

CAPÍTULO 7.

ANÁLISIS ENTRE LAS MICROESTRUCTURAS Y PROPIEDADES OBTENIDAS DE LOS DIFERENTES PROCESOS

El enfoque de este capítulo se basa en presentar una comparación de las metalografías obtenidas de las diferentes etapas del proceso de fabricación del tubo de escape en estudio. En este capítulo, se retomarán las metalografías estudiadas en los capítulos anteriores para analizar su evolución desde la condición de material inicial, hasta el último proceso que es el de tratamiento térmico. Se analizan, además, los cambios en las propiedades mecánicas debido a los cambios microestructurales ocurridos durante el proceso.

7.1. Metodología de Comparación entre Microestructuras

La figura 7.1 muestra la secuencia del proceso de fabricación del tubo de escape desde una tira de acero, pasando por el proceso de rolado y soldado, hidroformado y finalmente tratado térmicamente:

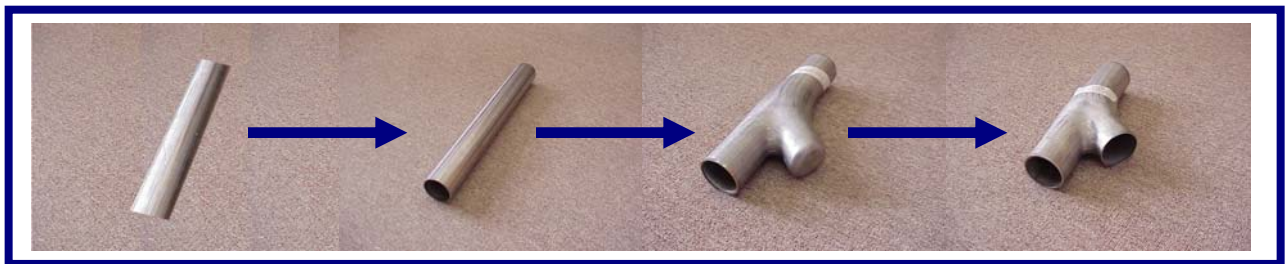


Figura 7.1 Secuencia de Fabricación de Tubo de Escape

El objetivo de efectuar una comparación entre las microestructuras del material consiste en analizar los cambios que se presentan a nivel estructural en el acero inoxidable AISI 409.

Con base en ello, es posible determinar los cambios en las propiedades mecánicas del material. Se consideran los análisis de los capítulos anteriores para comparar muestras procedentes de diferentes etapas del proceso. Las comparaciones entre estas muestras se efectúan considerando ubicaciones análogas sobre la pieza a lo largo de su transformación. En los subcapítulos siguientes se presenta un análisis por muestra en el que se indica la secuencia de transformación de la misma a lo largo del proceso. Asimismo, se presenta el análisis por secciones de la muestra, cuando corresponde.

7.2. Transformación Microestructural de la Muestra A

La muestra A en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra A de la pieza hidroformada (ver Figura 5.2), con las muestras R1 y R2 de la pieza rolada (ver Figura 4.1) y con las muestras I1 e I2 del material inicial (ver Figura 3.1).

La figura 7.2 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra A. En la secuencia anterior se observa que el grano comienza a hacerse fino desde el proceso de rolado, además de sufrir una deformación. Durante el hidroformado los granos se comprimen y desarrollan fronteras irregulares. El tratamiento térmico debería provocar una recristalización del material hasta un estado semejante al inicial; sin embargo, como se puede observar, la metalografía del tratamiento térmico muestra una condición de recristalización incompleta con fronteras de grano poco definidas. Al observar detalladamente, se puede notar que aunque el grano en el material inicial es similar al de la pieza tratada térmicamente, el efecto del tratamiento térmico no es suficiente para permitir que los granos desarrollen fronteras definidas.

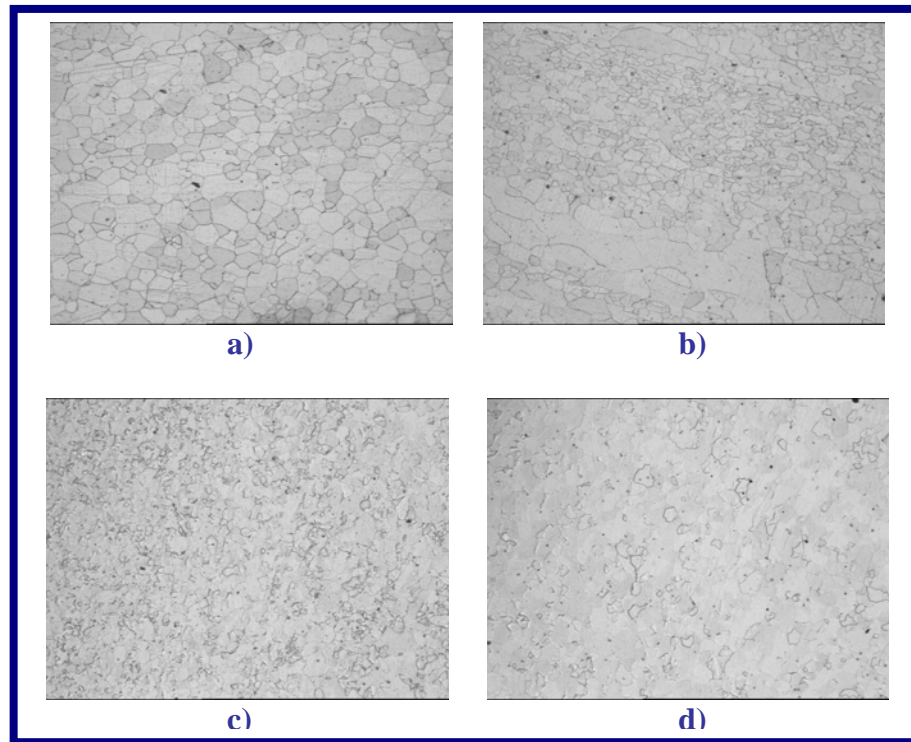


Figura 7.2 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra A
a)Material Inicial b)Pieza Rolada c)Pieza Hidroformada d)Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.3 muestra la transformación microestructural para la sección longitudinal de la muestra A. Se observa que el grano se deforma con el rolado y posteriormente se observa grano más fino durante el proceso de hidroformado, además, se observan granos compactos como consecuencia del trabajo en frío, al igual que el grano se hace fino. Similarmente, se distinguen fronteras de grano poco definidas. Al observar lo ocurrido durante el tratamiento térmico se observa que existe una recristalización del material, aunque su efecto no es suficiente para obtener las características en cuanto a tipo de grano y fronteras definidas y regulares del material inicial.

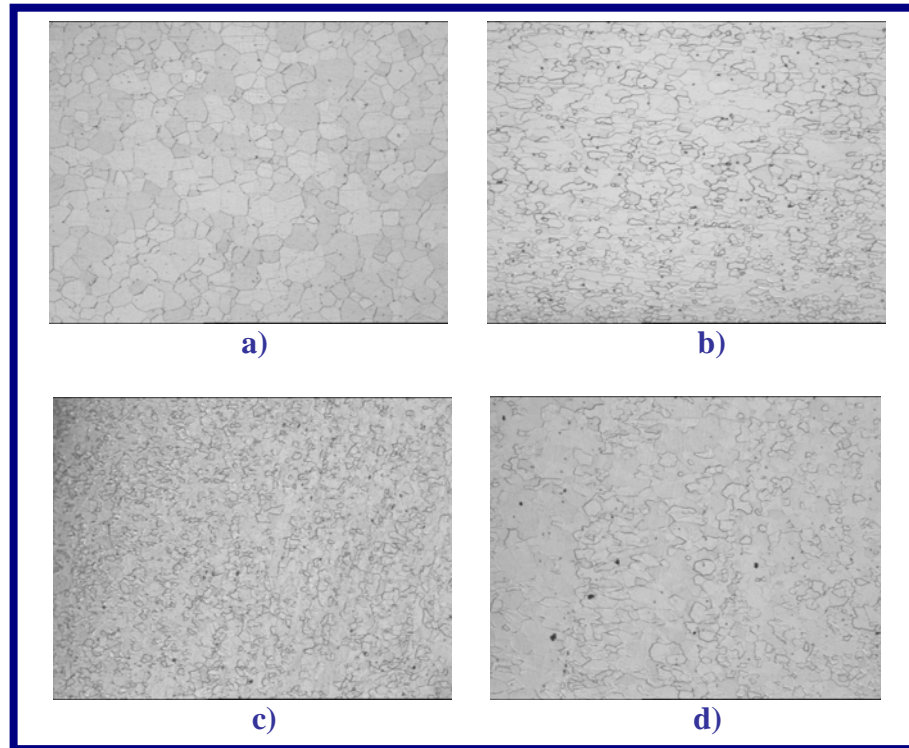


Figura 7.3 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra A
a)Material Inicial b)Pieza Rolada c)Pieza Hidroformada d)Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

