

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**CARACTERIZACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES Y ESTUDIO DE
SU RESISTENCIA MECÁNICA Y CONFORMABILIDAD**

POR

SERGIO ALEJANDRO LEAL ALANIS

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N.L., JUNIO DEL 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**CARACTERIZACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES Y ESTUDIO DE
SU RESISTENCIA MECÁNICA Y CONFORMABILIDAD**

POR

SERGIO ALEJANDRO LEAL ALANIS

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N.L., JUNIO DEL 2011

HOJA DE REVISIÓN

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Caracterización de aceros inoxidables y estudio de su resistencia mecánica y conformabilidad”, realizada por el alumno Sergio Alejandro Leal Alanis con número de matrícula 1207120, sea aceptada como opción para el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

Asesor
Dra. Patricia Zambrano Robledo

Revisor
Dra. Martha Guerrero Mata

Revisor
Dr. Joaquín del Prado Villasana

Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de la División de Estudios de Postgrado

DEDICATORIA

*El ánfora guarda siempre el aroma del primer vino que guardó.
Horacio Flaco*

Te tengo una gran admiración, por eso te tengo en mi corazón.

A mi madre Leticia, voz de la experiencia, por enseñarme a jamás rendirme y a seguir siempre mis sueños.

A Brenda y David, los pilares, por impulsarme a seguir adelante y mostrarme el lado positivo de las cosas.

A Mariangela, luz de nuestras vidas, por darnos motivos de sobra para siempre sonreír.

AGRADECIMIENTOS

*Sólo un exceso es recomendable en el mundo: el exceso de gratitud.
Jean de la Bruyere*

A Dios por darme la dicha de ver mi sueño realizado.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado durante la realización de mi maestría.

A FIME (UANL), mi segunda casa, por darme alojamiento durante todos estos años de licenciatura y maestría.

A METALSA por permitirme realizar este proyecto en conjunto, con el cual ponemos un granito de arena para darle un respiro a nuestro planeta.

A MEXINOX por el material donado a este proyecto con el único interés de hacer crecer la ciencia.

A la Dra. Patricia Zambrano por creer en mí y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto que me hizo madurar y ampliar mi perspectiva. Por su apoyo, sus consejos, el tiempo que compartimos, muchas gracias.

A la Dra. Martha Guerrero por permitirme aprender de usted, por ser mi guía en el desarrollo de este proyecto, por siempre aportarme ideas y consejos, por todo su apoyo, muchas gracias.

Al Dr. Joaquín del Prado por sus comentarios y consejos, los cuales enriquecieron esta tesis, por su gran disponibilidad y por el apoyo brindado, muchas gracias.

Al Ing. Pedro Silva por su colaboración y apoyo, debido a los cuales se logró el avance de este proyecto conjunto, muchas gracias.

Al Dr. Rafael Colás por esa forma tan humana y cordial de compartir el conocimiento, por siempre aclarar mis dudas y tenerme la confianza suficiente para prestarme sus libros, muchas gracias.

A la Dra. Adriana Salas y al Dr. Nelson Garza por su amistad, por siempre darme un espacio para revisar mi trabajo y aconsejarme, por su apoyo, por la motivación y sus palabras de aliento para que este proyecto saliera adelante, muchas gracias.

Al "Simulation Team": Oscar Zapata, René Cerda, Diego Sáenz, Néstor Martínez y Johana Gamez por su ayuda y consejos sobre el área de elemento finito.

A mis amigos de FIME: Daniel Pérez, Ariana Alvarado, Javier Beltran, Manuel Cruz y Vladimir Lara, por su amistad y por haberme ayudado a sacar adelante este proyecto.

A Daniela Téllez, gran amiga, con la cual tuve la dicha de que desarrolláramos a la par proyectos hermanos. Te agradezco por tu tiempo, por tu espacio, por el apoyo anímico (que fue de vital importancia), por conspirar conmigo para que todo esto fuera posible, gracias por tu amistad.

A mis amigos: Daniel Rodríguez, Miguel Campos, Israel Urista, Alejandro y Jorge Lugo, por los grandes momentos que pasamos juntos, los cuales siempre me hicieron sonreír y me dieron fuerza para continuar.

A mi familia, quienes son la esencia de esta tesis, por apoyarme e impulsarme en cada momento de mi vida, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, por siempre creer en mí, por soportar a la persona más intensa del mundo con este sueño y lo más importante, por su amor incondicional.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
Resumen	IX
Capítulo 1- Introducción	1
Capítulo 2 – Antecedentes	5
Capítulo 3 – Aceros inoxidables	9
3.1 – Resumen histórico.	9
3.2 – Definición de acero inoxidable.	11
3.3 – Clasificación de los aceros inoxidables.	12
3.4 – Composición y estructura del acero inoxidable.	14
3.5 – Aceros inoxidables austeníticos.	18
3.6 – Aceros inoxidables ferríticos.	22
3.7 – Aceros inoxidables martensíticos.	23
3.8 – Aceros inoxidables dúplex.	25
3.9 – Aceros inoxidables endurecidos por precipitación.	27
Capítulo 4 – Procesos de conformado	30
4.1 – Clasificación de los procesos de conformado.	30
4.2 – Laminado.	31
4.3 – Forjado.	32
4.4 – Extrusión.	33
4.5 – Trefilado.	35
4.6 – Operaciones de corte.	35
4.7 – Doblado.	36
4.8 – Embutido.	38
4.9 – Estampado.	40
4.10 – Hidroformado.	41
Capítulo 5 – Experimentación	43
5.1 – Material.	43

5.2 – Preparación metalográfica.	45
5.3 – Caracterización por medio de microscopía óptica.	47
5.4 – Macro dureza.	48
5.5 – Micro dureza.	49
5.6 – Ensayo de tensión.	51
5.7 – Análisis por simulación.	55
Capítulo 6 – Resultados y discusiones	59
6.1 – Microscopía óptica.	59
6.2 – Macro dureza.	61
6.3 – Micro dureza.	62
6.4 – Ensayo de tensión.	62
6.5 – Análisis por simulación.	73
6.6 – Selección del material de reemplazo.	86
Capítulo 7 – Conclusiones	88
Capítulo 8 – Recomendaciones	90
Capítulo 9 – Referencias	92
Apéndice A	96
Apéndice B	98
Apéndice C	99
Lista de tablas	109
Lista de figuras	110
Lista de ecuaciones	114

RESUMEN

Durante los últimos años se ha estado trabajando fuertemente por medidas más respetuosas con el medio ambiente. El sector automovilístico está buscando la forma de disminuir el peso de los componentes del chasis de un automóvil, mediante la investigación y desarrollo de materiales más ligeros, que contengan las mismas propiedades mecánicas o superiores que los utilizados actualmente, que tiene como última finalidad la reducción en el consumo de combustibles fósiles.

Los aceros inoxidable pueden utilizarse para reducir el peso debido a que presentan altas propiedades mecánicas que permitirían reducir el espesor de piezas estructurales del chasis de un automóvil, por eso se realizó una caracterización de dos aceros inoxidable austeníticos (AISI 304L y 316L) y un acero inoxidable martensítico (AISI 410S) con la finalidad de determinar sus propiedades mecánicas, su conformabilidad y su comportamiento en una pieza tubular sometida a compresión para evaluarlos como posibles reemplazos en partes de un chasis.

Durante la investigación experimental de este proyecto, se analizó la microestructura y medición de tamaño de grano para cada grado de acero inoxidable mediante microscopía óptica, ensayos Rockwell y Vickers para determinar la dureza y microdureza, ensayos de tensión a distintas velocidades de cabezal (10, 100 y 1000 mm/min.) con el objetivo de especificar las propiedades mecánicas en diferentes velocidades de deformación, así como la relación de deformación plástica promedio (R) para definir el grado de conformabilidad y anisotropía plástica de los distintos aceros inoxidable, por último se simuló un proceso de compresión de una pieza tubular utilizada en la industria automotriz con el propósito de describir su comportamiento durante un impacto frontal.

En las fotomicrografías se encontró un tamaño de grano homogéneo en todos los materiales, los valores más altos de dureza y microdureza pertenecen al AISI 304L y 316L, las propiedades mecánicas más elevadas y la más alta relación de deformación plástica promedio se obtuvieron para la aleación 304L. Durante la simulación de compresión de la pieza tubular el mejor comportamiento lo presentó el acero 304L.

El acero AISI 304L tiene las propiedades mecánicas más elevadas debido a su composición química (contiene entre 18-20% de Cr), otro aspecto que favorece a que se consigan estos niveles de esfuerzos es la alta tasa de consolidación que poseen los aceros inoxidable austeníticos. El valor de R muestra el grado de conformabilidad en un proceso de embutido o estampado profundo, por lo tanto el acero 304L presenta la conformabilidad más elevada. El acero 304L es el que durante la simulación de compresión obtuvo una mayor resistencia mecánica y mayor reducción de su longitud original, esto debido a su composición química.

Finalmente la aleación AISI 304L presentó mejores propiedades mecánicas para reemplazar al acero HSLA con el que actualmente se manufactura la pieza tubular, debido a que el 304L tiene un mejor comportamiento a compresión, y mayor resistencia mecánica, lo cual permitiría disminuir el espesor de la lámina, lo que llevaría a una reducción en peso de partes estructurales del chasis de un automóvil. Es importante mencionar que otras características y propiedades del material tienen que ser evaluadas como fatiga, resistencia a la corrosión, rigidez y costos para poder cumplir satisfactoriamente las especificaciones del vehículo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Cualquier cosa que la mente puede concebir, puede ser lograda.
W. Clement Stone

La importancia de los materiales en nuestra cultura es mayor de lo que habitualmente se cree. Cada segmento de nuestra vida cotidiana está influenciado en mayor o menor grado por los mismos, por ejemplo en transporte, vivienda, vestimenta, comunicación, recreación y alimentación. Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades (edad de piedra, edad de bronce, etc.) [1].

Durante los últimos años la tendencia es clara con respecto al procesamiento de materiales y se han generado medidas más respetuosas con el medio ambiente. Las políticas nacionales e internacionales están realizando esfuerzos importantes a nivel de investigación para que se consigan avances tecnológicos menos dañinos para el entorno [2].

El sector automovilístico no se encuentra al margen de estas políticas, y dado que es un sector altamente contaminante, está trabajando fuertemente desde diferentes líneas estratégicas, teniendo como objetivo principal la reducción en el consumo de los combustibles fósiles. Para ello el sector se enfrenta con dos alternativas, la primera es la obtención de fuentes de energía alternas, y la segunda es obtener una eficiencia mayor de los automóviles. Una forma de llevar a cabo la reducción del consumo de combustibles, es mediante

la disminución del peso de los componentes de un automóvil, mediante el desarrollo y aplicación de materiales más ligeros que proporcionen propiedades mecánicas superiores [2,3].

La industria automotriz ha fijado como objetivo común el reducir el consumo de combustible de los automóviles y así disminuir las emisiones de dióxido de carbono. El objetivo para los años 2008-2012 en lo referente a las emisiones es alcanzar 140g de CO₂ por Km. recorrido, lo que significa un consumo 25% menor que el del automóvil medio europeo de 1990. Si se reduce el peso en un 1%, el consumo de combustible decrecerá un 0.5% [3].

La sustitución de los aceros convencionales usados en la carrocería del automóvil por otros de mayor resistencia mecánica permite reducir el espesor de la lámina y por lo tanto el peso total de la carrocería entre el 25 y el 50%, situación que a su vez exige el desarrollo de nuevos grados de acero, y de nuevas técnicas de recubrimiento, de conformado y unión [4].

Tradicionalmente, la selección de materiales para el chasis de vehículos ha sido de acero al carbono, debido a su facilidad de fabricación, capacidad de absorción de energía y los costos relativamente bajos. Sin embargo, en los últimos años, la exigencia para que coincida con los nuevos objetivos como la reducción de peso, durabilidad y resistencia a los impactos ha enfocado el interés hacia otros materiales.

Se ha pensado que ciertos grados de acero inoxidable podrían ser utilizados para reducir el peso y el costo en la fabricación de vehículos de motor así como también para mejorar la seguridad y la robustez de las estructuras del chasis del automóvil debido a sus buenas propiedades mecánicas, tales como alta resistencia mecánica, excelente conformabilidad y soldabilidad, aunado a la alta capacidad de absorción de energía, lo que aumentaría la seguridad de los pasajeros en caso de una colisión [5,6].

El acero inoxidable ofrece un gran potencial en aplicaciones de conformado gracias a sus propiedades mecánicas. La alta relación resistencia/peso del material y sus considerables propiedades de elongación y endurecimiento por deformación plástica permiten diseños de gran complejidad, tridimensionales y sin costuras, además cuentan con la ventaja de que pueden ser reciclados [7,8].

Si bien es posible que el acero inoxidable no sea siempre un material barato, las simplificaciones en los procesos de producción asociadas a su uso pueden compensar el costo más elevado del material como por ejemplo, al reducir el número de etapas de la embutición profunda o los tratamientos térmicos [8].

El uso del acero inoxidable en aplicaciones automotrices puede dividirse en tres categorías principales:

- a) Elementos decorativos.- se utiliza cuando la función del acero inoxidable es dar apariencia estética, por ejemplo: vistas, logotipos, broches de cinturones de seguridad y rines.
- b) Elementos funcionales.- se emplea el acero inoxidable en piezas donde se requieren las propiedades de resistencia a la corrosión, por ejemplo: el sistema de escape de gases, el tanque de combustible y abrazaderas.
- c) Elementos estructurales.- el uso del acero inoxidable esta destinado a partes estructurales del chasis con la finalidad de conseguir una disminución de peso del mismo, por ejemplo: defensa, brazo del muelle de suspensión y pilar b.

El presente trabajo se enfoca al estudio de las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables laminados en caliente AISI 304L de 3.4 mm de espesor, 316L de 3 mm de espesor, y 410S de 2.6 mm de espesor, con la finalidad de determinar cual de estas aleaciones presenta la mejor opción para aplicaciones estructurales en partes de un chasis automotriz teniendo como finalidad

disminuir su peso y por consiguiente tener un impacto ambiental benéfico sin comprometer el nivel de seguridad e integridad de los pasajeros. Por lo tanto se ha decidido realizar una caracterización de dichos aceros trabajando en conjunto con la empresa Metalsa S.A. de C.V.

Por esto se pretende determinar la aleación con mejores propiedades mecánicas y de conformado para sustitución de aceros convencionales en partes estratégicas del chasis, mediante el estudio y caracterización de aceros inoxidables.

Se estima que se puede conseguir una reducción en peso de hasta un 20% en algunas partes del chasis mediante el uso de aceros inoxidables, sin poner en riesgo las condiciones de seguridad de los tripulantes del vehículo.

Por ello el sector automotriz se encuentra realizando avances tecnológicos más respetuosos con el entorno, está trabajando en el uso de materiales que permitan una reducción de peso en componentes estructurales del chasis con la finalidad de reducir el uso de combustibles fósiles y por lo tanto la disminución de emisiones de dióxido de carbono.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

*El pasado me ha revelado la estructura del futuro.
Pierre Teilhard*

La situación actual para aplicaciones en el área automotriz comprende el uso de materiales que están obligados a mantener la integridad de la estructura, resistir la corrosión, proporcionar una alta capacidad de absorción de energía, altos valores de resistencia al esfuerzo, excelentes propiedades de conformado y además que ofrezcan ventajas al medio ambiente al generar una reducción considerable en el peso del vehículo, lo cual tiene un impacto directo en el consumo de combustible, lo que es ideal para establecer el concepto revolucionario del chasis de un automóvil [7,9]. En base a estas características se plantea el uso de los aceros inoxidables dentro de la industria automotriz.

Para cumplir con el objetivo de disminuir el peso de chasis es necesario el uso de materiales ligeros, por ellos se estudió el acero inoxidable y se presenta como un material ligero, no debido a su densidad, si no en base a la relación entre el módulo de Young (E) y la densidad del material (ρ), denominado rigidez específica (R_e).

$$R_e = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

También a la relación entre el esfuerzo de cedencia (σ_y) y la densidad del material (ρ), llamada esfuerzo específico (σ_e).

$$\sigma_e = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad (2)$$

Donde se reportaron valores para el acero inoxidable similares a los de un aluminio [10,11].

Es necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales que se piensan utilizar por eso se realizó la caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables mediante ensayos de tensión, las pruebas de estos aceros se realizaron a temperatura ambiente y en las tres direcciones respecto a su laminación (0°, 45° y 90°) a distintas velocidades de deformación. Schuberth realizó pruebas en grados austeníticos (AISI 201, 301 y 301LN) para determinar sus propiedades mecánicas teniendo como objetivo principal el señalar que el acero inoxidable puede utilizarse para reducir el peso y costos de fabricación de vehículos, llegando a la conclusión de que los aceros inoxidables austeníticos muestran combinaciones muy buenas de resistencia y ductilidad, además muestran potencial para una reducción de peso en aplicaciones automotrices. Akhavan realizó pruebas en un grado martensítico (CA6NM) templado a temperaturas que van desde 550 a 750 °C para determinar las propiedades mecánicas del material bajo dichas condiciones, concluyendo que la muestra que no recibió tratamiento térmico presenta el esfuerzo máximo mas elevado pero el porcentaje de elongación menor y la muestra templada a 700 °C presenta el mayor porcentaje de elongación. Tsuchida llevó a cabo ensayos para determinar el efecto de la temperatura (123 a 323 K) en un grado austenítico (AISI 304) sometido a tensión, determinó que en ese rango de temperatura el esfuerzo máximo se incrementa cuando disminuye la temperatura, el porcentaje de elongación mas elevado se obtiene a 308 K [5,12,13].

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es la conformabilidad del material, debido a que estos serán sometidos a distintos procesos y deben de resistir el trabajo mecánico, por ello Magnusson determinó los diagramas limite

de formado realizó pruebas con tiras rectangulares de acero inoxidable AISI 301 y Hy800, el diámetro de penetración fue de 100 mm. y la velocidad del ensayo fue de 5 mm/seg, con el objetivo de mostrar la deformación máxima a la fractura para diferentes relaciones de deformación bajo un esfuerzo biaxial, lo que nos permite saber el límite de la deformación al momento de las operaciones, llegando a la conclusión de que los aceros austeníticos tienen un alto grado de conformabilidad por dos razones, la primera es que tiene un fuerte comportamiento de endurecimiento por trabajo mecánico y la segunda es que microestructura cambia de austenítica a martensítica en las regiones con alta deformación plástica [6].

El método de elemento finito es una herramienta más que se utilizó dentro de las investigaciones realizadas a los aceros inoxidables, sus aplicaciones son bastante amplias, ya que por medio de el Schuberth y Emmons determinaron el esfuerzo de Von Mises en piezas y estructuras sometidas a compresión, Placidi estableció la conformabilidad de los materiales mediante la obtención de los diagramas límite de formado y la disminución del espesor al reemplazar un acero al carbono por uno inoxidable, Magnusson encontró la variación en el espesor de la sección transversal al momento de conformar el material [5,6,14,15].

Los resultados de disminución de peso que se obtuvieron mediante el uso de aceros inoxidables en aplicaciones estructurales en el chasis son diversos, esto depende del grado de acero utilizado y de la geometría de la pieza, Placidi obtuvo una reducción de peso de 15% para un brazo de suspensión usando un AISI 304 y una reducción de 24% para un rin haciendo uso de AISI 301L, Capelli consiguió una disminución de 34% para una defensa utilizando un 301LN, Emmons determinó una reducción de 40% del peso del chasis de un autobús mediante el uso de un acero Nitronic 30 y Níquel reportó una disminución de 20% mediante el uso de aceros AISI 201, 301, y 301LN sin mencionar en que partes fueron utilizados [14, 15, 16, 17].

Un aspecto que es crítico dentro de los procesos industriales es el de los costos, se consideró a los aceros inoxidable competitivos en términos de capacidad de formado, esfuerzos y absorción de energía, también presentan ventajas adicionales en reducción de costos debido a la resistencia a la corrosión y al buen acabado superficial, ya que no necesitan ser recubiertos mediante un proceso de galvanizado o pintura, como presentan un alto esfuerzo tampoco es necesario un tratamiento térmico. Capelli en el 2005 realizó un análisis de costos para el chasis de un autobús de acero inoxidable obteniendo un costo total de ciclo de vida menor que en el que se emplea para un acero al carbono [7,16,18].

CAPÍTULO 3

ACEROS INOXIDABLES

Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano.
Isaac Newton

3.1 RESUMEN HISTÓRICO

Se dice que el acero inoxidable fue inventado por Harry Brearley (1871-1948), quien había comenzado a edad muy temprana a trabajar como operario en la acería de su pueblo natal, Sheffield (Inglaterra). En 1912, Brearley comenzó a investigar aceros resistentes al calor y la erosión, a petición de los fabricantes de armas, en una aleación que presentara mayor resistencia al desgaste que la experimentada hasta el momento por el interior de los cañones de las armas de fuego como resultado del calor desprendido por los gases.

En 1913 Brearley produjo una aleación con 0.24% C y 12.8% Cr en un horno eléctrico. Esta aleación resultó ser muy resistente a la corrosión, además como parte de este estudio se dio cuenta de que los aceros con alto nivel de cromo disuelto no eran atacados cuando eran inmersos en soluciones diluidas de ácido nítrico. Su invento no tuvo mayor interés inmediato y fue destinado a la fabricación de cuchillería. En 1915 abandonó los laboratorios Firth Brown de Sheffield, Inglaterra, por problemas con los derechos de las patentes. Los trabajos iniciados por Brearley fueron continuados por William H. Hatfield, quien en 1924 elaboró los aceros inoxidables del tipo 18/8 (18% Ni y 8% Cr).

Su aparición industrial parece realizarse simultáneamente en varios países además de en Inglaterra: en Alemania en 1914, Stauss y Maurer estudian

y exaltan las propiedades de resistencia a la herrumbre y a los ácidos, de aceros que contenían cantidades considerables de cromo y níquel.

En Francia en 1917 se patentaron los aceros que contenían de 10 a 15% de cromo y 20 a 40% de níquel, como resultado de los trabajos realizados por Chevenard. Las características más importantes de estos aceros como la pasividad, fue estudiada mas tarde en Alemania con el fin de determinar el efecto del cromo sobre la corrosión, a través del desarrollo de una capa protectora, así como también se estudió el efecto de la influencia favorable del molibdeno.

Después de la segunda guerra mundial y gracias a la innovaciones técnicas en el sector siderúrgico (principalmente colada continua), se consiguió un gran aumento de la producción de acero inoxidable, con un abaratamiento en sus costos de producción y por lo tanto un precio mas bajo en el mercado. La figura 3.1 muestra la producción de acero inoxidable por continentes entre el año 2002 y 2007.

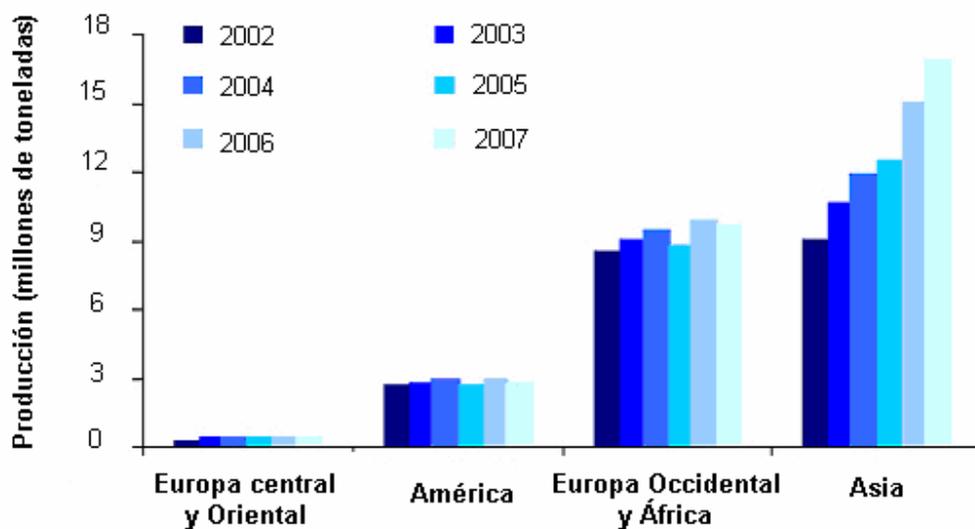


Figura 3.1 Producción mundial de acero inoxidable entre el año 2002 y 2007 [19].

3.2 DEFINICIÓN DE ACERO INOXIDABLE

Los aceros inoxidable son aleaciones base hierro, cromo, carbono, a los cuales se les añaden otros elementos, tales como níquel, molibdeno, manganeso, silicio y titanio, entre otros, que les confieren una buena resistencia a algunos tipos de corrosión en determinadas aplicaciones industriales. La presencia de cada elemento en determinados porcentajes produce distintas variaciones de las características intrínsecas de los diversos tipos. Según la norma EN 10088 se define a los aceros inoxidable como aquellas aleaciones férricas que contienen cromo en una proporción mínima del 10.5 % [20].

Esta característica de buena resistencia a la corrosión se debe a la capacidad de estas aleaciones de formar una capa pasiva que es una película adherente y estable de óxido de cromo (Cr_2O_3), también llamada cromita, que es la encargada de proteger el acero en un ambiente oxidante. Dicha película pasiva se vuelve a reconstruir cuando es dañada, si el ambiente es suficientemente oxidante, manteniendo una protección permanente del acero, como se muestra en la figura 3.2.

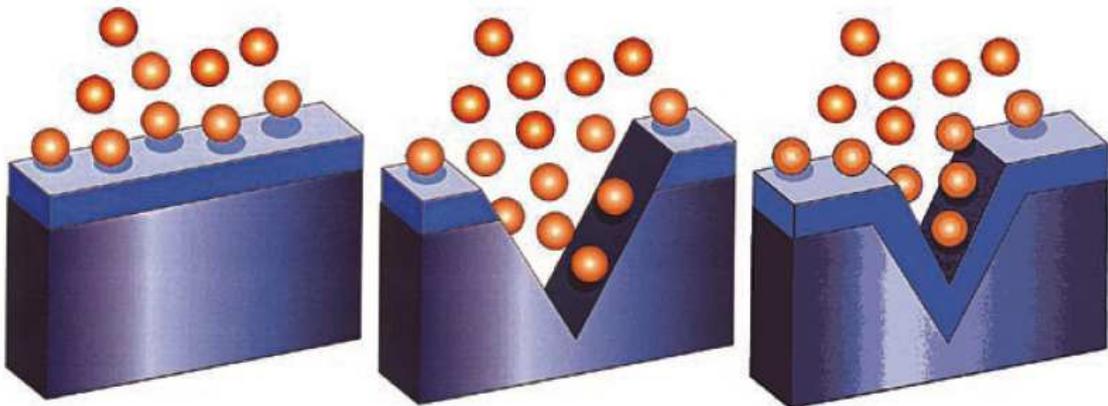


Figura 3.2 Si el acero inoxidable se corta o se daña, la capa pasiva se vuelve a formar en presencia del oxígeno del aire o el agua.

3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Existe una extensa variedad de aceros inoxidable, cada uno de los cuales posee propiedades para alguna aplicación específica, para mejorar sus características se les añaden algunos elementos:

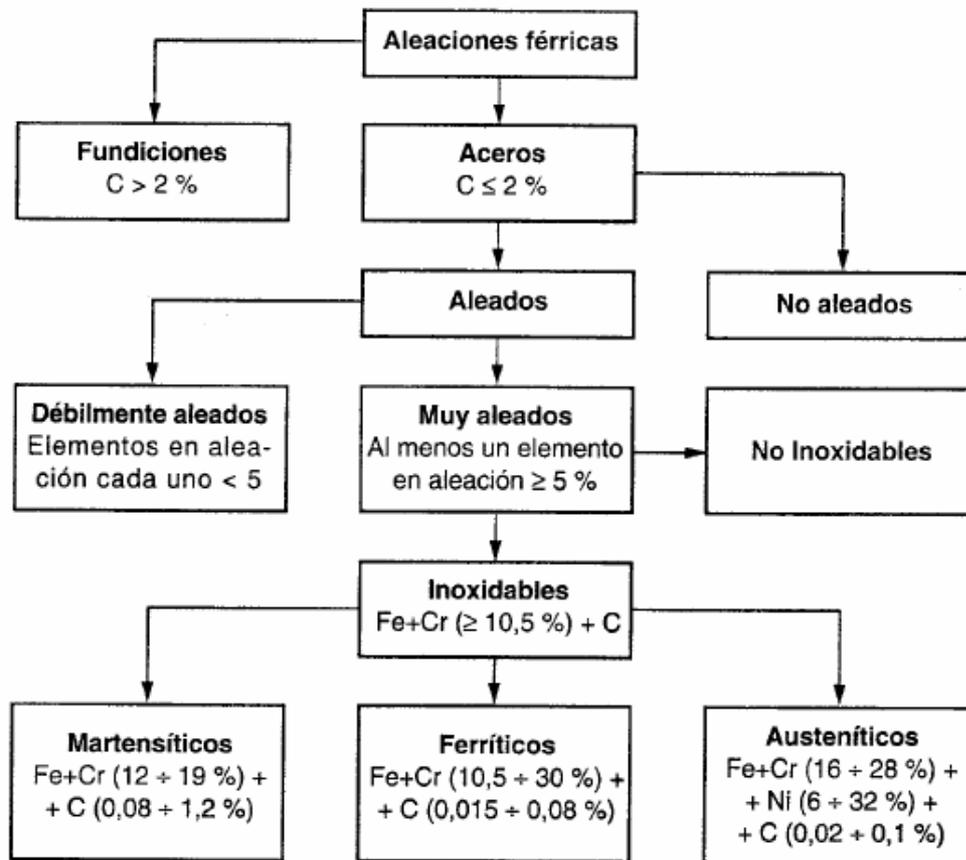
- a) Mayor resistencia a la corrosión: Cr, Ni, Ti y Mo.
- b) Mejorar la maquinabilidad: Se y S.
- c) Incrementar la dureza: Cu, Al y Mo.
- d) Aumentar la formabilidad y soldabilidad: Cr y Ni.
- e) Mejorar las características mecánicas: Mn, N y C.
- f) Disminuir la corrosión intergranular: Ti, Nb y Ta.

En ciertas aleaciones se disminuye el contenido de C para evitar problemas de corrosión al momento de aplicar soldadura.

La forma más común de clasificar a los aceros inoxidable es por la estructura cristalográfica o microestructura del material, se dividen en 5 familias:

- g) Austeníticos (FCC, por sus siglas en inglés).
- h) Ferríticos (BCC, por sus siglas en inglés).
- i) Martensíticos (Tetragonal centrada en el cuerpo).
- j) Doble fase o Dúplex (Austeno-ferríticos y Ferríticos-martensíticos).
- k) Endurecidos por precipitación (Base austenítica o martensítica).

La figura 3.3 representa el árbol genealógico de los aceros inoxidable, donde estos se encuentran en la parte inferior debido al alto grado de aleación.



Otros tipos: **Austeníticos** al Cr, Mn, Ni
Austeno-Ferríticos (Dúplex, Bifásicos o *Dual Phase*)
Endurecidos por precipitación (PH, *Precipitation Hardening*)

Figura 3.3 Árbol genealógico de los aceros inoxidable [20].

Entre las clasificaciones más consideradas en el área de los aceros inoxidable se encuentran la AISI (por sus siglas en inglés, American Iron and Steel Institute) y la SAE (por sus siglas en inglés, Society of Automotive Engineers). Según estas sociedades los aceros inoxidable se subdividen en las familias indicadas en la Tabla 1.

Clasificación de los aceros inoxidable según la AISI	
Designación de la serie	Grupos
2XX	Cr-Ni-Mn; no endurecibles, austeníticos, no magnéticos
3XX	Cr-Ni; no endurecibles, austeníticos, no magnéticos
4XX	Cr; endurecibles, martensíticos, magnéticos
4XX	Cr; no endurecibles, ferríticos, magnéticos
5XX	Cr; bajo cromo, resistentes al calor

Tabla 1. Clasificación de los aceros inoxidable según la AISI [21].

3.4 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ACERO INOXIDABLE

Como la definición de acero inoxidable se da por el porcentaje de cromo, que debe superar el 10.5%, el aumento de este porcentaje y la combinación con el níquel (figura 3.4) determinan la naturaleza y la proporción de las fases presentes y en consecuencia define el tipo del acero inoxidable [20].

