

CAPÍTULO 2.

ANTECEDENTES

Este capítulo contiene una reseña del procedimiento seguido durante la fabricación de tubo de escape de acero inoxidable, en una empresa del sector automotriz. Se presenta una descripción de los procesos asociados a esta fabricación. La información contenida en este capítulo se presenta como marco de referencia al tema central que abarca esta tesis que es el análisis de los cambios microestructurales ocurridos durante la fabricación del tubo de escape.

2. 1. Proceso de Fabricación de Tubo de Escape

En el sector automotriz son requeridos diversos componentes, los cuales son obtenidos a partir de una gran variedad de procesos de manufactura. Por otro lado, la fabricación de uno de estos componentes puede llevar implícito no únicamente un proceso, sino una secuencia de operaciones mediante las cuales es posible obtener las transformaciones y características deseadas en los componentes a partir de un material inicial. En este caso, el proceso de manufactura de tubos de escape utiliza acero inoxidable, el cual pasa a través de diferentes procesos en los cuales el material sufre cambios en su microestructura.

2.1.1. Descripción del Proceso de Rolado

El rolado es un proceso común para la manufactura de tubos de acero que consiste en un proceso continuo mediante el cual una lámina es sometida a la acción de una serie de

rodillos que le proporcionan a la tira de acero una forma específica [1]. El producto obtenido de la fabricación de tubos puede ser utilizado en una amplia variedad de procesos, incluyendo el hidroformado y la soldadura láser. En el proceso de rolado uno de los materiales más utilizados es el acero inoxidable y las características que definen el producto que sale del rolado, son el diámetro del tubo y su espesor de pared. Una vez obtenida la forma tubular, los bordes son soldados para formar una sección cerrada. Después de efectuar la operación de soldado, se afina el diámetro requerido haciendo pasar el tubo a través de otro conjunto de rodillos.

La fabricación de tubos, generalmente, es efectuada por talleres especializados únicamente en ello, y no en el doblado y soldado posterior [2]. Es por ello que cuando existen componentes que requieren ser ensamblados a otra pieza, los fabricantes no utilizan productos estándares de otros proveedores, sino que incluyen en sus procesos secuencias de operaciones requeridas específicamente para su producto. El doblado de tubos puede ser efectuado mediante máquinas automáticas o manuales, las cuales utilizan rodillos para doblar el tubo mientras éste es formado.

La calidad del tubo rolado es un aspecto de suma importancia cuando son efectuadas operaciones posteriores de hidroformado en el material dado que variaciones en las propiedades del material como resistencia de cedencia y dureza pueden provocar adelgazamiento excesivo o agrietamiento prematuro durante el hidroformado. De acuerdo con Karan Shah [1], la distribución de esfuerzos alrededor de la circunferencia del tubo rolado depende del diseño de la secuencia del rolado; por otro lado, los tubos utilizados en la aplicación de hidroformado deberán ser producidos por una secuencia que proporcione una distribución casi uniforme de los esfuerzos alrededor de la circunferencia.

En este caso particular, el proceso de construcción del tubo de escape consiste en usar tiras de acero inoxidable ferrítico con denominación AISI 409, de 1.9 mm. de espesor. La tira de acero inoxidable es suministrada a la línea de producción mediante un par de bobinas que aseguran la continuidad en la alimentación del proceso al soldar el final de un rollo con la punta del siguiente, mediante un electrodo. En la sección de entrada se efectúa un desorille a la tira de acero inoxidable mediante cuchillas; esta operación tiene dos objetivos principales, la primera es garantizar el mismo ancho en la tira para posteriormente obtener un diámetro uniforme en el tubo, mientras que el segundo objetivo es proporcionar un ángulo de inclinación adecuado para la aplicación de la soldadura láser que se efectúa posteriormente.

La siguiente operación a la cual es sometida la tira, es un proceso de rolado gradual, efectuado mediante rodillos de perfilado. La tira se pasa a través de nueve rodillos con alta dureza y resistencia al desgaste, que provocan una deformación gradual en el material hasta obtener una forma tubular de 59 mm. de diámetro interno.

