

11161
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

CARACTERIZACIÓN DE LA FORMACIÓN DEL
DEFECTO SUPERFICIAL "ESCAMA" EN EL TUBO DE
REFRIGERACIÓN COMERCIAL C-12200 Y SU
EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
MICROESTRUCTURA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
METAL-MECÁNICA
PRESENTA

FRANCISCO JAVIER JIMÉNEZ ALVAREZ

ASESOR: M.I. ANA MARIA PANIAGUA M.

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO

2003 4



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

	Página
INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVO	4
CAPÍTULO I PROPIEDADES Y FABRICACIÓN DEL TUBO DE COBRE	
1.1 Propiedades del cobre	5
1.2 Proceso de fabricación del tubo de cobre	7
CAPÍTULO II EXPERIMENTACIÓN	
2.1 Fundición	
2.1.1 Muestra del lingote y ataque químico para relevar la macroestructura.	11
2.1.2 Dureza	11
2.1.3 Muestra del lingote y composición química	12
2.2 Extrusión	
2.2.1 Temperatura de operación	12
2.2.2 Dureza puntual en el tubo Shell	13
2.2.3 Tamaño de grano del tubo Shell	13
2.2.4 Acabado superficial del dado de extrusión	14
2.3 Estirado	
2.3.1 Tensión máxima en el extrusión y estirado	14
2.3.2 Dureza en extrusión y estirado	15
2.3.3 Dureza puntual en el tubo defectuoso	16
2.3.4 Fósforo en el tubo defectuoso	16
2.3.5 Óxido cuproso en el tubo defectuoso	17
2.3.6 Difracción de Rayos X en el tubo defectuoso	17
2.3.7 Determinación de la temperatura en la etapa de estirado	17
CAPÍTULO III RESULTADOS	
3.1 Fundición	
3.1.1 Composición química del lingote	18
3.1.2 Tamaño del grano	18
3.1.3 Dureza del lingote	21
3.2 Extrusión	
3.2.1 Temperatura de operación	22
3.2.2 Dureza y esfuerzo de tensión del tubo Shell	22
3.2.3 Tamaño de grano del tubo Shell	24
3.2.4 Dureza y acabado superficial del dado de extrusión	26
3.3 Estirado	
3.3.1 Resistencia a la tensión en extrusión y estirado	28
3.3.2 Dureza en extrusión y estirado	28
3.3.3 Dureza puntual en el tubo defectuoso	30
3.3.4 Fósforo en el tubo defectuoso	30

3.3.5 Impurezas en tubo defectuoso	31
3.3.6 Detección de óxido cuproso	31
3.3.7 Determinación de las fases de cobre en el tubo defectuoso	32
3.3.8 Determinación de la temperatura en estirado	37

CAPITULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fundición	
4.1.1 Composición química del lingote	38
4.1.2 Tamaño de grano y dureza del lingote	38
4.2 Extrusión	
4.2.1 Temperaturas de operación	38
4.2.2 Dureza y esfuerzo de tensión del tubo Shell	39
4.2.3 Tamaño de grano del tubo Shell	39
4.2.4 Acabado superficial del dado de extrusión	39
4.3 Estirado	
4.3.1 Resistencia máxima en extrusión y estirado	40
4.3.2 Dureza en extrusión y estirado	40
4.3.3 Dureza puntual en el tubo defectuoso	41
4.3.4 Fósforo en el tubo defectuoso	41
4.3.5 Óxido cuproso en el tubo defectuoso	41
4.3.6 Difracción de Rayos X en el tubo defectuoso	41
4.3.7 Determinación de la temperatura en la etapa de estirado	42

CONCLUSIONES	43
--------------	----

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	44
--------------------------	----

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en determinar y dar solución a un problema del cobre en México, el cual presenta problemas técnicos crónicos en sus procesos de manufactura, concretamente en el tubo de cobre sin costura.

La fabricación del tubo de cobre sin costura está normalizada por la norma ASTM B 743-95^[5]. Esta especificación incluye al tubo de cobre sin costura en rollo, apropiado para el uso en refrigeración, aire acondicionado, las líneas de transporte de aceite y gasolina, entre otras.

Con el cual se hicieron pruebas al lingote para determinar dureza, tamaño de grano y composición química para obtener las primeras características del material. Después se hizo un estudio en las propiedades físicas y químicas en la etapa de extrusión y estirado, para así evaluar cada etapa del proceso y determinar en que punto de éste se presenta el problema de la formación de la escama en el tubo.

En esta investigación se describen las causas y efectos del defecto denominado "escama", en el capítulo I se describe el proceso de fabricación del tubo de cobre sin costura desde la fundición hasta el estirado del mismo. En el capítulo II trata de las técnicas utilizadas en la experimentación. En el capítulo III se exponen los resultados de la experimentación y finalmente en el capítulo IV se analizan los resultados y por último se presentan las conclusiones.

OBJETIVO

Determinar las causas y efectos que generan el defecto superficial "escama" en el tubo de cobre 99.9% sin costura en el rollo C-12200 y proveer un marco de referencia para el tratamiento de los defectos superficiales en tubos de cobre.

CAPÍTULO I

PROPIEDADES Y FABRICACIÓN DEL TUBO DE COBRE

1.1 Propiedades del cobre.

El cobre es un metal brillante, de color rojizo, notable por su conjunto de propiedades que lo hacen extraordinario, útil y conveniente para una diversidad de usos. El cobre se encuentra en la naturaleza, aproximadamente, en 165 minerales diferentes. Los más comunes se pueden agrupar en cobre nativo (relativamente escaso en estado metálico o elemental, sin transformaciones), minerales oxidados (malaquita, azurita, crisolita, cuprita, brochantita), y minerales sulfurados (son mezclas compuestas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos de otros diferentes elementos) y aleaciones de cobre. Las aleaciones de cobre se emplean en la tecnología de los metales, se les utiliza puros o formando mezcla con otros elementos. En el caso del cobre, la alta pureza se busca cuando se le desea emplear como conductor eléctrico, especialmente cuando este conductor es de un diámetro muy pequeño. Ello porque el cobre de alta pureza tiene una alta conductividad eléctrica y una elevada ductilidad.

El cobre en aleaciones, en cambio, ofrece otras ventajas para los usuarios que buscan propiedades distintas de fabricación o en el uso.

En ciertos procesos de fabricación son propiedades favorables:

- La facilidad de conformación por fundición.
- La facilidad de trabajo por forja o por mecanizado.

Propiedades de cobre:

- Alta conductividad térmica.
- Excelente para proceso de maquinado.
- Gran resistencia a la corrosión y alta capacidad de aleación metálica.
- Muy buena capacidad de deformación en caliente y frío.
- Mantiene sus propiedades indefinidamente en el reciclaje.
- Permite la recuperación de metales de aleaciones.
- Elemento básico para la vida animal y vegetal.

- Propiedades bactericidas.
- Color cálido apto para la decoración y el arte.
- Existencia metálica en estado natural.

El cobre es un metal con alta maleabilidad y ductilidad y que es útil para transportar fluidos líquidos y gases a presiones moderadas. El cobre se extrae puro o en minerales oxidados de las minas, luego es refinado mediante un proceso de electrólisis obteniendo placas de cobre al 99.99 %, el cual es fundido por arriba de los 1300 °C adicionando fósforo para atrapar y extraer al oxígeno de la masa fundida de cobre, con la finalidad de evitar en la solidificación la fragilidad y disminución en la ductilidad y maleabilidad.

El tubo es normalmente fabricado de alguno de los siguientes tipos de cobre:

Aleaciones de cobre UNS no.	Tipo de cobre
C10200	Libre de oxígeno sin residuos desoxidantes
C10300	Libre de oxígeno, extra bajo fósforo
C10800	Libre de oxígeno, bajo fósforo
C12000	Fosforizado, baja residualidad de fósforo
C12200	Fosforizado, alta residualidad de fósforo

El tubo de cobre C-12200^[5] sin costura en rollos es el utilizado en este trabajo, y tiene una composición química de 99.9% de cobre y 0.015 a 0.040 % de fósforo.

Uno de los problemas conocidos que se manifiesta, es el desprendimiento del cobre en la superficie exterior del tubo como se muestra en la figura 1.

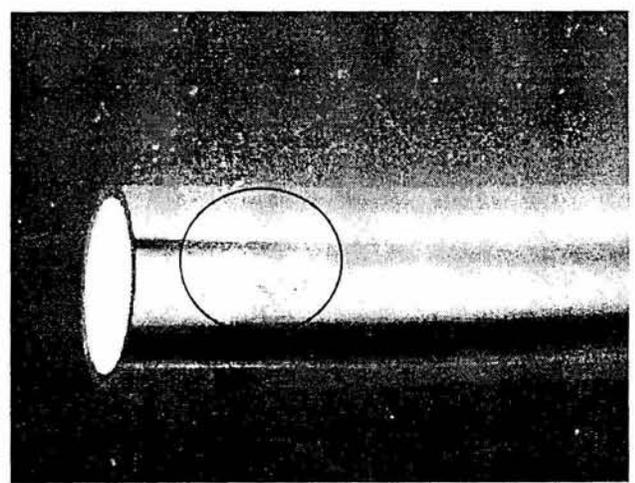
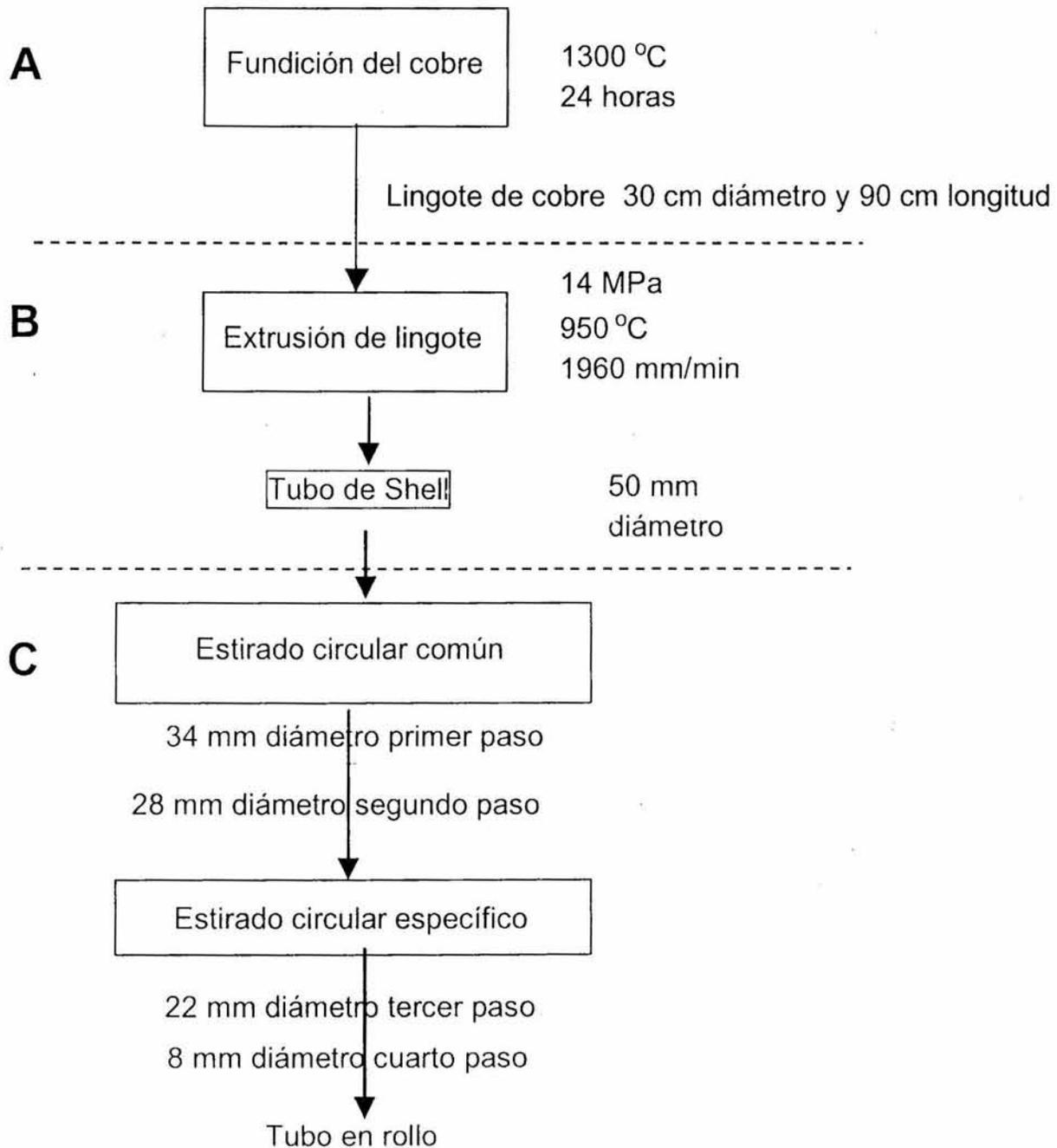


Figura 1. Detalle del desprendimiento del tubo de cobre C-12200.

En la figura 1 se muestra un tubo con el problema y se observan rayaduras y marcas de partículas de cobre desprendidas, esto se presenta a lo largo del proceso de extrusión y estirado.

1.2 Proceso de fabricación del tubo de cobre

El proceso de fabricación del tubo de cobre C-12200 esta formada de 3 etapas (A, B y C) que se muestran en el siguiente diagrama de flujo:



A Fundición:

En la fundición, se obtiene la formación del lingote de cobre a partir de un cátodo de cobre con una pureza del 99.99% y una cantidad de fósforo^[1] máxima de 0.040 % en peso en el horno de inducción tipo canal marca CALAMARI, el cual tiene integrado la fundición, guardado, mezclado y descarga para la colada continua. En la sección de vaciado del lingote hay una corriente de agua que enfría la parte exterior del mismo; solidificándolo a un diámetro de 30 cm, el cual es cortado por una sierra a una longitud de 90 cm y transportado a través de un sistema de rodillos. En esta etapa se tomó una muestra de lingote para analizar las propiedades de dureza y tamaño de grano, figura 2.