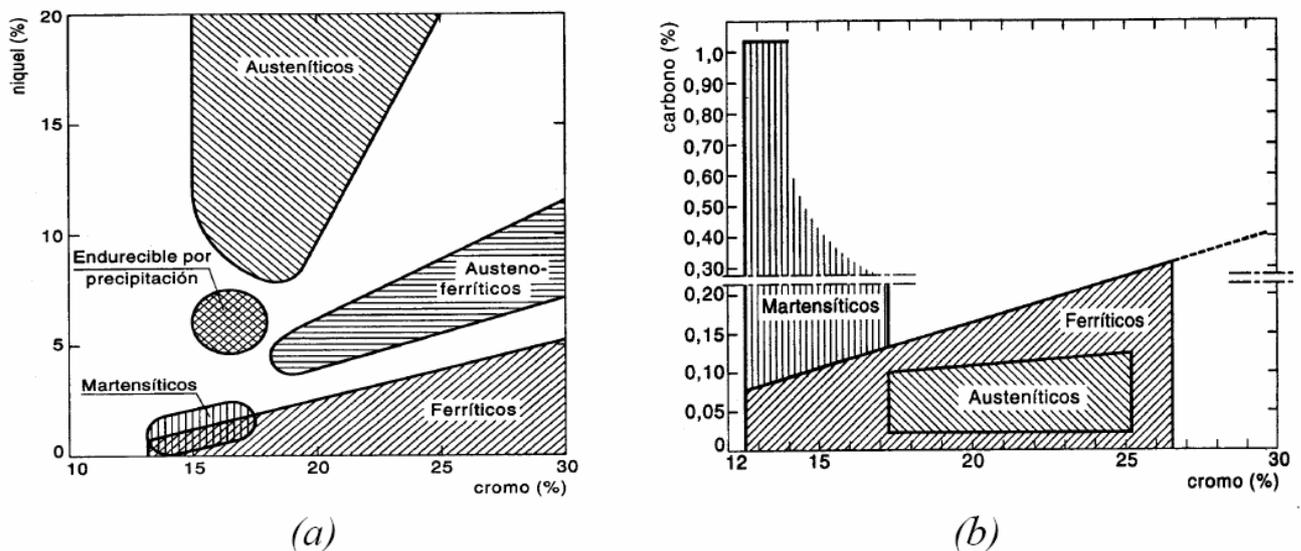


Figura 3.4 Tipos de familias de aceros inoxidable en función del contenido de (a) cromo y níquel, (b) cromo y carbono [20].

El cromo tiene la misma estructura cristalina que la ferrita (α), ambos son cúbicos centrados en el cuerpo (BCC) y es el elemento base en los aceros inoxidable. En el diagrama de equilibrio Fe-Cr que se muestra en la figura 3.5,

puede observarse que el Cr es un elemento que favorece la existencia de la fase ferrita (α) y que por lo tanto restringe la formación de la fase austenítica (γ), a un contenido de alrededor de un 12%. De manera semejante, otros elementos aleantes (por ejemplo Mo, Nb, Si, Al), pueden provocar el mismo efecto que el cromo, o por el contrario, pueden ayudar a la formación de la fase γ . El níquel, que tiene una estructura cúbica centrada en la cara (FCC), es el principal formador de la fase austenítica y de manera menos eficiente los son C, N, Mn y Co [21].

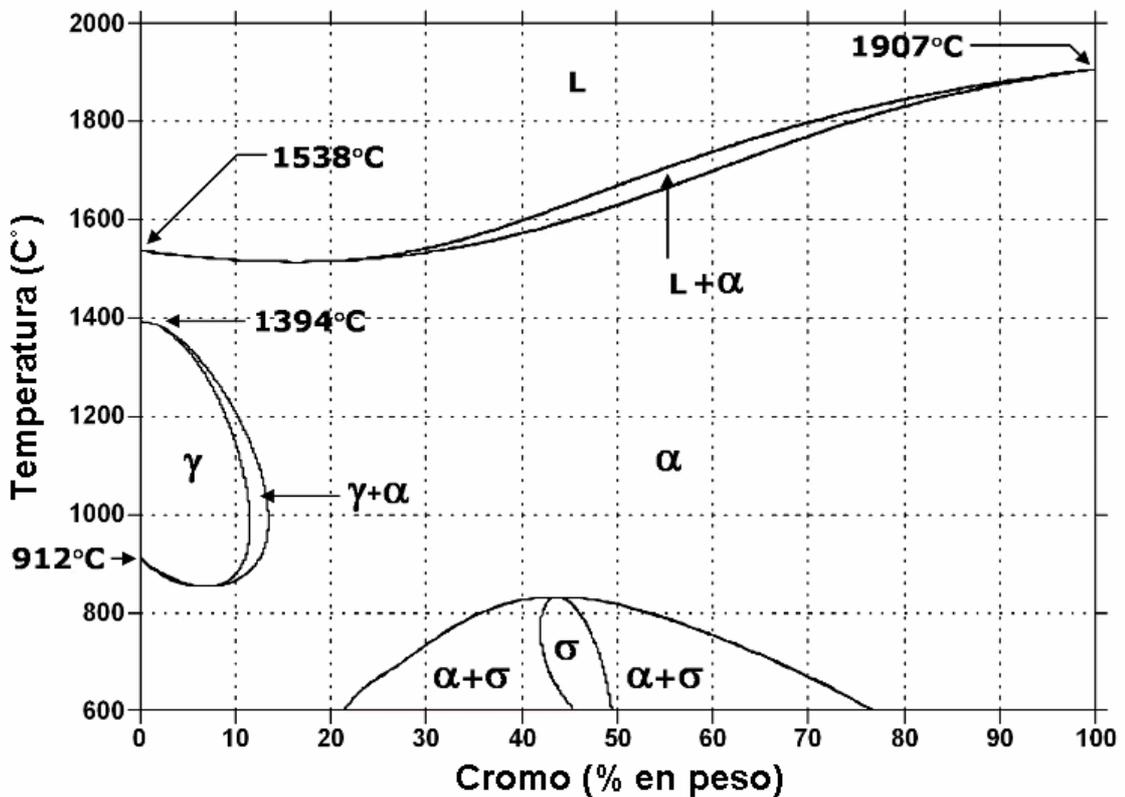


Figura 3.5 Diagrama de fases Fe-Cr [21].

El efecto en conjunto del Cr y Ni, los elementos principales mas importantes en un acero inoxidable, pueden apreciarse en la figura 3.6, que muestra la formación de diferentes fases al variar sus proporciones, manteniendo constante el contenido de hierro [21].

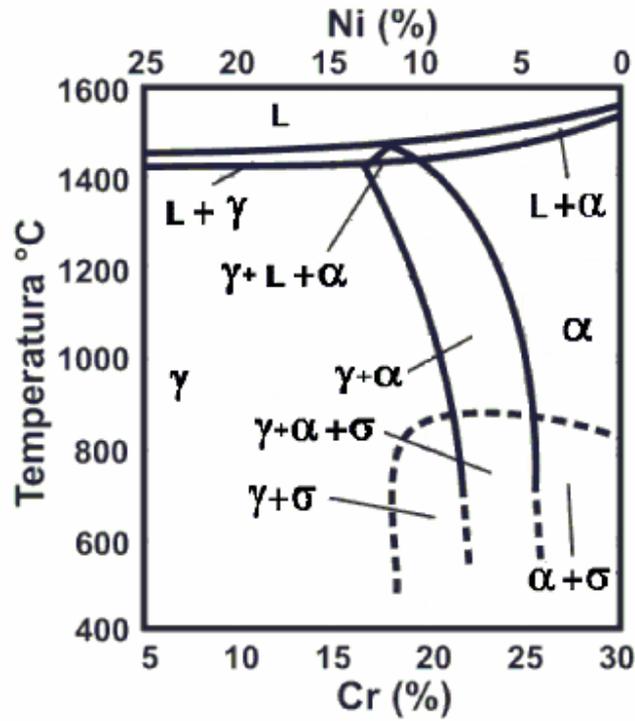


Figura 3.6 Sección vertical del diagrama de fases Fe-Cr-Ni a 70% en peso de Fe [21].

La contribución de los elementos formadores de austenita o ferrita se evalúa a partir de los denominados níquel y cromo equivalentes (Ni_{eq} y Cr_{eq} , respectivamente), calculados mediante:

$$\%Cr_{eq} = \%Cr + 5.5(\%Al) + 2(\%Si) + 1.75 (\%Nb) + 1.5 (\%Mo) + 1.5(Ti) \quad (3)$$

$$\%Ni_{eq} = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0.3(\%Cu) + 0.5(\%Mn) \quad (4)$$

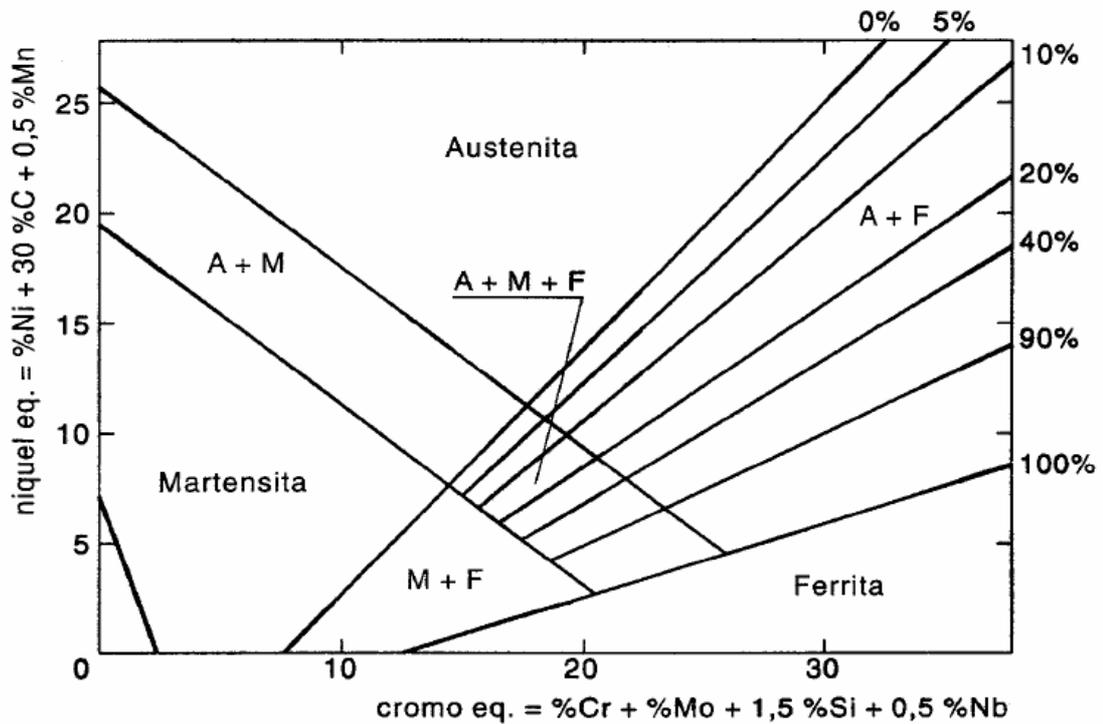


Figura 3.7 Representación esquemática del diagrama de Schaeffler [20].

El diagrama de Schaeffler fue obtenido de manera empírica, permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición química. Se puede observar que en el diagrama de Shaeffler no se encuentra la presencia de titanio (elemento estabilizador de la ferrita), ni el nitrógeno (elemento estabilizador de la austenita). El nitrógeno ha sido agregado en el diagrama de De Long y tiene como efecto reducir el intervalo del Cr_{eq} a 18-26% y del Ni_{eq} a 12-24%.

En el Apéndice A se muestra la composición nominal de los aceros inoxidables, de acuerdo a la designación del Instituto de Aleación de Fundición (Alloy Casting Institute).

3.5 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

El contenido de cromo en estos aceros varía entre el 16 y el 26%; los contenidos de níquel y manganeso pueden alcanzar los niveles de 35 y 16% respectivamente. La estructura austenítica en estos aceros se estabiliza a temperatura ambiente por medio de la adición de elementos como el níquel, manganeso y nitrógeno. No son ferromagnéticos en su condición de recocido y sólo se endurecen por trabajado. Sus características criogénicas son excelentes y exhiben una buena resistencia mecánica a altas temperaturas [22]. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinar, a menos que contengan S y Se, además pueden endurecerse agregando C y N [21].

La familia de los aceros austeníticos se divide en dos grupos [20]:

a) Aceros austeníticos al cromo-manganeso-níquel, designados por un número de tres cifras que comienza con la cifra 2, conocidos como la serie 200 (ver Tabla 1), que se caracteriza por una alta resistencia mecánica, debida a la presencia del azufre y el manganeso, en el que las dos últimas cifras dependen de otros elementos.

b) Aceros austeníticos al cromo-níquel, designados por un número 3, serie 300 (ver Tabla 1), que tiene como composición básica 12% Cr y 8% de Ni, siendo la gama de aceros con más éxito a nivel comercial. Para esta serie la composición química se modifica según el tipo de uso del material añadiendo o reduciendo elementos tales como el carbono y/o el nitrógeno y/o modificando el balance níquel/cromo.

Los aceros de la serie 200 adquieren sus características austeníticas por medio de la adición de nitrógeno y manganeso (entre 4 y 16%), en tanto que el níquel se limita por debajo del 7%. Los aceros de la serie 300 contienen altos niveles de níquel y hasta un 2% de manganeso. Se añaden elementos como molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio para mejorar la resistencia a la corrosión por haluros, picaduras o mejorar su resistencia a la oxidación. No son

ferromagnéticos en su condición de recocido y sólo pueden ser endurecidos por trabajado en frío [22].

Los valores al límite elástico, de fluencia o cedencia (σ_y) de los aceros austeníticos de la serie 300 son comparables a los de los aceros de bajo carbono. Los valores típicos de σ_y en la condición de recocido varían entre 200 y 280 MPa, la resistencia mecánica varía de 500 a 750 MPa y exhiben elongaciones del 40 al 60%. Los valores de σ_y en aceros al manganeso pueden variar de 350 a 500 MPa [22]. Estos aceros no son susceptibles a ser endurecidos por medio de tratamiento térmico, pero exhiben endurecimiento por trabajado mecánico [21].

Los aceros tipo AISI 302 (17% Cr, 8% Ni) y AISI 304 (18% Cr, 8% Ni) se consideran aleaciones básicas de los aceros inoxidable austeníticos. La composición particular de estos aceros debido al contenido mínimo de níquel (por lo tanto un menor costo) requerido para retener la fase γ a temperatura ambiente; de manera que para bajos o altos contenidos de Cr la adición de mas níquel es requerido. Por ejemplo, para mayor resistencia a la corrosión, es diseñado un acero con 25% Cr, pero necesita alrededor de un 15% de Ni para retener la austenita a temperatura ambiente y esto significa un costo mas alto [21].

En la figura 3.8 se muestran las modificaciones realizadas partir del acero AISI 304, formando una familia de aleaciones con diferentes propiedades mecánicas según su aplicación. Por ejemplo el acero AISI 201 es una versión con menor contenido de Ni y con mayor contenido de Mn y N, lo que mejora sus características mecánicas pero disminuye la resistencia a la corrosión y el caso del AISI 309 en el que se incrementa el porcentaje del contenido de Cr y de Ni mejorando sus propiedades mecánicas y a su vez la resistencia a la oxidación. De igual manera se parte de la composición química del acero inoxidable tipo

304 para llegar a otras familias de aceros inoxidable como son los dúplex y los endurecidos por precipitación.

Algunos sulfuros pueden estar presentes en aceros inoxidable como impurezas (0.03%) o como una adición intencional para mejorar su maquinabilidad (AISI 303) usualmente a un nivel de 0.3%. Los sulfuros que son predominantes son sulfuros de manganeso, pero también pueden ser de cromo, son generalmente perjudiciales para la resistencia a la corrosión en todos los grados de acero inoxidable, no solamente los austeníticos [21].

En aplicaciones para resistencia a la corrosión es necesario el control del contenido de carbono por debajo de 0.08% (AISI 304 y 316). Cuando estos aceros se soldan se deben tomar precauciones adicionales y frecuentemente se especifican valores de carbono inferiores a 0.03% [23]. En este trabajo de tesis se estudian los aceros inoxidable AISI 304L y 316L (austeníticos), donde la letra L es la abreviatura de Low Carbon (bajo carbono).

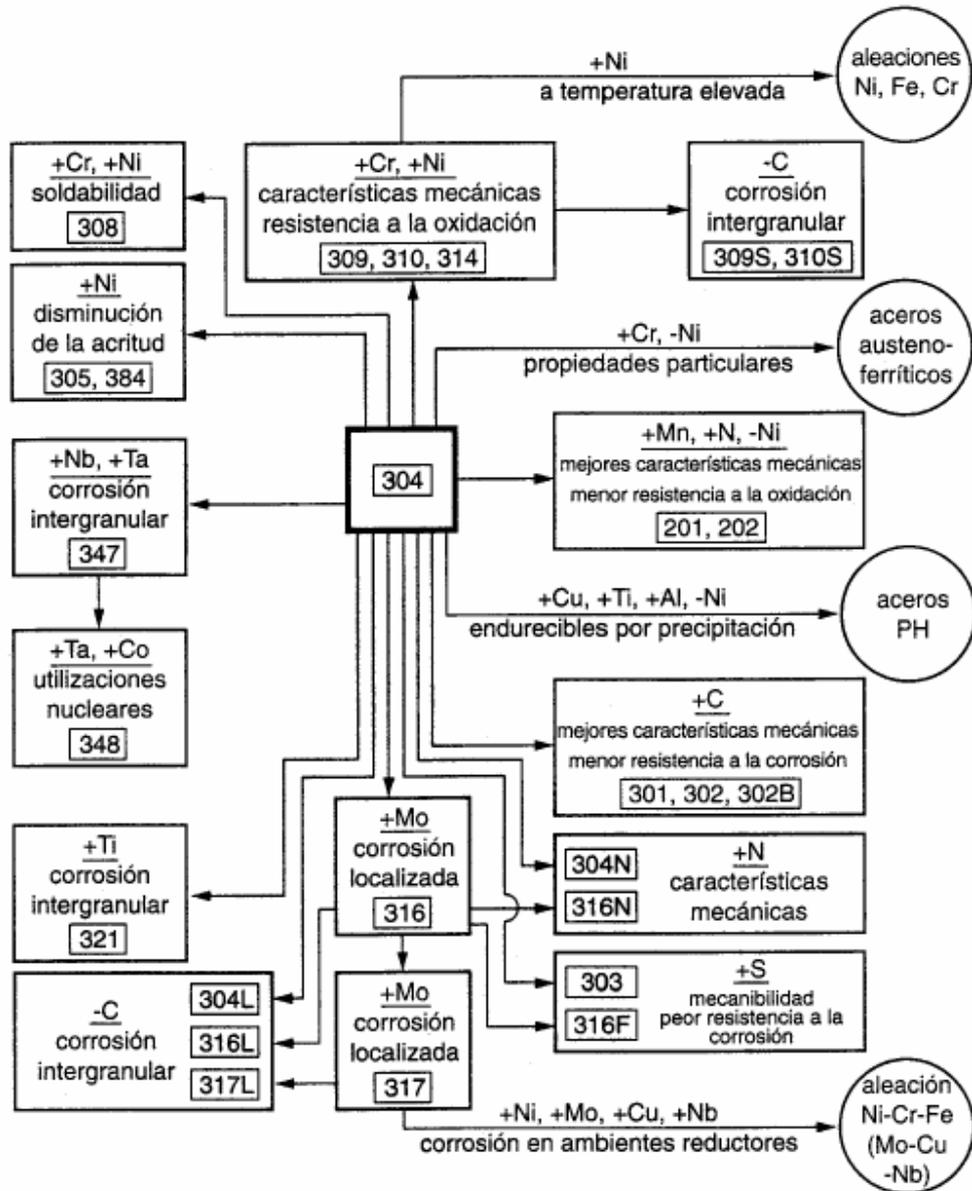


Figura 3.8 Familia de los aceros inoxidables austeníticos evolucionados a partir de AISI 304 para la obtención de determinadas propiedades [20].

3.6 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

Los aceros inoxidable ferríticos son esencialmente aleaciones hierro-cromo de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y son ferromagnéticos. El contenido de cromo se mantiene por encima de 10.5% para asegurar la formación de la capa de cromita y pueden contener hasta un 30% de este elemento. Algunos grados están aleados con molibdeno, silicio, aluminio, titanio o niobio con la finalidad de obtener características específicas. Estos aceros exhiben una ductilidad aceptable y son formados con relativa facilidad, sin embargo, su resistencia a alta temperatura es pobre comparada con la de algunos grados austeníticos. La tenacidad de los aceros ferríticos se ve limitada a bajas temperaturas y en secciones gruesas. Estos aceros no son susceptibles a ser tratados térmicamente, ni se ofrecen en condición de endurecidos por trabajado en frío, dada la pobre tasa de consolidación de la ferrita, y que el trabajado en frío reduce la ductilidad del material [22].

Se llama ferríticos toda vez que su estructura permanece en mayor parte ferrítica en condiciones normales de tratamiento térmico. El contenido de Cr y la presencia de los estabilizadores de la fase α en estos aceros hace que predomine la región de esta fase. En el calentamiento los aceros ferríticos no experimentan la transformación de BCC a FCC y durante el enfriamiento pasan por soluciones sólidas de cromo en hierro- α ; por lo que se transforman en martensita y solamente pueden ser endurecidos moderadamente por trabajo en frío. Los aceros inoxidable ferríticos son relativamente bajos en costo, ya que no contienen Ni y se usan como materiales de construcción en los que se requiere en especial resistencia al calor y a la corrosión [21].

Aceros ferríticos con la cifra 4 (ver Tabla 1), que representan la familia 400 en el que las dos últimas cifras dependen de los otros tipos de elementos. El contenido de C esta por encima de 1.2%. Se añade también Nb, Si, W y V. Pequeñas cantidades de Ni mejoran la resistencia a la corrosión. Se añaden S y Se para mejorar el maquinado [20,22].

El esfuerzo de fluencia de estos aceros en su condición de recocido varía de 240 a 380 MPa y su resistencia a la tensión fluctúa entre los 400 y 600 MPa. La ductilidad se encuentra en el intervalo de 20 a 35%. Es factible alcanzar mayores valores de fluencia y resistencia mecánica, 510 y 660 MPa respectivamente, mediante el incremento en el uso de aleantes [22].

Su ventaja comparativa con los inoxidable austeníticos es su inmunidad a la corrosión bajo tensión (especialmente en cloruros a alta temperatura). Se les suele usar en tubos de pared delgada de intercambiadores de calor donde se presenta este problema, por ejemplo en las plantas de procesamiento de petróleo o gas natural. El aumento de la temperatura disminuye el problema de falta de tenacidad y ductilidad [23].

Los aceros con contenidos de cromo de entre 10.5 y 12% exhiben una moderada resistencia a la corrosión y oxidación, pero son de bajo costo y fáciles de fabricar, tal como es el caso del acero AISI 409 usado extensivamente en la fabricación de convertidores catalíticos en automóviles. El acero AISI 430 resiste ácidos orgánicos oxidantes moderados y se emplea en utensilios de cocina y en la manufactura de monedas [22].

3.7 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

Los aceros martensíticos son aleaciones de hierro, cromo y carbono de estructura tetragonal centrada en el cuerpo. El contenido de cromo en estos aceros fluctúa entre 10.5 y 18%, el carbono, necesario para producir martensita y el contenido de este elemento puede exceder el 1% en peso, son ferromagnéticos a temperatura ambiente y al contrario de los aceros ferríticos y austeníticos, pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, estos son muy similares a los efectuados en los aceros grado maquinaria. Su resistencia a la corrosión es pobre. Es común añadir niobio, silicio, tungsteno y vanadio para mejorar la respuesta al revenido. Algunos grados contienen pequeñas

cantidades de níquel para mejorar la resistencia a la corrosión. Otros grados contienen adiciones de azufre o selenio para mejorar su maquinado [22].

Puesto que la composición de los aceros inoxidable martensíticos se ajusta para optimizar su resistencia y dureza, la resistencia a la corrosión de estos aceros es relativamente pobre comparada con la de los aceros ferríticos y austeníticos. Estos pueden mejorar su resistencia a la corrosión cuando han sido templados y pulidos. Los aceros inoxidable martensíticos pueden trabajarse en frío y en caliente sin dificultad, se maquinan fácilmente, tienen buena tenacidad y buena resistencia a la corrosión atmosférica y a algunos agentes químicos [21].

Aceros martensíticos con la cifra 4 (ver Tabla 1), que representan la familia 400 en el que las dos últimas cifras dependen de los otros tipos de elementos. El contenido de C está por encima de 1.2%. Se añade Nb, Si, W y V para mejorar la respuesta al revenido. Pequeñas cantidades de Ni mejoran la resistencia a la corrosión. Se añaden S y Se para mejorar el maquinado [20,22].

En este trabajo de tesis se estudia al acero inoxidable AISI 410S (martensítico), donde la letra S, representa una modificación al AISI 410 que indica un contenido menor de carbono (0.08%) y la adición de níquel (0.6%).

El esfuerzo de cedencia (σ_y) en la condición de recocido del acero martensítico 410 es de 276 MPa y puede incrementarse por trabajado en frío. Sin embargo, con un adecuado tratamiento de temple y revenido puede alcanzar valores cercanos a los 1500 MPa. La dureza se incrementa en forma similar de 82 Rockwell B de recocido a 52 Rockwell C después del tratamiento. Los aceros con mayores contenidos de aleación incrementan sus propiedades aún más [22].

Se recomienda el uso de estos aceros cuando se requiere una alta resistencia mecánica, a la fluencia y en fatiga en ambientes ligeramente agresivos de hasta 650°C. El acero AISI 410 es el más común y se utiliza en turbinas de gas, intercambiadores de calor. Los aceros de los tipos AISI 420 y 440 se utilizan en cuchillerías, válvulas, levas y rodamientos. El AISI 416

contiene azufre para facilitar el maquinado. Los aceros AISI 440A, B y C contienen altos niveles de cromo que aseguran su resistencia a la corrosión y contrarrestan la pérdida de éste elemento que forma parte de los carburos [22].

En la figura 3.9 se muestra la fotomicrografía de un acero inoxidable martensítico AISI 410 templado a 1000 °C y revenido a 200 °C por una hora, atacado químicamente mediante el reactivo Vilella, la fase clara es ferrita y la oscura martensita.

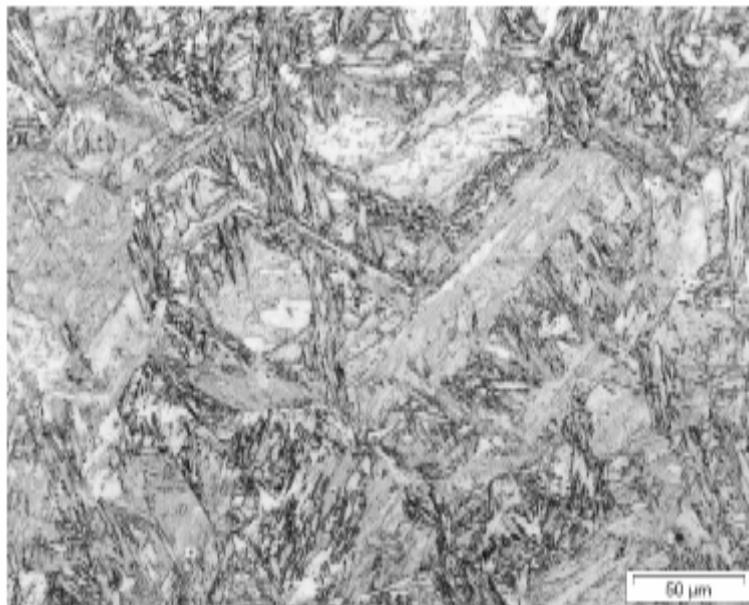


Figura 3.9 Fotomicrografía de un acero inoxidable martensítico AISI 410 templado a 1000 °C y revenido a 200 °C por una hora, atacado químicamente mediante el reactivo Vilella, la fase clara es α y la oscura martensita [24].

3.8 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Los aceros dúplex están constituidos por mezclas de ferrita y austenita, la cantidad de cada fase depende de la composición química del acero y del tratamiento térmico impartido, aunque los aceros se procesan para tener igual cantidad de ambas fases en su condición de recocido. Los principales aleantes son el cromo y níquel, aunque se adiciona nitrógeno, cobre, molibdeno, silicio y

tungsteno para balancear la microestructura y asegurar la resistencia a la corrosión [22].

La cantidad exacta de cada fase puede ser variada con la introducción de otros estabilizadores de α o γ . El límite elástico de estas aleaciones es muy variado, tiene tamaño de grano muy fino, son muy maleables, su resistencia a la corrosión es casi la misma que la de los aceros inoxidable austeníticos y tienen buena soldabilidad. Las principales desventajas son la dificultad de trabajarlos en caliente y a la susceptibilidad al desarrollo de las fases α' y σ , las cuales son indeseables debido a que son muy frágiles [21].

Los aceros dúplex son usados en una amplia gama de industrias, entre ellas la petrolera, la petroquímica, la de producción de papel y en aquellas dedicadas al control de la contaminación. Son ampliamente usados en ambientes acuosos con iones de cloro como reemplazo de grados austeníticos afectados por cloruros, corrosión o picado. Los grados con mayor aleación, conocidos como súper dúplex resisten el agua marina oxigenada o clorada [22].

En la figura 3.10 se muestra la fotomicrografía de un acero inoxidable dúplex AISI 329 envejecido durante 48 horas a 816 °C, atacado químicamente mediante 20% NaOH y 80% H₂O a 3 V cd por 10 segundos, se observa γ en color blanco, σ aparece en naranja y la otra fase presente es α .

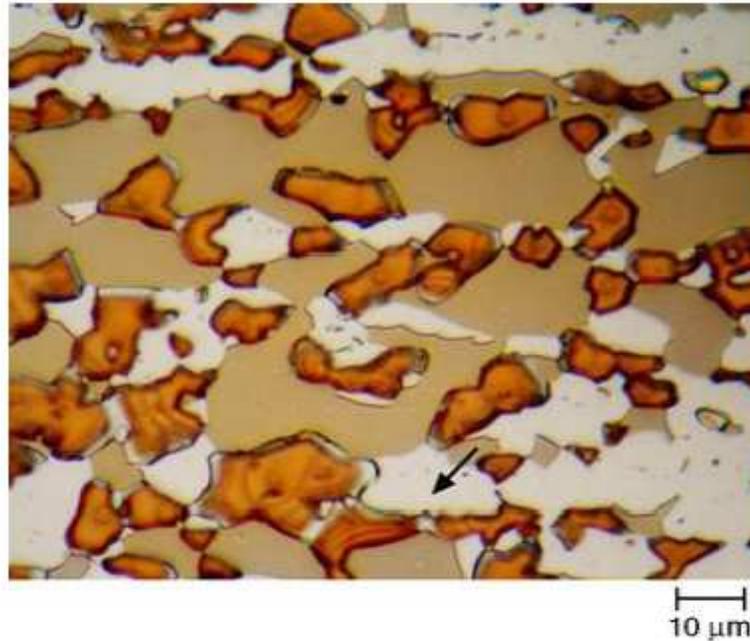


Figura 3.10 Fotomicrografía de un acero inoxidable dúplex AISI 329 envejecido durante 48 horas a 816 °C, atacado químicamente mediante 20% NaOH y 80% H₂O a 3 V cd por 10 segundos, la flecha señala la fase γ en color blanco, σ aparece en naranja y la otra fase presente es α [24].

3.9 ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN

Los aceros endurecidos por precipitación son aleaciones hierro-cromo-níquel caracterizadas por su alta resistencia mecánica. Los altos valores de resistencia y dureza, se obtienen por medio de la precipitación de partículas complejas formadas por la reacción de cobre, aluminio, titanio, niobio o molibdeno, ya sea en una matriz austenítica o martensítica. Estos aceros se clasifican en martensíticos, semiausteníticos y austeníticos, en base a la microestructura resultante de los tratamientos térmicos de solubilización, temple y envejecimiento [22].

El proceso de endurecimiento por precipitación involucra la formación de fases intermetálicas muy finas, como $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, carburos y sulfuros; por medio de un envejecido muy prolongado, que impide el movimiento de dislocaciones y

planos de deslizamiento durante la deformación dando una elevada resistencia al material. En el endurecimiento por precipitación generalmente resulta una ligera reducción en la resistencia a la corrosión y un incremento en la susceptibilidad a fragilización por hidrógeno [21].

Los aceros de este tipo ofrecen propiedades mecánicas comparables a las de los martensíticos; el esfuerzo de cedencia varía entre 500 y 1400 MPa, la resistencia mecánica entre 850 y 1500 MPa con elongaciones del 1 a 25%, con la ventaja de que éstas se obtienen en aceros con carbono por debajo del 0.1%. El nivel de aleación y las características de estos aceros les permite ser ampliamente utilizados en industrias del tipo aeroespacial y de alta tecnología [22].

En la figura 3.11 se muestra la fotomicrografía de un acero inoxidable endurecido por precipitación AISI 17-4 PH sometido a un proceso de recocido y envejecido, atacado químicamente mediante superpicral y revela los límites de grano, las fases presentes son ferrita en una matriz martensítica.

