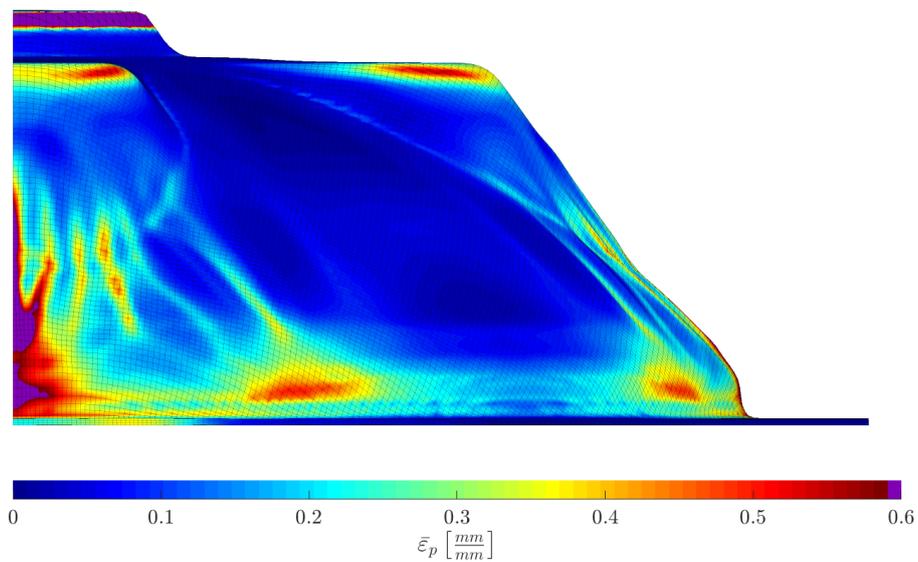


Figura 7.2.3: Deformación plástica acumulada del estampado de AD-4838

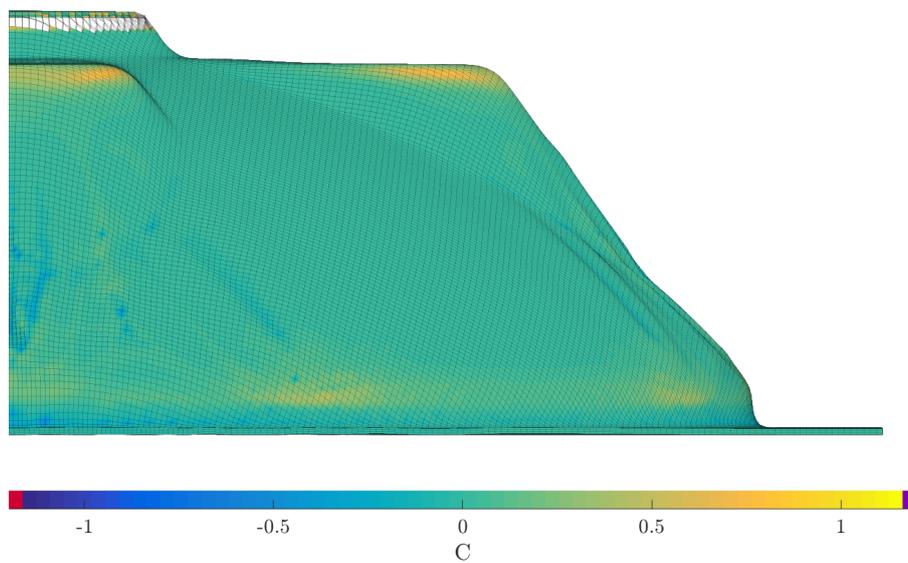
Criterio de Goijaerts (C) en el estampado actual

Figura 7.2.4: Parámetro de daño de Goijaerts del estampado de AD-4838

7.2.2. Conclusiones acerca del estampado actual

Se superan los límites admisibles, para un proceso industrial, de deformación plástica acumulada y del parámetro de daño C .

La producción de esta pieza presenta un riesgo de falla por arrugado o pandeo localizado de las piezas durante el conformado.

El modelo representa de forma adecuada la realidad del proceso.

8. Tapa E.O.S

Para diseñar la tapa E.O.S. (**E**levated **O**penings for **S**mokestack), se parte de una pieza actualmente en producción. A esta se le agrega la posibilidad de tomar una chimenea de 3in, dado que en su diseño ya contempla espacios planos para agujeros, una boca para una cámara de combustión de 6in y refuerzos para resistir la presión exigida. La figura 8.0.1 muestra una representación de la geometría propuesta.

Para todas las simulaciones de esta tapa se toma simetría en tres planos, es decir, se simula un octavo de la pieza. Esto simplifica el mallado y reduce los tiempos de cálculo.

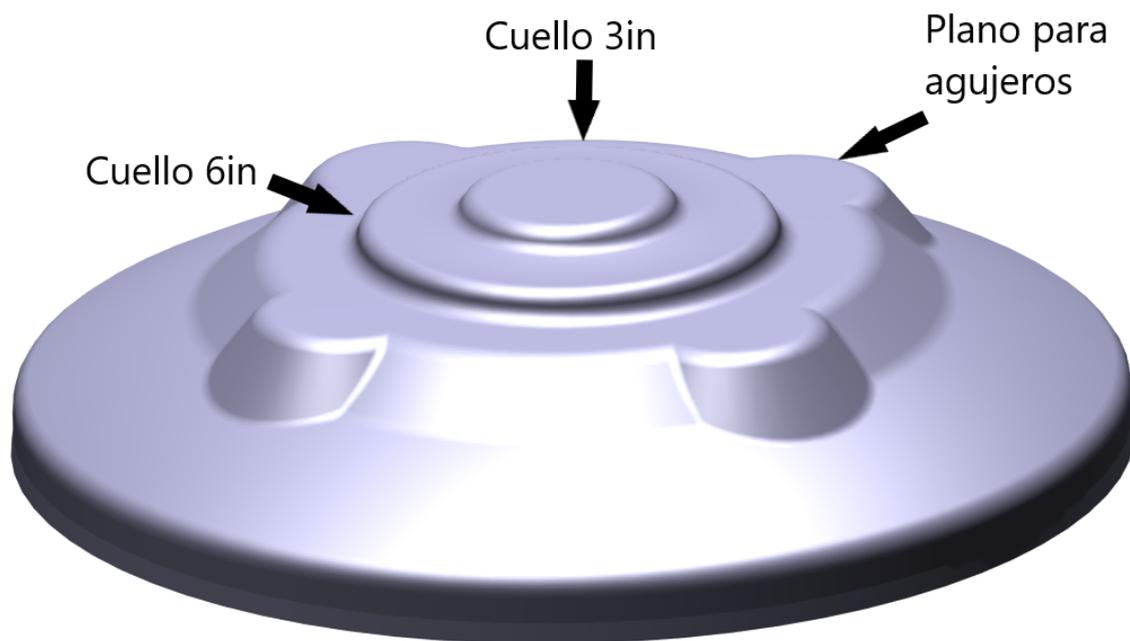


Figura 8.0.1: Representación de la nueva geometría para las tapas

8.1. Resultados de los ensayos hidráulicos

La tabla 8.1.1 contiene todas las configuraciones y espesores posibles de chapa y muestra cuáles cumplen con la norma ante ensayos a 9 y P_{max} .

En los espesores disponibles, ninguna tapa ciega supera el ensayo a P_{max} .

Las tapas en configuración tapa(+), con espesor de 3,2mm y con chimeneas de 3in o 6in superan el ensayo a P_{max} .

Las tapas ciegas, en cuanto a la norma de gas, sólo se utilizarán en caso de que se implementen los tanques de condensación. De esta manera, puede decirse que, de acuerdo a la línea actual, es suficiente con superar los ensayos con tapas que tengan chimeneas.

En cuanto a los tanques eléctricos, que admiten deformaciones permanentes, siempre que no haya filtraciones, es suficiente el espesor de 1,4mm. Esto se debe a que, a pesar de hay desplazamientos elevados, no se alcanza la falla.

