

## **CAPÍTULO 6.**

### **CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES DEL MATERIAL**

#### **HIDROFORMADO Y TRATADO TÉRMICAMENTE**

---

Este capítulo contiene una descripción de las características de la pieza hidroformada después de aplicar el tratamiento térmico. En la fabricación de tubo de escape, el material previamente hidroformado es sometido a un tratamiento térmico con la finalidad de disminuir la dureza en el material provocada por el efecto del hidroformado y generar una microestructura homogénea. Se presentan primeramente las características microestructurales del material tratado térmicamente. Posteriormente, se presentan las metalografías efectuadas al material y las condiciones bajo las cuales se efectuó el análisis, así como la interpretación de las metalografías arrojadas por la prueba.

#### **6.1. Características Microestructurales del Material Tratado Térmicamente**

El principal tratamiento térmico aplicado al acero inoxidable ferrítico, incluyendo el AISI 409, es el recocido. Generalmente, este proceso es conseguido mediante un enfriamiento rápido del material desde una temperatura elevada. El resultado obtenido del recocido para el acero inoxidable ferrítico es una disminución de la dureza, incremento de la ductilidad y, además, resistencia a la corrosión. El tratamiento térmico de recocido, permite efectuar un relevado de los esfuerzos residuales ocasionados por un proceso previo de trabajo en frío como el hidroformado; además, genera una estructura casi homogénea al eliminar zonas de transformación desarrolladas durante el fenómeno de fragilización a 475 °C [8].

Los aceros inoxidable ferríticos, son tratados térmicamente a una temperatura superior a los 475 °C y por debajo de la temperatura a la cual puede formarse austenita. Los aceros ferríticos son propensos a la fragilización cuando son expuestos prolongadamente o enfriados lentamente dentro del rango de temperatura que va de 400 a 525 °C, con un efecto sumamente negativo a los 470, 475 y 480 °C, afectando además la resistencia al impacto del material. Se piensa que la fragilización es causada por una precipitación de ferrita de alto cromo, por lo cual está estrechamente relacionada con el contenido de cromo del acero inoxidable. Esta condición puede ser eliminada tratando al material a una temperatura mucho mayor a los 475 °C, seguido de un enfriamiento rápido. De acuerdo con lo anterior los aceros inoxidables de bajo contenido de cromo, como el 409 con el que se efectúa este estudio, tienen un riesgo menor de verse afectados por este fenómeno.

La temperatura recomendada para tratar térmicamente a un acero inoxidable AISI 409 es de 885-900 °C; mientras que el método de enfriamiento recomendado es al aire tranquilo (AC) [8]. Particularmente, en el proceso de fabricación de la pieza bajo estudio, el tratamiento térmico se efectúa a una temperatura de 900 °C en un medio protegido de nitrógeno.

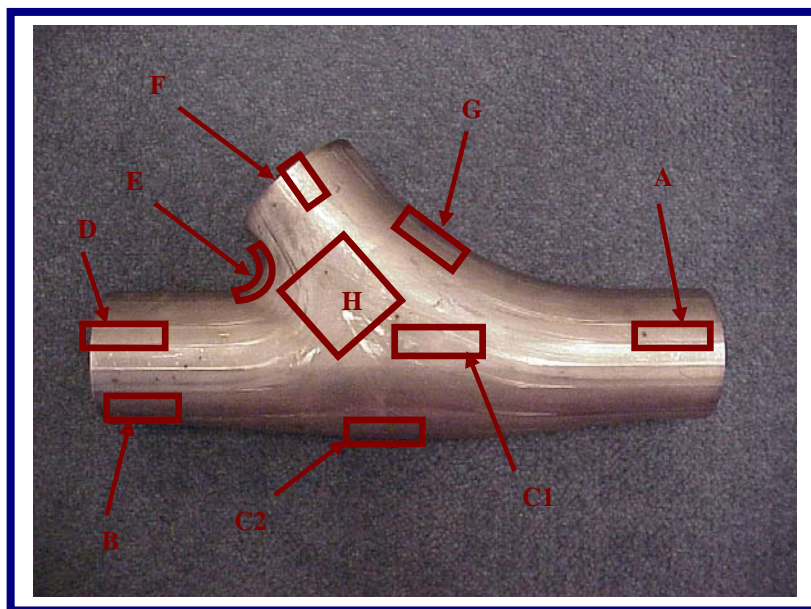
## **6.2. Metodología del Experimento**

Con el objetivo de analizar la microestructura del material tratado térmicamente, se seleccionaron una serie de secciones de la pieza. La selección se efectuó considerando las mismas zonas analizadas en el capítulo anterior, lo que permitirá efectuar la comparación de las microestructuras del material en procesos anteriores a este, que es el último en la fabricación del tubo de escape. La sustancia de ataque, tal y como en los capítulos

anteriores (Apéndice A) fue reactivo de Vilella para cada una de las secciones bajo estudio. El tiempo de ataque de las muestras fue de 45 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. Las escalas de aumentos utilizadas fueron 100X, para todas las muestras y 50X para una vista más general de la sección.

La figura 6.1 muestra la ubicación de las muestras estudiadas sobre la pieza tratada térmicamente:

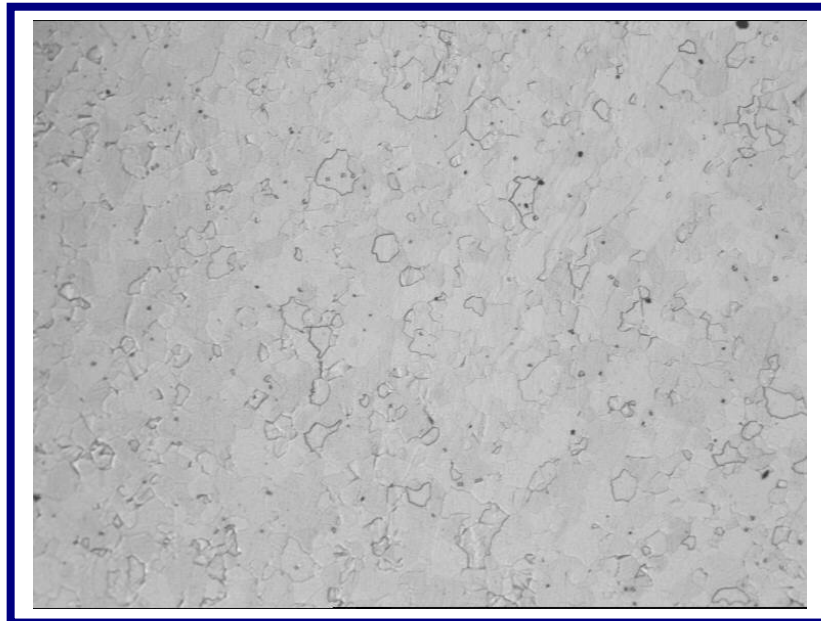


**Figura 6.1 Ubicación de Muestras Estudiadas sobre Pieza Tratada Térmicamente.**

### 6.2.1. Metalografía Efectuada sobre Muestra A

En el caso de la muestra A (ver figura 6.1), se consideraron como sujetas a estudio tanto la sección transversal como la longitudinal. Las figuras 6.2 y 6.3 muestran las metalografías efectuadas a la sección transversal y longitudinal, respectivamente.