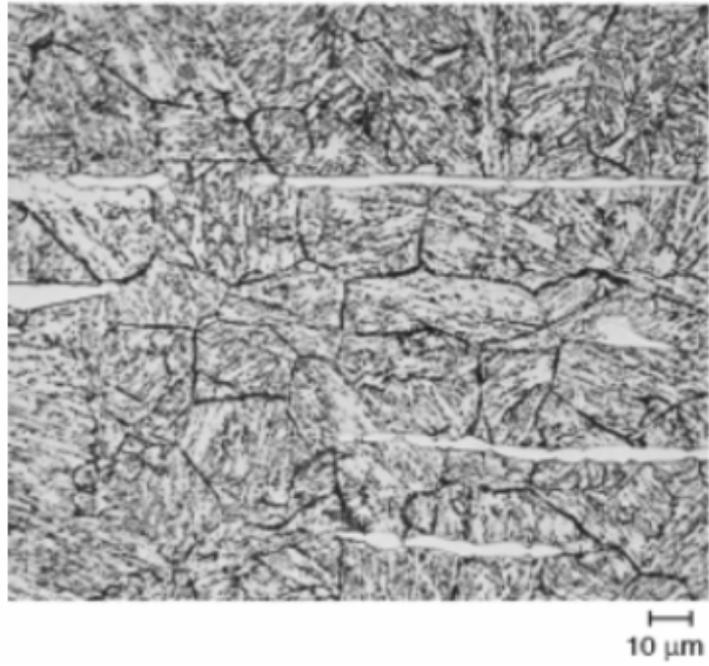


Figura 3.11 Fotomicrografía de un acero inoxidable endurecido por precipitación AISI 17-4 PH sometido a un proceso de recocido y envejecido, atacado químicamente mediante superpicral y revela los límites de grano, las fases presentes son ferrita en una matriz martensítica [24].

CAPÍTULO 4

PROCESOS DE CONFORMADO

*El conocimiento es sólo una de las representaciones de la existencia.
José Vasconcelos*

4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CONFORMADO

El formado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas, la deformación resulta del uso de una herramienta para formar metales.

Los procesos de conformado de metales se pueden clasificar en:

- a) Proceso de deformación volumétrica.
- b) Procesos de trabajo de láminas metálicas.

Los procesos de conformado por deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y cambios de forma, y la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. La forma de trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares [25, 26].

Las operaciones básicas de conformado por deformación volumétrica son:

- a) Laminado.
- b) Forjado.
- c) Extrusión.

d) Trefilado.

Los procesos de conformado en láminas metálicas son operaciones de formado o preformado de laminas, tiras o rollos. La relación que existe entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta [25].

Las operaciones básicas de conformado en láminas son:

- a) Operaciones de corte
- b) Doblado.
- c) Embutido.
- d) Estampado.

4.2 LAMINADO

El laminado es un proceso de deformación en el cual el espesor de un material se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por rodillos opuestos, estos giran para jalar el material y simultáneamente comprimirlo entre ellos, como se muestra en la figura 4.1 [25, 26].

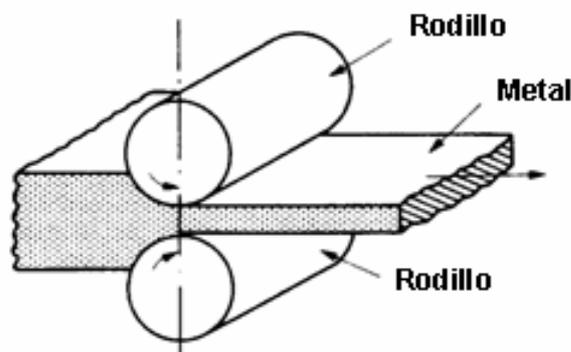


Figura 4.1 Proceso de laminación.

La mayoría de los procesos de laminado se realizan a alta temperatura debido a la cantidad de deformación requerida y recibe el nombre de laminado en caliente. Los metales laminados en caliente generalmente están libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas.

Los procesos de laminado requieren piezas de equipo pesado llamadas molinos de laminación y la aplicación mas común es la fabricación de acero.

4.3 FORJADO

El proceso de forjado se comprime una material de trabajo entre dos dados opuestos, de manera que la forma del dado se imprima para obtener el trabajo requerido [25].

El forjado en caliente es cuando la deformación se efectúa por encima de la temperatura de recristalización. Se conoce como forjado en frío al que se realiza por debajo de estas condiciones y no necesariamente a temperatura ambiente [27].

Existen tres tipos de operaciones de forjado:

- a) Forjado de dado abierto: es en el que el material se comprime entre dos dados planos, permitiendo que el metal fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a las superficies del dado.
- b) Forjado de dado impreso: es en el que las superficies del dado contienen una forma o impresión que se imparte al material durante la compresión, restringiendo el flujo del metal, en esta operación una parte del material fluye más allá del dado impresor formando una rebaba.
- c) Forjado sin rebaba: proceso en el que el dado restringe completamente el material dentro de la cavidad y no se produce rebaba excedente, es necesario controlar el volumen del material inicial para que se iguale al volumen de la cavidad del dado.

En la figura 4.2 se muestran los diferentes tipos de procesos de forja.

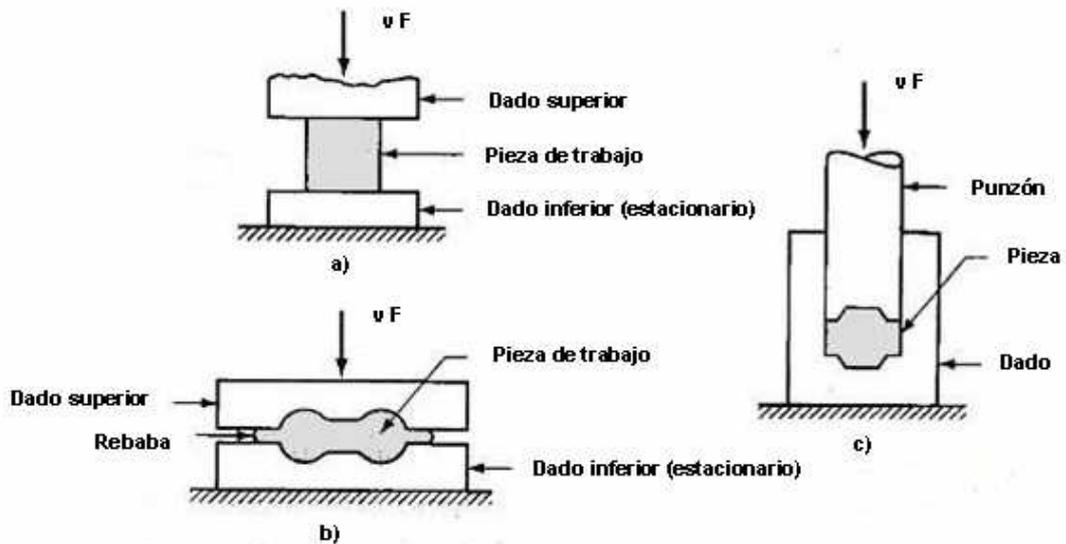


Figura 4.2 Procesos de forja: (a) dado abierto, (b) dado impreso y (c) sin rebaba.

4.4 EXTRUSIÓN

Extrusión es un proceso de compresión en el cual el metal es forzado a fluir a través de un dado para que tome la forma de la abertura de éste en su sección transversal [25].

Tipos de operaciones de extrusión:

- Extrusión directa: es en la que un tocho de metal se carga en un recipiente y una herramienta llama pisón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o mas aberturas de un dado al extremo opuesto del recipiente.
- Extrusión indirecta: es aquella en la que el dado está montado sobre el pisón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente, el metal es forzado a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pisón

La figura 4.3 muestra los diferentes procesos de extrusión.

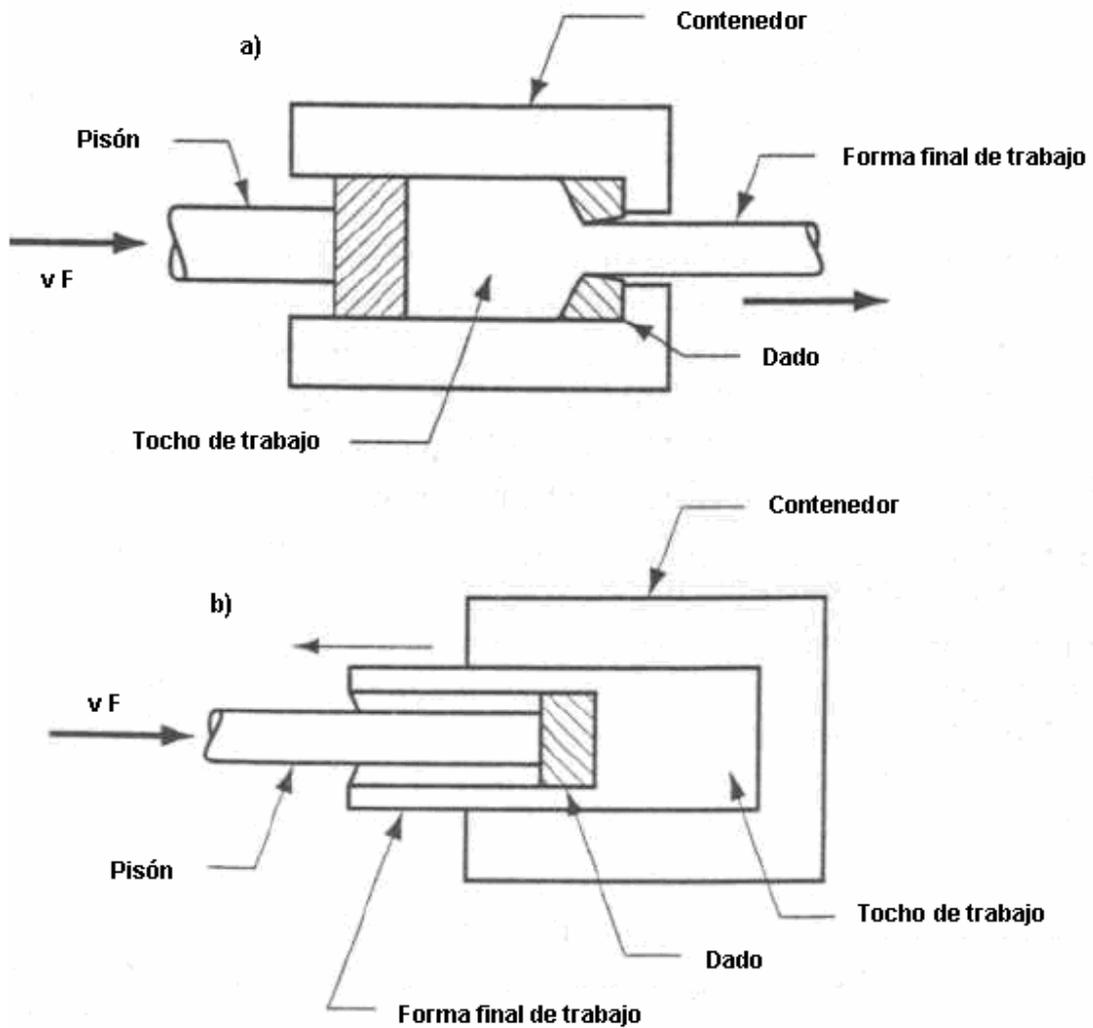


Figura 4.3 Procesos de extrusión: (a) directa y (b) indirecta.

La extrusión en caliente involucra el calentamiento previo del tocho a una temperatura por encima de la de cristalización. La extrusión en frío se utiliza para producir partes frecuentemente en forma terminada o en materiales muy suaves y dúctiles.

4.5 TREFILADO

El trefilado es un proceso de conformado en el cual el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira del material a través de un dado. Las características generales del proceso son similares al proceso de extrusión, la diferencia es que en el trefilado el material se jala a través del dado, mientras que en la extrusión se empuja. La diferencia básica entre el trefilado de barras (diámetro grande) y el trefilado de alambre (diámetro pequeño), es el tamaño del material que se procesa [25].

4.6 OPERACIONES DE CORTE

El proceso de corte no es propiamente un proceso de conformado, debido a que implica más el corte que el formado del metal, se incluye debido a que es una operación necesaria y muy común en el trabajado de laminas. En esta operación se corta la pieza usando un punzón y un dado.

Los métodos de corte más comunes son [25]:

- a) Cizallado: es la operación de corte de una lámina a lo largo de una línea recta entre dos bordes de corte, este proceso es utilizado generalmente para reducir grandes laminas a secciones más pequeñas para operaciones posteriores de conformado.
- b) Punzonado: implica el corte de una lámina a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza de material circundante. La parte que es cortada es el producto deseado de la operación.
- c) Perforado: es un proceso muy similar al punzonado, excepto que la pieza que se corta se desecha y se le llama pedacearía. El material remanente es la parte deseada.

La figura 4.4 muestra las operaciones de corte.

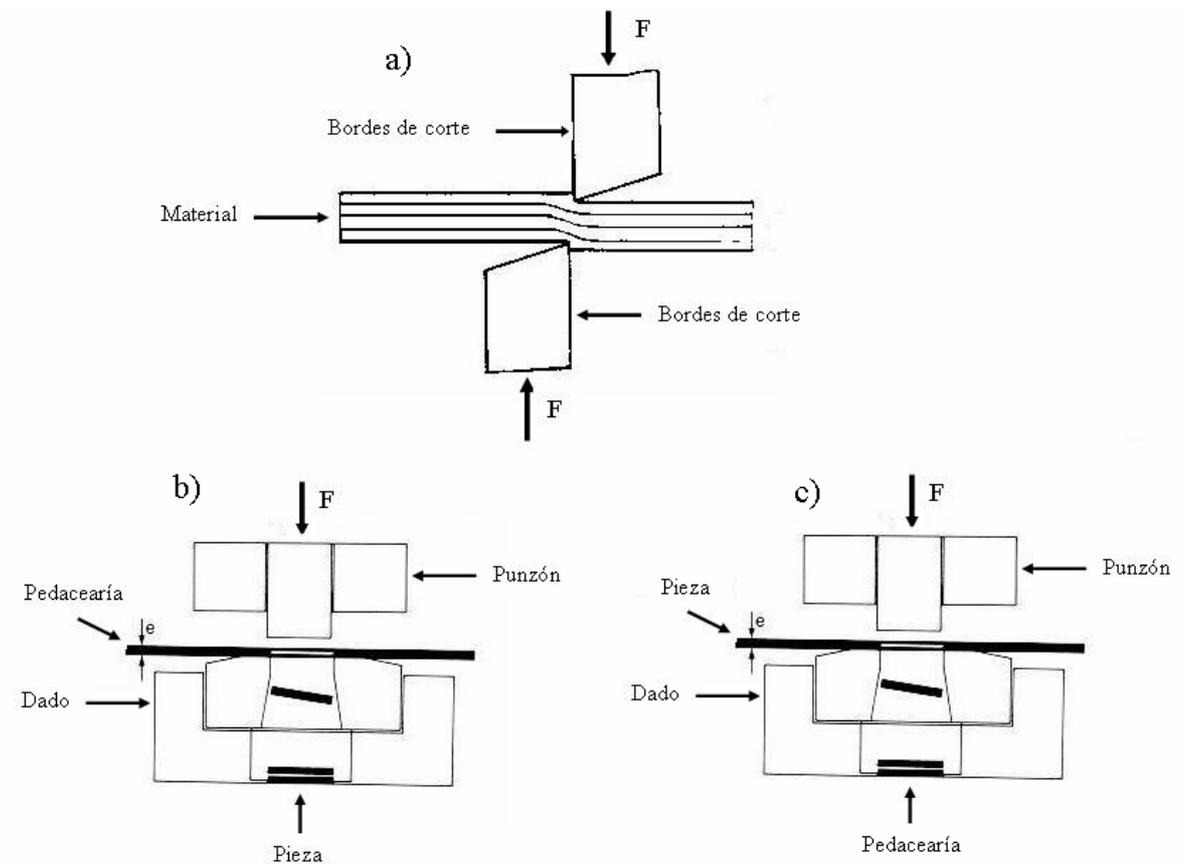


Figura 4.4 Operaciones de corte: a) cizallado, b) punzonado y c) perforado.

4.7 DOBLADO

El doblado es un proceso que implica la deformación de una lámina o placa para que adopte un ángulo con respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos. Durante la operación de doblado, la cara dentro del plano neutral se comprime, mientras que la cara por fuera de este plano se estira, así como se muestra en la figura 4.5. Este proceso produce muy poco o ningún cambio en el espesor de la lámina metálica [25].

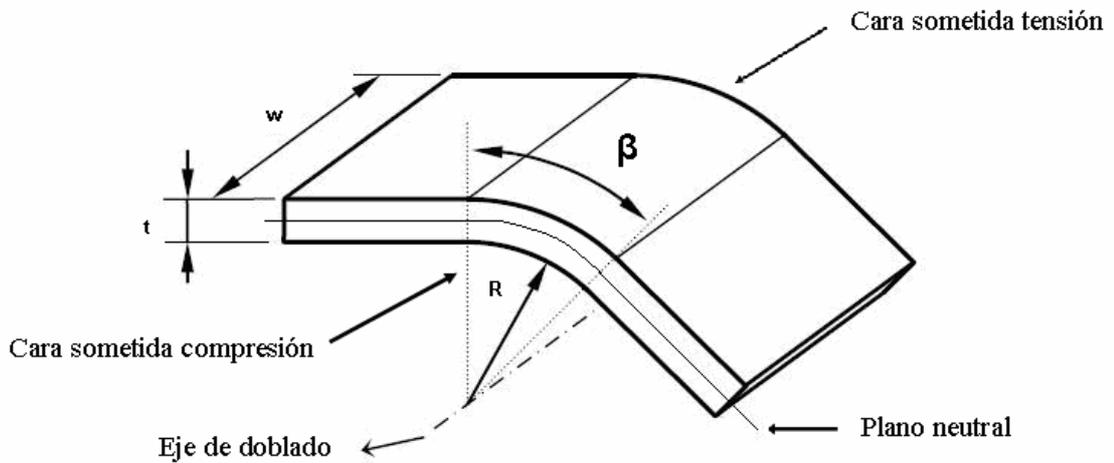


Figura 4.5 Proceso de doblado.

Los métodos de doblado más comunes son [26]:

- a) Doblado en V: en este método la lámina es doblada entre un punzón y un dado en forma de V, con este tipo de dados se pueden conseguir ángulos que varían desde los muy obtusos hasta los muy agudos.
- b) Doblado al aire: involucra una carga voladiza sobre la lámina, se utiliza una placa de presión que aplica una fuerza de sujeción para sostener la base de la pieza contra el dado, mientras el punzón dobla la parte volada sobre el borde del dado.

La figura 4.6 muestra los diferentes métodos de doblado

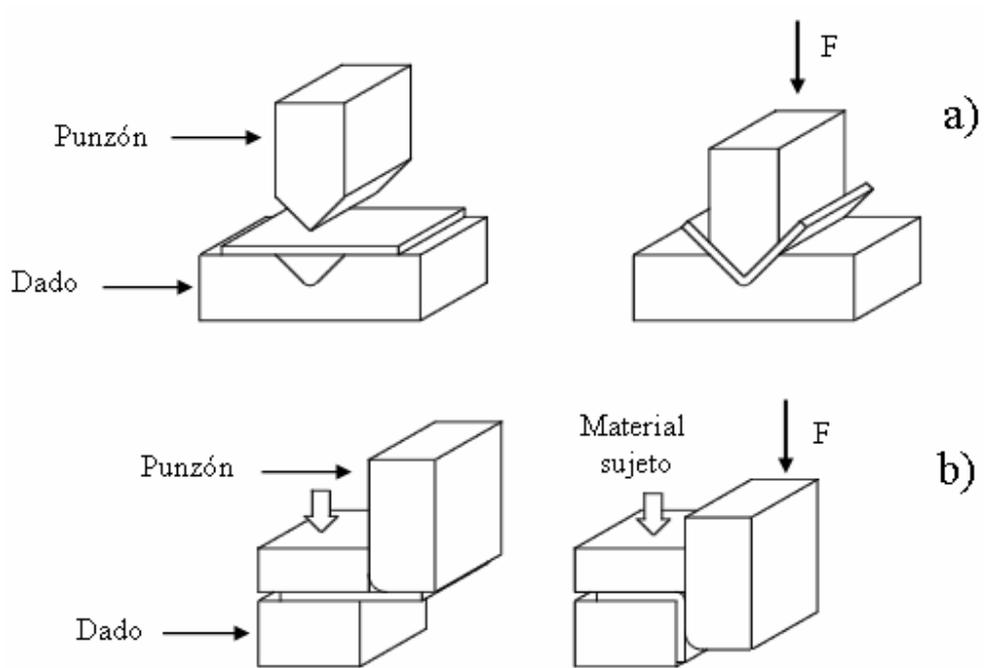


Figura 4.6 Métodos de doblado: a) doblado V y b) doblado al aire.

4.8 EMBUTIDO

El proceso de embutido se refiere a la transformación de una lámina para hacer piezas en forma de copa, caja y otras formas huecas más complejas mediante el estirado de un metal. Se realiza colocando una lámina sobre un dado, fijándola con un anillo y empujando el metal hacia la cavidad de este con un punzón, como se muestra en la figura 4.7 [28].

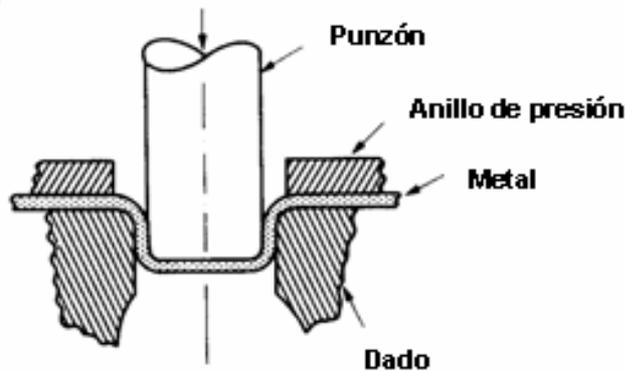


Figura 4.7 Proceso de embutido.

Durante el embutido la pieza experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar gradualmente la forma definida del punzón y la cavidad del dado.

Las etapas del proceso de embutido son [25]:

- a) Doblado: cuando el punzón empieza a doblar somete al material a una operación de doblado. La lámina es doblada simplemente sobre la esquina del punzón y la esquina del dado.
- b) Enderezado: a medida que el punzón avanza, ocurre una acción de enderezado del metal para que este puede introducirse dentro del claro y formar la pared de la pieza.
- c) Compresión: cuando el metal de las pestañas se estira hacia el centro, el perímetro exterior se hace menor, debido a que el volumen del material permanece constante, el metal se comprime y se hace más grueso.

En la figura 4.8 se muestran las etapas del proceso de embutido.

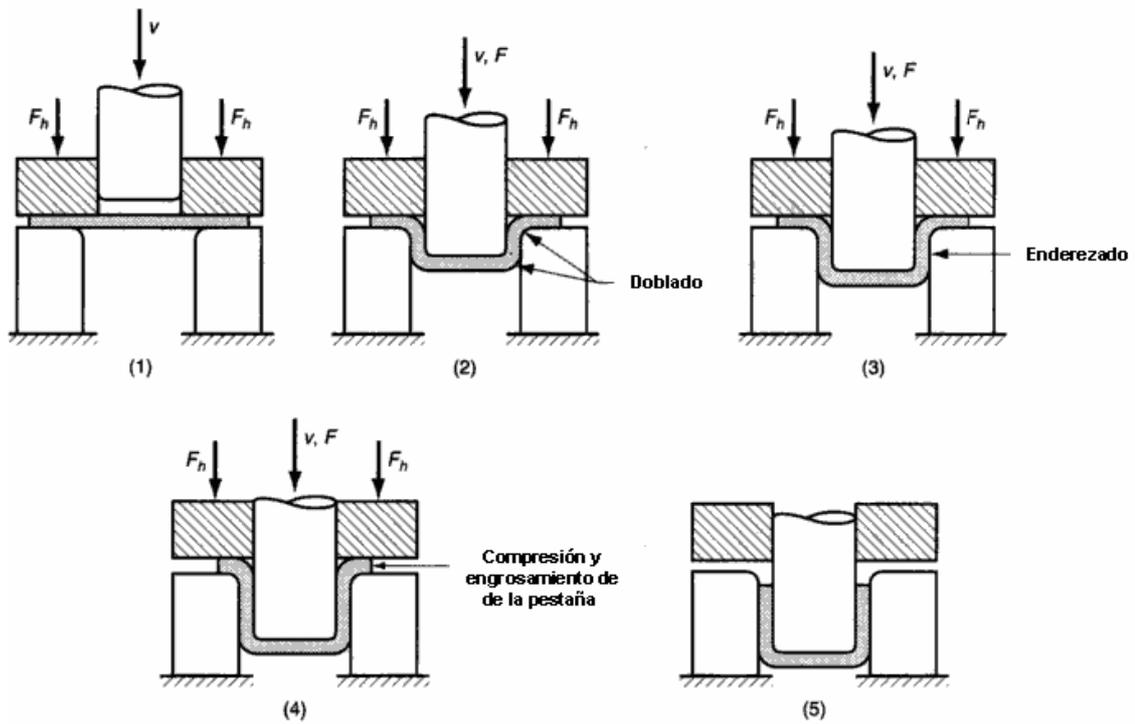


Figura 4.8 Etapas del proceso de embudo: (1) el punzón entra en contacto con la lámina, (2) doblado, (3) enderezado, (4) compresión, y (5) forma final

4.9 ESTAMPADO

El proceso de estampado es una operación de deformación volumétrica, se usa frecuentemente en el trabajo de láminas metálicas para formar indentaciones como venas o costillas de refuerzo. La indentación produce adelgazamiento de la lámina metálica y las elevaciones de las secciones producen engrosamiento del metal. Los dados de estampado poseen contornos y cavidades que coinciden, el punzón contiene los contornos positivos y el dado los negativos [28].

La figura 4.9 muestra el proceso de estampado.

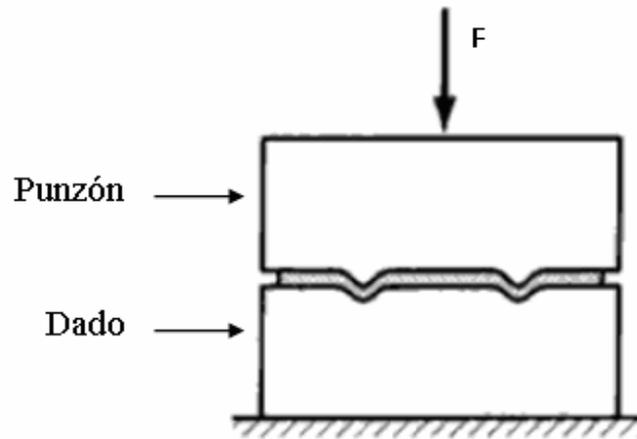


Figura 4.9 Proceso de estampado.

4.10 HIDROFORMADO

Los procesos de conformado tradicionales han evolucionado y dado paso a nuevos procesos para el conformado de materiales, uno de ellos es el hidroformado. El proceso de hidroformado consiste en la aplicación de una presión interna mediante un fluido, para transformar un tubo recto en un componente de diversas formas.

La metodología del hidroformado consta de colocar un tubo en un molde cerrado con la forma deseada, posteriormente aplicar fluido presurizado al interior del tubo, para que adopte la forma del molde [29].

El hidroformado constituye un trabajo en frío mediante el cual se ocasiona una deformación permanente del material y consecuentemente un endurecimiento del mismo tipo. Por su parte, algunos de los cambios microestructurales ocasionados por esta deformación incluyen una serie de deslizamientos de las dislocaciones presentes en el material. La deformación del material causa alargamiento de los granos [29].

En la figura 4.10 se muestra el proceso de hidroformado.

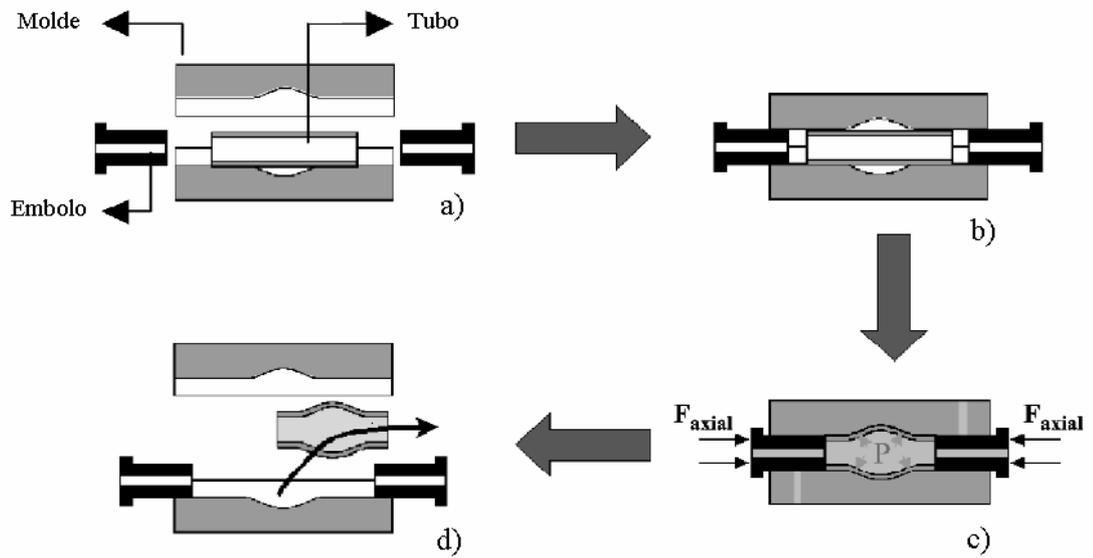


Figura 4.10 Proceso de hidroformado: a) se coloca el tubo en el molde, b) el molde se sella, c) el fluido da forma al tubo y d) la pieza final se retira.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

*La teoría es asesinada tarde o temprano por la experiencia.
Albert Einstein*

Este capítulo presenta los materiales utilizados, la preparación de las muestras, los equipos y la metodología experimental seguida en este proyecto de investigación, que fue realizado en su totalidad en el laboratorio del postgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

5.1 MATERIAL

Los criterios de selección de los aceros inoxidable fueron en base a las propiedades mecánicas reportadas en la literatura, se seleccionaron dos aceros inoxidable austeníticos debido a que actualmente las aplicaciones estructurales en el chasis del automóvil se basan en estos aceros, y un inoxidable martensítico para determinar si cuenta con el potencial requerido en estas aplicaciones.

Se estudiaron muestras de aceros inoxidable AISI 304L, 316L (austeníticos) y 410S (martensítico), dichas muestras fueron obtenidas de láminas roladas en caliente, los grados austeníticos fueron sometidos a un proceso de recocido (1100 °C) y el grado martensítico fue sometido a recocido (800 °C) y templado (1000 °C). En la Tabla 2 se muestra el espesor y la composición química nominal para los aceros proporcionada por el proveedor.

Composición química nominal AISI 304L, 316L y 410S										
AISI	Espesor (mm)	Composición (% Peso)								
		C % Max.	Mn % Max.	P % Max.	S % Max.	Si % Max.	Cr % Max.	Ni %	Mo %	N % Max.
304L	3.4	0.03	2	0.045	0.03	0.75	18-20	8-12	-	0.1
316L	3	0.03	2	0.045	0.03	0.75	16-18	10-14	2-3	0.1
410S	2.6	0.08	1	0.04	0.03	1	11.5-13.5	0.6	-	-

Tabla 2. Composición química nominal AISI 304L, 316L y 410S.

En la Tabla 3 se muestran las propiedades mecánicas de los aceros AISI 304L, 316L y 410S proporcionadas por el proveedor.

Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables AISI 304L, 316L y 410S proporcionadas por el proveedor					
AISI	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	% El	D. Brinell	D. Rockwell B
304L	170	485	40	201	92
316L	170	485	40	217	95
410S	205	415	22	183	89

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables AISI 304L, 316L y 410S proporcionadas por el proveedor.

Posteriormente se obtuvieron probetas de tensión cortadas a 0°, 45° y 90° con respecto a la dirección de laminación del material para cada uno de los aceros inoxidables (figura 5.1), mediante una máquina de corte con agua. Se cortaron 30 piezas por sección de lámina, además de las probetas se obtuvieron algunas secciones pequeñas con la finalidad de contar con muestras para las fotomicrografías y para obtener la dureza.

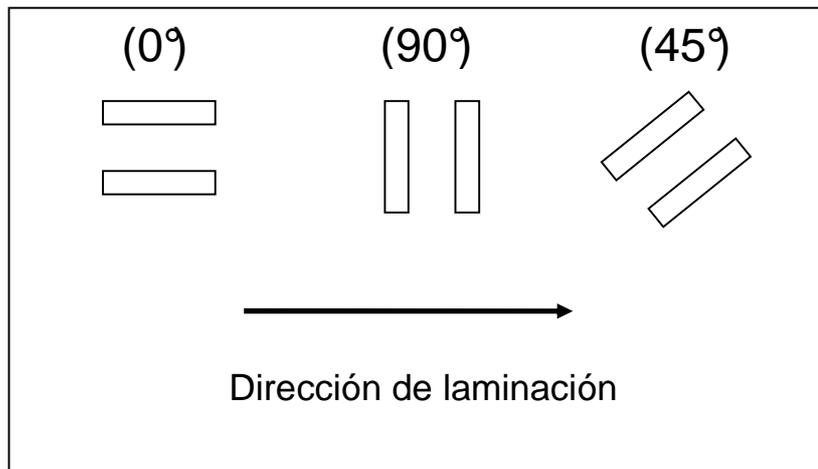


Figura 5.1 Orientación de las probetas respecto a la dirección de laminación.

5.2 PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Una pequeña sección del acero AISI 410S fue cortada mediante la máquina de corte con agua y montada en baquelita sobre su cara transversal respecto a su dirección de laminación, utilizando un equipo Struers modelo LaboPress-1, calentando la resina a 180° y manteniendo la temperatura durante 6 minutos aplicando una presión de 25 KN, posteriormente el tiempo de enfriamiento fue de 2 minutos.