Orientación	Espesor [mm]	Chimenea	NAG 314		Eléctrico
			9bar	P_{max}	P_{max}
Tapa (+)	1,4	Ciega	✘	✘	✓
		3in	✘	✘	✓
		6in	✘	✘	✓
	1,7	Ciega	✘	✘	✓
		3in	✘	✘	✓
		6in	✘	✘	✓
	2,3	Ciega	✘	✘	✓
		3in	✘	✘	✓
		6in	✓	✘	✓
	3,2	Ciega	✓	✘	✓
		3in	✓	✓	✓
		6in	✓	✓	✓

Tabla 8.1.1: Resultados del ensayo hidráulico para diferentes espesores

Todas las tapas en configuración fondo(-) sufren un colapso a presiones menores a las de trabajo.

8.2. Conformado en frío

Se considera que la etapa crítica de fabricación, en cuanto a su potencial de provocar fallas en el producto, es el conformado en frío que da forma a la pieza.

Se hacen, al igual que en la evaluación de la pieza que hoy existe, las simulaciones de estampado. Se toma el mismo material y se ensayan conformados de chapas de 1,4mm, 2,3mm y 3,2mm de espesor.

8.2.1. Presión del prensachapa

Uno de los parámetros fundamentales para un conformado exitoso es la presión del prensachapa. En el análisis de la pieza existente no se elabora sobre este factor porque no se cuenta con el dato de la carga real.

En esta etapa de diseño se hace un análisis de sensibilidad sobre la carga que debe ejercer el prensachapa para poder controlar el arrugado de la pieza durante el proceso. Se simula el conformado con cargas de prensachapa de 8kN, 40kN y 80kN.

Las figuras 8.2.1, 8.2.2 y 8.2.3 muestran el arrugado que ocurre en la chapa con cada una de estas cargas. Se puede ver que:

- 8kN: el arrugado es muy severo y avanza hacia la pieza final. Esta pieza, si se manufacturase, tendría que ser descartada
- 40kN: el arrugado es severo, pero queda confinado en el exterior de la pieza. Durante la fabricación, esta pieza tiene posibilidades de continuar en la línea si el proceso de refilado logra eliminar las arrugas

- 80kN: no ocurre el arrugado de la pieza y el conformado es exitoso.

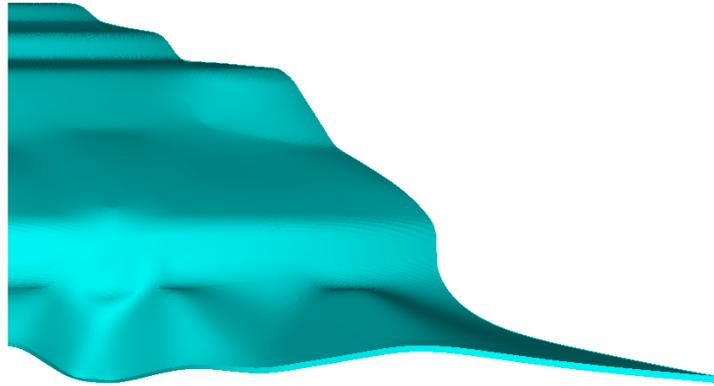


Figura 8.2.1: Conformado en frío con 8kN de carga de prensachapa

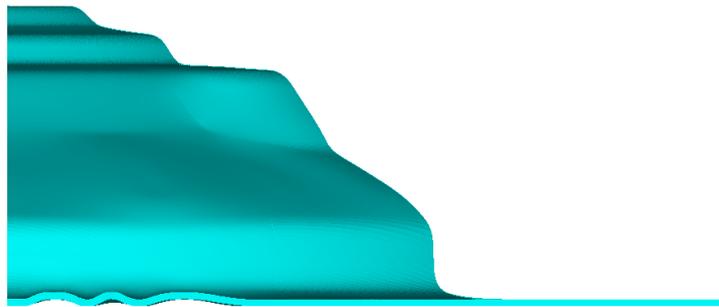


Figura 8.2.2: Conformado en frío con 40kN de carga en el prensachapa

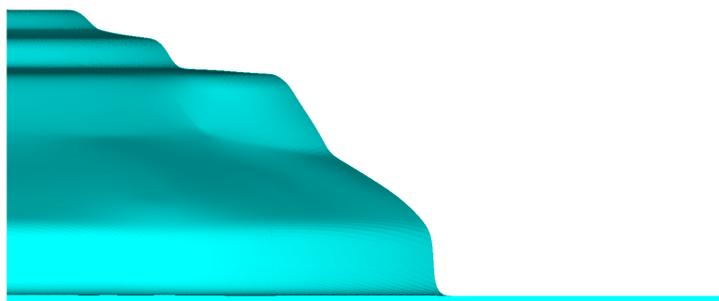


Figura 8.2.3: Conformado en frío con 80kN de carga en el prensachapa

8.2.2. Resultados del conformado - Espesor 1,4mm

En este espesor, el análisis se reduce a la inspección visual. El huelgo que surge de embutir chapa de 1,4mm en una matriz diseñada para un espesor de 2,3mm produce arrugas que no son aceptables en el producto. Esto se muestra en la figura 8.2.4.

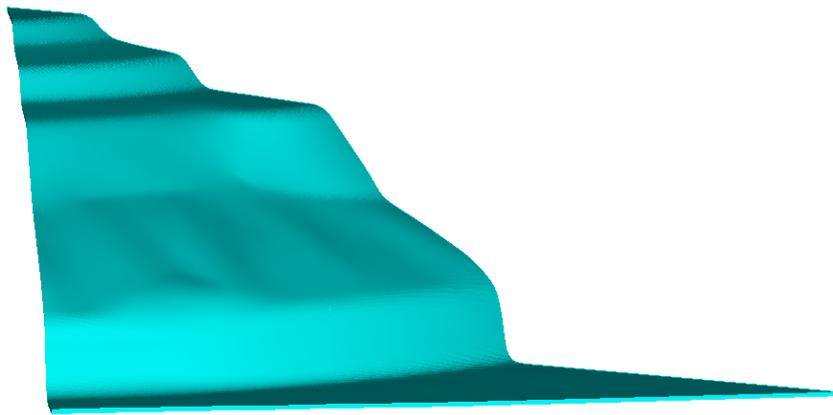


Figura 8.2.4: Deformada de la pieza estampada en chapa de 1,4mm

8.2.3. Resultados del conformado - Espesor 2,3mm

En la figura 8.2.5 se muestra la deformación plástica acumulada por la chapa durante el estampado.

En este proceso de estampado, se tiene un parámetro de daño de Goijaerts máximo de $C = 0,7833$. La distribución de este parámetro se muestra en la figura 8.2.6.