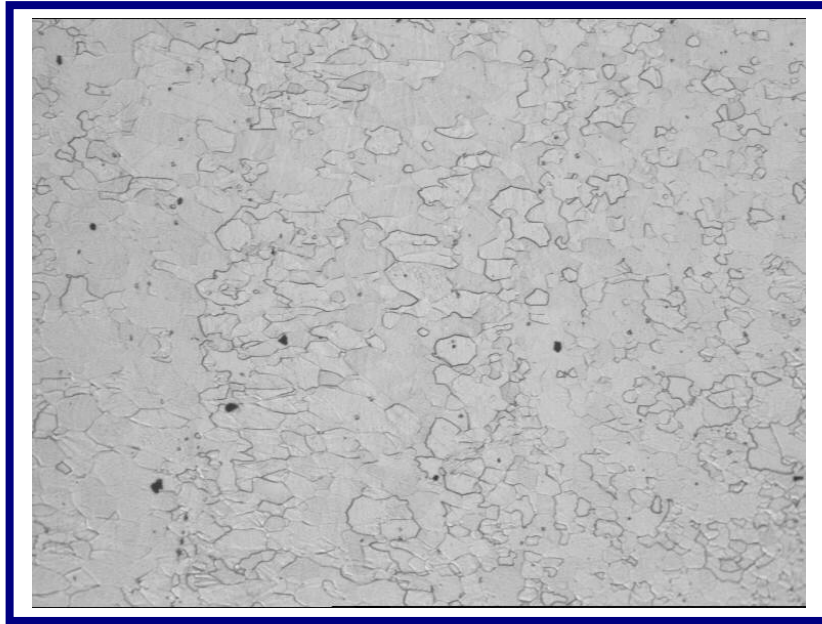
En ambas imágenes es posible ver la forma en la que se encuentran estructurados los granos. El efecto del tratamiento térmico ocasiona una recrystalización de los granos mostrando fronteras en su mayoría regulares y definidas (ver figura 6.2). Tanto en las secciones longitudinal como transversal se observa que existen granos con una recrystalización incompleta; observamos una mezcla de granos con límites bien definidos y granos que no alcanzaron esta recrystalización.



**Figura 6.2 Microestructura de Muestra A en Sección Transversal  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

En la figura 6.3 que comprende la sección longitudinal de la muestra A se observa una mayor definición en las fronteras de grano. Sin embargo, en ambas secciones se observan

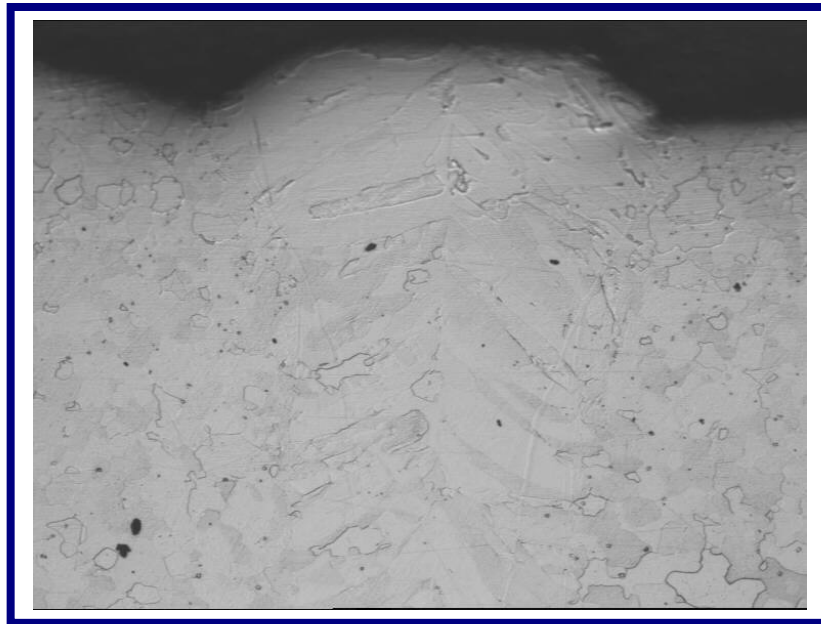
tamaños de grano no uniformes, así como fronteras irregulares, se observan diversas formas en granos pertenecientes a esta muestra.



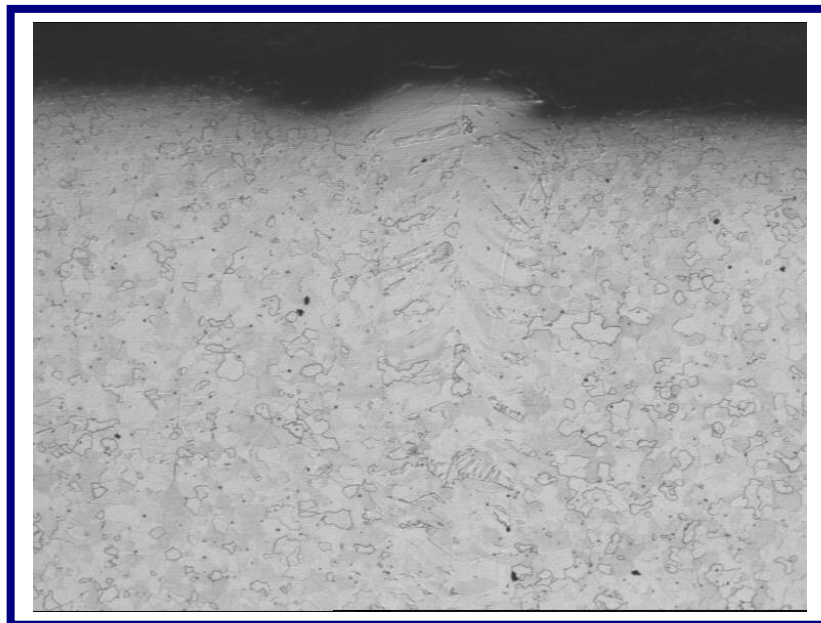
**Figura 6.3 Microestructura de Muestra A Sección Longitudinal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

### **6.2.2. Metalografía Efectuadas sobre Muestras B y C**

El efecto del tratamiento térmico sobre el área de aplicación de la soldadura se analizó en dos zonas. La primera zona comprende el extremo de la pieza (ver Figura 6.1) y corresponde a la muestra B. La figura 6.4 muestra un acercamiento a la zona de aplicación de la soldadura en la cual es posible observar que los granos que únicamente habían sido afectados por el calor tuvieron una recrystalización, consiguiendo una estructura similar a la del material no afectado por el calor en esta misma zona como se observa en la figura 6.5. Por su parte, se observa que en la zona de aplicación de la soldadura, el efecto del tratamiento térmico no fue suficiente para generar una recrystalización de los granos, pues todavía se observan granos columnares, visiblemente diferentes a las zonas circundantes.



**Figura 6.4 Microestructura de Muestra B en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

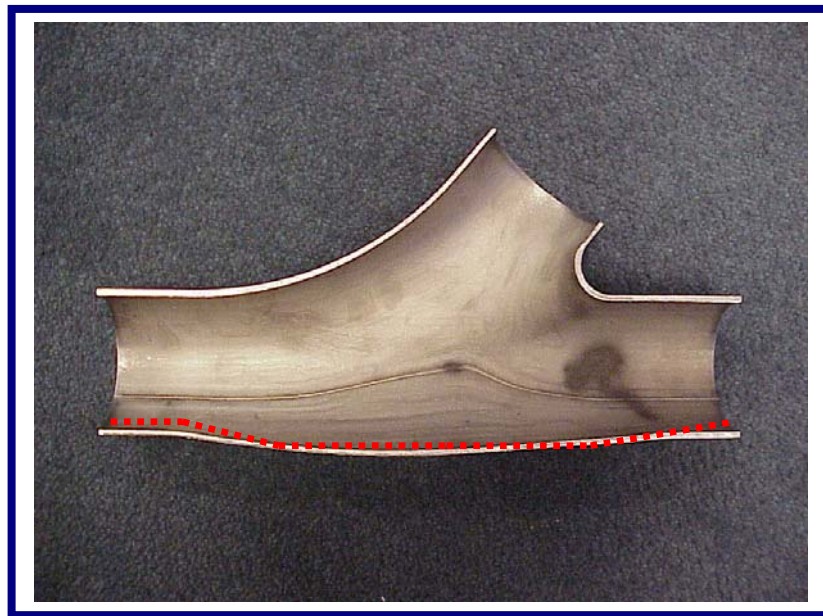


**Figura 6.5 Microestructura de Muestra B en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 50X**

La segunda zona estudiada para analizar el efecto del tratamiento térmico sobre el área de aplicación de la soldadura, de acuerdo con la muestra análoga del capítulo anterior, debería