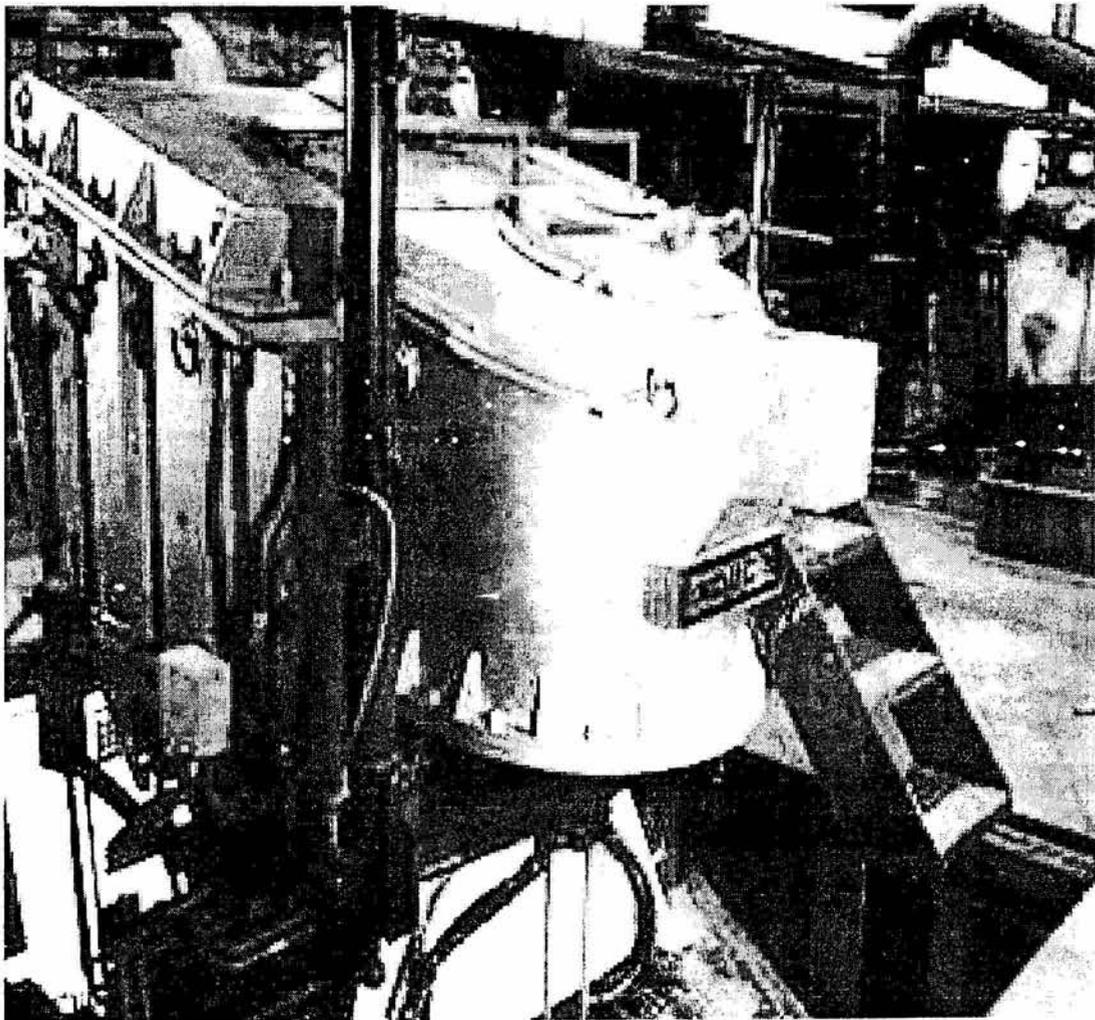


Figura 2. Horno de inducción tipo canal.

B Extrusión:

En la extrusión, el lingote se somete a una presión de 14 MPa y a una temperatura de 950 °C haciéndolo pasar por un dado y un mandril el cual forma al tubo de cobre llamado tubo Shell. El tipo de extrusión es horizontal directo, es decir el lingote se arrastra a través del interior de la prensa (recipiente) a medida que se desplaza el apisonador o RAM. La marca de la prensa es MANESMAN de 14 MPa, figura 3.

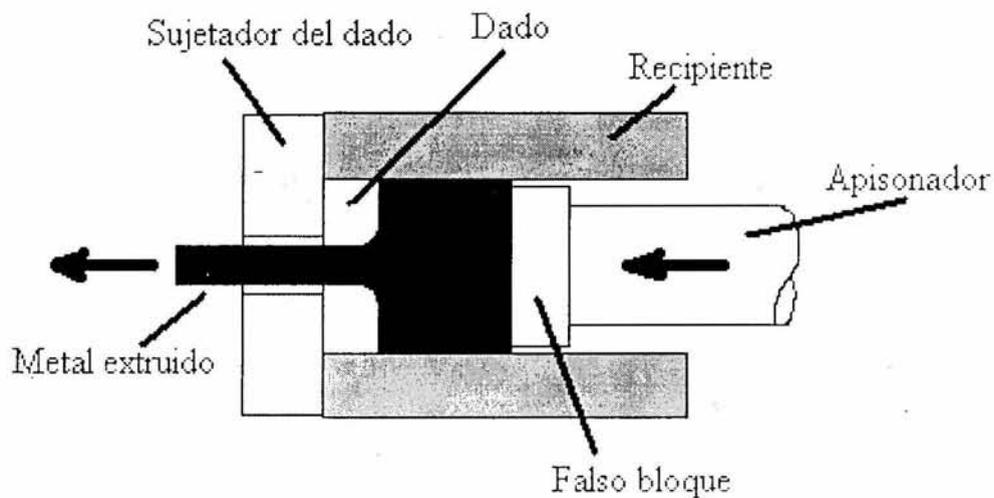


Figura 3. El lingote es desplazado a través del recipiente o contenedor haciendo pasar el lingote deformado por el dado de extrusión, conocido como extrusión directa^[6].

En esta etapa se tomaron muestras del tubo Shell y se determinó la dureza y tamaño de grano. Además, se observó la temperatura de operación y acabado superficial del dado.

C Estirado:

En el estirado, el tubo Shell se fabrica en la máquina de estirado en frío marca SCHUT lo cual consiste en la reducción controlada (por matrices cónicas sucesivas) del diámetro exterior y pared hasta la obtención de la medida requerida. Durante el proceso se alternan las reducciones o estiramientos sin recocimiento para equilibrar las estructuras internas. El tubo de cobre es sometido a una fuerza de tensión y reducción en el espesor y diámetro del tubo por cuatro pasos de estiramiento a través de los dados de estirado hasta llegar a un diámetro de 8 mm, figura 4. En esta etapa es donde se detecta el objeto de este estudio; el defecto superficial denominado "escama". Se determinó la resistencia máxima del tubo, dureza, contenido de fósforo en el tubo defectuoso, contenido de óxido cuproso, fases de cobre y temperatura de estirado.

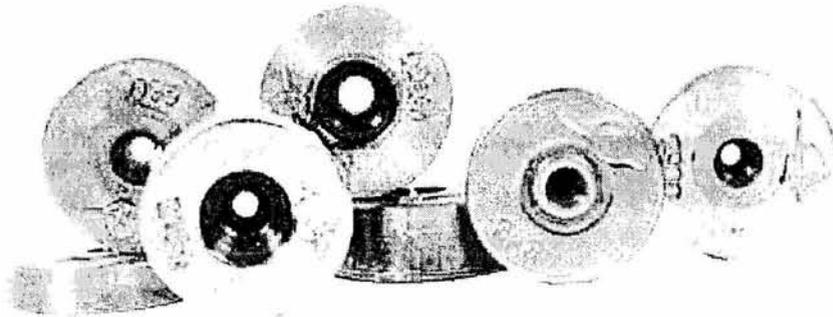


Figura 4. Dados para el proceso de estirado.

CAPITULO II

EXPERIMENTACIÓN

2.1 Fundición.

2.1.1 Muestra de lingote y ataque químico para revelar la macroestructura.

El lingote se cortó perpendicular a la longitud, con un espesor de 10 mm, mediante una sierra eléctrica, quedando como un disco. A continuación en forma manual mediante lijas se pulió la muestra hasta un acabado de grano 600, realizándose un ataque con ácido nítrico concentrado durante 45 segundos, posteriormente se obtuvieron macrografías al corte del lingote y se midió el tamaño de grano en dos partes del mismo.

2.1.2 Dureza.

Se cortó el disco de lingote en ángulos de 0° , 45° , 90° , 135° como se observa en la figura 5.

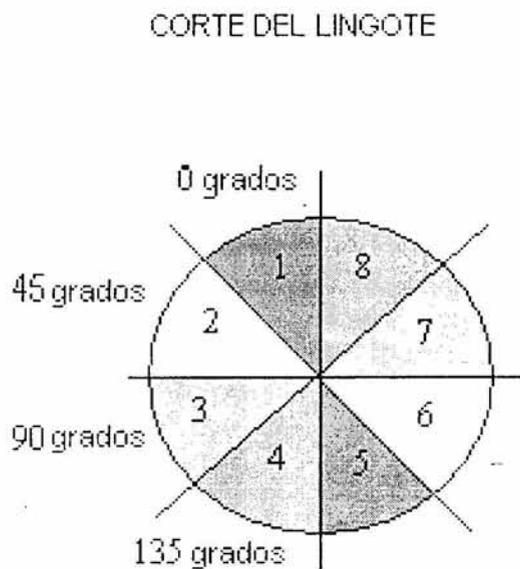


Figura 5. Forma en la que se realizó el corte de disco del lingote en cuatro diferentes ángulos obteniéndose ocho partes.

En cada pieza cortada del lingote se determinó la dureza, a lo largo del diámetro desde el centro del radio hasta su perímetro con el durómetro en la escala de RF, figura 6.



Figura 6. Forma en la que se realizó la toma de lecturas de la dureza a cada parte del disco o muestra del lingote mencionado en la figura 1.

2.1.3 Muestra de lingote y composición química.

Se cortaron con segueta manual a temperatura controlada mediante el aceite refrigerante, cinco muestras de lingote de 2x3x3 cm, las cuales se pulieron hasta lija 400. Luego se colocaron en el alimentador de arco eléctrico del equipo de emisión óptica, previamente calibrado con los estándares de cobre, el cual automáticamente determina vía programación el resultado de las lecturas de P, Cu, Fe, Pb, Al, Zn, Sn, S, Sb, y As. Después de cada lectura se dió limpieza al electrodo.

2.2 Extrusión

La extrusión se realiza en una máquina MANESMAN, tiene un ciclo de extrusión de 1960 mm/min, a una temperatura de extrusión de 950 °C y una presión de 14 MPa. En esta etapa el lingote de cobre se reduce de un diámetro de 30 cm a 5 cm, y se obtiene un tubo conocido como Shell de un espesor de pared de 8 mm.

2.2.1 Temperatura de operación.

Se tomaron las lecturas de temperaturas al inicio y final de la extrusión del lingote, realizando un disparo de 5 segundos con el láser del pirómetro (intervalo de operación de 0°C a 940°C) en las siguientes herramientas de la prensa de extrusión:

- a) Mandril.- Penetra a través del centro del lingote hacia el dado
- b) Portadados.- Porta al dado de extrusión
- c) Interior del contenedor.- superficie de contacto con el lingote.
- d) RAM.- Vástago que empuja al lingote hacia el dado de extrusión.
- e) Remanente.- Es la porción del lingote que no fue extruída.
- f) Exterior del contenedor.- superficie exterior del contenedor.
- g) Agua de enfriamiento.- Agua que circula por dentro del contenedor para mantener una temperatura controlada.
- h) Lingote.- Pieza que es extruída en la prensa.

Se registraron las lecturas de temperatura en los herramientales con la finalidad de conocer el comportamiento de la transferencia de calor del lingote, y saber con precisión la temperatura real en la que se realiza la extrusión del lingote.

2.2.2 Dureza puntual en el tubo Shell.

El tubo Shell se cortó en forma perpendicular al eje longitudinal del mismo en cinco secciones de 5 cm de longitud cada una de éstas, con una segueta manual con lubricante de enfriamiento, luego se pulió el espesor del tubo con una lija 600. Posteriormente se midió la dureza en el centro, exterior e interior del espesor del tubo Shell con penetrador de bola de acero 1/16, como se observa en la figura 7.

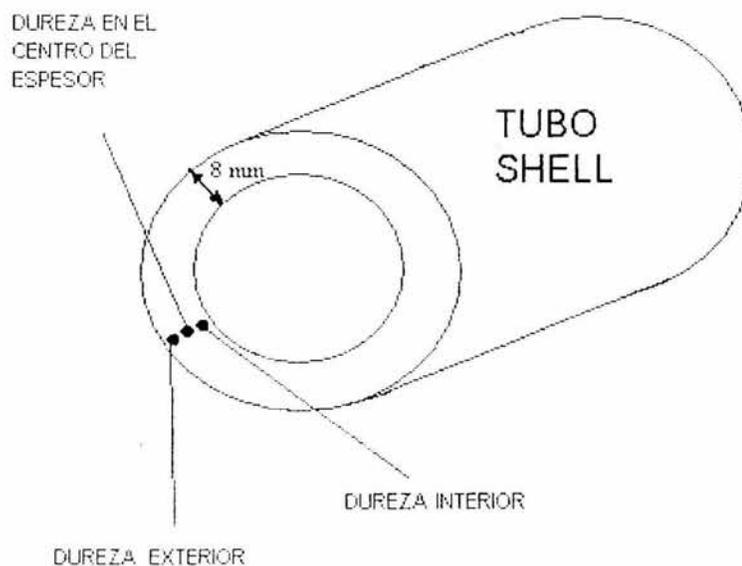


Figura 7. Forma en la que se realizó la toma de lecturas de la dureza en el tubo Shell.

