

CAPÍTULO 5.
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES DEL MATERIAL
HIDROFORMADO

Este capítulo contiene una descripción de las características del material hidroformado. En la fabricación de tubo de escape, la pieza previamente rolada y soldada es sometida a un trabajo en frío en una prensa que mediante una deformación genera la forma final del tubo de escape. Se presentan primeramente las características microestructurales del material hidroformado. Posteriormente, se presentan las metalografías efectuadas al material hidroformado, las condiciones bajo las cuales se efectuó el análisis, así como la interpretación de las metalografías arrojadas por la prueba. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de un macroataque efectuado en la pieza hidroformada.

5. 1. Características Microestructurales del Material Hidroformado

El proceso de hidroformado consiste en la aplicación de una presión interna mediante un fluido, para transformar un tubo recto en un componente con una forma que incluya diversas protuberancias. La metodología del hidroformado consiste en colocar un tubo en un molde cerrado con la forma deseada; posteriormente al aplicar el fluido presurizado al interior del tubo, éste adopta la forma del molde. La introducción del proceso de hidroformado al sector automotriz se debe principalmente a la mejora en el diseño de piezas, no únicamente por las formas irregulares conseguidas, sino también porque elimina la necesidad de ensambles para conseguir estas formas.

La figura 5.1 muestra la secuencia seguida por el material para obtener el tubo de escape a partir del material previamente rolado y soldado. La deformación del material ocasiona una reducción considerable en la longitud del tubo inicial. Al observar la pieza antes y después del hidroformado resulta aparente intuir que existen una serie de cambios a nivel microestructural



Figura 5.1 Pieza Hidroformada (derecha) a partir del Tubo Rolado y Soldado (izquierda).

El hidroformado constituye un trabajo en frío mediante el cual se ocasiona una deformación permanente del material y consecuentemente un endurecimiento del mismo. Por su parte, algunos de los cambios microestructurales ocasionados por esta deformación incluyen una serie de deslizamientos de las dislocaciones presentes en el material, las cuales aumentan al aplicar un esfuerzo mayor al límite elástico. La deformación del material ocasiona un alargamiento de los granos formando una red fibrosa [7].

5. 2. Metodología del Experimento

Con el objetivo de analizar la microestructura del material hidroformado, se seleccionaron una serie de secciones de la pieza. El criterio de selección fue, por un lado, las zonas con mayor deformación, y por otro lado, aquellas zonas que en capítulos posteriores permitan efectuar una comparación con las microestructuras del material en procesos anteriores y

posteriores al hidroformado. La sustancia de ataque fue, como en capítulos anteriores (ver Apéndice A), reactivo de Vilella. El tiempo de ataque de las muestras fue de 90 segundos. Para cada una de las muestras, con excepción de las de soldaduras y aquellas muestras cuya dimensión no permitía otra observación, se consideraron tanto la sección transversal como la longitudinal para el análisis microestructural. Para las muestras de soldaduras únicamente se consideraron secciones transversales. Cabe mencionar que las escalas de aumentos utilizadas fueron 100X, para todas las muestras y 50X para una vista más general de la sección. La figura 5.2 muestra la ubicación de las muestras estudiadas sobre la pieza hidroformada:

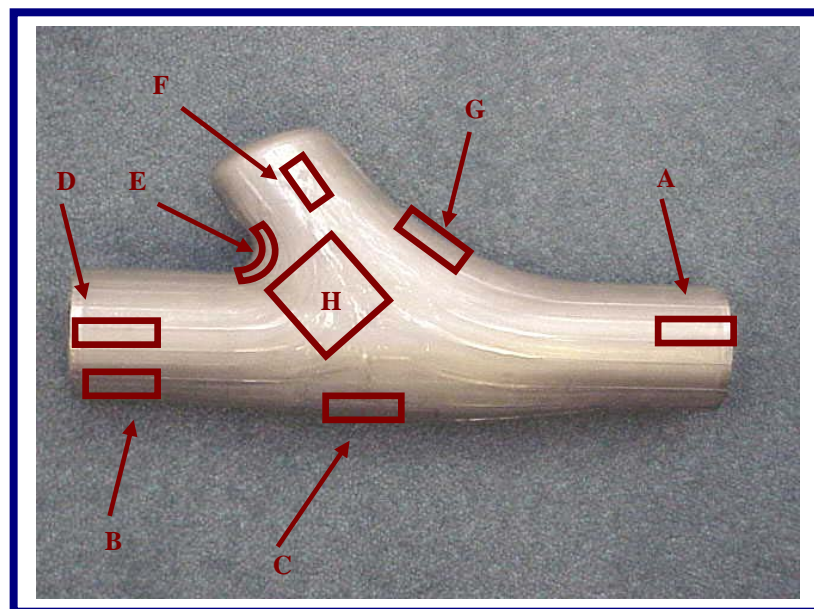


Figura 5.2 Ubicación de Muestras Estudiadas sobre Pieza Hidroformada

5.2.1. Metalografía Efectuada sobre Muestra A

En el caso de la muestra A (ver figura 5.2) se consideraron como sujetas a estudio tanto la sección transversal como la longitudinal. La figura 5.3 muestra la metalografía efectuada a

la sección transversal de la muestra A con reactivo de Vilella, mientras que la figura 5.4 muestra la metalografía para la sección longitudinal.



**Figura 5.3 Microestructura de Muestra A en Sección Transversal
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 5.4 Microestructura de Muestra A Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

En ambas imágenes es posible ver la forma en la que se encuentran estructurados los granos. Éstos, se encuentran comprimidos y muestran fronteras de grano irregulares. En la sección longitudinal de la muestra A, mostrada en la figura 5.4, se observa una distribución de los granos, muy similar a la de la sección transversal.

