

PMM/T - 22/95

IT/T - 2/95



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN

COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

DISEÑO DE HERRAMENTAL PARA LA LAMINACIÓN EN FRÍO DE TUBOS DE Zr₂Ni

Julio César Duhalde

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
INSTITUTO DE TECNOLOGIA

**Diseño de herramental para la laminación en frío de tubos
de Zry (*)**

por Julio C. Duhalde

Director

Ing. Alfredo Hey

(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

1995

AGRADECIMIENTOS:

A las siguientes personas:

De la Fábrica de Aleaciones Especiales:

Ing. Carlos Zunino

Sr. Luis Fernández

Sr. Jorge Heredia

Sr. Omar Bruner

Sr. Carlos Arakelian

Sr. César Aguirre

Sr. Almada

De la Comisión Nacional de Energía Atómica:

A mi director, Ing. Alfredo M. Hey.

Dra Isabel González

Ing. Savio.

Ing. Jorge Di Gaetano.

Lic. Gabriel San Martín.

A todos, gracias.

RESUMEN

Las centrales de energía nuclear usan dióxido de uranio como combustible para la producción de energía. Los elementos combustibles que contienen al uranio requieren un material, para sus partes estructurales, capaz de soportar las condiciones de operación y a la vez ser altamente transparente a los neutrones. El material usado en las centrales nucleares locales es una aleación base zirconio con adiciones de estaño, hierro y cromo llamada Zry-4.

Las vainas de Zry-4 destinadas a contener el combustible, son tubos sin costura de pared delgada obtenidos a partir de lingotes fundidos por arco al vacío dos veces, por un proceso que incluye forja en caliente y extrusión y una serie de pasos de laminación en frío con recocidos intermedios.

La laminación en frío se hace usando varios tipos de laminador peregrino y es determinante de la calidad geométrica y superficial de los tubos. En el presente trabajo, se analizan varios aspectos del proceso, así como los resultados de un plan de pruebas llevados a cabo en una planta industrial, con el propósito de determinar las condiciones de laminación y el herramental apropiado requerido para aumentar la productividad, por cambios en el avance de laminación, usando el diseño original como punto de partida.

Como conclusión, se presenta una secuencia de diseño del herramental, que incluye el diseño de rodillos, mandriles y zapatas. También se sugieren futuras actividades de desarrollo.

SYNOPSIS

Nuclear power stations use uranium dioxide as a fuel for energy production. The uranium containing fuel elements require a material, for its structural parts, capable of both withstanding the highly demanding operating conditions and of showing a high transparency to neutrons. The material used in the local power stations is a zirconium based alloy with tin, iron and chromium called Zry 4.

The Zry 4 fuel cladding consist of thin walled seamless tubing obtained, from double vacuum arc melted ingots, by a process that includes hot forging and extrusion and a cold rolling sequence with intermediate annealing treatments.

Cold rolling is performed using several variations of pilger rolling and is determinant of the geometrical and metallurgical quality of the tube. Several aspects of the process are analyzed in the present work, as well as the results of a number of trials performed at an industrial plant, with the aim of establishing the rolling conditions and the appropriate tooling required to increase productivity by changes in rolling feed, using the original design as a starting point.

A sequence for the design of tooling is presented as a conclusion, including the design of rolls, mandrels and straps. Future development activities are also suggested.

INDICE

Capítulo I	: Introducción.....	1
Capítulo II	: El Zircaloy.....	5
Capítulo III	: Proceso de producción de la vaina de Zry....	8
Capítulo IV	: La laminación por paso de peregrino.....	21
Capítulo V	: El herramental.....	35
Capítulo VI	: La deformación.....	51
Capítulo VII	: Programa de ensayos.....	75
Capítulo VIII	: Resultados.....	86
Capítulo IX	: Discusión.....	96
Capítulo X	: Conclusiones.....	113
Anexos.....		120

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear

Energía nuclear:

La energía nuclear[1], como su nombre lo indica, tiene su origen en el núcleo del átomo. Todos los elementos están formados por átomos, pero no todos los elementos pueden proporcionar el mismo nivel de energía.

Aquellos que se denominan fisionables liberan alta energía al romperse o fisionarse sus átomos. Uno de estos elementos es el uranio, que se presenta en varias formas denominadas isótopos. El isótopo más importante es el uranio 235, por ser fisionable.

El átomo de un elemento fisionable, para producir energía, necesita de algo que haga posible la ruptura de su núcleo para emitirla. Ese algo forma parte de su misma estructura y es el neutrón que, al incidir en el núcleo de un átomo fisionable, lo escisiona (lo parte) y da lugar a la liberación de:

- . Productos de fisión.
- . Neutrones.
- . Energía.

De los productos liberados interesan conservar, desde el punto de vista de la producción de energía, los dos últimos.

Los neutrones: para producir nuevas fisiones y crear un proceso en cadena, al incidir sobre nuevos átomos de uranio 235 que aún no han sido fisionados.

La energía de origen nuclear: para transformarla en energía eléctrica.

Proceso de la fisión:

Los neutrones emitidos directamente de la fisión poseen una muy alta velocidad; para que provoquen la fisión en otros núcleos de uranio 235 es necesario frenarlos y obtener una velocidad adecuada. Este proceso de atenuación energética de los neutrones se denomina moderación.

En los reactores de uranio natural, la moderación de neutrones se logra mediante el empleo de agua pesada.

Los neutrones, al pasar por el medio moderador, interaccionan con los átomos de agua pesada; entre choques sucesivos van perdiendo velocidad hasta que se obtiene la adecuada para producir la fisión.

El reactor (tipo Candú, como el de la Central Nuclear de Embalse):

El reactor propiamente dicho está formado por un tanque cilíndrico de acero, denominado "calandria", que contiene el agua pesada del moderador. La calandria se halla penetrada, horizontalmente, por 380 canales de elementos combustibles.

Elementos combustibles:

En cada uno de estos canales se encuentran alojados 12 manojos que contienen dióxido de uranio, que se encuentra dispuesto en forma de pequeñas pastillas encerradas en tubos de zircaloy (Zry-4). Se usa este material debido a que reúne las características necesarias para su utilización en el reactor, que son: resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y baja sección eficaz de captura de neutrones.

Los tubos de zircaloy se hallan sostenidos por soportes circulares planos, configurando lo que se ha convenido en llamar manojos de elementos combustibles (Fig.I.1).

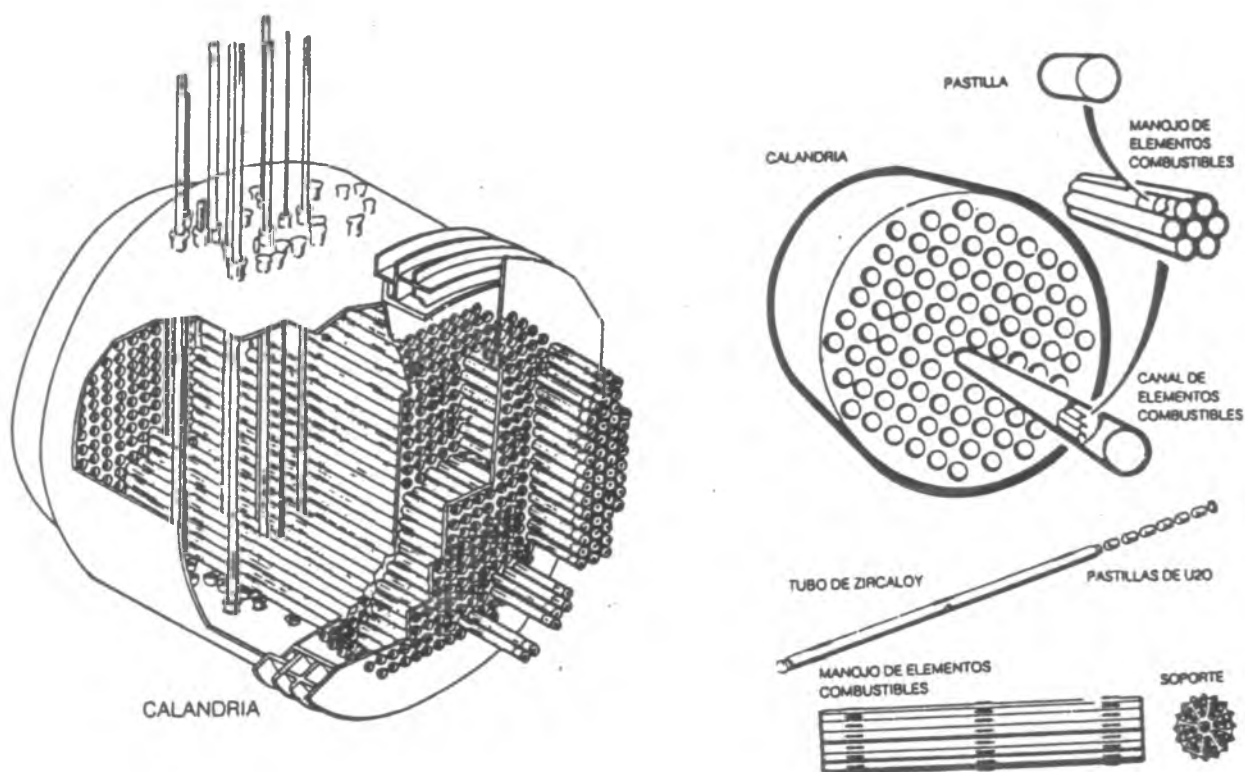


Fig. I.1

Dentro de los canales de elementos combustibles, y embebiendo exteriormente los manojos, circula el agua pesada del circuito primario de transporte de calor. La misma efectúa la transferencia térmica desde el combustible nuclear cuando este fisiona, hacia el sistema secundario.

El sistema secundario contiene agua liviana común. Esta agua, transformada en vapor es la que mueve las turbinas para producir electricidad.

La vaina de Zry

Las vainas de Zry son uno de los más críticos componentes estructurales en los reactores nucleares. Los mismos están sujetos a muchas condiciones adversas tales como alta temperatura, alta presión del refrigerante, medio ambiente corrosivo debido al flujo de agua pesada y bombardeo de neutrones.

Sobre la superficie externa se tienen fenómenos de oxidación e hidruración.

Sobre la superficie interna: la dilatación de las pastillas de UO_2 , y la agresión de los productos de fisión (iodo), que provoca el fenómeno de corrosión bajo tensión.

Si bien los fenómenos de oxidación se previenen con los aleantes, el fenómeno de corrosión bajo tensiones depende del estado de la superficie interna de los tubos.

Por estas razones las vainas deben cumplir con exigentes requerimientos de calidad con respecto a integridad, terminación superficial, dimensiones, análisis químico, propiedades mecánicas, aspectos metalúrgicos y resistencia a la corrosión.

El espesor de la vaina es importante que sea el mínimo compatible con las condiciones de trabajo [3], cuanto más se pueda reducir este espesor se tienen los siguientes beneficios:

- . Es necesaria menor cantidad de uranio para generar una cantidad dada de energía térmica.
- . Se ahorra Zry.: se reduce la masa de Zry. por unidad de masa de uranio.

Material para fabricar los tubos[2]:

El material para fabricar las vainas de Zry-4 para servicio nuclear, debe provenir de lingotes obtenidos por múltiples fusiones en vacío en horno de arco del tipo utilizado para materiales reactivos. Debe satisfacer lo establecido en la norma ASTM B-353.

CAPITULO II: EL ZIRCALOY

El Zry-4

El Zry-4 es una aleación constituida por aproximadamente 97% de Zr. Los elementos de aleación (estaño, hierro, cromo), tienen como fin la obtención de mejores características mecánicas y el aumento de la resistencia a la corrosión, conservando la propiedad del Zr de tener baja sección de captura de neutrones (Tabla II.1)[4].

Composición química básica del Zry-4:

Sn : 1,20-1,70 %

Fe : 0,18-0,24 %

Cr : 0,07-0,13 %

O : 0,10-0,16 %

Zr + impurezas: balance.

Tabla II.1. Comparación de la capacidad del Zr. de absorber neutrones con respecto a otros elementos:

Elemento	Absorción (barn)
Al	0,23
B	760
Co	37
Cr	3,1
Cu	3,77
Fe	2,53
Nb	1,15
Ni	4,8
Ti	5,8
Zr	0,18

El Zr tiene estructura hexagonal a temperatura ambiente. En el Zr. puro esta fase alfa es estable hasta los 862°C, donde se transforma a la fase beta que es cúbica centrada en las caras. En las aleaciones comerciales, esta transformación tiene lugar sobre un rango de temperaturas, donde el material contiene las fases alfa y beta.

Propiedades mecánicas del zircaloy:

La variación de la tensión de fluencia con la deformación puede ser descrita por una ley de Ludwik[5]:

$$\sigma(\text{kg./mm}^2) = 26 + 39.\epsilon^{0,25} \quad (\text{A partir del estado recocido})$$

Módulo de elasticidad: 98.000 MPa.

CAPITULO III: PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA VAINA DE ZRY

Las principales operaciones en la producción y control de vainas de Zry[6], se muestran en la tabla III.1 . Para poder satisfacer las especificaciones de la composición del lingote, se debe partir de esponja de Zry con muy bajo contenido de impurezas, especialmente de aquellas de alta sección de captura de neutrones, por ejemplo el Hafnio.

La uniformidad del análisis dentro del lote de esponja es también importante. Los elementos de aleación de los cuales el oxígeno es uno importante, son agregados con la esponja.

La esponja se prensa para hacer briquetas que son soldadas por electron-beam para formar un electrodo, que se funde en un horno de alto vacío a una presión de alrededor de 10^{-3} mm. de Hg. Esta operación se hace dos veces para asegurar la uniformidad y homogeneidad en el lingote final.

El forjado del Zry se hace en fase beta o alfa+beta. El equipo puede ser el convencional. Sin embargo, debe asegurarse que las condiciones de calentamiento sean tales que no se produzca una difusión de gases perjudicial dentro del material. La atmósfera debe ser ligeramente oxidante. Durante el enfriamiento del lingote y también durante el forjado, una fase secundaria rica en elementos de aleación (Sn, Cr, Fe) precipita. Si esta precipitación no está uniformemente distribuída en el material, tiene una influencia negativa sobre la resistencia a la corrosión. Por esta razón se hace un temple beta, es decir calentar a la región beta (1050°C) y templado.

Los tochos para extrusión son preparados por perforado y torneado. Son normalmente revestidos con Cu o grafito, para protegerlos de la contaminación superficial durante el calentamiento, y también para facilitar la lubricación durante la extrusión. El cobre se remueve luego de la extrusión por decapado con ácido nítrico.

La extrusión se hace en la región alfa, es decir a temperaturas más bajas que 825°C.

La deformación en frío de los tubos de Zry se hace normalmente por el método paso de peregrino. No se usa la trefilación, debido a la tendencia del Zry a adherirse a la matriz. Por otra parte el trefilado deja una textura indeseable en el tubo. En el laminado peregrino se pueden conseguir reducciones de área superiores al 80 %.

Todas las operaciones de recocido deben llevarse a cabo con una presión de vacío inferior a 10^{-3} mm. de Hg. para prevenir contaminación de gases. La temperatura de los recocidos intermedios es alrededor de 650°C a 700°C. Para satisfacer los requerimientos de propiedades mecánicas la temperatura de recocido final es de 450°C a 500°C .

En todas las etapas del proceso de producción la calidad superficial de los tubos debe ser cuidadosamente controlada. El acondicionamiento de la superficie involucra granallado interior, y pulido para el exterior.

El objetivo del acondicionamiento de la superficie es lograr una superficie con buena resistencia a la corrosión. El decapado se hace en una mezcla de HF-HNO₃, donde la relación HNO₃ a HF es aproximadamente 10:1. El contenido de HF es normalmente de 2 a 3 %. El resultado de la operación de decapado es muy afectada por

el tiempo entre el decapado y la operación de enjuague, y también por la eficiencia del enjuague. Si el enjuague es insuficiente, puede conducir a la aparición de puntos de óxido blancos, debido a residuos de fluoruro sobre la superficie.

Propiedades mecánicas de las vainas de Zry:

Las propiedades mecánicas de las vainas dependen principalmente de las siguientes tres variables:

- Reducción de área en la pasada de laminado final.
- Temperatura de recocido final.
- Textura: la misma depende de las dos variables anteriores y de la historia metalúrgica del tubo de entrada.

El trabajado en frío de los tubos por el proceso paso de peregrino da al material una textura donde los ejes "c" de los cristales, es decir los planos basales, son orientados en una dirección perpendicular al eje longitudinal del tubo. La dirección de los polos basales dentro del plano puede ser afectada por cambios en el valor "Q". Este valor se define como la relación entre la reducción en el espesor de pared y la reducción en diámetro.

$$Q = \frac{(E_E - E_F) / E_E}{(D_E - D_F) / D_E}$$

Donde:

E_E : espesor del tubo de entrada.

E_F : espesor del tubo de salida.

D_E : diámetro del tubo de entrada.

D_F : diámetro del tubo de salida.

Altos valores de "Q", es decir una reducción importante del espesor de pared y una pequeña reducción del diámetro, conducen a una textura donde los polos basales son orientados principalmente en la dirección radial, mientras que con bajos valores de "Q" (que es normal en trefilado) se obtienen cristales orientados tangencialmente. (ver figura III.1).

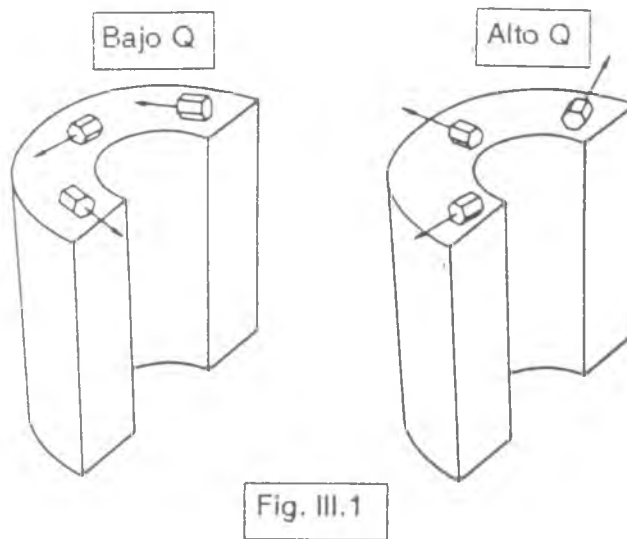


Fig. III.1

Los otros factores que influyen las propiedades mecánicas del tubo acabado son la reducción de área en laminación y la temperatura de recocido final. Las figuras III.2 muestran como la tensión de fluencia y la elongación son afectadas por estos factores. Para altas reducciones de área las propiedades mecánicas cambian muy rápidamente con temperaturas de recocido de alrededor de 500°C. En algunos casos las propiedades mecánicas requeridas del material, necesitan de un recocido en este rango de temperatura, dando por resultado un material parcialmente recristalizado.

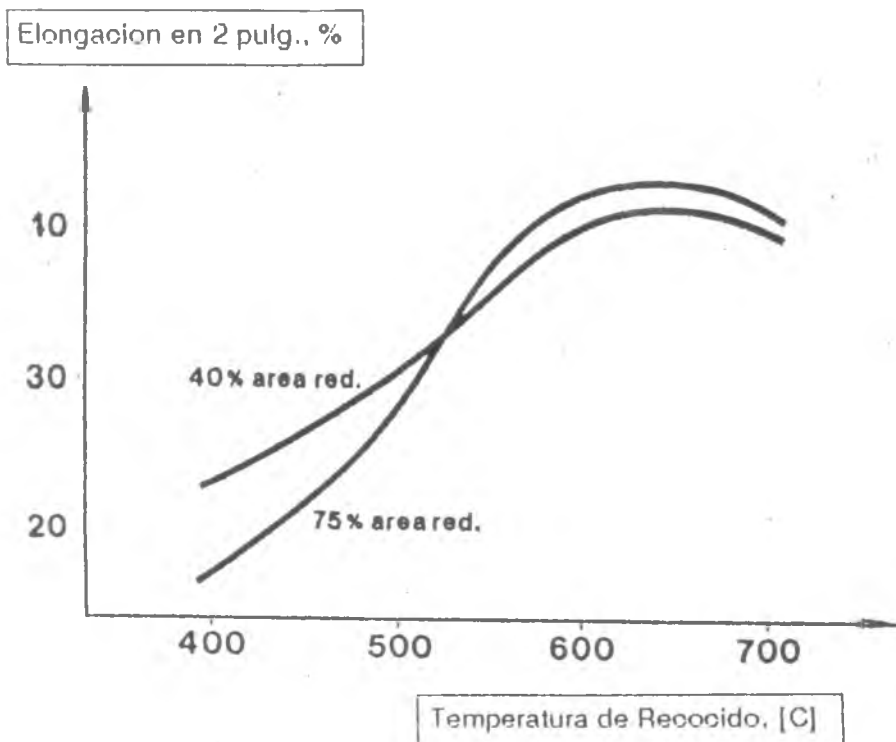
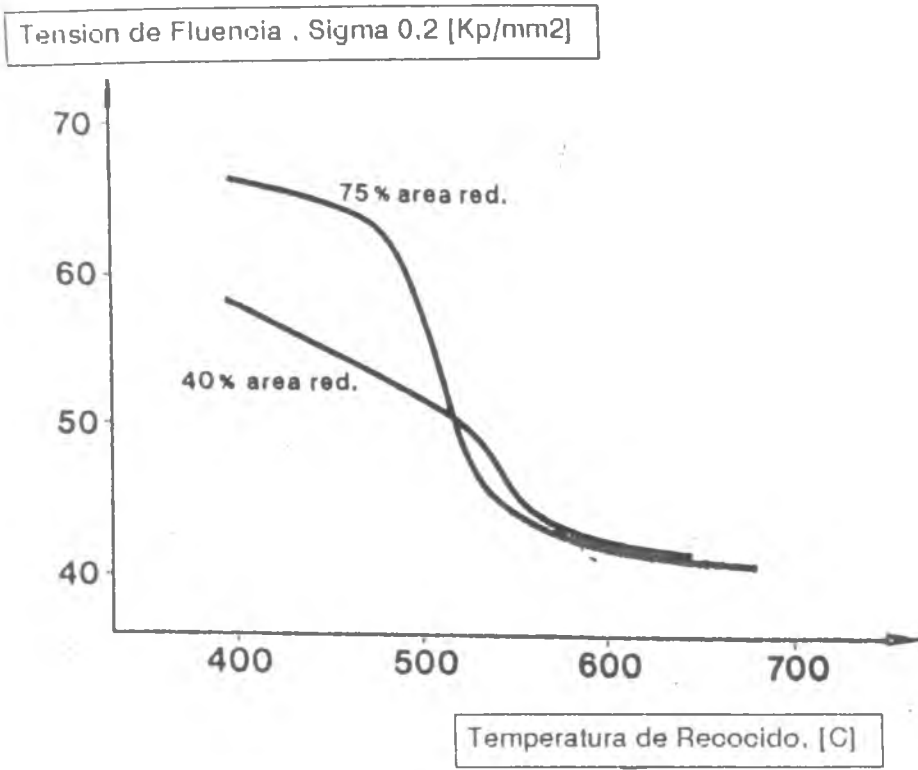


Fig. III.2

Para evaluar las propiedades circunferenciales, se utiliza el ensayo de explosión. Este ensayo se realiza presurizando con argón (u otro fluido según especificación) un trozo de vaina cerrada por ambos extremos. La presión se aplica hasta explosión, y se mide la relación entre el diámetro exterior promedio antes y después del ensayo. Esta relación debe superar un cierto valor establecido por norma.

Inspección final:

Antes de despacharlas al cliente, las vainas pasan por un intenso control final, donde se comprueban las dimensiones, las propiedades especificadas y que el material esté libre de defectos.

Los tubos con defectos son apartados y, si es posible retrabajados y luego reexaminados. Si esto no es posible, se envían a la chatarra para posterior refusión.

Las tolerancias de los diámetros interior y exterior son estrechas (tabla III.2) y es necesario controlar los diámetros a lo largo de la longitud total de todos los tubos.

Tabla III.2

		Dimensiones del último paso de Laminaación	Aumento de diámetro interno op. granallado	Disminución de diámetro externo en-op. pulido	Dimensiones Finales (promedios)	Valores especificados en planes CNEA		
ATUCHA 1	Cant. de lotes tomados de muestra		5	5				
	Periodo de fabricación		05-Jul al 21-Jul	07-Jul al 27-Jul				
	Diámetro Externo		X = 7,5 μ m	X = 18 μ m			11,915 mm	11,900 \pm 0,06 mm
	Espesor		S = 2,781 μ m	S = 1,0 μ m			0,553 mm	0,560 (min. 0,51) mm
	Diámetro Interno		10,80 \pm 0,01 mm				10,810 mm	10,800 \pm 0,04 mm
ATUCHA 2	Cant. de lotes tomados de muestra		2	2				
	Periodo de fabricación		21-Jul al 23-Jul	21-Jul al 30-Jul				
	Diámetro Externo		X = 9,17 μ m	X = 18 μ m			12,905 mm	12,900 \pm 0,06 mm
	Espesor		S = 4,197 μ m	S = 1,0 μ m			0,568 mm	0,670 (min. 0,53) mm
	Diámetro Interno		11,76 \pm 0,01 mm				11,770 mm	11,760 \pm 0,06 mm
CANDÚ	Cant. de lotes tomados de muestra		5	5				
	Periodo de fabricación		17-Jul al 28-Jul	14-Jul al 01-Ago				
	Diámetro Externo		X = 8,65 μ m	X = 18 μ m			13,095 mm	13,080 \pm 0,04 mm
	Espesor		S = 1,838 μ m	S = 1,0 μ m			0,423 mm	0,420 (min. 0,38) mm
	Diámetro Interno		12,24 \pm 0,01 mm				12,250 mm	12,240 \pm 0,04 mm

Para la detección de defectos en el material se utiliza el método de ultrasonido. La superficie del tubo es examinada a lo largo de una línea helicoidal con un paso determinado para tener un cierto grado de solapado. Las señales de defectos son grabadas. Para comprobar la calibración, un tubo conteniendo los defectos normalizados se pasa por la unidad de ultrasonido a intervalos constantes, por ejemplo, cada media hora.