2.2.3 Tamaño de grano del tubo Shell

Se cortó en forma diametral el tubo de Shell como se observa en la figura 7, se desbastó la muestra con lija de un tamaño de grano inicial de 100 hasta 1200, y finalmente un acabado espejo con alúmina. A continuación, se atacó con ácido nítrico concentrado durante 20 segundos para observar los límites de grano. Con el microscopio óptico a 75 aumentos, se obtuvo la micrografía vía programación en:

- A) Parte central
- B) Superficie externa
- C) Superficie interna.

Se calculó el tamaño de grano con la programación del microscopio.

2.2.4 Acabado superficial del dado de extrusión.

Se tomaron muestras aleatorias de dados, utilizados para la extrusión, después de haberse sometido a 3 extrusiones de 45 segundos, a una temperatura de 930 °C, utilizados en la prensa de extrusión, midiéndose su dureza RF en la superficie de contacto.

2.3 Estirado

2.3.1 Tensión máxima en extrusión y estirado.

El tubo Shell se cortó en forma longitudinal de una longitud de 40 cm, 4 partes del mismo, ver figura 8.

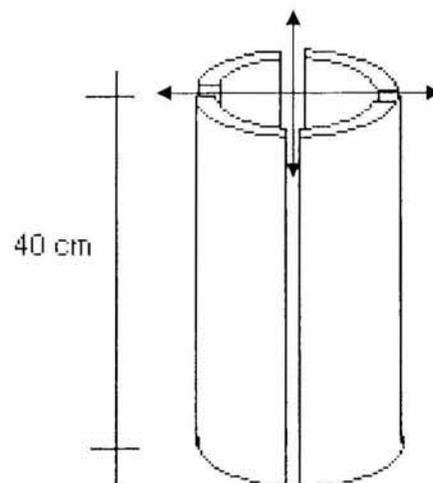


Figura 8. Cuatro partes del tubo Shell de 40 cm de longitud para someterse a la prueba de tensión.

En las etapas de estirado se cortaron muestras de tubo de cobre de tramos de 40 cm, sin realizar cortes seccionados del tubo. Se midió el espesor de pared del tubo Shell y los tubos de la etapa de estirado. Se colocaron en la máquina de tensión marca OHAUS (de rango de carga es de 0 a 41 MPa). Luego se aplicó carga hasta que se determinó la resistencia máxima del material.

2.3.2 Dureza en extrusión y estirado

Se cortó una muestra de tubo Shell en el cual se hizo el proceso de estirado desde la primera hasta la cuarta etapa, mostrándose sus dimensiones con la tabla 1.

Tabla 1. Diámetro y espesor del tubo en extrusión y etapas de estirado.

Etapa	Diámetro	Espesor
Extrusión tubo Shell	50 cm	8 mm
Primera de estirado	34 cm	5 mm
Segunda de estirado	28 cm	2 mm
Tercera de estirado	22 cm	1.5 mm
Cuarta de estirado	8 cm	1 mm

Luego, se pulió la superficie del espesor del diámetro. Se cortó la muestra en dos partes iguales, como se muestra en la figura 9.

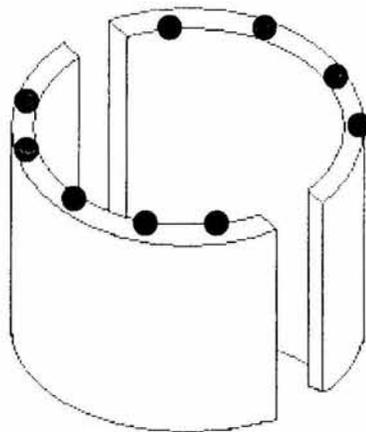


Figura 9. Ubicación en la que se realizó la toma de lecturas de a dureza en el tubo Shell.

Se procedió a medir la dureza RF en el centro del espesor del tubo Shell con el penetrador de bola de acero de 1/16. Para los tubos estirados se midieron 5 puntos de la superficie externa y 5 puntos de la superficie interna por etapa de estirado, figura 10.

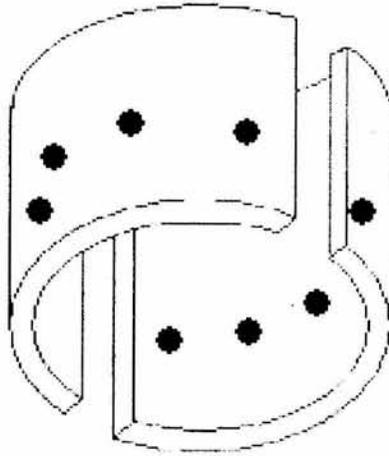


Figura 10. Ubicación en la que se realizó la toma de lecturas de la dureza en el tubo estirado.

2.3.3 Dureza puntual en el tubo defectuoso.

Se seleccionó una porción del tubo estirado de 34 mm de diámetro, donde se presenta el defecto superficial. Se cortaron 4 partes iguales de 5 cm de longitud, cortando cada porción a la mitad del diámetro, se procedió a determinar la dureza en la superficie por debajo de la lámina desprendida (retirando previamente dicha lámina) con el micrómetro se determinó el espesor de la escama desprendida.

2.3.4 Fósforo en el tubo defectuoso.

Se determinó el contenido de fósforo de dos maneras; vía colorimetría y en el equipo de emisión óptica en una muestra con defecto superficial.

Método colorimétrico:

Se cortaron 5 muestras de tubo defectuoso en forma transversal de 7 cm x 0.5 cm. Se alimentó el equipo de electrólisis automáticamente con cada una de las muestras y después de 8 minutos el equipo electrolítico realizó el análisis del contenido de fósforo.

Método de emisión óptica:

Se cortaron 5 muestras de tubo defectuoso en forma diametral, y cada una se cortó en dos tramos transversales, se pulió la superficie con lija grano 400, se colocaron en el equipo de emisión óptica, y éste determinó la composición de % de fósforo.

2.3.5 Óxido cuproso en el tubo defectuoso

Se pulió el tubo Shell en el espesor a acabado tipo espejo, se atacó con hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno relación 1:1, con estos reactivos se visualiza selectivamente el óxido de cobre durante 40 segundos, se observó en el microscopio a 75 aumentos. La aparición de puntos negros indica la presencia de óxido cuproso, tomándose fotografías vía programación.

2.3.6 Difracción de Rayos X en el tubo defectuoso.

Se seleccionaron 4 muestras representativas del defecto superficial en el tubo de estirado final, cortando la sección que contiene el defecto en cada una y se analizaron las muestras en un difractómetro marca Siemens con una variación de ángulo de difracción de 0 a 120 grados.

2.3.7 Determinación de la temperatura en la etapa de estirado.

Se midió con un cronómetro el tiempo de arranque del proceso de alimentación del tubo en la máquina de estirado en la reducción del diámetro de 34 mm a 28 mm, luego se determinó la temperatura a la salida de la máquina de estirado del rollo de tubo mediante el contacto con el termómetro luego de haber transcurrido 3 minutos al finalizar todo el estirado del rollo, se tomaron lecturas de la temperatura. Se realizaron varias mediciones hasta que el rollo entró de nuevo a la máquina para la siguiente etapa de estirado.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 Fundición

3.1.1 Composición química del lingote

Mediante el equipo de emisión óptica se determinó la composición química del lingote obteniendo, ver tabla II.

Tabla II. Composición química del lingote.

Elemento	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Promedio
P	0.0284	0.0250	>0.0615	0.0313	0.0236	0.03396
Cu	99.97	99.97	99.93	99.96	99.97	99.96
Fe	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0021	0.0013	0.00098
Pb	0.00015	0.0013	0.0010	0.0034	0.0006	0.00129
Al	0.0009	0.0007	<0.0025	0.0025	0.0009	0.0015
Zn	0.0028	<0.0025	<0.0025	0.0025	0.0028	0.00262
Sn	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
S	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Sb	0.0007	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.00054
As	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

3.1.2 Tamaño del grano

Se realizó un corte transversal al lingote de cobre C-12200, luego se fue atacado con el ácido nítrico concentrado sobre toda la superficie para observar el tamaño de grano, figura 11 y con mayor detalle ver la figura 12. Se observa un tamaño de grano heterogéneo donde la parte A presenta mayores granos columnares en comparación con la parte B, figura 13. Se aprecia a mayor detalle la parte A y B en la figura 14, y 15 respectivamente.

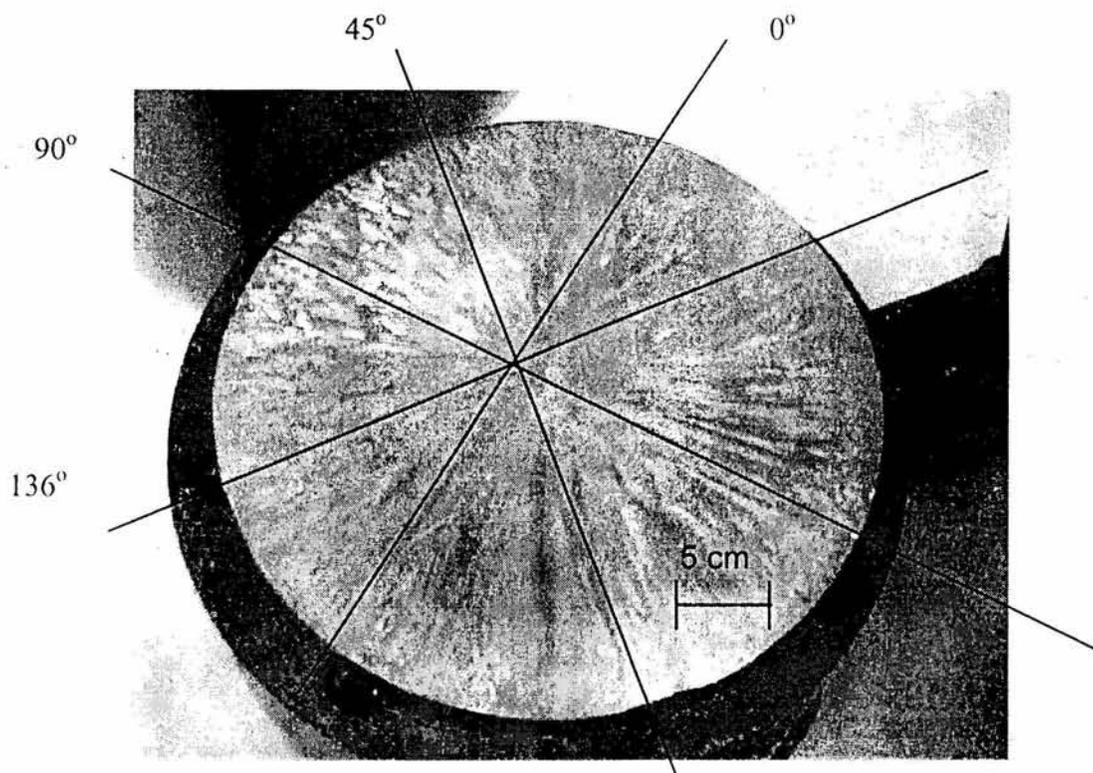


Figura 11. Foto macrografía de corte transversal del lingote atacado con ácido nítrico concentrado, aquí se observa el tamaño de grano de comportamiento radial.

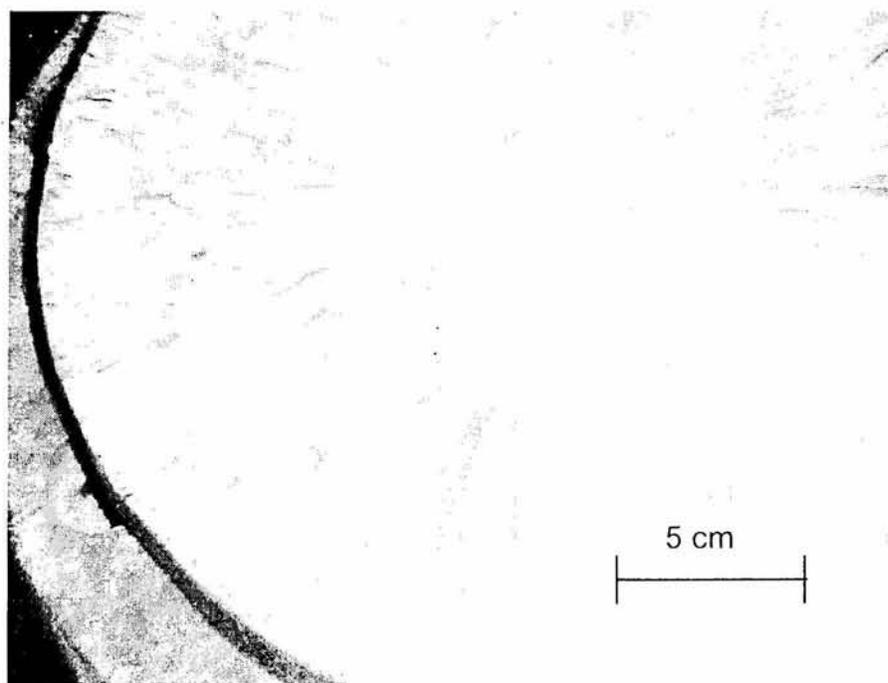


Figura 12. Foto macrografía de sección transversal del lingote atacado con ácido nítrico concentrado, observe la diferencia en el tamaño de grano del centro del lingote con relación a la superficie.