Una vez que las muestras fueron montadas, se prosiguió con el desbaste y pulido de las mismas. Las muestras fueron tratadas en una pulidora Struers modelo LaboPol-1 mediante el uso de varios grados de papel abrasivo de SiC, siguiendo la secuencia #280, 320, 500, 800, 1200, 2400 para el desbaste. La etapa final de pulido se realizó con un paño suave de nylon y una solución abrasiva de agua y alumina de 0.3 μm hasta que un acabado espejo fue conseguido.

Los aceros inoxidables austeníticos 304L y 316L fueron sometidos a un ataque químico electrolítico, debido a que los altos contenidos de Cr no favorecen la corrosión y para conseguir este proceso es necesario el uso de una

corriente eléctrica, las muestras no fueron montadas debido a que la baquelita no es conductora de la corriente. Estos especímenes fueron pulidos sobre la cara transversal (respecto a la dirección de laminación) de la muestra sin montar hasta conseguir el acabado espejo. Para el AISI 410 se realizó el proceso de desbaste y pulido ya mencionado anteriormente pero con la muestra montada en baquelita.

En este estudio se realizaron dos tipos de ataques químicos:

- a) Inmersión: el cual consistió en exponer la muestra a una solución reactiva por contacto directo durante un tiempo determinado.
- b) Electrolítico: consiste en hacer pasar una corriente continua a través de una celda electrolítica, que contiene el electrolito apropiado (reactivo) y en la que la probeta es el ánodo, siendo el cátodo algún material insoluble como platino o grafito.

La microestructura de los aceros inoxidable fue revelada mediante varios ataques químicos. En los aceros austeníticos AISI 304L y 306L (sin montar) se utilizó un ataque electrolítico, para el grado martensítico AISI 410S se aplicó un ataque por inmersión (ver Tabla 4).

Ataques químicos para aceros inoxidable modificada				
AISI	Ataque	Reactivo	Tiempo (s)	Voltaje (V)
304L	Electrolítico	A. Nítrico 60%	105	1.1
316L			135	1.1
410S	Inmersión	1gr A. Picrico 5ml A. Clorhídrico 100ml Etanol	70	-

Tabla 4. Ataques químicos para aceros inoxidable modificada [24].

En el ataque electrolítico de los grados austeníticos se utilizó una fuente de poder marca Epesco modelo D-612T y mediante conectores tipo caimán la muestra tomó la función de ánodo (conectada al positivo) y se utilizó un

recipiente de acero inoxidable como cátodo (conectado al negativo), como se muestra en la figura 5.2. Se requirió monitorear el voltaje en este arreglo mediante un multímetro.



Figura 5.2 Arreglo para el ataque electrolítico.

5.3 CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Los estudios de microscopía proporcionan las características microestructurales, tales como son el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación, así como las inclusiones no metálicas y otras heterogeneidades.

Se analizaron las muestras de los aceros inoxidables AISI 304L, 316L y 410S por microscopia óptica con el objetivo de determinar las características del material tal y como fue recibido del proveedor. Las muestras fueron observadas

y fotografiadas a 400 magnificaciones utilizando un microscopio óptico marca Nikon modelo FX-35WA.

5.4 MACRODUREZA

El ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la dureza de los materiales, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de indentadores y cargas.

En el ensayo Rockwell se coloca un material con una superficie plana en la base de la máquina. Se le aplica una precarga menor de 10 Kgf, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica una carga que varía entre 60, 100 y 150 Kgf en compresión [30]. Luego se retira dicha carga y se obtiene el valor de la dureza directamente en el indicador de la escala, se designa como HR.

Hay dos tipos de indentadores utilizados en este ensayo [30]:

- a) Esfera de acero endurecido (templado y pulido) de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulgadas de diámetro. Se utiliza en materiales blandos como los aceros recocidos, en grados maleables de fundiciones de hierro y en una amplia variedad de metales no ferrosos.
- b) El indentador de diamante, el cual tiene una forma esfero-cónica donde el cono tiene un ángulo de 120° y el radio de la punta esférica es de 200 μm . Se utiliza en materiales duros como los que tienen carburos cementados y en el acero templado.

La dureza de los aceros inoxidables AISI 304L, 316L y 410S fue determinada mediante un durómetro marca Wilson modelo Series 500 seleccionando la escala Rockwell B en la cual se utiliza como indentador una esfera de 1/16 pulgada de diámetro y se aplica una carga de 100 Kgf (ver Tabla 5). Se

realizaron un total de 10 indentaciones por muestra. En la figura 5.3 se muestra el durómetro utilizado.

Ensayo de dureza Rockwell B		
AISI	Carga (Kgf)	Indentador
304L	100	Esfera 1/16"
316L		
410S		

Tabla 5. Ensayo de dureza Rockwell.



Figura 5.3 Durómetro Wilson modelo Series 500.

5.5 MICRODUREZA

El ensayo de dureza Vickers es un método para medir la dureza de los materiales mediante un indentador de diamante con forma de pirámide, el ángulo comprendido entre las caras opuestas de la pirámide es de 136°. La dureza Vickers se define como la carga dividida por la superficie de indentación, esta zona se calcula a partir de mediciones microscópicas de las longitudes de las diagonales de la impresión [31]. Esta técnica es considerada como ensayo

de microdureza debido a la magnitud de la carga y al tamaño del indentador, se designa la dureza en unidades denominadas HV.

Para realizar este ensayo se necesita una cuidadosa preparación de la superficie de la muestra, para ello se requiere que las muestras sean montadas y pulidas hasta conseguir un acabado espejo (realizando la metodología mencionada en la sección 5.2).

La dureza Vickers de los aceros inoxidable AISI 304L, 316L y 410S fue determinada mediante un microdurómetro marca Shimadzu modelo HMV-2T en el cual se utiliza como indentador una pirámide de diamante y se aplica una carga de 0.3 Kgf por un tiempo de 15 segundos (ver Tabla 6). El equipo utilizado para realizar el ensayo cuenta con un dispositivo que realiza las mediciones de las diagonales de las huellas del indentador, calculando automáticamente el valor de la dureza. Se realizaron un total de 10 indentaciones por muestra.

Ensayo de dureza Vickers		
AISI	Carga (Kgf)	t (s)
304L	0.3	15
316L		
410S		

Tabla 6. Ensayo de dureza Vickers.



Figura 5.4 Microdurómetro Shimadzu modelo HMV-2T.

5.6 ENSAYO DE TENSION

Las propiedades mecánicas de un material determinan el comportamiento de este durante la aplicación de alguna carga o fuerza, existen tres tipos de ensayos: tensión, compresión y cortante.

El ensayo de tensión permite obtener información de las propiedades mecánicas de un material, mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada en una probeta. La probeta se coloca en la maquina de pruebas y se le aplica un fuerza F , que se conoce como carga. También se mide la elongación del material en la probeta por la aplicación de la fuerza en la longitud calibrada [32].

Para determinar las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable AISI 304L, 316L y 410S se realizaron ensayos de tensión uniaxiales, para ello se utilizó un máquina universal de pruebas marca Instron modelo 8502 servohidráulica de 10 toneladas de capacidad, como se muestra en la figura 5.5. Se utilizaron probetas las cuales fueron cortadas con una máquina de corte con agua a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación del acero (como se explica en la sección 5.1), manejando velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min. a temperatura ambiente y con un factor de repetibilidad de 3 en cada condición, para cada uno de los aceros inoxidable de este estudio. Las velocidades de cabezal se determinaron en base a la experiencia, estudios previos y asesoría por parte del personal técnico, haciendo variar dicha velocidad en un orden de magnitud hasta la capacidad máxima de la maquina.

Las dimensiones utilizadas de las probetas para el ensayo de tensión se muestran en la figura 5.6. Para tener un análisis más exacto de las dimensiones se utilizó un vernier digital marca Mitutoyo para registrar la longitud, el ancho y espesor de cada probeta.



Figura 5.5 Máquina universal de pruebas Instron modelo 8502.

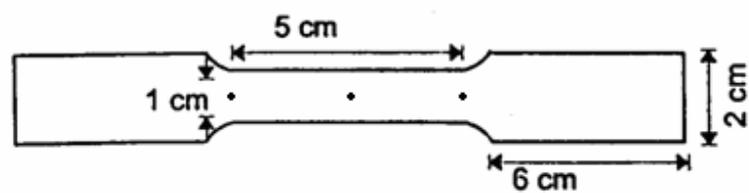


Figura 5.6 Dimensiones de la probeta de tensión [33].

En la Tabla 7 se muestra el diseño de experimentos para los ensayos de tensión a temperatura ambiente realizados en esta investigación.

Diseño de experimentos de los ensayos de tensión			
AISI	Ángulo (°)	Velocidad de cabezal (mm/min.)	Repetibilidad
304L 316L 410S	0	10	3
		100	3
		1000	3
	45	10	3
		100	3
		1000	3
	90	10	3
		100	3
		1000	3

Tabla 7. Diseño de experimentos de los ensayos de tensión.

Una vez realizados todos los ensayos de tensión se realizó la medición de las probetas ya deformadas (ver figura 5.7). Mediante el uso de un vernier se obtuvieron las dimensiones de la longitud entre marcas, el ancho y espesor en área de fractura de la probeta.



Figura 5.7 Comparación entre una probeta deformada y sin deformar.

5.7 ANÁLISIS POR SIMULACIÓN

El método de elemento finito consiste en el empleo de métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales que describen un problema físico normalmente mediante el uso de paquetes computacionales. Este método numérico se basa en dividir la geometría del sólido de interés y en la que se quiere resolver un problema físico, en pequeños elementos en los cuales y para cada uno de ellos, se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a una variable de interés como por ejemplo, la temperatura en transmisión del calor, el campo magnético en electromagnetismo, el perfil de velocidades en mecánica de fluidos, etc. en forma discreta, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. La solución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que converge a una solución [34].

El método de elemento finito supone que el comportamiento mecánico de un continuo, esta conformado por un número finito de partes o elementos. Sobre estas partes o elementos son consideradas las propiedades del material (en este caso las propiedades mecánicas: modulo de Young, esfuerzo de cedencia y máximo, etc.) y las relaciones constitutivas (las curvas de flujo del material), donde a su vez, estos elementos se encuentran conectados entre si por un número discreto de puntos llamados nodos, localizados en sus contornos [35].

Mediante el paquete genérico comercial Abaqus versión 6.9 se realizó la simulación del proceso de compresión para obtener el esfuerzo máximo de una pieza tubular de 576 mm de largo y de 3.5 mm de espesor, dicha pieza se muestra en la figura 5.8. La pieza tubular se simuló entre dos paredes sólidas, de las cuales una está fija y la otra ejerce el movimiento a una velocidad de 10 m/s hasta alcanzar una deformación máxima en la longitud de la pieza, con un tiempo de choque de 0.0125 segundos, en la compresión la fricción fue

despreciada, estas condiciones se basan en la investigación realizada por Gameiro.

Gameiro [36] realizó un análisis de elemento finito en tubos de aluminio con distinto diámetro interior (D), espesor (t) y longitud (L), dichos tubos fueron sometidos a un proceso de compresión entre dos paredes rígidas, de las cuales una esta fija y la otra se mueve a una velocidad de 10 m/s, despreciando la fricción, utilizó un modelo dinámico, con un tipo de elemento cascaron de 8 nodos.

Este análisis fue realizado con los datos obtenidos de las curvas de fluencia con velocidad de cabezal de 10 mm/min. de los aceros inoxidable AISI 304L, 316L y 410S, los datos empleados para el acero HSLA (por sus siglas en ingles, High Strength Low Alloy) fueron proporcionados por Metalsa S.A. de C.V., con la finalidad de conocer el comportamiento de la pieza durante su función estructural, es decir, al momento en que ocurra un impacto frontal en un automóvil.

Para llevar a cabo la simulación de la compresión de la pieza tubular se utilizo un modelo dinámico explicito, con un tipo de elemento cascaron de 4 nodos, la maya del modelo está conformada por un total de 27501 nodos y 27545 elementos.

Un modelo dinámico explicito es aquel que para la integración usa el operador de diferencias centrales, los valores de desplazamiento y velocidad son calculados en términos de cantidades que son conocidas al comienzo de cada incremento, además la matriz de masa y de rigidez no son invertidas [35].

Los elementos cascaron son usados para modelar estructuras en las cuales una dimensión (espesor), es significativamente mas pequeño que el resto de las otras dimensiones [35].

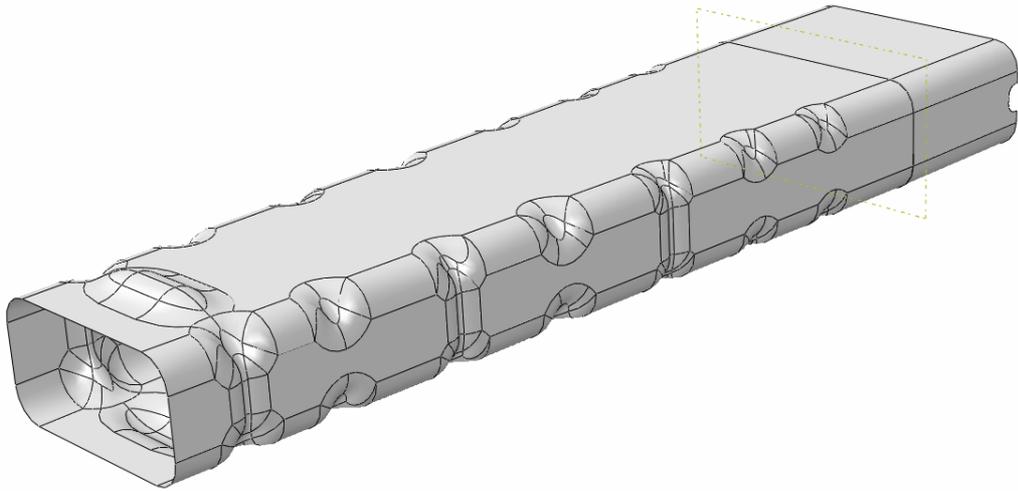


Figura 5.8 Pieza tubular.

En la figura 5.9 se muestra la pieza entre las paredes sólidas para llevar a cabo el proceso de compresión mediante simulación.

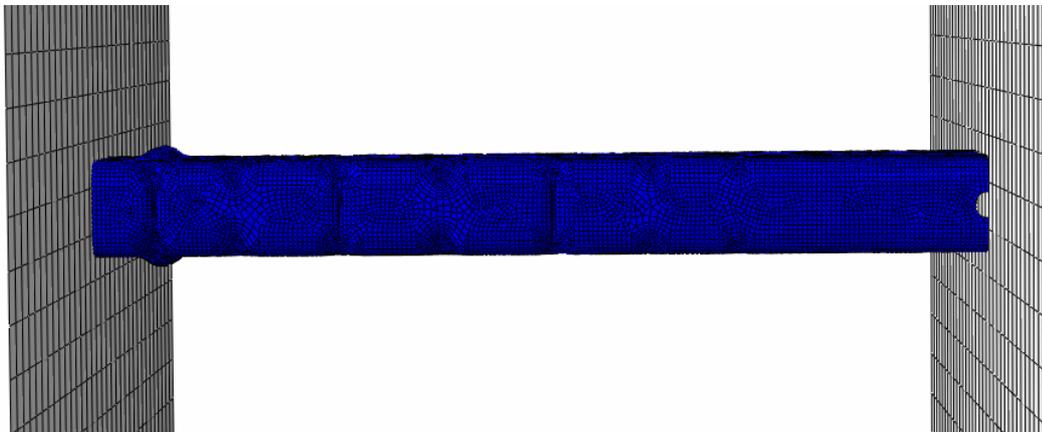


Figura 5.9 Pieza tubular entre paredes solidas.

La pieza tubular se utiliza para soportar la defensa frontal, parte de la cabina y un travesaño, además absorbe la energía durante los impactos frontales al momento de un choque, por esta razón es que la pieza se sometió a un proceso de compresión. En la figura 5.10 se muestra la ubicación de la pieza en el chasis.

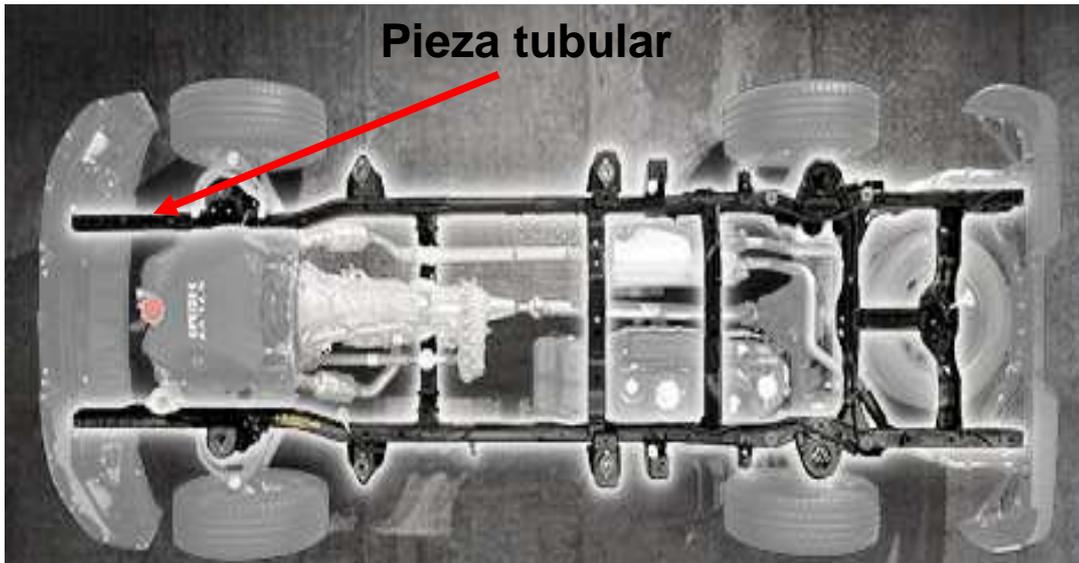


Figura 5.10 Ubicación de la pieza tubular en el chasis.

Para complementar este estudio se utilizó el programa CES EduPack versión 2010, la cual es una base de datos que contiene información de distintos materiales y sus procesamientos, que permite estimar la energía necesaria y la cantidad de CO₂ emitido para producir un material y llevar a cabo su manufactura. Se obtuvo esta información basado en el proceso de producción del material y manufactura de 100 piezas con un peso de 3 Kg cada una. También se determinó la cantidad de energía y emisiones contaminantes que se ahorrarían si las piezas son recicladas al final de su ciclo de vida. Estos datos fueron encontrados para los aceros inoxidables AISI 304L, 316L y 410S, para ser comparados con un acero de baja aleación AISI 3140.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIONES

*Entonces conocerán la verdad, y la verdad los hará libres.
Jn. 8:32*

6.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

En las figuras 6.1 a la 6.3 se presentan las fotomicrografías de los aceros inoxidables AISI 304L, 316L y 410S respectivamente, donde se puede apreciar un tamaño de grano distinto para cada acero inoxidable. El tamaño de grano promedio fue determinado mediante el método planimétrico, este involucra el conteo del número de granos dentro de un área determinada, para ello se traza sobre la fotomicrografía un círculo con un diámetro de 79.8 μm (área de conteo) y otro de diámetro de 175 μm , que debe coincidir con los bordes superior e inferior de la imagen, mediante un conteo del número de granos dentro de círculo (N_{interno}) y el número de granos interceptados por el círculo ($N_{\text{interceptado}}$) se calcula el número de granos por mm^2 (N_A) mediante la ecuación 5 (M el número de magnificaciones de la fotomicrografía) y se determina el valor ASTM E-112

$$N_A = 0.0002M^2 \left(N_{\text{interno}} + \frac{N_{\text{interceptado}}}{2} \right) \quad (5)$$

El AISI 304L tiene un tamaño de grano promedio ASTM 8 (22.5 μm), el AISI 316L tiene un tamaño de grano promedio ASTM 9 (15.9 μm) y el AISI 410S tiene un tamaño de promedio ASTM 7.5 (26.7 μm). En los grados austeníticos se puede apreciar algunos granos con una tonalidad más oscura, es la presencia de ferrita dentro de la matriz austenítica.

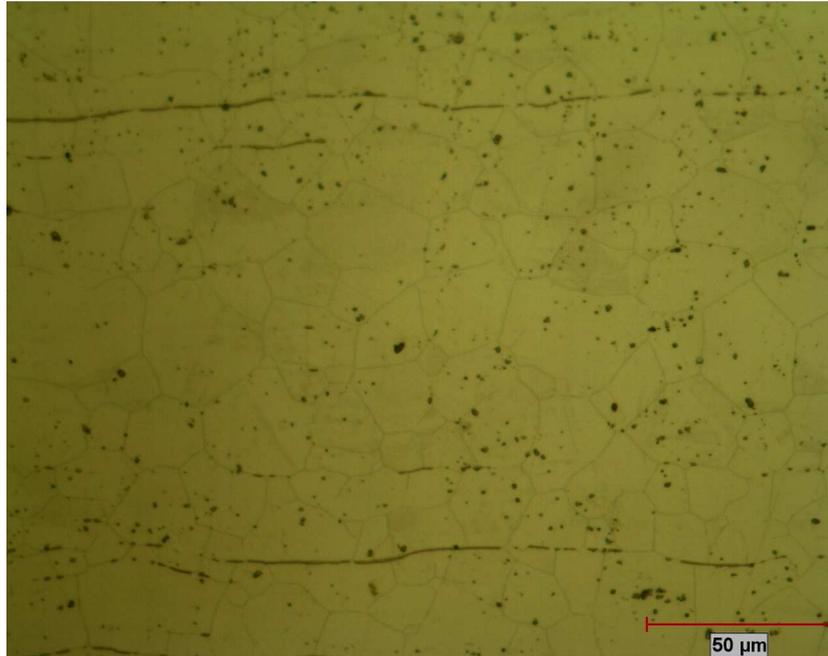


Figura 6.1 Fotomicrografía de un acero AISI 304L a 400x, revela un tamaño de grano promedio ASTM 8 ($22.5\mu\text{m}$), la zonas oscuras muestran la fase α en la matriz austenítica.

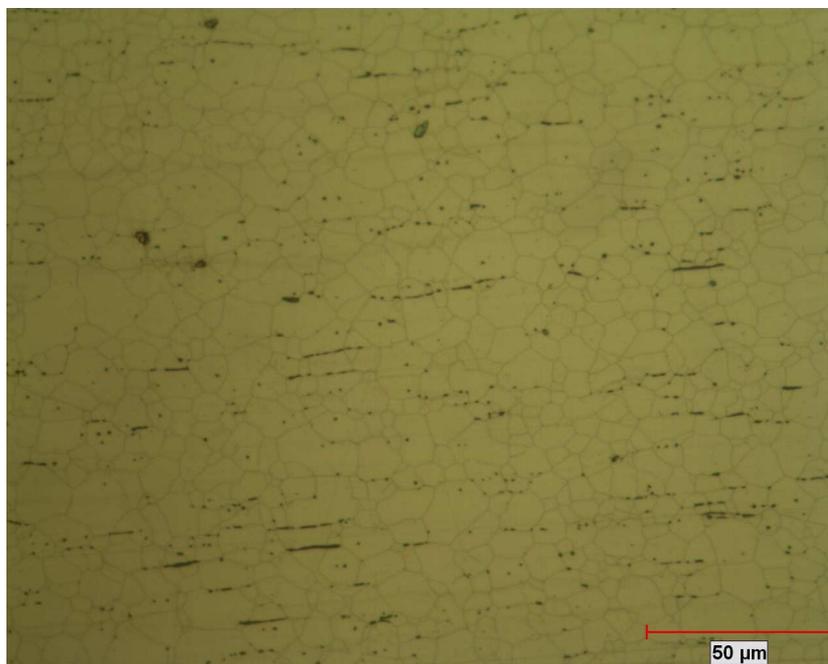


Figura 6.2 Fotomicrografía de un acero AISI 316L a 400x, revela un tamaño de grano promedio ASTM 9 ($15.9\mu\text{m}$), la zonas oscuras muestran la fase α en la matriz austenítica.

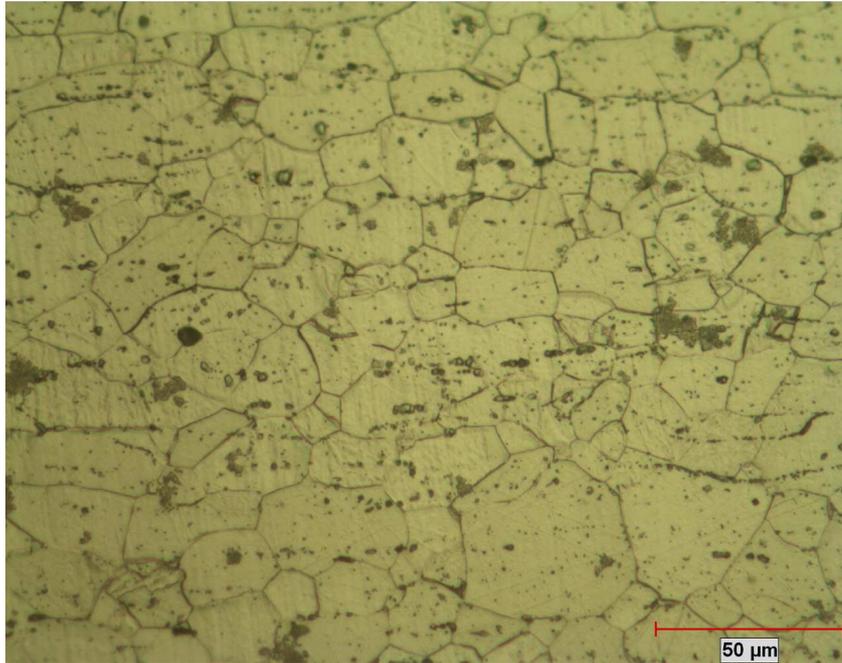


Figura 6.3 Fotomicrografía de un acero AISI 410S a 400x, revela un tamaño de grano promedio ASTM 7.5 (26.7μm).

6.2 MACRODUREZA

La dureza se obtuvo como el promedio de las lecturas registradas de cada muestra, los resultados se muestran en la Tabla 8.

Resultados dureza Rockwell B AISI 304L, 316L y 410S			
INDENTACIÓN	AISI 304L	AISI 316L	AISI 410S
1	81	85	59
2	80	88	85
3	88	88	74
4	88	87	72
5	88	87	70
6	85	87	72
7	90	87	74
8	88	83	74
9	88	87	76
10	88	87	72
Promedio	86	87	73

Tabla 8. Resultados dureza Rockwell B AISI 304L, 316L y 410S.

6.3 MICRODUREZA

La dureza se obtuvo como el promedio de las lecturas registradas de cada muestra, los resultados se muestran en la Tabla 9.

Resultados dureza Vickers AISI 304L, 316L y 410S			
INDENTACIÓN	AISI 304L	AISI 316L	AISI 410S
1	204	199	165
2	202	191	160
3	213	188	161
4	199	194	165
5	201	185	158
6	196	194	166
7	212	196	167
8	191	205	165
9	196	232	165
10	191	248	205
Promedio	201	203	168

Tabla 9. Resultados dureza Vickers AISI 304L, 316L y 410S.

6.4 ENSAYO DE TENSIÓN

El esfuerzo de cedencia (σ_y) en todas las condiciones de los ensayos de tensión fue obtenido a 0.002 de la deformación verdadera (ϵ), esto fue trazando una pendiente paralela a la región elástica de la curva a dicha deformación. El exponente de endurecimiento por deformación (n) es una medida del aumento de la dureza y la resistencia causada por la deformación plástica, el coeficiente de consolidación (K) es una medida de que tan resistente es un material, estos valores se obtienen determinando la ecuación de la grafica del logaritmo del esfuerzo verdadero contra el logaritmo de la deformación verdadera, donde n es la pendiente y K es la intersección con el eje y , estas propiedades se basan en la ecuación de Hollomon (ver Apéndice B, ecuación 16).

El porcentaje de elongación (%EI) del material es obtenido a la fractura. Otro aspecto importante de mencionar es que el modulo elástico o de Young (E)

no fue calculado debido a que actualmente la maquina universal no cuenta con un extensómetro y el resultado teórico obtenido no sería representativo de dichos aceros.

Cabe mencionar que en el rango de la curva que se encuentra entre el esfuerzo máximo (σ_{max}) y el esfuerzo ultimo (σ_u), es aquel en el que el adelgazamiento de la probeta es critico y debido a la ausencia del extensómetro el esfuerzo ultimo se presenta como una aproximación.

Las ecuaciones para determinar las curvas esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera se encuentran en el Apéndice B.

En los ensayos de tensión a velocidad de cabezal de 10 mm/min. se obtuvo para el AISI 304L un esfuerzo máximo de 986 MPa y una elongación de 65% (se presentan las propiedades mecánicas promedio para los tres aceros inoxidables, de igual forma para el resto de las velocidades de cabezal), para el 316L se obtuvo un esfuerzo máximo de 889 MPa y el valor de elongación fue de 52%, para el acero 410S dichos valores son 550 MPa y 36%. El resto de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo se muestran en la Tabla 10.

La figura 6.4 muestra las curvas esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera de los aceros inoxidables a velocidad de cabezal de 10 mm/min. Cada condición de los ensayos tuvo repetibilidad de 3 (ver Tabla 7), por lo tanto se seleccionó la curva promedio de cada ángulo para cada uno de los aceros inoxidables, este tipo de consideraciones se aplicaron a las velocidades de cabezal de 100 y 1000 mm/min.

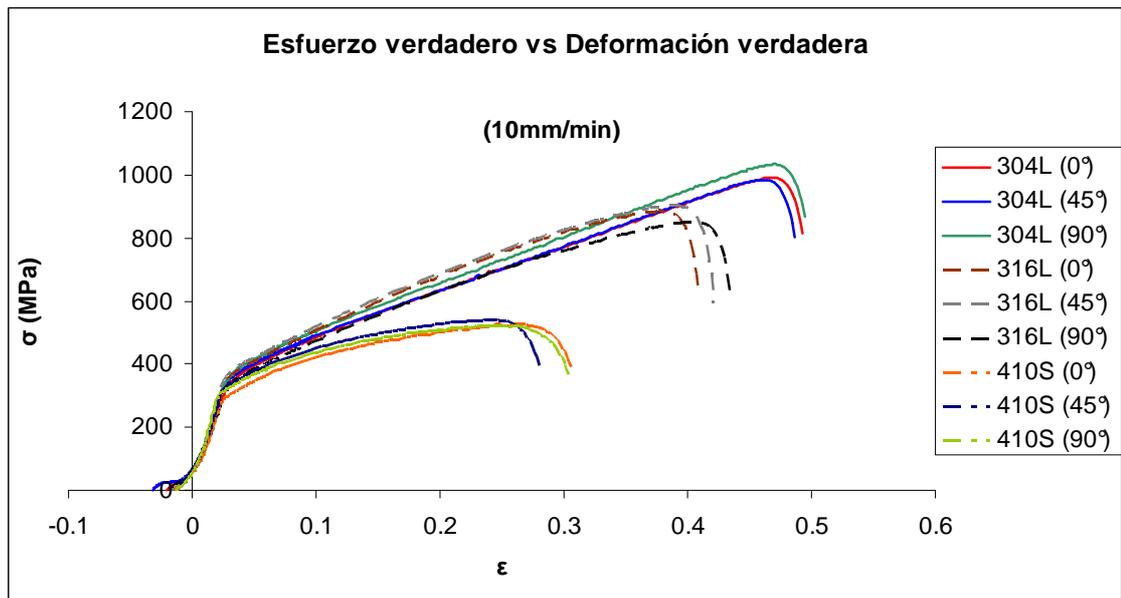


Figura 6.4 Curva Esfuerzo verdadero vs. Deformación verdadera AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 10 mm/min.

Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 10 mm/min							
304L	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	348.85	986.16	794.21	0.39	1239.80	65.30	69.83
45°	331.41	982.37	803.98	0.38	1203.20	65.77	64.89
90°	344.23	1019.71	858.45	0.38	1268.60	65.04	63.92
316L	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	351.20	889.82	615.42	0.37	1249.30	52.42	68.53
45°	351.36	902.30	638.90	0.36	1239.80	54.04	65.61
90°	330.55	848.49	627.86	0.37	1167.10	56.17	72.40
410S	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	294.82	530.47	381.88	0.25	758.70	37.52	66.34
45°	332.99	545.63	382.82	0.22	764.60	34.43	66.90
90°	308.15	522.70	376.64	0.24	752.90	36.62	71.38

Tabla 10. Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 10 mm/min.

En los ensayos realizados a velocidad de cabezal de 100 mm/min. se obtuvieron resultados de esfuerzo máximo de 940 MPa y una elongación de 62% para el acero 304L, un esfuerzo máximo de 891 MPa y el valor de la elongación de 53% para el acero 316L y valores correspondientes de 541 MPa y 33% para el acero 410S.

En la figura 6.5 se muestran las curvas esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera de los aceros inoxidable ensayados a velocidad de cabezal de 100 mm/min.