5.2.2. Metalografías Efectuadas sobre Muestras B y C

El efecto del hidroformado sobre el área de aplicación de la soldadura se analizó en dos zonas. La primera zona comprende el extremo de la pieza, mientras que la segunda zona comprende la zona ubicada en la sección media de la pieza. Se observa que mientras en la primera zona existe un trabajo a compresión por efecto del proceso de hidroformado, en la segunda zona el trabajo es a tensión. Debido a las características de interés sobre la soldadura, únicamente se considera la sección transversal de la misma, para la muestra B y muestra C (ver figura 5.2).

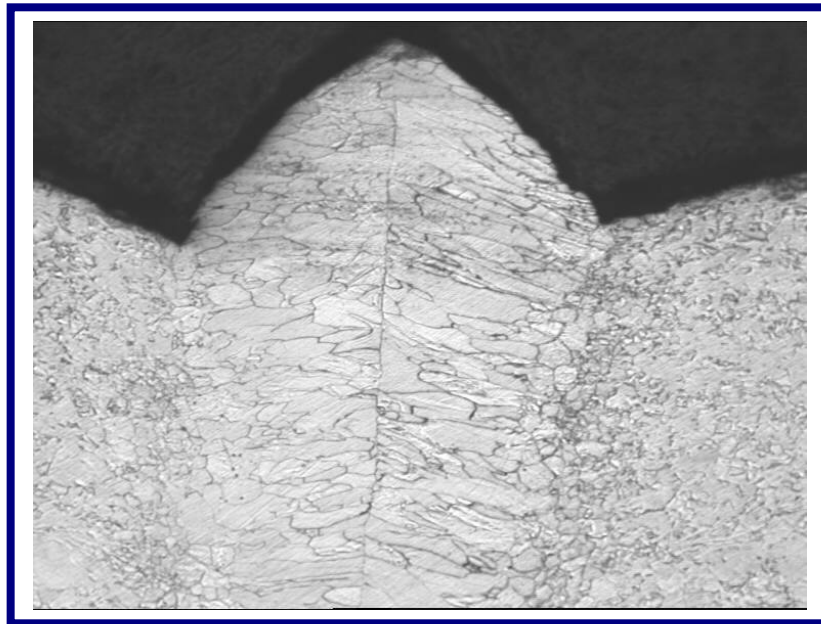
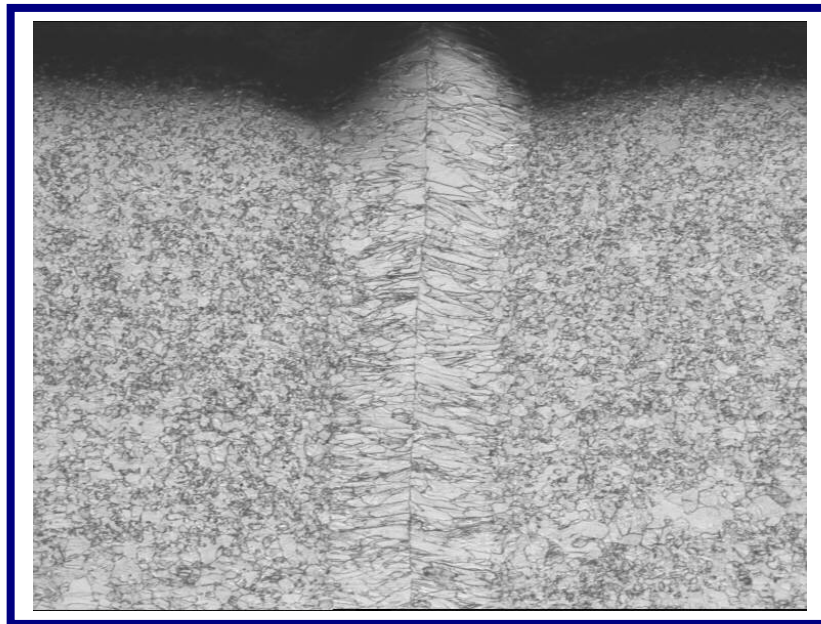


Figura 5.5 Microestructura de Muestra B en Sección Transversal.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

Para el caso de la muestra B, figuras 5.5 y 5.6 es posible notar que los granos ubicados en la zona afectada por el calor, a la izquierda y derecha de la soldadura, se encuentran comprimidos y su forma es diferente a la observada en la zona de la soldadura. En esta última zona, los granos presentan una forma columnar y el proceso de hidroformado ocasiona una compresión en la microestructura de la soldadura en esta zona de la pieza.



**Figura 5.6 Microestructura de Muestra B en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 50X**

Por su parte, en la muestra C, figuras 5.7 y 5.8, se observa que el efecto del proceso de hidroformado en esta zona de la soldadura es diferente que en la muestra B. Lo anterior se debe al tipo de trabajo a tensión y compresión mencionado anteriormente para cada una de las muestras. Al comparar las figuras 5.6 y 5.8, ambas a 50X y con reactivo de Vilella, se observa la evidencia dimensional de que la muestra B se encuentra a compresión mientras que la muestra C se encuentra a tensión.