7.3. Transformación Microestructural de las Muestras B y C

La muestra B en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra B de la pieza hidroformada (ver Figura 5.2), con la muestra S1 de la pieza rolada (ver Figura 4.1) y con la muestra I1 del material inicial (ver Figura 3.1). La muestra B, únicamente fue analizada en su sección transversal pues lo que busca analizar es el comportamiento de la soldadura láser en la pieza.

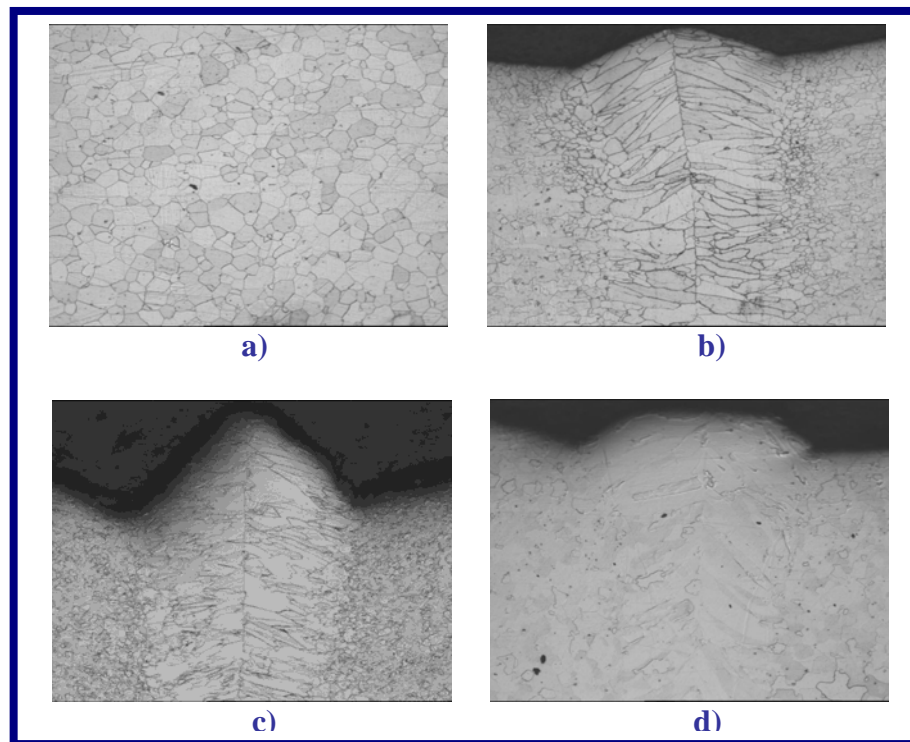


Figura 7.4 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra B
a) Material Inicial b) Pieza Soldada c) Pieza Hidroformada d) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.4 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra B. En la secuencia anterior se observa el efecto de la soldadura sobre la forma del grano. Durante el proceso de aplicación de la soldadura láser, se forman granos columnares en la zona de aplicación y granos más finos que el inicial en la zona afectada por el calor, alrededor del punto de aplicación. Durante el proceso de hidroformado, debido a la deformación en frío que sufre el material se observan granos comprimidos, que mantienen su forma columnar en el punto de aplicación y granos comprimidos incluso más allá de la zona afectada por el calor. Finalmente, en la muestra de la pieza tratada térmicamente, se observa que los granos tanto del material afectado por el calor como el material circundante no afectado por el calor fueron recrystalizados logrando un acomodo similar; sin embargo,

en la zona de aplicación de la soldadura, los granos aún mantienen, en cierto grado, la forma columnar, indicando un efecto incompleto del tratamiento térmico.

Para efectos del análisis de transformación microestructural de la muestra C, se presentan dos secuencias. La primera incluye una muestra de la zona de la soldadura localizada incorrectamente en la pieza tratada térmicamente. La segunda secuencia incluye una muestra de la zona en la que debería de estar la soldadura en la pieza tratada térmicamente.

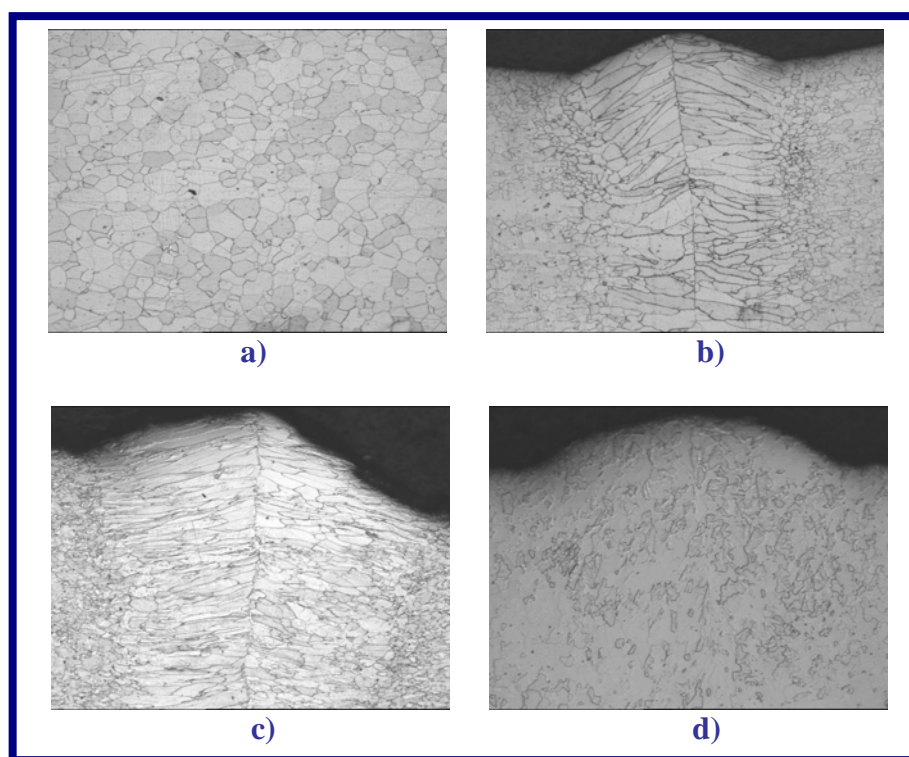


Figura 7.5 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra C1
a) Material Inicial b) Pieza Soldada c) Pieza Hidroformada d) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.5 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra C1 (Figura 6.1). Se observa el efecto de la aplicación de la soldadura sobre la forma del grano, se forman granos columnares en la zona de aplicación y granos más finos que el inicial en la zona afectada por el calor, alrededor del punto de aplicación. En el

proceso de hidroformado, se observa un alargamiento de los granos, esto es porque durante el hidroformado esta zona de la pieza sufre una expansión, haciendo que los granos se encuentren a tensión. Durante el tratamiento térmico, se observa que los granos tanto del material afectado por el calor como el material circundante no afectado por el calor son recristalizados en su totalidad; los granos columnares desaparecen y es posible observar un tamaño de grano uniforme en la zona, aunque se observa que el grano es un poco más fino que el grano en su condición inicial.