El buen comportamiento de corrosión bajo condiciones de reactor, es también una propiedad importante de las vainas de Zry. La prueba se realiza generalmente a 400°C., con vapor de agua bajo una presión de 105 bar a lo largo de tres o catorce días en un

autoclave. El aumento de peso por corrosión no debe sobrepasar 22 mg./dm², o bien 38 mg./dm².

El ensayo de corrosión permite sacar conclusiones sobre una composición química correcta del material, adecuado tratamiento térmico y microestructura.

Los resultados de todos las pruebas son compiladas en un certificado para todos los lotes de tubos. Este certificado se envía junto con el material.

Proceso de producción de las vainas

Tabla III.1 : Secuencia de fabricación y control:

Etapa de fabricación	Control realizado
=====	
1 Lingote de Zry obtenido por doble fusión. Tamaño: 300 mm ϕ x 700 mm. largo	a) Composición química. b) Dureza. c) Dimensiones.
2. Forjado del lingote	a) Temperatura. b) Dimensiones.
3. Extrusión a 150 mm de diámetro.	a) Temperatura y tiempo de mantenimiento. b) Inspección visual.
4. Temple beta.	a) Temperatura y tiempo de mantenimiento. b) Microestructura y tamaño de grano.

5. Laminación a la medida del TREX.
 - a) Calidad superficial.
 - b) Dimensiones.

6. Recocido y esmerilado.
 - a) Temperatura y tiempo.
 - b) Presión de vacío.
 - c) Dureza.
 - d) Microestructura.

7. Laminado peregrino.
(3 pasos)
 - a) Calidad superficial
 - b) Dimensiones.

8. Recocido al vacío entre pasadas.
 - a) Presión de vacío.
 - b) Temperatura y tiempo.

9. Granallado interior pulido exterior.
 - a) Terminación superficial
 - b) Inspeccion visual.

10. Control por ultrasonido
 - a) Grietas longitudinales y transversales.
 - b) Diámetro ext.e int., ovalidad y variación del espesor de pared.

11. Evaluación del material
- a) Resistencia a la tracción
 - b) Ensayo de explosión.
 - c) Orientación de hidruros
 - d) Metalografía.
 - e) Ensayo de corrosión.
 - f) Análisis químico(H,N,O)
12. Corte final e inspección
- a) Control dimensional.
 - b) Enderezado.
13. Limpieza y expedición.

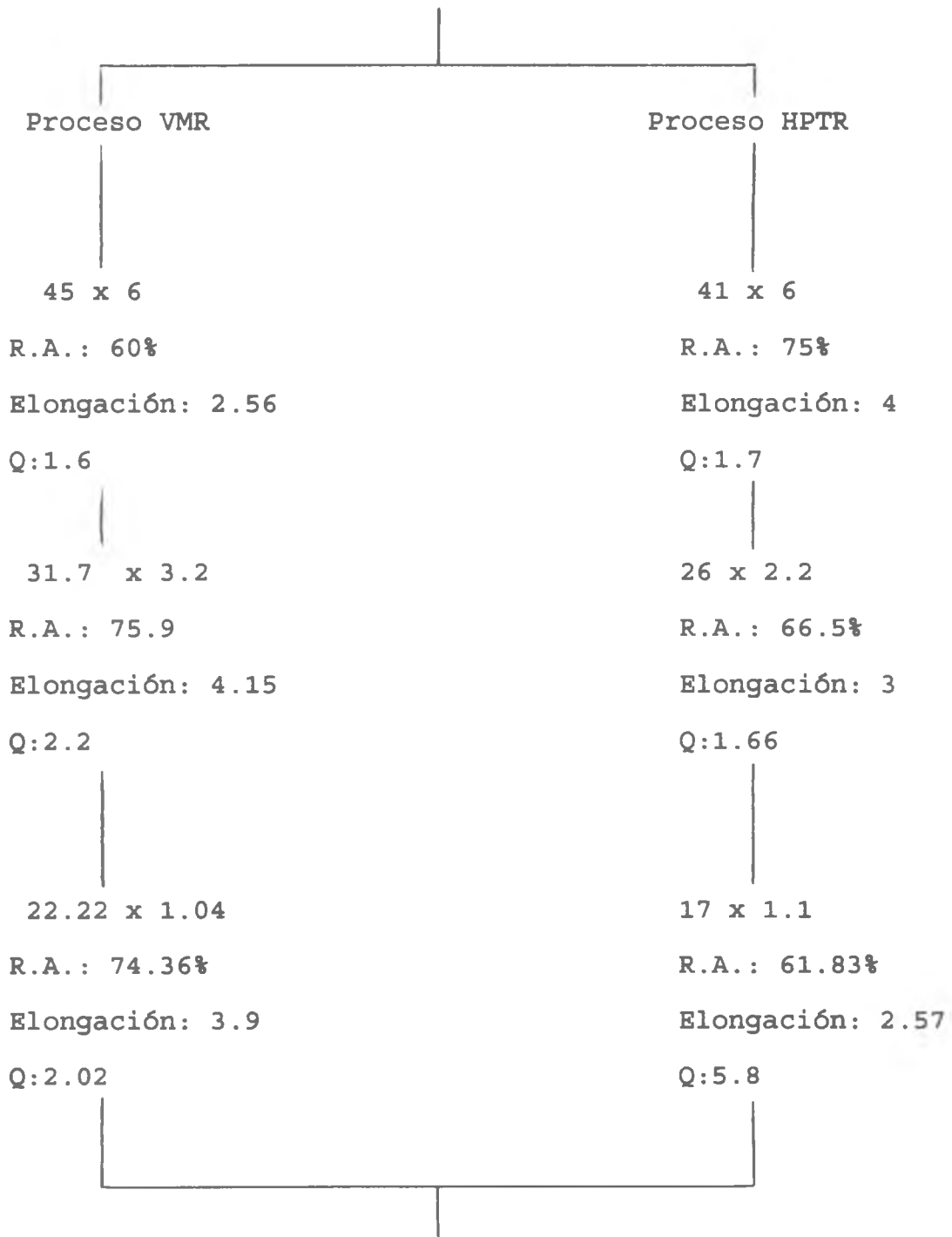
En FAE (anexo I) se comienza con el proceso en el punto 7. La secuencia de laminación es confidencial.

Otras secuencias posibles son:

En la India[7] (Nuclear Fuel Complex, Hyderabad), para un reactor del tipo PHWR (Pressurised Heavy Water Reactor), es:

El primer número es el diámetro exterior y el segundo, el espesor de pared, ambos en milímetros.

Medida inicial: 63 x 11



Medidas finales: 15.265 x 0.406

En Francia, [8] (Zircotube) es:

Usando el proceso HPT para los tres pasos:

44.45 x 7.62

R.A.: 52% , ϵ :0.72 , Q: 1.17

|

31.75 x 5.05

R.A.: 79% , ϵ :1.55 , Q: 1.47

|

17.17 x 1.8

R.A.: 83% , ϵ :1.75 , Q: 1.48

|

9.52 x 0.56

La temperatura de los recocidos intermedios se encuentra entre 650°C y 700°C. La temperatura de recocido final es de aproximadamente 450°C a 500°C

En Japón[9] (Sumitomo Metal Industries), para reactores del tipo BWRs (boiling water reactors), que usan tubos de Zry-2 recubiertos con Zr, la secuencia es:

63.5 x 10.9

R.A: 64%

|

40 x 6.2

R.A.:75%

|

22 x 2.6

R.A.:80%

|

12.5 x 0.86

¿Por qué se utiliza el método paso de peregrino para laminar los tubos de Zry?

Se hace para controlar la orientación de la estructura cristalina, de modo que los ejes de los hexágonos queden orientados en forma radial [4]. Esto es porque las vainas de Zry absorben hidrógeno del agente refrigerante circundante bajo condiciones de funcionamiento del reactor; este hidrógeno, en las paradas del reactor, se precipita en forma de hidruro de Zr en la red cristalina y disminuye la ductilidad del material de la vaina. Sin embargo, la disminución de la ductilidad es más crítica en hidruros orientados radialmente que en hidruros dispuestos tangencialmente, debido a la posibilidad de que se produzcan pinchaduras a través del espesor de la vaina. Como los hidruros precipitan sobre los planos basales de los hexágonos, la distribución tangencial de los mismos se obtiene con los ejes de los hexágonos orientados en forma radial. Por ello, a efectos de prueba, muestras tomadas de tubos acabados se cargan artificialmente de hidrógeno. La orientación de los hidruros puede describirse entonces metalográficamente en una sección transversal del tubo por medio del factor F_n . Este factor representa la relación entre el número de hidruros orientados en dirección radial dentro de un ángulo de 45° y el número total de hidruros existentes.

La textura puede medirse por el factor de Kearns que cuantifica la fracción de polos orientados en forma radial.

Si : $f_r = 1$ textura radial (la que conviene)

$f_r = 0.5$ textura a 45° de la dirección radial.

$f_r = 0$ textura tangencial.

CAPITULO IV: LA LAMINACIÓN POR PASO DE PEREGRINO

Existen en FAE dos tipos de proceso de laminación por paso de peregrino:

- 1) El HPT donde los calibres son espirales que tienen garganta de laminación de perfil variable y el mandril es notablemente cónico o parabólico.
- 2) El HPTR donde los calibres son cilindros que tienen garganta de laminación de perfil constante y por esta razón es necesaria otra pieza para lograr el perfil de deformación llamada zapata. El mandril es ligeramente cónico o recto.

En FAE el proceso de fabricación comienza con el TREX (tube reduced extrusion), al cual se le efectúa el primer paso de laminación en la máquina HPT 32 (anexo II).

El tren laminador de tubos en frío deforma al material en un régimen de trabajo periódico, mediante dos calibres de laminación de garganta de sección variable. Los calibres pueden tener una sección circular completa como en la HPT 15-30 (anexo II), o estar formados por sectores de círculo, como en el caso del laminador HPT 32. Los calibres están alojados en una caja de laminación que tiene un movimiento alternativo, accionada por un mecanismo biela-manivela.

Los calibres efectúan su movimiento de giro y traslación accionados por un par de engranajes conductores fijados en el mismo eje de los calibres[10], que engranan en sendas cremalleras fijadas a las paredes laterales de la caja de laminación.

El proceso de laminado de tubos en la máquina tipo HPT 32 se muestra en la fig. IV.1 y el de la HPT 15-30 se muestra en la figura IV.2

En su recorrido, los calibres deforman al tubo contra un mandril que se encuentra entre los mismos y que permanece inmóvil durante la operación, sujetado por una barra portamandril.

En la posición inicial de la caja de laminación, el tubo de entrada es accionado por un mecanismo que lo desplaza en la dirección de laminación una cierta distancia que se llama "avance". Al desplazarse la caja hacia adelante, se produce en un sector del tubo de entrada una reducción en sentido radial del diámetro, hasta que el diámetro interior toca al mandril, a partir de este punto se produce una reducción tanto del diámetro como del espesor. Esta reducción es gradual y está gobernada por el perfil de los calibres y del mandril.

En la posición extrema delantera de la caja de laminación, se produce un giro de aproximadamente 60° en forma conjunta del tubo y del mandril. Al retroceder la caja de laminación, lamina y corrige la parte del tubo que había quedado en el plano de separación entre los calibres. Al principio y al final de la carrera de la caja de laminación, la garganta de los calibres tiene una abertura tal que permite el avance y el giro del tubo.

La acción es repetitiva.

Cambio de forma del tubo en el proceso de laminación:

En la posición delantera de la caja de laminación, como resultado del avance del tubo de entrada, la garganta laminada del tubo se

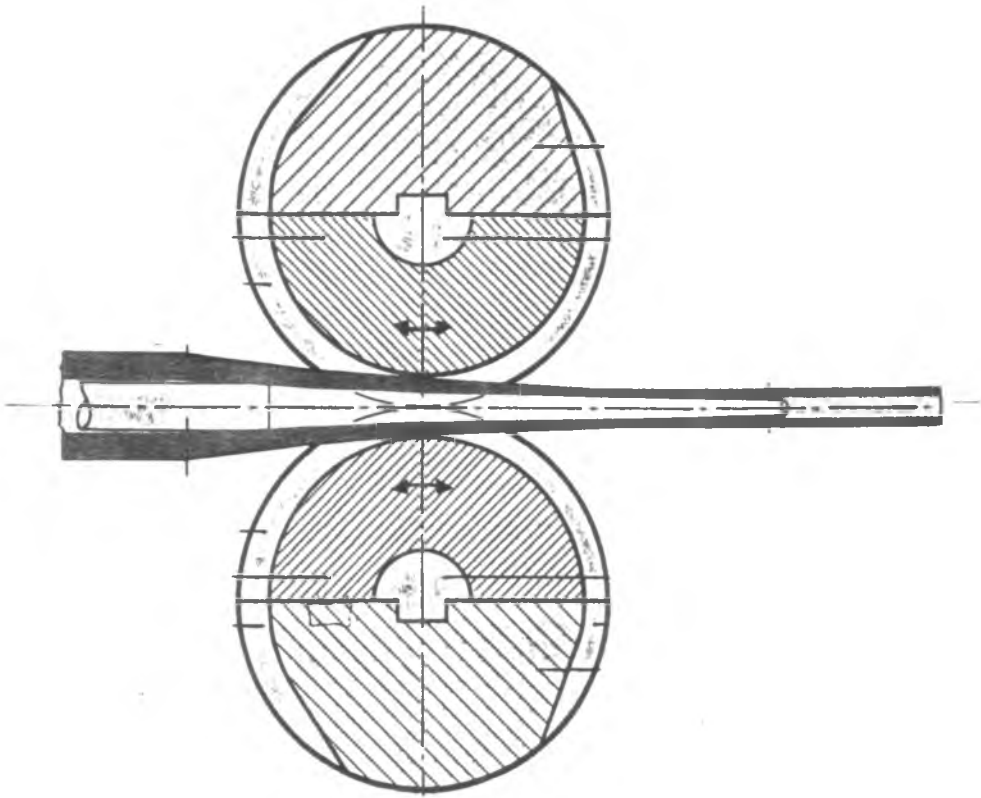


Fig. IV.1

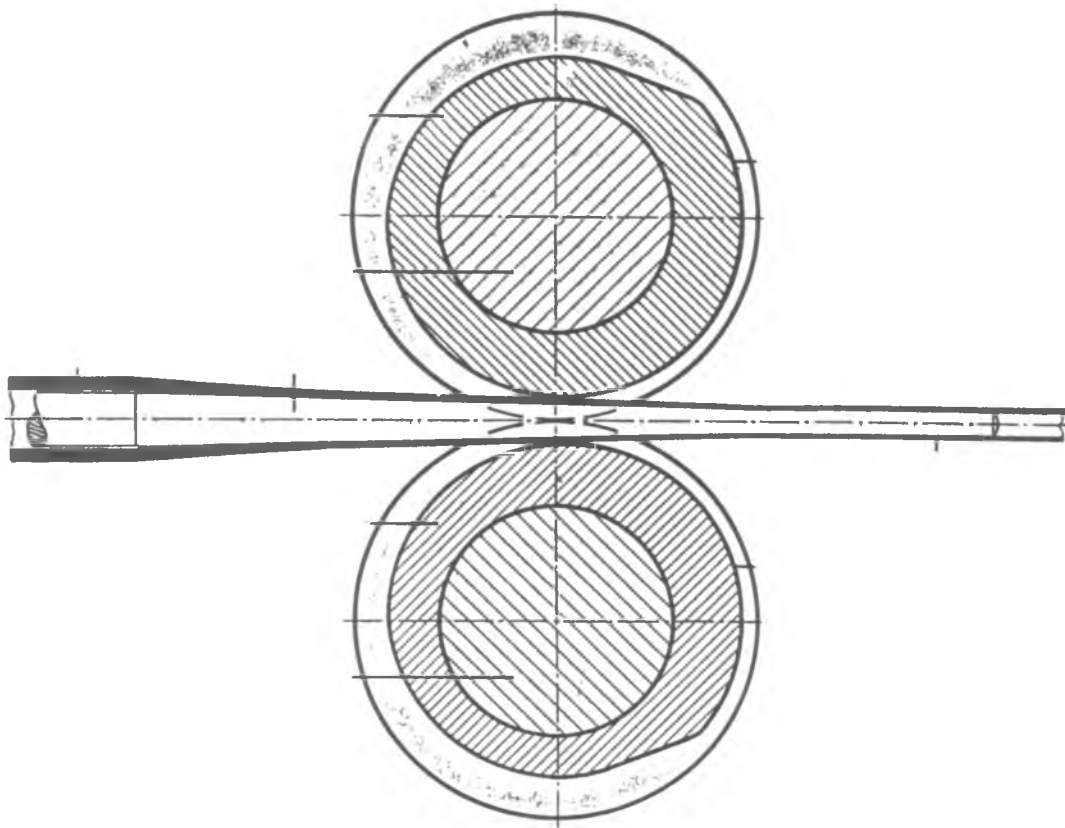


Fig. IV.2

desplaza, en la dirección de laminación, una distancia "m" (avance).

Al avanzar, la superficie interna de la garganta laminada (se llama así a la zona de transición entre el tubo de entrada y el de salida) se separa de la superficie del mandril y deja una separación "s". Con el movimiento de la caja hacia adelante, se produce la reducción de la garganta del tubo en el diámetro, hasta que la superficie interna del mismo toma contacto con el mandril, después de lo cual la reducción del diámetro acompaña a la de la pared del tubo.

A medida que la caja avanza hacia adelante y los calibres se desplazan sobre la garganta del tubo, la compresión que aquellos ejercen se traduce en un desplazamiento del material laminado hacia adelante.

El ángulo de contacto del calibre con el tubo que está siendo deformado, se puede descomponer en un ángulo de reducción del diámetro Φ_d y uno de reducción de pared Φ_p . La suma de ambos da el ángulo total de contacto Φ_{ct} , variable en el recorrido de los calibres.

En cada carrera de la caja de laminación, ingresa a la zona de deformación una porción del tubo de entrada de longitud igual a la de avance m. El volumen que ingresa a la zona de deformación es:

$$V_1 = \pi \cdot t_1 \cdot (D_1 - t_1) \cdot m$$

Donde:

D_1 : diámetro de entrada.

t_1 : espesor de entrada.

En un ciclo de laminación, el segmento tubular obtenido tiene una longitud δl_2 , cuyo volumen es:

$$V_2 = V_1 = \pi \cdot t_2 \cdot (D_2 - t_2)$$

Donde:

D_2 : diámetro de salida.

t_2 : espesor de salida.

De las relaciones vistas se puede despejar δl_2 :

$$\delta l_2 = \pi \cdot t_1 \cdot (D_1 - t_1) \cdot \mu / \pi \cdot t_2 \cdot (D_2 - t_2) = \mu \cdot m$$

Donde μ es el coeficiente de estirado del paso de laminación que se está considerando.

Deslizamiento del material en la garganta de los calibres:

En su movimiento alternativo, los calibres del laminador HPT, ruedan sobre un plano cuya traza sobre el plano vertical está formada por los puntos de contacto de los engranajes conductores con las cremalleras ubicadas una a cada lado de la caja de laminación.

El proceso de laminación de tubos, como el de cualquier perfil no plano, va acompañado inevitablemente por un deslizamiento no uniforme del metal laminado con respecto a la superficie de la garganta de los calibres en todo plano diametral.

Las velocidades circunferenciales de los puntos distribuidos en la cavidad de la garganta de los calibres son diferentes, en función del radio del punto que se analice.

El centro instantáneo de velocidades se encuentra en el punto E, punto del engrane del engranaje conductor con la cremallera. La sucesión de estos puntos forma una línea paralela a la de

deslizamiento del calibre, ubicada a una distancia igual al radio primitivo del engranaje conductor.

Para la determinación cuantitativa de la magnitud del deslizamiento, se introduce el factor $\alpha_{des.}$, que expresa la relación entre la velocidad del punto ubicado en el fondo de la garganta (V_f) y la de desplazamiento de los calibres (V_c):

$$\alpha_{des.} \% = V_f/V_c \cdot 100$$

La experiencia demuestra que no conviene que $\alpha_{des.}$ supere el 15 al 20 %. En caso contrario se produce un desgaste muy intenso de los calibres.

Zonas de trabajo en el laminado con HPT:

En una carrera de la caja de laminación, se deben poder efectuar las siguientes operaciones:

- Avance del tubo de entrada.
- Deformación del tubo.
- Calibrado del tubo laminado.
- Giro del tubo y del mandril.

La operación de deformación del tubo se suele dividir en dos partes:

- Reducción del diámetro.
- Reducción del diámetro y del espesor de pared.

La determinación de las longitudes de las zonas señaladas se hace a partir del conocimiento de la longitud de la carrera de la caja de laminación y, dentro de esta, de las longitudes requeridas para que actúen los mecanismos de avance y de giro del tubo (durante ambas operaciones el tubo debe estar libre, o sea no comprimido por los calibres).

Pueden variarse las longitudes de deformación y de calibración, siempre que se mantenga:

Longitud de deformación + Longitud de calibración = constante.

Según la calidad deseada en el tubo laminado, la longitud de calibración será mayor o menor.

Laminación de tubos con el método HPTR

Se denomina HPTR al proceso que utiliza rodillos de laminación de perfil constante. Esto trae como consecuencia la necesidad de otra pieza llamada zapata.

Principios de funcionamiento de la máquina HPTR:

Las máquinas HPTR se emplean fundamentalmente para reducir el espesor de pared en tubos de pared delgada. No se suelen emplear para grandes reducciones del diámetro exterior, debido a que la geometría de los rodillos no es apropiada para esto.

En la figura IV.3 se muestra el esquema básico de laminación de tubos en una máquina HPTR (ver anexo III).

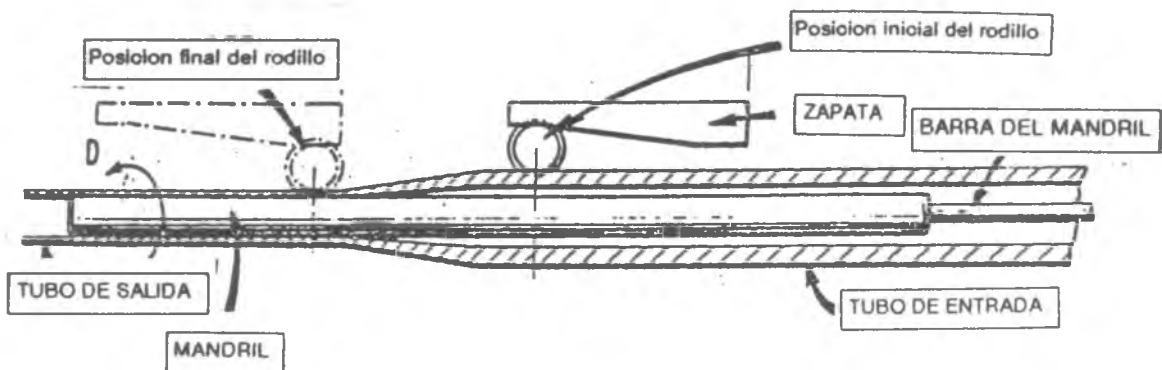


Fig. IV.3

Con el método HPTR se pueden producir tubos de muy bajo espesor de pared, debido al pequeño diámetro de los rodillos.

En la figura IV.4 se muestra un esquema de la caja de laminación de la HPTR 8.15.