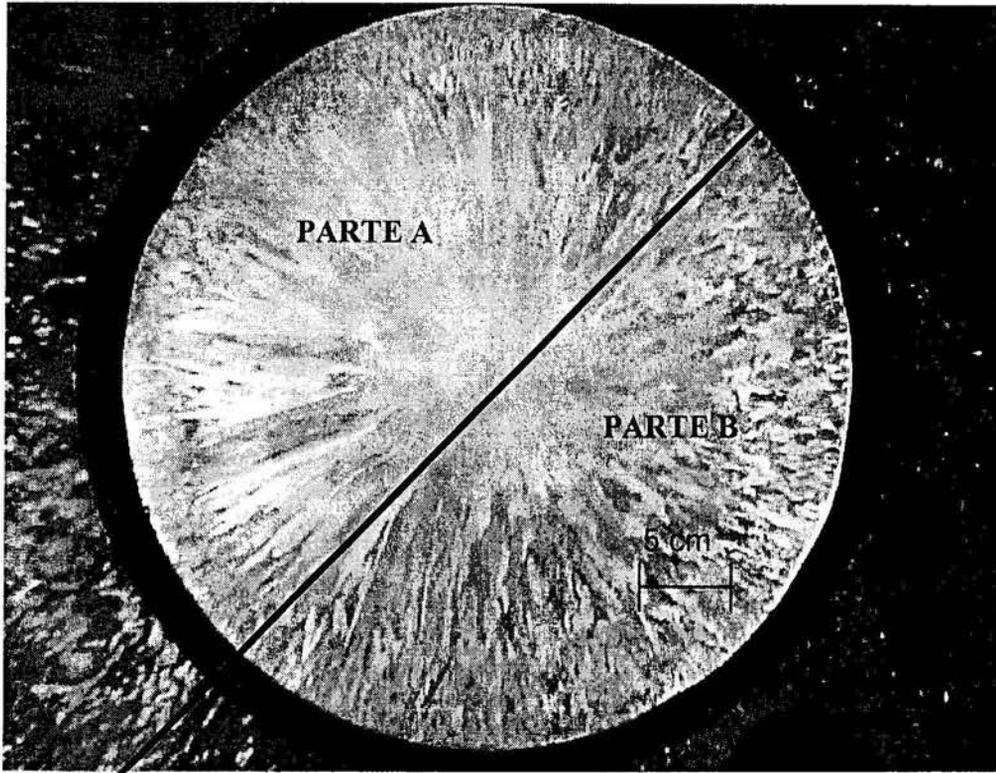


Figura 13. Foto macrografía del tamaño de grano heterogéneo con grano alargado en el centro (ataque con ácido nítrico concentrado), donde en la parte A presenta mayores granos columnares en comparación con la sección B.

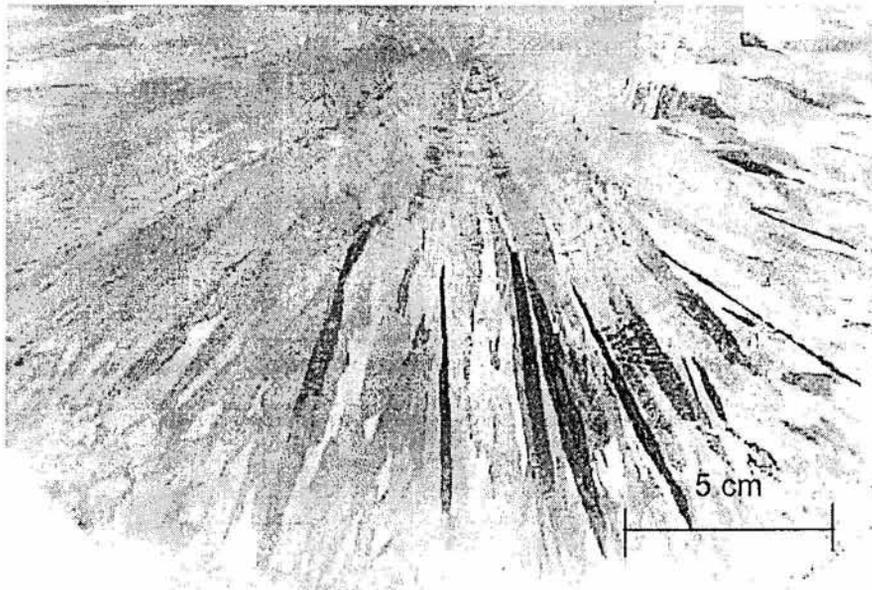


Figura 14. Foto macrografía de la parte A de la sección del lingote transversal (ataque con ácido nítrico concentrado) donde se observan granos columnares y equiaxiados.

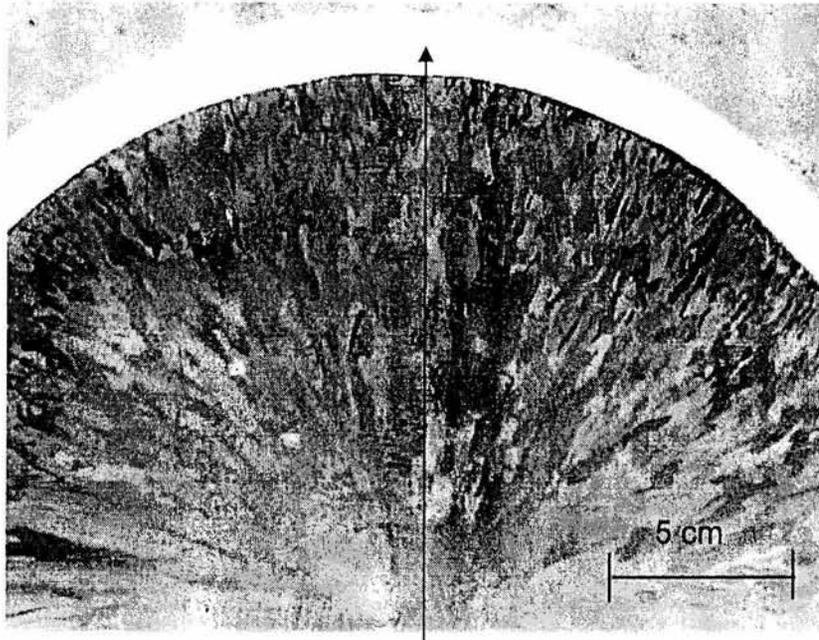


Figura 15. Foto macrografía de la parte B de la sección del lingote transversal (ataque con ácido nítrico concentrado) donde se observan los granos columnares, ver en la figura 14.

3.1.3 Dureza del lingote.

Al determinar la dureza RF sobre toda la superficie transversal del lingote, se observa que el comportamiento en las diferentes secciones o ángulos de mismo es heterogénea, presentado una mayor dureza en el extremo con respecto al centro, en algunos puntos de la parte de media del lingote la dureza RF es menor que en centro, figura 16.

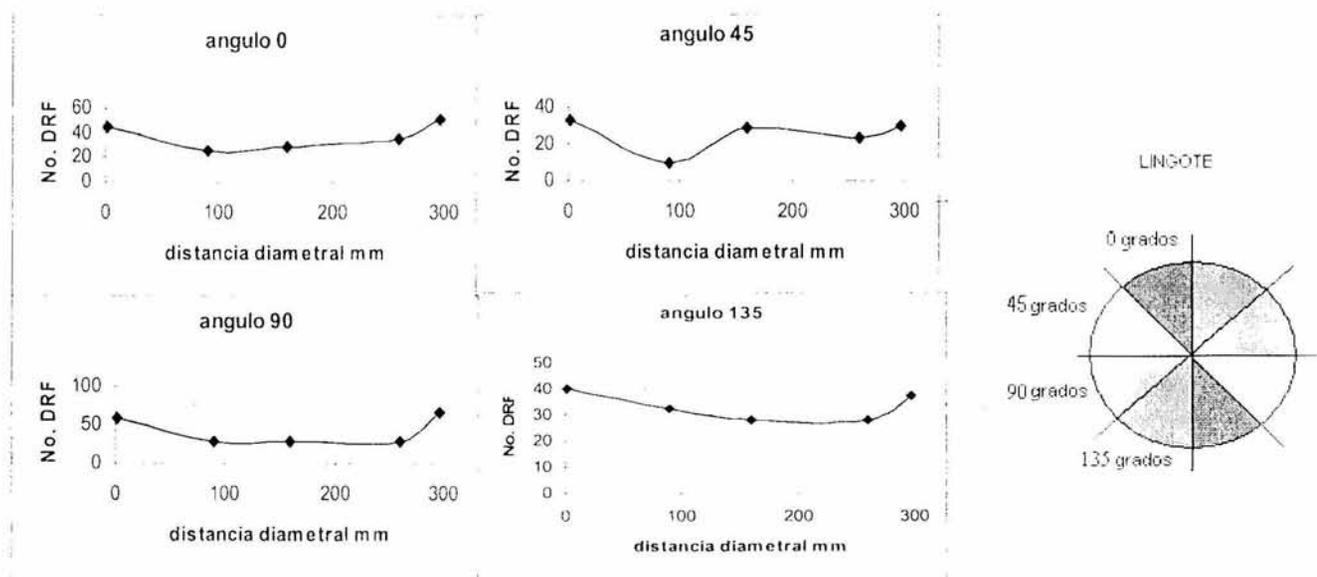


Figura 16. Comportamiento de la dureza del lingote en diferentes ángulos, la dureza se incrementa hacia la periferia del lingote en relación con el centro del mismo.

3.2 Extrusión

3.2.1 Temperatura de operación.

La temperatura de extrusión del lingote es de 930°C. Un estudio del comportamiento de la temperatura en la prensa de extrusión antes de introducir el lingote y después a la salida del mismo se observa en la tabla III.

Tabla III. Comportamiento de las secciones de la prensa de extrusión.

MANDRIL °C		PORTADADOS °C		CONTENEDOR °C		RAM °C		REMANENTE °C
entrada	salida	entrada	Salida	entrada	salida	entrada	salida	salida
66	143	263	299	380	382	150	193.2	152
92	150	216	358	356	393	197	184.2	221
123		281	382	368	421		187	241
79.9			342	348	399		175	300
			470	398	424			239
			453	480				295
			461					308
90.2	146.5	253.3	395	388.3	403.8	173.5	184.8	250.8

3.2.2 Dureza y esfuerzo de tensión del tubo Shell.

Después de realizarse la extrusión del lingote se obtiene el tubo de cobre conocido como Shell, con un diámetro de 50 mm y un espesor de 4 mm.

La medición de la dureza en el centro del espesor del tubo y en la superficie interior y exterior del mismo tubo se muestra en la figura 17.

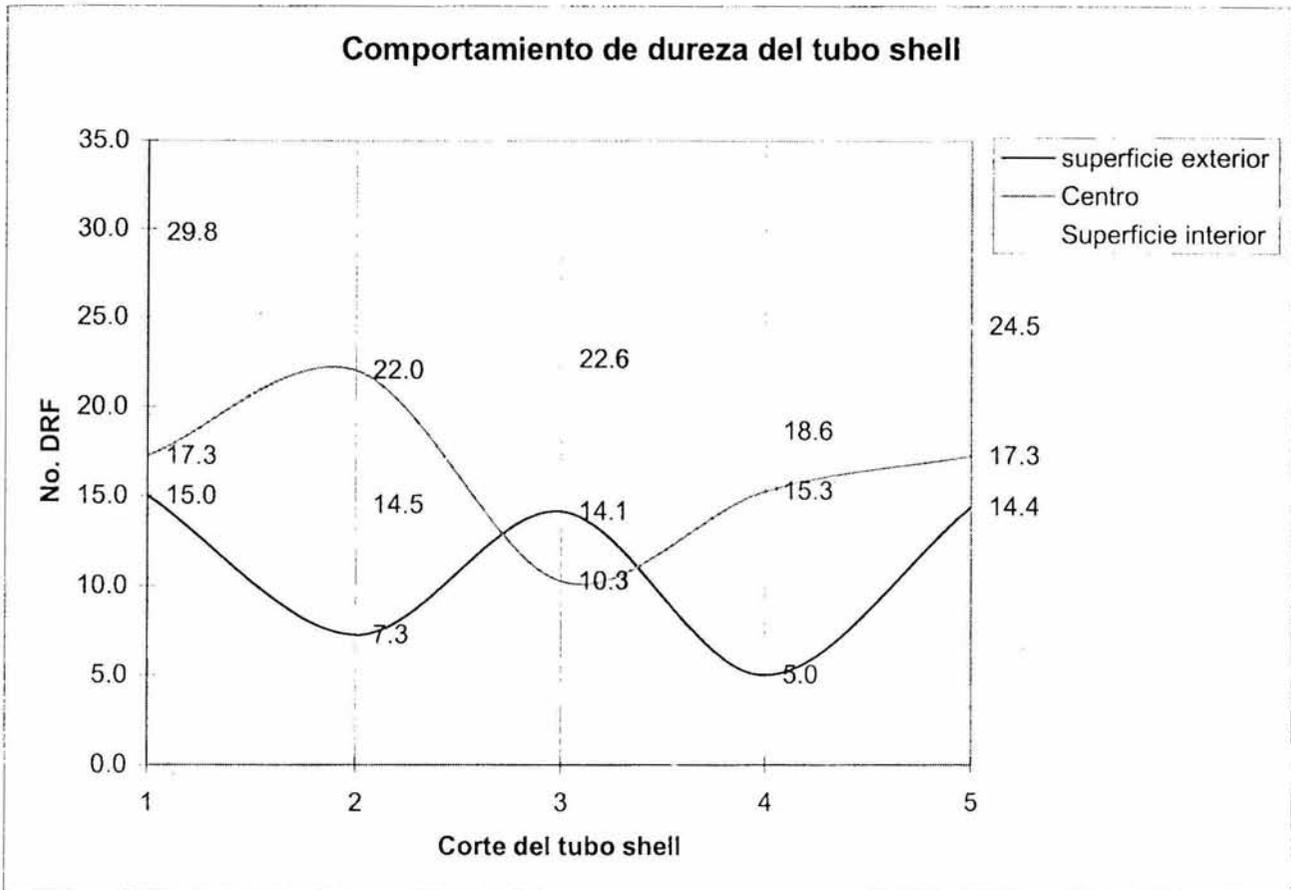


Figura 17. Comportamiento de la dureza en el tubo Shell, donde la dureza en la superficie interior del tubo presenta una dureza mayor que en el centro y la dureza en la superficie exterior menor con relación en el centro.

El promedio de la dureza por corte se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. Dureza promedio por corte.