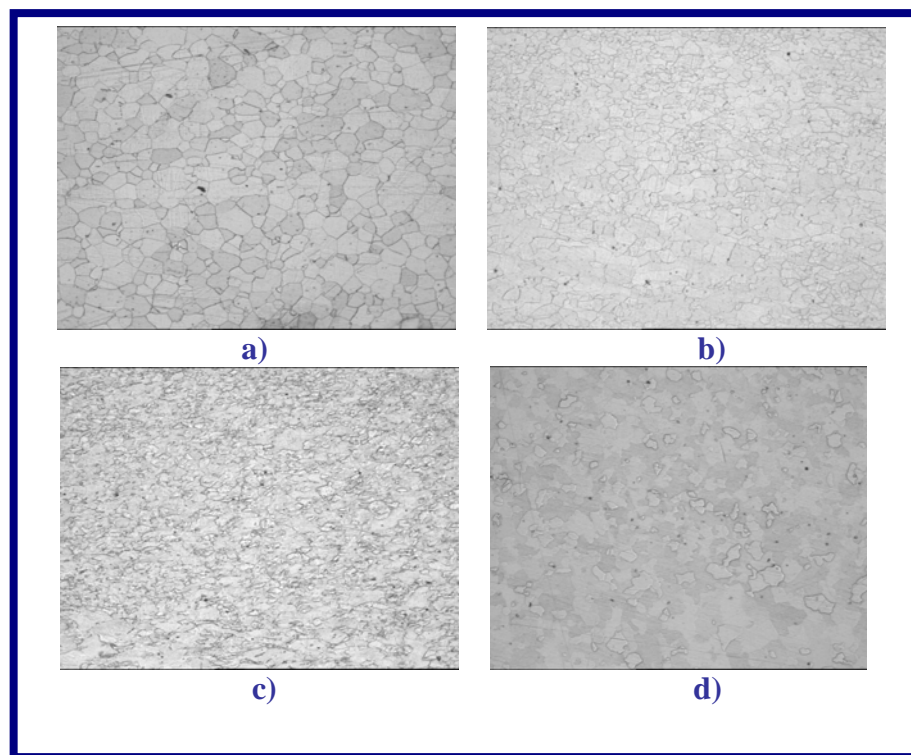


Figura 7.6 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra C2
a) Material Inicial b) Pieza Soldada c) Pieza Hidroformada d) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.6 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra C2 (Figura 6.1). Para el análisis de la transformación microestructural de esta zona, se presentan microestructuras de zonas ubicadas junto a la soldadura en las piezas soldada e hidroformada, con el objetivo de observar el comportamiento del material en esta zona, pero sin considerar el efecto de aplicación de la soldadura. De manera similar a C1, el efecto del rolado causa un aplastamiento de granos, del mismo modo, el hidroformado provoca que los granos se tornen compactos. Durante el tratamiento térmico, se observa una recristalización total del material, con forma de grano similar al inicial, aunque con menor definición de las fronteras de grano.

7. 4. Transformación Microestructural de la Muestra D

La muestra D en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra D de la pieza hidroformada (ver Figura 5.2), con las muestras R1 y R2 de la pieza rolada (ver Figura 4.1) y con las muestras I1 e I2 del material inicial (ver Figura 3.1).

La figura 7.7 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra D. En la secuencia anterior se observa que el grano desde el proceso de rolado se empieza a ser fino. Durante el hidroformado los granos se compactan y se vuelven más finos. El tratamiento térmico genera una recristalización del material que si bien es cierto alcanza que el grano sea similar al inicial, no consigue definir las fronteras de grano.

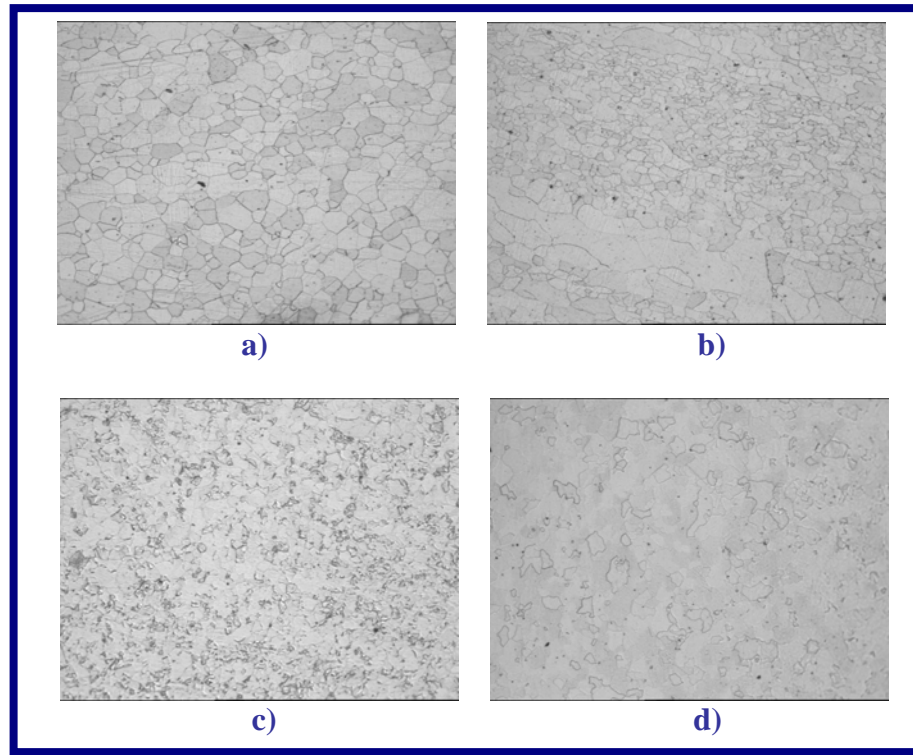


Figura 7.7 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra D
a)Material Inicial b)Pieza Rolada c)Pieza Hidroformada d)Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.8 muestra la transformación microestructural para la sección longitudinal de la muestra D. El proceso de rolado causa un aplastamiento de los granos, por su parte, se observa que el grano es fino durante el proceso de hidroformado; aunque se observan fronteras de grano definidas, existe un acomodo sumamente compacto del material. En el tratamiento térmico, se observa una recrystalización parcial de los granos con forma de grano muy distinta del objetivo.

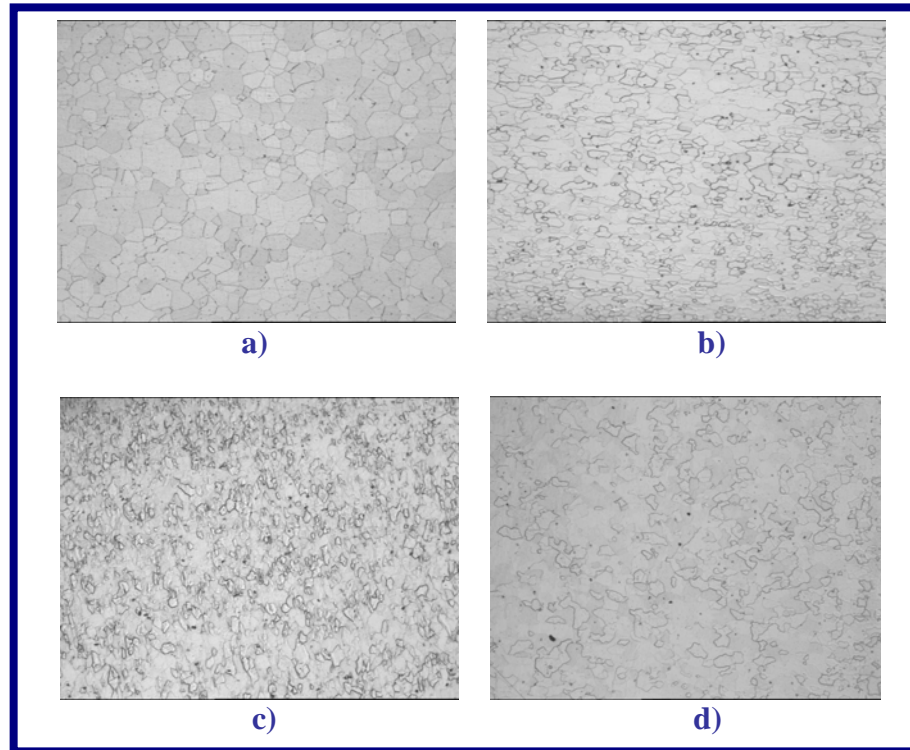


Figura 7.8 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra D
a)Material Inicial b)Pieza Rolada c)Pieza Hidroformada d)Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

7.5. Transformación Microestructural de la Muestra E

La muestra E en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra E de la pieza hidroformada (ver Figura 5.2), con la muestra R2 de la pieza rolada (ver Figura 4.1) y con la muestra I2 del material inicial (ver Figura 3.1).