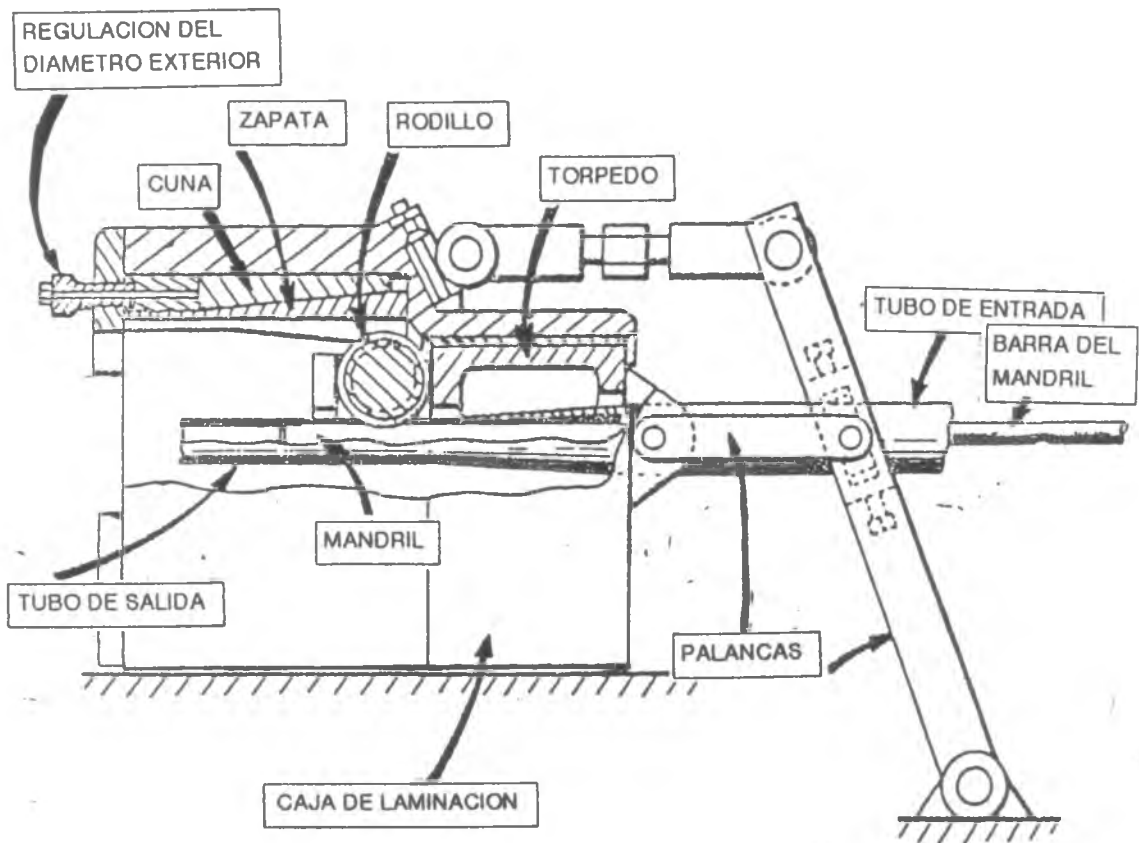


Fig. IV.4

El tubo se deforma[11] sobre un mandril ligeramente cónico mediante tres rodillos que se encuentran alojados en la cabeza portarodillos y que se apoyan en guías (zapatas). La cabeza portarodillos va enroscada a otra pieza, a este conjunto se lo

llama torpedo. Este torpedo desliza dentro de una jaula de laminación. A la jaula van atornilladas las zapatas y se mueven junto con la misma, guiando a los rodillos en su movimiento longitudinal (a lo largo del tubo) y transversal (lo que provoca la reducción de diámetro y espesor del tubo).

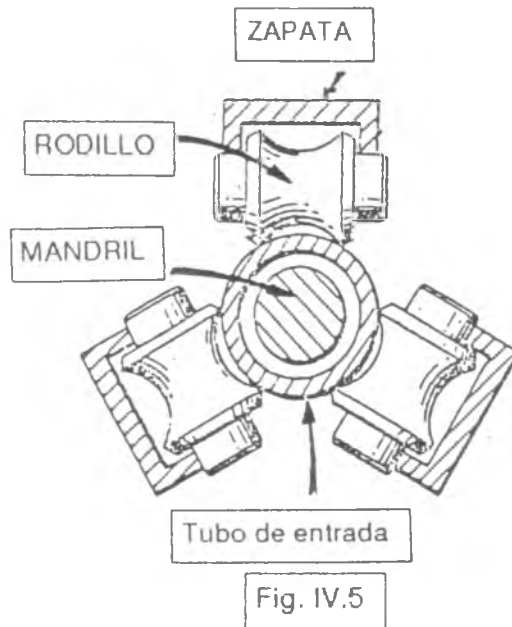
Tanto la jaula como el torpedo, tienen un movimiento de avance y retroceso producido por un sistema biela-manivela a través de un sistema de palancas.

En cada carrera de la máquina se produce el avance del tubo a la zona de laminación en una longitud previamente seleccionada (1.3, 1.7, 2.5, 4.1, 8mm) y un giro (39° ó 51°) para corregir la parte de tubo laminado que había quedado en el espacio existente entre los rodillos. El movimiento de avance y giro del tubo se producen simultáneamente, cuando la caja de laminación está en su posición trasera.

Laminación del tubo:

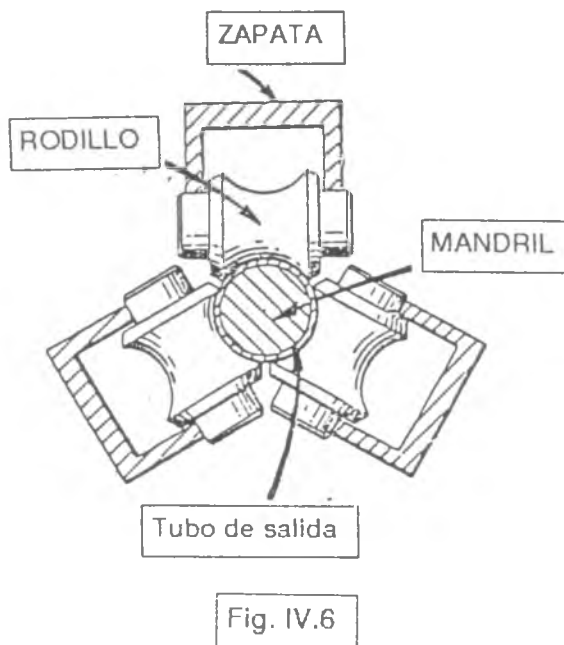
Una vez producidos el avance y el giro, los rodillos, guiados por la zapata, se cierran sobre el tubo y empiezan a reducirlo en diámetro hasta que la cara interior del tubo toca al mandril. En esta primera etapa de la deformación se produce un pequeño aumento del espesor.

La figura IV.5 muestra el momento en que los rodillos toman contacto con el tubo.



En una segunda etapa, se produce la reducción en espesor. Como la conicidad del mandril es muy pequeña, el diámetro interior permanece casi constante, por lo que la reducción en diámetro es proporcional a la variación del espesor.

La figura IV.6 muestra el momento en el cual los rodillos terminan de laminar el tubo.



El diámetro de la garganta del rodillo (la zona que está en contacto con el tubo), es mayor al diámetro del muñon que gira sobre las zapatas. Para que el rodillo gire sin resbalar tanto sobre el tubo como sobre la zapata, es necesario compensar la diferencia de velocidad angular entre la garganta del rodillo y el muñon. Esto se consigue por medio del sistema de palancas, que hace que la jaula de laminación donde están fijadas las zapatas, se desplace hacia adelante a mayor velocidad que el torpedo, que es el que fija la velocidad de desplazamiento de los rodillos.

Como la profundidad de la garganta cambia con el diámetro de tubo a laminar, mientras que el diámetro del muñon permanece fijo, también cambia la relación de velocidades, por lo que es necesario modificar la longitud de las palancas según tabla IV.1

El muñon del rodillo recorre sobre la zapata aproximadamente 200 mm., pero el rodillo recorre sobre el tubo una distancia dada por la relación entre el diámetro de la garganta que gira sobre el tubo (donde el deslizamiento es nulo) y el diámetro del muñon.

Influencia de los parámetros de laminación [8]:

- a) Avance: Aumentar el avance ocasiona daños en la superficie interior de los tubos, debido a que al aumentar el volumen de material a deformar, aumenta la cantidad de deformación aplicada por pasada; el deterioro de la superficie es proporcional a la cantidad de deformación aplicada por pasada. Además puede llegar a desprenderse material de la superficie del tubo, y esto provoca la aparición de material pegado sobre el mandril.

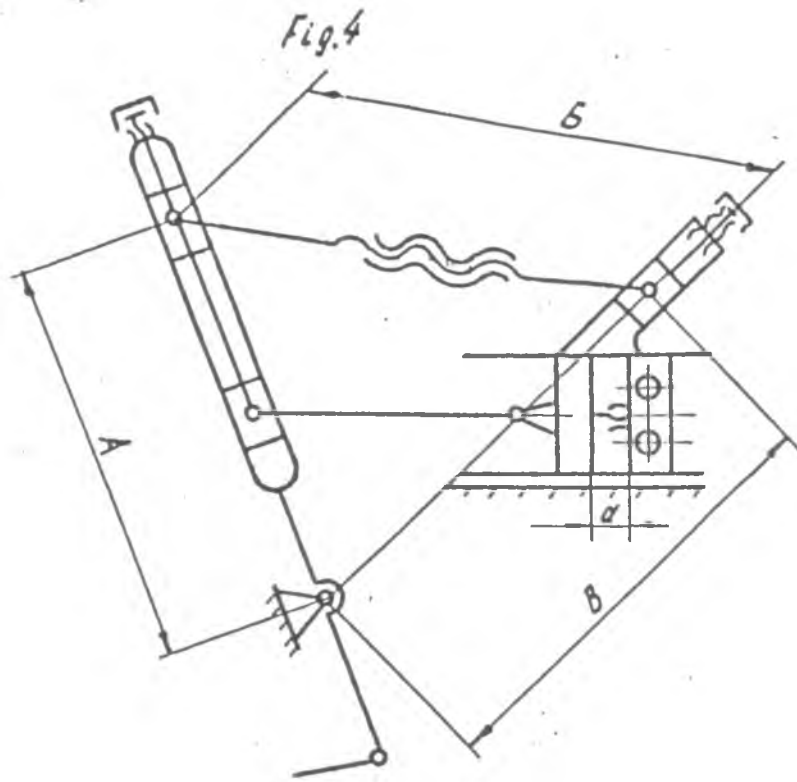


Tabla IV.1 mm

Diámetro del tubo acabado	a	Longitud de los brazos del sistema de corredera y palancas		
		A	B	B
8	2	485	362	436
9	4	480	364 ²	441 ⁵
10	6	474	367 ³	445 ⁴
11	8	468	370 ⁵	450 ⁵
12	9	463 ⁵	373 ³	455 ⁵
13	11	457 ⁶	377 ⁴	460 ⁵
14	13	451 ⁶	380 ³	466 ⁶
15	15	446 ⁶	384 ⁴	471 ⁵

ATUCHA

CAIBU

Esquema del sistema de palancas

Tabla IV.1

b) Número de golpes: si se aumenta el mismo, se requiere una refrigeración más intensa del tubo que está siendo laminado, puesto que el calor liberado como consecuencia de la deformación provoca la adherencia de material (por rotura de la capa de lubricante) a las herramientas de trabajo, principalmente el mandril.

c) Influencia de la lubricación:

En forma industrial, a la salida del laminador, se requiere:

- Aspecto visual correcto: ausencia de rayas y de material pegado o arrancado. (Se llama material pegado a las partículas de Zry desprendidas durante el proceso de laminación, que a su vez se adhieren al tubo al ser laminadas contra el mismo).
- Una rugosidad inferior a un valor límite.

Las dos condiciones anteriores dependen, en gran medida, de la eficacia de la lubricación. La portancia de la capa lubricante depende de dos factores principales:

- De la geometría del herramental.
- De la formulación del lubricante. Es un sebo refinado, al que se le adiciona un jabón de potasio (~ 16%), preparado a partir de materias grasas vegetales. La presencia de jabón permite al producto ser emulsificable en agua.

La lubricación interior del tubo se realiza con lubricante poco diluído, de esta forma la capa portante es más resistente pero la disipación de calor es baja. Para la lubricación exterior y a la vez refrigerar, se utiliza un caudal importante de lubricante bien diluído en agua.

Relación entre portancia y reducción:

Los estudios de Cook (1981), muestran la influencia de la deformación sobre la superficie interna de los tubos:

- Si la reducción de diámetro interno disminuye, aumenta la portancia.
- Aumentar el avance no modifica la portancia.
- El diseño del herramental influye sobre la forma de los picos y valles de rugosidad, más que sobre la portancia.

Resulta que conviene, para aumentar la portancia, tener poca reducción del diámetro interior, tal como ocurre en el proceso HPTR.

CAPITULO V : EL HERRAMENTAL

1) Herramental de la HPT 32:

Esta máquina utiliza dos calibres insertados en dos cilindros (Fig. V.1). Parte de la zona de descarga para avance y giro está tallada en los calibres, y parte, en los cilindros que lo soportan.

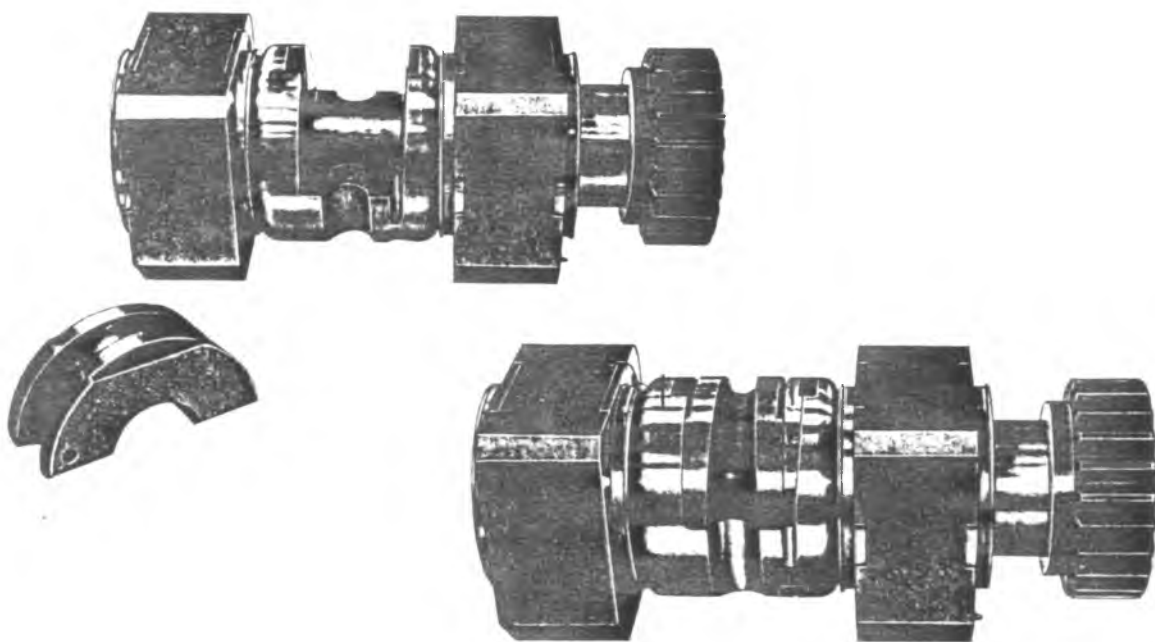


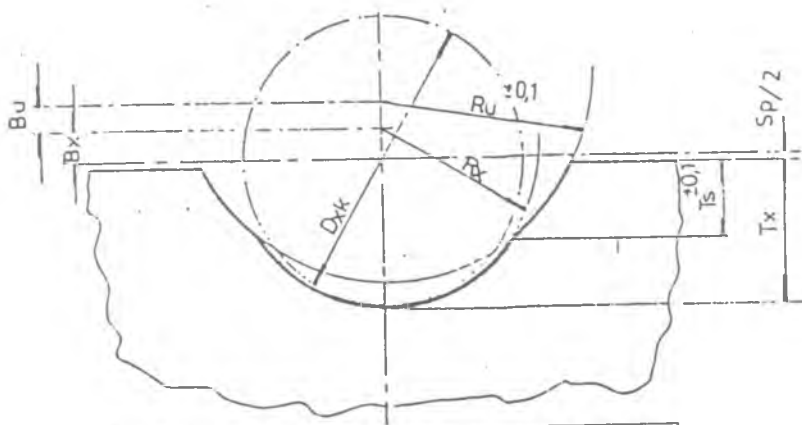
Fig. V.1

Los calibres tienen una garganta de deformación de perfil variable. El diámetro de entrada se adapta al diámetro del TREX y el diámetro de salida corresponde a la medida final del tubo. El perfil del calibre entre el diámetro de entrada y el de salida sigue una ley parabólica. Los calibres deforman al TREX contra un mandril que también sigue una ley parabólica, de esta forma, se consigue que la variación de espesor del TREX sea mayor al comienzo de la deformación, cuando el material aún no está endurecido por

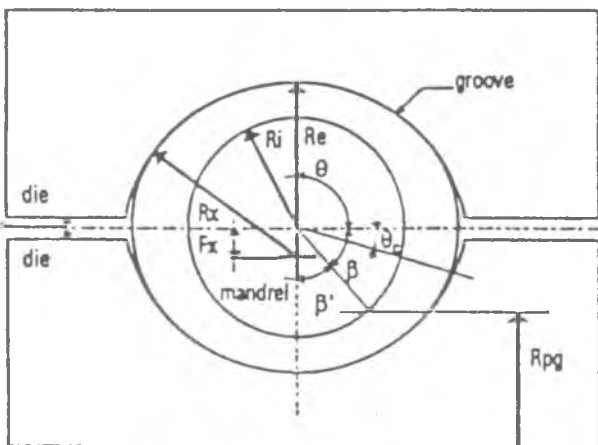
deformación y menor hacia el final de la misma, cuando está endurecido.

Al tener compensado el endurecimiento con la deformación, se consigue que la fuerza separatriz entre los calibres no presente un pico de esfuerzo, como el que presentaría un herramental de diseño cónico; de esta manera, se pueden realizar mayores deformaciones sin exceder la capacidad de la máquina.

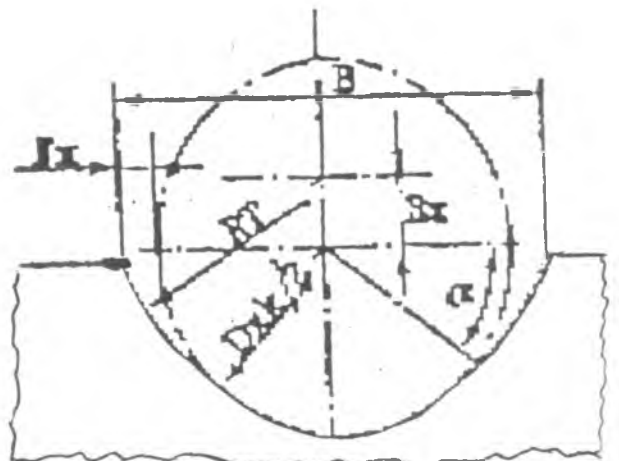
La sección transversal de los calibres puede ser[13]: (fig. V.2)



CIRCULAR CON CENTRO DESPLAZADO Y DESCARGA CIRCULAR



CIRCULAR CON CENTRO DESPLAZADO



CIRCULAR CON CENTRO CONCENTRICO Y DESCARGA CIRCULAR

Fig. V.2

El área de la garganta destinada a permitir el ensanchamiento del material durante la laminación (llamada descarga), tiene gran influencia en la calidad de los tubos y en la productividad de los trenes de laminación. Muchas dificultades en el trabajo y defectos en los tubos se deben a una incorrecta descarga de los calibres. Si la descarga es insuficiente, puede haber solapados o abolladuras en la superficie de los tubos, también arranque de material de la superficie del tubo.

Si es excesiva, disminuye la exactitud en los tubos terminados y pueden aparecer rajaduras en tubos elaborados con metales sensibles a la fragilización. Una descarga excesiva hace también que la caja de laminación deba trabajar demasiado en su carrera de retroceso, esto conduce a un desgaste rápido de los calibres[10].

La magnitud de la descarga depende de todos los factores involucrados en el proceso de laminación. La misma se ajusta en base a experiencia, debido a la compleja geometría del proceso y al desigual comportamiento en el ensanche de aleaciones diferentes.

2) Herramental de la HPT 15-30:

Debido a que esta máquina se utiliza para efectuar menores reducciones que la anterior, en este paso los esfuerzos son menores, por lo que los calibres tienen forma de anillo (fig. V.3) y van montados sobre un eje.

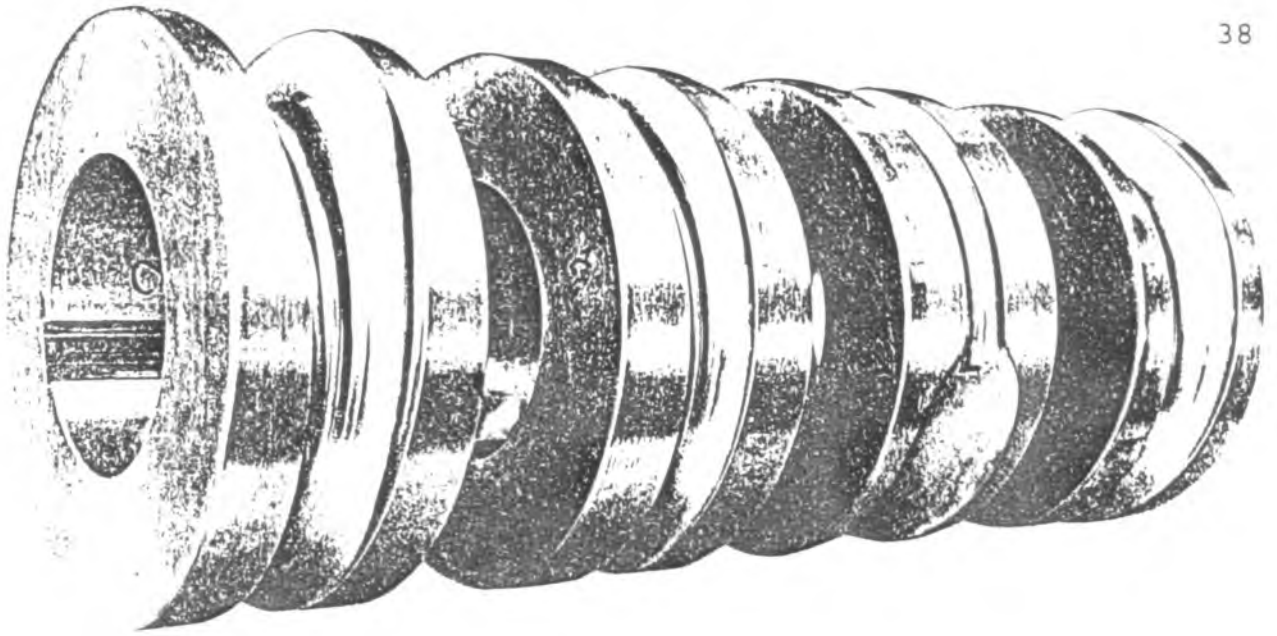


Fig. V.3

Al igual que en el caso anterior tanto el perfil de los calibres como el mandril, siguen una ley parabólica.

Las zonas de descarga para avance y giro están talladas en los propios calibres.

Materiales usados en los calibres de las máquinas anteriores:

Por indicación de los fabricantes rusos de las máquinas, tanto los calibres como los mandriles se construían de acero SAE 52100, que si bien es un acero económico, no tiene las mejores propiedades mecánicas, especialmente en cuanto a resistencia a la fatiga.

Como muchas fallas de los calibres ocurrían luego de la aparición de una grieta en la garganta, posiblemente por fatiga y los calibres muchas veces se partían al no resistir el esfuerzo de laminación, por indicación de Sandvik[14] se pasaron a utilizar los siguientes materiales:

Para el mandril: acero Uddeholm ASP 30 (obtenido por pulvimetalurgia). Con este acero no se presentaron más

inconvenientes con el mandril. Esto se debe a que el acero es más homogéneo, con una distribución fina de los carburos. Como el acero de partida se cuela al vacío, se tiene un menor número de inclusiones.

Para los calibres: acero Uddeholm SR 1855. Este acero tiene una composición similar al SAE 51100 más una adición de Si, para mejorar sus propiedades de resistencia a la fatiga. Con este acero aumentó la duración de los calibres.

Actualmente se utiliza el acero SAE H13 (acero para herramientas con alto contenido de Cromo, Molibdeno y Vanadio), que presenta aún mejores propiedades mecánicas, pero su precio es 2 a 3 veces mayor que el del acero anterior.

En cuanto al tratamiento térmico, conviene que el material empiece a transformarse a martensita comenzando en la zona de la garganta. Para lograr esto se utiliza un dispositivo que fuerza la circulación de aceite en la zona de la garganta del calibre. De esta manera se evita la aparición de burbujas de vapor en la superficie de la garganta, que son causa de aparición de puntos blandos en la misma.

3) Herramental de la HPTR 8-15:

Se compone de:

- Un juego de 3 zapatas.
- Un juego de 3 rodillos.
- Un mandril.

a) LA ZAPATA:

Se construyen según el plano N° 1

El propósito de estas piezas es actuar como soporte y guía de los rodillos. Se fabrican de acero SAE 52100.

Las zonas en las cuales están divididas las zapatas son:

- a) Avance y giro: $x_{a g}$
- b) Reducción del diámetro: x_d
- c) Reducción del espesor de pared y del diámetro externo: $x_{e d}$
- d) Calibración: x_c
- e) Salida: x_s

La longitud destinada al avance y giro está determinada por las características de la máquina.

El diseño de la zapata se basa principalmente en la determinación de la longitud de calibración del tubo y del perfil de la zona de reducción.