Superficie	No. DRF				
	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4	Corte 5
Promedio	20.7	14.6	15.7	13.0	18.7

Y la dureza promedio por sección se muestra en la tabla V.

Tabla V. Dureza promedio por sección del tubo Shell.

Superficie:	Exterior	Centro	Interior
No. DRF:	11	16	24

3.2.3 Tamaño de grano del tubo Shell.

El tamaño de grano a través del espesor del tubo Shell nos muestra la inhomogeneidad de las propiedades mecánicas. Las fotografías presentadas en las figuras 18, 19 y 20 muestran el tamaño de grano al extremo interior, centro y exterior:



75x

Figura 18. Extremo interno de la pared del tubo Shell a 75 aumentos, atacado con ácido nítrico concentrado, con un promedio de área de grano de 0.006891 mm^2 .

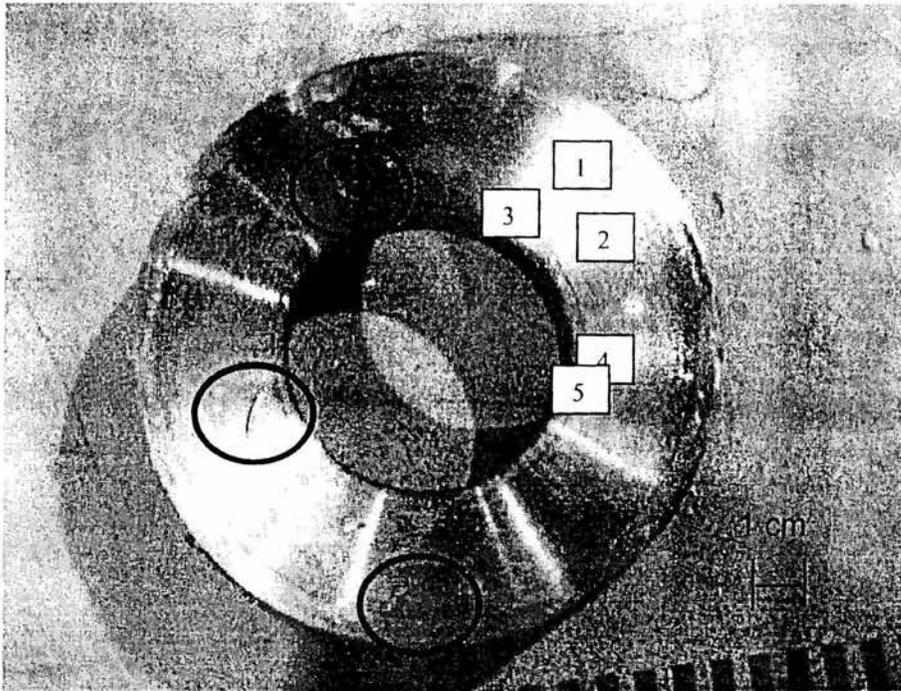


Figura 21. Acabado del dado, después de haber sido extruido el lingote durante 45 segundos. Obsérvese el desgaste del dado sobre la superficie de contacto con el lingote. Se señala la ubicación de los puntos donde se tomaron las mediciones de dureza.



Figura 22. Detalle del desprendimiento del dado de acero, luego de haberse usado para extruir un lingote de cobre durante 45 segundos a 920 °C.

3.3 Estirado

3.3.1 Resistencia a la tensión en extrusión y estirado

Se observa que cuando se reduce de un diámetro de 34 mm a 28 mm el incremento en la resistencia máxima del material es de 156 MPa, esto indica un gran incremento de dicha propiedad.

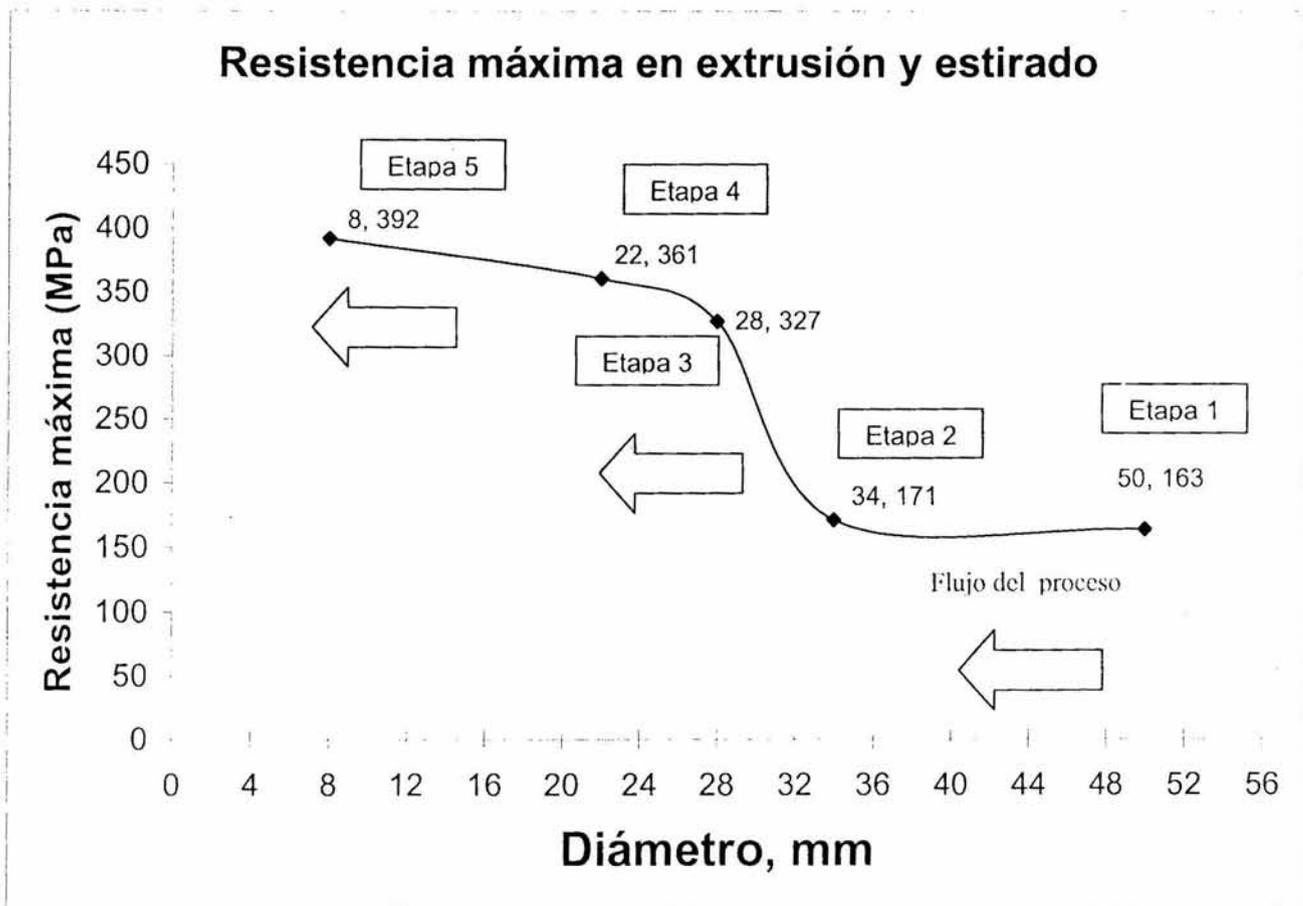


Figura 23. Variación de la resistencia desde el tubo extruido de la prensa hasta las etapas de estirado.

3.3.2 Dureza en extrusión y estirado.

En la tabla VII se presentan los resultados de la dureza en el lingote, en el tubo Shell y en el tubo estirado.

Tabla VII. Resultados de dureza en el lingote y el tubo Shell extruido.

Proceso	Localización	No. dureza
Fundición del cobre para obtener el lingote.	Centro del lingote	60 RF
	Periferia del lingote	11 RB
Tubo Shell obtenido por extrusión del lingote.	Diámetro exterior del tubo Shell	64 RF
	Diámetro interior del tubo Shell	81 RF

En la figura 24 se muestra el comportamiento de la dureza en las diferentes etapas del estirado.

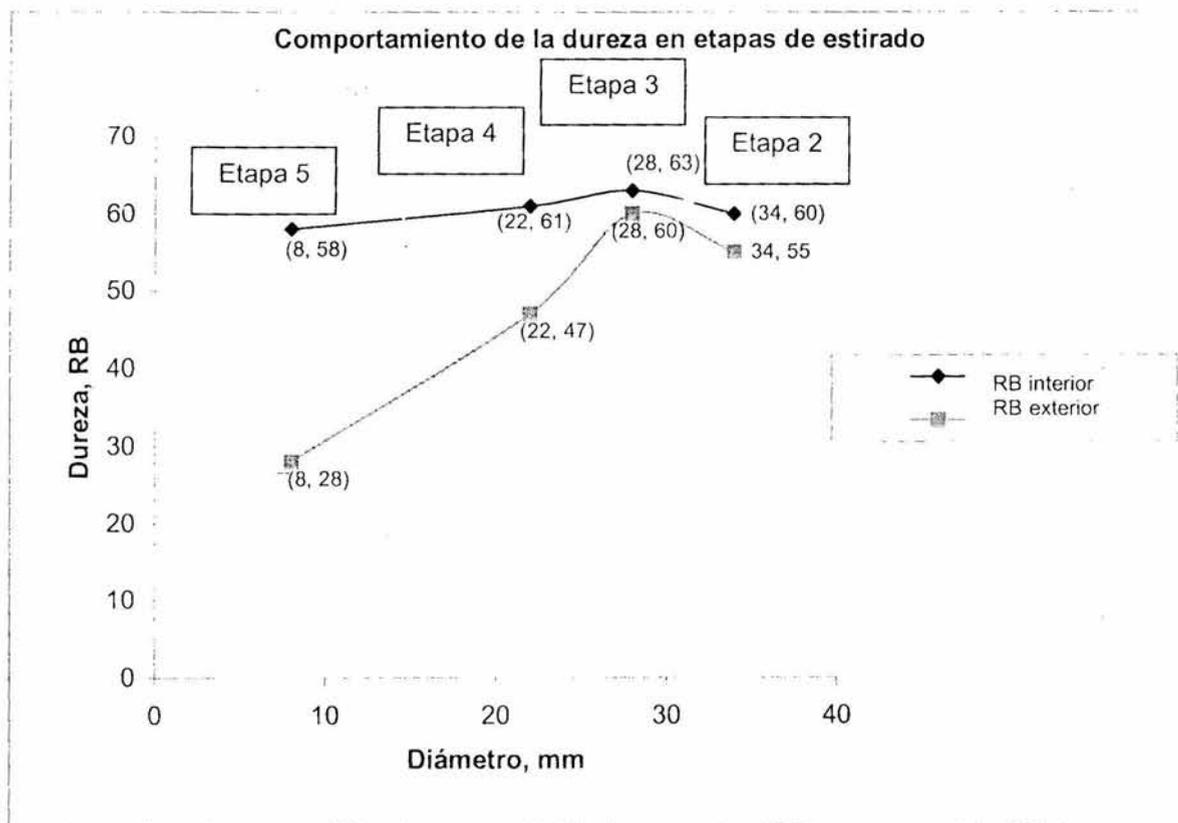


Figura 24. Comportamiento de la dureza en las etapas de estirado.

3.3.3 Dureza puntual en el tubo defectuoso.

El tubo de cobre estirado de 34 mm a 28 mm de diámetro presentó el defecto superficial de "escama" (en la etapa 3, indicado en la figura 23) en el cual se observa una dureza debajo de la lámina o "escama" desprendida de 69 RB, el espesor de la lámina desprendida es de 0.085 mm. La dureza en la superficie interior del tubo es de 64.3 RB, la dureza en la superficie exterior del tubo de 57.5 RB, dureza cerca de la escama de 57.7 RB, esto se puede esquematizar en la figura 26 y tabla VIII.

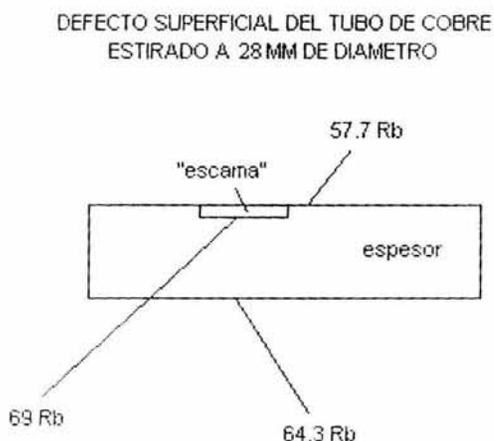


Figura 26. Croquis de la ubicación de las durezas en la "escama" y sus alrededores en el tubo de cobre estirado de 34 mm a 28 mm de diámetro.

Tabla VIII. Resultado de la dureza en el tubo de cobre estirado de 34 mm a 28 mm de diámetro.

Ubicación	Dureza RB
Cáscara de la escama	57.7
Por debajo de la escama	69.0
En la superficie interior	64.3
En la superficie exterior	57.5

3.3.4 Fósforo en el tubo defectuoso.

El estudio en el tubo defectuoso mediante electrólisis resulta de 0.03045% en peso, y en emisión óptica 0.031% en peso.

3.3.5 Impurezas en el tubo defectuoso.

Se realizó el análisis del tubo defectuoso vía emisión óptica obteniéndose los resultados mostrados en la tabla IX.

Tabla IX. Se observa que el contenido en fósforo esta dentro de la especificación del cobre C-12200 de 0.015 a 0.040 % en peso, y con impurezas permisibles de S, Zn y Al.

Elemento	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
P	0.0283	0.0252	0.015	0.0228
Cu	99.97	99.97	99.96	99.9667
Fe	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
Pb	0.00014	0.00014	0.00015	0.0001
Al	0.0009	0.0009	0.0007	0.0008
Zn	0.0022	0.0028	0.0025	0.0025
Sn	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
S	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049
Sb	0.0007	0.0003	0.0006	0.0005
As	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004

3.3.6 Detección de óxido cuproso.

Para detectar la presencia de óxido de cuproso en el cobre defectuoso se atacó la superficie con hidróxido de amonio concentrado y peróxido de hidrógeno, ver figura 27 y 28 donde se observan trazas de óxido.