2.1.2. Soldadura Láser

El proceso de soldadura láser es un proceso moderno de soldadura utilizado para unir metales ferrosos, acero inoxidable, metales preciosos y aleaciones, ya sea con el mismo material o con otro material. La recurrencia de la industria actual por el uso de este proceso se debe a sus ventajas entre las que destacan la profundidad de penetración de la soldadura y la minimización del calor de entrada. Adicionalmente, es común utilizar alta tecnología asociada con este proceso; se usan sistemas computarizados para mejorar la calidad del producto mediante un control preciso del proceso de soldadura. Las ventajas en el uso de la soldadura láser son las siguientes [3]:

- Cordones profundos y delgados
- Ausencia de distorsión en las soldaduras generadas
- Minimización de zonas afectadas por el calor
- Habilidad para soldar componentes pequeños y delgados
- Alta velocidad de trabajo
- Soldadura sin contacto
- No requiere aislamiento
- No requiere acabados secundarios
- Soldaduras extremadamente precisas

Entre las limitaciones asociadas al uso de la soldadura láser se mencionan:

- Alta velocidad de enfriamiento puede causar ruptura en algunos metales
- Elevada inversión inicial
- Superficies ópticas fácilmente dañadas
- Alto costo de mantenimiento

La soldadura láser funciona dirigiendo el disparo de luz a la superficie de la pieza, donde la concentración de luz se convertirá en energía térmica, provocando una fusión del material de la pieza. Generalmente los espesores menores a 0.800 pulgadas son factibles para este proceso. Debido a que la fuente de calor es luminosa, no existe material de aporte, lo que permitirá que exista una excelente resistencia a la fatiga en la unión. El láser, acrónimo de “Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación” es un artefacto que produce una luz concentrada por medio de la estimulación molecular o la transición electrónica a niveles menores de energía causando una emisión de fotones [4]. Ver figura 2.1.

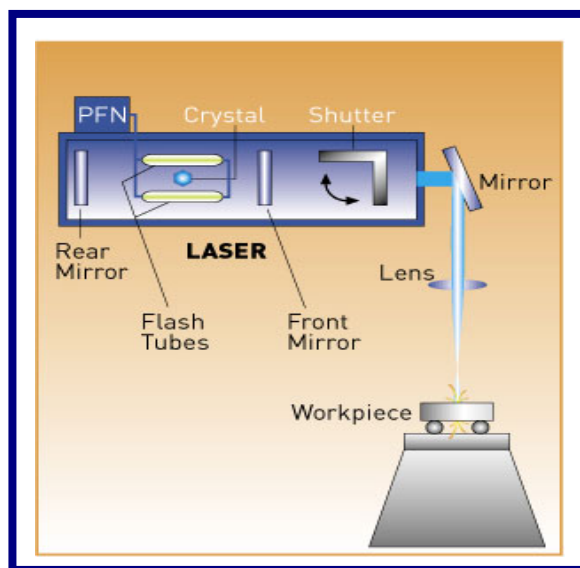


Figura 2.1 Funcionamiento de la Soldadura Láser [4]

En el proceso de fabricación de tubo de escape bajo estudio, una vez rolada la tira de acero, el tubo resultante es soldado longitudinalmente mediante un proceso de soldadura láser similar al detallado en esta sección. Este proceso cuenta con un sistema computarizado de ajuste de parámetros que garantizan la correcta aplicación de la soldadura y, mediante límites de control, evitan un desfase entre el punto de aplicación y la posición del tubo rolado que es ajustada mecánicamente. La tabla 2.1 muestra algunos parámetros relevantes utilizados en el proceso de soldadura láser.