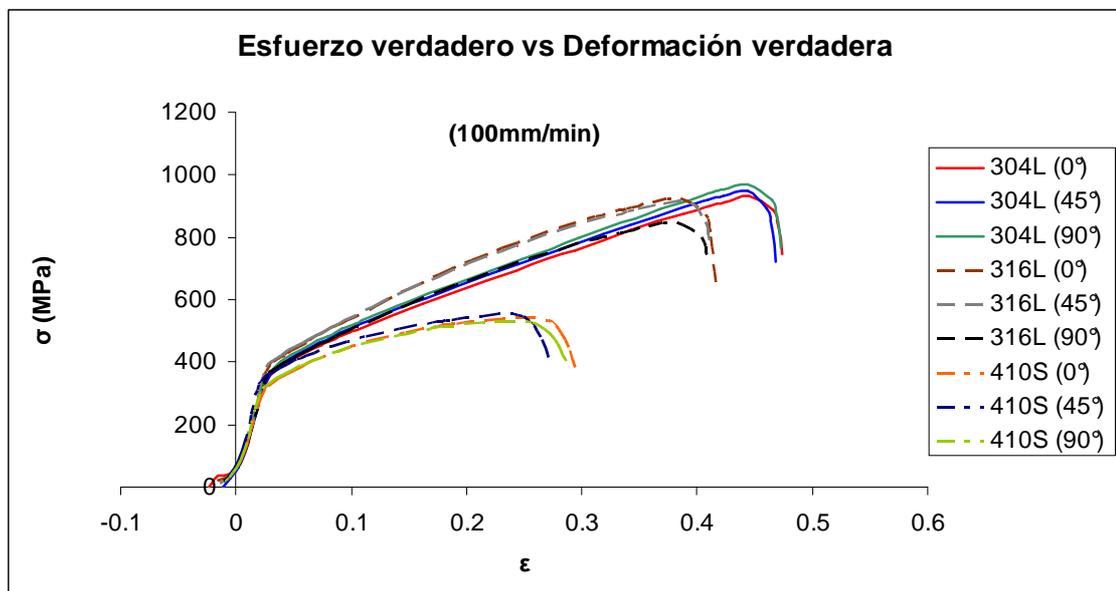


Figura 6.5 Curva Esfuerzo verdadero vs. Deformación verdadera AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 100 mm/min.

La Tabla 11 muestra el resto de las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tensión en estas condiciones.

Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 100 mm/min							
304L	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	355.55	923.81	771.41	0.36	1175.00	63.27	67.15
45°	365.29	940.75	755.41	0.35	1193.10	61.98	55.84
90°	376.42	963.74	792.22	0.36	1230.20	62.15	64.94
316L	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	363.95	891.95	665.26	0.36	1241.50	52.71	64.84
45°	388.30	915.31	764.76	0.34	1249.30	53.66	63.26
90°	354.81	844.72	713.64	0.34	1148.10	53.14	65.20
410S	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%El	%A
0°	316.88	541.95	391.33	0.24	770.30	36.05	70.06
45°	354.21	557.06	412.96	0.21	770.40	33.40	64.37
90°	320.30	530.56	395.15	0.23	752.90	33.86	69.29

Tabla 11. Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 100 mm/min.

Los resultados obtenidos de los ensayos de tensión a velocidad de cabezal de 1000 mm/min. para el AISI 304L fue un esfuerzo máximo de 971 MPa y una elongación de 66%, para el 316L se obtuvo un esfuerzo máximo de 931 MPa y el valor de elongación fue de 58%, para el acero 410S dichos valores son 564 MPa y 37% respectivamente.

En la figura 6.6 se muestran las curvas esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera de los aceros inoxidable sometidos a ensayos de tensión a velocidad de cabezal de 1000 mm/min.

Se muestra el resto de las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tensión a esta velocidad de cabezal en la Tabla 12.

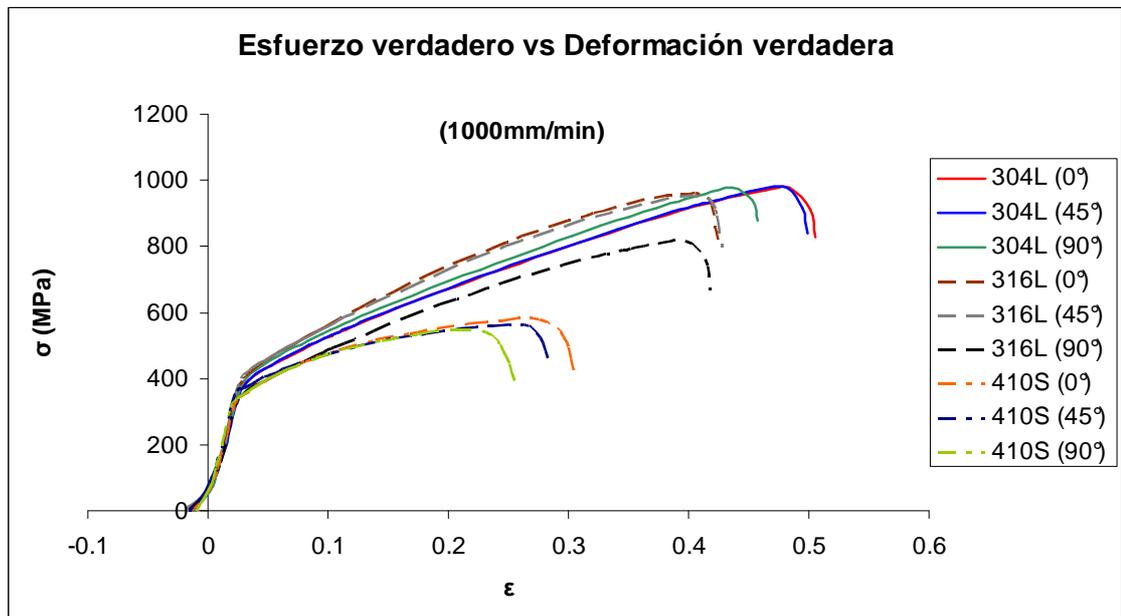


Figura 6.6 Curva Esfuerzo verdadero vs. Deformación verdadera AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 1000 mm/min.

Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a vel. de cabezal de 1000 mm/min							
304L	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%EI	%A
0°	359.01	971.22	842.75	0.35	1230.20	70.38	66.50
45°	388.38	964.72	825.13	0.35	1220.90	66.49	55.72
90°	385.74	978.19	845.30	0.34	1230.20	65.74	63.01
316L	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%EI	%A
0°	380.84	931.64	752.39	0.35	1270.40	56.13	62.57
45°	407.60	952.55	808.57	0.35	1278.40	59.53	61.62
90°	353.73	815.89	675.08	0.33	1088.10	58.79	68.82
410S	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	n	K (MPa)	%EI	%A
0°	340.06	577.97	407.77	0.24	806.90	39.39	67.69
45°	362.82	564.85	449.73	0.21	759.00	37.36	60.83
90°	340.55	551.85	411.56	0.22	788.30	35.63	65.22

Tabla 12. Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 1000 mm/min.

Las propiedades mecánicas reportadas por Capelli [16] de un acero austenítico AISI 301 ($\sigma_y=370$ MPa, $\sigma_{max}=800$ MPa, $n=0.6$ y $\%El=53$) que son similares a las de los aceros 304L ($\sigma_y=344$ MPa, $\sigma_{max}=986$ MPa, $n=0.38$ y $\%El=65$) y 316L ($\sigma_y=351$ MPa, $\sigma_{max}=890$ MPa, $n=0.37$ y $\%El=54$), debido a la composición química, ya que contienen una cantidad muy similar de Cr, el 301 y 316L tienen de 16-18 %, el acero 304L tiene 18-20 %, otro aspecto que favorece a que se consigan estos niveles de esfuerzos es la alta tasa de consolidación (endurecimiento por trabajo mecánico) que poseen los aceros inoxidable austeníticos. El valor del exponente de endurecimiento por deformación (n) no coincide con los resultados obtenidos en este trabajo, esto puede ser debido al rango de valores que existe entre el esfuerzo de cadencia y el máximo (σ_{max}/σ_y).

En un acero inoxidable martensítico Akhavan [12] obtuvo las propiedades mecánicas de un CA6NM ($\sigma_y=1150$ MPa y $\sigma_{max}=1350$ MPa) que son muy superiores a las del acero 410S ($\sigma_y=308$ MPa y $\sigma_{max}=530$ MPa), la diferencia en los esfuerzos se debe a la composición química, ya que el níquel incrementa las propiedades mecánicas, el acero CA6NM contiene 3.5 % de Ni y el 410S solo posee 0.6 %.

Las propiedades mecánicas de mayor interés para este proyecto son el esfuerzo máximo (σ_{max}) y el porcentaje de elongación ($\%El$), en la Tabla 13 se presenta un comparativo entre la diferencia en porcentajes (Dif %) de estas propiedades manteniendo constante el ángulo respecto a la laminación y variando la velocidad de cabezal para cada uno de los aceros inoxidables.

La diferencia en porcentajes (Dif %) se obtiene tomando como punto de comparación el cual es para cada uno de los aceros inoxidables la velocidad de cabezal de 10 mm/min. para cada ángulo (0° , 45° y 90°), obteniendo una diferencia de incremento o decremento según sea el caso para las velocidades de 100 y 1000 mm/min.

Diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de AISI 304L, 316L y 410S a ángulo constante.													
Condición		304L				316L				410S			
°	Vc (mm/min)	σ _{max} (MPa)	Dif %	%EI	Dif %	σ _{max} (MPa)	Dif %	%EI	Dif %	σ _{max} (MPa)	Dif %	%EI	Dif %
0°	10	986.16	-	65.30	-	889.82	-	52.42	-	530.47	-	37.52	-
0°	100	923.81	-6.3	63.27	-3	891.95	0.2	52.71	0	541.95	2.0	36.05	-3
0°	1000	971.22	-1.5	70.38	7	931.64	4.7	56.13	7.6	577.97	8.8	39.39	5.4
45°	10	982.37	-	65.77	-	902.30	-	54.04	-	545.63	-	34.43	-
45°	100	940.75	-4.2	61.98	-6	915.31	1.4	53.66	-1.8	557.06	2.2	33.40	-2.9
45°	1000	964.72	-1.8	66.49	1.5	952.55	5.5	59.53	9.2	564.85	3.4	37.36	8.8
90°	10	1019.71	-	65.04	-	848.49	-	56.17	-	522.70	-	36.62	-
90°	100	963.74	-5.5	62.15	4.6	844.72	-0.5	53.14	-5.3	530.56	1.5	33.86	-8.3
90°	1000	978.19	-4.1	65.74	0	815.89	-3.8	58.79	3.5	551.85	5.5	35.63	-2.7

Tabla 13. Diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de AISI 304L, 316L y 410S a ángulo constante.

Ninguno de los aceros inoxidable excede el 10% en el valor absoluto de la diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo (σ_{max}) ni el porcentaje de elongación (%EI). Para el resto de las propiedades mecánicas, tales como el esfuerzo de cedencia (σ_y), exponente de endurecimiento por deformación (n), coeficiente de consolidación (K) y el porcentaje de reducción de área (%A) donde la diferencia en porcentaje no es significativa, lo que vuelve a los aceros inoxidables austeníticos y martensíticos estudiados en esta tesis insensibles a la velocidad de cabezal.

En la Tabla 14 se presenta la misma comparativa pero mantenido constante la velocidad de cabezal y variando el ángulo de la probeta.

La diferencia en porcentaje (Dif %) se obtiene tomando como punto de comparación para cada uno de los aceros inoxidables el ángulo de 0° para las velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min., obteniendo una diferencia de incremento o decremento según sea el caso para los ángulos de 45° y 90°.

Diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal constante.													
Condición		304L				316L				410S			
°	Vc (mm/min)	σ_{max} (MPa)	Dif %	%El	Dif (%)	σ_{max} (MPa)	Dif %	%El	Dif (%)	σ_{max} (MPa)	Dif %	%El	Dif %
0	10	986.16	-	65.30	-	889.82	-	52.42	-	530.47	-	37.52	-
45	10	982.37	-0.4	65.77	0.7	902.30	1.4	54.04	3	545.63	2.8	34.43	-8.2
90	10	1019.71	3.3	65.04	-0.3	848.49	-4.6	56.17	7.1	522.70	-1.5	36.62	-2.4
0	100	923.81	-	63.27	-	891.95	-	52.71	-	541.95	-	36.05	-
45	100	940.75	1.8	61.98	-2.0	915.31	2.6	53.66	1.8	557.06	2.9	33.40	-7.3
90	100	963.74	4.3	62.15	-1.7	844.72	-5.2	53.14	0.7	530.56	-2	33.86	-6
0	1000	971.22	-	70.38	-	931.64	-	56.13	-	577.97	-	39.39	-
45	1000	964.72	-0.7	66.49	-5.5	952.55	2.2	59.53	6	564.85	-2.2	37.36	0.9
90	1000	978.19	0.7	65.74	-6.5	815.89	-12.4	58.79	4.7	551.85	-4.5	35.63	-9.5

Tabla 14. Diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal constante.

El acero 316L en la condición de velocidad de 1000 mil/min. muestra que la mayor diferencia absoluta que es de 12.4%, el resto de los aceros en cada una de sus condiciones no exceden el 10% en valor absoluto de la diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo (σ_{max}) ni el porcentaje de elongación (%El).

Las demás propiedades mecánicas, tales como el esfuerzo de cedencia (σ_y), esfuerzo ultimo (σ_u), exponente de endurecimiento por deformación (n), coeficiente de consolidación (K) y el porcentaje de reducción de área (%A) donde la diferencia en porcentaje no es significativa, lo que vuelve a los aceros inoxidables austeníticos y martensíticos estudiados en este trabajo insensibles a la orientación en que se deforman.

Otra propiedad que se puede determinar a partir del ensayo de tensión es la relación de deformación plástica (r), que es un parámetro que indica la capacidad de las láminas metálicas a resistir el adelgazamiento o engrosamiento al ser sometidas a fuerzas de tensión o compresión en el plano de la lámina, por

lo tanto, la relación de deformación plástica indica la uniformidad del material al ser sometido a un proceso de embutido o estampado profundo [37].

La relación de deformación plástica es una medida de la anisotropía plástica y esta relacionada con la orientación cristalográfica preferencial. La anisotropía es la característica que puede presentar un material cuando sus propiedades dependen de la orientación en las que sean medidas [33, 37].

La relación de deformación plástica fue obtenida a la fractura de las probetas del ensayo de tensión, midiendo con un vernier su ancho y espesor.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la anisotropía promedio (R) son las siguientes [37].

Relación de deformación plástica:
$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (6)$$

Relación de deformación de ancho inicial y final:
$$\epsilon_w = \ln\left(\frac{W_0}{W_f}\right) \quad (7)$$

Relación de deformación de espesor inicial y final:
$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right) \quad (8)$$

Relación de deformación plástica promedio:
$$R = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (9)$$

Para el acero 304L el valor de la relación de deformación plástica promedio más elevado se obtuvo a la velocidad de cabezal de 10 mm/min. y fue 0.91, para el acero 316L el valor más elevado de anisotropía fue 0.67 a las velocidades de 10 y 1000 mm/min., el valor obtenido para el acero 410S fue 0.64 a la velocidad de 1000 mm/min.

La figura 6.7 muestra la relación de deformación plástica promedio de los aceros inoxidable AISI 304L, 316L y 410S a las velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min.

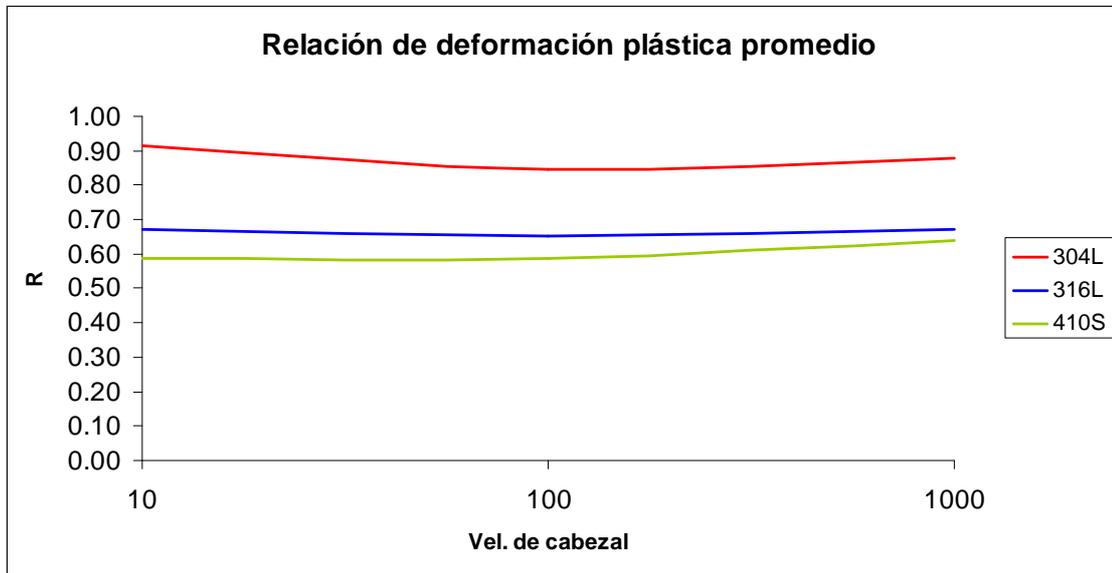


Figura 6.7 Relación de deformación plástica promedio AISI 304L, 316L y 410S a velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min.

Los valores de la relación de deformación plástica promedio reportados por Schubert [5] en un acero inoxidable AISI 201 es de 0.90, en un AISI 301 es de 0.96 y en un acero AISI 301LN es de 0.94, los cuales son próximos al valor obtenido para el AISI 304L que es de 0.91, pero estos son superiores comparados con los valor del AISI 316L y 410S que son de 0.67 y 0.64 respectivamente.

El valor de la relación de deformación plástica muestra el grado de conformabilidad de un material en un proceso de embutido o estampado profundo, por lo tanto el acero austenítico AISI 304L presenta la conformabilidad más elevada de los aceros inoxidables de este estudio, esto se debe a su composición química, ya que el Cr permite una alta resistencia mecánica y una

mayor deformación del material, lo que produce una mejor manufacturabilidad de las piezas evitando roturas durante el conformado.

6.5 ANÁLISIS POR SIMULACIÓN

El proceso de compresión para el acero HSLA (ver sección 5.7), esta materia se utiliza para manufacturar la pieza tubular (encargada de absorber la energía en un impacto frontal), se obtuvo un esfuerzo máximo de 409 MPa y una reducción en su longitud de 347 mm, lo que corresponde a una compresión del 60% de la longitud original de la pieza, la cual es de 576 mm. En las figuras 6.8 a la 6.11 se muestra la pieza tubular al finalizar el proceso de compresión.

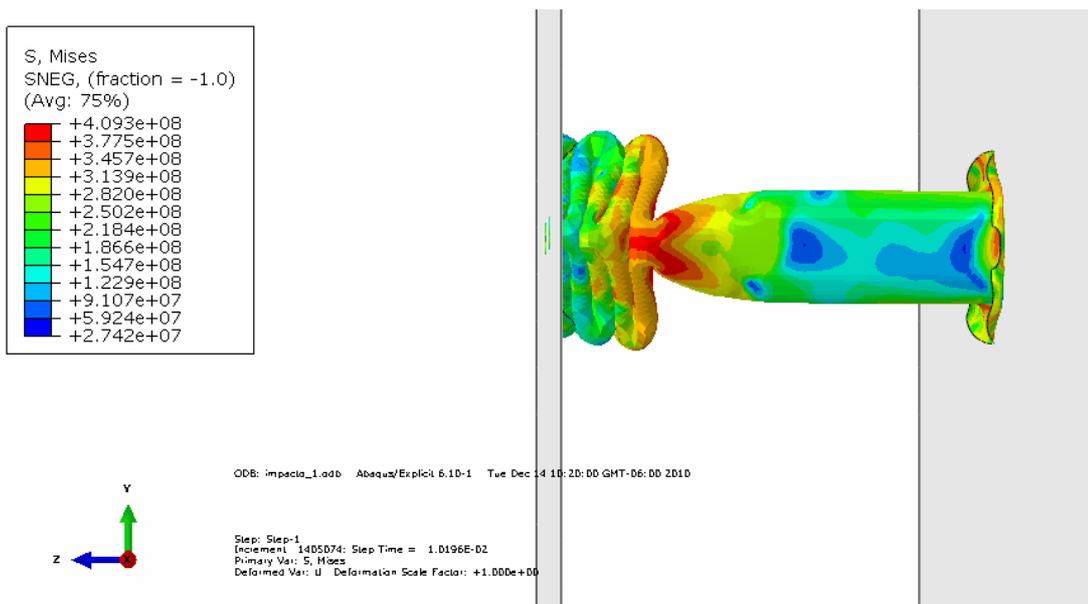


Figura 6.8 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista lateral).

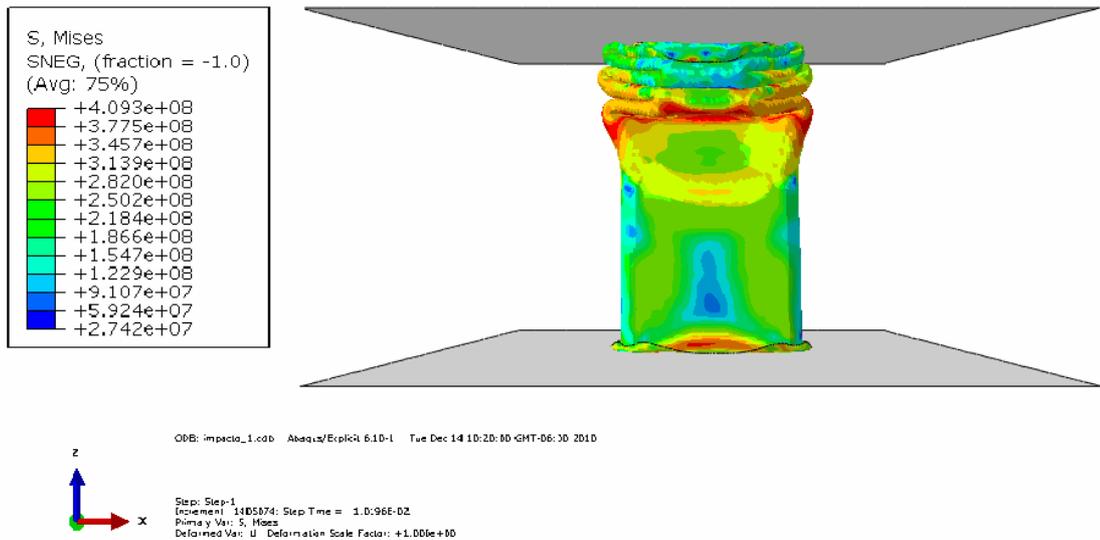


Figura 6.9 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista superior).

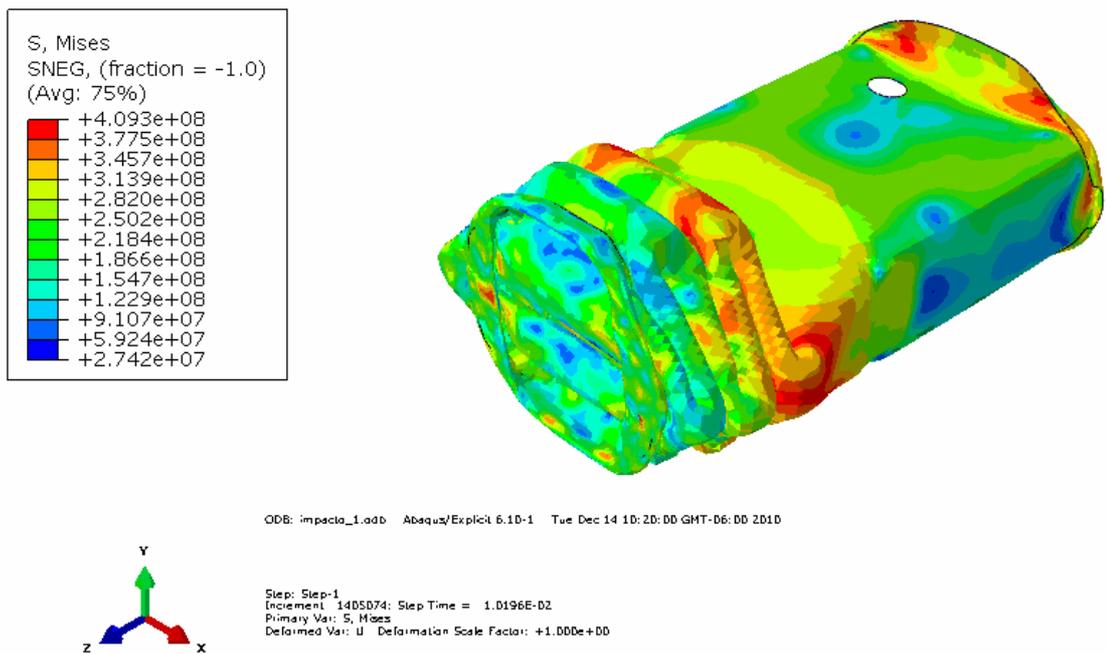


Figura 6.10 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista isométrica).

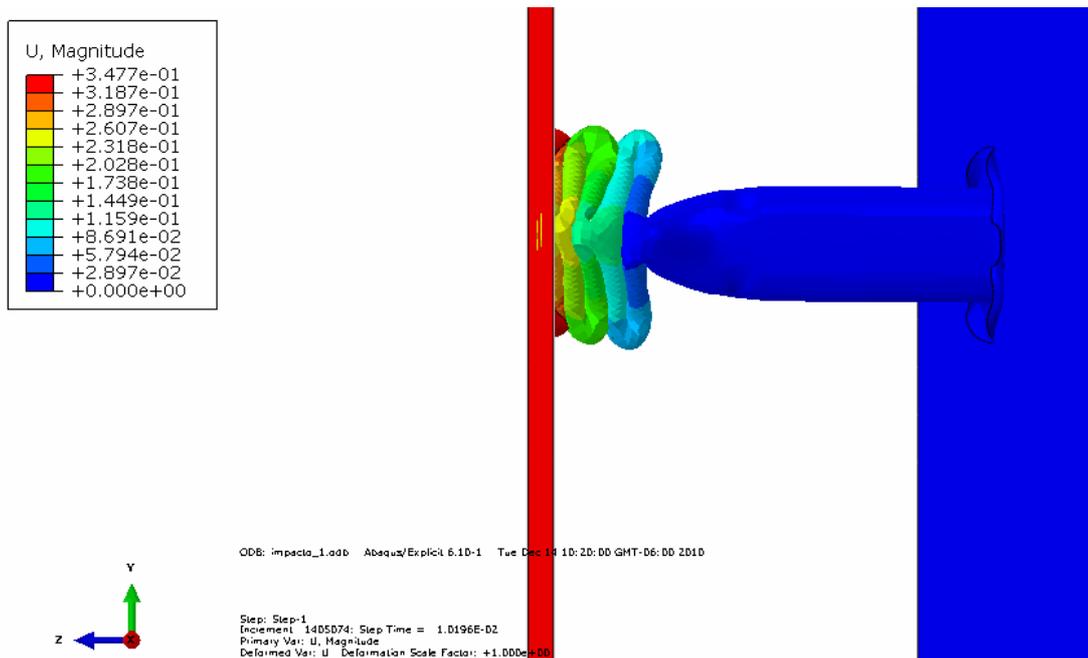


Figura 6.11 Reducción en longitud de 347 mm (409 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de HSLA.

Los pasos secuenciales del proceso de compresión del acero HSLA, así como los de los aceros inoxidables son establecidos predeterminadamente por el paquete Abaqus, el resumen de estos se encuentra en el Apéndice C.

El acero AISI 304L al ser sometido a compresión alcanzo un esfuerzo máximo de 985 MPa y una reducción en su longitud de 418 mm, lo que representa una compresión de 72.5% de la longitud original de la pieza tubular. En las figuras 6.12 a la 6.15 se muestra la pieza al finalizar el proceso de compresión.

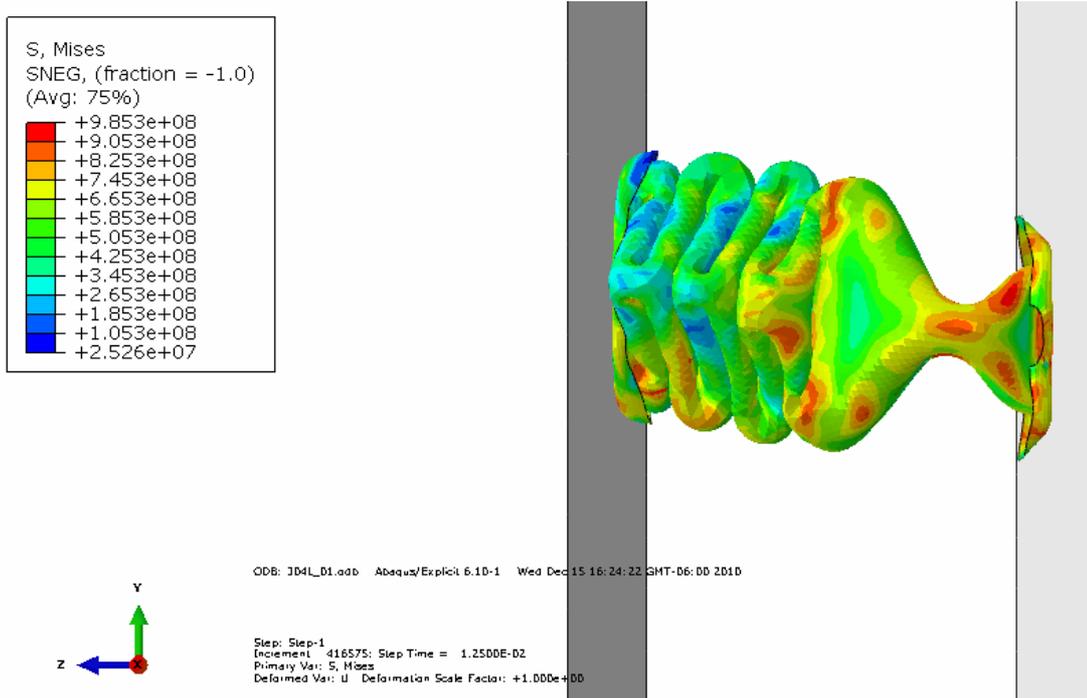


Figura 6.12 Esfuerzo máximo de 985 MPa obtenido a 418 mm de compresión de la pieza de AISI 304L (vista lateral).

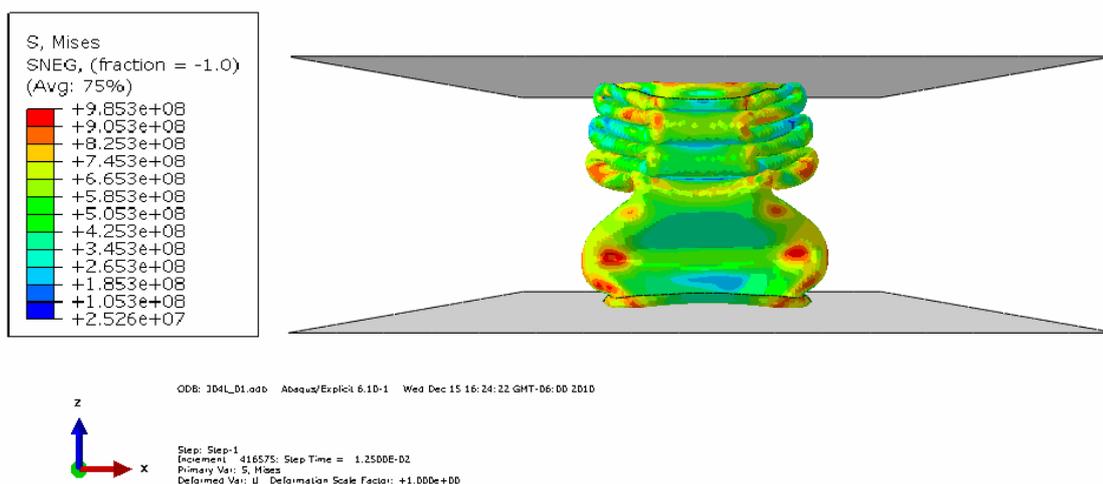


Figura 6.13 Esfuerzo máximo de 985 MPa obtenido a 418 mm de compresión de la pieza de AISI 304L (vista superior).