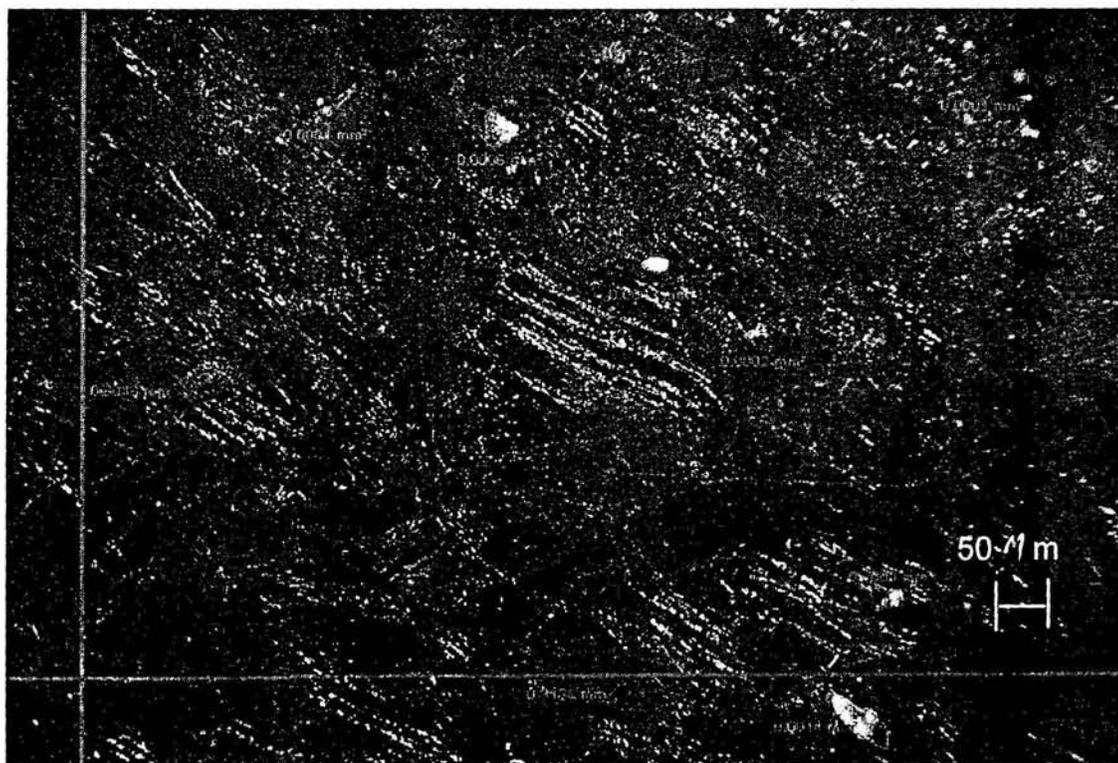
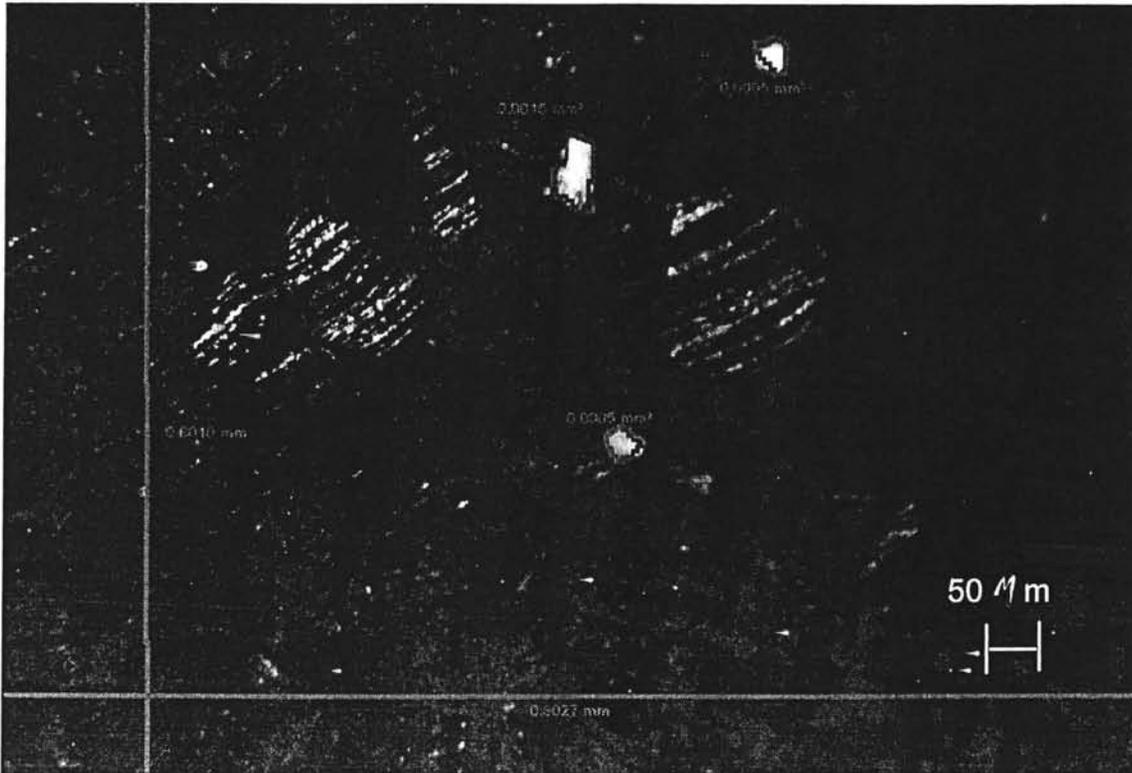


Fig. 27

Fig. 28



Figuras 27 y 28. Corte del espesor del tubo Shell atacado con hidróxido de amonio concentrado y peróxido de hidrógeno relación 1:1, a 75 aumentos.

El porcentaje de óxido cuproso de acuerdo al área transversal (espesor) del tubo es de 0.491% en área. El óxido de cobre afecta al tubo en las propiedades mecánicas resultando fragilidad en el momento de ejercer presión radial a las paredes del tubo, manifestándose como fuga. Para este porcentaje, se considera que el óxido de cobre como impureza que no afecta a las propiedades del cobre.

3.3.7 Determinación de las fases de cobre en el tubo defectuoso.

Los difractogramas muestran que los seis picos de difracción corresponden a las fases del cobre puro, esto quiere decir que no hay presencia de compuestos de cobre en la zona donde se presenta la "escama", descartando la posibilidad que dicho defecto sea atribuible a la presencia de contaminantes. En las figuras 29, 30, 31 y 32 se muestran los difractogramas.

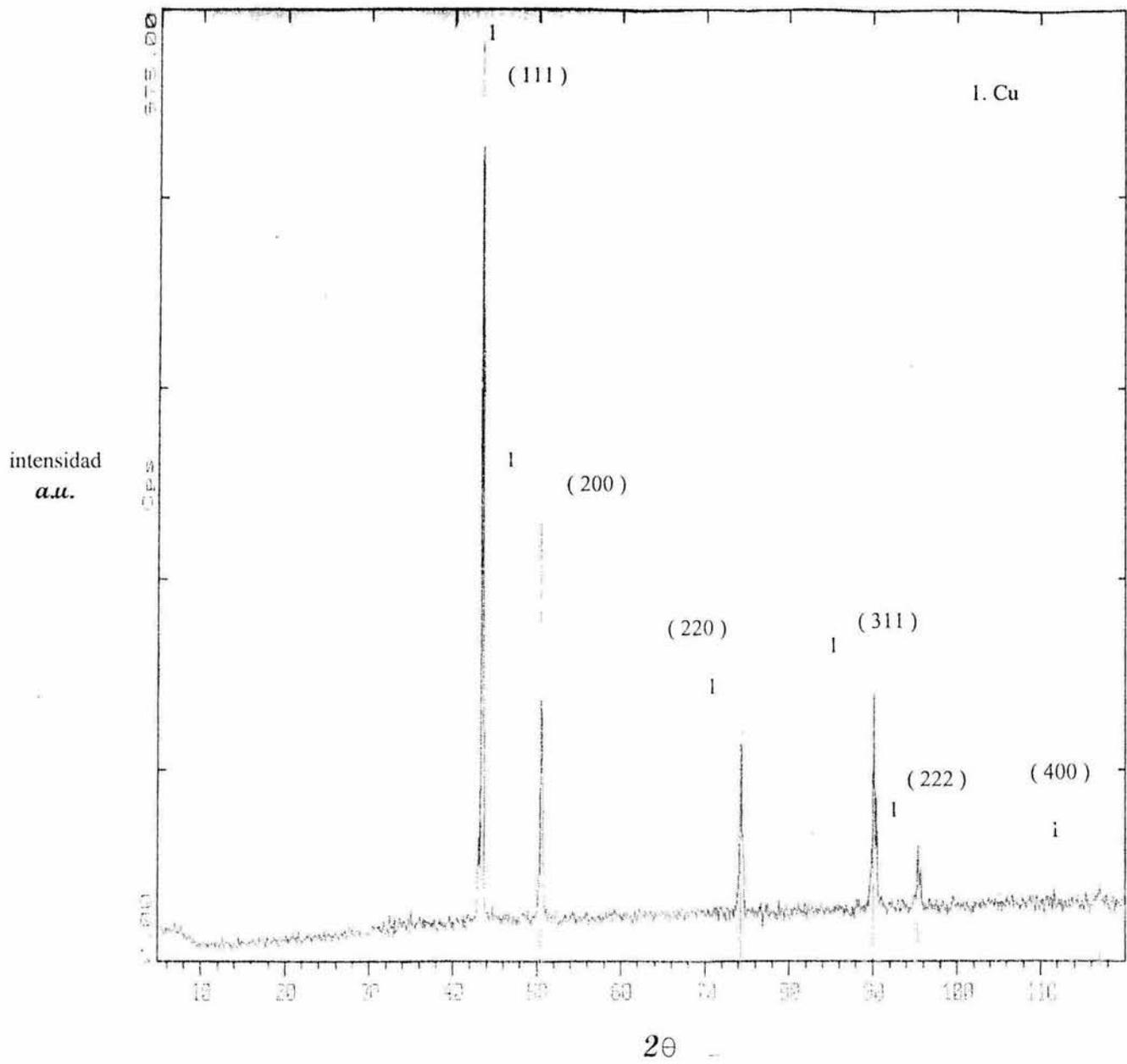


Figura 29. Difracción de Rayos-x para el tubo de cobre defectuoso, muestra no. 1.

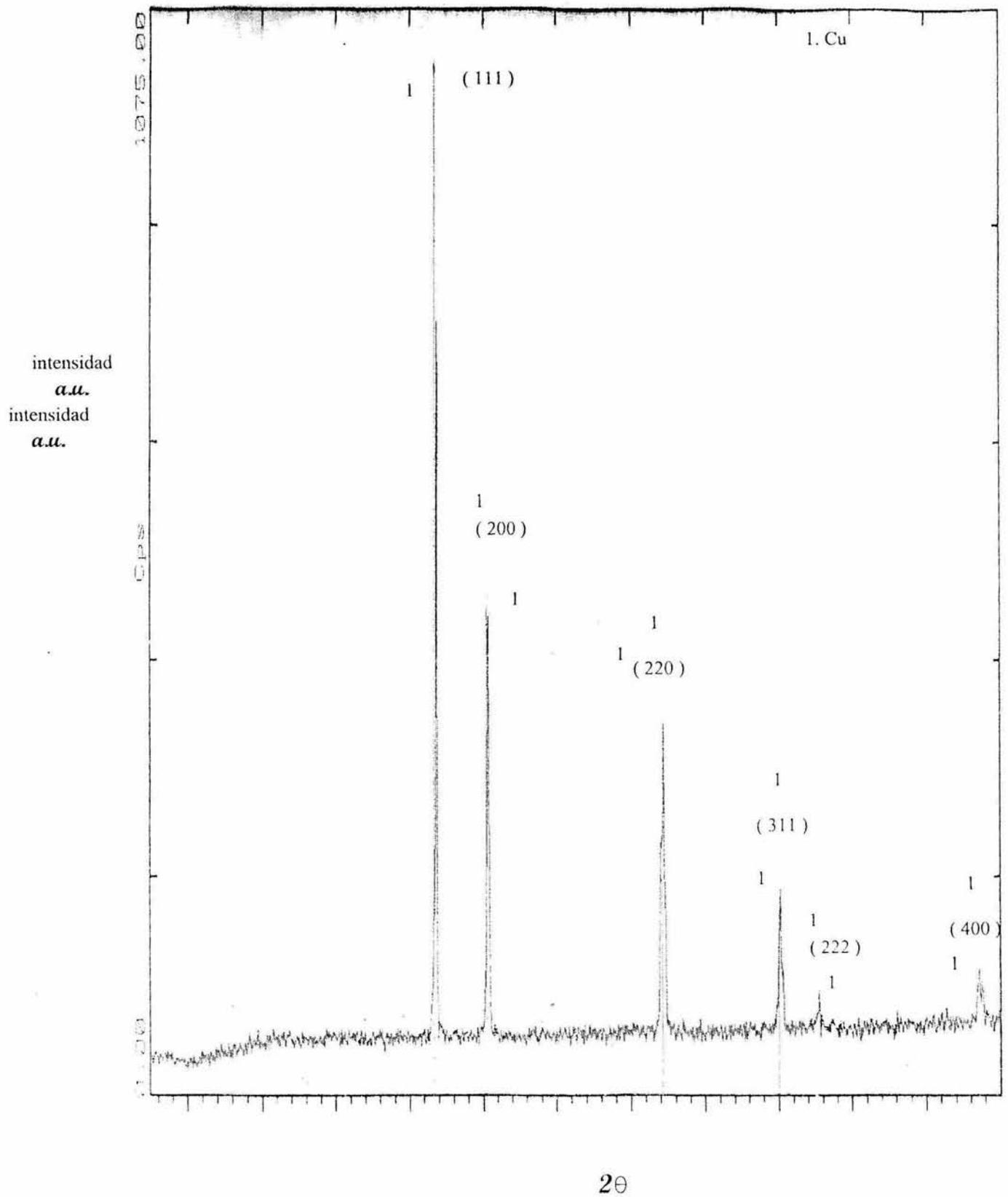


Figura 30. Difracción de Rayos-x para el tubo de cobre defectuoso, muestra no. 2.