Figura 5.7 Microestructura de Muestra C en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

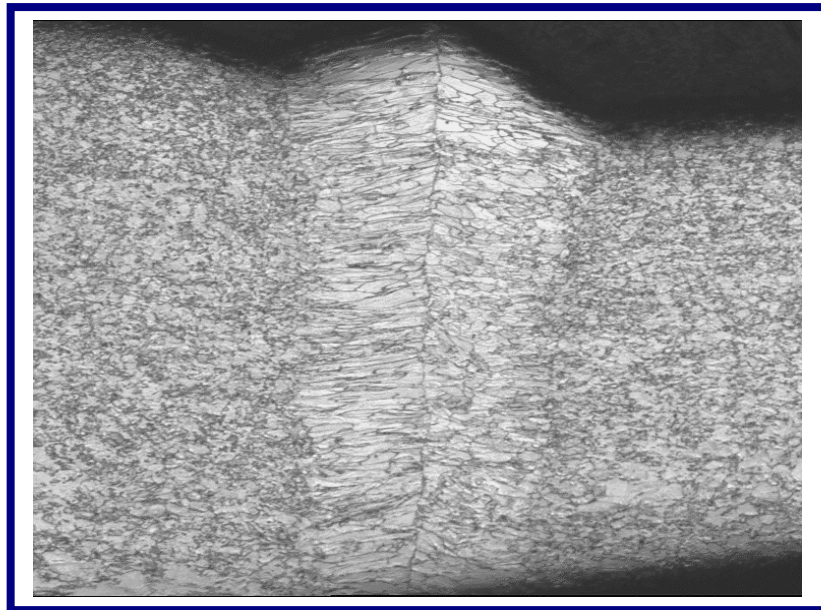


Figura 5.8 Microestructura de Muestra C en Sección transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 50X

Como se puede ver en la figura 5.7, esta sección de la soldadura ubicada en la parte central de la pieza, muestra granos comprimidos en la zona afectada por el calor a ambos lados de

la soldadura, mientras que en la zona de aplicación de la soldadura, es notoria la tensión existente en esta parte de la pieza debido a que los granos columnares de la soldadura están alargados en el mismo sentido que se observa la tensión en esta parte de la pieza.

5.2.3. Metalografía Efectuada sobre Muestra D

La muestra D (ver figura 5.2) fue analizada tanto en la sección longitudinal como en la sección transversal. Respecto a la sección transversal con ataque con reactivo de Vilella, figura 5.9, se observan granos con fronteras definidas y compactos.

Al comparar las figuras 5.9 y 5.10, se observa la diferencia existente entre el efecto del proceso de hidroformado en la sección longitudinal y transversal. En la sección longitudinal, figura 5.10, se observan granos más compactos. Lo anterior se debe a que la aplicación de la fuerza axial propia del proceso de hidroformado es aplicada en este sentido.

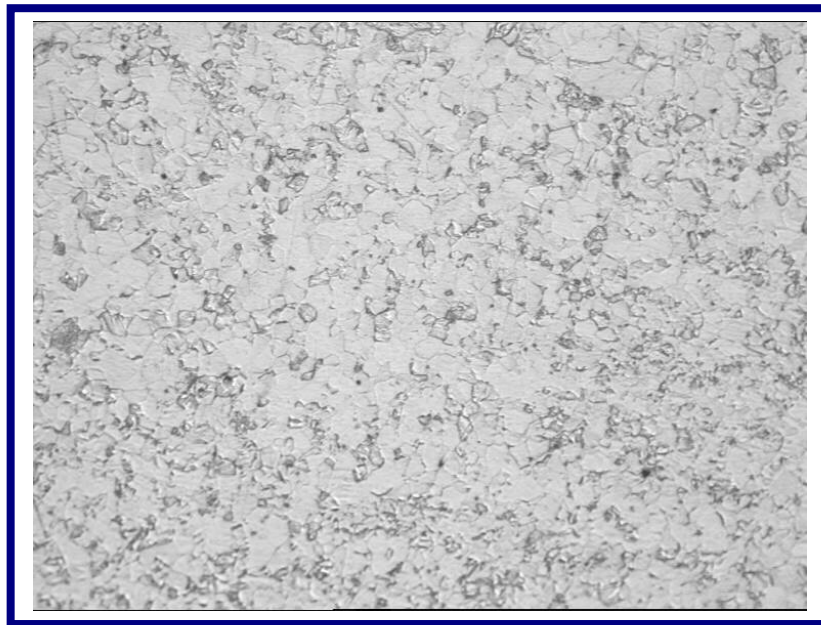


Figura 5.9 Microestructura de Muestra D en Sección Transversal.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X



Figura 5.10 Microestructura de Muestra D en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

5.2.4. Metalografía Efectuada sobre Muestra E

Debido a la ubicación de la muestra E sobre la pieza hidroformada, (ver figura 5.2), únicamente es posible someter a estudio la sección transversal de esta muestra.