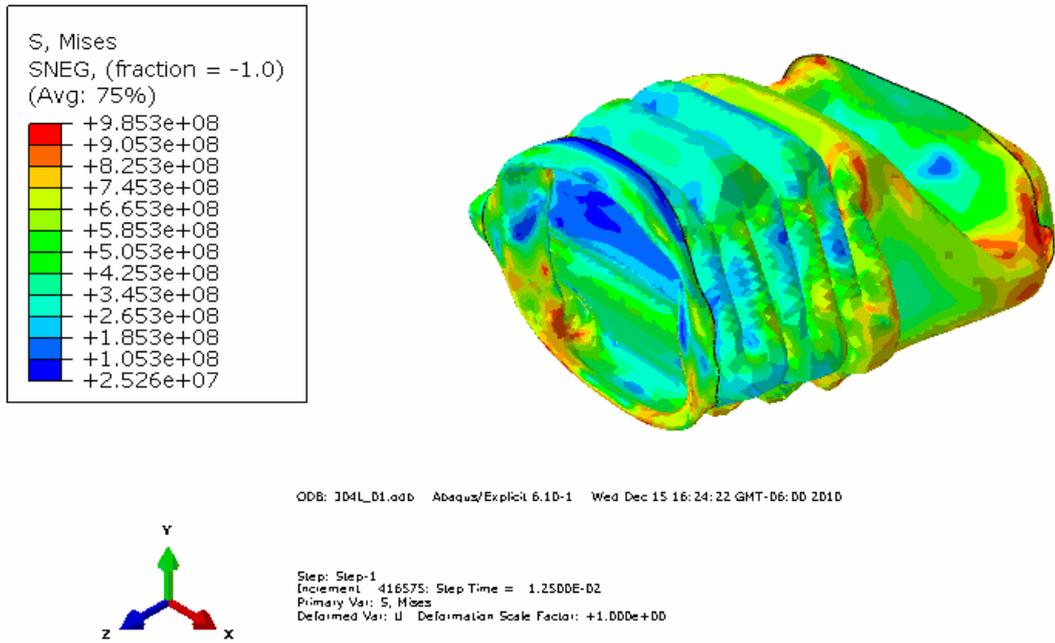


Figura 6.14 Esfuerzo máximo de 985 MPa obtenido a 418 mm de compresión de la pieza de AISI 304L (vista isométrica).

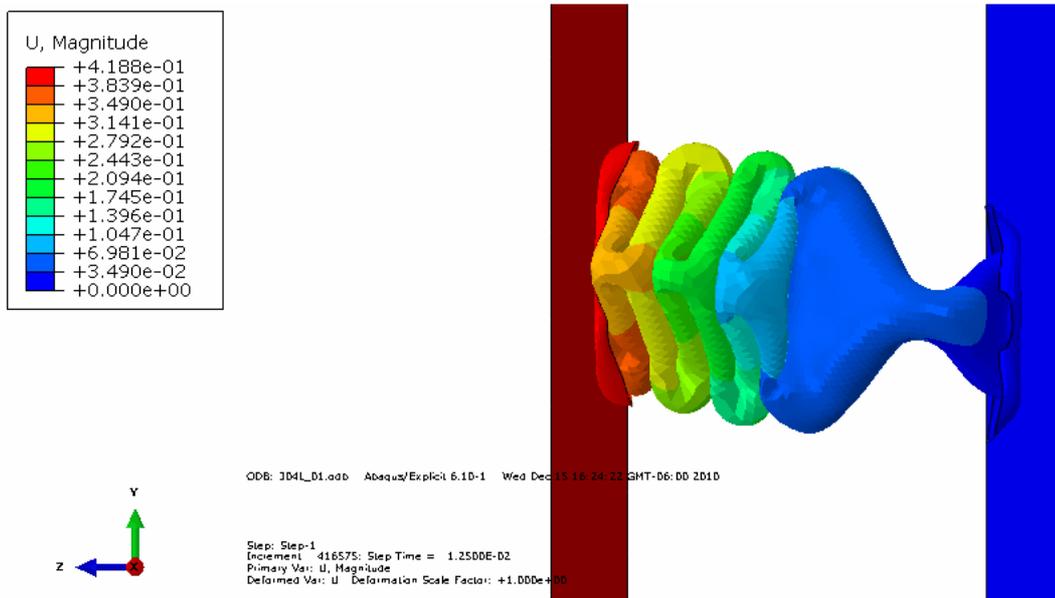


Figura 6.15 Reducción de longitud de 418 mm (985 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de AISI 304L.

El acero inoxidable AISI 316L al ser sometido al proceso de compresión alcanza un esfuerzo máximo de 862 MPa y una reducción en su longitud de 172 mm, lo que representa una compresión de 30% de la longitud original de la pieza tubular. En las figuras 6.16 a la 6.19 se muestra la pieza al finalizar el proceso de compresión.

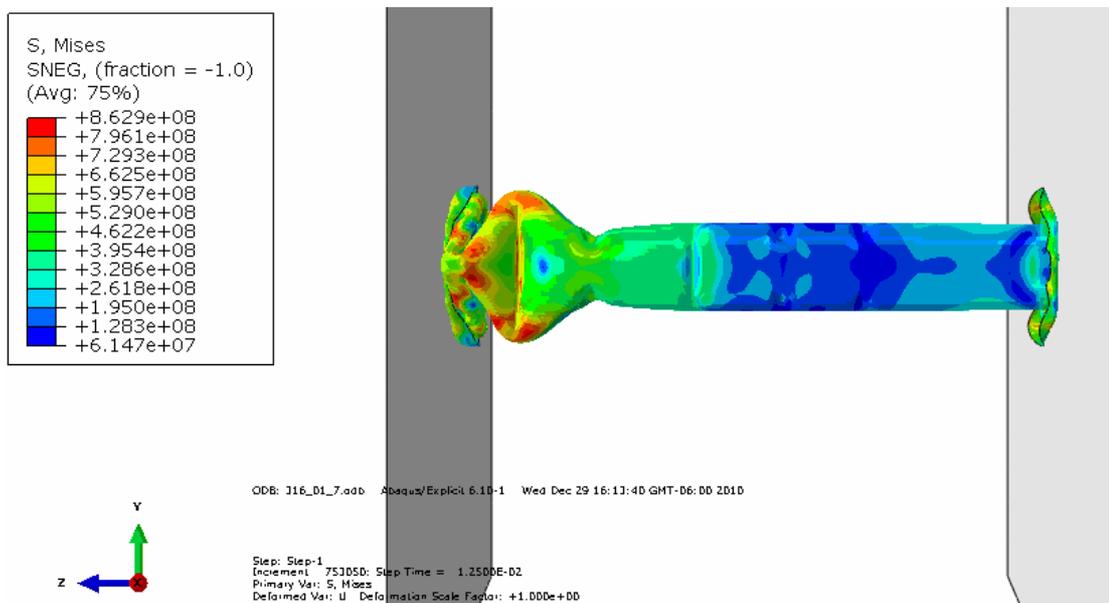


Figura 6.16 Esfuerzo máximo de 862 MPa obtenido a 172 mm de compresión de la pieza de AISI 316L (vista lateral).

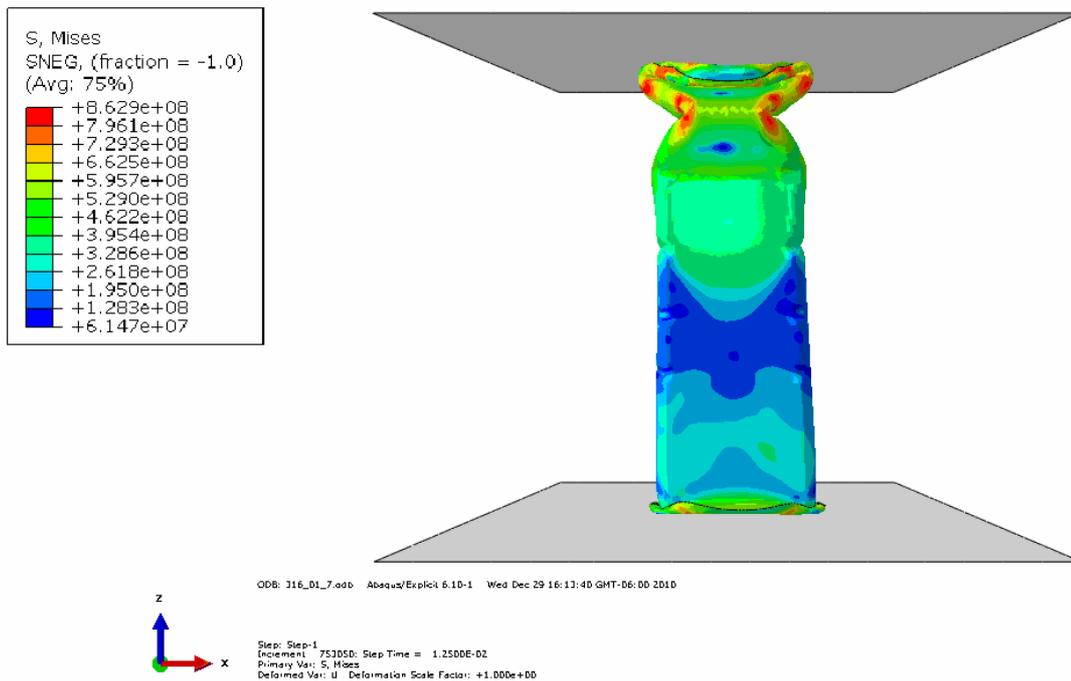


Figura 6.17 Esfuerzo máximo de 862 MPa obtenido a 172 mm de compresión de la pieza de AISI 316L (vista superior).

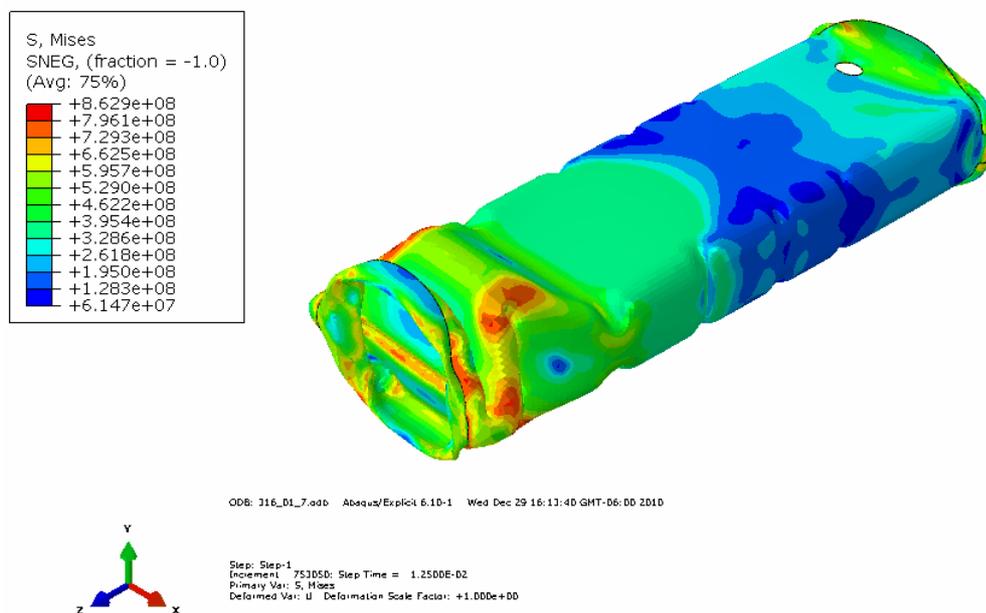


Figura 6.18 Esfuerzo máximo de 862 MPa obtenido a 172 mm de compresión de la pieza de AISI 316L (vista isométrica).

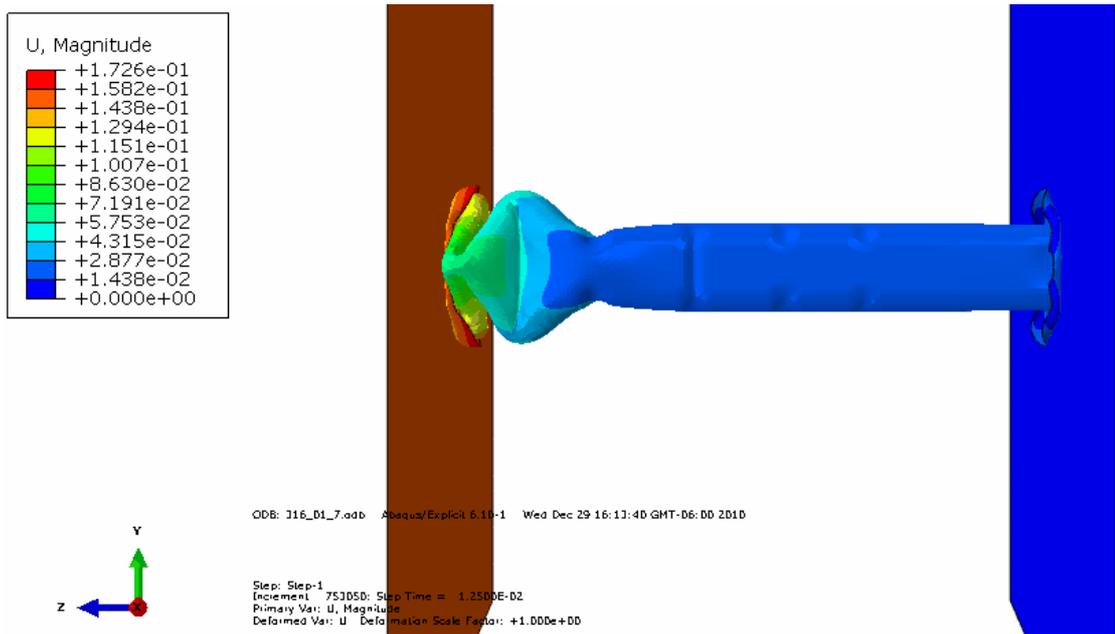


Figura 6.19 Reducción de longitud de 172 mm (862 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de AISI 316L.

El acero AISI 410S al ser sometido a compresión alcanzó un esfuerzo máximo de 516 MPa y una reducción en su longitud de 176 mm, lo que representa una compresión de 30.5% de la longitud original de la pieza tubular. En las figuras 6.20 a la 6.23 se muestra la pieza al finalizar el proceso de compresión.

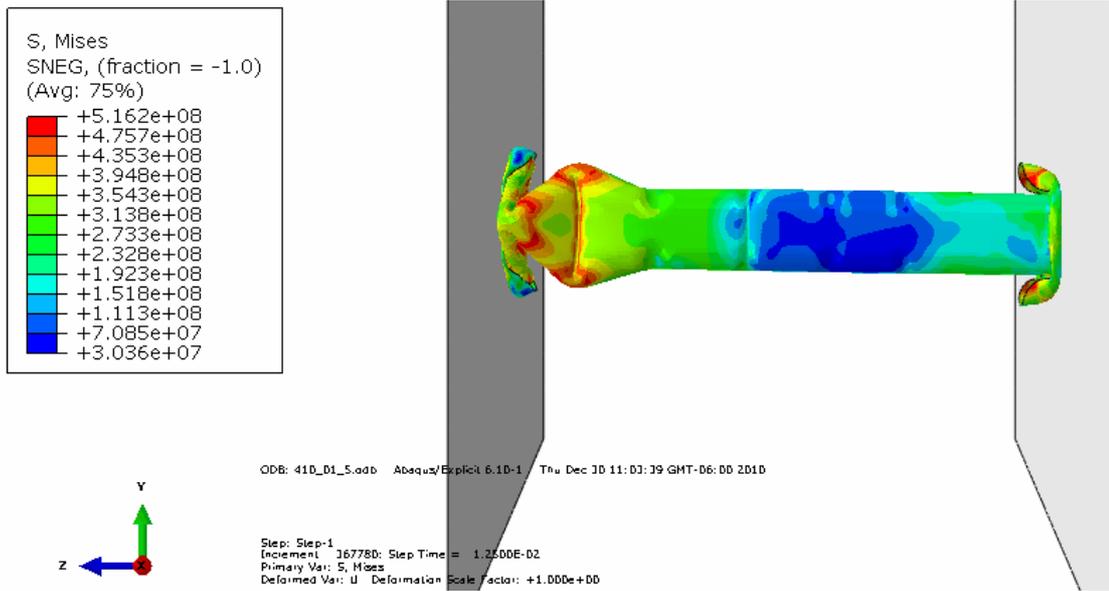


Figura 6.20 Esfuerzo máximo de 516 MPa obtenido a 176 mm de compresión de la pieza de AISI 410S (vista lateral).

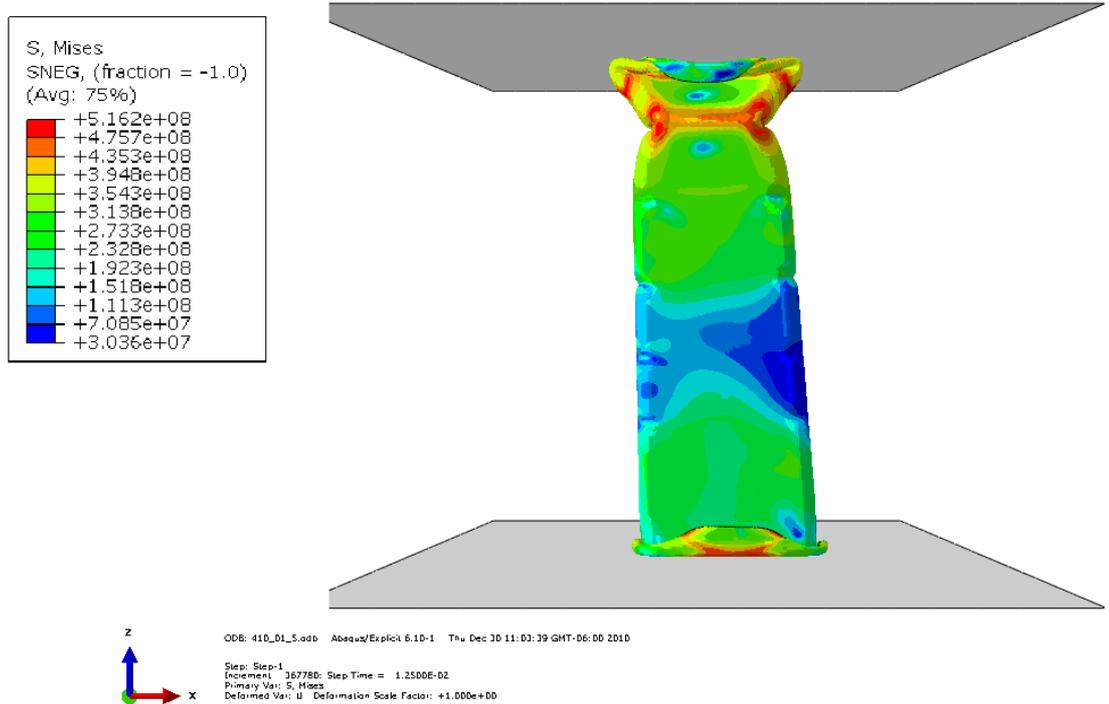


Figura 6.21 Esfuerzo máximo de 516 MPa obtenido a 176 mm de compresión de la pieza de AISI 410S (vista superior).

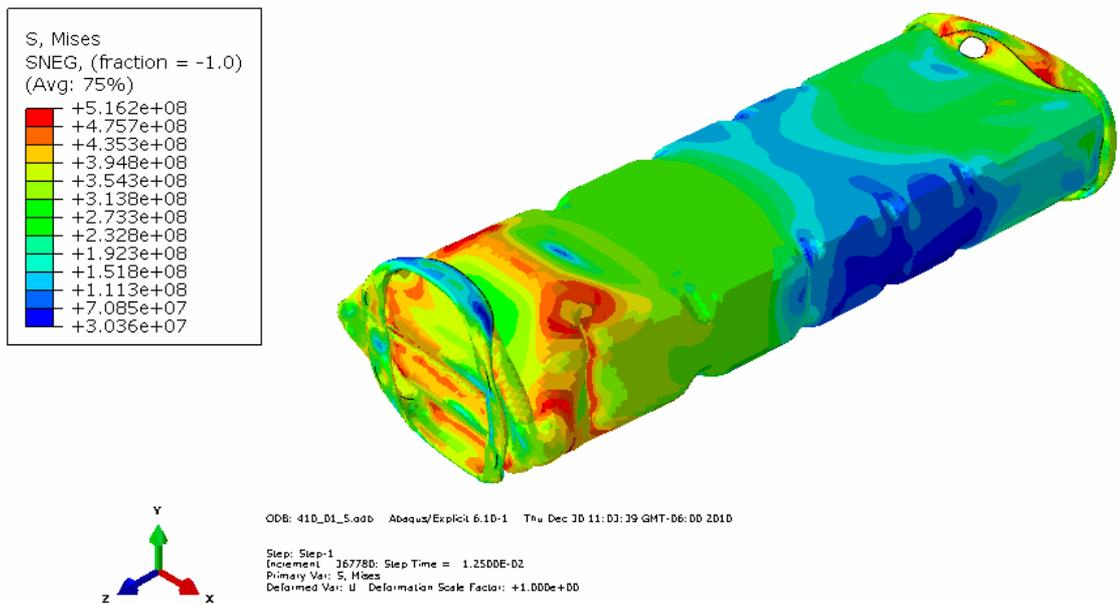


Figura 6.22 Esfuerzo máximo de 516 MPa obtenido a 176 mm de compresión de la pieza de AISI 410S (vista isométrica).

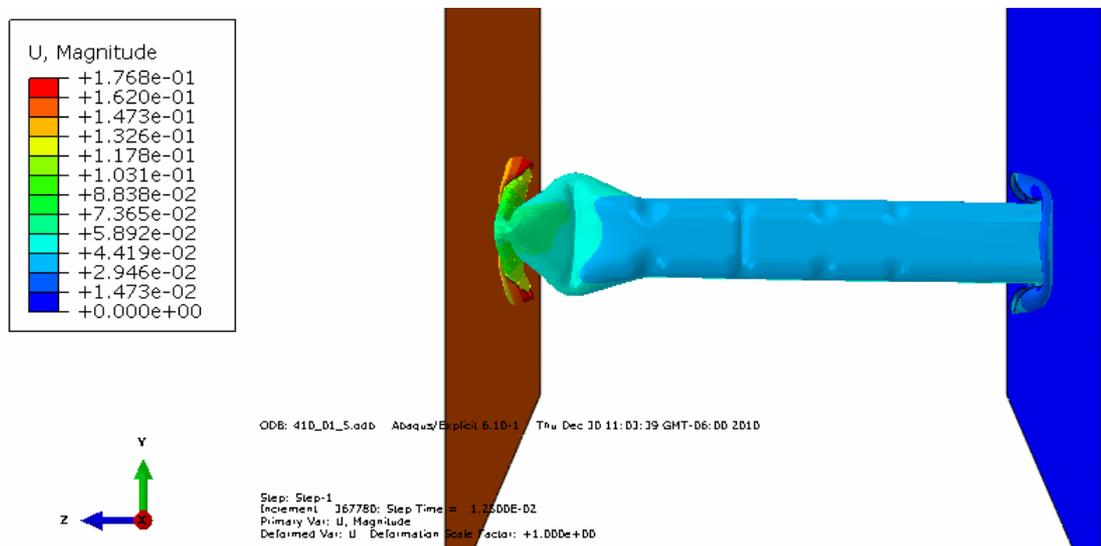


Figura 6.23 Reducción de longitud 176 mm (516 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de AISI 410S.

En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de compresión de los aceros HSLA, 304L, 416L y 410S.

Resultados de la compresión de los aceros HSLA, 304L, 416L y 410S			
Acero	σ_{max} (MPa)	Reducción de longitud (mm)	Reducción de longitud (%)
HSLA	409	347	60
304L	985	418	72.5
316L	862	172	30
410S	516	176	30.5

Tabla 15. Resultados de la compresión de los aceros HSLA, 304L, 416L y 410S.

El acero inoxidable 304L durante el proceso de simulación fue el que obtuvo la mayor resistencia mecánica ($\sigma_{max} = 985$ MPa) y una reducción del 72.5% de su longitud original, por lo tanto es el acero que presenta el mejor comportamiento en la pieza tubular al ser sometida a un impacto, esto es debido a la composición química (contenido cromo de 18 a 20%, ver Tabla 2), y a sus altas propiedades mecánicas ($\sigma_{max} = 986$ MPa y %EI = 65, ver Tabla 10).

Kremer [38] realizó estudios mediante procesos de compresión físicos a piezas tubulares de acero inoxidable AISI 304, con la finalidad de validar elementos que tengan la capacidad de absorber energía, mostrando un alta deformación del material durante los impactos en automóviles, utilizó una pieza tubular de 305 mm de largo, 2.97 mm de espesor, dicha pieza alcanzó una deformación de 178 mm (58% de la longitud original), pero no reporta el esfuerzo alcanzado por la pieza durante la compresión.

Los resultados de la reducción en longitud de la pieza tubular obtenidos mediante simulación para el acero AISI 304L (72.5%) son ligeramente mayores que los obtenidos por Kremer mediante pruebas de compresión para un AISI 304 (58%), esta diferencia se puede deber a la composición química, el 304L

cuenta con un menor contenido de C, este elemento endurece el material, y un mayor contenido de Ni, que aumenta la formabilidad, y a que las dimensiones de las piezas tubulares no son las mismas. Esto sugiere que el diseño o geometría de la pieza afecta la energía que puede absorber, por lo tanto es importante considerar este aspecto para el desempeño de la pieza tubular.

Los resultados obtenidos de la energía necesaria y la cantidad de CO₂ emitido para la producción del material y manufactura de 100 piezas con un peso de 3 Kg mediante el programa CES EduPack se presentan en la Tablas 16 y 17.

Se utilizó la información correspondiente de un AISI 3140 (acero de baja aleación) debido a que en la base de datos no se contaba con la información del HSLA. La pieza tubular es manufactura en un proceso de hidroformado, pero se utilizó la información de un proceso de forja por la misma razón.

Cantidad de energía necesaria para la producción y manufactura de los aceros AISI 3140, 304L, 316L y 410S				
Etapas del Proceso	AISI 3140 Energía (MJ)	AISI 304L Energía (MJ)	AISI 316L Energía (MJ)	AISI 410S Energía (MJ)
Producción del Material	10461.4	24344.7	24344.7	24344.7
Proceso de Manufactura	819.5	722.1	716.1	699.6
Reciclaje del Material	-7318.3	-8614.2	-17318.4	-17318.4
Total	3962.5	16452.6	7742.4	7725.9

Tabla 16. Cantidad de energía necesaria para la producción y manufactura de los aceros AISI 3140, 304L, 316L y 410S.

La energía para producir cualquier grado de aceros inoxidable es 24344.7 MJ, y es 2.3 veces mayor que la energía requerida para producir un acero de baja aleación. La energía necesaria para manufacturar el acero inoxidable es ligeramente menor, alrededor de .85 veces la necesaria para manufacturar el

acero de baja aleación. El ahorro de energía al reciclar los aceros inoxidable AISI 316L y 410S al final de su ciclo de vida es de 17318 MJ, que es una recuperación de energía 2.3 veces mayor que la obtenida de reciclar el acero AISI 3140. La energía total para los aceros inoxidable 316L y 410S es de 7742.4 MJ y la del 304L es de 16452.6 MJ, que son respectivamente 1.95 y 4.15 veces mayores en comparación de la energía total del acero 3140.

Cantidad de emisiones contaminantes durante la producción y manufactura de los aceros AISI 3140, 304L, 316L y 410S				
Etapa del Proceso	AISI 3140 Emesion de CO2 (Kg)	AISI 304L Emesion de CO2 (Kg)	AISI 316L Emesion de CO2 (Kg)	AISI 410S Emesion de CO2 (Kg)
Producción del Material	633.7	1529.6	1529.6	1529.6
Proceso de Manufactura	65.6	57.8	57.3	56.0
Reciclaje del Material	-443.9	-541.6	-1088.5	-1088.5
Total	255.4	1045.8	498.4	497.1

Tabla 17. Cantidad de emisiones contaminantes durante la producción y manufactura de los aceros AISI 3140, 304L, 316L y 410S.

La cantidad de CO₂ emitida durante el procesamiento de los aceros inoxidable es de 1529.6 Kg, y es 2.4 veces mayor que las emisiones contaminantes del acero 3140. La cantidad de gases invernadero emitida durante la manufactura de los aceros inoxidable es .87 veces menor que la del acero de baja aleación. El ahorro en las emisiones de CO₂ al reciclar los aceros inoxidable 316L y 410S es 2.4 veces mayor que el obtenido al reciclar el acero de baja aleación. La cantidad total de CO₂ emitido para los aceros inoxidable AISI 316L y 410S de 498 Kg y la del 304L es de 1045.8 Kg, que son respectivamente 1.9 y 4 veces mayores en comparación de la cantidad de CO₂ total del acero 3140.

Entre mejores propiedades mecánicas posea un material, como es el caso de los aceros inoxidable, mayor podrá ser su aprovechamiento en

aplicaciones estructurales, pero a su vez requerirán una cantidad mayor de energía para su producción, también la cantidad de energía requerida para su manufactura es menor, lo que representa un mayor grado de conformabilidad de los aceros inoxidable y vuelve mas rápido su procesamiento.

Como la cantidad emitida de CO₂ está directamente ligada a la cantidad de energía que requieren los procesos, como la producción y manufactura de los aceros inoxidable, es conveniente por cuestiones ambientales, considerar el reciclaje de los materiales al final de su ciclo de vida, ya que de esta manera se disminuirá un porcentaje de las emisiones de gases invernadero al recomenzar su ciclo.

6.6 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE REEMPLAZO

El acero AISI 304L es el que presentó las mejores propiedades mecánicas, el valor más elevado en la relación de deformación plástica y el mejor comportamiento en la simulación de la compresión de la pieza tubular, de los aceros inoxidable estudiados en este trabajo.

En la Tabla 18 se muestra una comparación entre las propiedades del acero HSLA y el AISI 304L.

Comparación entre las propiedades del acero HSLA y el AISI 304L								
Acero	Propiedades del ensayo de tensión						Propiedades de simulación	
	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ	%El	R	σ_{max} (MPa)	Reducción de longitud(%)
HSLA	275	413	328	0.35	21	1	409	60
304L	344	986	803	0.49	64	0.91	985	72.5

Tabla 18. Comparación entre las propiedades del acero HSLA y el AISI 304L.

El acero 304L es el material más adecuado para reemplazar al acero HSLA debido a que presenta las mejores propiedades mecánicas (σ_y , σ_{max} , σ_u , ϵ , %El) y muestra un mejor comportamiento en la compresión de la pieza tubular, esto

se debe a la composición química, ya que el acero 304L tiene un mayor contenido de aleantes (18-20% Cr, 8-12% Ni, 2% Mn y 0.75% Si) en comparación con el HSLA (0.01% Ni, 0.33%, 0.02% Si). Pero se disminuiría ligeramente la conformabilidad del material debido a la diferencia en la relación de deformación plástica.

Debido a que el acero inoxidable 304L presenta un esfuerzo a compresión 2.4 veces mayor que el obtenido para el acero HSLA, se reducirá ese mismo número de veces el espesor de la pieza tubular, lo que permitiría disminuir el espesor de la pieza fabricada con acero 304L a 1.45 mm, pero como este no es un espesor comercial, se utilizará material de 1.52 mm para igualar el esfuerzo que presenta el acero HSLA con un espesor de 3.5 mm, lo que ofrecería una disminución del 43% en peso para la pieza tubular de 5.6 Kg, para tener como peso final 3.1 Kg la pieza fabricada con acero inoxidable 304L.

Es necesario conocer con mayor detalle otras propiedades como la vida a la fatiga, la soldabilidad, resistencia a la corrosión, pandeo, rigidez, costos, etc. antes de considerar remplazar un material de una pieza con resistencias más elevadas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

*Cada día sabemos más y entendemos menos.
Albert Einstein*

- Se determinó que el acero inoxidable austenítico 304L, que cuenta con el mayor contenido de Cr (18-20%) de los materiales estudiados, es el que presenta las propiedades mecánicas y de conformado más elevadas mediante el análisis de las curvas esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera y la relación de deformación plástica.
- Los aceros inoxidables austeníticos 304L y 316L y el acero martensíticos 410S no mostraron cambios en sus propiedades mecánicas durante los ensayos de tensión realizados a diferentes velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min.
- Los aceros inoxidables austeníticos 304L y 316L y el acero martensíticos 410S no mostraron cambios en sus propiedades mecánicas durante los ensayos de tensión realizados a probetas de ángulos 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación
- Entre mejores propiedades mecánicas posea un material, como es el caso de los aceros inoxidables 304L, 316L y 410S, mayor podrá ser su aprovechamiento en aplicaciones estructurales, pero a su vez requerirán una cantidad mayor de energía para su producción, sin embargo la

cantidad de energía requerida para su manufactura es menor, lo que representa un mayor grado de conformabilidad de los aceros inoxidable y facilita su manufactura.

- El acero inoxidable austenítico AISI 304L presentó las mejores propiedades mecánicas, el grado más alto de conformabilidad y el mejor comportamiento en la pieza tubular al ser sometida a un impacto, de las aleaciones estudiadas en esta tesis, por lo tanto es el material más adecuado para remplazar el acero HSLA, debido a que el acero 304L presenta un esfuerzo a compresión 2.4 veces mayor que el obtenido para el acero HSLA, lo que permitiría disminuir el espesor de la pieza tubular fabricada con acero 304L a 1.52 mm para igualar el esfuerzo que presenta el acero HSLA con un espesor de 3.5 mm, lo que ofrecería una disminución del 43% en peso para la pieza tubular de 5.6 Kg, para tener como peso final 3.1 Kg la pieza fabricada con acero inoxidable 304L.
- Se podría obtener una disminución en el peso de las piezas estructurales utilizando aceros inoxidables austeníticos con alto contenido de cromo, debido a su alto esfuerzo máximo el cual permitiría remplazar materiales de menor resistencia, utilizando un espesor menor que con el que originalmente cuenta el material, igualándose así los esfuerzos entre materiales. Esto provoca una reducción en el peso de las partes estructurales del chasis de un automóvil, que conlleva a un consumo menor de combustibles fósiles, teniendo como resultado una menor emisión menor de CO₂ por Km recorrido, la cual tiene un impacto benéfico en el medio ambiente. Es necesario conocer con mayor detalle otras propiedades como la vida a la fatiga, la soldabilidad, resistencia a la corrosión, pandeo, rigidez, costos, etc. antes de considerar remplazar un material de una pieza con resistencias más elevadas.