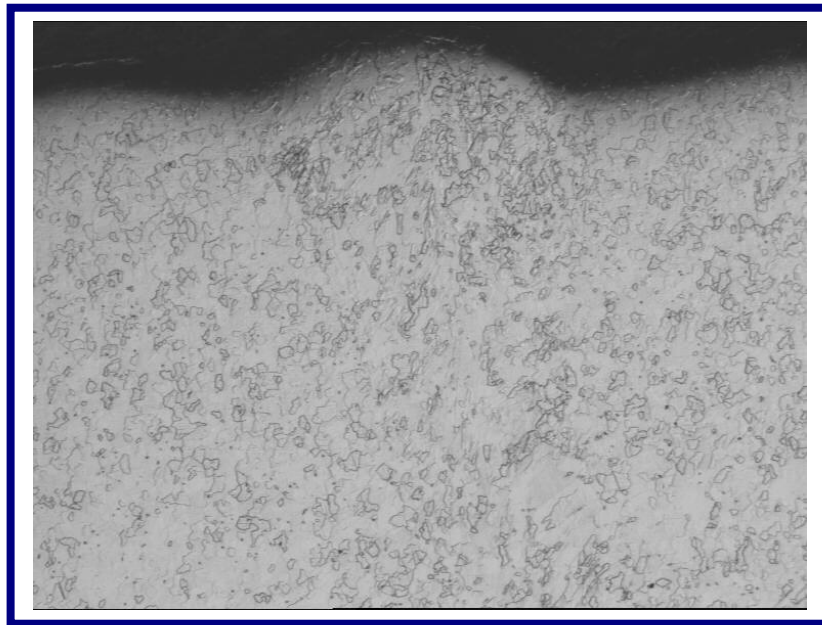
comprender la zona ubicada en la sección media de la pieza a la altura de la muestra B (ver Figura 6.1); sin embargo, la pieza proporcionada para el análisis microestructural del tratamiento térmico presenta una deformación no deseable afectando la zona de la soldadura; lo anterior debido a un acomodo incorrecto de la pieza en la prensa de hidroformado.

La figura 6.6 muestra la ubicación incorrecta de la soldadura y una línea punteada indicando la posición en la que debería encontrarse. Como consecuencia, y con motivo de contar con una muestra útil para efectuar las comparaciones posteriores se decidió considerar dos zonas para la muestra C; la muestra C1 (ver figura 6.1) considera la zona donde se encuentra la soldadura, mientras que la muestra C2 (ver figura 6.1) considera la zona en la que supuestamente debería de estar la soldadura con el fin de observar los granos en esa zona, en la cual, en este caso, existe una deformación libre del material debido al diseño del molde de hidroformado.



**Figura 6.6 Ubicación Incorrecta de la Soldadura en la Pieza Tratada Térmicamente.**

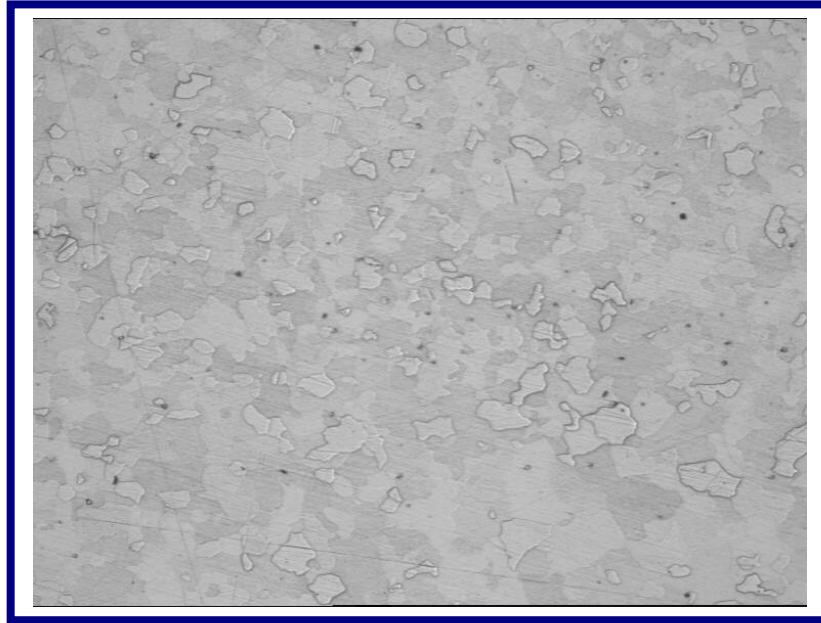
En la muestra C1 (Figura 6.7) se observa la presencia de granos recristalizados más finos que los presentes en el material inicial, se observa que la zona de aplicación de la soldadura tiene una recristalización debido al efecto del tratamiento térmico, y los granos columnares anteriormente presentes, se han redondeado. Del mismo modo se observan fronteras de grano definidas aunque no en toda la muestra.



**Figura 6.7 Microestructura de Muestra C1 en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

La figura 6.8 muestra la distribución de los granos en la zona de ubicación teórica de la soldadura. Se observan granos con forma relativamente uniforme entre sí y en su mayoría grano grueso. Aunque es posible distinguir la distribución de los granos, pocos cuentan con fronteras bien definidas, lo que indica una recristalización incompleta.