Tabla 2.1 Parámetros Utilizados Durante el Proceso de Soldadura Láser

Variable	Rango	Unidades
Velocidad de Aplicación	aprox. 7	m/min.
Distancia entre fuente del rayo y punto de aplicación	184	mm.
Potencia del láser	4100-4600	W

Posteriormente, el tubo soldado es sometido a un pulido mediante lijas para proporcionar un acabado uniforme a la soldadura y posteriormente pasa por una estación de calibración

de diámetro y otra de enderezado que corrige cualquier deformación sufrida anteriormente. Para inspeccionar el proceso de soldadura, el material pasa por una estación que cuenta con un equipo de corriente parásita que detecta grietas o poros en la soldadura e inyecta una marca con spray donde exista uno de esos defectos. Posteriormente una impresora de chorro marca el material con el código de lote y fecha de fabricación. La siguiente operación consiste en cortar el tubo a una longitud de 510 mm. mediante una cortadora automática. Con esta última operación se termina el proceso de producción de tubo (Figura 2.2), que servirá como materia prima para la fabricación del tubo de escape.



Figura 2.2 Tubo Rolado y Soldado

2.1.3. Proceso de Hidroformado

El hidroformado de tubos es una tecnología relativamente nueva y, por lo tanto, con investigación en desarrollo. Entre los aspectos sujetos a investigación se encuentran el diseño de herramental, sistema hidráulico, material de los moldes, concentraciones de

esfuerzo, fricción, recubrimientos para las piezas, parámetros del proceso y selección de material. Entre las principales ventajas del hidroformado se encuentra el hecho de que permite producir piezas de menor peso y mayor rigidez. Una de las industrias más beneficiadas con el desarrollo de este proceso ha sido la industria automotriz, la cual cuenta con diversos componentes fabricados mediante este método como por ejemplo, componentes de la suspensión, flechas, componentes del chasis, tubos de escape, entre otros. En términos generales el proceso de hidroformado de tubos puede ser explicado mediante cuatro fases:

1. *Alimentación de pieza a prensa de hidroformado.* Un tubo previamente preparado con una película sólida lubricante es colocado en el molde. Ver figura 2.3

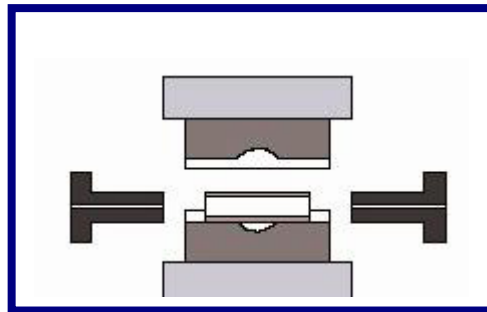


Figura 2.3 Alimentación de Pieza a la Prensa de Hidroformado [5]

2. *Aprisionamiento de la pieza.* Al activar la prensa de hidroformado el molde se cierra manteniendo en su interior el tubo a hidroformar. Ver figura 2.4

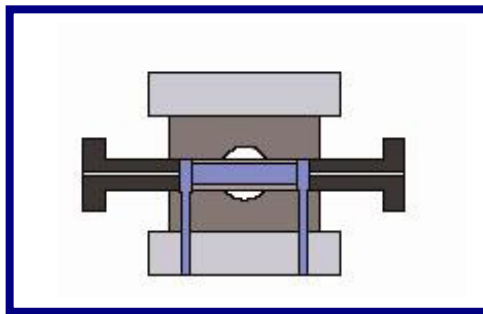


Figura 2.4 Sujeción de la Pieza a Hidroformar [5]

3. *Activación del proceso de hidroformado.* Se aplica una fuerza axial mediante dos pistones además de una presión interna ejercida por un fluido. Ver figura 2.5

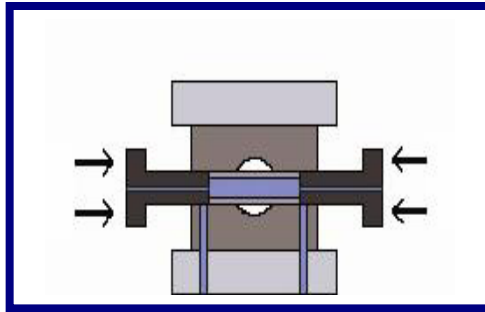


Figura 2.5 Activación de Proceso de Hidroformado [5]

4. *Recuperación de la pieza hidroformada.* El ciclo de hidroformado termina con la apertura del molde y la recuperación de la pieza hidroformada. Ver figura 2.6