La figura 7.9 muestra la transformación microestructural de la muestra E. En la secuencia anterior se observa la deformación de los granos debido al rolado de la pieza, del mismo modo se notan granos alargados. Durante el proceso de hidroformado, el material

sufre una alta deformación ocasionando una distorsión de los granos, ya que se observan alargados y comprimidos. Además se observa que los granos se encuentran direccionados en el sentido de la deformación. Por su parte, al efectuar el tratamiento térmico, se nota un reacomodo de los granos disminuyendo el impacto del trabajo en frío aunque sin recuperar su condición inicial, además de que los granos se observan con fronteras irregulares.

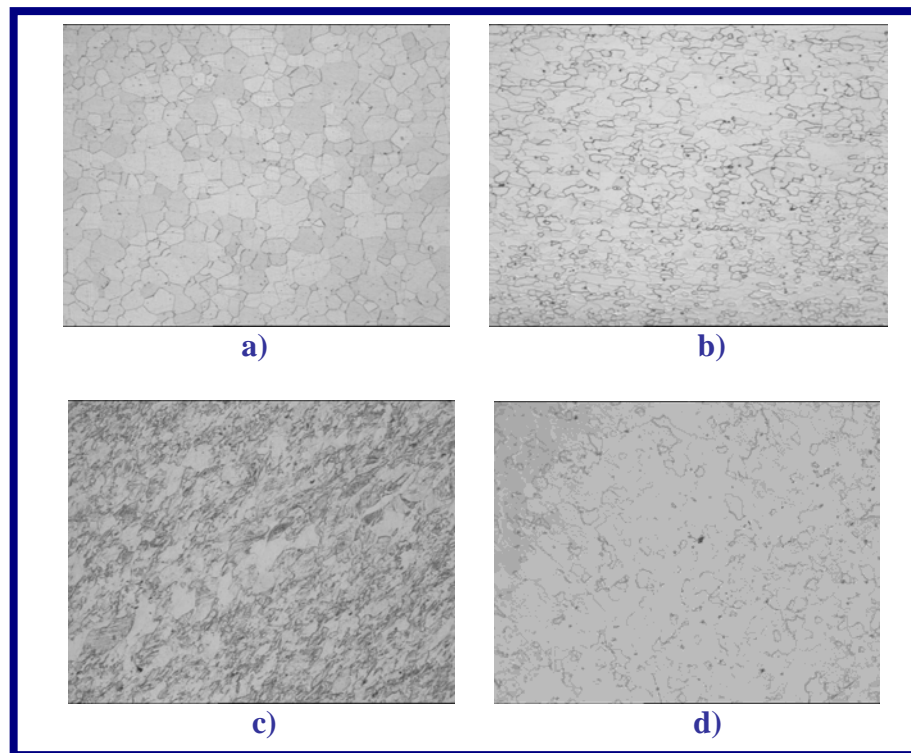


Figura 7.9 Transformación Microestructural la Muestra E

a) Material Inicial b) Pieza Rolada c) Pieza Hidroformada d) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

7. 6. Transformación Microestructural de la Muestra F

La muestra F en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra F de la pieza hidroformada (ver

Figura 5.2) y con las muestras I1 e I2 del material inicial (ver Figura 3.1). El análisis de la transformación microestructural de la muestra F, no considera el proceso de rolado debido a que esta muestra se ubica en una zona que aparece hasta el proceso de hidroformado.

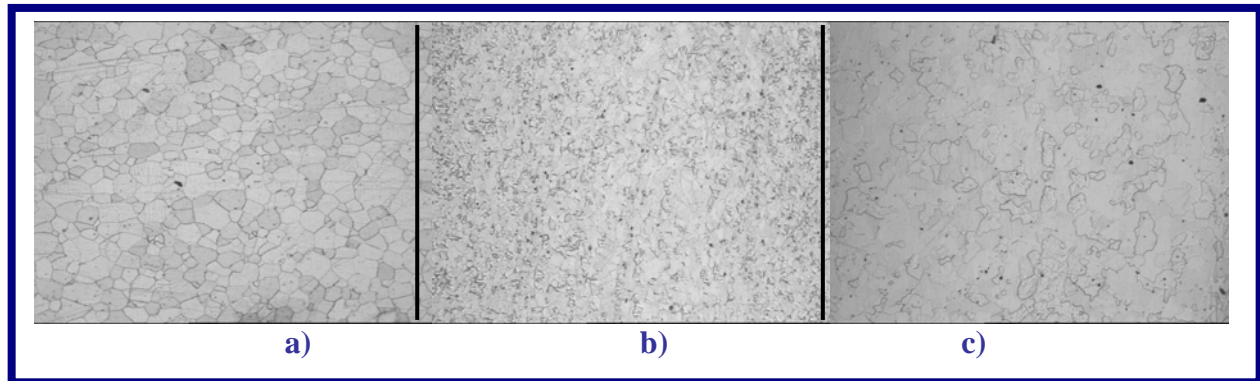


Figura 7.10 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra F
a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.10 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra F. En la secuencia anterior se observa que el grano es mayormente afectado en el proceso de hidroformado debido a que esta zona es altamente deformada. Se observan granos comprimidos y con fronteras irregulares. En el tratamiento térmico se obtiene una recristalización del material que no consigue definir las fronteras de grano en su totalidad, aunque si se observa un crecimiento de los granos respecto a los observados después del hidroformado.

La figura 7.11 muestra la transformación microestructural para la sección longitudinal de la muestra F. En la secuencia mostrada, se observa que el grano se hace fino respecto al inicial en el proceso de hidroformado, por otro lado, se observa que los granos son más alargados en esta sección de la muestra debido a que la sección longitudinal coincide con el sentido de la deformación. Durante el tratamiento térmico se genera una recristalización del

material que no consigue definir las fronteras de grano en su totalidad. Se observa un crecimiento de los granos respecto a los observados después del hidroformado, aunque se observa que es menor a los granos del material inicial.

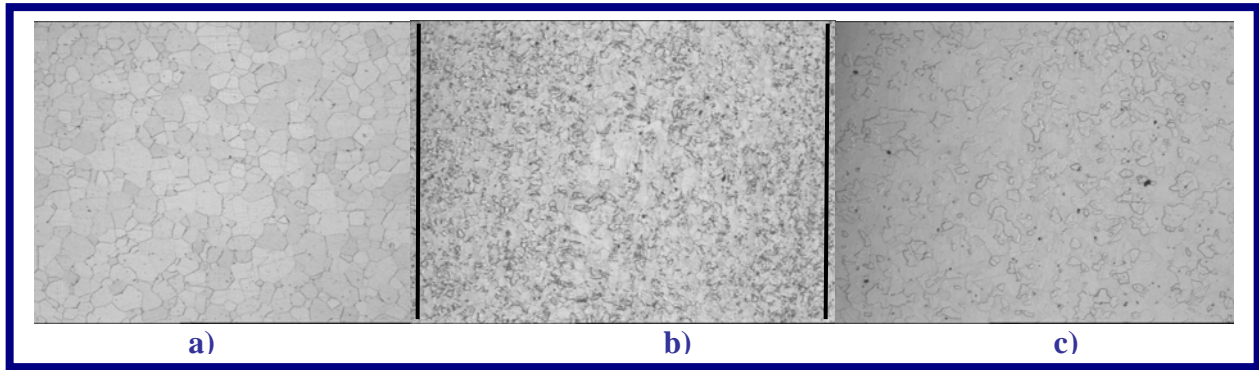


Figura 7.11 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra F

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

7.7. Transformación Microestructural de la Muestra G

La muestra G en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra G de la pieza hidroformada (ver Figura 5.2), con las muestras R1 y R2 de la pieza rollada (ver Figura 4.1) y con las muestras I1 e I2 del material inicial (ver Figura 3.1).