La longitud de la zona de calibración se puede determinar mediante la expresión:

$$x_c = \mu . m . k . R_u / R_k \quad (1)$$

Donde:

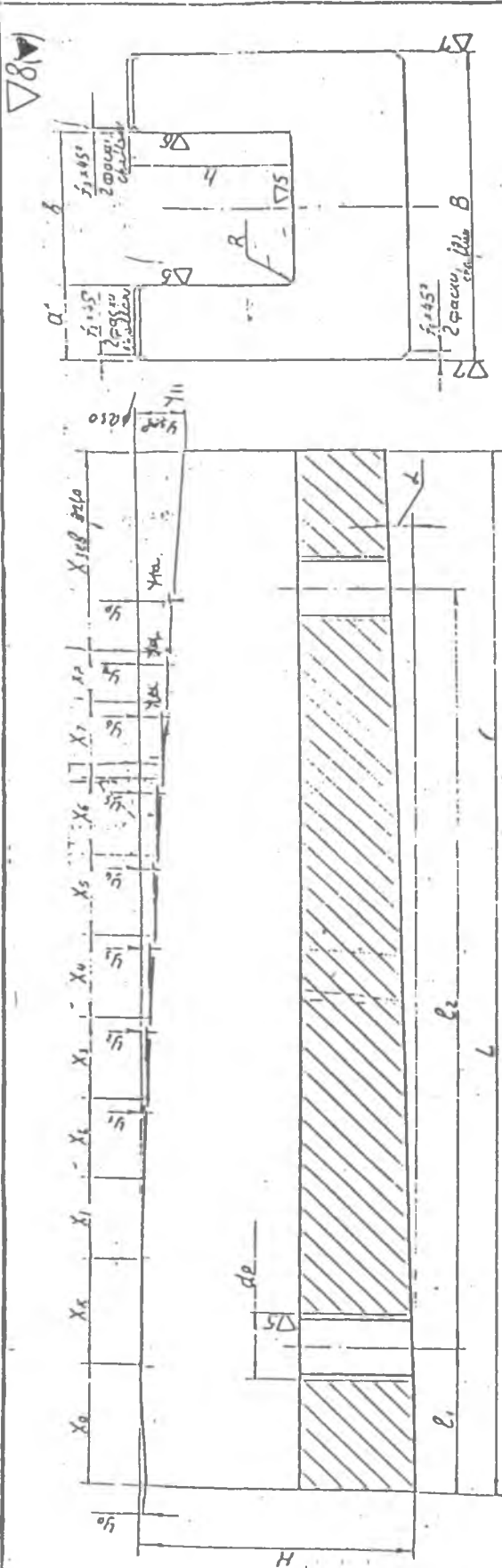
μ : factor de alargamiento.

m : avance del tubo en cada carrera.

R_u : radio del muñon.

R_k : radio de laminación del rodillo (radio en el cual el rodillo gira sobre el tubo sin deslizar).

k : factor que depende de la calidad. Se determina en forma experimental.



1. HRC 55...60, *свойства*
2. Плоски припускоба *комплектно*
3. Размер *за* *справки*
4. Материала *по* *комплектта* *и* *чертежа*.
5. Материал: *Сталь ШХ15 ГОСТ.301-60*

$$Y_p = \frac{D_{nom} - D_{int}}{2}, \quad Y_{set} \geq X_{set} (Y_p - Y_7) + Y_7, \quad \rho_1$$

$$Y_7 = \frac{D_{nom} - D_{int}}{2}, \quad \text{где: } D_{nom} = 200 \text{ (D}_{nom} - D_{int}) - (D_{nom} - D_{int})$$

$$Y_6 = 0.67 \cdot Y_7;$$

$$Y_5 = 0.48 \cdot Y_7;$$

$$Y_4 = 0.34 \cdot Y_7;$$

$$Y_3 = 0.22 \cdot Y_7;$$

$$Y_2 = 0.13 \cdot Y_7;$$

$$Y_1 = 0.06 \cdot Y_7;$$

Y₇ - диаметр шестерни
Y₆ - радиус закругления
Y₅ - радиус закругления
Y₄ - радиус закругления
Y₃ - радиус закругления
Y₂ - радиус закругления
Y₁ - радиус закругления

Plano N 1

Para la longitud de las demás zonas, el fabricante aconseja:

$x_{A G} : 36 \text{ mm.}$

$x_D : 14 \text{ mm.}$

$x_{B D} : 105 \text{ mm.}$

$x_S : 30 \text{ mm.}$

Estas longitudes implican un valor de longitud de la zona de calibración, $x_C : 25 \text{ mm.}$

La longitud de reducción de diámetro x_D , junto con el salto de diámetro exterior en la zona de reducción de diámetro, fija el ángulo de plegado del tubo contra el mandril. Si se toman como referencia las condiciones de laminación del tubo tipo Atucha II, para obtener el valor de $x_D = 14 \text{ mm.}$, que en el diseño de origen ruso es fijo para cualquier caso, se obtiene la siguiente expresión que tiene en cuenta las dimensiones del tubo de entrada y el de salida.

$$x_D = [(D_{mp} - D_e)/2]/[0,019*(R_k/R_u)] \quad (2)$$

Donde:

D_{mp} : Diámetro exterior del tubo de entrada.

D_e : Diámetro exterior al comienzo de la reducción de espesor.

Las alturas "y" se determinan de la siguiente manera:

$y_S : 0,2 \text{ mm.}$ De este modo queda determinado el ángulo de salida.

En la zona de salida se produce el cambio de sentido de rotación del rodillo. Debido a que el rodillo "flota" sobre resortes y realiza 120 carreras por minuto, el rodillo tiene un movimiento

inercial importante, por esta razón el ángulo de salida (que se convierte en ángulo de entrada en la carrera de retroceso) debe ser pequeño, para que el rodillo no golpee y abolle al tubo al tomar contacto con el mismo.

$$y_7 = t_o + \delta t - t_f$$

Donde:

t_o : espesor del tubo de entrada.

t_f : espesor del tubo de salida.

δt : engrosamiento. Se debe a la reducción del diámetro externo antes de que la superficie interior del tubo toque al mandril.

El fabricante aconseja tomar :

$$\delta t = 0.05.\delta d$$

Siendo δd el juego diametral entre tubo inicial y mandril, y se calcula de la siguiente forma:

$$\delta d = (De_o - 2.t_o) - (De_f - 2.t_f)$$

Esto equivale a restar los diámetros interiores.

En las longitudes $x_{A G}$ y x_D , el perfil de la zapata es lineal

$$y_p = (De_o - De_f)/2$$

$$y_z = [36(y_p - y_7)/x_D] + y_p$$

y_z está relacionada con y_p , de modo que el ángulo de la zona de avance y giro sea igual al ángulo de la zona de reducción de diámetro, por lo que una línea recta delimita ambas zonas.

En la longitud $x_{E D}$ el perfil de la zapata es parabólico, por las razones ya vistas.

El fabricante de la máquina sugiere:

$$y_6 = 0,67 \cdot y_7$$

$$y_5 = 0,48 \cdot y_7$$

$$y_4 = 0,34 \cdot y_7$$

$$y_3 = 0,22 \cdot y_7$$

$$y_2 = 0,13 \cdot y_7$$

$$y_1 = 0,06 \cdot y_7$$

Cada una de estas alturas "y", está separada 15 mm. de la anterior, a partir de y_7 .

Si tomamos los coeficientes y graficamos:

Tabla V.1

X	Y
1	0,06
2	0,13
3	0,22
4	0,34
5	0,48
6	0,67

La curva de ajuste sigue una ley parabólica, de la forma:

$$Y = 0,0142857 \cdot X^2 + 0,0205714 \cdot X + 0,028. \quad (3)$$

Si se modifican los coeficientes de esta ecuación, se obtiene para cada x, otro coeficiente y, de esta forma se pueden lograr otros perfiles de zapata.

En los dos primeros pasos de laminación, el perfil parabólico tiene como propósito evitar picos de esfuerzo, de modo de lograr el máximo aprovechamiento de la máquina.

Aquí, en el último paso de laminación, los esfuerzos son bajos. Lo que se busca es obtener una alta calidad superficial. Para lograr esto es necesario, también, que no haya picos de esfuerzo, ya que, donde los hubiera, sería más intenso el contacto entre el tubo y el herramental, y se generarían defectos. También aumentaría el desgaste de los rodillos.

b) EL RODILLO:

El rodillo se construye según el plano N° 2.

Material: SAE 52100.

Los valores a definir son el diámetro T , y los ángulos alfa y beta. Tales valores dependen fundamentalmente del material a laminar, del avance utilizado y del salto de diámetro entre el tubo de entrada y el de salida.

Donde:

$$D_o = 52 \text{ mm.}$$

$$D_u = 29 \text{ mm.}$$

$$B = 40 \text{ mm.}$$

$$b = 19 \text{ mm.}$$

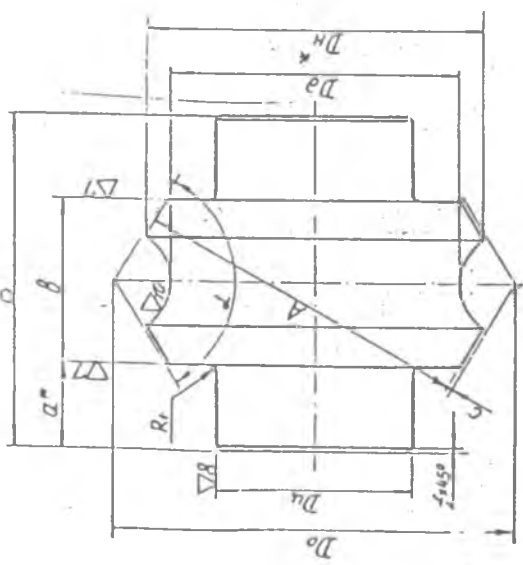
$$a = 10.5 \text{ mm.}$$

$$A = 44.2 \text{ mm.}$$

$$c = 0.4 \text{ mm.}$$

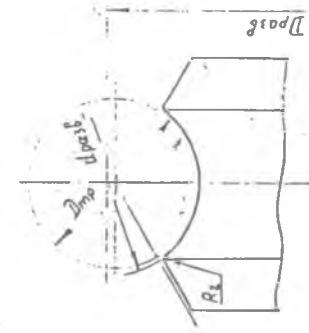
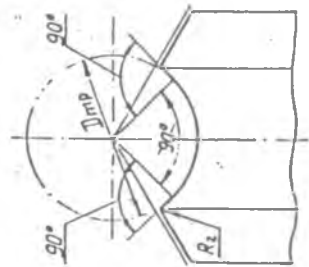
$$R_1 = R_2 = 0.5 \text{ mm.}$$

▽614



Designo de la herramienta
Разделка ручная для станков ХПТР 4-8-15, 15-30

Designo de la herramienta
Разделка ручная для станков ХПТР 30-60, 60-120



- $D_a = D_0 - \Delta \text{mp}$, *diámetro de garganta*
 - $D_{\text{praz}} = D_0 + 2(\text{cat} \cdot \text{mp})$, *aprox. id. tubo*
 - $D_{\text{praz}} = D_0 + \text{praz}$; *id. tubo de cemento de garganta*
 - $D_k = D_0 - 0.5 \Delta \text{mp}$, *diámetro ХПТР 4-8, 8-15, 15-30, 30-60;*
 - $D_k = D_0 - 0.7 \Delta \text{mp}$, *для станков ХПТР 50-120*
 - $D_k = D_0 - 0.866 \Delta \text{mp}$, *для станков ХПТР 4-8-15, 15-30, 30-60;*
 - $D_k = D_0 - 0.924 \Delta \text{mp}$, *для станков ХПТР 60-120*
- где: Δmp - толщина стенок готовой трубы, D_0 - диаметр стальной трубы, D_k - диаметр ролика*
- Лаз, т.е. толщина стенок трубы до и после проката*
- или Δmp - толщина стенок*
1. HRC 55...58
 2. Разделка ручная для станков ХПТР 4-8-15, 15-30, 30-60
 3. Разделка ручная для станков ХПТР 60-120
 4. Материал: Сталь ШХ15 ГОСТ 801-60

Рис. 1 Ролик

Estos valores son generales e independientes del tubo que se desee laminar. Para nuestro caso particular debemos fijar el diámetro T, de lo que resulta:

$$D_a = D_o - T$$

$$D_h \approx D_o - 0.5 T$$

El diseño ruso recomienda:

Diámetro T = Diámetro nominal del tubo de salida.

$$\alpha: 90^\circ \quad \beta: 90^\circ$$

Con estos valores se puede laminar sin problemas si el avance es de 1,3 mm.

El ángulo α determina la porción de garganta del rodillo que va a coincidir con el diámetro nominal del tubo, y el ángulo β la inclinación de dos rectas tangentes al diámetro T, que conforman la **zona de descarga** del rodillo. Esta zona de descarga permite al tubo que se está laminando ensanchar en forma transversal en una magnitud controlada.

Si la descarga es excesiva el tubo se desliza hacia adelante durante la laminación cuando no está sujeto por el patrón de avance y giro, esto es causa de defectos en el interior por roce contra el mandril y de variación dimensional (la medida del diámetro del tubo no es constante a lo largo del mismo).

Si la descarga es insuficiente el tubo presiona en forma excesiva contra la zona de descarga del rodillo y contra el mandril, esto ocasiona defectos en el tubo por arrastres ó arranques de material y la aparición de material pegado (pequeñas partículas de metal arrancadas del tubo) en los rodillos, el mandril y el tubo laminado.

El tubo queda agarrado al mandril por el siguiente mecanismo:

El Zry, al fluir entre los rodillos, lo hace por deformación plástica y esta deformación va precedida por una deformación elástica. Esta deformación elástica es la que genera la tensión elástica necesaria para que el tubo quede sujetado al mandril.

La zona de descarga del rodillo se puede controlar a través de la variación de los ángulos α y β . La descarga aumenta si disminuye α y/o si aumenta β .

Los datos recogidos sobre laminación de tubos de acero inoxidable y zircaloy muestran que α nunca es mayor a 90° (daría lugar a un rodillo muy cerrado) ni β es menor a 90° (por la misma razón).

Estos ángulos se determinan para cada caso particular en base a la experiencia, variando el ángulo α entre 70° y 90° , y el ángulo β entre 90° y 97° . Si el ángulo β es mayor a 90° origina un punto de inflexión en el empalme de las zonas delimitadas por estos ángulos que es desfavorable a la calidad del tubo, pero a veces es necesario hacerlo así para que el rodillo pueda tomar al tubo de entrada dentro de la garganta, si no fuera así los bordes del rodillo dejarían defectos en el tubo. Esta problema se presenta cuando la diferencia de diámetros entre el tubo de entrada y el de salida supera un cierto valor. Un ejemplo es el caso de los tubos para la central Atucha I.

c) EL MANDRIL: Se construye según el plano N°3.

Material: ASP 30.

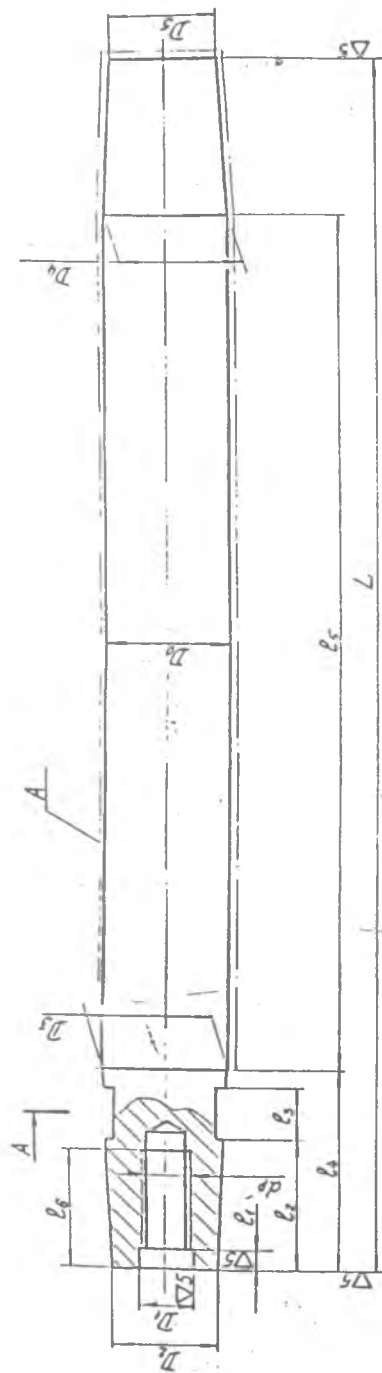
$$D_o = D_{mp} - 2 \cdot t_{mp}$$

Donde:

D_{mp} : Diámetro exterior del tubo a laminar.

t_{mp} : espesor del tubo a laminar.

Δ10/Δ



A-A

Тип стана УПТР	L	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₅	l ₆	d ₀
Клеть 4-8	400	—	—	—	20	370	—	—	—	—
8-15	400	5	20	10	40	350	20-30	M4, M8		
15-30	400	5	20	10	40	350	35	M8, M20		
30-60	490	5	0	20	40	420	45	M20, M36		
60-120	620	5	0	20	40	540	55	M36, M52		

тип ст. и л. машины

S - размер под ключ

$D_0 = D_{тр} - 2t_{тр}$;
 $D_1 = d_p + 0.5 \dots 1 \text{ мм}$;
 $D_2 = D_0 = D_0 - f \dots 2 \text{ мм}$;
 $D_3 = D_0 + 0.015 \dots 0.02 \text{ мм}$;
 $D_4 = D_0 - 0.015 \dots 0.02 \text{ мм}$;

где: $D_{тр}$ - наружный диаметр готовой трубы;
 $t_{тр}$ - толщина стенки готовой трубы;

1. Поверхность А хромить НРС 55...60
2. Обрабатывать оправку в продольной нарезке
3. Возвратность оправки не допускается
4. Материал: Сталь ШХ15 ГОСТ 201-60

Рис. 2 Оправка

En el plano se observa que el mandril tiene la medida del diámetro interior del tubo en la mitad de su longitud.

$$D3 = D_o + 0,015 \dots 0,020 \text{ mm.}$$

D3 junto con D4, determinan la conicidad del mandril.

$$D4 = D_o - 0,015 \dots 0,020 \text{ mm.}$$

El tubo deja de tocar al mandril a aproximadamente 7 cm. de la punta del mismo. En este punto, el diámetro del mandril es aproximadamente una centésima menor al diámetro interior que se quiere obtener en el tubo.

Como se observó que en las condiciones de laminación de FAE (en cuanto a reducción de área y avance), la recuperación es mayor, el diámetro del mandril en el punto que el tubo deja de estar en contacto con el mismo, es dos centésimas menor.

CAPITULO VI : LA DEFORMACIÓN

Herramental:

En [8] 1891 Deghral concluía que el perfil longitudinal óptimo debía ser una parábola de forma general $x^2 = 2py$. En 1927 Lobkowitz propuso un perfil hiperbólico de forma $2xy = a^2$. En los años '50, Gruner propuso un perfil exponencial del tipo $y_0 e^{-bx}$. En 1960, Sansome y Lloyd demostraron que el perfil parabólico da el esfuerzo máximo de laminado menor, readoptando las ideas de Degrahl.

La parábola adoptada define el camino de deformación.

El camino de deformación comprende la reducción del tubo sobre una longitud predefinida llamada L_{zr} y el calibrado del tubo sobre una longitud llamada L_{zc} .

La parábola se elige de forma tal de tener un máximo de reducción en la primera mitad de L_{zr} , donde la reducción es bien soportada por el metal en estado recocido ó aún poco endurecido por deformación, y la lubricación es abundante. Luego, debe haber una disminución progresiva del esfuerzo hacia la zona de calibración, donde va a definirse la calidad de la superficie del tubo.

Longitud de la zona de reducción L_{zr} :

Aumentar L_{zr} permite efectuar una deformación más gradual con disminución de las tensiones actuantes. Se obtienen así mejores superficies y disminuye el desgaste del herramental. Pero esto sólo puede lograrse disminuyendo la longitud de la parte calibrante, lo que puede deteriorar la exactitud dimensional.

Perfil transversal:

Para calcular la descarga óptima debemos tener en cuenta:

- El avance.
- La elongación.
- El perfil longitudinal del calibre.

Intentos de modelizar el proceso. Síntesis bibliográfica:

Por orden cronológico:

1) 1880. Descubrimiento del laminado por paso de peregrino, y primera tentativa de modelizarlo por Degrahl.

2) 1950. Aproximación 2D semi-empírica. Gelegi (1954-55) y Neuman y Siebel (1954).

Se hace un análisis de deformación plana, donde la tensión de fluencia varía según:

$$\sigma = \sigma_0(1 + 2\mu \cdot Ld/2e)$$

Donde:

σ = Tensión de fluencia.

Ld = Longitud de contacto.

e = espesor que está siendo laminado.

La fuerza separatriz será:

$$F = \sigma \cdot A_p$$

donde A_p es el área proyectada de contacto.

Este modelo supone un contacto uniforme tubo-matriz y no tiene en cuenta el trabajo redundante.

Gelegi introdujo otros factores:

$$\sigma = \sigma_0(1 + C\mu \cdot Ld/2D \cdot 4\sqrt{v})$$

donde C es un parámetro que depende de la relación Ld/e y se determina experimentalmente.

El coeficiente de rozamiento μ , depende del material, de la velocidad de trabajo del laminador y de la temperatura, el mismo sigue la expresión:

$$\mu = a - bT - cv \quad \text{donde } a, b \text{ y } c \text{ son constantes.}$$

La aproximación de Neuman y Siebel es más rigurosa, puesto que el endurecimiento del material está dado por una ley de Ludwik. El aspecto redundante de la deformación es tenido en cuenta con un parámetro Γ , que varía entre 0,6 y 0,8):

$$\sigma = \sigma_0 / \Gamma \cdot (1 + \mu \cdot Ld / 2e) \quad (1/\Gamma > 1)$$

3) 1960. Aproximación de Sansome y Lloyd. Trata el caso de un indentador plano. Su modelo es muy simplista.

Al análisis anterior, estos autores le agregaron una estimación de la longitud de contacto. Para el laminado de chapa es:

$$Ld = \sqrt{R h}$$

donde

R es el radio del cilindro, y

h la reducción de espesor.

Pero, para el laminado de tubos, este valor aumenta en un factor $\sqrt{2}$, como puede verse en la figura VI.1, debido a la onda que se forma delante del rodillo.

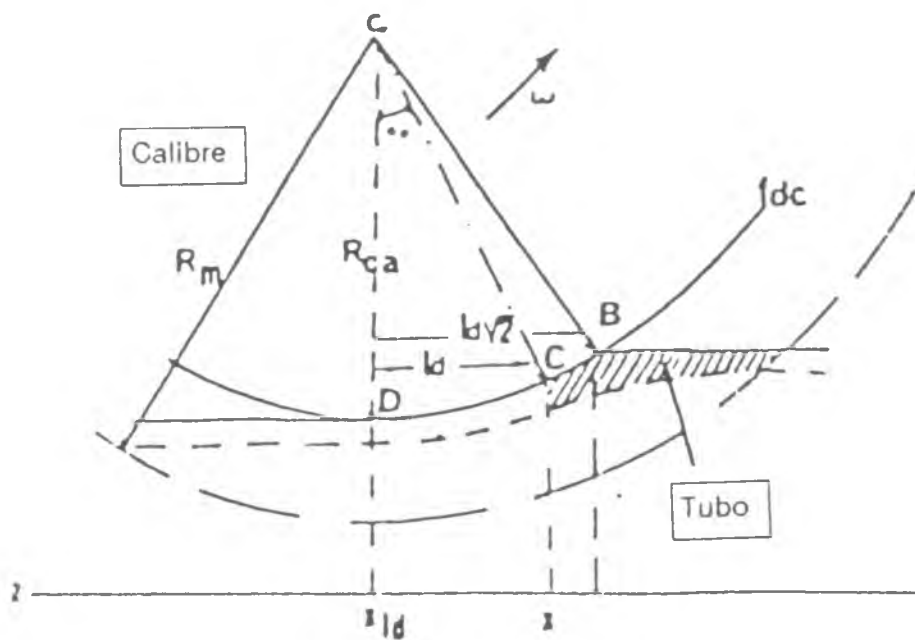


Fig. VI.1

4) 1975. Aproximación semiteórica de Yoshida, Matsui, Totai y Mandai, en tubos de cobre laminados en un laminador instrumentado. Estos autores, para tener en cuenta la variación de tensión con el ángulo ϕ , utilizaron un laminador instrumentado, con calibres provistos de detectores de presión. Con los datos experimentales obtenidos, integran los esfuerzos sobre la garganta y el esfuerzo total.

5) 1977. Análisis de la cinemática de contacto por Haleem, Cole y Sansome, que corrobora la aproximación realizada por Yoshida y Matsui.

6) 1981. Aproximación mas rigurosa por Hayashi y Furugen, utilizando la teoría de la plasticidad, y observación fina de la deformación realizada en los laboratorios de Sumitomo Metal (Japón).

El modelo calcula (en base a mediciones experimentales):

Las tres deformaciones locales (ϵ_r , ϵ_ϕ , ϵ_z)

Las tres tensiones locales (σ_r , σ_ϕ , σ_z)

El esfuerzo de laminado global P.

7) 1990. Farrugia, en Francia, hace el siguiente análisis:

En coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z), la deformación local del tubo en una dada estación, se representa por un tensor de la forma:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_\phi & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad \text{despreciando el término } \epsilon_{\phi z} \text{ de rotación del tubo.}$$

En una estación dada, luego de una pasada de laminación, se tiene un cierto diámetro y espesor (diámetro y espesor final, D_f y e_f). Al avanzar el tubo, en esa estación se tienen las dimensiones que habían una distancia "m", más atrás (diámetro y espesor inicial, D_i y e_i). Al volver a laminar, se tienen las siguientes deformaciones:

$$\epsilon_r = -\ln (e_f / e_i)$$

$$\epsilon_\phi = -\ln (D_{Mf} / D_{Mi})$$

Donde: D_{Mf} y D_{Mi} son los diámetros medios final e inicial.

$$\epsilon_z = \epsilon_r + \epsilon_\phi$$

Esta última expresión se debe al carácter incompresible de la deformación plástica:

$$\epsilon_r + \epsilon_\phi + \epsilon_z = 0$$

Luego, este autor deduce expresiones que tienen en cuenta la no uniformidad de contacto tubo-calibre (debido a la diferente geometría del tubo y del calibre) y la no uniformidad del espesor que está siendo laminado luego del giro del tubo.