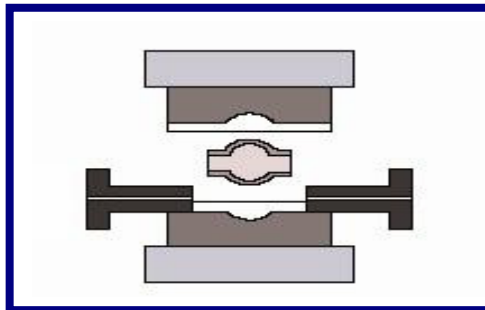


Figura 2.6 Pieza Hidroformada [5]

La tecnología del hidroformado proporciona una alternativa atractiva respecto a otros procesos de formado, debido a su bajo costo por pieza y utilidad para producción de partes asimétricas y contornos irregulares.

Las ventajas en el uso del hidroformado son las siguientes [6]:

- Herramental no caro
- Versatilidad en el formado de formas y contornos complejos
- Mínimo adelgazamiento del material

- Minimización en las operaciones requeridas
- Cambios de herramental más rápidos
- Ahorro en costo de acabado
- Versatilidad de materiales formados
- Precisión dimensional
- Facilidad en el diseño de nuevos productos

En este caso de fabricación, previo al proceso de hidroformado, el tubo es preparado mediante un baño químico a 80 °C durante 1 hora, con esto se le aplica un recubrimiento de Microgleit 18808 que es una película sólida lubricante de bisulfito de molibdeno. Cada pieza es recubierta con 29 gramos de este producto con el propósito de disminuir la fricción entre la pieza y el molde durante el proceso de hidroformado, efectuado posteriormente.

El tubo preparado en la operación anterior, es sometido al proceso de hidroformado para obtener la forma del escape mediante la aplicación de dos fuerzas axiales de compresión y fluido a alta presión. Un operador toma uno a uno los tubos y lo coloca en el molde de la prensa de hidroformado; posteriormente acciona la máquina y ésta comienza a inyectar una emulsión con una presión de 400 bar; adicionalmente dos pistones aplican sobre la pieza una presión de 900 bar. La forma deseada (Figura 2.7) es obtenida en aproximadamente 33 segundos, la pieza hidroformada es descargada manualmente de la prensa y colocada en racks para su transporte al siguiente proceso. Cabe mencionar que en este punto, la longitud del tubo es modificada de 510 a 300 mm.



Figura 2.7 Tubo Hidroformado

Las piezas hidroformadas son lavadas únicamente con agua a presión y a una temperatura de 70 °C mediante espreas. La pieza es sometida a un tiempo de espera de 2 días, con el objetivo de asegurar el completo secado de la misma.

2.1.4. Tratamiento Térmico

El trabajo en frío ofrece algunas ventajas al ser empleado, pues permite obtener tolerancias dimensionales de alta precisión y buenos acabados superficiales. Por otro lado, hablando en términos económicos, el trabajo en frío resulta sumamente rentable. Sin embargo, simultáneamente al producir la forma deseada puede endurecer el metal, haciéndolo quebradizo afectando posibles procesos de manufactura posteriores. Durante la deformación del material se producen esfuerzos residuales, los cuales no tienen una distribución uniforme en el material deformado. Los esfuerzos residuales afectan la capacidad de la pieza para soportar cargas. En caso de que una pieza tenga esfuerzos

residuales a compresión, ésta será resistente a esfuerzos de tensión. De manera similar, cuando la pieza tiene esfuerzos residuales a tensión su resistencia a la compresión será mayor pero su resistencia a la tensión disminuirá [7].

El principal tratamiento térmico aplicado a un acero inoxidable ferrítico es el recocido, que generalmente se obtiene al enfriar rápidamente el material desde una alta temperatura [8]. Con el objetivo de eliminar los efectos del trabajo en frío y el endurecimiento producido durante la deformación debido a las dislocaciones, se emplea el tratamiento térmico de recocido, el cual permite conservar las tolerancias dimensionales obtenidas inicialmente en la pieza y el acabado superficial. Por otro lado, mediante el recocido se obtiene una estructura casi homogénea. En su condición recocida el acero inoxidable ferrítico desarrolla una alta ductilidad y resistencia a la corrosión.