La figura 7.12 muestra la transformación microestructural para la sección transversal de la muestra G. En la secuencia anterior se observa que el grano se hace fino desde el proceso de rolado. Durante el hidroformado los granos se comprimen y se generan fronteras de grano irregulares. El tratamiento térmico genera una recristalización del material que no define totalmente las fronteras de grano, aunque sí se observa un crecimiento del grano.

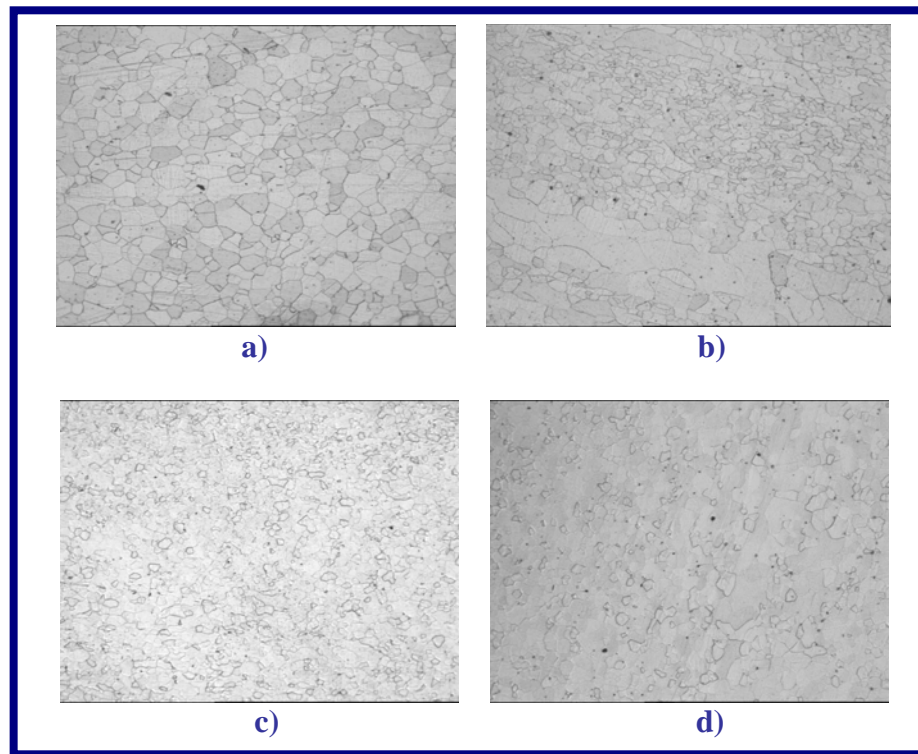


Figura 7.12 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra G
a) Material Inicial b) Pieza Rolada c) Pieza Hidroformada d) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

La figura 7.13 muestra la transformación microestructural para la sección longitudinal de la muestra G. Durante el hidroformado los granos se comprimen y se alargan; los granos presentan fronteras irregulares. El tratamiento térmico genera una recristalización del material que no define totalmente las fronteras de grano y los granos se observan todavía alargados, aunque se observa que el grano comienza a tener características similares al grano en condiciones iniciales.

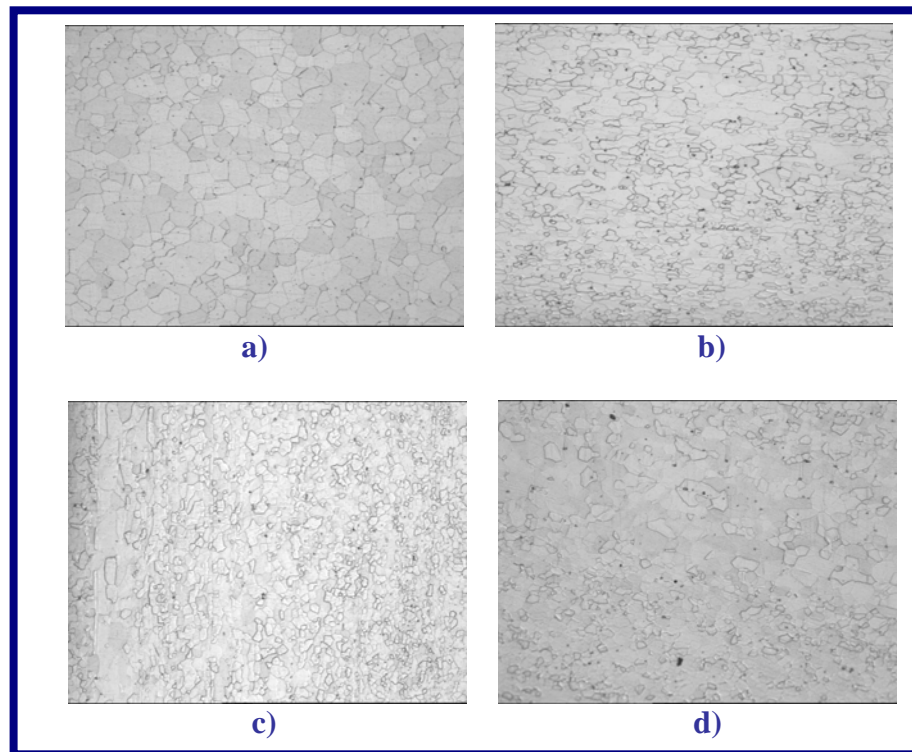


Figura 7.13 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra G
a) Material Inicial b) Pieza Rolada c) Pieza Hidroformada d) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

7. 8. Transformación Microestructural de la Muestra H

La muestra H en la pieza tratada térmicamente (ver Figura 6.1) debido a su ubicación, es posible compararla microestructuralmente con la muestra H de la pieza hidroformada (ver Figura 5.2), y con las muestras I1 e I2 del material inicial (ver Figura 3.1). No es posible comparar la muestra H con la pieza rolada, debido a que al observar las líneas de flujo en el macroataque efectuado en la pieza hidroformada (Ver 5.2.8), se considera como una zona de transición y alta deformación con desplazamiento de material.