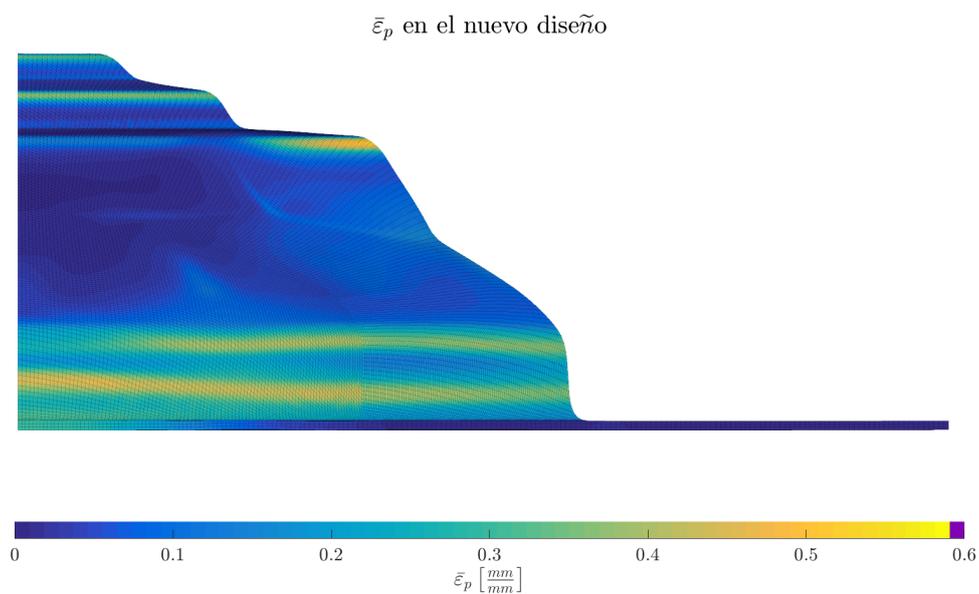


Figura 8.2.5: Deformación plástica acumulada en el diseño E.O.S - Espesor 2,3mm

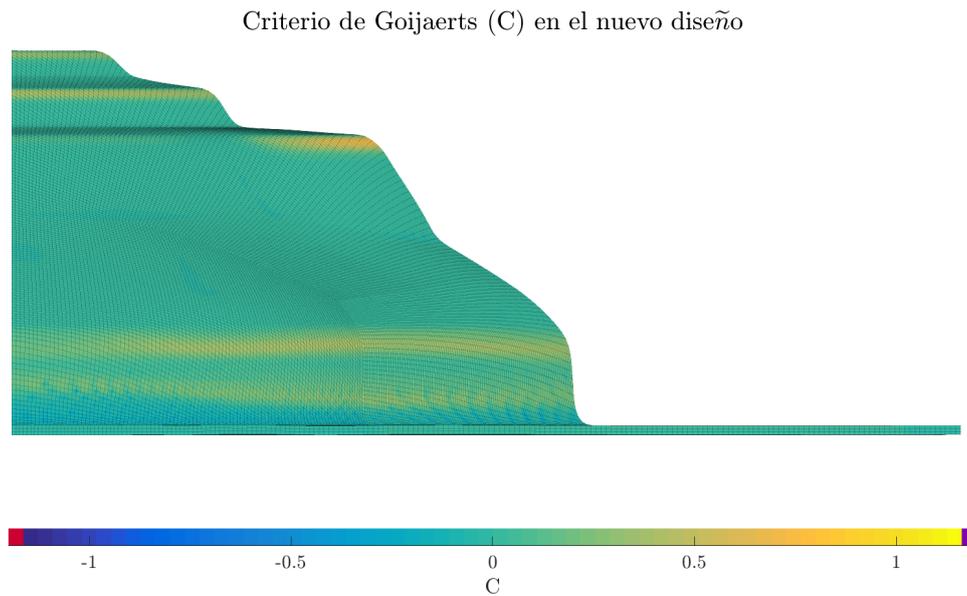


Figura 8.2.6: Criterio de Giojaerts en el diseño E.O.S - Espesor 2,3mm

8.2.4. Resultados del conformado - Espesor 3,2mm

En la figura 8.2.7 se muestra la deformación plástica acumulada por la chapa durante el estampado. Se superan los límites admisibles.

En este proceso de estampado, se tiene un parámetro de daño de Goijaerts máximo de $C = 1,7384$. Sin embargo, es en un punto localizado y aislado, y se considera error numérico, dado que todos los demás puntos se encuentran por debajo del valor admisible. De todas maneras, hay regiones de la pieza con valores muy cercanos al admisible. La distribución de este parámetro se muestra en la figura 8.2.8.

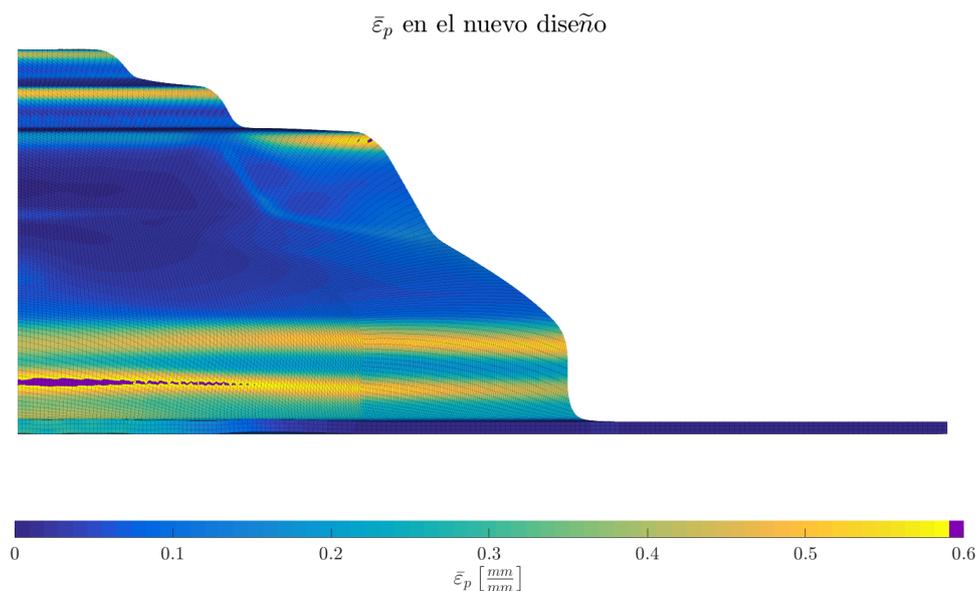


Figura 8.2.7: Deformación plástica acumulada del diseño E.O.S. - Espesor 3,2mm

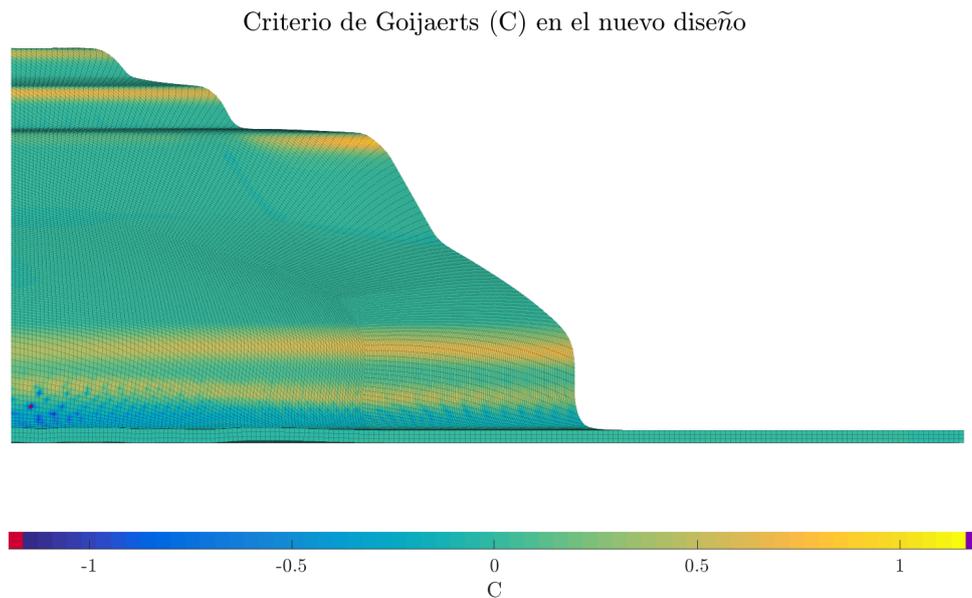


Figura 8.2.8: Criterio de Giojaerts en el diseño E.O.S - Espesor 3,2mm

8.3. Conclusiones sobre el diseño E.O.S

Cada espesor requiere de un análisis diferente:

8.3.1. Espesor 1,4mm

La pieza no puede ser fabricada en este espesor, utilizando esta matriz, porque el arrugado es muy severo.

8.3.2. Espesor 1,7mm

No tiene sentido fabricar esta pieza en este espesor, dado que no es suficiente para los tanques de gas y es excesivo para los eléctricos.