CAPÍTULO 8

RECOMENDACIONES

*Me gustan más los sueños del futuro que la historia del pasado.
Thomas Jefferson*

Se recomienda para continuar con este trabajo de investigación de caracterización de propiedades mecánicas y de conformado realizar como trabajo futuro las siguientes actividades:

- Utilizar otros grados de aceros inoxidable austeníticos para determinar si tienen mejores propiedades mecánicas que sean de utilidad para aplicaciones estructurales automotrices. Se sugieren los aceros inoxidable Nitronic 50 (20.5-23.5% Cr y 11.5-13.5% Ni), JS-700 (19-23% Cr y 24-26% Ni) y AL-6X (20-22% Cr y 23.5-25.5% Ni) debido a su alto contenido de cromo y níquel.
- Realizar pruebas de impacto (Charpy), fatiga, soldabilidad con el objetivo de determinar la tenacidad, absorción de energía y complementar el estudio de las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable.
- Realizar ensayos de copa Olsen y determinar los diagramas de límite de formado (FLD, por sus siglas en inglés) con la finalidad de complementar el estudio de conformabilidad de los aceros inoxidable.

- Realizar un análisis mediante microscopía electrónica de barrido para determinar la distribución de las distintas fases, los precipitados de carburo de cromo y defectos presentes en el material con la finalidad de encontrar la relación que existe entre la composición química, la microestructura y las propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 9

REFERENCIAS

*Cuando uno contempla a los grandes triunfadores,
descubre que no son necesariamente los mejores,
ni los más brillantes, ni los más fuertes, ni los más
rápidos, pero si los más perseverantes.*

Anthony Robbins

- [1] Callister W., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Rervete S.A., 1995, pp. 2.
- [2] Aceros Avanzados de Alta Resistencia, OTEA, Mayo 2008.
- [3] Mayor Resistencia – Menor Peso, SAAB, 2006.
- [4] Automoción, PLATEA, 2005.
- [5] Schuberth S., Et al., Next Generation Vehicle – Engineering Guidelines for Stainless Steel in Automotive Application, 2004.
- [6] Magnusson C., Et al., Stainless Steel as a Lightweight Automotive Material, 2003.
- [7] Snelgrove P., Stainless Steel Automotive and Transport Developments, 2001.
- [8] Fernández S., Guía del Acero Inoxidable para Arquitectos, 2002.
- [9] Newson T., Stainless Steel Applications – Automotive, 2005.

- [10] Kemppainen J., Stainless Steel – A New “Light Metal” for the Automotive Industry, 2000.
- [11] Cunat P., Stainless Steel Properties for Structural Automotive Applications, 2000.
- [12] Akhavan B., Influence of Retained Austenite on the Mechanical Properties of Low Carbon Martensitic Stainless Steel Castings, 2010.
- [13] Tsuchida N., Stress-Induced Martensitic Transformation Behaviors at Various Temperatures and Their TRIP Effects in SUS304 Metastable Austenitic Stainless Steel, 2010.
- [14] Emmons J., Et al, Ultralight Stainless Steel Urban Bus Concept, 2001.
- [15] Placidi F., Et al., Potencial Application of Stainless Steel for Vehicle Crasworthiness Structures, 2003.
- [16] Capelli F., Et al., Stainless Steel: A New Structural Automotive Material, 2005.
- [17] Stainless Steel Car Frames – The Next Generation, Níkel & Society, Vol. 24, December 2008.
- [18] Gehm R., A Stainless Future, 2009.
- [19] Research in China, China Stainless Steel Industry Report. [En línea] 2007. <http://www.researchinchina.com/Htmls/Report/2008/5171.html>
- [20] El M., Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Caracterización Termodinámica de Aceros Inoxidables Austeníticos AISI 304, Diciembre 2003.

- [21] Vazquez J., Tesis de Maestría FIME-UANL, Estudio de la Precipitación de Carburos en el Acero Inoxidable AISI 304 en Enfriamiento Continuo, Enero 1996.
- [22] Colás R., Aceros Inoxidables, Resistentes a la Corrosión, al Calor y Súper Aleaciones, 1994.
- [23] Laufgang S., Aceros Inoxidables, 2003.
- [24] ASM Metals Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures, 2004, pp. 1589-1614.
- [25] Groover M., Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas, Prentice Hall, 1997, pp. 435-523.
- [26] García M., Tesis Doctoral, Universitat de Girona, Contribución al Estudio del Proceso de Doblado al Aire de Chapa. Modelo de Predicción del Ángulo de Recuperación y del Radio de Doblado Final, Julio 2005.
- [27] Cerda R., Tesis de Maestría FIME-UANL, Evolución del Tamaño de Grano Durante el Proceso de Forja en Caliente de una Aleación Base Níquel por Medio de Elemento Finito, Septiembre 2010.
- [28] Campos F., Formado por Deformación en Láminas Metálicas por el Proceso de Embutido Profundo, 2008.
- [29] Rodríguez O., Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas Puebla, Análisis de los Cambios Microestructurales que se Presentan en el Acero Inoxidable Usado para la Fabricación de Tubo de Escape, Mayo 2005.
- [30] ASM Metals Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation, 2000, pp. 429-432.

- [31] Dieter G., Mechanical Metallurgy SI Metric Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988, pp. 331-332.
- [32] Askenland D., Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Internacional Tomson Editores, 1998, pp. 130-138.
- [33] Zambrano P., Tesis Doctoral FIME-UANL, Utilización de la Técnica de Microscopia de Imágenes de Orientación para Relacionar la Microtextura de Aceros Laminados en Caliente con la Anisotropía, Octubre 2000.
- [34] Escribano M., El Análisis por Elementos Finitos, 2005.
- [35] Uzcátegui M., Abaqus Programa de Elementos Finitos, 2006.
- [36] Gameiro C., Dynamic Axial Crushing of Short to Long Circular Aluminium Tubes with Agglomerate Cork Filler, 2007.
- [37] ASTM, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio for Sheet Metal, E-517, 2007.
- [38] Kremer K., Metal Foams for Improved Crash Energy Absorption in Passenger Equipment, 2004.
- [39] ASM Metals Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991, pp. 1682-1687.

APÉNDICE A

Composición nominal de los aceros inoxidable modificada								
AISI	Composición (% en peso)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Otros
Aceros Austeníticos								
201	0.15	5.5-7.5	1	16-18	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25N
202	0.15	7.5-10	1	17-19	4-6	0.06	0.03	0.25N
301	0.15	2	1	16-18	6-8	0.045	0.03	-
302	0.15	2	1	17-19	8-10	0.045	0.03	-
302B	0.15	2	2-3	17-19	8-10	0.045	0.03	-
303	0.15	2	1	17-19	8-10	0.2	0.15	0.6Mo
303Se	1.15	2	1	17-19	8-10	0.2	0.06	0.15Se
304	0.08	2	1	18-20	8-10.5	0.045	0.03	-
304H	0.04-0.1	2	1	18-20	8-10.5	0.045	0.03	-
304L	0.03	2	1	18-20	8-12	0.045	0.03	-
304LN	0.03	2	1	18-20	8-12	0.045	0.03	0.1-0.16N
302Cu	0.08	2	1	17-19	8-10	0.045	0.03	3-4Cu
304N	0.08	2	1	18-20	8-10.5	0.045	0.03	0.1-0.16N
305	0.12	2	1	17-19	10.5-13	0.045	0.03	-
308	0.08	2	1	19-21	10-12	0.045	0.03	-
309	0.2	2	1	22-24	12-15	0.045	0.03	-
309S	0.08	2	1	22-24	12-15	0.045	0.03	-
310	0.25	2	1	24-26	19-22	0.045	0.03	-
310S	0.08	2	1.5	24-26	19-22	0.045	0.03	-
314	0.25	2	1.5-3	23-26	19-22	0.045	0.03	-
316	0.08	2	1	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3Mo
316F	0.08	2	1	16-18	10-14	0.2	0.1	1.75-2.5Mo
316H	0.04-0.1	2	1	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3Mo
316L	0.03	2	1	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3Mo
316LN	0.03	2	1	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3Mo; 0.1-0.16N
316N	0.08	2	1	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3Mo; 0.1-0.16N
317	0.08	2	1	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4Mo
317L	0.03	2	1	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4Mo
321	0.08	2	1	17-19	9-12	0.045	0.03	5x%C min Ti
321H	0.04-0.1	2	1	17-19	9-12	0.045	0.03	5x%C min Ti
330	0.08	2	0.75-1.5	17-20	34-37	0.04	0.03	-
347	0.08	2	1	17-19	9-13	0.045	0.03	10x%C min Nb
347H	0.04-0.1	2	1	17-19	9-13	0.045	0.03	8x%C - 1 Nb
348	0.08	2	1	17-19	9-13	0.045	0.03	0.2Co; 10x%C Nb: 0.1Ta
348H	0.04-0.1	2	1	17-19	9-13	0.045	0.03	0.2Co; 8x%C Nb: 0.1Ta
384	0.08	2	1	15-17	17-19	0.045	0.03	-

Aceros Ferríticos								
405	0.08	1	1	11.5-14	-	0.04	0.03	0.1-0.3Al
409	0.08	1	1	10.5-11.75	0.5	0.045	0.045	6x%C - 0.75 Ti
429	0.12	1	1	14-16	-	0.04	0.03	-
430	0.12	1	1	16-18	-	0.04	0.03	-
430F	0.12	1.25	1	16-18	-	0.06	0.15	0.6Mo
430FSe	0.12	1.25	1	16-18	-	0.06	0.06	0.15Se
434	0.12	1	1	16-18	-	0.04	0.03	0.75-1.25Mo
436	0.12	1	1	16-18	-	0.04	0.03	0.75-1.25Mo; 5x%C-0.7 Nb
439	0.07	1	1	17-19	0.5	0.04	0.03	0.15 Al; 12x%C-1.1Ti
442	0.20	1	1	18-23	-	0.04	0.03	-
444	0.025	1	1	17.5-19.5	1	0.04	0.03	1.75-2.5Mo; 0.025N
446	0.2	1.5	1	23-27	-	0.04	0.03	0.25N
Aceros Dúplex								
329	0.2	1	0.75	23-28	2.5-5	0.04	0.03	1-2Mo
Aceros Martensíticos								
403	0.15	1	0.5	11.5-13	-	0.04	0.03	-
410	0.15	1	1	11.5-13.5	-	0.04	0.03	-
414	0.15	1	1	11.5-14	1.25-2.5	0.04	0.03	-
416	0.15	1.25	1	12-14	-	0.06	0.15	0.6Mo
416Se	0.15	1.25	1	12-14	-	0.06	0.06	0.15Se
420	0.15	1	1	12-14	-	0.04	0.03	-
420F	0.15	1.25	1	12-14	-	0.06	0.15	0.6Mo
422	0.2-0.25	1	0.75	11.5-13.5	0.5-1	0.04	0.03	0.75-1.25Mo; 0.75-1.25W
431	0.2	1	1	15-17	1.25-2.5	0.04	0.03	-
440A	0.6-0.75	1	1	16-18	-	0.04	0.03	0.75Mo
440B	0.75-0.95	1	1	16-18	-	0.04	0.03	0.75Mo
440C	0.95-1.2	1	1	16-18	-	0.04	0.03	0.75Mo
Aceros Endurecidos por Precipitación								
PH 13-8Mo	0.05	0.2	0.1	12.2-13.2	7.5-8.5	0.01	0.008	2-2.5Mo; 0.9-1.35Al; 0.01N
15-5 HP	0.07	1	1	14-15.5	3.5-5.5	0.04	0.03	2.5-4.5Cu; 0.15-0.45Nb
17-4 HP	0.07	1	1	15.5-17.5	3-5	0.04	0.03	3-5Cu; 0.15-0.45Nb
17-7 HP	0.09	1	1	16-18	6.5-7.75	0.04	0.03	0.75-1.5Al

Tabla 19. Composición nominal de los aceros inoxidable modificada [39].

APÉNDICE B

Ecuaciones utilizadas para determinar las curvas Esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera correspondientes a los ensayos de tensión [31].

Deformación ingenieril:
$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (10)$$

Esfuerzo ingenieril:
$$S = \frac{P}{A_0} \quad (11)$$

Deformación ingenieril prima:
$$e' = e - e_0 \quad (12)$$

Ecuación para corregir el corrimiento en la probeta:
$$e_0 = e_1 - \left[\frac{S_1(e_2 - e_1)}{S_2 - S_1} \right] \quad (13)$$

Esfuerzo real:
$$\varepsilon = \ln(e') + 1 \quad (14)$$

Deformación real:
$$\sigma = S(e') + 1 \quad (15)$$

Ecuación de Hollomon:
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (16)$$

APÉNDICE C

Resumen de la secuencia de la simulación de compresión de la pieza tubular para los aceros HSLA grado 35, AISI 304L, 416L y 410S.

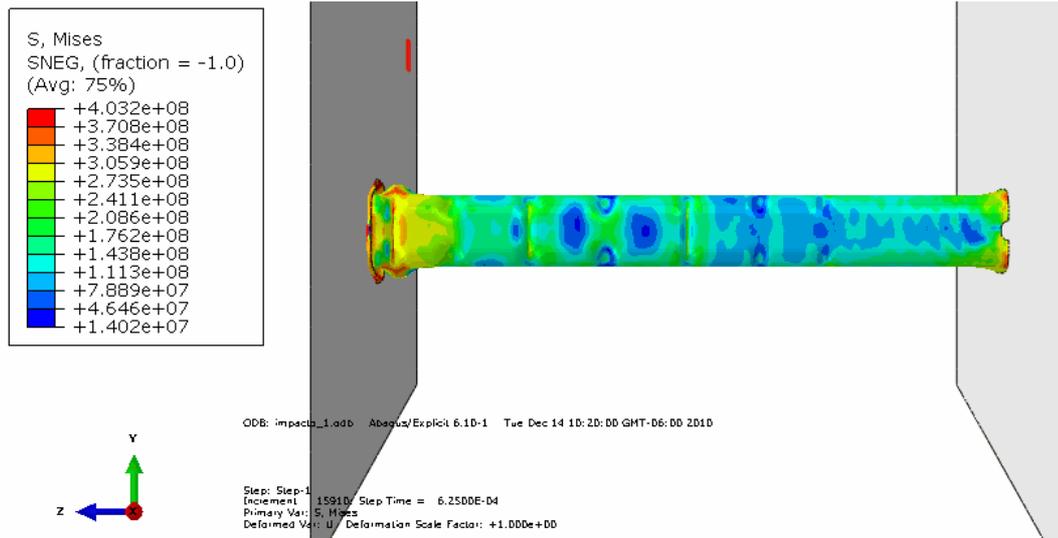


Figura C1 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 1/17 (403 MPa a 20.41 mm).

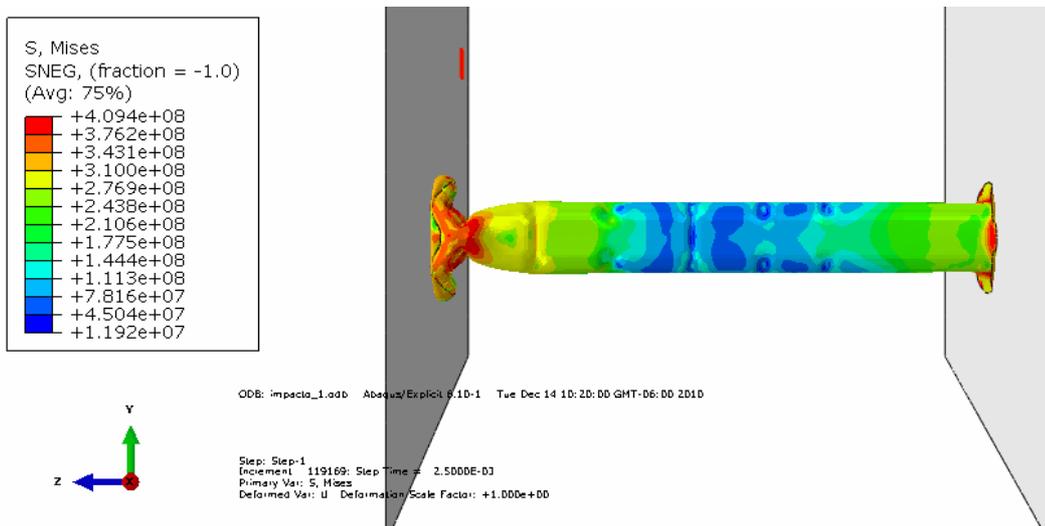


Figura C2 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 4/17 (409 MPa a 81.64 mm).

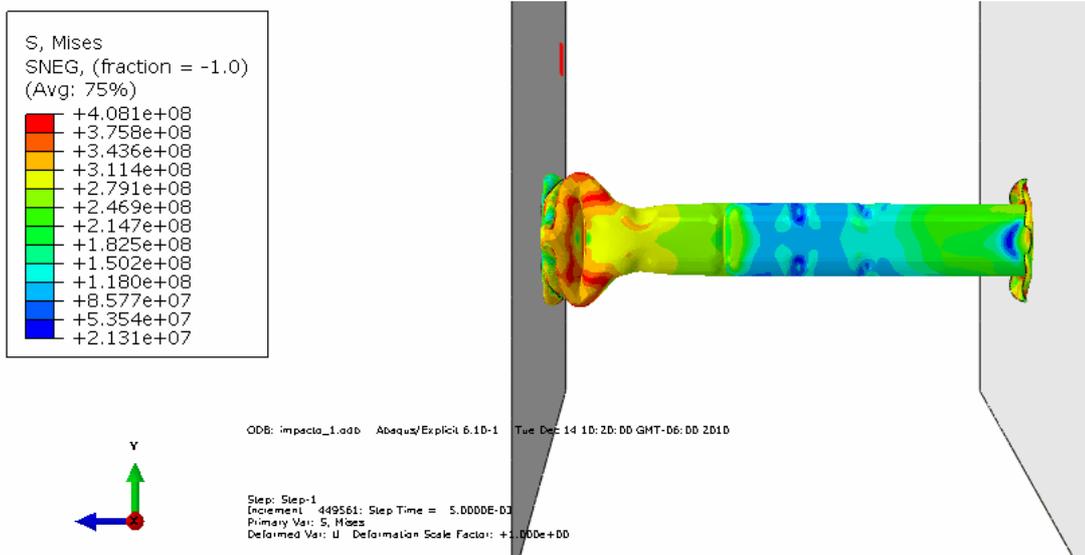


Figura C3 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 8/17 (408 MPa a 163.29 mm).

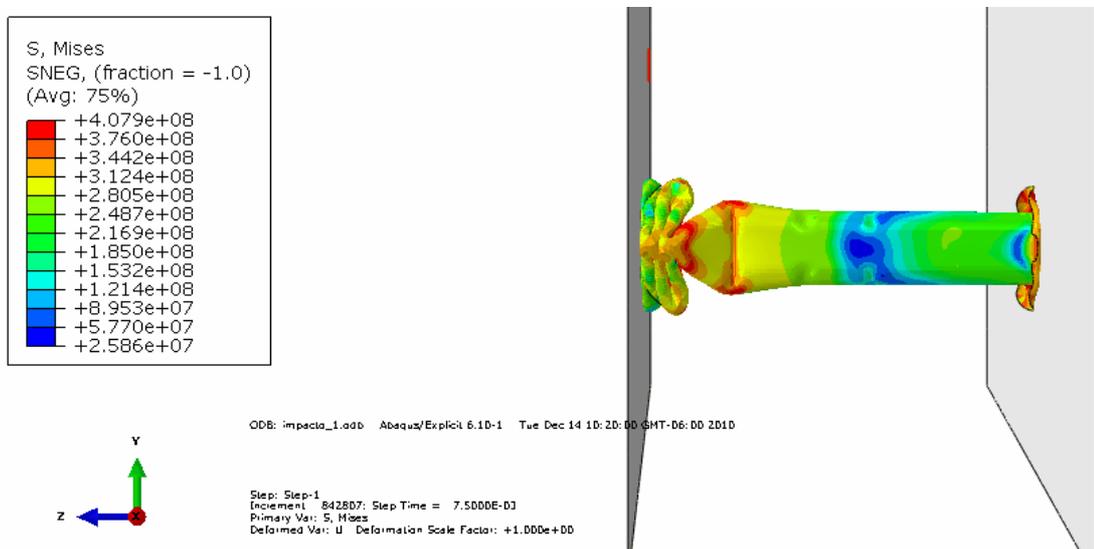


Figura C4 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 12/17 (407 MPa a 244.92 mm).

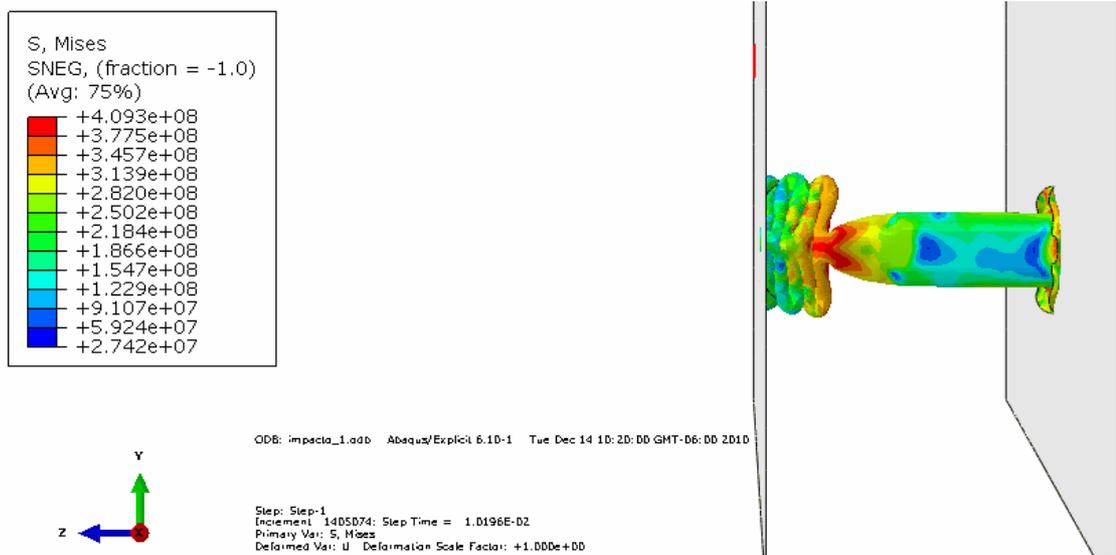


Figura C5 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 17/17 (409 MPa a 347 mm).

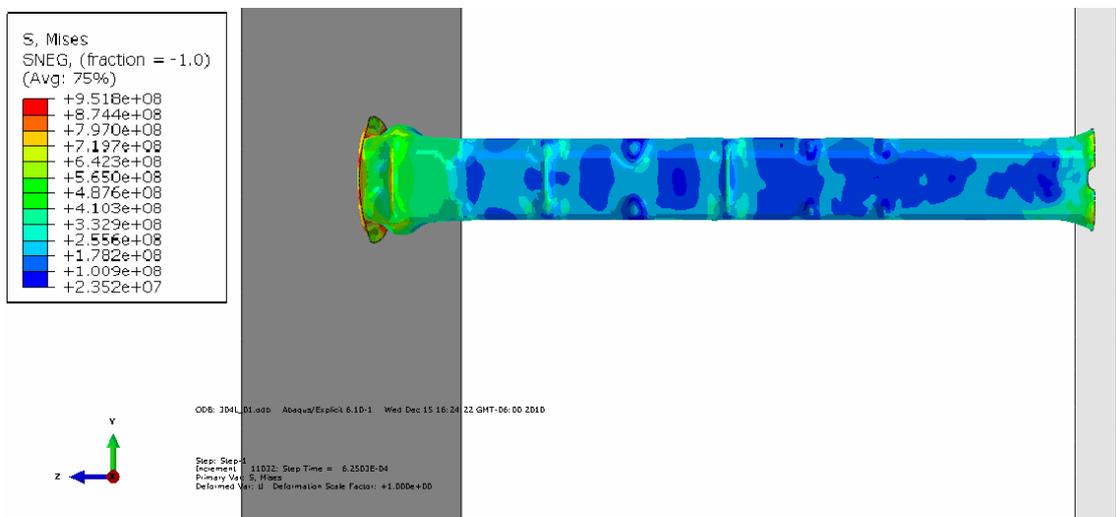


Figura C6 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 1/20 (951 MPa a 20.9 mm).

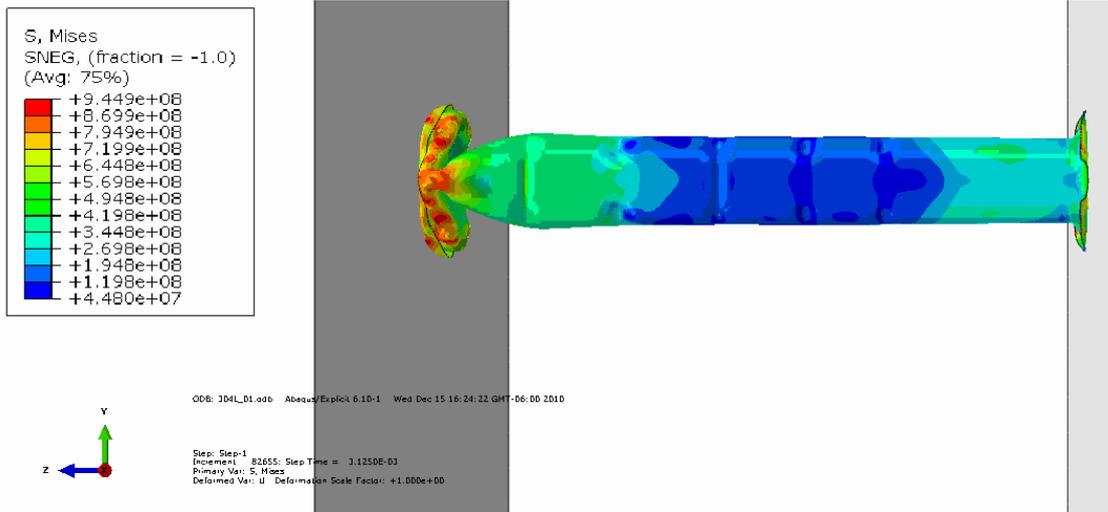


Figura C7 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 5/20 (944 MPa a 104.5 mm).

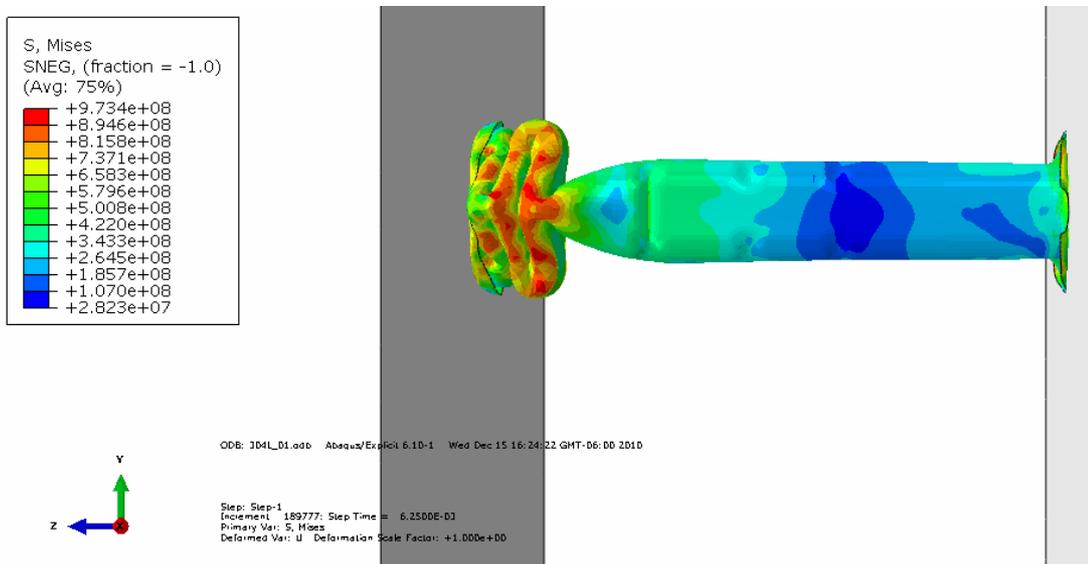


Figura C8 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 10/20 (973 MPa a 209 mm).

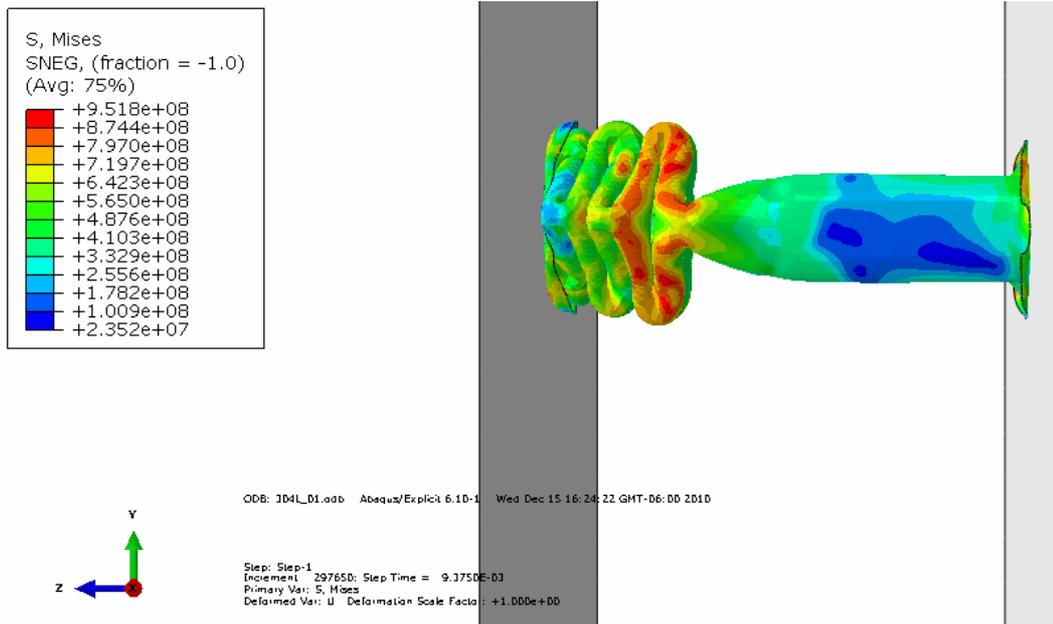


Figura C9 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 15/20 (951 MPa a 313.5).

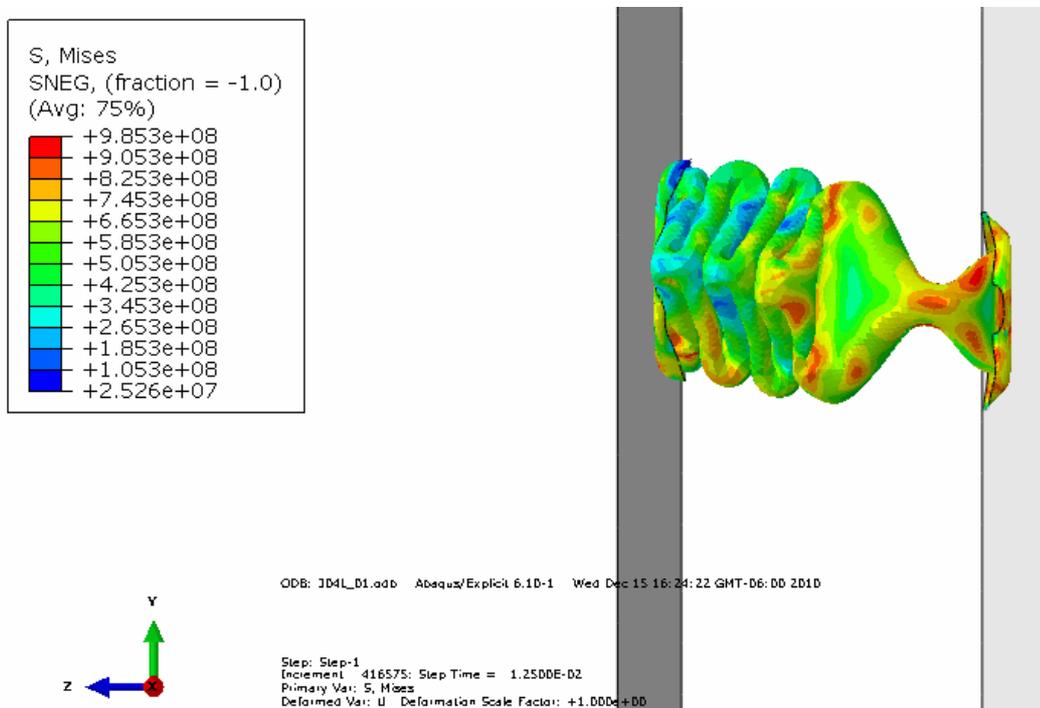


Figura C10 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 20/20 (985 MPa a 418 mm).