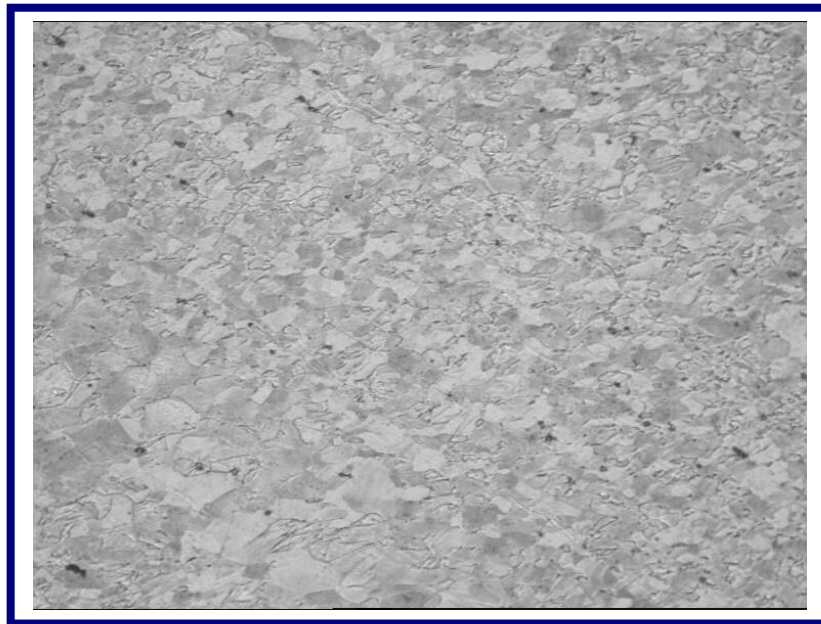


Figura 5.11 Microestructura de Muestra E en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 5.11 muestra la metalografía atacada con reactivo de Vilella para esta muestra. Se observan dos regiones; una con grano fino y otra con grano grueso. Lo anterior se explica al considerar que la muestra E proviene de una zona de transición en la que se encuentra trabajo a tensión y a compresión. Se observa además en esta zona, la existencia de carburos en una matriz ferrítica.

5.2.5. Metalografía Efectuada sobre Muestra F

La muestra F (ver figura 5.2) está considerando una zona de alta deformación. Se analizó tanto la sección transversal, figura 5.12, como la longitudinal, figura 5.13, de esta muestra. Tal y como se muestra en la figura 5.12, se observan los granos comprimidos, mientras que en la sección longitudinal, figura 5.13, es posible notar como los granos se presentan alargados como consecuencia de la fuerza a la que es sometida la pieza para causar ese grado de deformación.



**Figura 5.12 Microestructura de Muestra F en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 5.13 Microestructura de Muestra F en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

5.2.6. Metalografía Efectuada sobre Muestra G

En la muestra G, (ver figura 5.2), considerando la sección transversal, es posible notar que los granos están definidos aunque se observa grano más fino que el presente en la muestra F. Se observa, además, un comportamiento anisotrópico del grano. Por otra parte, la sección longitudinal muestra la forma en la que los granos se deforman mayormente que en sentido transversal, debido a que la deformación ocurre en este sentido. Las figuras 5.14 y 5.15 revelan la presencia de fronteras definidas en su mayoría y grano fino.

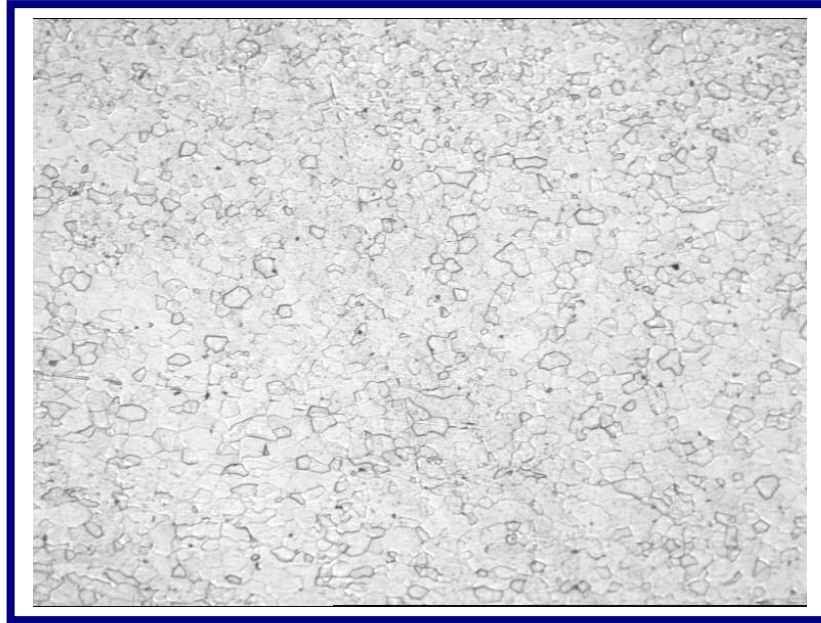


Figura 5.14 Microestructura de Muestra G en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

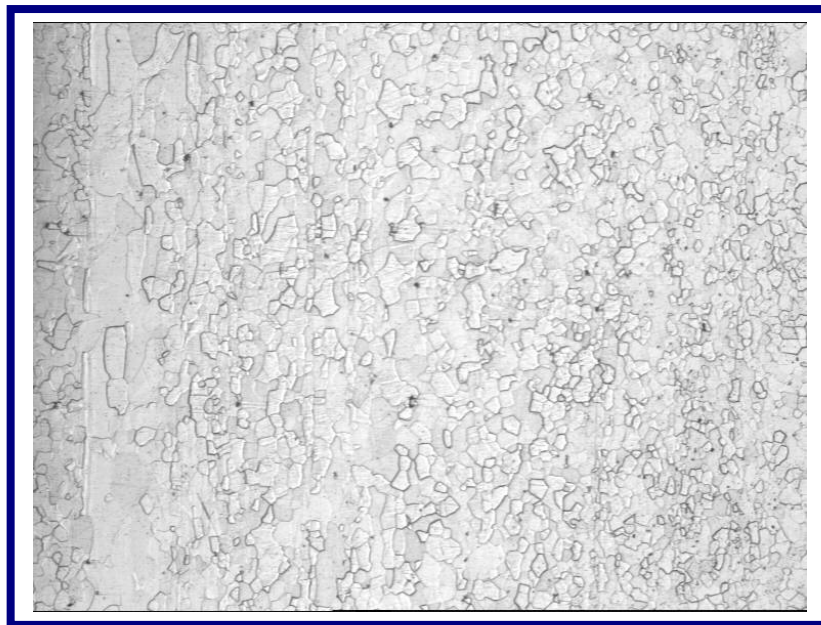


Figura 5.15 Microestructura de Muestra G en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

5.2.7. Metalografía Efectuada sobre Muestra H



Figura 5.16 Muestra H en Pieza Hidroformada Mostrando Secciones de Corte Utilizadas en Metalografías.