8.3.3. Espesor 2,3mm

La deformación plástica acumulada $\bar{\varepsilon}_p = 0,5587 \frac{mm}{mm}$ que se obtiene en este proceso es aceptable, si se compara con el límite impuesto en el ensayo Erichsen y con el estampado que se encuentra vigente. Sin embargo, es muy cercana al valor admisible.

El valor de $C = 0,7833$ indica, con este criterio, que la pieza no falla durante el conformado.

Deben tomarse las medidas necesarias para controlar la presión del prensachapa y así evitar piezas arrugadas.

La pieza es útil, únicamente, para utilizarse con chimeneas de 6in o en tanques eléctricos. En este último caso, el espesor es excesivo y, por lo tanto, económicamente inviable.

8.3.4. Espesor 3,2mm

La deformación plástica acumulada supera el valor admisible y el parámetro C es muy cercano a la falla. El espesor es muy elevado respecto a lo que se usa actualmente y, por lo tanto, resulta económicamente inviable.

8.3.5. Viabilidad del diseño

Este diseño no es recomendable, dado que, en el espesor necesario para superar las normas vigentes, la chapa corre un elevado riesgo de falla durante el conformado. El aumento del espesor de chapa, frente al espesor que hoy se utiliza, representa un gran impacto en los costos de producción. Por este motivo, no tiene sentido desarrollar un mejor diseño de matrices, con las que podría minimizarse la probabilidad de fallas durante el conformado.

9. Tapa S.T.Y.X.

Dado que la tapa E.O.S no es económicamente viable, se opta por evaluar una alternativa que resulte posible fabricar y de menor espesor de chapa. Se evalúa la tapa S.T.Y.X (Simplified **T**ori-spheroid with **Y**ielded **eX**it).

Para esto, se considera necesario flexibilizar uno de los requisitos originales: se admite que, en este diseño, se pueda conformar una primera geometría, cortar la pieza y luego ejecutar una segunda operación de conformado. Esto permite producir un cuello único, el necesario para soldar la chimenea que corresponda, y evita el escalonamiento central que es susceptible a desplazarse cuando aumenta la presión interna.

Se acepta también que no se usan tapas en configuración fondo(-).

La figura 9.0.1 muestra una representación de la pieza que se propone.

Se hacen sobre esta nueva propuesta las mismas evaluaciones a las que se somete al diseño E.O.S.

Se simula también el conformado del cuello, una vez que está hecho el corte necesario. Para esto, se parte de un modelo objetivo de la pieza una vez cortada. Esto es importante, ya que implica que se desprecian las deformaciones que se adquieren durante el conformado principal.

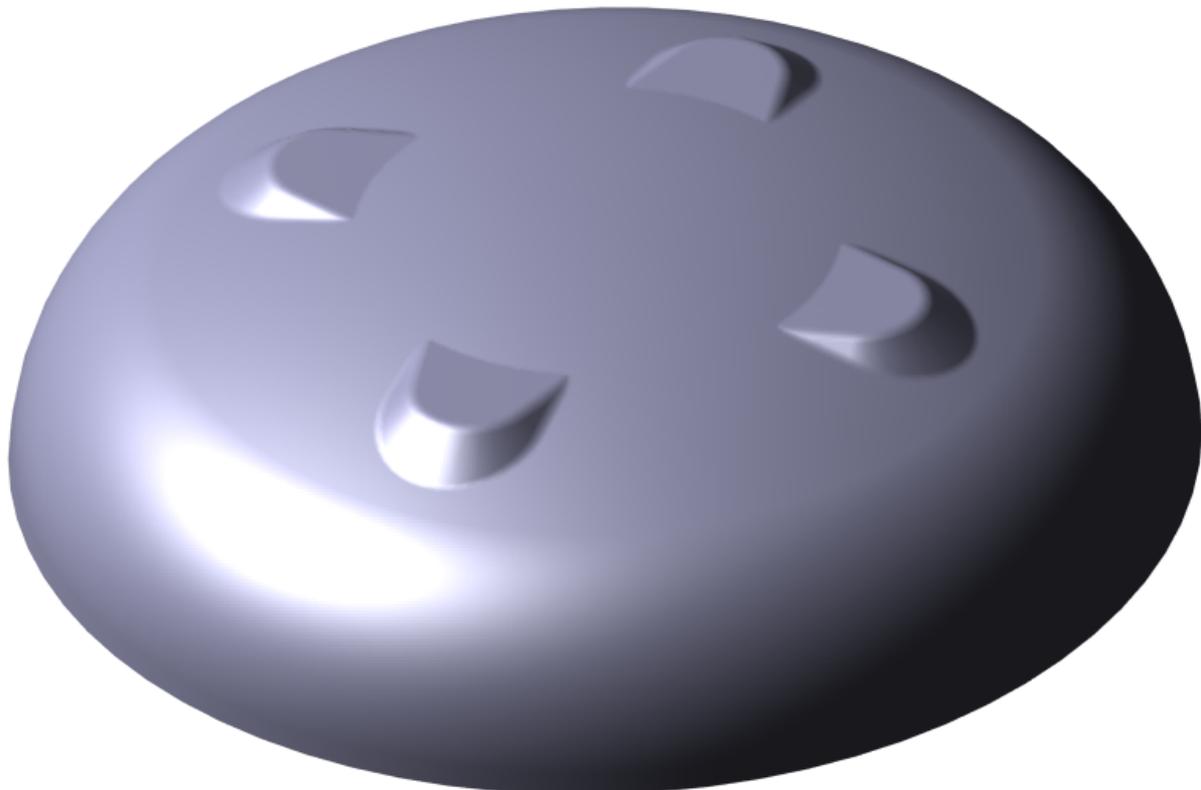


Figura 9.0.1: Geometría propuesta - diseño S.T.Y.X

9.1. Resultados de los ensayos hidráulicos

Se muestran, en la tabla 9.1.1 los resultados de los ensayos hidráulicos.

Orientación	Espesor [mm]	Chimenea	NAG 314		Eléctrico
			9bar	P_{max}	P_{max}
Tapa (+)	1,4	Ciega	✓	✗	✓
		3in	✓	✗	✓
		6in	✓	✗	✓
	1,7	Ciega	✓	✓	✓
		3in	✓	✓	✓
		6in	✓	✗	✓
	2,3	Ciega	✓	✓	✓
		3in	✓	✓	✓
		6in	✓	✓	✓
	3,2	Ciega	✓	✓	✓
		3in	✓	✓	✓
		6in	✓	✓	✓

Tabla 9.1.1: Presiones admisibles para diferentes espesores

Es importante destacar el caso de la tapa con un espesor de 1,7mm y una cámara de combustión de 6in. Esta no cumple con los desplazamientos de la norma. Su desplazamiento longitudinal máximo es de 2,73mm, es decir, 0,15mm superior al límite. Esta elongación ocurre en una zona interior al recipiente.

Por este motivo, se considera adecuado diseñar la matriz de conformado para un espesor máximo de chapa de 1,7mm. Esta matriz debe poder, también estampar piezas de 1,4mm de espesor.

9.2. Resultados del estampado

Se muestran los resultados de los estampados de la pieza en espesores de 1,4mm y 1,7mm. En ambos espesores, la pieza se arruga, aunque sin alcanzar la falla. La figura 9.2.1 muestra la pieza luego del conformado.

9.2.1. Espesor 1,4mm

Las figuras 9.2.2 y 9.2.3 muestran, respectivamente, el valor del criterio de Goijaerts y la deformación plástica acumulada en el estampado de la pieza de 1,4mm de espesor.

Se obtiene un valor máximo del criterio de Goijaerts $C = 0,3846$ y una deformación plástica acumulada $\bar{\epsilon}_p = 0,5278 \frac{mm}{mm}$.