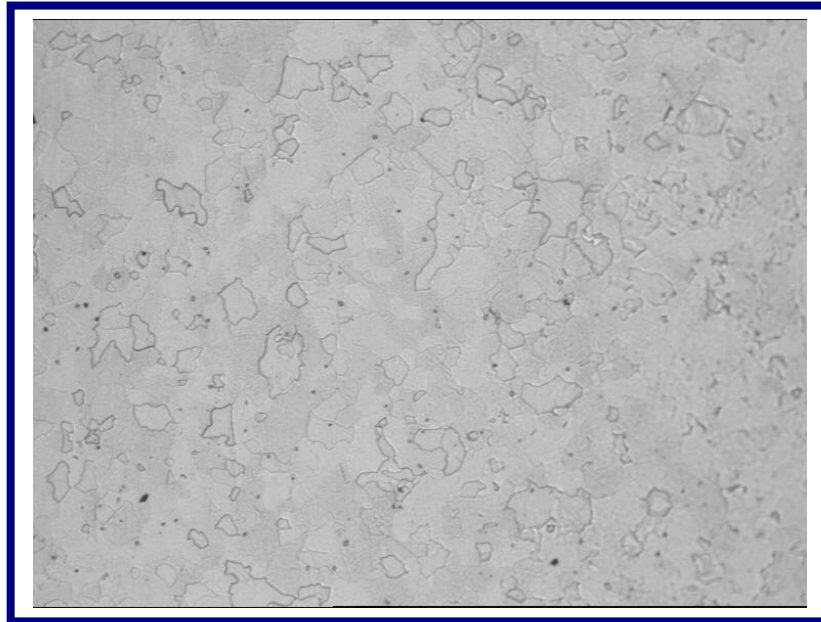


**Figura 6.8 Microestructura de Muestra C2 en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

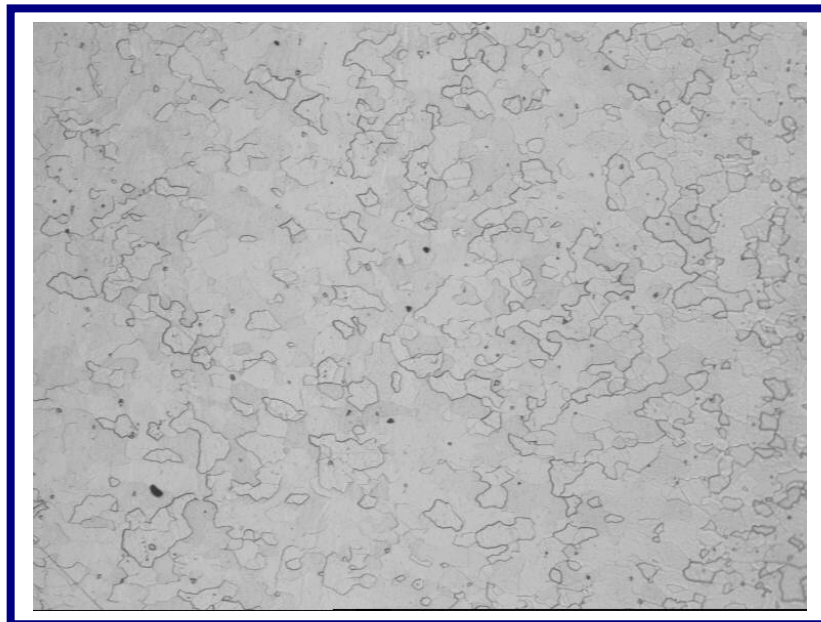
### **6.2.3. Metalografía Efectuada sobre Muestra D**

La muestra D (ver figura 6.1) fue analizada tanto en la sección longitudinal como en la sección transversal. Respecto a la sección transversal atacada con reactivo de Vilella, en la figura 6.9, se observan algunos granos con fronteras definidas, aunque en su mayoría se observan granos sin frontera definida en totalidad debido al efecto del tratamiento térmico.

Respecto a la sección longitudinal, existe un mayor número de granos con fronteras definidas, aunque aún se observan granos cuya etapa de recristalización no fue suficiente como para lograr obtener fronteras de grano definidas. La ubicación de la muestra D, sobre la pieza tratada térmicamente cuenta mayormente con una deformación en sentido longitudinal, es por ello que comparativamente entre las figuras 6.9 y 6.10, se observan granos ligeramente más comprimidos en la sección longitudinal que en la transversal.



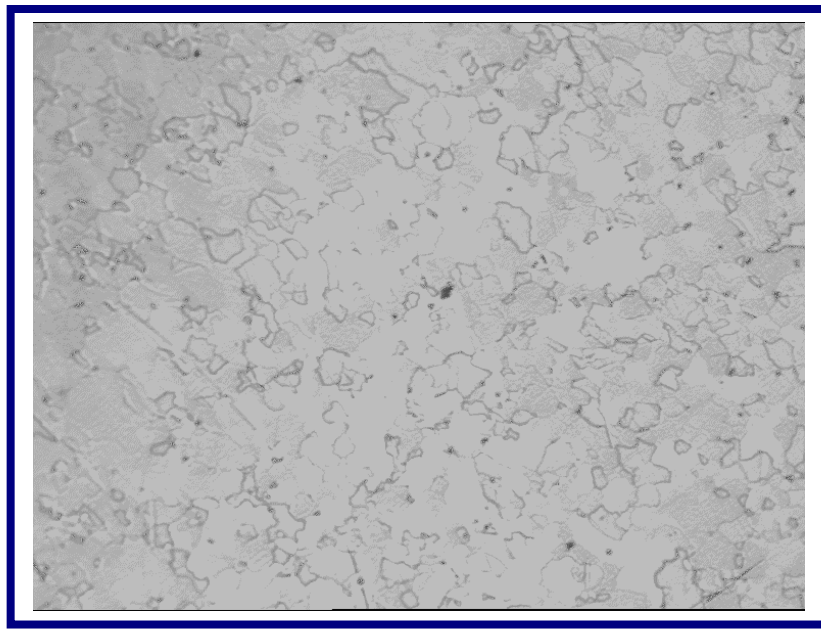
**Figura 6.9 Microestructura de Muestra D en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 6.10 Microestructura de Muestra D en Sección Longitudinal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

#### 6.2.4. Metalografía Efectuada sobre Muestra E

Debido a la ubicación de la muestra E sobre la pieza tratada térmicamente, (ver figura 6.1), únicamente es posible someter a estudio la sección transversal de esta muestra. Las figura 6.11 muestra la metalografía respectiva. En esta figura, se observa la presencia de granos con fronteras definidas, se puede notar la presencia de granos finos y gruesos, lo cual es debido a que esta zona es altamente deformada. Se trata de una zona sometida a fuerzas de tensión y compresión.

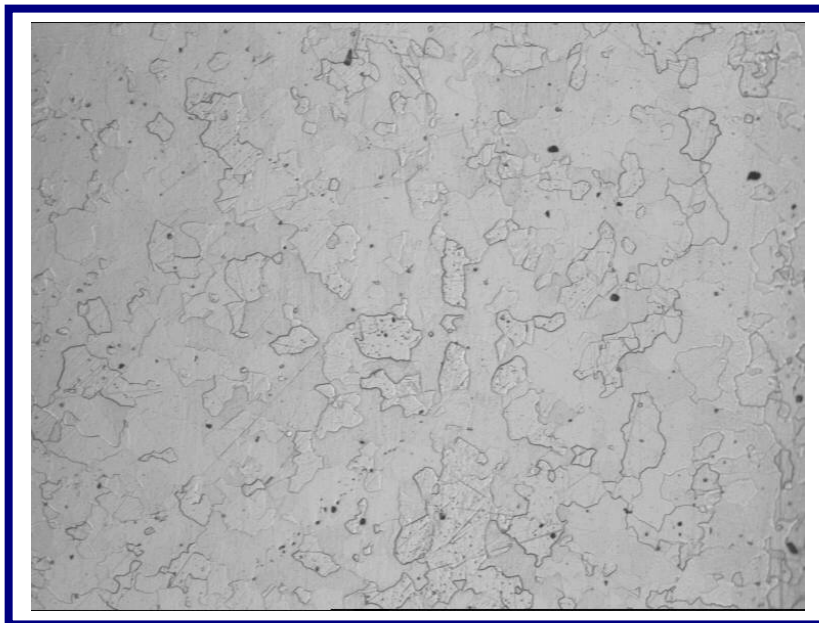


**Figura 6.11 Microestructura de Muestra E en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

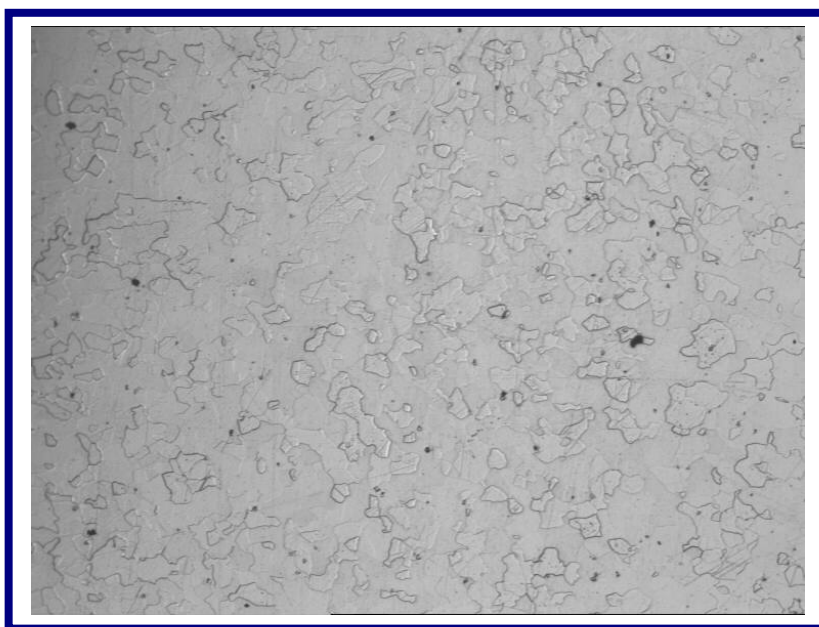
#### 6.2.5. Metalografía Efectuada sobre Muestra F