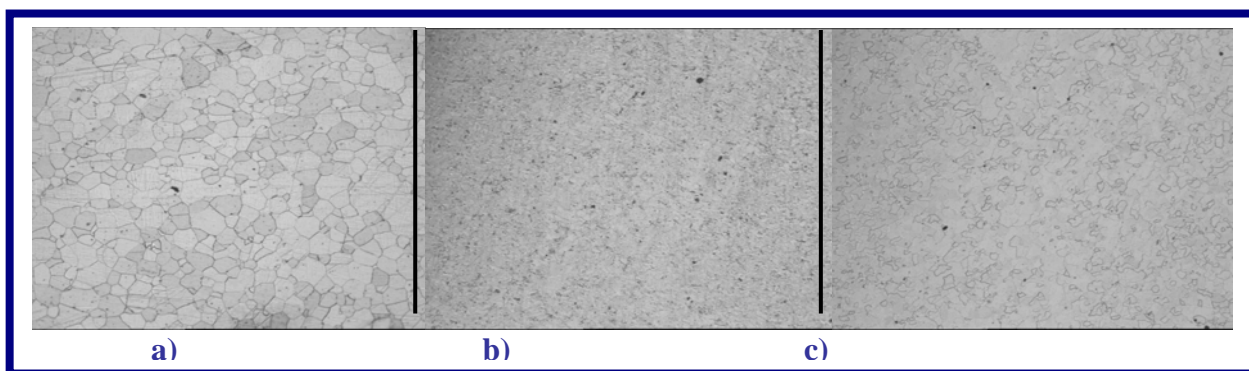


Figura 7.14 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra H1

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

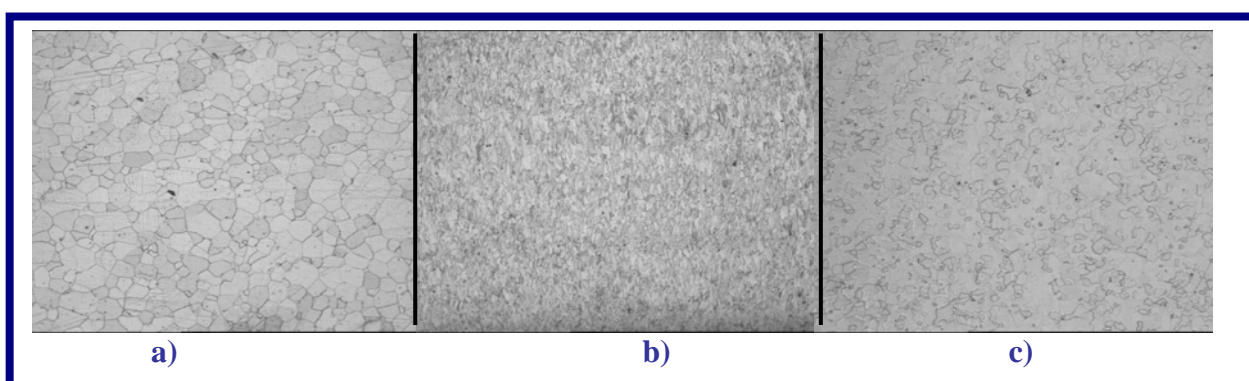


Figura 7.15 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra H2

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

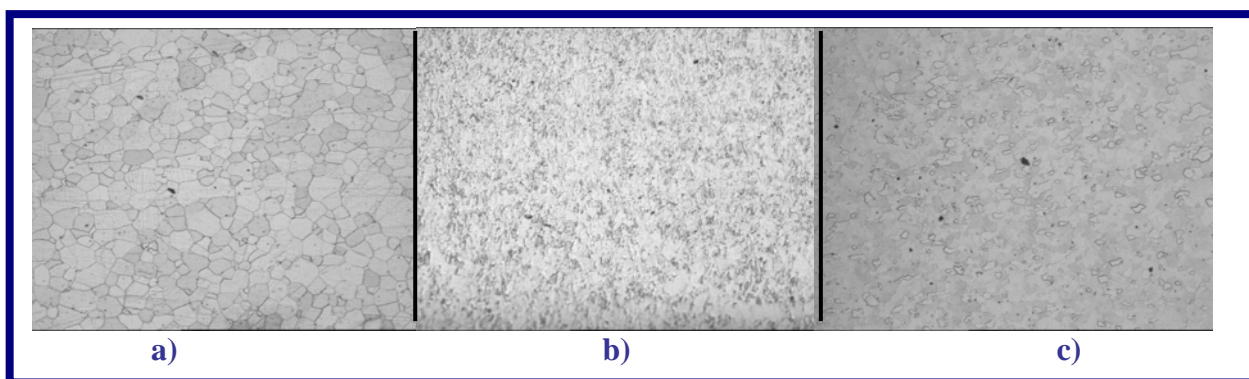


Figura 7.16 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra H3

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

En las figuras 7.14, 7.15 y 7.16, se observa la secuencia de transformación de la microestructura de las muestras H1, H2 y H3, respectivamente, en su sección transversal. Se nota el alto impacto del hidroformado, pues los granos están comprimidos y presentan una tendencia a alargarse en el sentido de la deformación. En particular, para la muestra H1, el efecto del hidroformado solo comprime los granos. Respecto al efecto del tratamiento térmico, se observa que las características de los granos son similares, pues estos presentan un tipo de grano grueso mayor al observado después del hidroformado. Además los granos comienzan a definir fronteras regulares, aunque el efecto del tratamiento térmico no es suficiente para causar una frontera de grano bien definida.