La muestra H (ver figura 5.2), está incluida en la zona de la pieza considerada como la de mayor deformación, pues las líneas de deformación son notorias incluso a simple vista. Debido a que la zona a analizar es muy grande como para ser observada en una sola metalografía, fue necesario seccionar el área de estudio. La zona se dividió en seis partes, con el objetivo de analizar los cambios microestructurales ocurridos en esta zona. Las secciones de corte de la muestra H se observan en la figura 5.16.

En la muestra H1, tal y como se puede ver en la figura 5.17 se puede observar la distribución de los granos en la sección transversal. Los granos de esta sección, debido a la deformación se encuentran tan compactos que resulta difícil observarlos en la metalografía. Del mismo modo en la figura 5.18, en la cual se considera la sección longitudinal, se

observan granos pequeños debido a la deformación. La muestra H2, figuras 5.19 y 5.20, muestra una microestructura similar a la presentada por la muestra H1.

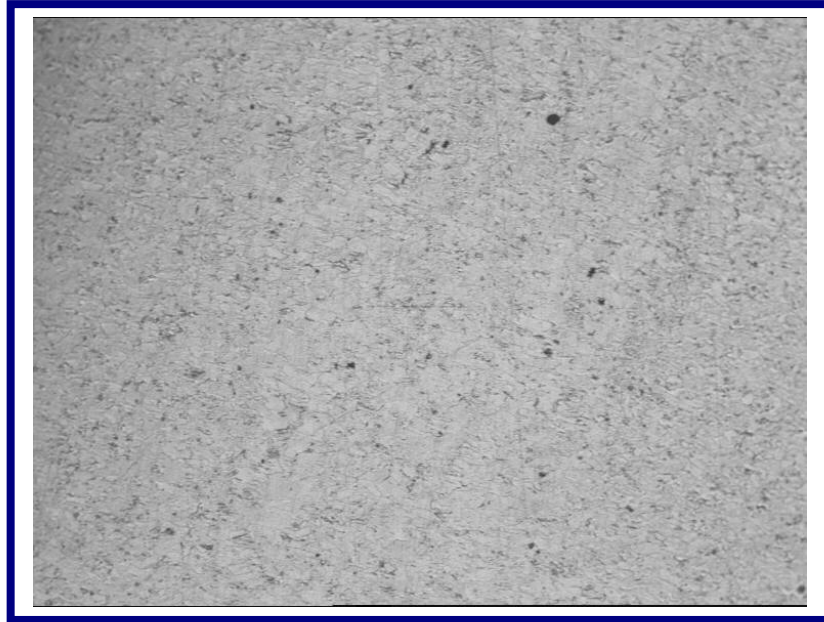


Figura 5.17 Microestructura de Muestra H1 en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

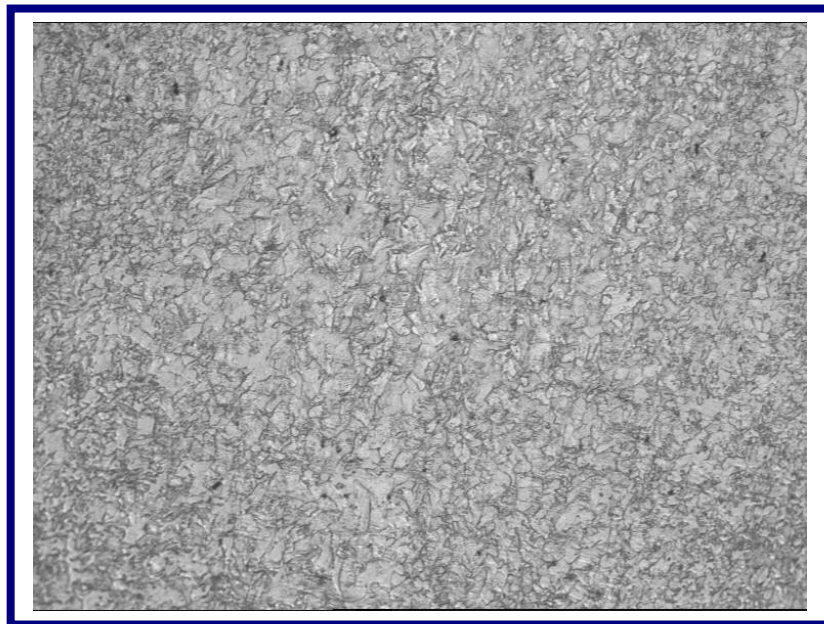


Figura 5.18 Microestructura de Muestra H1 en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X



Figura 5.19 Microestructura de Muestra H2 en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