La muestra F (ver figura 6.1) está considerando una zona de alta deformación. Se analizaron la sección transversal y la longitudinal, figuras 6.12 y 6.13, de esta muestra. Tal y como se muestra en la sección transversal, se observa que los granos cuentan con fronteras definidas, aunque debido a que se trata de una zona de alta deformación, se observan granos muy finos y granos gruesos. En la sección longitudinal, figura 6.13, es

posible notar, igualmente, granos con fronteras definidas y se puede observar que existen granos que no completaron su recristalización. Se observa además, grano más fino que el observado en la sección transversal, debido al sentido de la deformación.



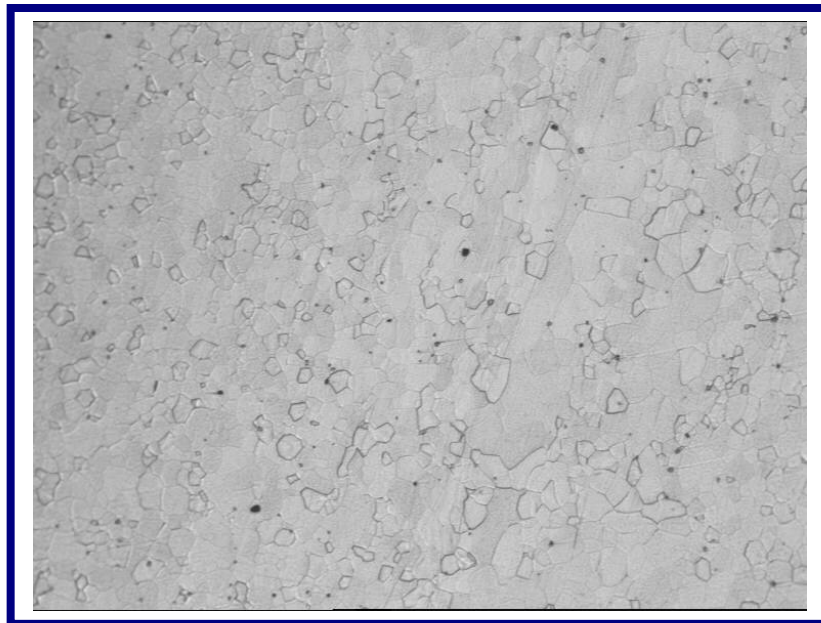
**Figura 6.12 Microestructura de Muestra F en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



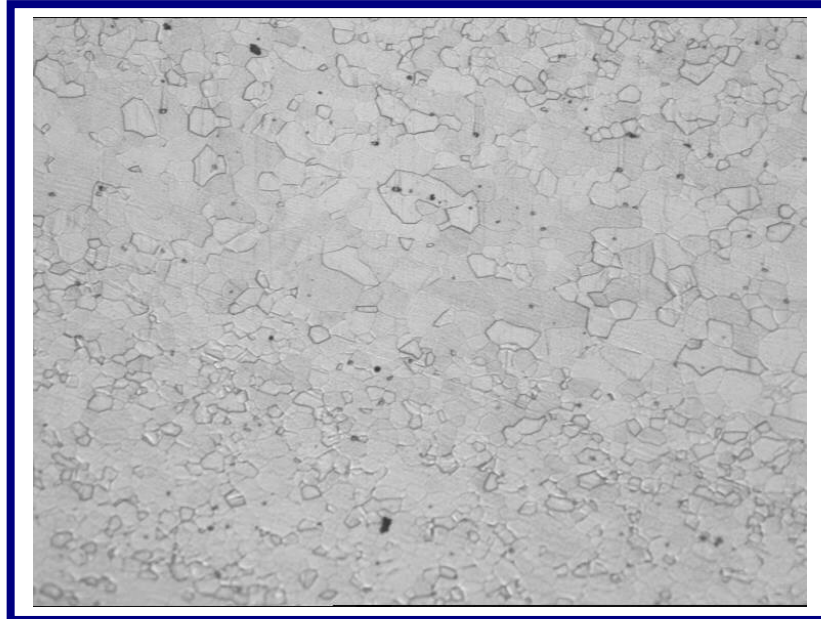
**Figura 6.13 Microestructura de Muestra F en Sección Longitudinal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

### 6.2.6. Metalografía Efectuada sobre Muestra G

En la muestra G, (ver figura 6.1), considerando la sección transversal, figura 6.14, es posible notar que los granos tienen fronteras definidas sin embargo, también, se observan granos sin recrystalizar. Por otra parte, la sección longitudinal, figura 6.15, presenta granos finos y gruesos agrupados y fronteras de grano definidas en algunos casos y no muy definidas en otros. En ambas secciones, figuras 6.14 y 6.15, es posible notar que incluso después del tratamiento térmico se observa una orientación de los granos en el sentido de la deformación y que el comportamiento de los granos en esta zona es similar tanto en el sentido transversal como en el sentido longitudinal.



**Figura 6.14 Microestructura de Muestra G en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 6.15 Microestructura de Muestra G en Sección Longitudinal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

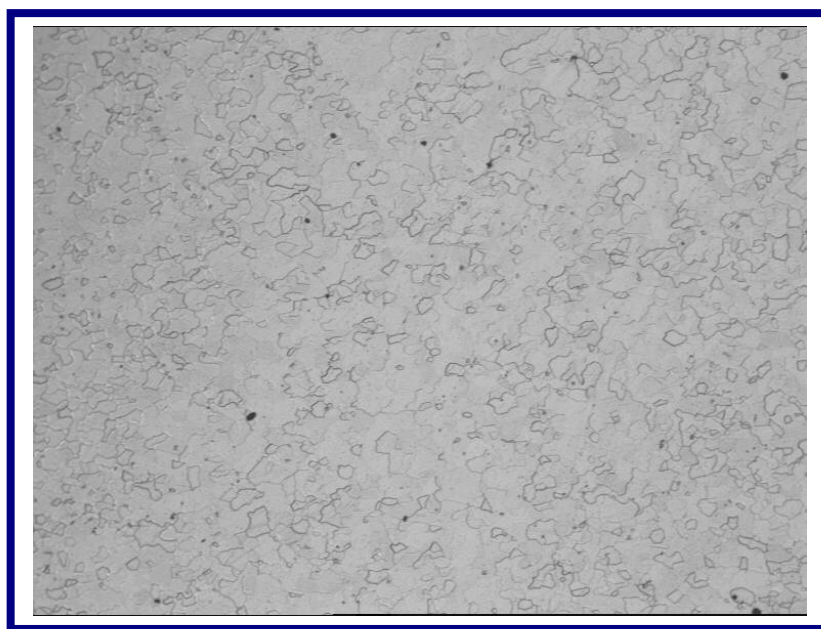
### **6.2.7. Metalografía Efectuada sobre Muestra H**