Tabla 2.2 Parámetros de Recocido para Aceros Inoxidables Ferríticos [8]

Annealing Treatments of Ferritic Stainless Steels			
Type	Temperature(a)		Cooling method(b)
	°F	°C	
405	1350 to 1500	735 to 815	AC or WQ
409	1600 to 1650	885 to 900	AC
429	1450 to 1550	780 to 845	AC or WQ
430	1400 to 1500	760 to 815	AC or WQ
430F	1250 to 1400	675 to 760	AC or WQ
430FSe	1250 to 1400	675 to 760	AC or WQ
434	1450 to 1550	790 to 845	AC or WQ
436	1450 to 1550	790 to 845	AC or WQ
442	1350 to 1500	735 to 815	AC or WQ
446	1450 to 1600	790 to 870	AC or WQ

(a) Time at temperature depends on section thickness, but is usually 1 to 2 hr, except for sheet which may be soaked 3 to 5 min per 0.10 in. (2.5 mm) of thickness. (b) AC, air cool; WQ, water quench

La tabla 2.2 muestra los rangos estándares de temperatura y método de enfriamiento utilizados para los aceros inoxidables. En esta tabla se puede observar que para el acero inoxidable ferrítico AISI 409 se debe emplear un recocido a una temperatura de entre 885 °C y 900 °C con un enfriamiento con aire. En los grados ferríticos, puede desarrollarse una

fragilidad debida a un enfriamiento lento o a una exposición prolongada a una temperatura de 475°C [7]. Se piensa que la fragilidad es causada por la precipitación de cromos ferríticos. Por lo tanto, los tratamientos térmicos con enfriamiento en horno para obtener máxima ductilidad deben estar controlados para evitar la fragilidad.

La etapa final en el proceso de fabricación estudiado consiste en someter al tubo previamente hidroformado, a un tratamiento térmico para disminuir la dureza que adquirió por la deformación en frío durante los procesos anteriores. Para ello, la pieza es introducida a un horno continuo en el cual el material es sometido a tres etapas; la primera etapa consiste en un precalentamiento a 40 °C, mientras que la tercera etapa consiste en un enfriamiento, con una temperatura controlada a 40 °C La etapa intermedia consiste en un horno de calentamiento dividido en 4 zonas; la atmósfera utilizada consiste en una mezcla de nitrógeno e hidrógeno como combustible y se encuentra a una temperatura de 800-820 °C. La tabla 2.3 muestra los parámetros utilizados durante el tratamiento térmico.

Tabla 2.3 Parámetros Utilizados Durante el Tratamiento Térmico

Variable	Rango	Unidades
Temperatura de Horno de Precalentamiento	40	°C
Temperatura Zona 1	800	°C
Temperatura Zona 2, 3 y 4	820	°C
Temperatura de Refrigeración	40	°C
Velocidad de la Banda	300	mm/min
Nitrógeno	15000-16000	m ³ /hr
Hidrógeno	25000-26100	m ³ /hr

La velocidad de la banda regula los tiempos de permanencia en cada una de las etapas del tratamiento térmico. A continuación, la tabla 2.4 muestra los tiempos correspondientes a la velocidad establecida de 300 mm/min.

Tabla 2.4 Tiempos Utilizados para el Tratamiento Térmico

Zona	Tiempo (min.)
Pre calentamiento	7
Calentamiento Zona 1	6
Calentamiento Zona 2	5
Calentamiento Zona 3	5
Calentamiento Zona 4	4
Enfriamiento	44

Finalmente, tres cortes son efectuados sobre la pieza para controlar la longitud de los tres extremos (A,B,C) de la pieza final (Figura 2.8); las rebabas resultantes son eliminadas y la pieza es cepillada, finalizando así el proceso de fabricación del tubo.