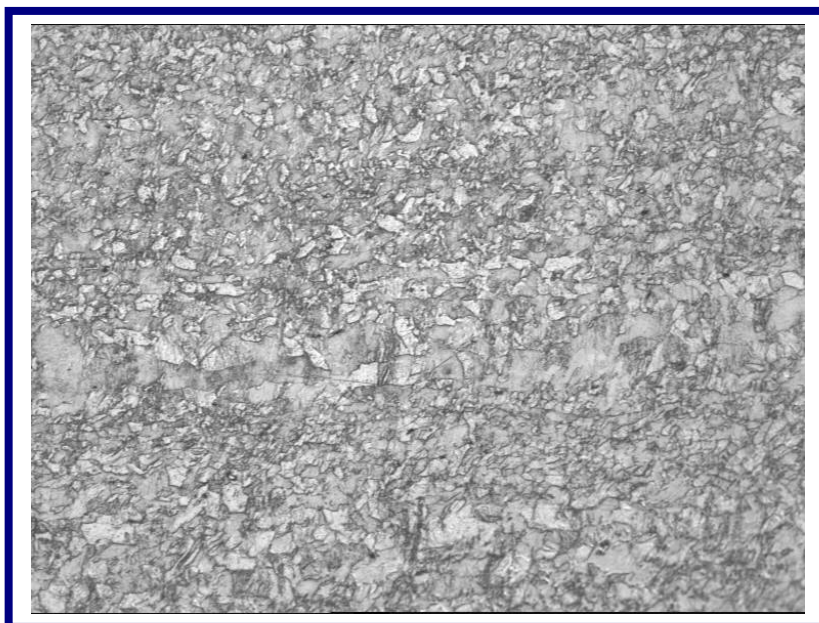


Figura 5.20 Microestructura de Muestra H2 en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La muestra H3 presenta de la misma manera que las muestras H1 y H2 en su sección transversal, ver figura 5.21, granos pequeños y comprimidos de manera en que casi no es posible observarlos en la metalografía. Por otra parte, en la figura 5.22, se muestra una

distribución de grano no uniforme, pues es posible ver que hay granos medianos y pequeños en la metalografía debido a que la zona de deformación tiene un comportamiento



Figura 5.21 Microestructura de Muestra H3 en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

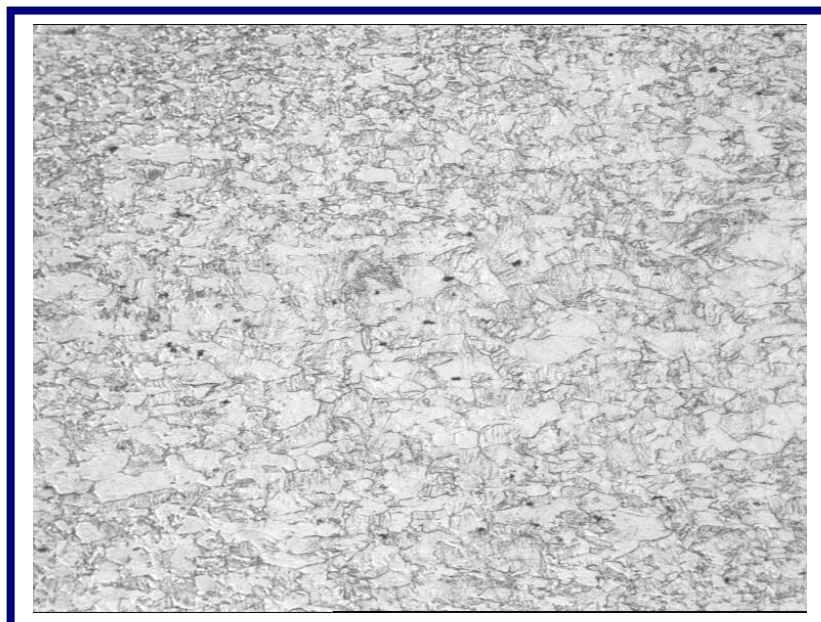
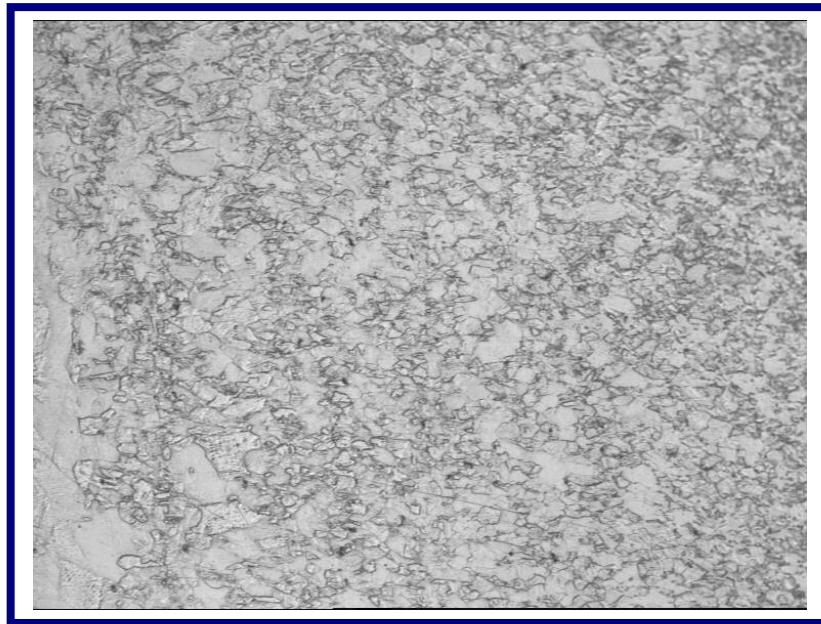


Figura 5.22 Microestructura de Muestra H3 en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

no uniforme en el material. La presencia de granos de diversos tamaños en H3 se debe a que esta muestra está ubicada en una zona de deformación poco uniforme.