Obtiene la siguiente expresión para la fuerza separatriz:

$$P(x) = 1,45 P_{m_o}(x) \cdot L_{d_o}(x) \cdot r_{usi}(x)$$

Donde:

$P_m(x)$ = presión media en x. (Experimental, laminando plastilina)

$L_d(x)$ = longitud del arco de contacto. (La de Neuman y Siebel)

$r_{usi}(x)$ = radio de la garganta del calibre.

Subíndice o : significa en el fondo de la garganta del calibre

Para que esta expresión ajuste con la experiencia, hace variar el coeficiente de rozamiento entre 0,05 y 0,2; desde el comienzo al fin de la zona de deformación.

8) 1993. Aubin, Girard y Montmitonnet[15]. Hicieron un modelo basado en definiciones geométricas de las deformaciones, transformadas en tensiones vía el criterio de fluencia de Von Mises y el método del bloque.

Introducción:

La complejidad del análisis del proceso paso de peregrino, surge de al menos tres condiciones:

1) La geometría de la herramienta es compleja: la evolución radial del mandril y el perfil de la garganta del calibre siguen una ley parabólica, con un perfil transversal con descarga en los lados.

2) El proceso es muy influenciado por la deformación elástica de la herramienta: el mandril tiene un movimiento axial (elástico), y la fuerza separatriz crea un gap entre los rodillos, por lo que se modifican la evolución del diámetro y del espesor. El aplastamiento en el fondo del calibre, influencia fuertemente el estado de tensión.

3) Finalmente, surgen efectos dinámicos de la aceleración debido al movimiento hacia adelante y atrás de los calibres (hasta 260 ciclos por minuto).

La fuerza separatriz y sus consecuencias:

La fuerza separatriz produce un gap entre los rodillos, que puede ser medido midiendo el aplastamiento de un alambre metido entre ellos durante una carrera.

Otra consecuencia de la fuerza separatriz es la deformación elástica de los calibres, especialmente el aplastamiento de los rodillos, que significativamente influencia la longitud de contacto L_d y las tensiones.

Para medir el área de contacto, se pinta en una dada estación el tubo parcialmente trabajado. Luego, se cierran los calibres con la fuerza correspondiente a esta estación (que fue previamente medida): el área donde la pintura ha sido comprimida, es el área de contacto.

Se ha observado que la longitud de contacto es sólo ligeramente dependiente de la posición radial alrededor del mandril.

La longitud de contacto medida es significativamente más grande que la calculada por la fórmula de Siebel y Neumann.

La diferencia se debe al aplastamiento de los rodillos.

Bajo condiciones reales de trabajo, el aplastamiento de los rodillos puede multiplicar la longitud de contacto por un factor mayor a 2. Por esta razón es un efecto importante que nunca debe ser descuidado, cuando se analiza la deformación plástica del tubo.

La figura VI.2 muestra las longitudes de contacto que se encuentran durante la laminación de tubos, teniendo en cuenta el aplastamiento de los rodillos y la onda de deformación delante de los mismos.

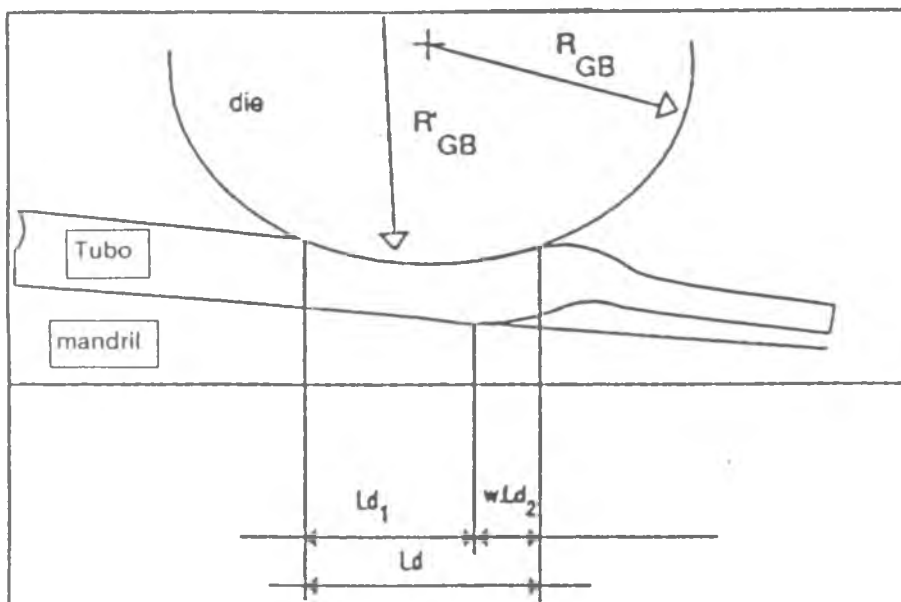


Fig. VI.2

La fórmula corregida para el radio equivalente deformado es:

$$R' = R. \{1 + 16(1-\delta^2).F / \pi E. e\}$$

Donde:

R: radio del calibre en el fondo de la garganta.

e: reducción del espesor del tubo durante una carrera.

E, δ : módulo de Young y de Poisson (del material del calibre).

F: fuerza separatriz.

También es necesario tener en cuenta, un factor W, para el incremento de la longitud de contacto debido a la onda de deformación que se forma delante del calibre. Este factor de ajuste es mayor a 1 y ha sido ocasionalmente encontrado igual a 4; el valor normal está alrededor de 1,5 a 2. Así, la longitud del arco de contacto puede ser expresada por la siguiente fórmula (para una estación dada):

$$Ld = \sqrt{2mR'(S_1/S_k)} \cdot (C_c - C_k) + W \cdot \sqrt{2mR(S_1/S_k)} C_k$$

Donde:

m: longitud de alimentación (avance)

S_1, S_k : sección del tubo después y antes de la pasada de laminación.

C_c : 1/2 de la conicidad del calibre.

C_k : conicidad del mandril.

El análisis de los resultados, muestra que la fórmula de Hitchcok y el factor de onda pueden ser considerados suficientes para realizar un cálculo aproximado.

Medida de las deformaciones de corte:

Se sabe que ocurre torsión del tubo durante la laminación. Es bien conocido el hecho que una marca radial en el tubo de entrada puede ser oblicua a la salida. Estas dos observaciones muestran que se desarrollan tensiones de corte. Su predicción es muy difícil bajo condiciones reales, por lo que su medición es un prerequisite para su inclusión en el modelo.

Haciendo una medición colocando insertos:

$$\epsilon_{\theta z} \approx 0,02-0,03$$

Este valor tan bajo puede despreciarse.

Por el contrario, la $\epsilon_{rz} = \text{tg } \Gamma / \sqrt{3}$

Ver figura VI.3

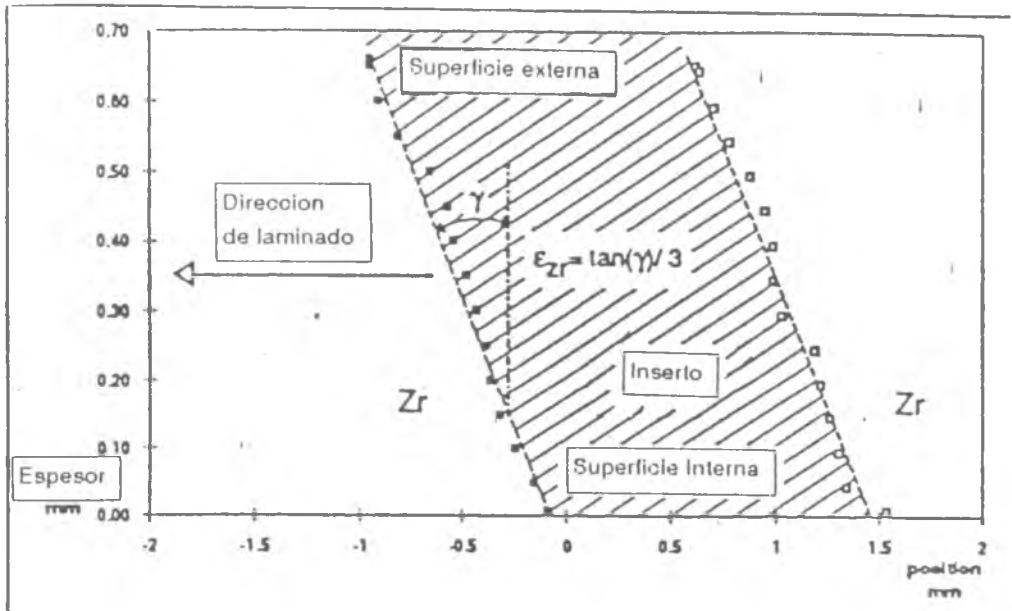


Fig. VI 3

El ángulo Γ luego de la laminación es normalmente de 40° a 55° y

$$\epsilon_{rz} = (1/\sqrt{3}) \cdot \text{tg } \Gamma = 0,5-0,8$$

que no es un valor despreciable con respecto a los otros componentes de deformación.

A través de una aproximación por elementos finitos, se ha visto que un incremento de ϵ_{rz} es proporcional al incremento de elongación ϵ_{zz} y que también depende del coeficiente de fricción (interno y externo) y del factor de deslizamiento, determinado por el diseño del herramental. Es también muy sensible a cualquier cosa que perturbe una tendencia al movimiento hacia adelante (adhesión del tubo sobre el mandril) ó hacia atrás (restricción por el carro alimentador).

Incrementos de deformación:

Las deformaciones son consideradas homogéneas alrededor de la sección transversal.

Las componentes ϵ_{zz} , $\epsilon_{\psi\psi}$ y ϵ_{rr} se definen igual que en el modelo de Farrugia.

El tensor de deformación se completa por el incremento medido de la deformación de corte.

La deformación equivalente es:

$$\epsilon = \sqrt{2/3(\epsilon_{zz}^2 + \epsilon_{\psi\psi}^2 + \epsilon_{rr}^2 + 2 \epsilon_{rz}^2)}$$

Las componentes de tensión se pueden calcular a partir del criterio de fluencia de Von Mises.

σ_{zz} se puede calcular por medio de una ecuación diferencial, deducida a partir de la aplicación del método del bloque, en función del coeficiente de rozamiento interno y externo, de los ángulos de contacto interno y externo y de la conicidad local del calibre y del mandril. Debido a la dificultad para conocer estas

condiciones de borde, las mismas se deducen a partir de la fuerza restrictiva impuesta por la mordaza de salida (esta mordaza impide que el tubo se deslice hacia adelante al ser laminado).

La fuerza separatriz será:

$$F = \sigma_{rx} \cdot Ld \cdot D$$

Diseño de la zapata por computadora:

Se confeccionó una planilla de cálculo para diseñar la zapata según el criterio ruso, y también para realizar otros diseños. Se pueden modificar tanto las longitudes, como el perfil de deformación.

El criterio para el diseño de la zapata se basa en encontrar la forma óptima de la curva de esfuerzo. La forma debe ser tal que no presente picos, y el esfuerzo vaya disminuyendo progresivamente al acercarnos a la zona de calibración.

La forma de la curva de esfuerzo depende de:

- La forma de la zapata, que fija el estado de deformaciones a lo largo de la garganta de deformación
- La curva de endurecimiento del material, que junto al estado de deformaciones, fija el estado de tensiones.

Modificación de la longitud de las distintas zonas de la zapata:

Se pueden modificar las longitudes de descarga delantera, calibración, reducción de diámetro y reducción de diámetro y de espesor. La suma de estas longitudes más la de avance y giro debe ser igual a 210 mm.

Modificación del perfil de deformación:

Para modificar el perfil de deformación, se pueden modificar los coeficientes de la parábola de ajuste de los coeficientes de la zapata. (Fórmula 3 del cap. V).

Si se modifica la constante, se consigue influir en forma importante sobre los primeros coeficientes, y poco sobre los últimos. La influencia sobre la curva de esfuerzo se da hacia el final de la misma. Si se coloca como constante el valor 0.005, dejando los otros coeficientes como los de la zapata rusa, se obtienen los coeficientes de la zapata modificada.

La figura VI.4 compara las curvas de esfuerzo calculadas, pudiéndose observar que la zapata rusa no es la ideal. Esto se debe a que la última reducción de espesor es la mitad de la anterior, o sea que en esta zona la zapata presenta un diseño cónico, que no compensa el aumento del endurecimiento del material que está siendo laminado.

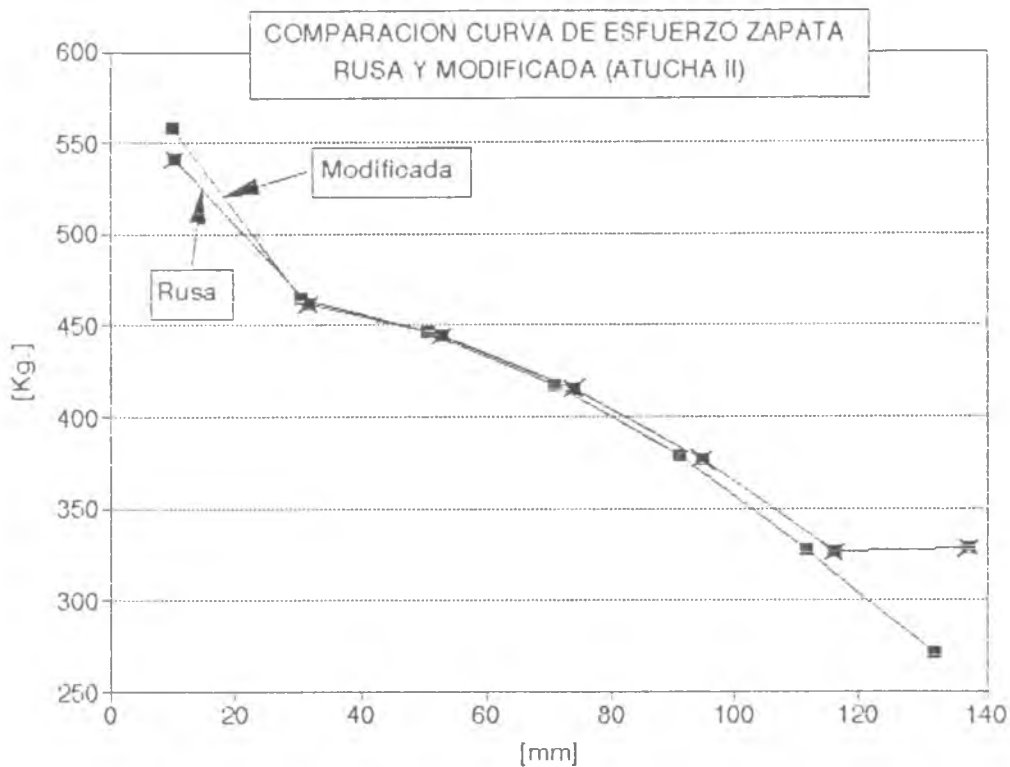


Fig. VI.4

Para calcular la fuerza separatriz, se usa la siguiente fórmula:

$$P = F_c \cdot \sigma \cdot L_d \cdot D$$

Donde:

F_c : factor debido al rozamiento. En este caso se usa el factor dado por Ekelund para laminación en frío.

σ : tensión de fluencia del material en la zona considerada.

(Como se considera un caso de deformación plana, esta tensión excede en un factor 1,155 a la obtenida en un ensayo uniaxial convencional).

L_d : longitud de contacto rodillo-tubo en forma longitudinal.

D : ancho proyectado de contacto.

Cada uno de estos factores se determina de la siguiente manera:

$$F_c = 1 + (1,6 \cdot \mu \cdot \sqrt{R' h} - 1,2 h) / (h_1 + h_2)$$

Donde:

μ = Coeficiente de rozamiento. Es de 0,05 a 0,1

R' = Radio del fondo de la garganta del rodillo ($D_a/2$), corregido por aplastamiento.

h = reducción de espesor del tubo en la zona considerada.

h_1 = espesor inicial.

h_2 = espesor final.

$$L_d = \sqrt{2mR' \cdot (S_1/S_k) \cdot (\beta - \delta)} + \sqrt{2mR \cdot (S_1/S_k) \cdot \delta}$$

Donde:

m = avance.

S_1 = sección transversal final en la zona considerada.

S_k = sección transversal inicial en la zona considerada.

β = Conicidad del perfil exterior. Es: $\arctg 0,5[d/dx(D_{e_x})]$

δ = Conicidad del perfil interior. Es: $\arctg 0,5[d/dx(d_{i_x})]$

Para laminación plana, la longitud de contacto L_d es igual a $\sqrt{R'h}$. En este caso de laminación de tubos, los factores que acompañan a R en la fórmula de L_d son para calcular h . Es un h particular debido a la geometría del proceso.

D = Se determina experimentalmente. Es el ancho proyectado de la zona de contacto de los rodillos. Pintando una garganta de laminación de Atucha II, y observando donde los rodillos borran la pintura, se determinó que el ancho medido sobre el tubo sigue aproximadamente la siguiente expresión:

$$[(D_{e_i} + D_{e_f})/2] \cdot \pi/5$$

Donde:

D_{e_i} = Diámetro exterior inicial de la estación considerada.

D_{e_f} = Diámetro exterior final de la estación considerada.

El ancho proyectado es la cuerda del ancho medido.

σ : Se determina de la siguiente manera. Primero, en función de la geometría de zapata propuesta se calculan las deformaciones impuestas al tubo por cada una de las zonas de zapata, la componente ϵ_{rz} se estima en función del siguiente criterio, ante la imposibilidad de obtener una medición experimental debido al poco espesor del tubo. En la publicación [15] los autores encuentran que el ángulo final es de 40° a 55° grados, pero su reducción de área es mucho mayor a los casos aquí considerados (83%) y, debido al uso del sistema HPT, el deslizamiento entre el tubo y los calibres es mucho mayor que en HPTR, por lo tanto en nuestro caso el ángulo será menor y se estima en 30 grados. Para cada estación, el ángulo se calcula de la siguiente forma: se multiplica el ángulo total estimado por la relación entre la

disminución del espesor en esa estación y la reducción de espesor total.

Con la deformación equivalente, se entra en la curva de endurecimiento del material por tracción y se obtiene la "curva de endurecimiento de la garganta", ya que sobre la garganta es donde se va a laminar.

Luego, en función del avance, de la conicidad del mandril y de la geometría de la zapata, se calculan los factores que intervienen en la fórmula de la fuerza separatriz. Haciendo el producto, se obtiene el valor de la misma.

Corrección del radio por aplastamiento de los rodillos:

Se utiliza la fórmula de Hitchcok:

$$R' = R.(1 + c.P/h.D)$$

Donde $c = 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kg}$. Para el acero.

En el cálculo de R' (por método iterativo, tomando $R'=R$ para calcular un primer valor de esfuerzo), se presenta un inconveniente. Como h está en el denominador, a medida que baja el h , aumenta mucho el R' , tomando valores que no corresponden con la realidad.

En la figura VI.5 se puede observar que en una comparación realizada entre la longitud de contacto calculada y la medida, luego de una primer zona que corresponde a la reducción de diámetro, hay un factor constante entre ambas curvas. Teniendo en cuenta este hecho, se calcula el radio corregido para la primera estación, y luego el mismo se mantiene constante para las restantes.

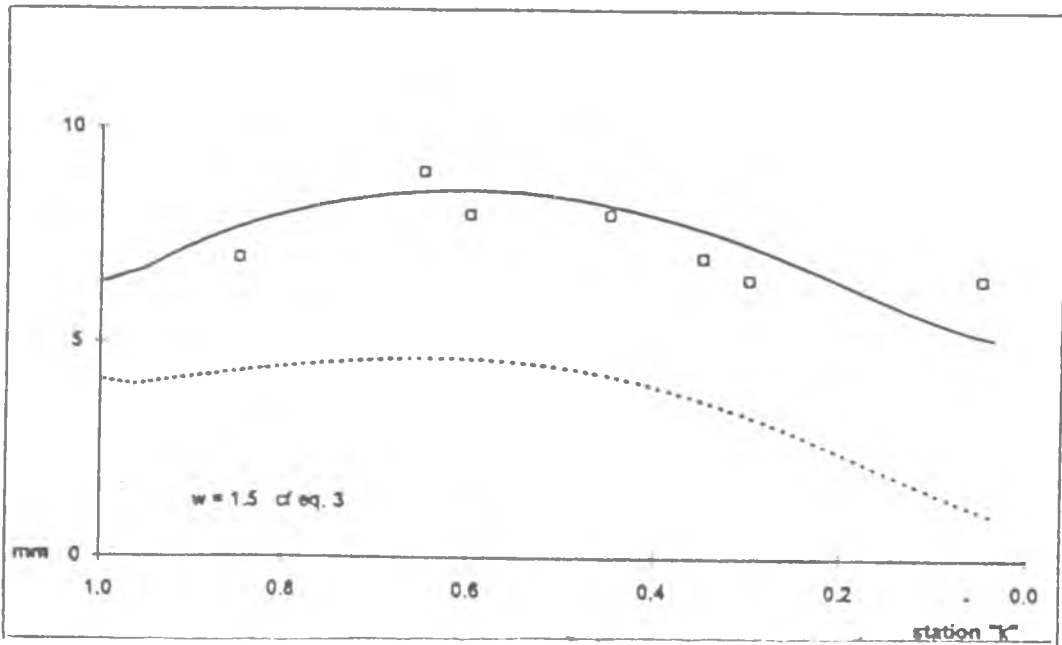


Fig. VI.5

En el anexo 5 se da un ejemplo de la planilla de cálculo.

Para conocer la influencia de los componentes de deformación que menos influyen en la deformación equivalente, se hicieron para el tubo tipo Atucha II, los siguientes gráficos:

La figura VI.6 muestra la influencia sobre la fuerza separatriz que tiene la consideración o no de la componente de deformación debida a la reducción del diámetro (en la zona de reducción de diámetro y espesor).

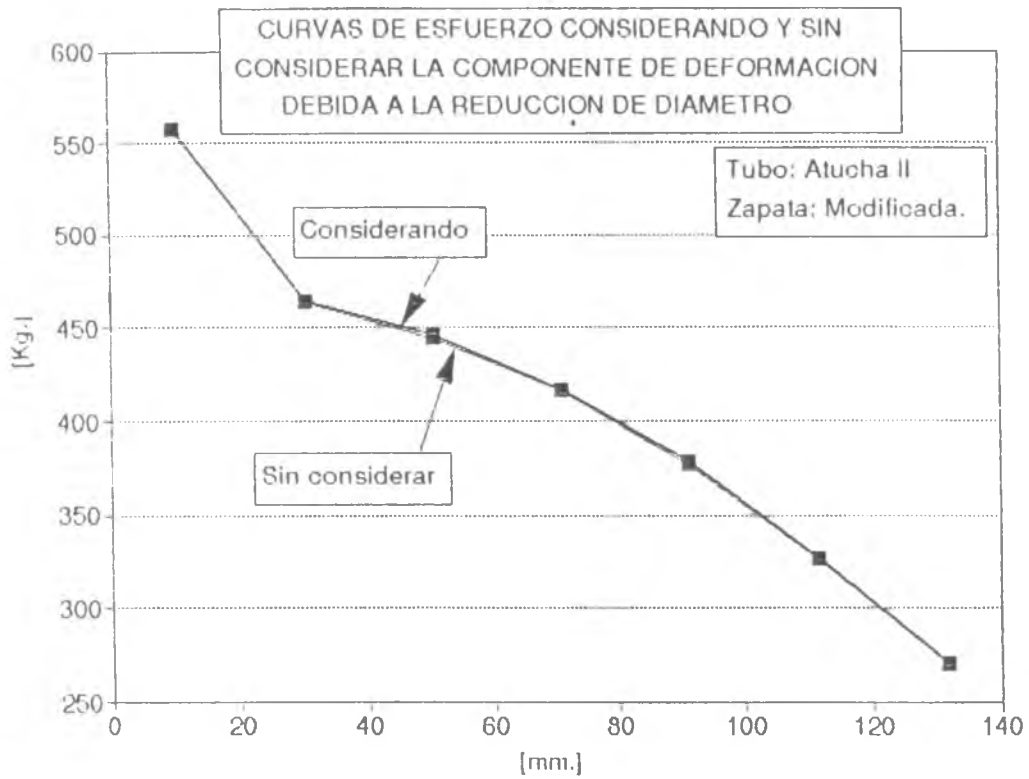


Fig. VI.6

La figura VI.7 muestra la influencia sobre la fuerza separatriz del ángulo estimado de inclinación de la pared del tubo "Γ".