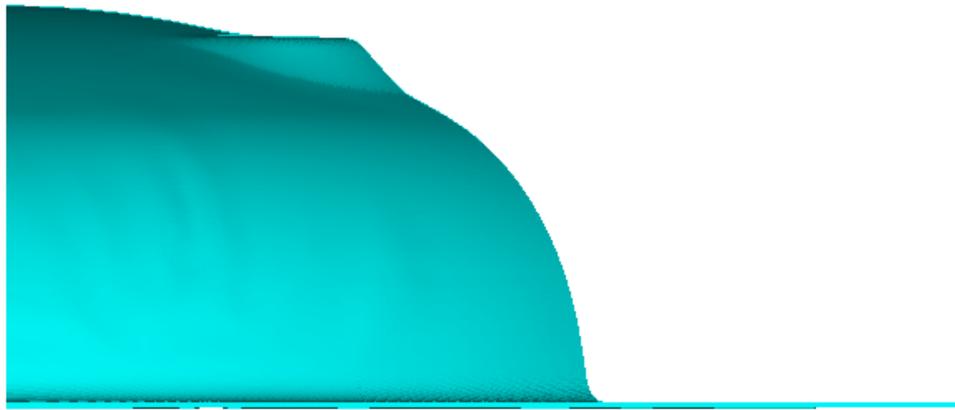


Figura 9.2.1: Deformada del estampado del diseño S.T.Y.X - Espesor 1,4mm

Criterio de Goijaerts (C) en el nuevo diseño

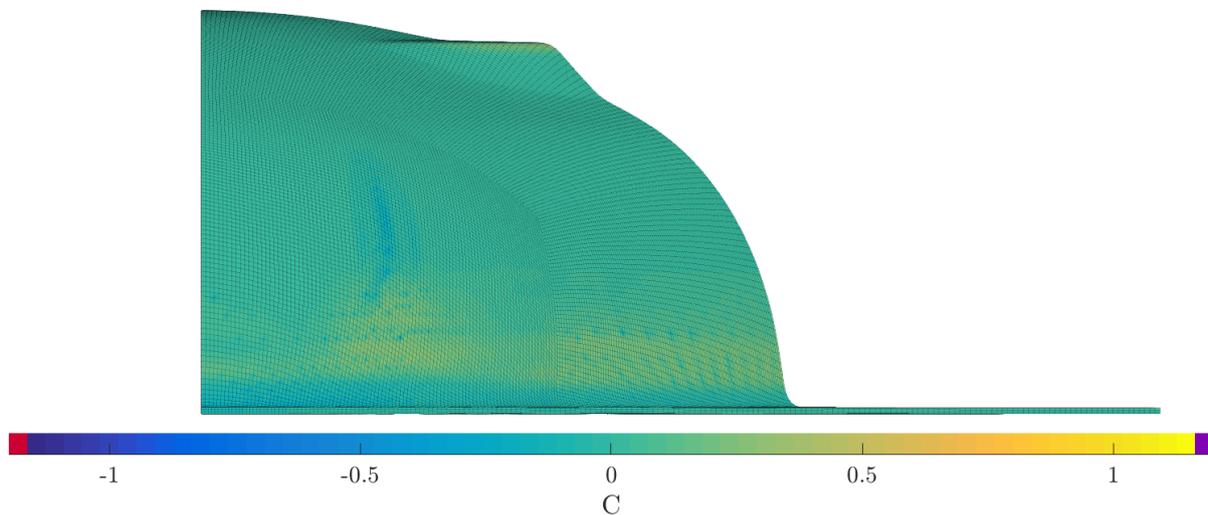


Figura 9.2.2: Criterio de Goijaerts en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,4mm

9.2.2. Espesor 1,7mm

Las figuras 9.2.4 y 9.2.5 muestran, respectivamente, el valor del criterio de Goijaerts y la deformación plástica acumulada en el estampado de la pieza de 1,7mm de espesor.

Se obtiene un valor máximo del criterio de Goijaerts $C = 0,5840$ y una deformación plástica acumulada $\bar{\epsilon}_p = 0,5850 \frac{mm}{mm}$.

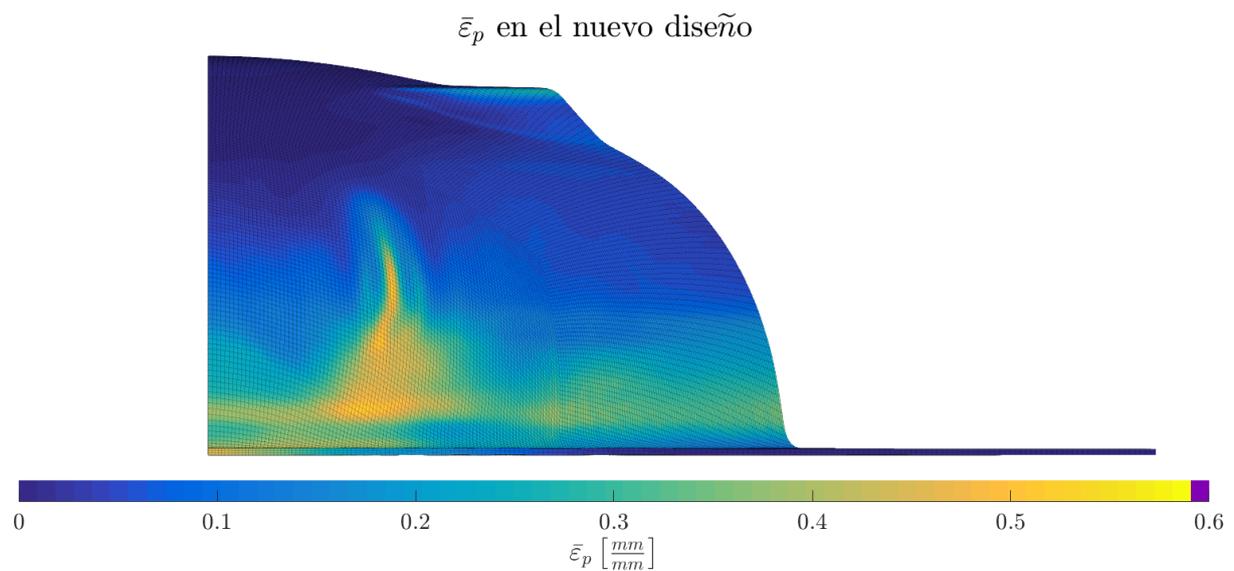


Figura 9.2.3: Deformación plástica acumulada en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,4mm

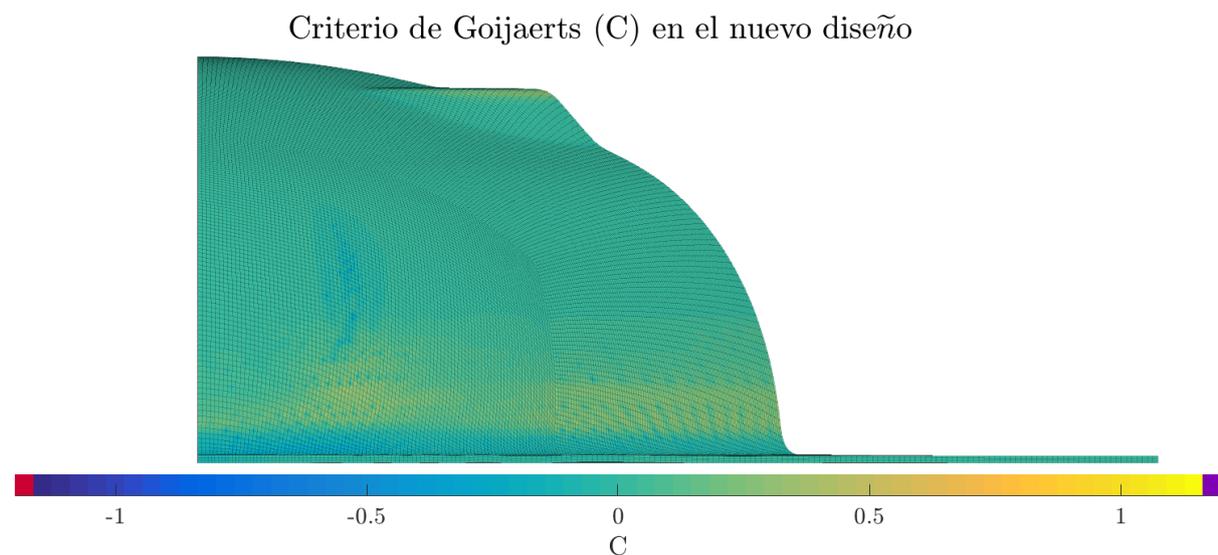


Figura 9.2.4: Criterio de Goijaerts en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,7mm

9.3. Conformado de los cuellos

Para este análisis se toma la pieza cortada y refileada, y se conforma el cuello necesario. Se utilizan cuellos de 3in y 6in.