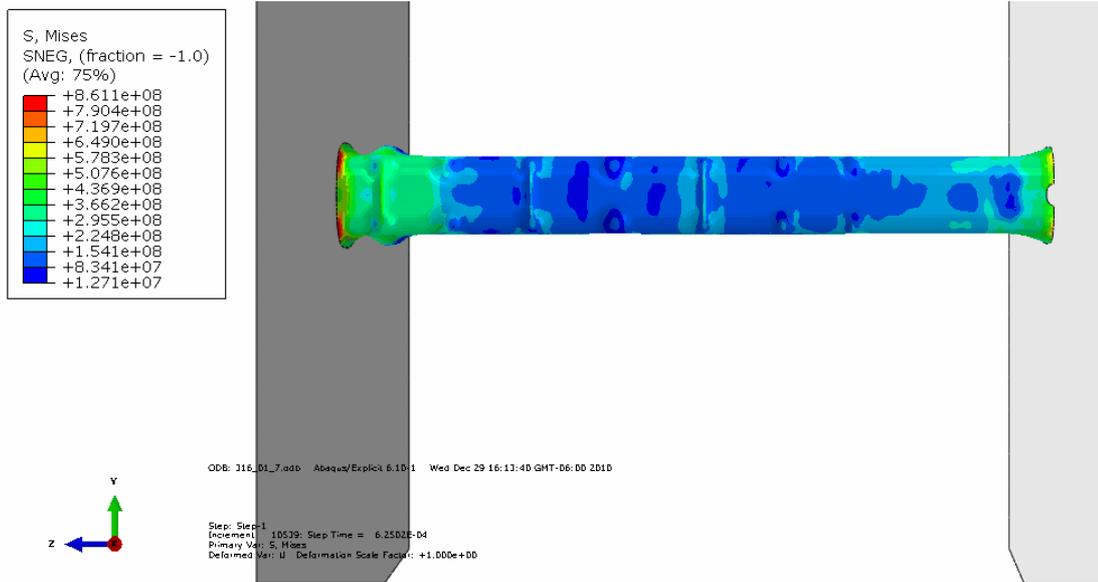


Figura C11 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 1/20 (861 MPa a 8.6 mm).

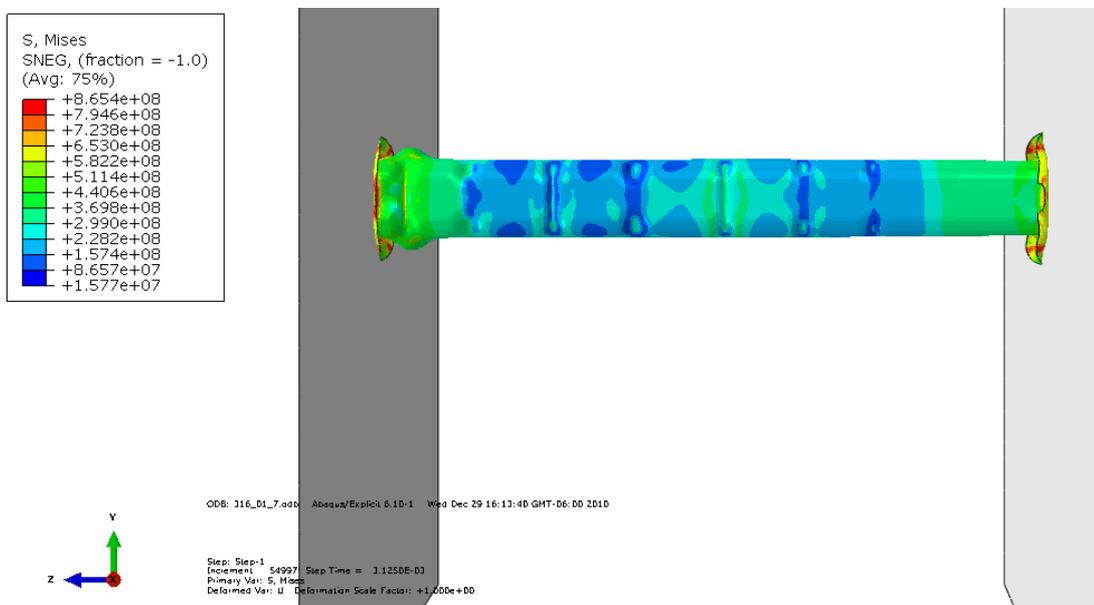


Figura C12 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 5/20 (865 MPa a 43 mm).

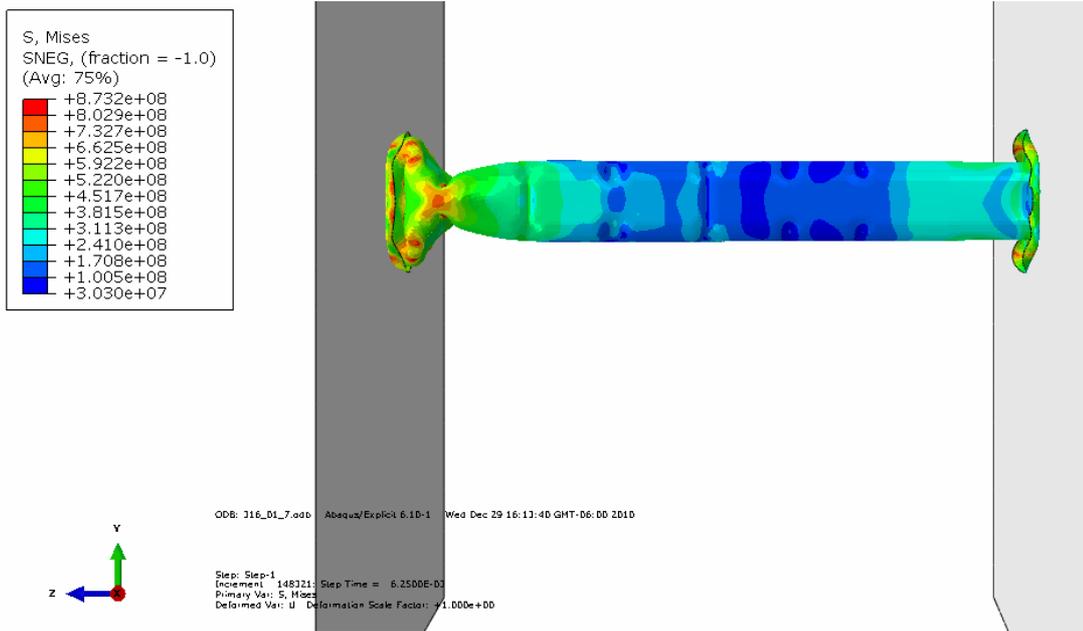


Figura C13 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 10/20 (873 MPa a 86 mm).

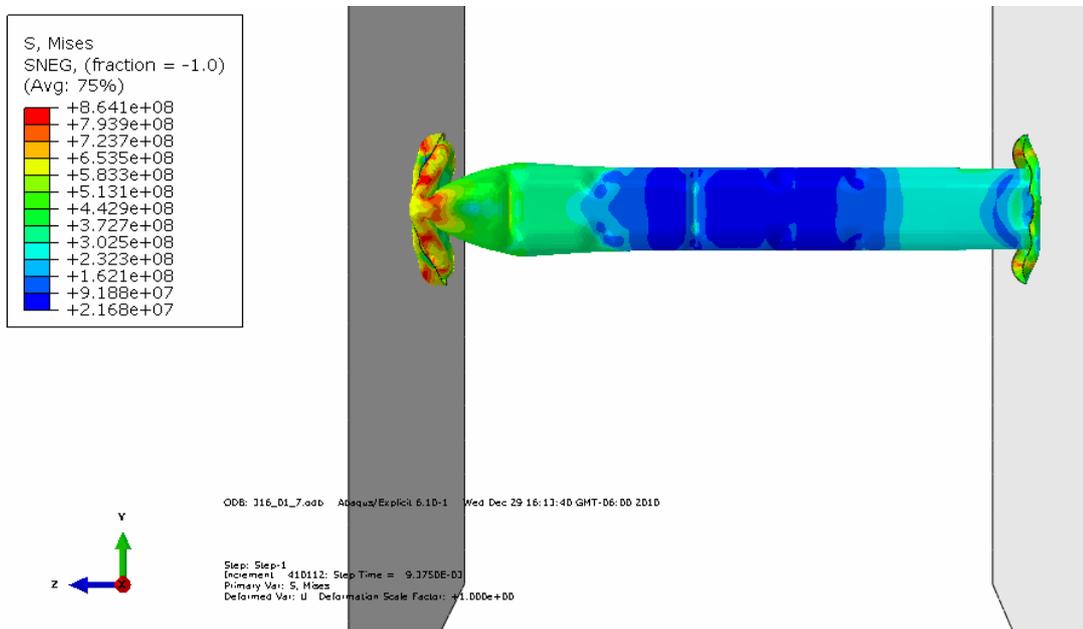


Figura C14 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 15/20 (864 MPa a 129 mm).

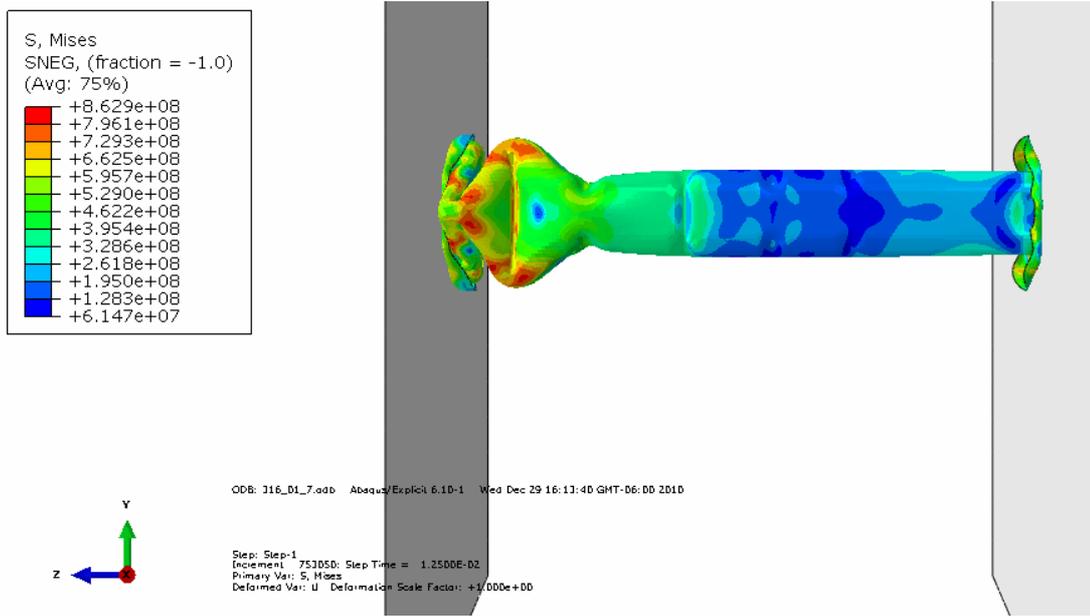


Figura C15 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 20/20 (862 MPa a 172 mm).

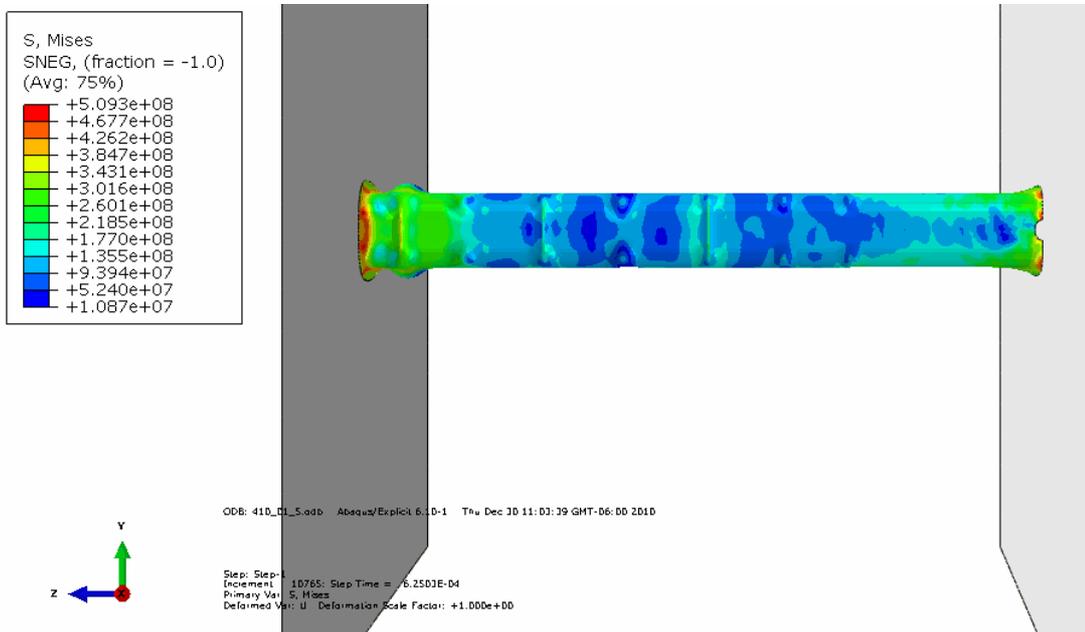


Figura C16 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 1/20 (509 MPa a 8.8 mm).

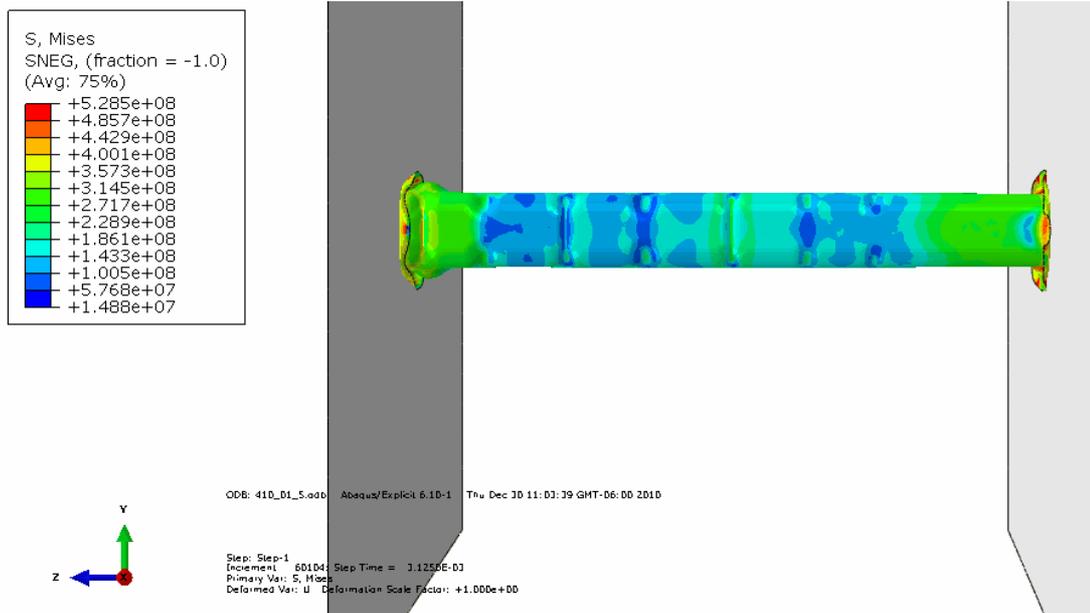


Figura C17 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 5/20 (528 MPa a 44 mm).

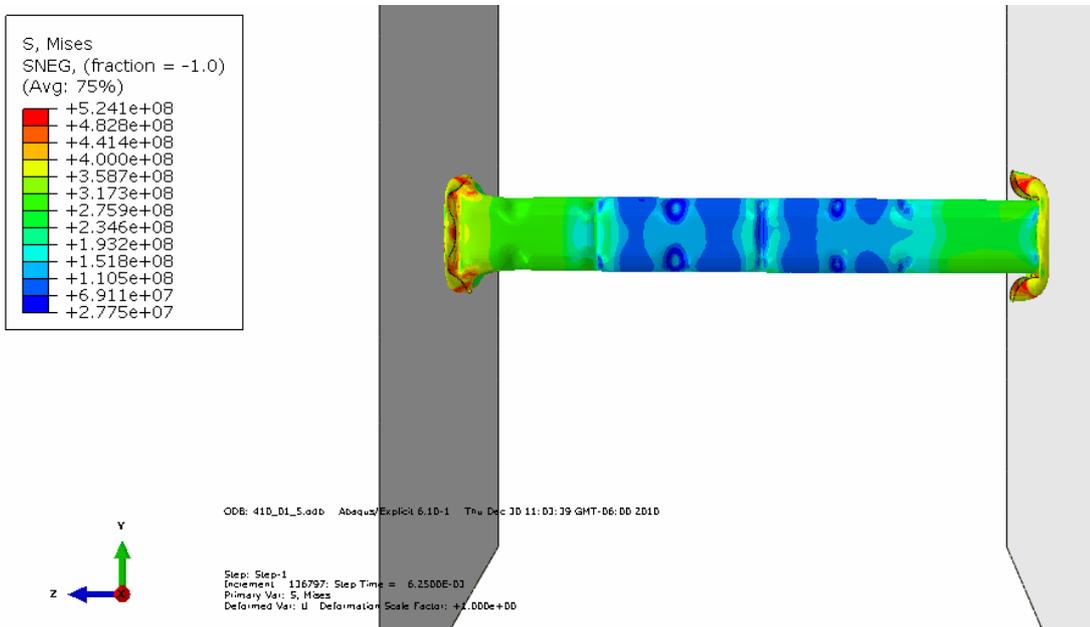


Figura C18 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 10/20 (524 MPa a 88 mm).

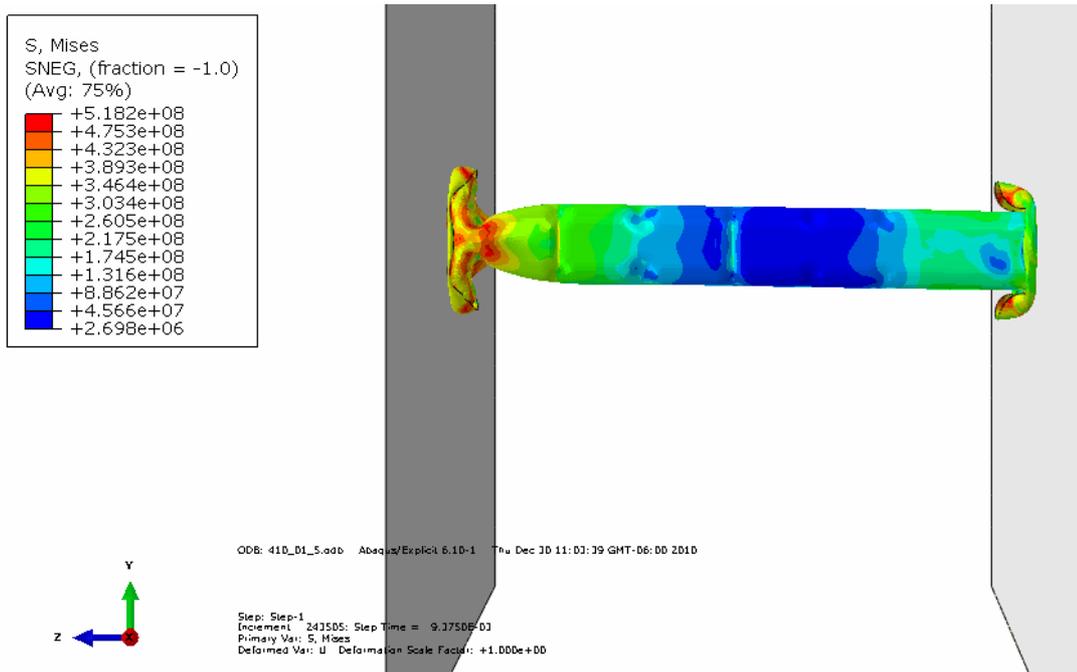


Figura C19 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 15/20 (518 MPa a 132 mm).

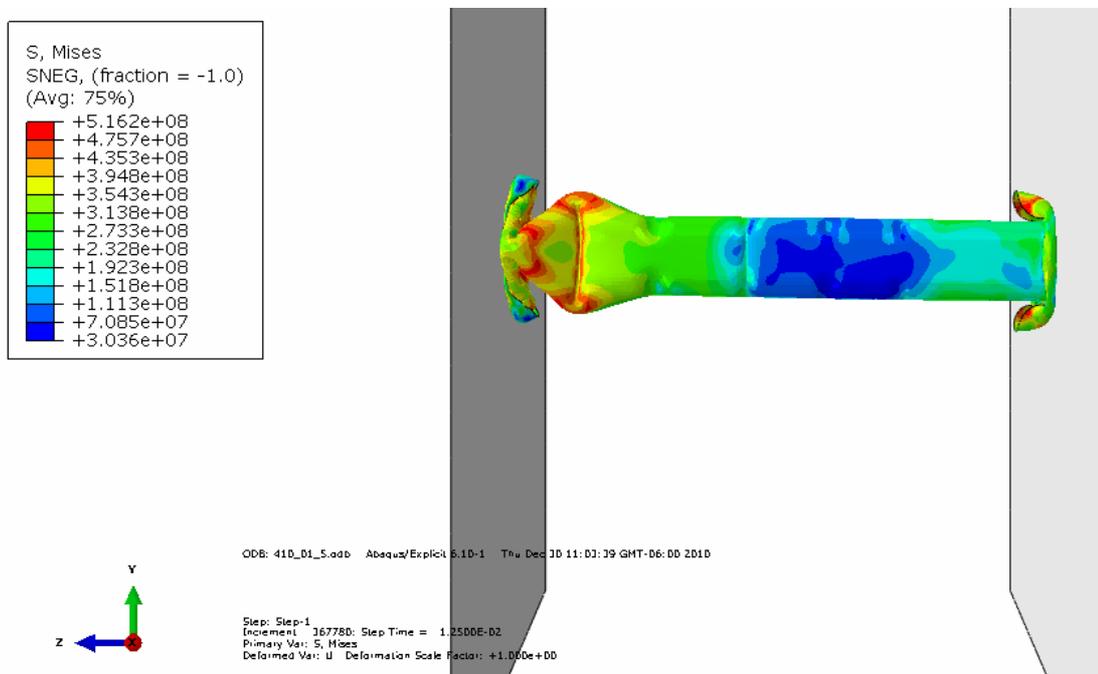


Figura C20 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 20/20 (516 MPa a 176 mm).

LISTA DE TABLAS

Tabla – Nombre	Página
Tabla 1. Clasificación de los aceros inoxidable según la AISI [21].	14
Tabla 2. Composición química nominal AISI 304L, 316L y 410S.	44
Tabla 3. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidable AISI 304L, 316L y 410S proporcionadas por el proveedor.	44
Tabla 4. Ataques químicos para aceros inoxidable modificada [24].	46
Tabla 5. Ensayo de dureza Rockwell.	49
Tabla 6. Ensayo de dureza Vickers.	50
Tabla 7. Diseño de experimentos de los ensayos de tensión.	54
Tabla 8. Resultados dureza Rockwell B AISI 304L, 316L y 410S.	61
Tabla 9. Resultados dureza Vickers AISI 304L, 316L y 410S.	62
Tabla 10. Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 10 mm/min.	64
Tabla 11. Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 100 mm/min.	66
Tabla 12. Resumen de las propiedades mecánicas AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 1000 mm/min.	67
Tabla 13. Diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de AISI 304L, 316L y 410S a ángulo constante.	69
Tabla 14. Diferencia de porcentajes del esfuerzo máximo y el porcentaje de elongación de AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal constante.	70
Tabla 15. Resultados de la compresión de los aceros HSLA, 304L, 416L y 410S.	83
Tabla 16. Cantidad de energía necesaria para la producción y manufactura de los aceros AISI 3140, 304L, 316L y 410S.	84
Tabla 17. Cantidad de emisiones contaminantes durante la producción y manufactura de los aceros AISI 3140, 304L, 316L y 410S.	85
Tabla 18. Comparación entre las propiedades del acero HSLA y el AISI 304L.	86
Tabla 19. Composición nominal de los aceros inoxidable modificada [39].	96

LISTA DE FIGURAS

Figura - Nombre	Página
Figura 3.1. Producción mundial de acero inoxidable entre el año 2002 y 2007 [19].	10
Figura 3.2. Si el acero inoxidable se corta o se daña, la capa pasiva se regenera en presencia del oxígeno del aire o el agua.	11
Figura 3.3. Árbol genealógico de los aceros inoxidables [20].	13
Figura 3.4. Tipos de familias de aceros inoxidables en función del contenido de (a) cromo y níquel, (b) cromo y carbono [20].	14
Figura 3.5. Diagrama de fases Fe-Cr [21].	15
Figura 3.6. Sección vertical del diagrama de fases Fe-Cr-Ni a 70% en peso de Fe [21].	16
Figura 3.7. Representación esquemática del diagrama de Schaeffler [20].	17
Figura 3.8. Familia de los aceros inoxidables austeníticos evolucionados a partir de AISI 304 para la obtención de determinadas propiedades [20].	21
Figura 3.9. Fotomicrografía de un acero inoxidable martensítico AISI 410 templado a 1000 °C y revenido a 200 °C por una hora, atacado químicamente mediante el reactivo Vilella, la fase clara es α y la oscura martensita [24].	25
Figura 3.10. Fotomicrografía de un acero inoxidable dúplex AISI 329 envejecido durante 48 horas a 816 °C, atacado químicamente mediante 20% NaOH y 80% H ₂ O a 3 V cd por 10 segundos, la flecha señala la fase γ en color blanco, σ aparece en naranja y la otra fase presente es α [24].	27
Figura 3.11. Fotomicrografía de un acero inoxidable endurecido por precipitación AISI 17-4 PH sometido a un proceso de recocido y envejecido, atacado químicamente mediante superpicral y revela los límites de grano, las fases presentes son ferrita en una matriz martensítica [24].	29
Figura 4.1. Proceso de laminación.	31
Figura 4.2. Procesos de forja: (a) dado abierto, (b) dado impreso y (c) sin rebaba.	33
Figura 4.3. Procesos de extrusión: (a) directa y (b) indirecta.	34
Figura 4.4. Operaciones de corte: a) cizallado, b) punzonado y c) perforado	36
Figura 4.5. Proceso de doblado.	37
Figura 4.6. Métodos de doblado: a) doblado V y b) doblado al aire.	38
Figura 4.7. Proceso de embutido.	39
Figura 4.8. Etapas del proceso de embutido: (1) el punzón entra en contacto con la lámina, (2) doblado, (3) enderezado, (4) compresión, y (5) forma final	40
Figura 4.9. Proceso de estampado.	41
Figura 4.10. Proceso de hidroformado: a) se coloca el tubo en el molde, b) el molde se sella, c) el fluido da forma al tubo y d) la pieza final se retira.	42
Figura 5.1. Orientación de las probetas respecto a la dirección de laminación.	45
Figura 5.2. Arreglo para el ataque electrolítico.	47
Figura 5.3. Durómetro Wilson modelo Series 500.	49

Figura 5.4. Microdurómetro Shimadzu modelo HMV-2T.	51
Figura 5.5. Maquina universal de pruebas Instron modelo 8502.	53
Figura 5.6. Dimensiones de la probeta de tensión [33].	53
Figura 5.7 Comparación entre una probeta deformada y sin deformar.	54
Figura 5.8. Pieza tubular.	57
Figura 5.9 Pieza tubular entre paredes solidas.	57
Figura 5.10 Ubicación de la pieza tubular en el chasis.	58
Figura 6.1. Fotomicrografía de un acero AISI 304L a 400x, revela un tamaño de grano promedio ASTM 8 (22.5 μ m), la zonas oscuras muestran la fase α en la matriz austenítica.	60
Figura 6.2. Fotomicrografía de un acero AISI 316L a 400x, revela un tamaño de grano promedio ASTM 9 (15.9 μ m), la zonas oscuras muestran la fase α en la matriz austenítica.	60
Figura 6.3. Fotomicrografía de un acero AISI 410S a 400x, revela un tamaño de grano promedio ASTM 7.5 (26.7 μ m).	61
Figura 6.4 Curva Esfuerzo verdadero vs. Deformación verdadera AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 10 mm/min.	64
Figura 6.5 Curva Esfuerzo verdadero vs. Deformación verdadera AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 100 mm/min.	65
Figura 6.6 Curva Esfuerzo verdadero vs. Deformación verdadera AISI 304L, 316L y 410S a velocidad de cabezal de 1000 mm/min.	67
Figura 6.7. Relación de deformación plástica promedio AISI 304L, 316L y 410S a velocidades de cabezal de 10, 100 y 1000 mm/min.	72
Figura 6.8 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista lateral).	73
Figura 6.9 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista superior).	74
Figura 6.10 Esfuerzo máximo de 409 MPa obtenido a 347 mm de compresión de la pieza de HSLA (vista isométrica).	74
Figura 6.11 Reducción en longitud de 347 mm (409 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de HSLA.	75
Figura 6.12 Esfuerzo máximo de 985 MPa obtenido a 418 mm de compresión de la pieza de AISI 304L (vista lateral).	76
Figura 6.13 Esfuerzo máximo de 985 MPa obtenido a 418 mm de compresión de la pieza de AISI 304L (vista superior).	76
Figura 6.14 Esfuerzo máximo de 985 MPa obtenido a 418 mm de compresión de la pieza de AISI 304L (vista isométrica).	77
Figura 6.15 Reducción de longitud de 418 mm (985 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de AISI 304L.	77
Figura 6.16 Esfuerzo máximo de 862 MPa obtenido a 172 mm de compresión de la pieza de AISI 316L (vista lateral).	78
Figura 6.17 Esfuerzo máximo de 862 MPa obtenido a 172 mm de compresión de la pieza de AISI 316L (vista superior).	79
Figura 6.18 Esfuerzo máximo de 862 MPa obtenido a 172 mm de compresión de la pieza de AISI 316L (vista isométrica).	79

Figura 6.19 Reducción de longitud de 172 mm (862 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de AISI 316L.	80
Figura 6.20 Esfuerzo máximo de 516 MPa obtenido a 176 mm de compresión de la pieza de AISI 410S (vista lateral).	81
Figura 6.21 Esfuerzo máximo de 516 MPa obtenido a 176 mm de compresión de la pieza de AISI 410S (vista superior).	81
Figura 6.22 Esfuerzo máximo de 516 MPa obtenido a 176 mm de compresión de la pieza de AISI 410S (vista isométrica).	82
Figura 6.23 Reducción de longitud 176 mm (516 MPa) obtenida en la compresión de la pieza de AISI 410S.	82
Figura C1 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 1/17 (403 MPa a 20.41 mm).	99
Figura C2 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 4/17 (409 MPa a 81.64 mm).	99
Figura C3 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 8/17 (408 MPa a 163.29 mm).	100
Figura C4 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 12/17 (407 MPa a 244.92 mm).	100
Figura C5 Compresión de pieza tubular de HSLA, paso 17/17 (409 MPa a 347 mm).	101
Figura C6 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 1/20 (951 MPa a 20.9 mm).	101
Figura C7 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 5/20 (944 MPa a 104.5 mm).	102
Figura C8 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 10/20 (973 MPa a 209 mm).	102
Figura C9 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 15/20 (951 MPa a 313.5).	103
Figura C10 Compresión de pieza tubular de AISI 304L, paso 20/20 (985 MPa a 418 mm).	103
Figura C11 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 1/20 (861 MPa a 8.6 mm).	104
Figura C12 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 5/20 (865 MPa a 43 mm).	104
Figura C13 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 10/20 (873 MPa a 86 mm).	105
Figura C14 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 15/20 (864 MPa a 129 mm).	105
Figura C15 Compresión de pieza tubular de AISI 316L, paso 20/20 (862 MPa a 172 mm).	106
Figura C16 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 1/20 (509 MPa a 8.8 mm).	106
Figura C17 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 5/20 (528 MPa a 44 mm).	107
Figura C18 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 10/20 (524 MPa a 88 mm).	107

Figura C19 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 15/20 (518 MPa a 132 mm).	108
Figura C20 Compresión de pieza tubular de AISI 410S, paso 20/20 (516 MPa a 176 mm).	108

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación - Nombre	Página
Ecuación 1. Rigidez especifica	5
Ecuación 2. Esfuerzo especifico	6
Ecuación 3. Porcentaje de cromo equivalente	16
Ecuación 4. Porcentaje de níquel equivalente	16
Ecuación 5. Número de granos por mm ²	59
Ecuación 6. Relación de deformación plástica	71
Ecuación 7. Relación de deformación de ancho inicial y final	71
Ecuación 8. Relación de deformación de espesor inicial y final	71
Ecuación 9. Relación de deformación plástica promedio	71
Ecuación 10. Deformación ingenieril	98
Ecuación 11. Esfuerzo ingenieril	98
Ecuación 12. Deformación ingenieril prima	98
Ecuación 13. Ecuación para corregir el corrimiento en la probeta	98
Ecuación 14. Esfuerzo real	98
Ecuación 15. Deformación real	98
Ecuación 16. Ecuación de Hollomon	98