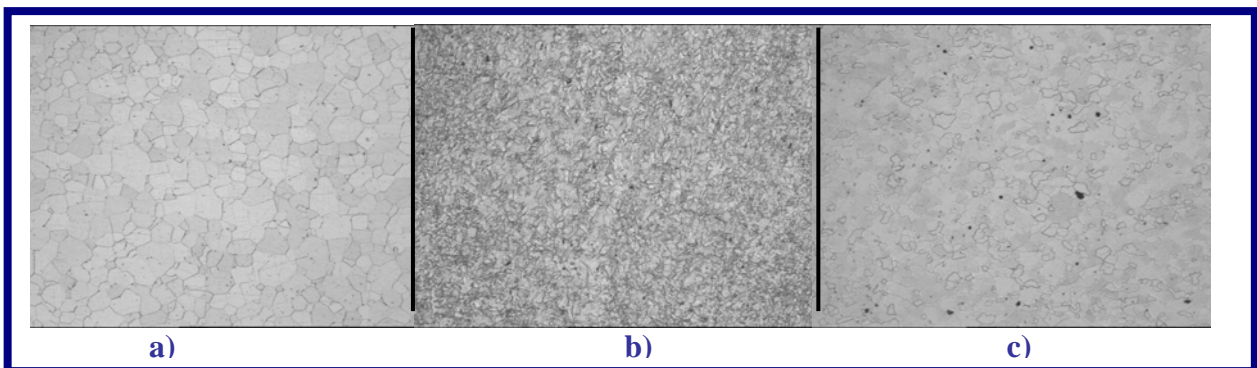


Figura 7.17 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra H1

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

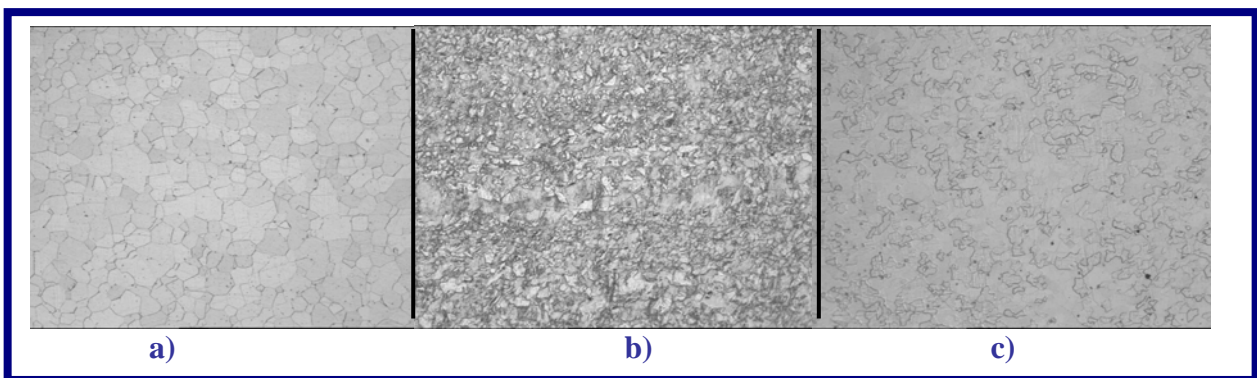


Figura 7.18 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra H2

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

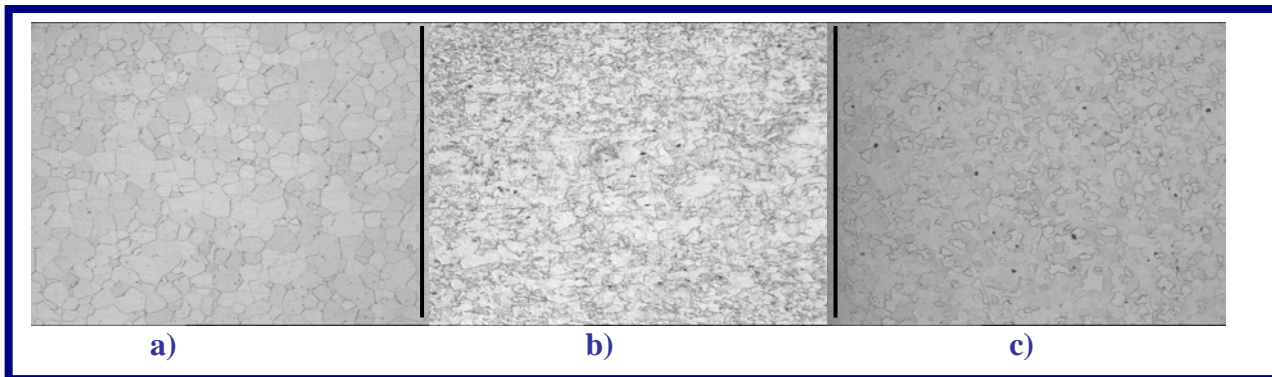


Figura 7.19 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra H3

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

En las figuras 7.17, 7.18 y 7.19, se muestran las secciones longitudinales para las muestras H1, H2 y H3 respectivamente. Como resultado del proceso de hidroformado, se observan sobre la muestra H1 granos distorsionados y muy comprimidos debido a su ubicación sobre la pieza. Por su parte, H2 presenta granos comprimidos en menor proporción y H3 presenta granos que más que comprimidos, están alargados. Posteriormente, se observa un comportamiento homogéneo en los granos de la zona como resultado del tratamiento térmico. Se observa un comportamiento muy similar al encontrar granos con fronteras regulares, aunque no totalmente definidas y grano un poco más grueso, pero no igual al del material inicial.

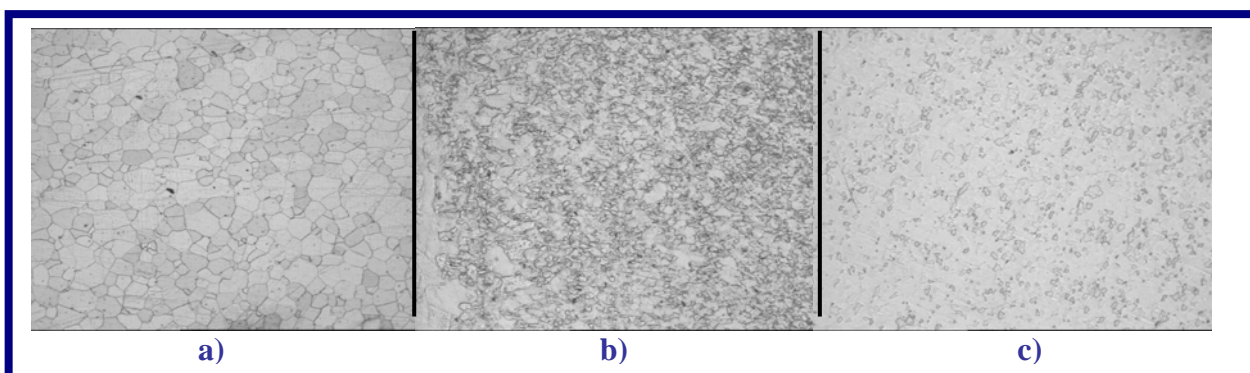


Figura 7.20 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra H4

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

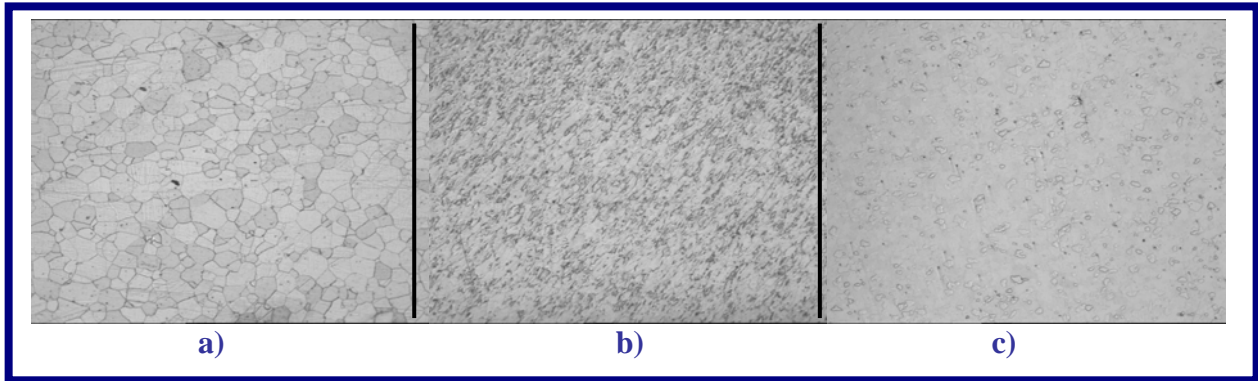


Figura 7.21 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra H5

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

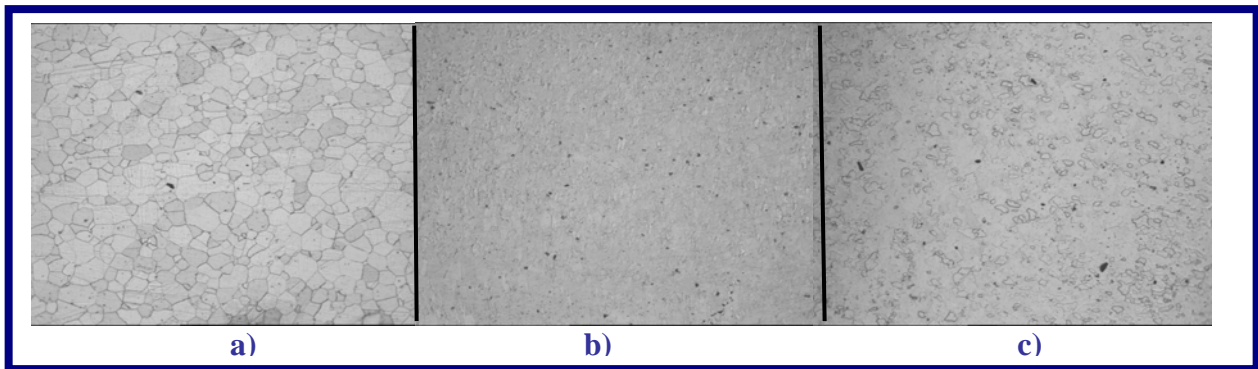


Figura 7.22 Transformación Microestructural de la Sección Transversal de la Muestra H6

a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.

Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

En las figuras 7.20, 7.21 y 7.22, se observa la secuencia de transformación de las muestras H4, H5 y H6, respectivamente, en su sección transversal. Se observa que el hidroformado tiene un impacto mayor al presentado en H1, H2 y H3. Lo anterior es debido a la ubicación de las muestras, pues H4, H5 y H6, se encuentran en una zona crítica de acuerdo con las líneas de flujo del material (Ver Figura 5.29). En las muestras H4, H5 y H6 hidroformadas se observan granos comprimidos y mayormente alargados. Se observa un escaso efecto del tratamiento térmico sobre estas muestras; el grano no crece de manera significativa, aunque se observan bordes redondeados y definición en las fronteras.

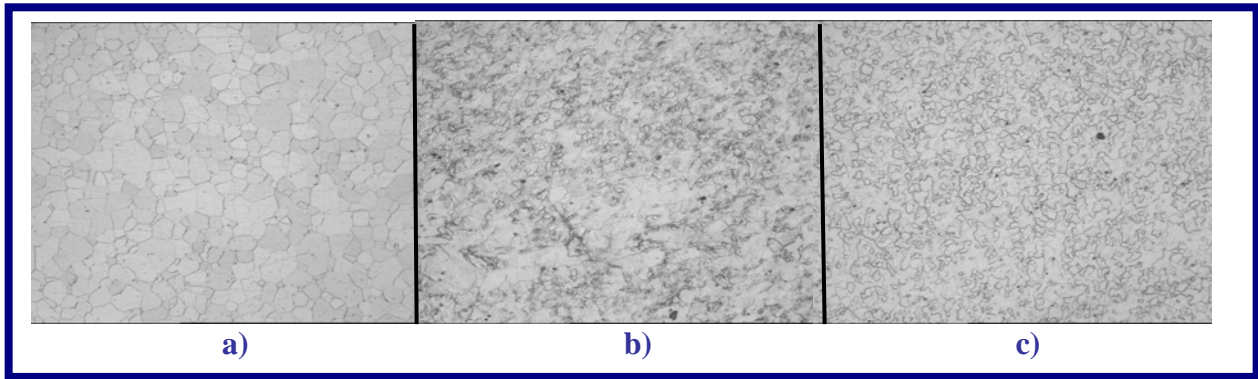


Figura 7.23 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra H4
a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