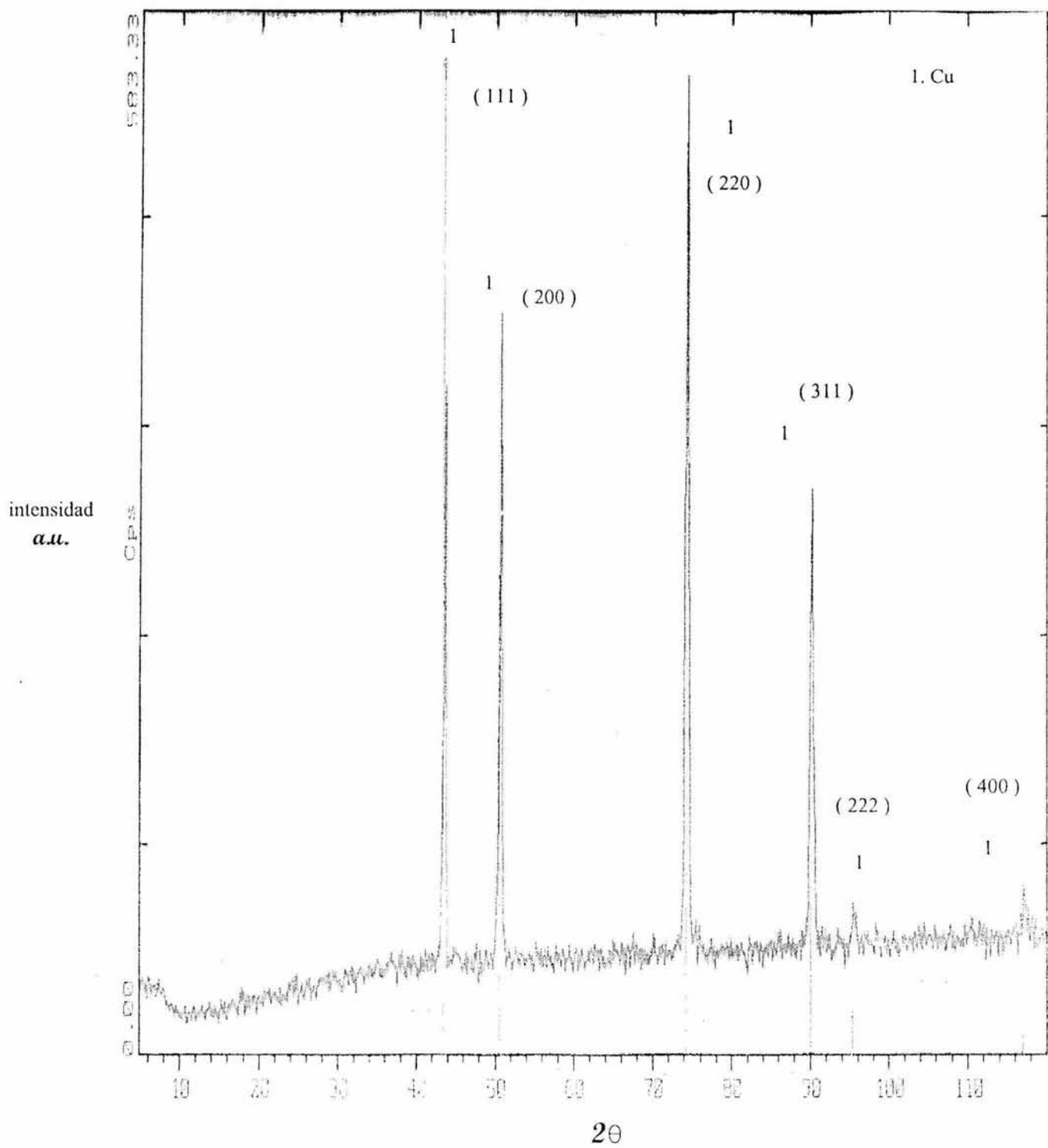


Figura 31. Difracción de Rayos-x para el tubo de cobre defectuoso, muestra no. 3.

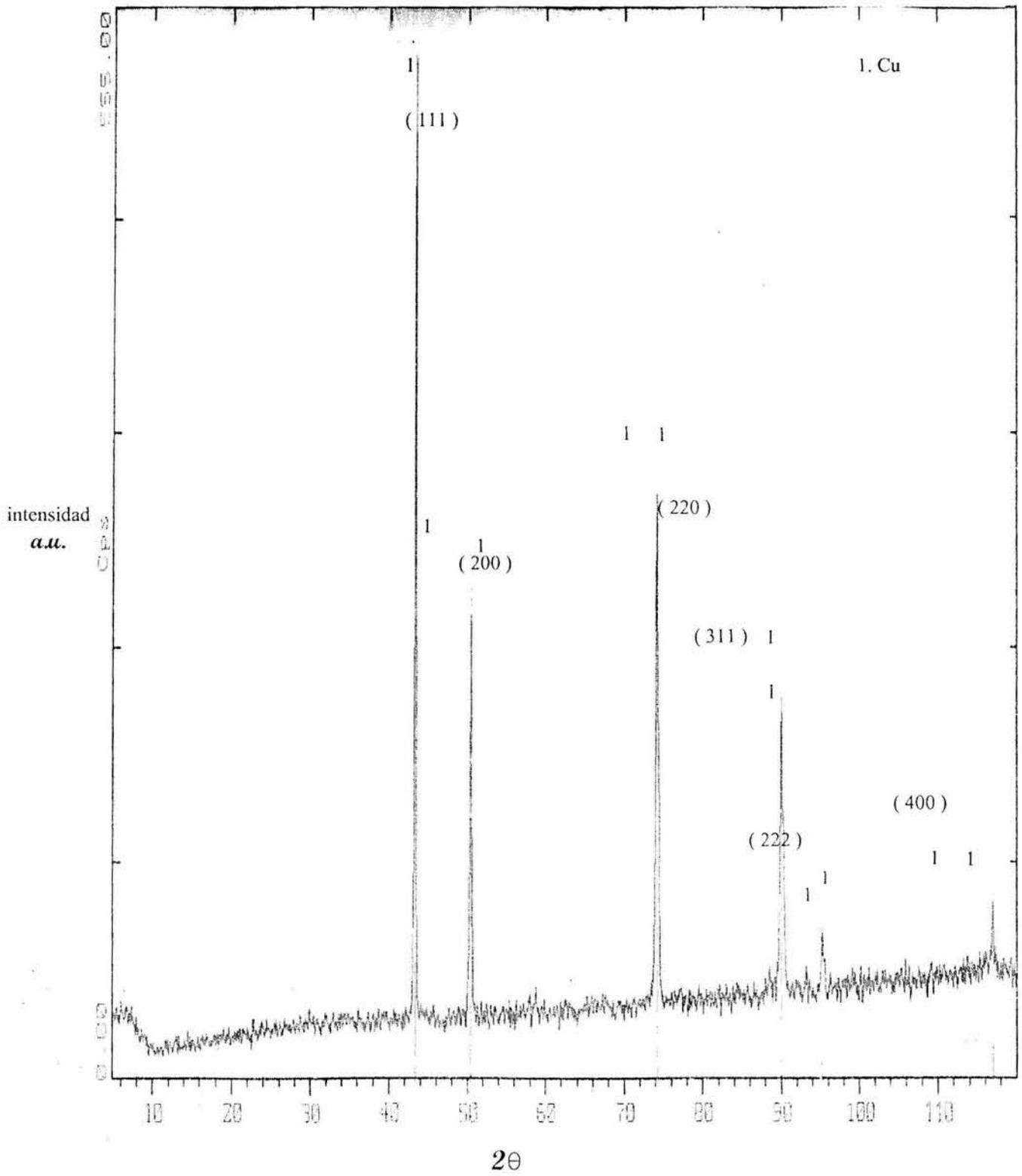


Figura 32. Difracción de Rayos-x para el tubo de cobre defectuoso, muestra no. 4.

3.3.8 Determinación de la temperatura en estirado.

El comportamiento de la temperatura en el estirado, se observa en la figura 33.

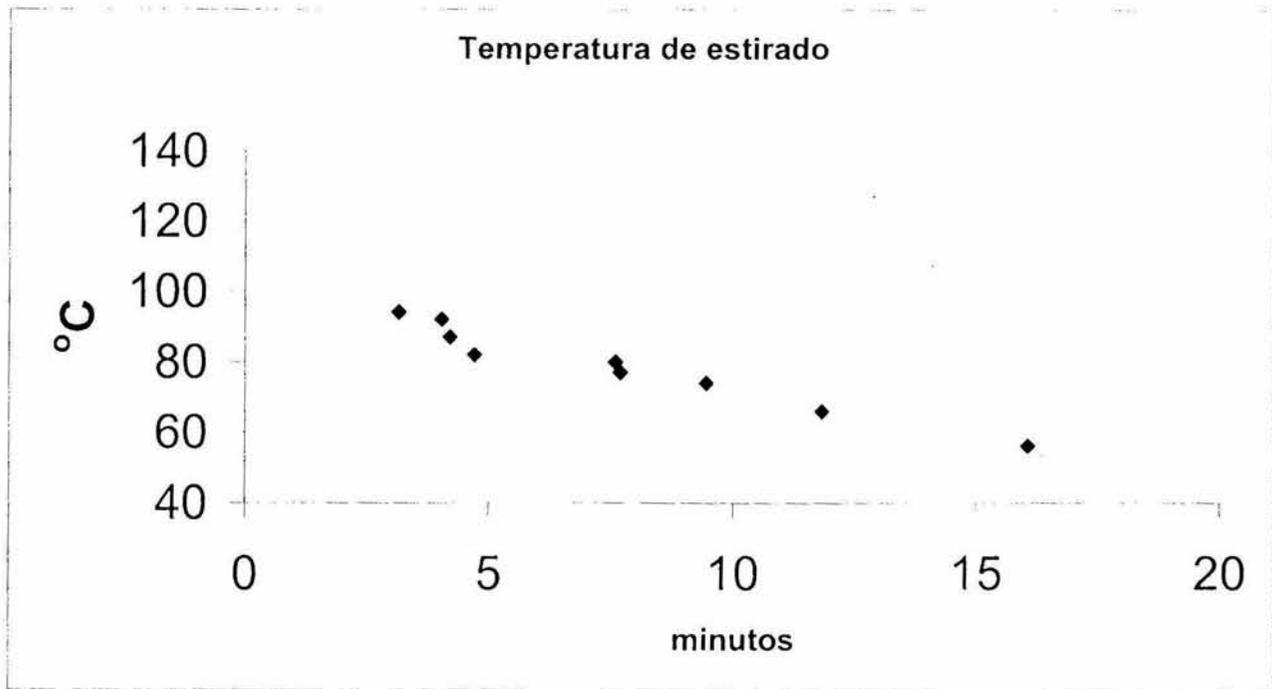


Figura 33. Comportamiento de la temperatura exterior del tubo, luego de haberse estirado de 34 mm a 28 mm de diámetro, donde extrapolando hacia cero minutos (es decir, en el momento del contacto del tubo con el dado de estirado) se deduce una temperatura por arriba de 100 °C.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fundición.

4.1.1 Composición química del lingote

De acuerdo con la norma ASTM B 743 –95^[1], el contenido de fósforo esta dentro de la especificación que es de 0.015 a 0.04 %, por lo tanto se descarta la posibilidad de que el fósforo pudiera generar fragilidad al cobre, los demás elementos son trazas permisibles en el cobre que también quedan descartadas de poder generar el defecto superficial.

4.1.2 Tamaño de grano y dureza del lingote.

El lingote en condiciones ideales debería de presentar un tamaño de grano homogéneo desde la periferia hasta el centro del mismo, sin embargo en este estudio el lingote está alejado de esta condición, como se puede observar de la figura 13 del apartado 3.1.2 del capítulo III.

Se observa en la parte A del lingote un mayor crecimiento columnar del grano, debido a una baja transferencia en el sistema de enfriamiento, comparado con la parte B del mismo lingote. Es importante que el tamaño de grano del lingote sea homogéneo, ya que de no ser así, pueden generarse en el momento de la extrusión esfuerzos residuales, lo cual generaría defectos superficiales en las etapas de estirado.

La dureza es homogénea en el centro del lingote, pero hacia el exterior del lingote la dureza se incrementa drásticamente y observándose que en el intermedio entre el centro del lingote y el exterior, la dureza es menor que en el mismo centro, esto quiere decir que los granos columnares que se observan en las figuras 14 y 15 son de menor dureza ya que el tiempo de enfriamiento fue lento, por lo cual hubo un crecimiento del grano y eliminación de esfuerzos internos lo cual no sucede con la parte exterior del mismo lingote.

4.2 Extrusión.

4.2.1 Temperaturas de operación.

La temperatura de diseño^[2] para lograr una extrusión adecuada es de 700°C a 1140°C y una temperatura de precalentamiento de las secciones de extrusión de 420 °C a 530°C.

El portadados es previamente calentado antes de introducirlo a la prensa de extrusión, con una temperatura de 253 °C, la cual está por debajo de la recomendada por diseño (420°C).

Esto indica que en el momento de la extrusión, el contacto del lingote con el portadados, puede originar que la superficie externa del lingote se enfríe más con respecto al núcleo, y también que se generen más esfuerzos en la superficie debido al contacto con la pared del portadados y el contenedor, conforme la extrusión continua, la cubierta exterior del lingote comienza a fallar en forma de acordeón^[6].