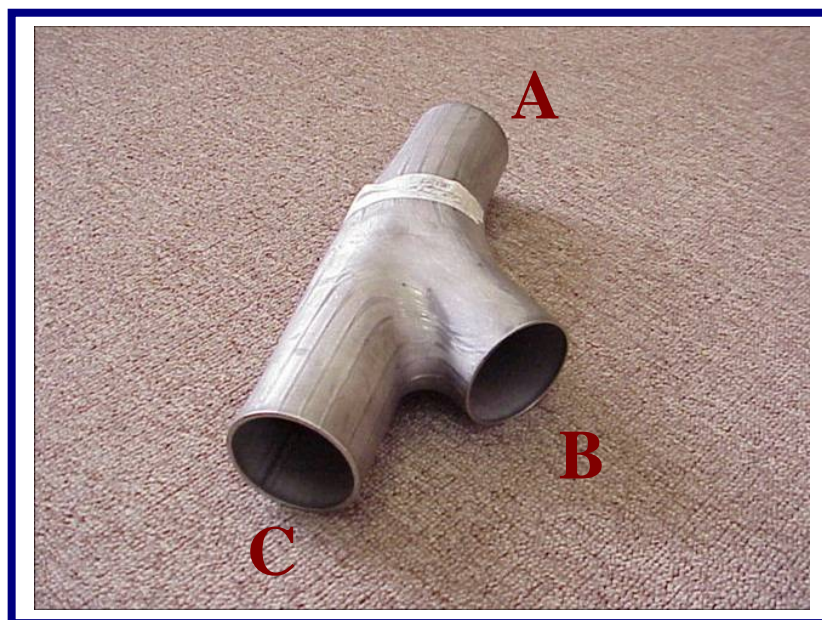


Figura 2.8 Pieza Final

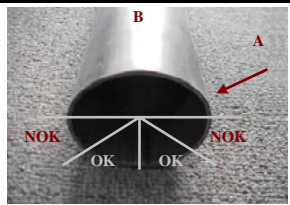
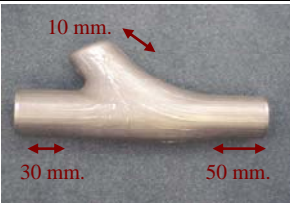
2.1.5. Especificaciones Técnicas para la Pieza Final

Las Tablas 2.5 y 2.6 muestran las características dimensionales y atributos especificados para la pieza (ver Figura 2.8), mismos que son verificados al final del proceso como cumplimiento a los requerimientos del cliente.

Tabla 2.5 Características Dimensionales Requeridas para Pieza Final

Variable	Rango	Unidades
Diámetro A, B y C	62.7-64.3	mm.
Espesor en A, B y C	1.4-3.2	mm.
Longitud Total	282-284	mm.
Dureza Máxima	87	HRB

Tabla 2.6 Atributos Verificados en Pieza Final

Atributo	Descripción	Ayuda Visual
Ubicación de la soldadura	La pieza no debe presentar la costura de la soldadura fuera de los 45° especificados.	
Arrugas provenientes de proceso de hidroformado	Verificar que la pieza no presente arrugas en las áreas indicadas. Fuera de las áreas indicadas solamente se permiten ondulamientos no muy pronunciados.	

En el proceso de fabricación, se pueden presentar fallas en el hidroformado y en el tratamiento térmico. En el proceso de hidroformado se encuentran fallas como: Fractura o ruptura del material, material mal formado del domo en el interior y exterior de la pieza, material con longitud, espesor y diámetros fuera de especificación, la causa potencial de las fallas se deben a que los parámetros del proceso no están controlados. Otra falla común es la presencia de arrugas y esto se debe a que el recubrimiento esta fuera de inspección.

Respecto al material tratado térmicamente se encuentran fallas como material oxidado y la causa potencial se debe a que el material este húmedo o que la banda transportadora este sucia. De manera similar, la sobrecarga de piezas en la banda transportadora puede ocasionar que el material tenga una dureza fuera de especificación.

Considerando el proceso de fabricación al que el material es sometido, se realizará el estudio a nivel microestructural, mediante el cual se conocerán las características y cambios microestructurales en las diferentes etapas durante el proceso de fabricación.