Se contiene la pieza entre dos matrices y se conforma el cuello con una herramienta hemiesférica. La figura 9.3.1 muestra el herramental y la pieza.

En todos los casos se desprecian las deformaciones plásticas acumuladas que se hayan obtenido durante el embutido de la tapa.

En las tapas con chimeneas de 3in se omiten los planos para agujeros para simplificar el mallado. En el caso del conformado de 6in, se considera necesario evaluar cómo afecta al proceso de fabricación la rigidez que estos planos representan, dada la cercanía con el

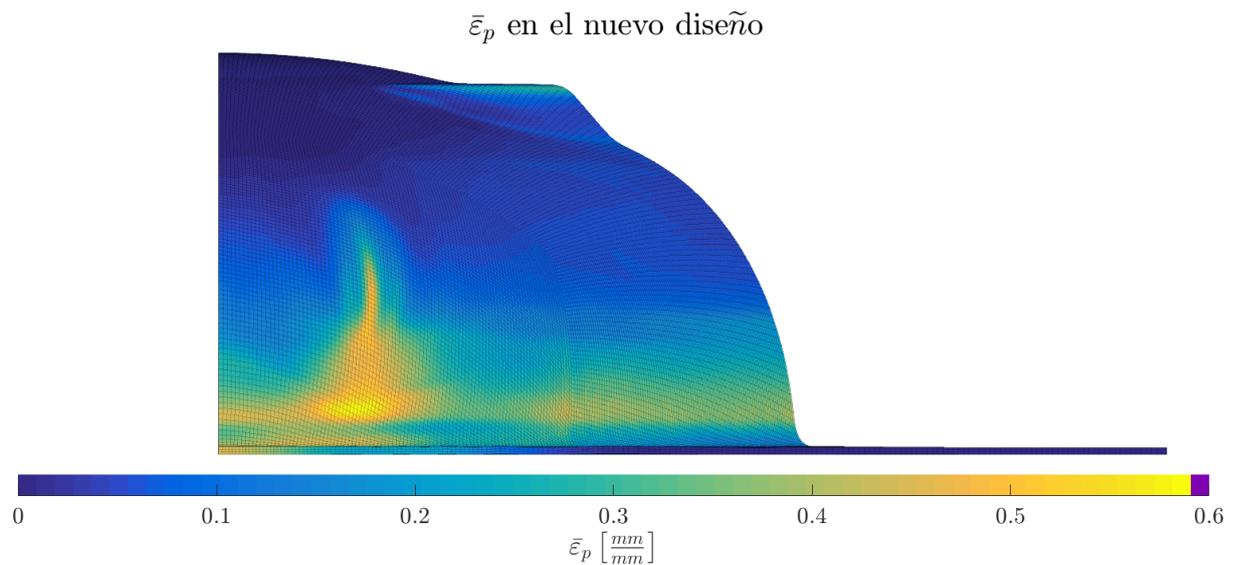


Figura 9.2.5: Deformación plástica acumulada en el diseño S.T.Y.X - Espesor 1,7mm

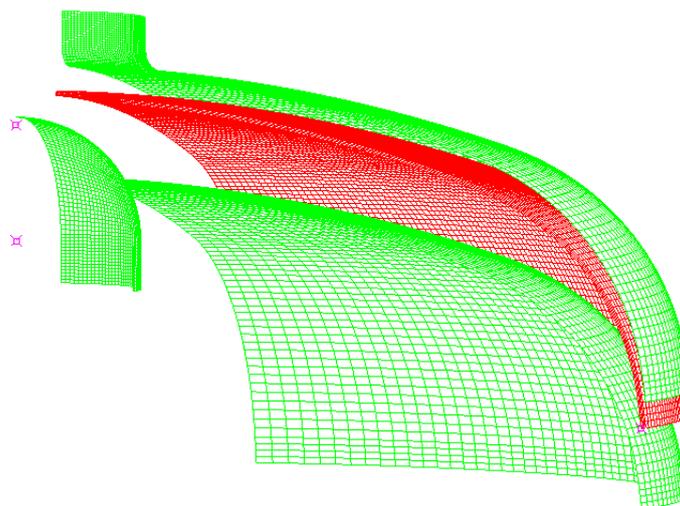


Figura 9.3.1: Herramental (en verde) y pieza (en rojo) del conformado del cuello de 3in cuello.

Se evalúa el conformado con piezas de 1,7mm de espesor y se considera que, si la deformación es admisible, el conformado es exitoso tanto en este espesor como en chapa de 1,4mm.

Es esperable que, si el conformado de ambos diámetros es correcto, también podrían conformarse cuellos de cualquier diámetro intermedio. Esto da al fabricante la libertad de cambiar los diámetros de sus chimeneas con una pequeña modificación de la línea.

9.3.1. Resultados del segundo conformado

El conformado del cuello de 3in, en piezas de 1,4mm y de 1,7mm, es exitoso. En las figuras 9.3.2 y 9.3.3 se muestra la pieza antes y después de conformar el cuello. Se alcanza

un valor máximo de $\bar{\varepsilon}_p = 0,2082 \frac{mm}{mm}$. Se requiere una fuerza máxima de $5,51kN$ en la herramienta esférica para efectuar la operación.

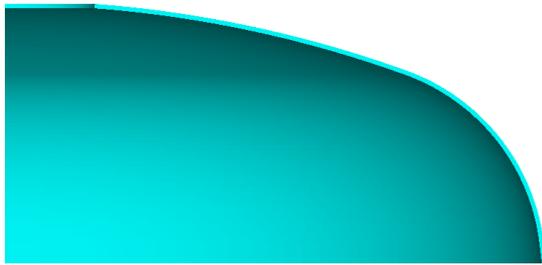


Figura 9.3.2: Pieza antes de conformar el cuello de 3in

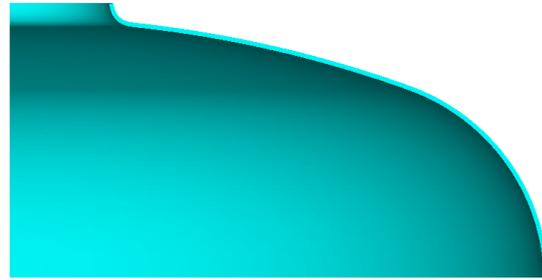


Figura 9.3.3: Tapa con cuello de 3in

El conformado del cuello de 6in, en piezas de 1,4mm y de 1,7mm, es exitoso. En las figuras 9.3.4 y 9.3.5 se muestra la pieza antes y después de conformar el cuello. Se alcanza un valor máximo de $\bar{\varepsilon}_p = 0,1928 \frac{mm}{mm}$. Se requiere una fuerza máxima de $6,64kN$ en la herramienta esférica para efectuar la operación.