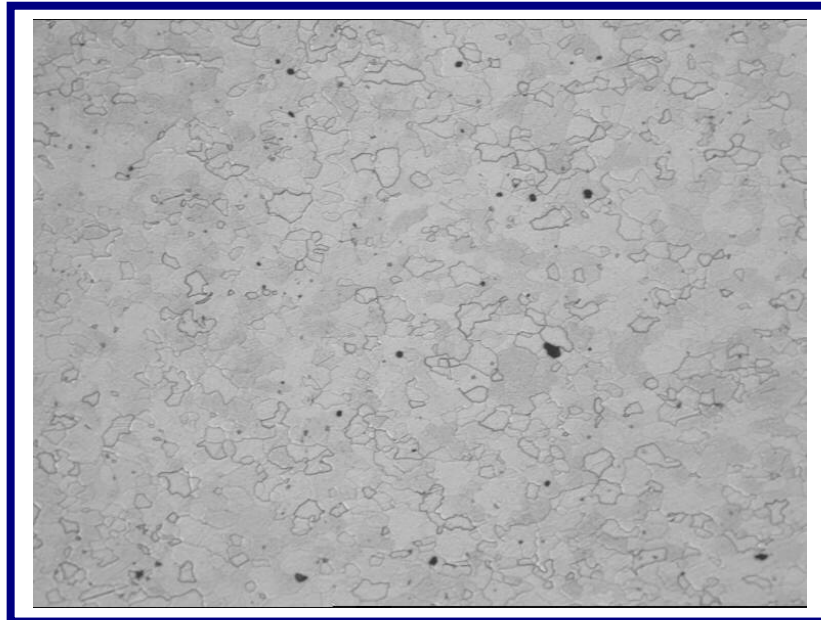
**Figura 6.16 Muestra H en pieza Tratada Térmicamente Mostrando  
Secciones de Corte Utilizadas en Metalografías.**

En la muestra H (ver figura 6.1), zona de la pieza considerada como la de mayor deformación, tal como en el capítulo anterior, se dividió en seis partes. Las secciones de corte de la muestra H se observan en la figura 6.16.

En la muestra H1, tal y como se puede ver en las figura 6.18 se observan granos muy finos y con fronteras de grano bien definidas y pocas áreas con recristalización incompleta. El tamaño de grano indica que se trata de una zona de alta dureza y que el efecto del tratamiento térmico, pese a que permite una recristalización homogénea de los granos, estos no recuperan el estado inicial. En las figura 6.19, en la cual se considera la sección longitudinal, se observan granos más gruesos que los observados en la sección transversal. Del mismo modo, se observan fronteras de grano bien definidas, aunque zonas mayores con recristalización incompleta.



**Figura 6.17 Microestructura de Muestra H1 en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 6.18 Microestructura de Muestra H1 en Sección Longitudinal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

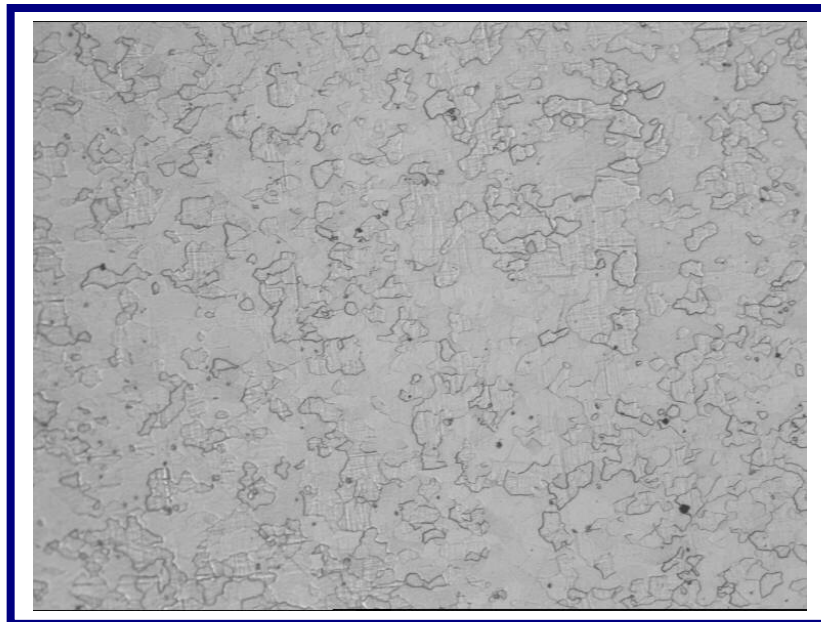
En la muestra H2, sección transversal, figura 6.19 se observan granos finos, semejantes a los observados en la misma sección de H1 y fronteras de grano definidas. De igual modo, casi no se observan áreas con recristalización incompleta. Se observan también granos finos, en su mayoría. En la figura 6.20, disminuyen las zonas con recristalización incompleta con respecto a lo observado en H1, misma sección. Aunque se observan formas de grano menos homogéneas y granos, ligeramente mayores a los observados en H1 para la sección longitudinal. Las características del grano son similares en ambas secciones para la muestra H2.





**Figura 6.19** Microestructura de Muestra H2 en Sección Transversal.

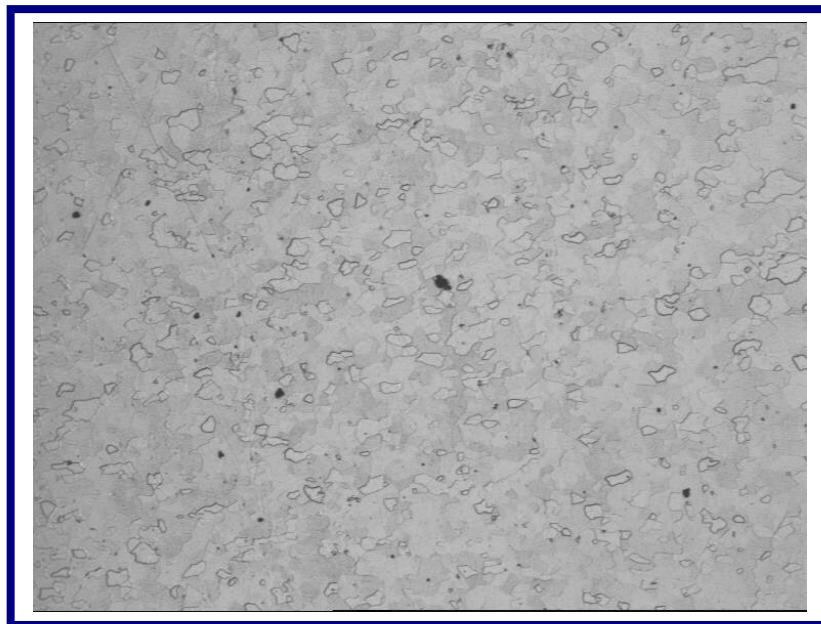
**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



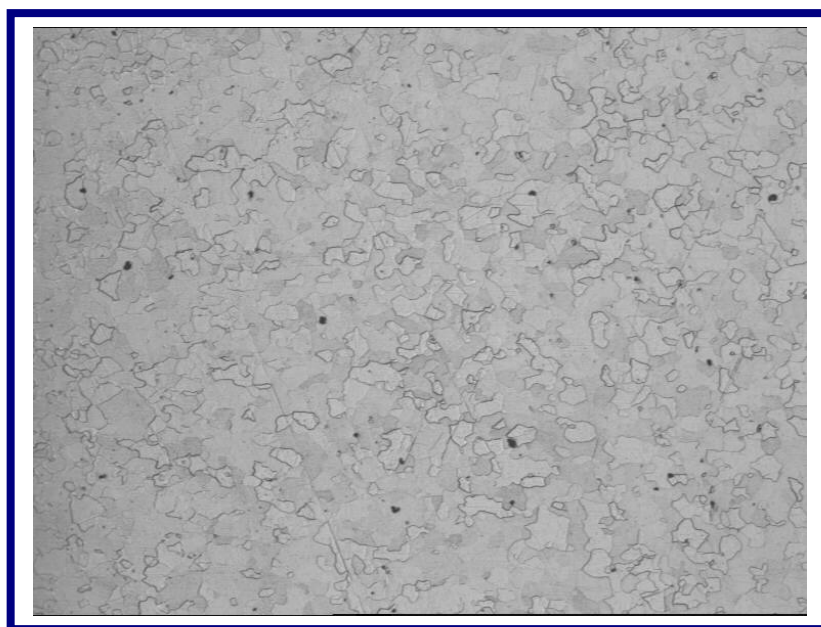
**Figura 6.20** Microestructura de Muestra H2 en Sección Longitudinal.