Las muestras H4, H5 y H6, figuras 5.23 a 5.28, presentan una gran similitud en sus microestructuras transversales y longitudinales. La característica general de estas muestras es la presencia de granos largos y fibrosos. Lo anterior se debe al trabajo en frío y a la alta deformación. A diferencia de los granos observados en las muestras H1, H2 y H3, estos granos presentan una frontera definida y más perceptible, aunque se observa un acomodo de los granos principalmente en el sentido de la deformación. Las microestructuras revelaron una uniformidad en el tamaño de grano. Finalmente se observa que las muestras H4, H5 y H6, presentan un acomodo de los granos en el sentido de la deformación de la protuberancia observada en la pieza hidroformada.



**Figura 5.23 Microestructura de Muestra H4 en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



Figura 5.24 Microestructura de Muestra H4 en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X



Figura 5.25 Microestructura de Muestra H5 en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X



Figura 5.26 Microestructura de Muestra H5 en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X



Figura 5.27 Microestructura de Muestra H6 en Sección Transversal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X



**Figura 5.28 Microestructura de Muestra H6 en Sección Longitudinal.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

5.2.8. Macroataque Efectuado sobre Pieza Hidroformada

Adicionalmente a las microestructuras detalladas anteriormente, se efectuó un macroataque (consultar Apéndice B) a una sección de la pieza hidroformada. El macroataque reveló algunos detalles sobre la deformación ocasionada en la pieza por el proceso de hidroformado. Las observaciones derivadas del macroataque permiten reforzar las inferencias efectuadas a partir de las microestructuras. La figura 5.29 muestra la sección de la pieza hidroformada después de haber efectuado el macroataque.

En esta figura se observa el patrón de flujo del material; el cual se desplaza longitudinalmente desde los extremos de la pieza hacia la protuberancia, como muestran las flechas indicadas en la figura 5.29. La información revelada por el macroataque coincide

con lo observado en las microestructuras. La zona con la mayor deformación es la observada en la muestra H (ver figura 5.2).

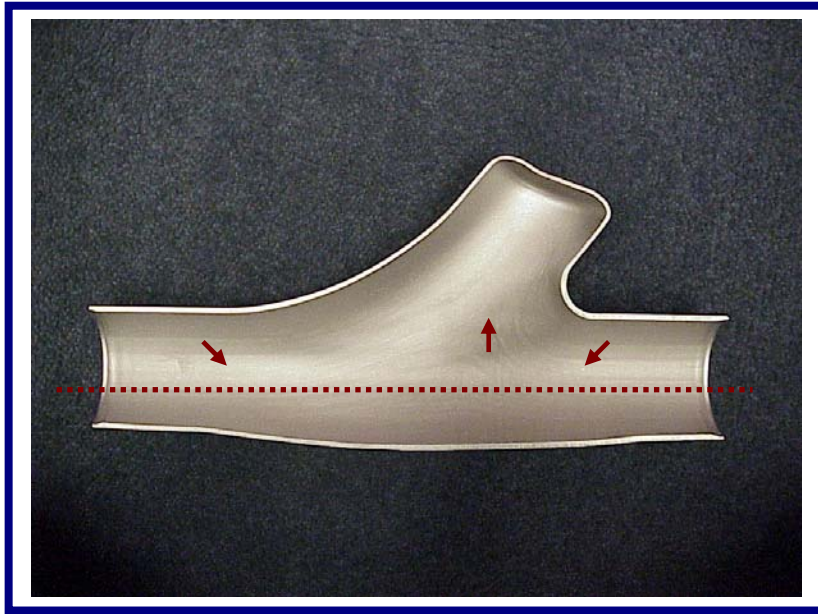


Figura 5.29 Patrones de Flujo en Pieza Hidroformada después de Macroataque

Se observa además, que la zona por debajo de la línea punteada mostrada como referencia en la figura 5.29 sufre una deformación no tan crítica al compararla contra la deformación observada por encima de esta misma línea. Por otro lado, el material que conforma la protuberancia en la pieza hidroformada es aportado en mayor grado por la zona mostrada a la izquierda en la figura 5.29 y por encima de la línea de referencia.

La figura 5.30 presenta una vista detallada de la pieza macroatacada. En esta imagen, además de apreciar las líneas de flujo del material, es posible observar la presencia de arrugas ocasionadas por la compresión a la cual está sometida la pieza. Existe, además, una tendencia a la generación de este mismo tipo de arrugas en la zona observada a la derecha en la figura 5.29. De acuerdo con lo observado después del macroataque, se asume que estas arrugas y la misma tendencia observada son ocasionadas debido a que el material en

la sección izquierda, encuentra una oposición a fluir normalmente hacia la protuberancia; comprimiendo el material en toda la zona derecha, pero principalmente donde se observan las arrugas.



Figura 5.30 Detalles de Pieza Hidroformada después de Macroataque

5.2.9. Espesores en Pieza Hidroformada

El índice de anisotropía (r) o razón de deformación plástica es un índice medido para las deformaciones finitas que expresa la habilidad de la lámina a resistir adelgazamientos o engrosamientos cuando es sometida a fuerzas de tensión o compresión. La propiedad de la constancia del volumen durante la deformación plástica, permite que el índice de anisotropía r se pueda expresarse de la siguiente forma:

$$r = \frac{\text{Ln}(W/W_0)}{\text{Ln}(T/T_0)} \quad \text{ec 5.1 [15]}$$

Donde: T_0 = Ancho inicial

W_0 = Espesor inicial

T = Ancho final

W = Espesor final

La figura 5.31 muestra los puntos en los cuales fueron medidos los espesores posteriores al proceso de hidroformado. Con base en los espesores determinados anteriormente se cálculo del valor r ; los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.2 y expresa una formabilidad para las zonas en las que la geometría permite hacer el análisis con mayor precisión.