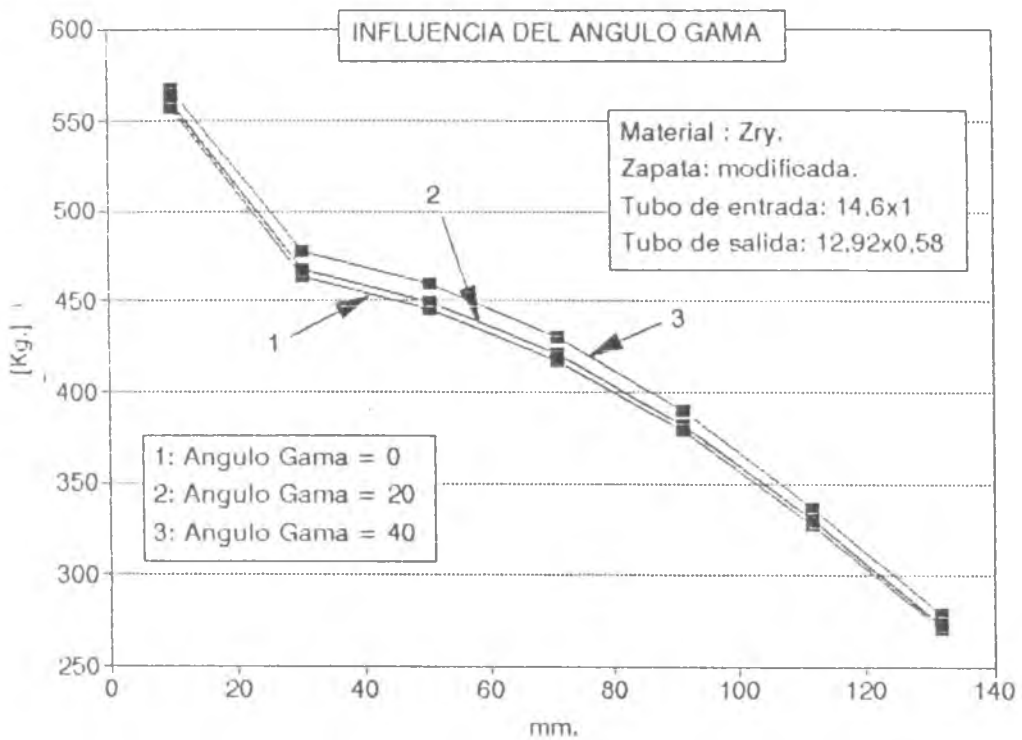


Fig. VI.7

Se observa que ambas componentes, especialmente la reducción de diámetro, influyen de manera poco significativa en la fuerza separatriz resultante. Si estas componentes no se tienen en cuenta, se estarían considerando sólo las componentes de reducción de diámetro y de estiramiento, o sea el problema queda reducido a un caso de laminación plana en cuanto a la deformación. La principal diferencia entre la laminación de tubos en la HPTR 8-15 y un laminador plano se encuentra en la expresión de la longitud de contacto.

En las figuras se observa un pico de esfuerzo en el primer tramo de la deformación de espesor. Esto probablemente se deba a que los coeficientes de la zapata no fueron determinados para el zircaloy. En la referencia[11] dice que el fabricante recomienda esos coeficientes para laminar acero, pero no dice cual.

La curva de esfuerzo que los rusos pretenden obtener con la zapata de perfil parabólico es la representada en la figura VI.8. El esfuerzo va disminuyendo a medida que avanza la deformación.

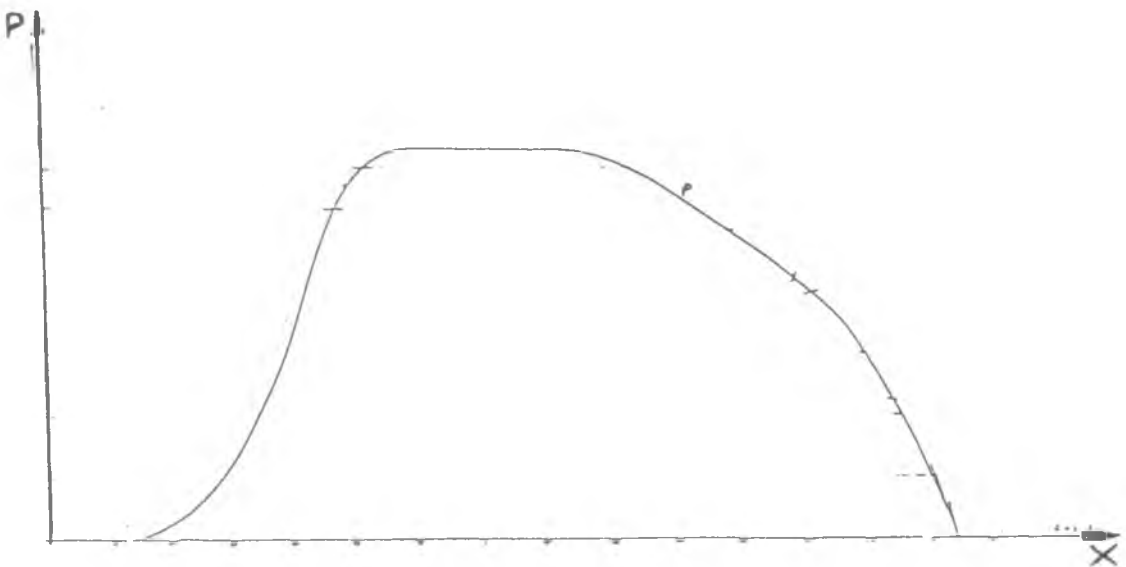


Fig. VI.8

En la figura VI.9 está representada la curva de esfuerzo calculada para el acero 304L.

Donde:

$$\sigma_0 = 20 \text{ Kg/mm}^2$$

$$K = 110$$

$$n = 0,75$$

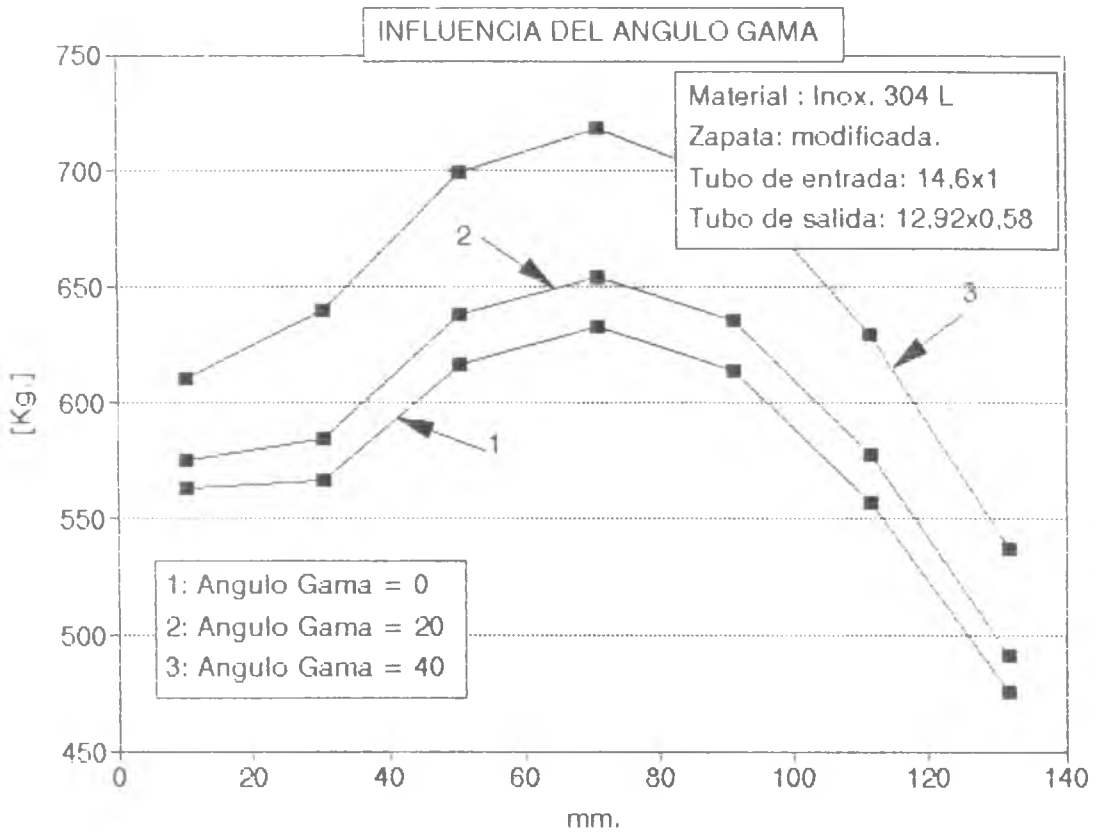


Fig. VI.9

La curva muestra que el esfuerzo es creciente a medida que avanza la deformación. Además se observa que la influencia del ángulo Γ es significativa. Suponiendo que los cálculos son aproximadamente correctos, se considera que la zapata no fue diseñada para este acero.

En la figura VI.10 está representada la curva de esfuerzo con la zapata de diseño ruso y el acero 4340.

Donde:

$$\sigma_0 = 30 \text{ Kg/mm}^2$$

$$K = 65,1$$

$$n = 0,15$$

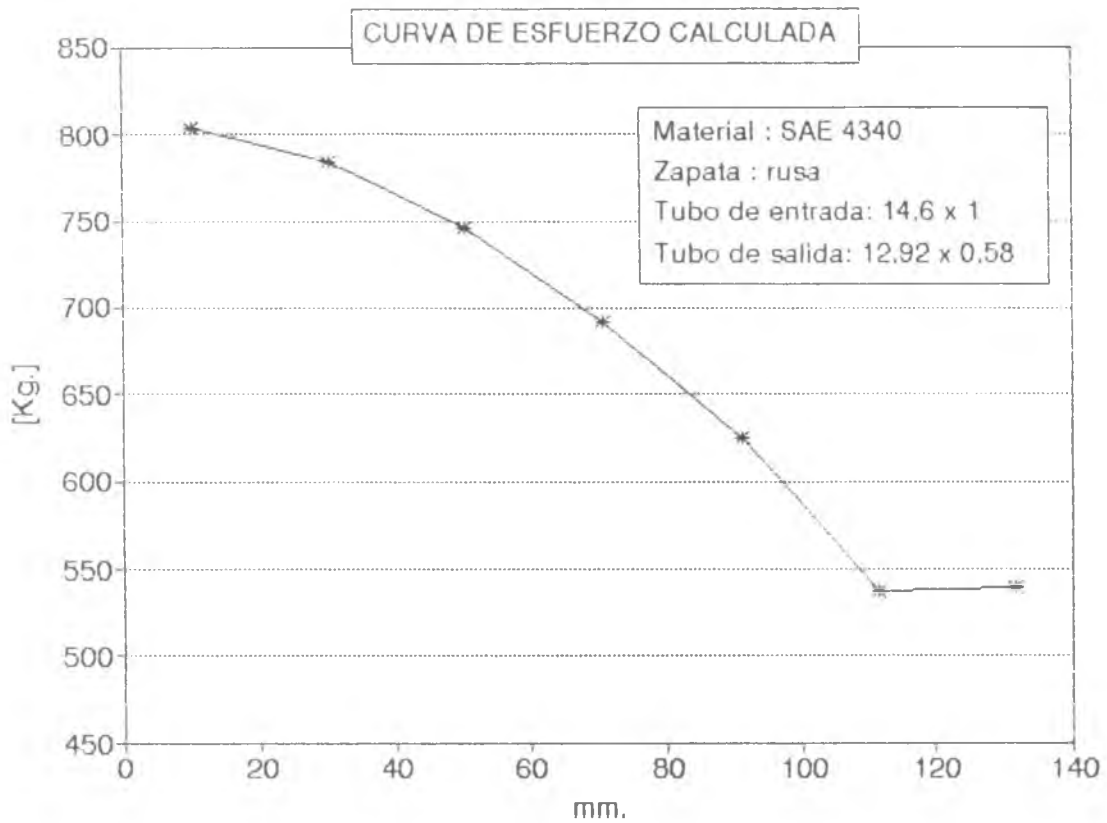


Fig. VI.10

Con este material, la curva de esfuerzo si coincide aproximadamente con la cada por los rusos, por lo que probablemente la zapata fue diseñada para un acero de este tipo. Si esto es así, las curvas

calculadas son válidas y pueden utilizarse para encontrar el perfil de zapata más favorable.

Para obtener una validación experimental de la curva de esfuerzo calculada, se midió la corriente consumida por el motor durante la laminación utilizando una pinza amperométrica conectada a un registrador. Se pretendía encontrar una relación entre el esfuerzo de laminación (variable) y la corriente consumida. Resultó que estas variaciones de corriente no pudieron ser detectadas, ya que probablemente sean muy pequeñas frente a la corriente consumida total.

En las figuras VI.6 y VI.7 se observa que hay un pico en la curva de esfuerzo. La curva de esfuerzo ideal no debe presentar este pico. En la figura VI.11 está representada la curva de esfuerzo usada en Zircotube[15], para el último paso de laminación. La misma no presenta picos y el esfuerzo va disminuyendo hacia la zona de calibración, al igual que ocurre en la curva de esfuerzo suministrada por el fabricante de las máquinas.

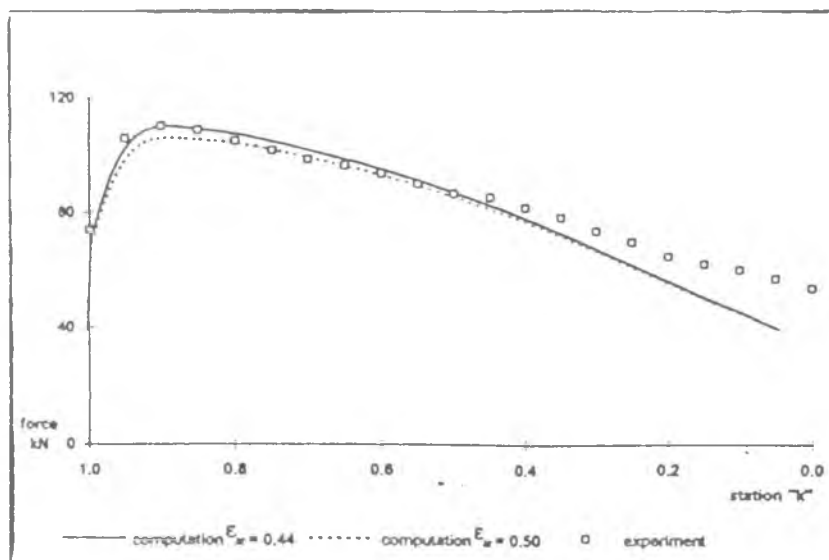


Fig. VI.11

Tomando esta curva de esfuerzo como referencia, se buscaron los coeficientes que eliminen el pico de esfuerzo, para obtener una zapata corregida, los mismos son:

Tabla VI.1: Coeficientes de zapata corregidos por cálculo.

	Para Atucha I	Para Atucha II	Para Embalse
1	0,76	0,74	0,72
2	0,55	0,53	0,52
3	0,37	0,36	0,35
4	0,22	0,22	0,22
5	0,12	0,11	0,11
6	0,04	0,04	0,04

Las curvas de esfuerzo obtenidas se representan en la figura VI.12.

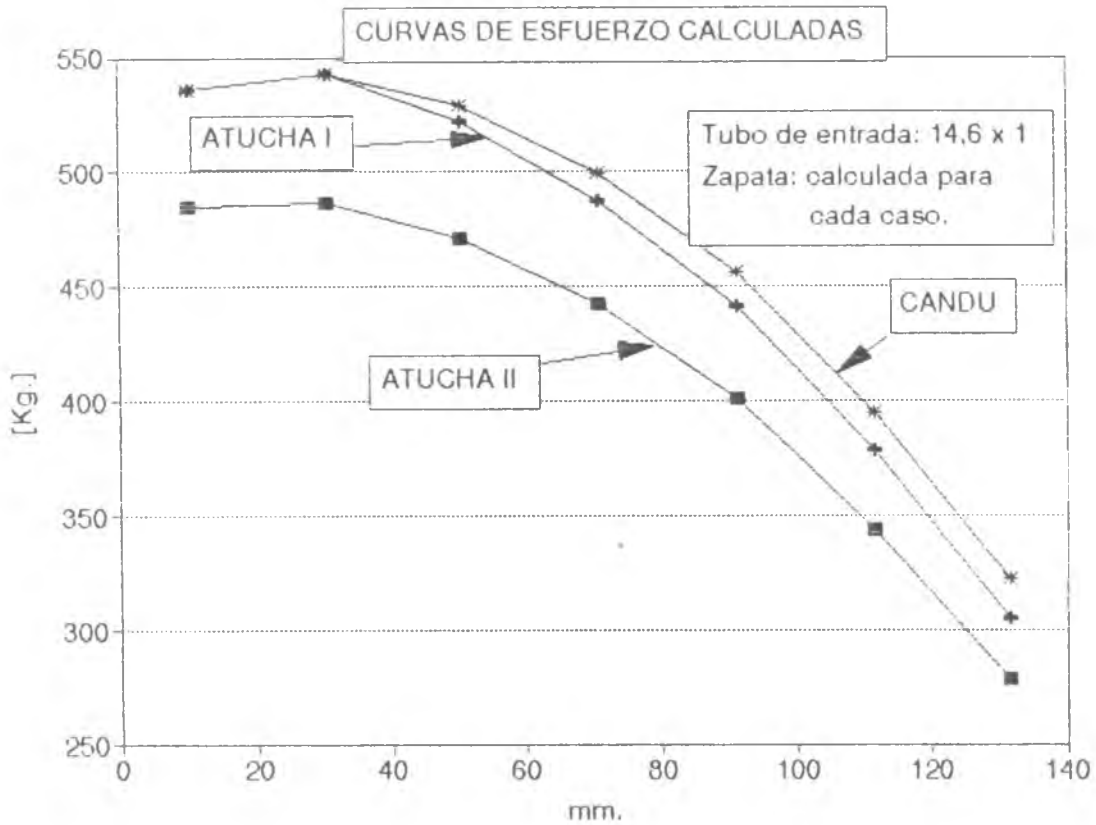


Fig. VI.12

Se observa que los coeficientes dependen no sólo del material, sino también de la deformación aplicada (variable para cada tipo de tubo), ya que esta deformación fija la posición de la zona de reducción de diámetro y espesor con respecto a la curva de endurecimiento.

CAPITULO VII: PROGRAMA DE ENSAYOS

El programa de ensayos tuvo como objetivo determinar cuales eran las condiciones de laminación y el herramental necesario para poder aumentar el avance de laminación de 1,7 a 2,5 mm.

Hasta Octubre de 1994, las condiciones de laminación de tubos de Zircalloy-4 para las centrales Atucha I, Atucha II y Embalse fueron las siguientes:

Atucha I (CNA I):

Diámetro del tubo de entrada: 14.60 mm.

Espesor del tubo de entrada: 1 mm \pm 0.01 mm.

Diámetro del tubo de salida: 11.93 \pm 0.01 mm.

Espesor del tubo de salida: 0.565 \pm 0.01 mm.

Reducción: 52.8%

Estiramiento: 2.11

Avance: 1.7 mm.

Golpes por minuto: 120

Rodillo: Diámetro T: 11.93 mm

α : 84° , β : 95°

Zapata: diseño ruso.

Atucha II (CNA II):

Diámetro del tubo de entrada: 14.60 mm.

Espesor del tubo de entrada: 1 mm \pm 0.01 mm.

Diámetro del tubo de salida: 12.92 \pm 0.01 mm.

Espesor del tubo de salida: 0.58 \pm 0.01 mm.

Reducción: 47.3%

Estiramiento: 1.90

Avance: 1.7 mm.

Golpes por minuto: 120

Rodillo: Diámetro T: 12.92 mm.

α : 73° β : 90°

Zapata: diseño ruso.

Candú (CNE)4 pasos:

Diámetro del tubo de entrada: 14.34 mm.

Espesor del tubo de entrada: 0.8 mm \pm 0.01 mm.

Diámetro del tubo de salida: 13.11 \pm 0.01 mm.

Espesor del tubo de salida: 0.435 \pm 0.01 mm.

Reducción: 49.1%

Estiramiento: 1.96

Avance: 1.7 mm.

Golpes por minuto: 80

Rodillo: Diámetro T: 13.11 mm.

α : 73° β : 90°

Zapata: diseño ruso.

Cambios de Parametros de Proceso en Laminadoras HPTR 8-15

1. Objetivos

El presente trabajo tiene por objeto definir los cambios de parámetros intervinientes en el proceso de laminación de tubos para aumentar el avance de 1,7 mm. a 2,5 mm. en el último paso de laminación. Para ello se realiza un análisis de los parámetros que puedan intervenir, fijando un orden de prioridades para el análisis

de los mismos y se confecciona un plan de ensayos para la precalificación de los cambios de procesos descriptos.

2. Análisis de los parámetros intervinientes:

2.1 Temperatura de los recocidos intermedios:

La temperatura de los recocidos intermedios utilizados hasta la fecha es de 700°C, y la misma fue definida por CNEA en su transferencia de tecnología. La posibilidad de utilizar una temperatura de 650°C en este tratamiento se viene analizando en base a experiencias propias y de otros fabricantes.

La especificación de la vaina exige que los tratamientos térmicos intermedios den como resultado una estructura completamente recristalizada, cosa que ocurre aproximadamente por sobre los 620°C.

El disminuir la temperatura de recocido presenta las siguientes ventajas:

- a) Se disminuye el crecimiento de grano, y por lo tanto el tamaño de grano final en el tubo a ser laminado. Esto es favorable para la calidad superficial en todo proceso de conformado.
- b) Se gasta menos energía para realizar el tratamiento térmico, lo que resulta en un beneficio económico.
- c) Aumenta la vida útil del horno.

2.2 Diseño de los rodillos:

2.2.1 Diámetro de la garganta de los rodillos:

Es el diámetro del fondo de la garganta y corresponde a la zona de trabajo o deformación. Las alternativas son relacionadas al

diámetro nominal de la vaina que se quiera obtener, y estas son: diámetro mayor, igual o menor que el nominal de la vaina.

2.2.2 Radio de descarga:

Es el radio de salida de la garganta, está relacionado con el ángulo de descarga y el diámetro del tubo de entrada. Las dos alternativas posibles son: $R=0,5$ mm. ; y $R=0,8$ mm.

2.2.3 Angulo de trabajo y de descarga:

Son los ángulos en que se divide el perfil de contacto entre rodillo y vaina; el primero delimita la zona de deformación por carga normal al tubo y el de descarga corresponde a la zona donde el material fluye lateralmente hasta el empalme con el radio de descarga. Las alternativas se expresan en pares de ángulos de trabajo y descarga respectivamente, por ej. $84^{\circ}/95^{\circ}$

2.3 Medidas del tubo de entrada:

Este parámetro se analiza para el caso de la vaina CNA I, con el objeto de unificar el tubo de entrada para Atucha I, con el tubo de entrada para el Tubo Soporte para Atucha I.

Además, como la calidad superficial obtenida en este tipo de tubo es inferior a la obtenida en los restantes (suelen aparecer rayas) y se piensa que esto se debe al salto de diámetro exterior e interior que se tiene con tubo de entrada de 14,6 mm., se propone la alternativa siguiente: diámetro 13,7 mm. para reducir el salto de diámetro exterior y espesor 1,15 mm. para poder también obtener el Tubo Soporte para Atucha I de espesor 1,21 mm

2.4 Diseño de la zapata:

El diseño de la zapata incide directamente en la velocidad, cantidad y continuidad de la deformación. Existen dos alternativas a probar en esta primera etapa: un diseño del fabricante de las máquinas (rusas) y otro diseño FAE (zapata modificada), que se desarrolló a partir del primero. Otros diseños posibles son el de origen canadiense y una composición de éste con el ruso.

2.5 Terminación superficial del mandril:

La misma actúa en el coeficiente de rozamiento del tubo. No siempre superficies muy lisas favorecen la laminación, es por eso que se probarán mandriles pulidos con tela esmeril y sin pulir, o sea con la terminación del rectificado.

3. Caracterización de discontinuidades superficiales:

Para la caracterización se realizarán ensayos dimensionales y de inspección visual con lupa metalográfica. Para ello se tomarán muestras de tubos de entrada, gargantas de laminación, y tubos laminados, en los tres productos fabricados.

3.1 Muestreo:

La toma de muestra se realizará en distintas etapas de la puesta a punto del herramental:

3.1.1 Tubo de entrada:

Se tomará una muestra del mismo en cada prueba. El lote muestreado debe contar con por lo menos 20 tubos del mismo estado de terminación superficial.

3.1.2. Garganta de laminación:

Se muestreará en cada puesta a punto de máquina luego de obtener la medida final, y otra luego de laminar 10 tubos en las condiciones definidas. Si en la toma de muestra se presenta algún defecto, se agregará la misma al muestreo y se tomará una muestra de la primer garganta luego de corregido el defecto.

3.1.3 Tubo laminado:

Se tomará una muestra después de laminar 3, 8, y 15 tubos, una vez aprobada la puesta a punto por el control de calidad de turno.

3.2. Ensayos a realizar:

3.2.1. Dimensional:

Se controlará en tubo de entrada y en tubo laminado:

- Diámetro exterior.
- Diámetro interior.
- Excentricidad.

En la garganta se controlará:

- Variación del diámetro en la longitud, con máquina Zeiss.
- Variación de espesor cada 10 mm.

3.2.2 Inspección visual con lupa metalográfica (20x - 120 x):

Se tomará registro video grabado de la superficie exterior e interior de gargantas y tubos laminados, analizando las discontinuidades superficiales y su progresión sobre la longitud de la muestra.

4. Plan de ensayos:

El plan de ensayos se realizará según el cuadro 1, donde se detallan los parámetros analizados, las alternativas a probar, y las condiciones de cada ensayo. El mismo fue construido según el método de Taguchi y Shainin para la experimentación de procesos. En las condiciones de ensayo se identifican con "F" los parámetros fijos, y con "V" los parámetros variados en el ensayo.

CUADRO 1 : PLAN DE ENSAYOS PARA HPTR 8-15

PARAMETROS ANALIZADOS	ALTERNATIVAS	CONDICIONES DE ENSAYO															
		CANDU				ATUCHA 1				ATUCHA 2							
		C1	C2	C3	C4	N1	N2	N3	N4	D1	D2	D3	D4				
TEMPERATURA RECOCIDO INTERMEDIO	700 °C	F	F	F	F	V	V			V	V			V	V		
	650 °C							V	V					V	V	V	
DIAMETRO GARGANTA DEL RODILLO	=VAINA	V	V	V	V	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
	>VAINA																
RADIO DE DESCARGA DEL RODILLO	0,5	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
	0,8																
ANGULOS DE TRABAJO Y DESCARGA DEL RODILLO	84/95					F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
	73/90	V	V	V	V												
	80/90																
MEDIDAS TUBO ENTRADA	14,6 x 1,0	F	F	F	F	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
	13,7 x 1,15																
DISEÑO DE ZAPATA	FAE	F	F	F	F					V	V	V	V	V	V	V	
	RUSO																
TERMINACION SUPERFICIAL MANDRIL	PLUJIDO LONG.	V	V	V	V	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
	SIN PULIRI		V	V	V												

Análisis de las modificaciones a realizar en la zapata:

Zona de calibración:

Una forma de ver en que medida está actuando la longitud de calibración sobre el tubo, es calcular cuantas vueltas da un punto que ingresa a la misma, hasta el momento que la abandona. De esta forma se puede tener en cuenta el ángulo de giro del tubo, que la fórmula 1 del capítulo V no tiene en cuenta.