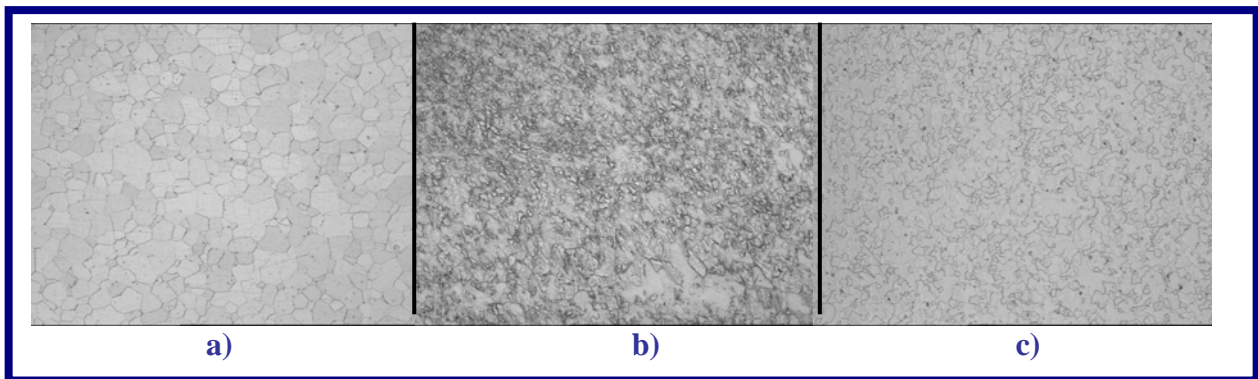


Figura 7.24 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra H5
a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

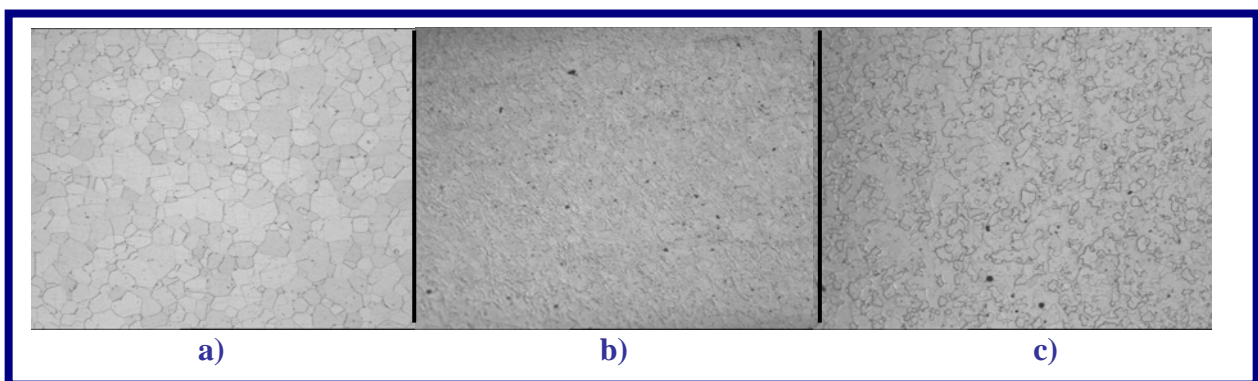


Figura 7.25 Transformación Microestructural de la Sección Longitudinal de la Muestra H6
a) Material Inicial b) Pieza Hidroformada c) Pieza Tratada Térmicamente.
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X

En las figuras 7.23, 7.24 y 7.25, se observa la secuencia de transformación de la microestructura de las muestras H4, H5 y H6, respectivamente, en su sección longitudinal. Se observa que el efecto del hidroformado genera granos comprimidos. Se observa un direccionamiento de los granos en el sentido de la deformación, sin embargo, debido a la ubicación de las muestras sobre la pieza, en H6 este direccionamiento es uniforme, mientras que en H4 y H5, el direccionamiento de los granos refleja una deformación no uniforme en cuanto a su sentido. Como resultado del tratamiento térmico, se observan fronteras de grano definidas aunque irregulares. Se observa grano fino con respecto al del material inicial, siendo la muestra H6 la que presenta el grano más grueso de estas tres muestras.

7.9. Modificaciones en las Propiedades Mecánicas de Dureza y Ductilidad Resultantes de las Transformaciones Microestructurales Observadas en la Fabricación de Tubo de Escape

El proceso de fabricación de tubo de escape puede visualizarse de manera general como la deformación de un material inicial mediante un trabajo en frío hasta obtener una forma deseada y posteriormente, una disminución de la dureza consecuente y una relevación de los esfuerzos generados, por medio de un tratamiento térmico. Las propiedades mecánicas críticas en este proceso son la dureza y la ductilidad. Lo anterior debido a que el grado de deformación desde el material inicial hasta la pieza final es muy alto y, por otro lado, esta pieza es ensamblada a otro componente en un proceso posterior por medio de una expansión en los extremos.

Las características microestructurales del material inicial, acero inoxidable AISI 409, presenta bordes redondeados en fase ferrítica. El acero inoxidable es un material dúctil, al tratarse de un material dúctil, se relaciona con una dureza baja, al compararlo con otros aceros inoxidables incluso dentro del mismo grupo de los ferríticos.

La deformación en frío ocasionada por el proceso de rolado genera un incremento en la dureza del material; se observa una mayor deformación en el sentido transversal de la pieza y la deformación es casi nula en el sentido longitudinal. Por su parte, la soldadura provoca un aumento en la dureza en la zona de aplicación tanto en las zonas afectadas por el calor, esto hace que la pieza sea frágil en las áreas donde haya soldadura. Como consecuencia de la soldadura láser se obtiene un incremento en la fragilidad del material en estas zonas, razón por la cual el posicionamiento de la soldadura durante el proceso de hidroformado se recomienda en una zona de mínima deformación para disminuir el riesgo de fracturas.

El hidroformado es el proceso más crítico en la fabricación de esta pieza, al representar la máxima deformación observada sobre el material, genera una alta dureza y una disminución en la ductilidad y consecuentemente, dislocaciones. Por otro lado, la deformación necesaria para obtener la forma deseada no es uniforme, lo que genera características microestructurales no homogéneas a lo largo de la pieza. Se observan por tanto, zonas con mayor dureza que otras y granos de distintos tamaños y formas.

Como consecuencia de la alta deformación sufrida durante el hidroformado, es requerido un tratamiento térmico para homogeneizar las características microestructurales del material y, consecuentemente, las propiedades mecánicas del mismo. El tratamiento de recocido permite disminuir la dureza del material mediante la recristalización y el acomodo de los granos. La condición ideal es alcanzar las características del material inicial. Durante

el recocido se debe evitar una fragilización a 475°C; fenómeno al cual son susceptibles los aceros inoxidable ferríticos. El tratamiento térmico efectuado para la fabricación de esta pieza se da a 900°C, seguido de un enfriamiento con aire.

Al observar el comportamiento microestructural de las muestras analizadas al salir de este proceso, se distingue una falta de homogeneidad en el tamaño, forma y acomodo de los granos. Se observan, por tanto durezas distintas. El valor promedio máximo observado se encuentra en la pieza hidroformada y es de 97.8 Rockwell B, en la Zona 2. De acuerdo con la especificación, los límites para la pieza final son de máx. 85 Rockwell B. Sin embargo, al observar la Tabla 6.1, se encuentra que los valores de dureza de las tres zonas bajo estudio se encuentran dentro de los límites especificados, aunque el mayor valor se reporta en la Zona 3, al observar un valor promedio de 77.8. Por su parte, los valores de dureza en la Zona 1 y 2, de la pieza tratada térmicamente, se encuentran por debajo del valor observado en la Zona 3.