**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

La muestra H3 presenta de la misma manera que las muestras H1 y H2 en su sección transversal y longitudinal, ver figuras 6.21 y 6.22, granos finos; aunque también se observan, áreas mayores con recristalización incompleta.

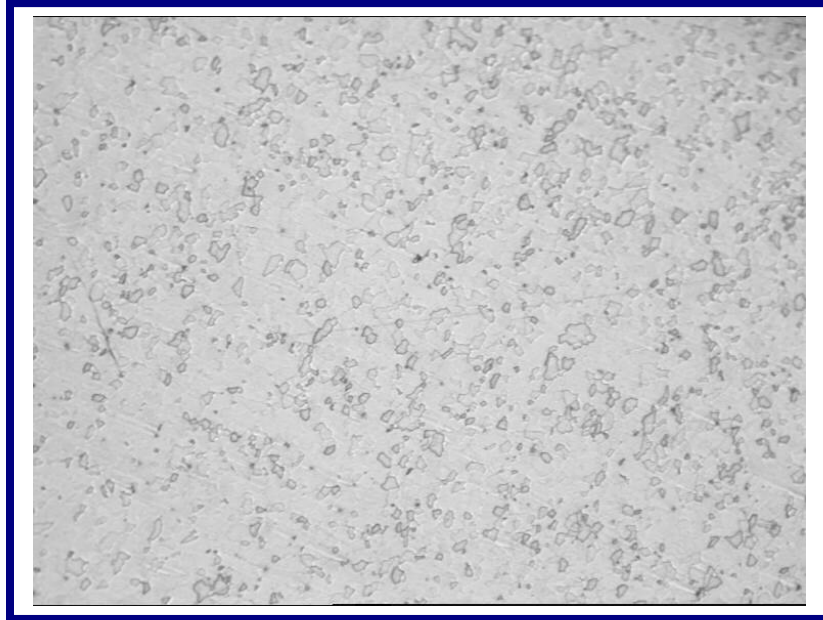


**Figura 6.21 Microestructura de Muestra H3 en Sección Transversal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



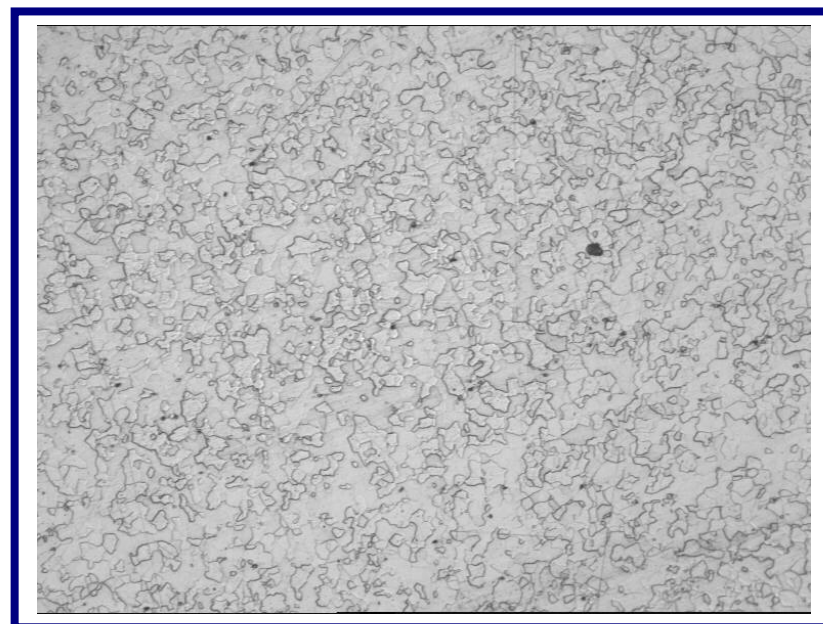
**Figura 6.22 Microestructura de Muestra H3 en Sección Longitudinal.  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

La muestra H4, muestra en su sección transversal, figura 6.23, múltiples zonas de recristalización incompleta. Se observa, por otro lado, grano muy fino. Respecto a la sección longitudinal, figura 6.24, se observa recristalización casi en la totalidad de la muestra y granos de forma irregular con fronteras de grano definidas.



**Figura 6.23 Microestructura de Muestra H4 en Sección Transversal.**

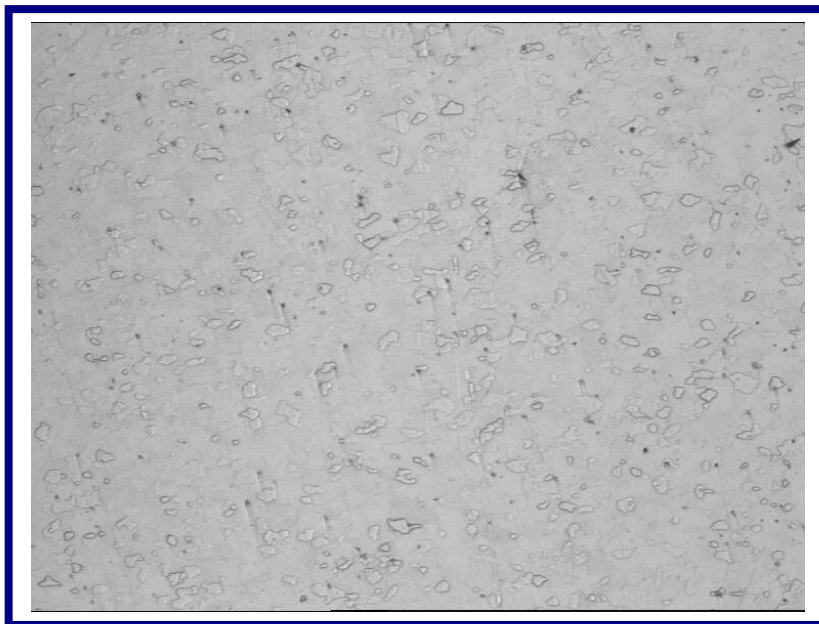
**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 6.24 Microestructura de Muestra H4 en Sección Longitudinal.**

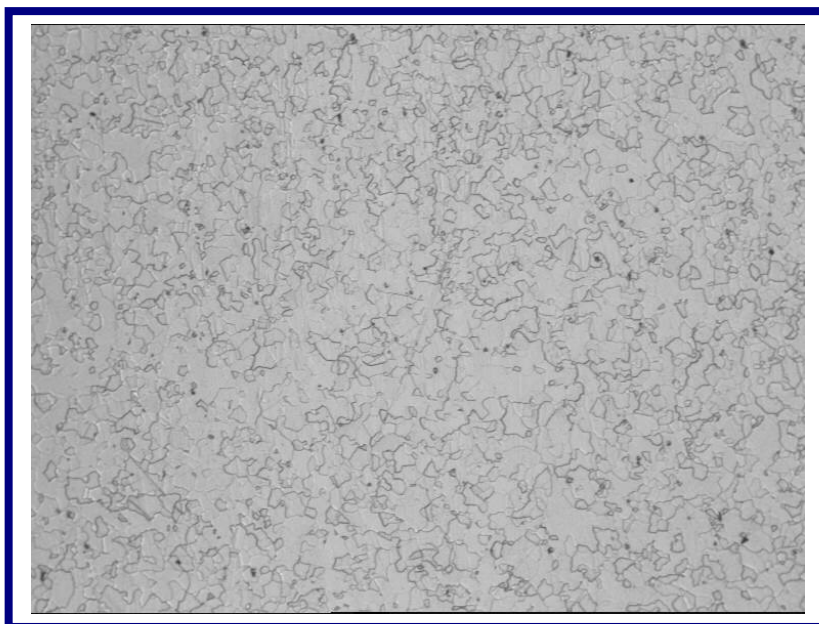
**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

En la sección transversal de la muestra H5, figura 6.25, se observan granos finos con fronteras definidas. La figura 6.26 muestra la sección longitudinal de la muestra H5 en donde se observan, de manera similar a H4, fronteras de grano definidas y ausencia de zonas no recristalizadas.