Si la longitud de calibración sobre la zapata es de 25 mm., debido a la diferencia de diámetros entre el muñon y la garganta de laminación, la longitud de calibración sobre el tubo (LCT) es:

$$LCT = x_c \cdot Ru / Rk \quad (1)$$

Donde :

$$Ru \approx 40 \text{ mm.}$$

$$Rk = 29 \text{ mm.}$$

Por lo que:

$$LCT \approx 34,5 \text{ mm.}$$

En cada ciclo de laminación el tubo avanza, gira y luego es estirado, en una magnitud dada por el producto de $\mu \cdot m$, por lo que el desplazamiento total (DT) de un punto dentro de la zona de calibración resulta:

$$DT = \mu \cdot m + m$$

Por ejemplo, para los tubos Atucha II:

$$\mu \cdot m + m = 1,86 \cdot 1,7 + 1,7 = 4,86 \text{ mm.}$$

Cada vez que ocurre este desplazamiento, el tubo gira, por lo que el número de giros se obtendrá haciendo el cociente:

$$LCT / DT$$

Que en este caso es: $34,5/4,86 \approx 7$

Este número, multiplicado por el ángulo de giro y dividido por 360° , da el número de vueltas que da un punto dentro de la zona de calibración.

Si el ángulo de giro es de 39° : $7 \cdot 39^\circ / 360^\circ \approx 0,76$ vueltas

Si el ángulo de giro es de 51° : $7 \cdot 51^\circ / 360^\circ \approx 1$ vuelta.

Por lo que el tubo queda mejor calibrado con ángulo de giro de 51° . Esto se verifica experimentalmente.

Al aumentar el avance a 2,5 mm el DT es:

$$DT = 1,86 \cdot 2,5 + 2,5 = 7,15 \text{ mm}$$

Como ya se sabe que si LTC/DT es aproximadamente igual a 7, el tubo queda correctamente calibrado, para mantener la relación es necesario aumentar LTC y, en consecuencia, x_c .

$$7,15 \cdot 7 = 50 \text{ mm} = LTC'$$

Despejando x_c de (1):

$$x_c = LTC' \cdot R_k / R_u = 50 \cdot 29 / 40 = 36,25 \text{ mm.}$$

Para no acortar en forma excesiva otras zonas de la zapata, se adopta $x_c = 35 \text{ mm.}$

Para aumentar 10 mm la longitud de calibración, ingeniería de FAE decidió restar 4,2 mm. a x_{E_D} y 5 mm. a x_s y 0,8 mm. a x_{AG}

Zona de reducción de diámetro y espesor:

Debido a que la zapata de diseño ruso, presenta en el último tramo de la deformación un perfil cónico, fueron modificados los

coeficientes de la zapata, de modo que el término independiente de la fórmula (3), cap. V, sea igual a 0,005. Los nuevos coeficientes son:

$$y_6 = 0,64 \cdot y_7$$

$$y_5 = 0,47 \cdot y_7$$

$$y_4 = 0,32 \cdot y_7$$

$$y_3 = 0,20 \cdot y_7$$

$$y_2 = 0,10 \cdot y_7$$

$$y_1 = 0,04 \cdot y_7$$

Pero como la zapata tiene una longitud fija de 210 mm, lo que se hizo fue acortar 4.2 mm. $x_{E D}$ restando 0,6 mm. a cada x_i y 0,8 mm a

$x_{A G}$.

CAPITULO VIII: RESULTADOS

Nota: en diámetro del rodillo las palabras *mayor* o *igual* se refieren al diámetro del tubo de salida.

En alfa y beta las palabras *mayor*, *igual* o *menor* se refieren al ensayo anterior.

X/Y : par de ángulos confidenciales.

1) CANDU 4 PASOS

Prueba N°1

RODILLO: Diámetro: igual alfa: 73° beta: 90° R: 0.5 mm.

ZAPATA: rusa

MANDRIL: 12.22

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO: 700 C.

GARGANTA: Presenta marcas de huellas de rodillos y algunos arrastres.

PROBETA: Gran variación dimensional, (0,015 mm.). Presenta rayas. El diámetro interior del tubo es una centésima superior al nominal por lo que se debe utilizar un mandril de diámetro una centésima menor, al utilizado normalmente para laminar con avance 1,7 mm.

CURSO DE ACCION: Agrandar la garganta del rodillo. Para esta operación se utiliza un cilindro revestido con un papel esmeril 320. El diámetro del conjunto es algunas décimas de mm. mayor al diámetro T del rodillo a pulir. El rodillo se pule mientras se lo hace girar en el torno. A esta operación se la llama "retocar los rodillos".

Prueba N°2

RODILLO: mismo anterior retocado

ZAPATA: rusa.

MANDRIL: 12.21

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700 C.

GARGANTA: Idem anterior

PROBETA: Idem anterior

CURSO DE ACCION: Probar rodillos de mayor diámetro y zapatas con mayor zona de calibración para eliminar la variación dimensional.

Prueba N° 3

RODILLO: Diámetro: mayor alfa:igual beta:igual R: 0.5 mm.

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 12.21

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700 C.

GARGANTA: Presenta facetado y rayas profundas

PROBETA: Aceptable. Se observan pequeñas rayas. No presenta variación dimensional.

CURSO DE ACCION: Como se presume que las rayas observadas en la garganta son debidas a los rodillos, se prueban otros de mayor diámetro.

Prueba N° 4

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:igual beta:igual R: 0.5 mm.

ZAPATA: modificada.

MANDRIL: 12.21

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700 C.

GARGANTA: Presenta facetado y algunas rayas en el interior.

PROBETA: Aceptable. Se observan rayas.

CURSO DE ACCION: retocar los rodillos en la zona de descarga para eliminar rayas del interior.

Prueba N° 5

RODILLO: mismo anterior retocado. Alfa:mayor Beta:igual

ZAPATA: Idem anterior

MANDRIL: Idem anterior

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700°C.

GARGANTA: Poco facetada y buena terminación superficial.

PROBETA: Muy buena. No presenta variación dimensional

Prueba N° 6 :

RODILLO: mismo anterior.

ZAPATA: rusa.

MANDRIL: Idem anterior.

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO: Idem anterior.

GARGANTA: Poco facetada y buena terminación superficial.

PROBETA: Buena. No presenta variación dimensional pese el haber usado la zapata rusa con zona de calibración de 25 mm.

2) ATUCHA II

PRUEBA N°1

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:80° beta:90° R:0,5.

ZAPATA:rusa

MANDRIL:11,73mm.

ANGULO DE GIRO:51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700° C.

GARGANTA: Cuesta sacarla del mandril, por lo que los rodillos fueron retocados en la zona de descarga. Con este retoque, siguen apareciendo rayas y arrastres en la garganta, debido a la geometría de los rodillos. No se observa facetado.

PROBETA: Es aceptable, aunque algo rugosa. Leve variación dimensional (dentro de tolerancia).

CURSO DE ACCION: Se vuelven a retocar los rodillos en la zona de descarga, pero no se logra solucionar el problema del agarre de la garganta, que da lugar a arrastres de material, por lo tanto se prueban otros rodillos.

PRUEBA N° 2

RODILLO: Diámetro:igual alfa:mayor beta:mayor R:0,8

ZAPATA:rusa

MANDRIL:11,73

ANGULO DE GIRO:51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700° C.

GARGANTA: Presenta algunas marcas interiores por quedar algo agarrada al mandril, pero menos que en la prueba anterior. Se observa facetado.

PROBETA: Superficie aceptable. Se verifican variaciones dimensionales en el tubo terminado.

CURSO DE ACCION: Como estos rodillos también dan problemas se prueban otros.

PRUEBA N° 3

RODILLO: Diámetro:igual alfa: menor beta:menor R:0,8

ZAPATA: rusa

MANDRIL: 11,73

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700° C.

GARGANTA: Facetada, pero menos que en el caso anterior. Muchas rayas pequeñas en el interior.

PROBETA: Aceptable. Variaciones dimensionales en el tubo terminado.

RESULTA QUE:

Es conveniente utilizar rodillos de mayor diámetro que el tubo, para disminuir el facetado y la variación dimensional.

PRUEBA N° 4

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:igual beta:igual R:0,5 mm.

ZAPATA: rusa

MANDRIL:11,73

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700° C.

GARGANTA: Facetado poco pronunciado. Presenta en el interior gran número de arrastres de baja profundidad, debido a agarre sobre el mandril.

PROBETA: Presenta pocas rayas y algunos arrastres. No es aceptable. Ligeras variaciones dimensionales.

CURSO DE ACCION: Se prueba otro rodillo.

PRUEBA N° 5

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:mayor beta:mayor R:0,5mm.

ZAPATA: modificada.

ANGULO DE GIRO: 51°

MANDRIL: 11,73 mm.

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700°C.

GARGANTA: Presenta arrastre generalizado de material

PROBETA: Presenta arrastres y rayas. No aceptable.

CURSO DE ACCION: Descartar rodillos con diámetro 13,11 y ángulo central más cerrado.

PRUEBA N° 6

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:menor beta:menor R:0,8 mm.

ZAPATA: modificada.

MANDRIL:11,74

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700°C.

GARGANTA: Presenta marcas debidas a los rodilos.

PROBETA: Aceptable

CURSO DE ACCION: Retocar los rodillos, para que no marquen la garganta. Con los rodillos retocados se obtiene:

GARGANTA: Presenta facetado y algunas rayas en el interior. Es aceptable.

PROBETA: Aceptable. Superficie rugosa con pocas rayas.

RESULTA QUE: El rodillo de diámetro mayor y ángulos X/Y R=0,8 retocado**anda bien, por lo que se hicieron los siguientes ensayos variando el ángulo de giro y/ó la temperatura de recocido del tubo de entrada.

a) TEMPERATURA DE RECOCIDO: 700°

ANGULO DE GIRO: 39°

GARGANTA: Presenta facetado mucho menos pronunciado que en el caso anterior.

PROBETA: rugosa con muchas rayas cortas. Leve variación dimensional.

b) TEMPERATURA DE RECOCIDO: 650°

ANGULO DE GIRO: 39°

GARGANTA: poco facetada. Superficie buena

PROBETA: Pocas rayas y menor rugosidad que en el caso anterior. Leve variación dimensional.

c) TEMPERATURA DE RECOCIDO: 650°

ANGULO DE GIRO: 51°

GARGANTA: Aceptable.

PROBETA: muy buena. Baja rugosidad y pocas rayas superficiales.

PRUEBA N° 7

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:mayor beta:igual R:0.5 mm.

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 11,73

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700 C.

GARGANTA: Presenta material arrancado en la superficie.

PROBETA: buena

CURSO DE ACCION: El rodillo es muy cerrado. Se lo retoca y queda con ángulo alfa igual y ángulo beta mayor. Con esta modificación se obtienen garganta y probeta muy buenas.

3)ATUCHA IPRUEBA N°1

RODILLO: Diámetro:mayor alfa:84° beta:95° R:0.5 mm.

ZAPATA:modificada

MANDRIL:10.77

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:650°C.

GARGANTA: Presenta algunos arrastres por agarre del tubo al mandril

PROBETA: Aceptable. Presenta rayas pequeñas con disposición en hélice. Se observa variación dimensional.

CURSO DE ACCION: retocar los rodillos

PRUEBA N° 2

RODILLO: (luego de retocado) Diámetro:mayor

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 11.73

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:650 C.

GARGANTA: muy buena. No queda agarrada al mandril.

PROBETA: muy buena. No presenta variación dimensional.

CURSO DE ACCION: Probar otros rodillos

PRUEBA N° 3

RODILLO: Diámetro: mayor Alfa:X Beta:Y

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 11.73

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700°C.

GARGANTA: muy buena.

PROBETA: muy buena.

4) CANDU 3 PASOS

PRUEBA N°1

RODILLO: Diámetro: mayor alfa:73° beta:90° R: 0.5 mm.

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 12.21

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700°C.

GARGANTA: Presenta marcas de huellas de rodillos y algunos arrastres.

PROBETA: Aceptable. Se observan rayas.

CURSO DE ACCION: Retocar los rodillos.

PRUEBA N° 2

Con rodillo retocado.

RODILLO: Diámetro: mayor Alfa:mayor Beta:igual

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 12.21

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700 C.

GARGANTA: muy buena

PROBETA: muy buena.

PRUEBA N° 3

RODILLO: Diámetro: mayor Alfa:mayor Beta:igual

ZAPATA: modificada

MANDRIL: 12.21

ANGULO DE GIRO: 51°

TEMPERATURA DE RECOCIDO:700 C.

GARGANTA: muy buena

PROBETA: muy buena.

CAPITULO IX: DISCUSIÓN

Plan de ensayos en HPTR 8-15:

Concluídos los ensayos se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

Parámetros analizados:

- 1.1 Temperatura de recocidos intermedios.
- 1.2 Diámetro de la garganta del rodillo.
- 1.3 Angulo de trabajo y de descarga de los rodillos.
- 1.4 Medidas del tubo de entrada.
- 1.5 Diseño de las zapatas.
- 1.6 Radio de descarga de los rodillos.

Resulta que:

- 1) Al aumentar el avance aumenta el alargamiento por golpe y también el ensanchamiento, por lo que para no dañar al tubo se deben utilizar rodillos de diámetro mayor al nominal.
- 2) Se comprobó que si se aumenta la longitud de la zona de calibración de la zapata, se eliminan las variaciones dimensionales, por lo que se adopta esta longitud de calibración que no trae otras consecuencias desfavorables.
 - 2.1) En el caso de Candú 4 pasos, se puede lograr un tubo con una variación dimensional no detectable, con zapatas con longitud de calibración de 25 mm. debido a que tiene la menor reducción de los cuatro tipos de tubo ensayados (ver resultado prueba N° 6 de Candú 4 pasos).

3) Con el tubo de entrada recocido a 650°C mejora la terminación superficial (baja la rugosidad de la superficie).

Si el ángulo de giro es de 39° se obtiene mejor calidad superficial y mayor variación dimensional que con ángulo de giro de 51° . Como es más importante el control dimensional, se adopta para producción el ángulo de 51°.

En cuanto al radio $R=0,8^{**}$, se considera que en este caso fue favorable porque al ser la garganta del rodillo más pequeña de lo que corresponde, este radio mayor contribuyó a aumentar la zona de descarga. Pero en un rodillo de geometría correcta donde no tocan esta zona ni el tubo de entrada ni el terminado, este radio no tiene influencia sobre la deformación. Su única función es eliminar el filo del borde del rodillo para facilitar el manipuleo y que no se estropee por pequeños golpes.

Para evaluar los mismos se puede construir el cuadro siguiente[16]:

PARAMETRO	CNE 4P	CNE 3P	CNAI	CNAII	PUNTAJE
TEMPERATURA DE RECOCIDO INTERMEDIO	4	3	4	4	15
DIAMETRO DE LA GARGANTA DEL RODILLO	5	5	5	5	20
ANGULO DE TRABAJO Y DE DESCARGA DE LOS RODILLOS	3	3	3	4	13
MEDIDAS DE LOS TUBOS DE ENTRADA	3	3	5	3	14
DISEÑO DE LAS ZAPATAS	3	4	5	5	17
RADIO DE DESCARGA DE LOS RODILLOS	2	2	2	2	8

Puntos:

- 1 Sin incidencia en la calidad del tubo.
- 2 Poca incidencia.
- 3 Incidencia no comprobada.
- 4 Incidencia comprobada.
- 5 Indispensable para obtener el resultado buscado.

El puntaje asignado es subjetivo y en base a la apreciación de los participantes en los ensayos.

Las características del herramental a utilizar se describen a continuación, para cada producto.

Vaina CNA I

Zapatas: diseño ruso modificado.

Rodillo: Diámetro de garganta: mayor.

Alfa:x

Beta:y

Mandril: Diámetro D1 = 10.77 mm.

Vaina CNA II

Zapatas: diseño ruso modificado.

Rodillo: Diámetro de garganta: mayor.

Alfa: x

Beta: y

Mandril: Diámetro D1 = 11,73 mm.

Vaina CNE 3P

Zapatatas: diseño ruso modificado.

Rodillo: Diámetro de garganta: mayor.

Alfa: x

Beta: y

Mandrill: Diámetro D1 = 12.23 mm.

Vaina CNE 4P

Zapatatas: diseño ruso modificado.

Rodillo: Diámetro de garganta: mayor.

Alfa: x

Beta: y

Mandrill: Diámetro D1 = 12,24 mm.

D1: Diámetro donde el tubo deja de tocar al mandrill. También se llama diámetro de calibración del mandrill.

Pruebas anexas:

El plan de ensayos, sirvió para determinar las condiciones de laminación y el herramental necesario, para poder laminar obteniendo tubos de buena calidad con avance 2,5 mm.

Como todas las pruebas se hicieron con zapatas de perfil parabólico que dan una mejor repartición del esfuerzo, se quiso determinar el efecto sobre el tubo de la utilización de una zapata de diseño recto. Para esto se hizo la prueba N° 1.

En una fecha posterior a la realización del plan de ensayos, llegó proveniente de Canadá herramental de las siguientes características:

- La zapata: la zona de reducción de diámetro y espesor esta definida por dos rectas.

No tiene zona de descarga x_s , por lo que la zona de calibración es más larga que la utilizada en FAE.

- El rodillo: el diámetro T del mismo es igual al del tubo de salida. Los ángulos son $73^\circ/91^\circ$.

- El mandril: es recto (no cónico) y no está pulido sino sólo rectificado fino.

Utilizando parte o todo de este herramental se hicieron las pruebas 2, 3 y 4 para conocer el comportamiento de este tipo de herramental.

Prueba N° 1:

En Candú 3 pasos, se hizo una prueba utilizando una zapata de diseño ruso que fue rectificada en la zona de reducción de espesor, para lograr que la variación de espesor del tubo laminado siguiera una ley lineal y no parabólica. La curva de esfuerzo calculada para este caso se muestra en la figura IX.1

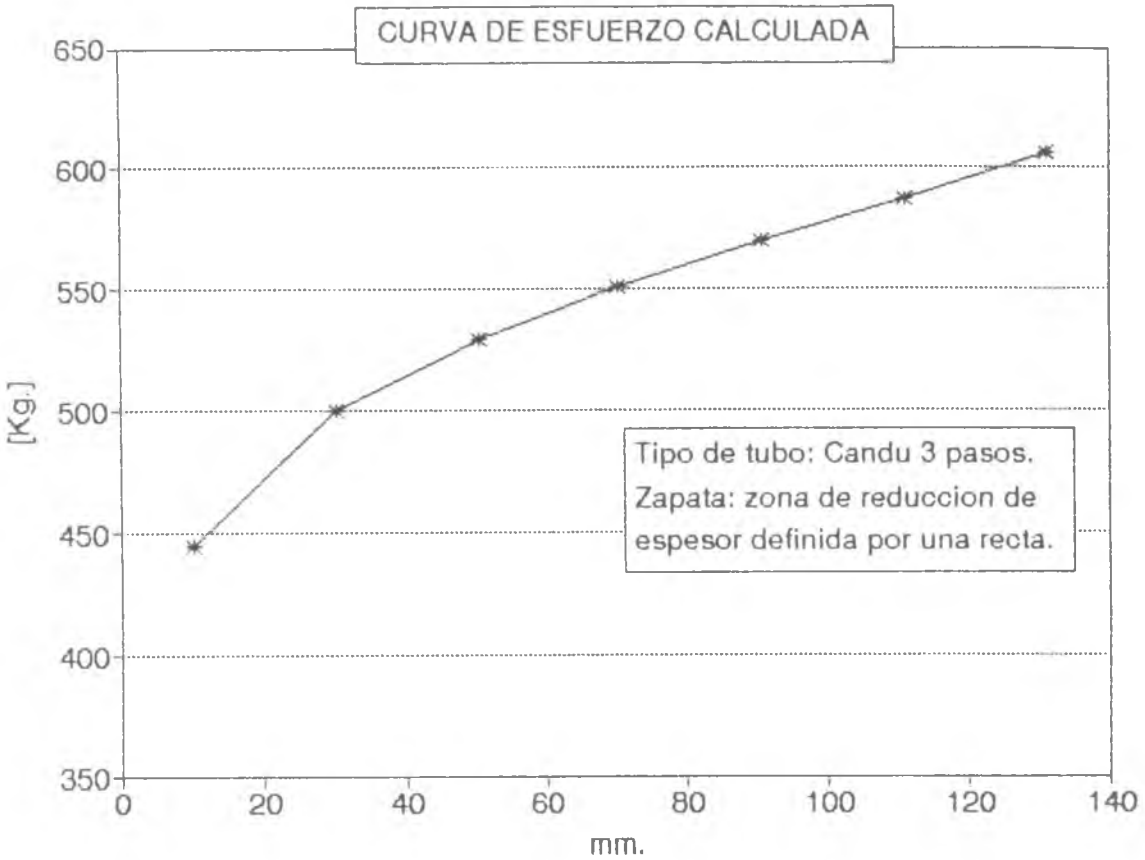


Fig. IX.1

El resultado fue que la superficie obtenida se presenta con desgarros y la calidad de la superficie de salida es peor que la del tubo de entrada (foto 8, anexo VI) al contrario de lo que ocurre normalmente.

Prueba N°2:

En Candú 3 pasos, se laminó un tramo de tubo con una zapata de origen canadiense, donde la zona de reducción de espesor está definida por dos rectas, que fijan una primera reducción de espesor

importante y luego otra mucho menor. La curva de esfuerzo calculada se representa en la figura IX.2.

El resto del herramental fue el utilizado normalmente en FAE para Candú 3 pasos.

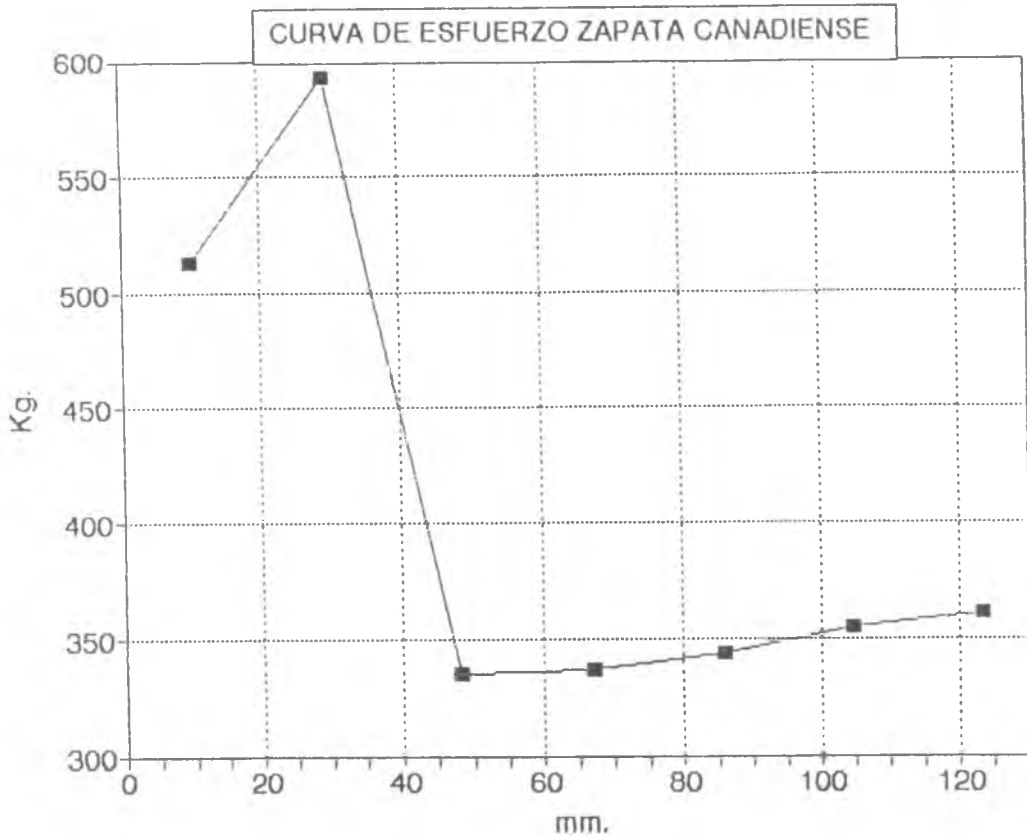


Fig. IX.2

En este caso no se observa en el interior ningún deterioro de la superficie, por lo que este tipo de deformación, aunque no es la ideal, es suficiente para lograr tubos de buena calidad.

La zapata de origen canadiense, no presenta la zona de salida que tiene la zapata rusa, que se destina en este caso a aumentar la zona de calibración. Como en condiciones normales de laminación,

no se observan la aparición de defectos en el tubo ni dificultades en el proceso de laminación, la zona de salida del diseño ruso parece no tener razón de ser. En el manual de operación de la HPTR 60/120 (mucho mayores esfuerzos que en la HPTR 8/15) el fabricante explica que esta zona es para tener una disminución gradual del esfuerzo luego de la calibración, lo que asegura la obtención de tubos con superficies libres de defectos, pero se verificó experimentalmente que esto no es necesario en la zapata de la HPTR 8/15 debido a lo reducido del esfuerzo de laminación.