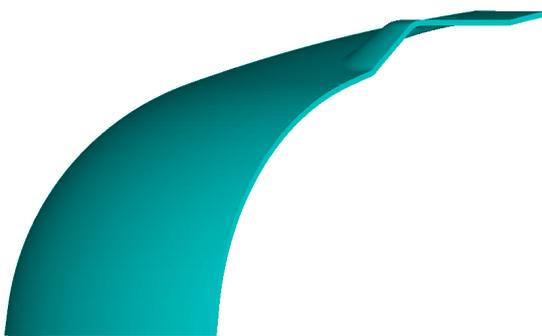


Figura 9.3.4: Pieza antes de conformar el cuello de 6in



Figura 9.3.5: Tapa con cuello de 6in

9.4. Conclusiones sobre el diseño S.T.Y.X

Las prestaciones de este diseño, en cuanto a su capacidad para resistir presión con espesores de chapa bajos, lo hacen económicamente viable.

El proceso de estampado es posible, aunque es importante regular las condiciones para minimizar las arrugas.

El conformado de los cuellos requiere una carga relativamente baja y no produce deformaciones en la pieza que puedan inducir una falla.

10. Proceso de corte y tiempos

Se propone utilizar un proceso de corte láser. Este método permite hacer cortes rápidos, con buena terminación y sin consumibles.

Las máquinas de corte láser funcionan necesariamente por control numérico. Esto permite generar los programas necesarios para producir cada una de las piezas, siempre cargando un pre-elaborado único.

10.1. Propuestas de maquinaria

Se tienen dos alternativas: una máquina *ad hoc*, optimizada para este proceso en particular o un brazo robot con un cabezal de corte. Ambas máquinas tienen la posibilidad de fabricar las piezas con la misma calidad.

Para los espesores contemplados, los proveedores de herramientas de corte láser indican una potencia de 500W.

Para los espesores y el material que se busca cortar, se puede refrigerar la zona de corte con aire comprimido. Se requiere una pureza de aire del 99,998 % y una presión de 13 bar. Tanto el cabezal como la fuente de láser se refrigeran con agua.

10.1.1. Brazo robot

Un brazo de seis grados de libertad puede hacer todos los movimientos necesarios para cortar los agujeros y los cuellos. Este se puede equipar con un cabezal de corte láser a elección.

10.1.2. Máquina a medida para el diseño E.O.S

Se propone como alternativa una máquina a medida para efectuar los cortes. En la figura 10.1.1 se muestran de forma esquemática los movimientos que debe hacer la máquina para permitir el corte.

El proceso es el siguiente:

1. Se cortan los agujeros mientras el sostén se encuentra en posición vertical
2. Se vuelca la pieza
3. Se corta el cuello correspondiente mediante una rotación del sostén.

El ángulo de vuelco de la pieza para permitir el corte de los cuellos es variable y depende del diseño de la tapa y las dimensiones de cabezal de corte.

Se debe tener cuidado con el diseño y la selección de cabezal para evitar colisiones entre la pieza y la máquina. Existen cabezales con boquillas muy finas y largas que permiten cortar en espacios reducidos.

El presupuesto para esta máquina se encuentra en la figura A.0.1 del anexo A.

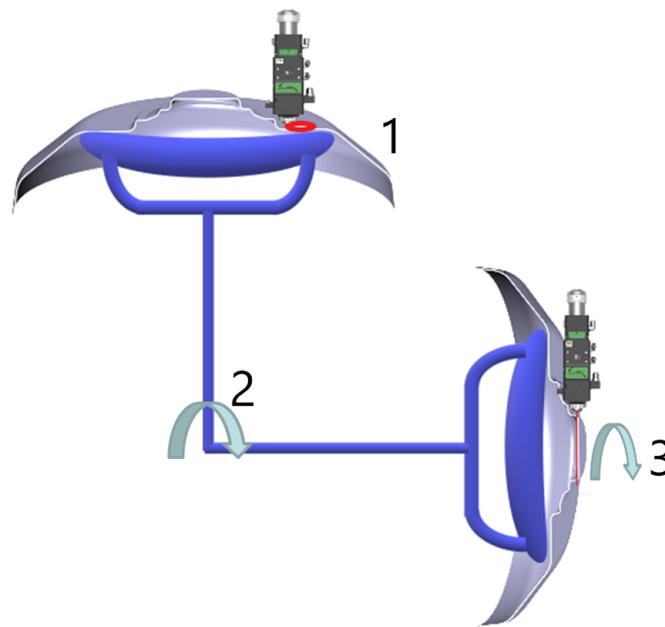


Figura 10.1.1: Esquema del proceso de corte de la máquina a medida

10.1.3. Máquina a medida para el diseño S.T.Y.X

Esta máquina consiste en un cabezal de corte láser montado sobre un pantógrafo. Este tiene la posibilidad de moverse en los ejes X , Y , y Z . Existen hoy máquinas similares que, por estar diseñadas para cortar chapa plana, no tienen el recorrido suficiente en el eje Z .

Una vez que se carga la pieza en la máquina, se efectúan los cortes de los agujeros para conexiones de agua y, de ser necesario, el agujero central.

Es también una opción incorporar el proceso de conformado de los cuellos a esta máquina, dado que las fuerzas necesarias son bajas. Esto podría agilizar el proceso de fabricación. Se propone la utilización de una prensa hidráulica.

Como primera aproximación, se propone el siguiente proceso:

1. Se cortan los agujeros con láser mientras la pieza se apoya sobre la contramatriz de la prensa que conformará luego el cuello
 - De esto se desprende que la prensa está contenida dentro de la máquina de corte

Esta decisión se debe a que la velocidad de movimiento de láser es muy superior a la que puede obtenerse moviendo la pieza
2. El cabezal se mueve hacia la posición *home*, es decir, hacia una de las esquinas
3. Se conforma el cuello correspondiente

No se tiene, por el momento, un presupuesto para este diseño de máquina.

10.2. Tiempos de corte

En este segmento, se trata con los tiempos de corte, dado que los tiempos de conformado dependen de las prensas utilizadas en planta. De esta manera, no se puede explicitar el tiempo total de fabricación. Esta diferencia es especialmente importante al momento de diferenciar las máquinas para los diseños I y II, dado que la primera tiene más movimientos durante el proceso de corte, que no son contabilizados.

Debe tenerse en cuenta que, si bien el corte agrega tiempo de carga, descarga y corte, ahorra los cambios de matriz, que resultan extremadamente lentos y costosos.

El fabricante de la maquinaria *ad hoc*, ya sea para el diseño E.O.S o S.T.Y.X, informa que la velocidad máxima de corte es de $6000 \frac{mm}{min}$ y la velocidad de traslación libre de $15000 \frac{mm}{min}$. En la tabla 10.2.1 se muestran los tiempos de corte estimados para todas las piezas.

Chimenea	Nº de Agujeros	Tiempo(s)
Ciega	0	0
	2	1,95
	3	3,00
	4	4,04
3in	0	2,81
	2	4,76
	3	5,81
	4	6,85
6in	0	5,58
	2	7,54
	3	8,58
	4	9,62

Tabla 10.2.1: Tiempos de corte de las piezas. No considera carga y descarga de la máquina

A estos hay que agregar los tiempos de carga y descarga y el tiempo de los movimientos intermedios. Debe considerarse que, por ejemplo, el movimiento de una prensa hidráulica es muy lento frente al corte láser. A priori, se contemplan 5s de carga y descarga y 5s de movimiento de la prensa.

Se estiman entonces tiempos de producción de entre 5s y 20s, dependiendo de la pieza que se fabrique.

Es importante recordar que el trabajo puede hacerse de forma continua, incluso cambiando la pieza a fabricar. Por este motivo, se considera muy probable que, incluso si el tiempo medido para fabricar una pieza fuese mayor al actual, el tiempo promedio de producción disminuya.

11. Conclusiones finales

En base al trabajo realizado, se considera que el modelo del material desarrollado permite analizar procesos de conformado en frío de manera fehaciente. A su vez, los criterios de falla seleccionados son representativos de los modos de falla que se dan en el proceso. Este modelo de material permite, de ser necesario, evaluar otros procesos dentro de la planta que incluyan grandes deformaciones.

El proceso de conformado, cuyo modelo es validado por la simulación de la fabricación de la pieza de referencia, representa la realidad de forma suficiente.