**Figura 6.25 Microestructura de Muestra H5 en Sección Transversal.**

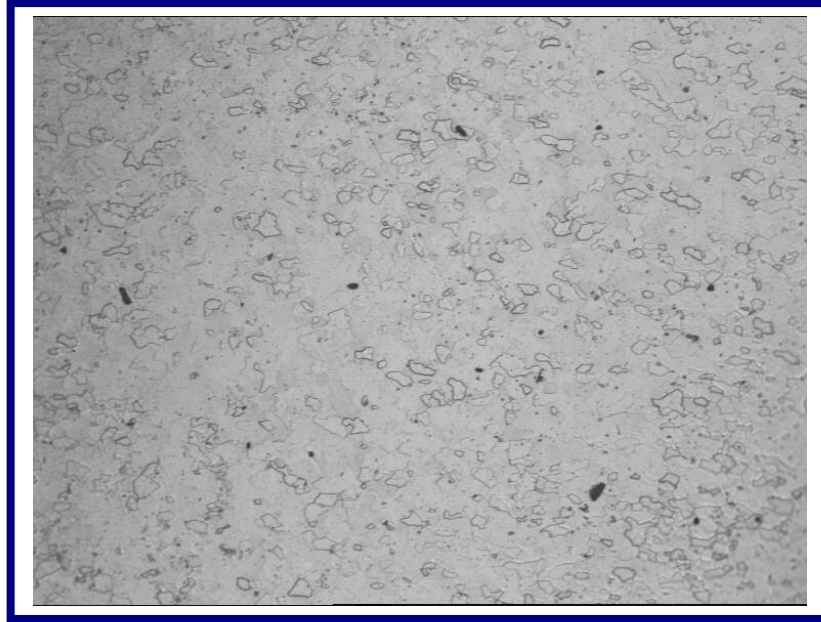
**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 6.26 Microestructura de Muestra H5 en Sección Longitudinal.**

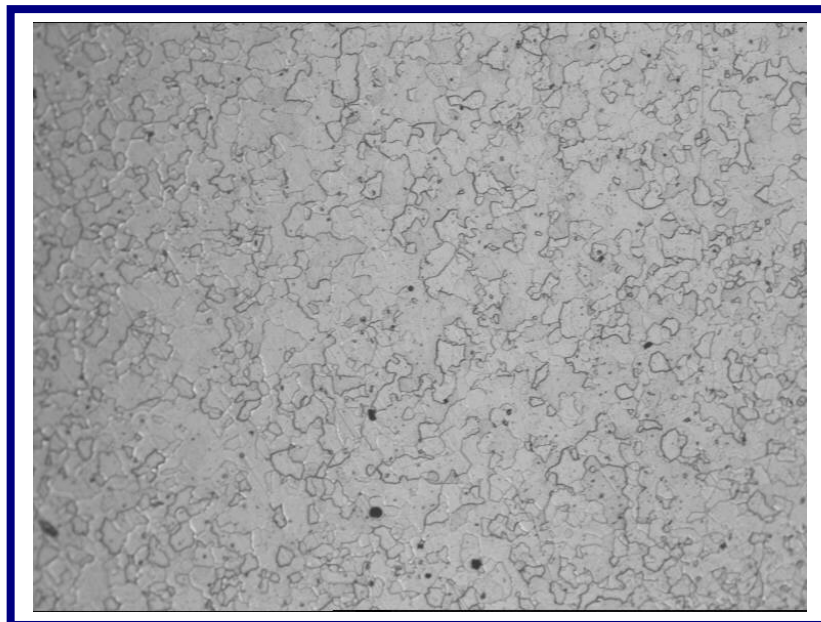
**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

La figura 6.27 representa la sección transversal de la muestra H6. Se observan una mayor cantidad de fronteras de grano definidas, con respecto a H4 y H5. Existen aún zonas sin recrystalizar y el grano es fino. La figura 6.28 muestra una recrystalización casi en su totalidad de la sección longitudinal H6. El grano observado es más grueso que en H4 y H5.



**Figura 6.27** Microestructura de Muestra H6 en Sección Transversal.

**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**



**Figura 6.28** Microestructura de Muestra H6 en Sección Longitudinal.

**Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

### 6.2.8. Dureza del Material Tratado Térmicamente

Sobre la pieza tratada térmicamente fue efectuada una prueba de dureza Rockwell. La figura 6.29 muestra las zonas de medición:

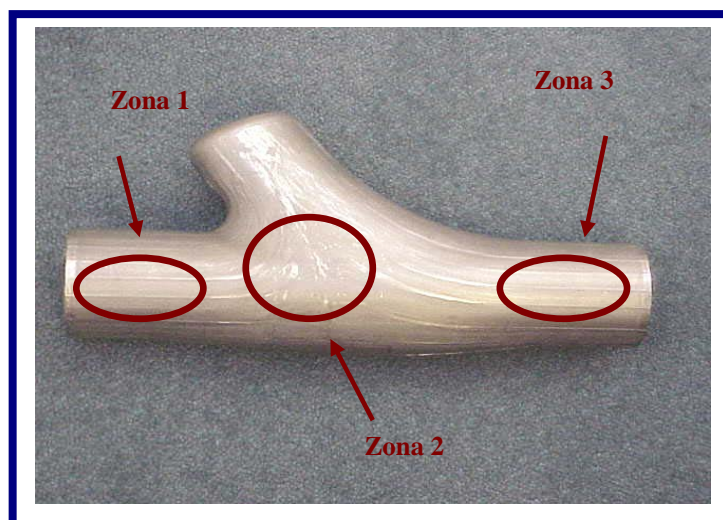


Figura 6.29 Zonas de Medición de Dureza sobre Pieza Tratada Térmicamente.

Tabla 6.1 Dureza Rockwell B sobre Pieza Tratada Térmicamente

Zona	Valores de Dureza	Promedio
ZONA 1	65, 67,66, 67, 70, 67, 67, 65, 71, 69	67.4
ZONA 2	68, 70, 67, 71, 70, 69, 68, 70, 72,68	69.3
ZONA 3	72, 73, 66, 75,74,74,68,70,70,69,67	77.8

La tabla 6.1 muestra los valores de dureza medidos en las diferentes zonas. La zona con los mayores grados de dureza se registra en la zona 3, ya que esta zona fue afectada por la compresión en el proceso de hidroformado, mientras que para las zonas 1 y 2 el material fluye. De acuerdo con lo observado en las metalografías efectuadas y los valores de dureza, se observa que de acuerdo con el tipo de grano presente en cada zona, es posible corroborar los valores obtenidos, pues se encuentra que el grano más fino se encuentra en muestras relativas a la zona 3. Es posible notar que esta es la zona que sufre la mayor deformación y consecuentemente, es el punto con mayor dureza, pese a que ya se realizó el tratamiento térmico.