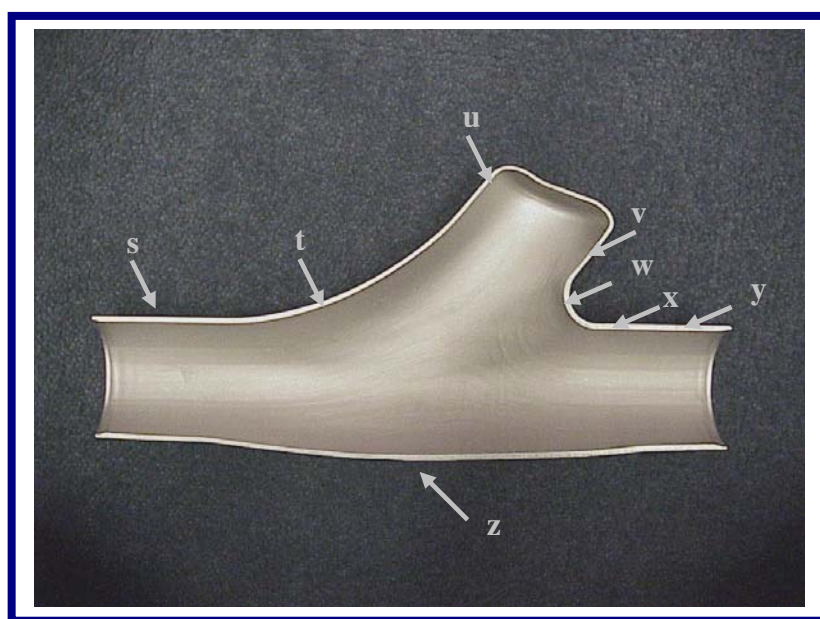


Figura 5.31 Muestras de Espesores en Pieza Hidroformada

Tabla 5.1 Tabla de Espesores en Muestras Especificadas

Muestra	Espesor Inicial	Espesor Final
s	1.9	2.7
t	1.9	2.3
u	1.9	1.6
v	1.9	1.7
w	1.9	2.6
x	1.9	2.5
y	1.9	2.9
z	1.9	2.5

Tabla 5.2 Cálculo de “Valor r ”

Muestra	Ancho Inicial	Ancho Final	Espesor Inicial	Espesor Final	r
s	2	1.4	1.9	2.7	1.015
t	2	1.7	1.9	2.3	0.851
x	2	1.5	1.9	2.5	1.048
y	2	1.3	1.9	2.9	1.019

5.2.10. Dureza del Material Hidroformado

Sobre la pieza hidroformada fue efectuada una prueba de dureza Rockwell. La figura 5.32 se muestran las zonas consideradas para realizar la medición de la dureza. Por otra parte, se presenta en la tabla 5.2 muestra los valores de dureza encontrados. La zona con la mayor dureza registrada es la Zona 2. De acuerdo con las metalografías efectuadas y el macroataque, se observa que esta es la zona que sufre la mayor deformación, tal y como se observa en las metalografías y referente a los granos de esta zona están muy compactos y esto consecuentemente ocasiona que esta zona sea la que presente la mayor dureza.

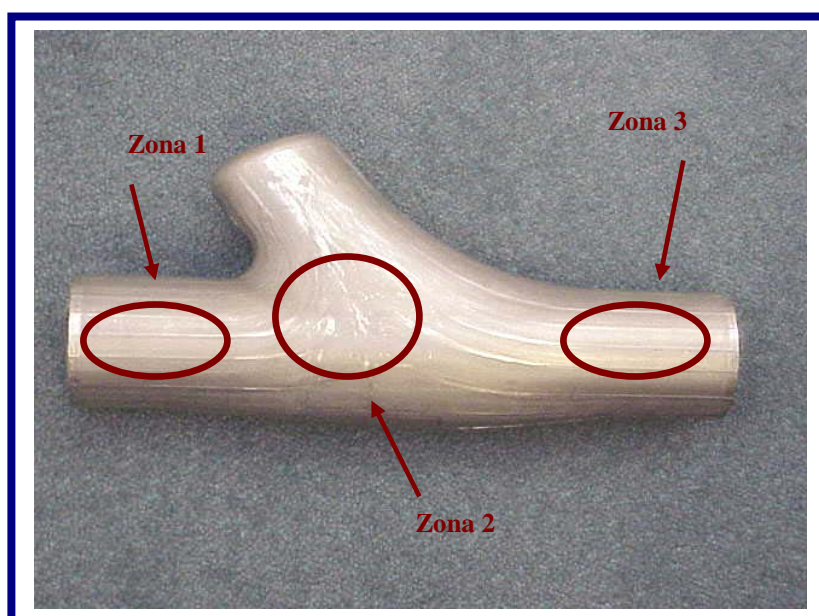


Figura 5.32 Zonas de Medición de Dureza sobre Pieza Hidroformada

Tabla 5.3 Dureza Rockwell B sobre Pieza Hidroformada

Zona	Valores de Dureza	Promedio
ZONA 1	85, 87, 86, 87, 87, 87, 86, 85, 88, 89	86.7
ZONA 2	98, 97, 97, 99, 98, 99, 98, 97, 97,98	97.8
ZONA 3	84, 87, 86, 85, 89, 86, 88, 87, 88, 86	86.6