Se recomienda que la temperatura de extrusión no sea demasiado elevada, ya que puede causar un rango amplio de dureza^[8]. En este estudio la temperatura de extrusión es de 920°C, la cual no es óptima ya que el dado a esa temperatura sufre un recocido originando desprendimiento del acero, por lo que hay una gran probabilidad de que se presente un defecto superficial.

4.2.2 Dureza y esfuerzo de tensión del tubo Shell.

De los resultados se deduce que hay una inhomogeneidad en la dureza, presentándose menor dureza en la superficie del tubo, con respecto a la superficie interior debido a la diferencia en los esfuerzos originados en la fundición y extrusión

Esta diferencia de dureza se le conoce como inhomogeneidad de dureza^[8], esto puede dar lugar al inicio del defecto superficial “escama” objeto de estudio en este trabajo.

4.2.3 Tamaño de grano del tubo Shell.

Es claro que en el centro del espesor del tubo Shell el tamaño de grano es más grande que en los extremos, debido a la inhomogeneidad en los esfuerzos presentada desde la fundición del lingote, ya que la velocidad de enfriamiento y la cortina de agua en el proceso de solidificación no es homogénea.

4.2.4 Acabado superficial del dado de extrusión.

La dureza del dado de extrusión es fundamental para vida útil del mismo y para la calidad del acabado superficial del tubo Shell, la dureza de diseño es de 36 a 45 RC con un tipo de acero H21, H23 o H36^[2], con alto contenido de tungsteno (arriba del 8.5 %).

En este estudio la dureza del dado es de 19 RC y el tipo de acero para el dado es de H12 con un bajo contenido de tungsteno (1.70 % máximo) que solo soporta hasta 3 extrusiones el equivalente a 45 segundos a una temperatura de 920 °C, esto origina que el dado de extrusión se dañe.

Es necesario que se realice un rediseño al dado de extrusión para obtener un acabado superficial liso y uniforme, además de que hay que bajar la temperatura de extrusión de la prensa para incrementar a la vida útil del dado, aunque esto implicaría mayor consumo de energía en la prensa y una disminución en la velocidad de extrusión que impactaría en la eficiencia del proceso.

4.3 Estirado.

4.3.1 Resistencia máxima en extrusión y estirado

Teóricamente la resistencia mínima en estirado final es de 250 MPa^[18], la resistencia del tubo de cobre se va incrementando conforme se va reduciendo su diámetro y espesor, esto genera que el tamaño de grano se alargue conforme se va estirando el tubo, y en forma proporcional los esfuerzos internos, se muestra en la tabla X que la resistencia máxima en las etapas finales de estirado están dentro del requerimiento mínimo de 250 MPa.

Tabla X. Comportamiento de la resistencia máxima en extrusión y estirado, en referencia al requerimiento ASTM mínimo.

Etapa	Diámetro (mm)	Resistencia máxima (MPa)
Extrusión	50	163
Estirado	34	171
	28	327
	22	361
	8	392
	250 MPa mínimo [ASTM-B280]	

4.3.2 Dureza en extrusión y estirado.

El cobre sujeto a la deformación del lingote y del tubo por extrusión se comporta de la siguiente forma:

Figura 24, y tabla VII. Se puede observar que es amplia la diferencia de la dureza entre el lingote entre el centro y la periferia del mismo. Luego de ser extruido el lingote la dureza del tubo Shell resulta con la diferencia de 17 RB, Al continuar la etapa de estirado la dureza sobre las dos superficies del tubo se incrementan de forma considerable hasta alcanzar una dureza máxima de 63 RB para la superficie interior del tubo y 60 RB en la superficie exterior del tubo.

La dureza en la superficie exterior es menor en todo el proceso de estirado y la diferencia entre dureza se incrementa drásticamente a un diámetro de 22 mm (etapa 5) donde la dureza baja hasta 28 RB en el exterior y 58 RB en el interior de la superficie del tubo de cobre.

El comportamiento de los esfuerzos internos en la superficie exterior e interior del tubo de cobre a través de la extrusión y estirado debería de ser similar, con la finalidad de evitar defectos superficiales, esto trae consigo una diferencia en la dureza^[8], generándose el defecto superficial "escama".

4.3.3 Dureza puntual en el tubo defectuoso.

Se observa que la diferencia en dureza entre la superficie exterior del tubo y la dureza abajo del defecto superficial es significativa ($69 \text{ RB} - 57.7 \text{ RB} = 11.3 \text{ RB}$) originada por los esfuerzos internos, esto es un factor que origina el defecto superficial de escama.

4.3.4 Fósforo en el tubo defectuoso.

El fósforo arriba de un 0.04% puede originar fragilidad al tubo de cobre y poder producir fracturas y defectos superficiales. En este estudio el porcentaje obtenido de fósforo está por debajo de dicho límite^[1], por lo tanto, la influencia del fósforo queda descartada como causa del defecto superficial de escama.

4.3.5 Óxido cuproso en el tubo defectuoso

El defecto superficial de escama no es originado por impurezas del óxido cuproso, ya que la concentración de la impureza está dentro del límite permisible.

4.3.6 Difracción de rayos X en el tubo defectuoso.

Mediante la prueba de difracción de rayos X resultó que no existen compuestos de cobre, esto indica que no hay probabilidades de que se puedan formar fases con el fósforo y/o oxígeno disuelto en el cobre, ya que los ángulos de difracción corresponden a las fases de cobre puro

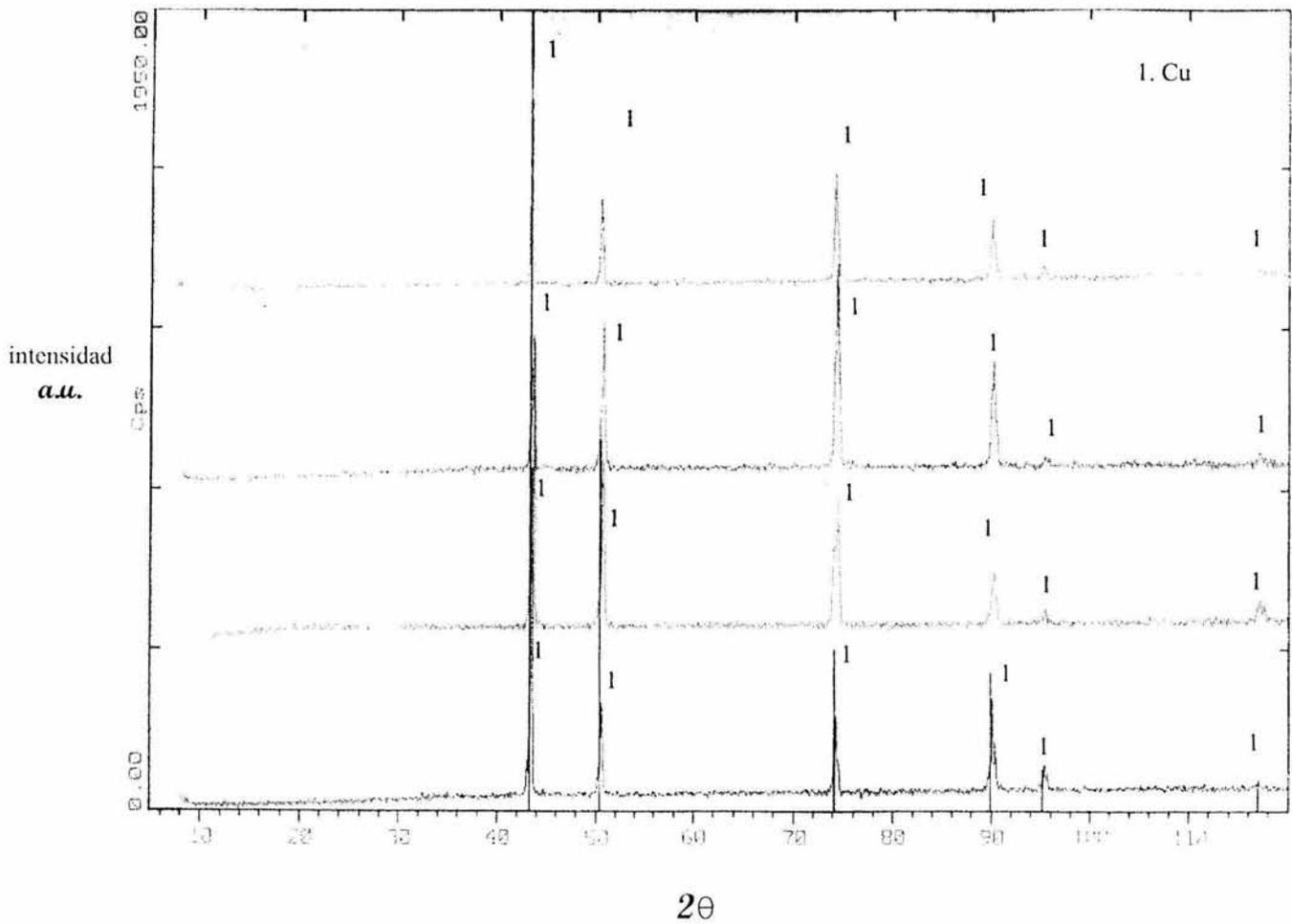


Figura 33. Se reúnen las cuatro muestras, donde todas coinciden en los mismos índices de difracción de rayos X, característica del cobre sin impurezas.

4.3.7 Determinación de la temperatura en la etapa de estirado.

Es eminente que sufre un calentamiento importante el tubo de cobre en la etapa de estirado, siendo un factor real de generar esfuerzos internos y recocidos superficiales. La temperatura de combustión del aceite lubricante de es 170 °C.

CONCLUSIONES

Después del trabajo experimental realizados (metalografía, difracción de rayos X, mediciones de dureza, prueba de tensión, emisión óptica) se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- 1.- El defecto superficial "escama" no es atribuible a una contaminación de fósforo en la fundición; ya que los resultados por emisión óptica y colorimetría evidencian la presencia dentro de los límites permisibles.
- 2.- El defecto superficial "escama" no es generado por rebabas del dado arrastradas en la extrusión, ya que en la difracción de rayos X no manifiestan compuestos de Cr, Ni y Fe.
- 3.- El defecto superficial "escama" no se origina por compuestos aleantes de Fe, Pb, Al, Zn, Sn, S, de acuerdo a la prueba por emisión óptica.
- 4.- El defecto superficial "escama", tiene su origen desde la fundición del lingote, el cual presentó durezas no homogéneas, las cuales en las etapas de extrusión y estirado lo acentúan, además originan heterogeneidad en el grano y la diferencia en dureza continua al momento de seguir estirando el tubo y al hacerlo pasar a través del dado se genera un recocido superficial, lo cual agudiza la diferencia de dureza entre el centro del espesor y el exterior del mismo, resultando un rompimiento y desprendimiento del grano de cobre, originando el defecto superficial denominado "escama".

Recomendación: Es necesario realizar un estudio sobre el diseño del dado y análisis de esfuerzos en estirado, y la relación con la velocidad de extruido y el tipo de lubricante, para reducir los riesgos que genera este defecto superficial.

Referencia bibliográfica.

- [1] Metals Handbook Committee, Metals Handbook, vol. 7, Atlas of microstructures of industrial alloys, 8 ed., American Society for Metals, U.S.A., 1977, pag. 277.
- [2] Metals Handbook Committee, Metals Handbook, vol. 1, Properties and Selection of Metals, 8 ed., American Society for Metals, U.S.A., 1977, pag. 745, 755.
- [3] Metals Handbook Committee, Metals Handbook, vol. 4, Forming of Steel, Strip and Plate, 8 ed., American Society for Metals, U.S.A., 1977, pag. 23 al 30, 404 al 424.
- [4] ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructures, 5 ed., U.S.A., 1992, pag. 399 a 414.
- [5] Annual book of ASTM Standards, Standard Specification for Seamless Cooper Tube in Coils B 743-95, U.S.A., 1995.
- [6] Higgins, Raymond Aurelius, Ingeniería metalúrgica, ed. Continental, 2ª. Ed., 1963, México, pag. 229 a la 279.
- [7] Heinz L., Wallmeir H., Manual de extrusión, parte 1, Tecnología para la extrusión de cobre y aleaciones, CUPRO San Luis S.A. de C.V., 1983.
- [8] Oxford, William, Metal Forming, Prentice may, 2ª. Ed., U:S.A., 1983, pag. 220 a 235.
- [9] Morral, F. & Jimeno E., Metalurgia General, tomo 1, Reverté, 1ª. Ed., Barcelona España, 1982, pag. 289 a 308.
- [10] Avner, H. Sydney, Introducción a la metalurgia Física, Mir Moscu, 3ª. Ed., URSS, pag. 412 a 414.
- [11] Greaves, Richard Henry, Metalografía Microscópica Práctica, URMO, España, 1979, pag. 166 a 173.

[12] Lajtin, Yu. M., Metalografía y tratamiento térmico de los metales, MIR MOSCU, 3ª. Ed., 1983, pag. 412 a 414.

[13] Reed-Hill, Robert E., Principios de Metalurgia física, Continental, 1a. Ed., México, 1979, pag. 245 a 290.

[14] Morela, Pere Solá, Tratamientos Térmicos de los Metales, MARCOMBO, España, 1991, pag. 113 a 118.

[15] Malishev, A. & Nikolaiev G., Tecnología de los Metales, LIMUSA, 1ª. Ed., México, pag. 266 a 268.

[16] Morela, Pere Solá, Conformación Metálica, MARCOMBO, España, 1991, pag. 49 a 50.

[17] Seybolt, A.V., Técnicas de Metalurgia Experimental, LIMUSA WILEY, 1ª. Ed., México, 1969, pag. 269 a 280.

[18] Annual book of ASTM Standards, Standard Specification for Seamless Cooper Tube for Air Conditioning and Refrigeration Field Service B 280-99, U.S.A., 1999., pag. 465.