El diseño E.O.S. (sección 8) no cumple con los objetivos del producto. Esto se debe a que su riesgo de falla es muy elevado y el espesor de chapa que se necesita para cumplir con las normas es prohibitivo desde el punto de vista económico.

Por otra parte, se sugiere incorporar el diseño S.T.Y.X (sección 9) a los productos. Es importante notar que esta pieza no cumple con el conjunto completo de requisitos de diseño que se plantean inicialmente, dado que requiere dos operaciones de conformado. Sin embargo, tiene un diseño que permite cumplir con las normas si se la fabrica en los espesores de chapa más deseables. Su proceso de corte es más sencillo que el del diseño E.O.S.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos, el desempeño de las piezas es siempre mejor si se las ubica en la configuración tapa(+). Se recomienda incorporar esta modificación a todos los termotanques.

Desde el punto de vista del corte, se considera que la mejor alternativa es la máquina *ad hoc* para el diseño S.T.Y.X. El uso de aire comprimido como refrigerante implica que el costo de operación es relativamente bajo y la calidad del corte es superior a la obtenida con otros métodos. Los tiempos de corte son adecuados.

Con el reemplazo de las tapas actuales por el diseño S.T.Y.X, se reduce la complejidad de la línea y se elimina la necesidad de producir stock intermedio. Esta pieza permite también hacer modificaciones a los termotanques para mejorar su desempeño, sin necesidad de diseñar una nueva tapa; por ejemplo, modificar las medidas de las chimeneas o la cámara de combustión.

Incorporar la máquina de corte láser a la planta implica una enorme versatilidad. No solo porque permite cambiar el producto que se está fabricando de forma rápida y sencilla, sino porque da lugar a agregar nuevos diseños en el futuro sin necesidad de rediseñar la planta.

A. Presupuestos

 <p>MegaLaser MÁQUINAS DE CORTE Y GRABADO LASER</p>		<p>PRESUPUESTO</p>		
<p>DE NICOLAS GOTZL - CUIT 23-25855533-3</p>		<p>NO. : 0003-00000492</p>		
<p>CLIENTE : Federico Hojman - ITBA ID 298</p>		<p>Fecha: 3 de julio de 2019</p>		
<p>DIRECCIÓN :</p>		<p>Término: Ver notas debajo</p>		
<p>CUIT :</p>		<p>Ref.:</p>		
<p>CUIT :</p>		<p>Nota:</p>		
<p>CUIT :</p>		<p>AT. : fhojmangandolfo@itba.edu.ar</p>		

CÓD.	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNITARIO	TOTAL
30	<p>Máquina de corte sistema Fiber Laser 500W RAYCUS</p> <p>DISEÑO A DEFINIR - CONSTRUCCION NACIONAL</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modulo Laser de fibra 500W RFL C500 RAYCUS 100.000 hs. - Cabezal Au3tech modelo MC100-QBH. - Sistema de refrigeración: Water Chiller CWFL-500. - Controlador Au3techmodel MCC3721H. - Área de trabajo 600x600mm (X,Y) - Eje Z 300mm. - Sistema lineal Guías Hiwin 15mm de bolas recirculantes. - Sistema transmisión tornillo de bolas Hiwin 20mm de bolas re circulantés. - Motorización Motores SERVO DRIVER lazo cerrado Hiwin de baja inercia. - Estructura Acero al carbono rectificado en todos los ejes. - Controladora PLC con panel de pantalla LCD. - Velocidad Rápida 15000mm/minuto. - Resolución 0,05mm real. - Home automático por sensores inductivos. - Eje Z sensor de autofocus en tiempo real. - Brazo robot CNC para carga y posicionamiento de pieza <ul style="list-style-type: none"> - Estructura de acero al carbono rectificada. - Sistema lineal Hiwin de alta precisión. - Motores paso a paso con reductora planetaria 2 micrones. - Electroimanes para sujetar pieza metálica. - Movimientos programables de giro, posicionamiento de pieza y rotación de la misma para proceso de corte sobre lateral. - Eje rotativo para girar la pieza y permitir el corte sobre el radio de la misma. 	1	74.300,00 USD	74.300,00 USD
<p>OBSERVACIONES: Validez presupuesto: 30 DIAS. Tipo de cambio aplicable: dólar vendedor BNA</p>				
<p>SUB TOTAL</p>				74.300,00 USD
<p>IVA : 10,50%</p>				7.801,50 USD
<p>IVA :</p>				
<p>OTROS :</p>				
<p>TOTAL PRESUPUESTO :</p>				82.101,50 USD

TÉRMINOS Y CONDICIONES:

1. La forma de pago expresada anteriormente.
2. La máquina se entrega lista para usar. Se brinda un curso explicativo para su uso.
3. Damos ayuda y soporte técnico telefónico.
4. La garantía es de 1 (UN) año y cubre todos los desperfectos fabrica y mal funcionamiento de los componentes.

Firmado por: Nicolás Götzl
Fecha: 3 de julio de 2019

Recibido por:
Fecha:

Megalaser Pantógrafos, Cuenca 5284 Villa Pueyrredon CP(1419), Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
Tel : (54 11) 5254 0173 Email: laser@megalaser.com.ar Website : www.megalaser.com.ar

Figura A.0.1: Presupuesto de la maquinaria de corte láser *ad hoc*



PATAGONIA
CNC MACHINES

ORDEN DE INVERSION CELDA ROBOTIZADA DE CORTE LASER

	DESCRIPCION	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	ROBOT DE 6 EJES PARA CORTE LÁSER.	U\$S 66.240	U\$S 66.240
1	Fuente de corte láser por fibra optica de 500 watt de potencia. Equipo Chiller de Regulación de temperatura para cabezal. Cabezal especifico modelo mini para integración con Robot de manipulación	U\$S 52.840	U\$S 52.840
1	Integración láser al robot	U\$S 12.500	U\$S 12.500
1	Dispositivos neumáticos necesarios para la sujeción del conjunto a cortar. Incluye: Estructura mecánica cortada en laser, soldado, mecanizado y pintado con pintura epoxi al horno. Componentes neumáticos para fijación de piezas. Señores necesarios para verificación de correcta posición de pieza.	U\$S 18.500	U\$S 18.500
1	CELDA DE CORTE Integración con equipos. Base para Robot Cerramiento estructural con vidrios de protección de los rayos del láser. Comandos para operador. Barreras de seguridad.	U\$S 19.600	U\$S 19.600
	<u>TOTAL</u>		<u>U\$S 169.680,00</u>

*Valores en dólares estadounidenses, tipo de cambio oficial cotización venta Banco Nación Argentina.
IMPUESTOS NO INCLUIDOS.*

Patagonia CNC Machines S.A. CUIT: 30-71095273-2.

Camino de Cintura 7497, 9 de Abril, E. Echeverría, Buenos Aires. Código postal: B1839FSH. Teléfono: +54 11 4693 3773.

5

Figura A.0.2: Presupuesto de la celda de corte con brazo robot

Referencias

- [1] *Aprobación de calentadores de agua por acumulación de funcionamiento automático (termotanques) NAG-314*. Norma. Buenos Aires, AR: Ente Nacional Regulador Del Gas, 1995.
- [2] ADINA R&D, Inc. *ADINA Structures*. Ver. 9.3.4. URL: <http://www.adina.com>.
- [3] Klaus-Jürgen Bathe. *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe, 2006.
- [4] Klaus-Jürgen Bathe. *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe, 2006, pág. 762.
- [5] Adrianus Maria Goijaerts, LE Govaert y FPT Baaijens. «Prediction of ductile fracture in metal blanking». En: *Journal of manufacturing science and engineering* 122.3 (2000), págs. 476-483.
- [6] EN ISO. «6892-1. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature». En: *International Organization for Standardization* (2009).
- [7] B ISO. «20482: 2003, metallic materials—sheet and strip—Erichsen cupping test». En: *British Standards Institution, London* (2003).