Prueba N°3:

Laminación de un tubo Candú 4 pasos con herramental de origen canadiense.

RODILLO: Diámetro 13.08 Alfa:x Beta:y

Mandril: Cilíndrico. Diámetro: 12.23

ZAPATA: zona de reducción de diámetro y espesor definida por dos rectas

Se obtienen probeta y garganta de buena calidad. Se observa que aunque el rodillo tiene el diámetro T igual al diámetro de salida del tubo (que en Canadá es de 13.08 mm.), se puede laminar sin problemas, mientras que en FAE el rodillo que anda bien tiene el diámetro T mayor al diámetro del tubo de salida y ángulos X/Y.

Esto puede explicarse, en parte, teniendo en cuenta que el rodillo de origen canadiense tiene el ángulo beta un grado mayor al usado en FAE.

La otra razón posiblemente sea, que el mandril canadiense carece de conicidad, por lo que la onda de deformación que se forma

delante del rodillo es menor a la que se forma usando un mandril cónico. Como desde el punto de vista del rodillo, esa onda determina el diámetro del tubo que tiene que laminar, al ser esa onda pequeña, la garganta del rodillo no necesita ser tan grande como la utilizada en FAE.

Al ser el rodillo canadiense más cerrado, la recuperación es menor. Una y media centésima de mm. contra tres centésimas con herramental FAE.

Influencia del uso del mandril cilíndrico sobre la curva de esfuerzo:

En la figura IX.3 están representadas las curvas de esfuerzo calculadas usando un mandril cónico o uno cilíndrico.

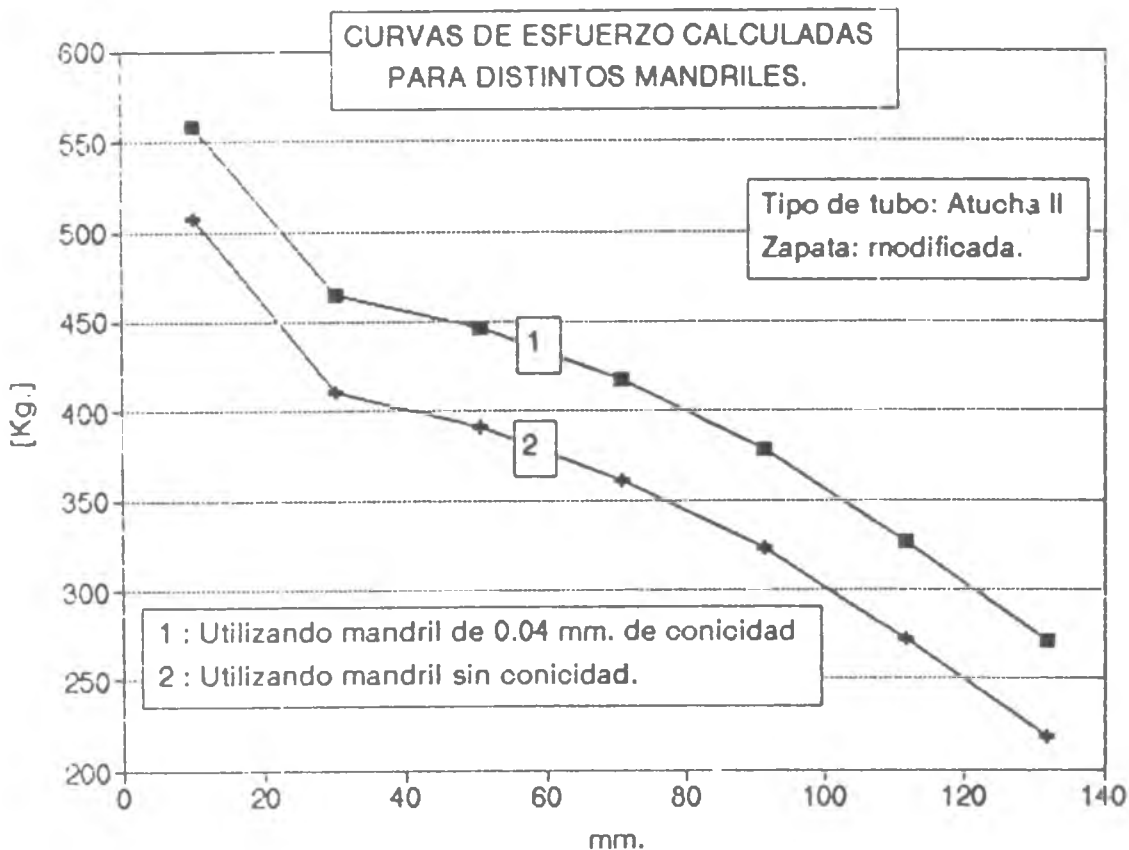


Fig. IX.3

Se observa que usando un mandril cónico el esfuerzo es mayor. Esto se debe a que en el caso de usar mandril cónico la longitud de contacto debida a la conicidad del mandril no es nula, como en el caso de usar mandril cilíndrico. Además una mayor longitud de contacto trae aparejado que el radio corregido por aplastamiento de los rodillos sea mayor, por lo que el esfuerzo aumenta más.

Prueba N° 4: Laminación de un tubo tipo Candú 3 pasos (tubo de entrada de 14,60 x 1) con herramental canadiense.

Se observan rayas en el interior de la garganta y de la probeta debido a que el rodillo es muy cerrado para este tubo de entrada. Ver foto 6, anexo VI

Fenómenos que aparecen durante la laminación y su interpretación:

1) El facetado:

Consiste en una serie de facetas que definen la superficie exterior del tubo. Comienzan en la zona donde los rodillos empiezan a reducir el diámetro del tubo. Son particularmente notables en la zona de reducción de diámetro, para luego disminuir y posteriormente desaparecer en la zona de reducción de espesor.

Se produce en forma notable cuando la diferencia de diámetro entre el tubo de entrada y el de salida, supera un cierto valor, de aproximadamente 2 mm.

Esto se da en el caso de los tubos para Atucha I, cuando se lamina de diámetro de entrada 14,60 mm. a diámetro de salida 11,93 mm.

La faceta se produce cuando los rodillos comienzan a deformar el tubo de entrada utilizando la zona de descarga. Como el contacto se produce sólo en los flancos del rodillo, se generan dos facetas por cada rodillo a lo largo del tubo, luego, al ir avanzando el rodillo, las facetas generadas son más anchas y menos profundas, ya que se comienza a deformar con toda la garganta.

Si el facetado es pronunciado, a partir de la zona de intersección de dos facetas y luego de un ciclo de avance y giro, se genera una raya en el interior, cuando esta zona de intersección es laminada por el rodillo, que no desaparece totalmente en el tubo de salida. Si la raya es profunda, puede ser considerada defecto.

Para disminuir el facetado existen dos caminos:

a) Reducir el salto de diámetro exterior. Esto fue lo que se hizo en los tubos tipo Atucha I y la garganta de laminación que era la que tenía peor aspecto con respecto a los demás tipos de tubo, pasó a ser la mejor.

b) Aumentar el largo de la zona de reducción de diámetro, con esto se consigue que el facetado sea menos pronunciado y aunque sobre el tubo ocupa una longitud mayor, no se producen defectos. La desventaja es que aumentar la zona de reducción de diámetro implica reducir la zona de reducción de diámetro y espesor, lo que resulta en un aumento del esfuerzo de laminación, y/o la longitud de calibración, lo que resulta en una disminución de la calidad del tubo.

Para aumentar el largo de la zona de reducción de diámetro hay que utilizar otro diseño de zapata. En la figura IX.4 están representadas la zapata de diseño ruso, que tiene una zona de reducción de diámetro de 14 mm., y la zapata ZC-100 (usada

originalmente en la laminación de acero inoxidable) que tiene una zona de reducción de diámetro de 41 mm. La zapata rusa da como resultado tubos con facetado pronunciado, mientras que la otra produce un facetado mucho menos pronunciado.

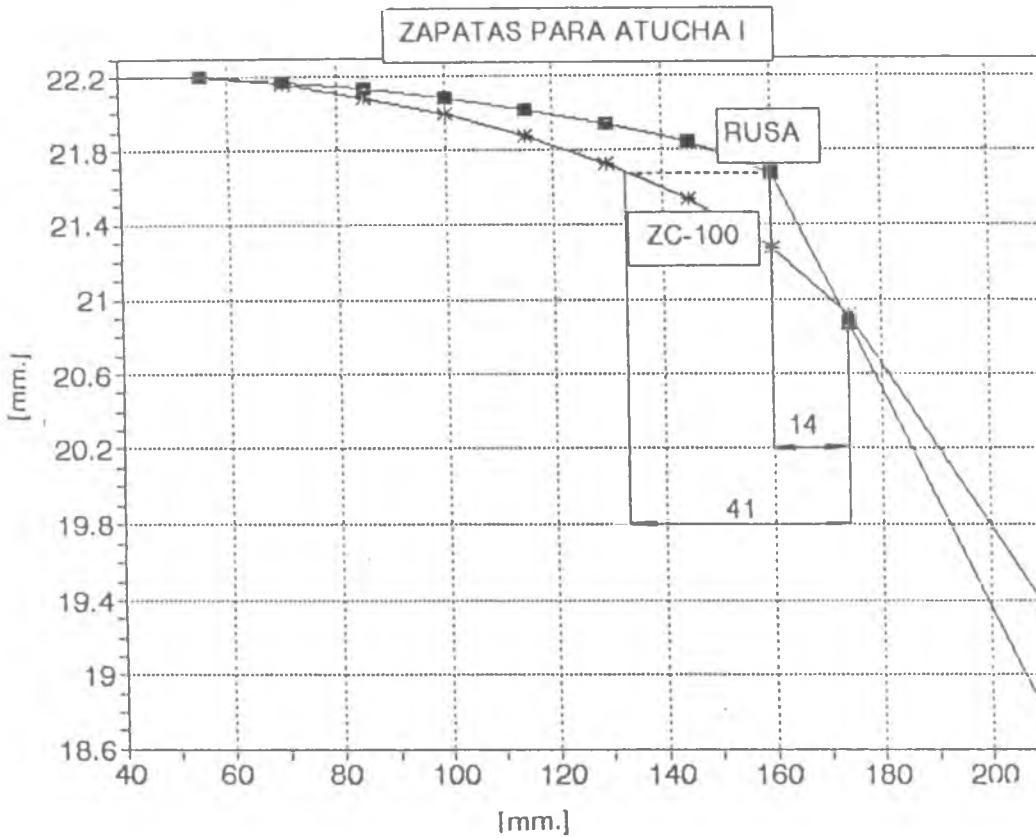


Fig. IX.4

Este fenómeno también se observa si se compara el facetado obtenido utilizando la zapata canadiense y la rusa (utilizando en ambos casos el mismo rodillo). Con la zapata canadiense el facetado es más notable que el conseguido con la zapata rusa. En la figura IX.5 están representadas las zapatas canadiense y rusa, y se observa que

la primera destina 8 mm. para la reducción de diámetro, mientras que la rusa destina 14 mm.

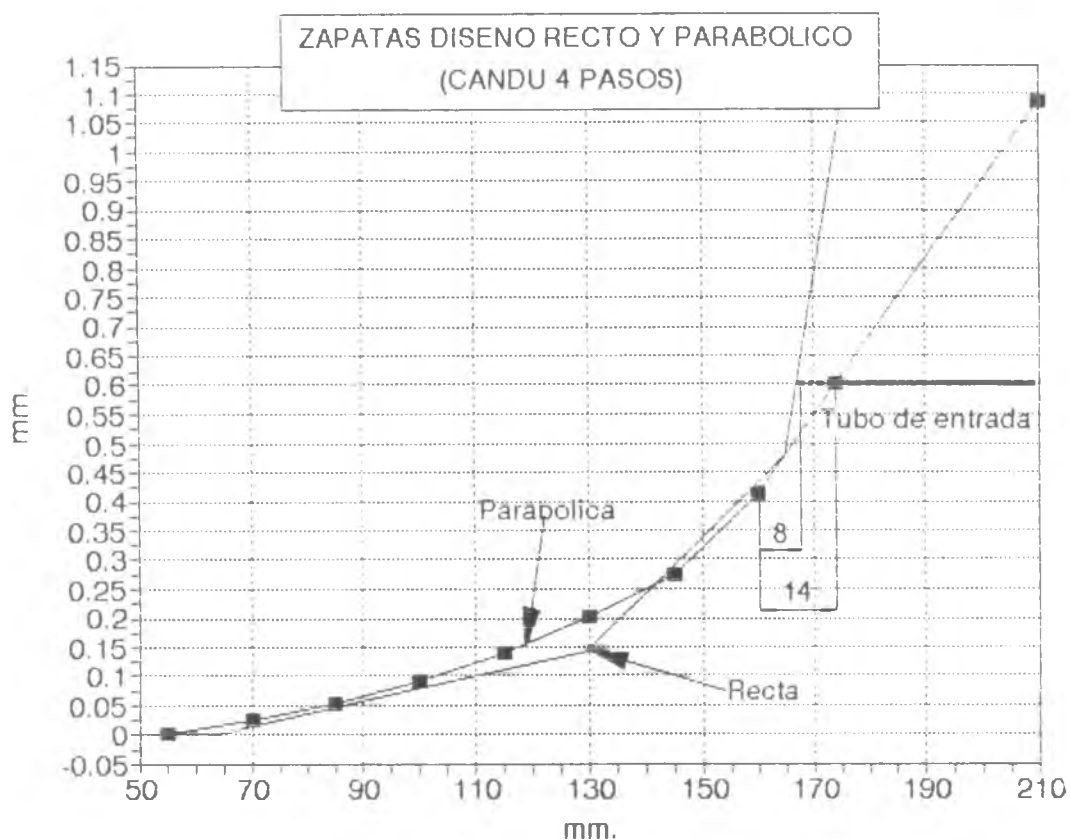


Fig. IX.5

2) La variación dimensional. (También llamada "bambú"):

Se llama así a la variación de diámetro a lo largo de la longitud del tubo. Esta variación, cuando se presenta, tiene generalmente un diámetro de dos a cinco centésimas de mm. mayor al diámetro del resto del tubo. Recorriendo el tubo a lo largo de su longitud con los dedos, se detectan una serie de nódulos, (el tubo se asemeja a una caña) separados entre sí en el caso de avance 2,5 mm., siete

a ocho mm., que corresponde a la longitud de avance más el avance por el estiramiento. La explicación es la siguiente:

Cuando el rodillo está laminando al tubo, se produce una onda de material delante del mismo; el tamaño de esta onda depende de:

1)El avance, ya que aumenta el espesor a reducir y por lo tanto la cantidad de material delante del rodillo.

2)La conicidad del mandril. Si el mandril es cónico, luego del avance aparece un espacio entre el interior del tubo y el mandril. Antes que el rodillo comience a reducir espesor, primero aplasta el tubo contra el mandril, lo que genera una onda de material delante del mismo.

Cuando el rodillo llega al punto donde comienza la zona de calibración, desaparece la primera condición, ya que ha concluido la reducción de espesor.

La segunda se mantiene, pero el recorrido de los rodillos sigue en la zona de calibración una trayectoria paralela al eje longitudinal del tubo, en cambio el mandril debido a su conicidad va disminuyendo de diámetro, por lo que contribuye en esta zona a que los rodillos aplasten la onda contra el mandril.

Si el mandril es recto, la onda desaparece igual si la zona de calibración es suficientemente larga ya que la onda (que es inicialmente pequeña por no contribuir la conicidad del mandril a generarla), se diluye en el espacio entre los rodillos. Esto se observa en el herramental de origen canadiense.

3) Daño en la superficie interior:

Cuando la garganta del rodillo es mas pequeña de lo que corresponde, generalmente la superficie exterior no resulta dañada o aparece levemente dañada (material arrancado). En cambio, la superficie interior aparece muy dañada, aparecen rayas, arrastres y material arrancado.

La explicación es la siguiente: Cuando la garganta del rodillo es más pequeña de lo que corresponde, el metal fluye en un valor excesivo hacia la zona de descarga de los rodillos y hacia el espacio entre los mismos, por lo que el tubo se sujeta fuertemente sobre el mandril, dificultándose en demasía el estiramiento hacia adelante. El tubo roza contra el mandril y se daña la superficie interior, aparecen rayas, arrastres y material arrancado.

Además el motor debe hacer un esfuerzo mayor al que hace normalmente y esto se traduce en un mayor consumo de corriente. En una ocasión (Atucha II prueba N° 5), saltaron los fusibles térmicos del motor debido al excesivo consumo de corriente del motor.

Pero en la superficie exterior difícilmente se observen daños. Esto es porque el rodillo al avanzar y reducir espesor, rueda sobre el tubo acompañando la deformación y el estiramiento, mientras que el mandril, que permanece inmóvil roza fuertemente (por la rotura de la capa lubricante debido a que la misma no resiste la presión que ejerce el tubo contra el mandril) contra el tubo que se está estirando, lo que resulta en daños en la superficie interior del mismo.

4) El ángulo de giro:

En la laminación de tubos se usan normalmente como ángulos de giro los ángulos de 39° o de 51° . De donde salen estos valores?

La respuesta podría ser la siguiente: cuando para laminar se utilizan tres rodillos, el ángulo que hay entre el centro de la garganta de un rodillo y el centro siguiente es de 120° , por lo que el ángulo que hay entre el centro de la garganta de un rodillo y el centro del espacio entre rodillos es de 60° .

La razón de hacer girar al tubo un cierto ángulo antes de cada carrera de laminación, es llevar la parte del tubo que había quedado en el espacio entre los rodillos luego de una carrera de laminación, hacia dentro de la garganta del rodillo en la carrera siguiente, de modo de ir laminando sobre todo el contorno del tubo y que el tubo de salida quede circular.

El análisis siguiente es válido para la zona de calibración. En esta zona el tubo es "amasado" por los rodillos en cada ciclo de avance y giro pero el espesor se mantiene casi constante.

Si el ángulo de giro fuera nulo, el material a laminar en cada punto de la garganta de laminación provendría solamente del material que ingresa debido al avance del tubo. Si el ángulo de giro es distinto de cero el material a laminar proviene tanto del avance como del que estaba en el espacio entre los rodillos. Debido a la geometría de la garganta de los rodillos y a que son tres rodillos, la cantidad máxima de material a laminar se tiene cuando el ángulo de giro es de 60° , pero como este ángulo es submúltiplo de 360° (que corresponde a un giro completo), el tubo tiende a salir con un contorno no circular sino poligonal, por lo que se adopta como ángulo de giro un ángulo menor, en este caso de 51° .

Este valor de 51° es un 14% menor a 60° , o lo que es lo mismo $60 \cdot 0.86$.

También podría adoptarse el ángulo de 39° , pero en este caso la cantidad de material a deformar por pasada es menor por lo que el tubo sale menos calibrado (mayor variación dimensional), hecho que se verificó experimentalmente.

Entonces, para que está el ángulo de 39° ?

Porque también se puede laminar utilizando cuatro rodillos. En este caso el ángulo de giro con el cual se tiene la mayor cantidad de material a deformar por pasada es de 45° . Por las razones enunciadas anteriormente, no se usa este ángulo sino uno menor, en este caso de 39° .

Este valor de 39° es un 13,3% menor al de 45° , o lo que es lo mismo $45 \cdot 0.867$ por lo que probablemente el diseñador ruso de la máquina usó este criterio de multiplicar el ángulo ya sea de 60° o de 45° por el valor 0.86.

Los valores definitivos para el ángulo de giro fueron obtenidos al seleccionar los engranajes que había disponibles.

CAPITULO X: CONCLUSIONES

Como conclusión, la secuencia de diseño para el herramental del laminador tipo HPTR 8-15 es la siguiente:

Para la zapata:

1. En base al avance seleccionado, calcular la longitud de la zona de calibración de modo que el tubo de como mínimo una vuelta dentro de la zona de calibración. Esta longitud depende de los parámetros de laminación y de la calidad, principalmente en el aspecto dimensional, que se quiera obtener.

Para el tipo de tubos estudiados, que el tubo gire por lo menos una vuelta dentro de la zona de calibración, asegura una exactitud de las dimensiones de \pm cinco milésimas. En el caso de tubos con menores requerimientos dimensionales, la longitud de calibración puede ser menor, lo que permite aumentar las longitudes restantes.

2. En base al salto de diámetro exterior fijar la longitud de reducción de diámetro (x_D), según la fórmula (2), cap.V.

Este es un valor orientativo, deducido de las condiciones de laminación del tubo tipo Atucha II que se presenta muy poco facetado. Este valor se puede aumentar o disminuir según el facetado que se observe en la garganta y la calidad de tubo que se quiera obtener.

3. La longitud de avance y giro es fija (35 mm.), por lo que la longitud destinada a la reducción de espesor se obtiene por diferencia luego de haber calculado las anteriores. Esta longitud

debe dividirse por siete para obtener la longitud de cada segmento de la zona de reducción de espesor.

4. Ingresar los valores anteriores, las dimensiones del tubo de entrada y de salida y los coeficientes que caracterizan a la curva de endurecimiento, en la planilla de cálculo, y modificar los coeficientes de la parábola hasta obtener la curva de esfuerzo más apropiada.

Si el esfuerzo obtenido es bajo, conviene reemplazar los siete segmentos por dos que sigan aproximadamente el mismo perfil, para simplificar el mecanizado y que la zapata resulte más económica.

Para el rodillo:

El rodillo ideal se determina en forma experimental. Debe tenerse en cuenta:

1. El material. Distintos materiales se comportan diferente bajo las mismas condiciones de laminación, por ejemplo el acero inoxidable ensancha menos que el Zry por lo que el rodillo correspondiente a este material va a ser más cerrado que el necesario para laminar Zry.

2. El avance y la reducción de espesor que influyen directamente en el ensanchamiento.

3. El diámetro del tubo de entrada. Cuanto mayor sea, más abierta debe ser la garganta del rodillo. Esto se logra, para un mismo diámetro T cerrando el ángulo central y abriendo los de descarga.

Si esto conduce a un rodillo excesivamente abierto, queda como recurso aumentar tanto el ángulo central como el de descarga, de modo que el rodillo sea lo suficientemente abierto como para poder recibir al tubo de entrada dentro de la garganta, pero que a su vez el tubo no se deslice hacia adelante durante la laminación.

4. Si no se tiene idea de como debe ser la garganta del rodillo a utilizar, puede empezarse por ensayar rodillos con diámetro T igual al tubo de salida y ángulos $80^{\circ}/90^{\circ}$. Este par de ángulos dan margen tanto como para cerrar o abrir los rodillos sin modificar el diámetro T.

5. Durante la laminación de prueba, debe observarse el comportamiento de la máquina y del tubo que está siendo laminado. Si se observa que durante la carrera de retroceso el tubo de entrada se curva en forma excesiva, esto significa que se está produciendo laminación hacia atrás. Esto puede solucionarse seleccionando un avance menor o colocando rodillos con mayor área de garganta (modificando los ángulos o aumentando el diámetro T). Si la máquina se comporta bien debe extraerse un tramo del tubo de salida y observar tanto el interior como el exterior.

Si en el exterior se observa material arrancado (foto 10 anexo VI), significa que los rodillos son muy cerrados. En este caso, en el interior probablemente aparezcan rayas (foto 4 anexo VI) y si la superficie es en general buena, el problema posiblemente pueda solucionarse modificando los ángulos de forma que el rodillo sea más abierto.

Pueden aparecer rayas en el interior sin que se produzca material arrancado en el exterior, pero la solución es la misma.

Si en la superficie interior se observa material arrancado y arrastres (foto 5 anexo VI), será necesario modificar el diámetro T, por ejemplo una décima de milímetro mayor o más, hasta que desaparezcan los defectos.

Si la garganta del rodillo que se coloca es demasiado grande, (por ejemplo el diámetro T es una décima superior al que debería ser o los ángulos de descarga son un grado mayores al valor correcto) ya sea por construcción o por que la misma se ha agrandado por desgaste durante la laminación, probablemente no se presenten problemas cuando el tubo que esta siendo laminado esté sujetado por el carrito. Pero cuando el carrito termina su recorrido, el tubo que estaba siendo laminado queda suelto y es empujado por el tubo siguiente que sí está sujetado. En este caso, el tubo que está siendo laminado debe autosostenerse sobre el mandril. Esto no ocurre cuando la garganta del rodillo es excesivamente grande y en este caso, el tubo puede deslizarse hacia adelante hasta 3 mm. en cada carrera hacia adelante del torpedo, para luego retroceder durante la carrera de retroceso . Esto es causa de variación dimensional en el tubo terminado. Depende de la calidad que se desee obtener, esto puede ser un problema o no.

Cuando el deslizamiento hacia adelante supera aproximadamente los 3 mm., el tubo ya no se sostiene sobre el mandril, y no es posible laminar sin sujetar el tubo.

6. En ocasiones al comenzar a laminar no se observan defectos en la superficie de los tubos, pero con el tiempo cuando el rodillo

es ligeramente cerrado, aparecen en el borde de la garganta del rodillo las marcas mostradas en la foto A del anexo VI. En la zona de estas marcas empieza a acumularse Zry en polvo, estas partículas de Zry que provienen de la superficie exterior del tubo son tan pequeñas que, mirando la superficie exterior del tubo con una lupa no se advierte que han sido arrancadas de allí.

Si se sigue laminando en estas condiciones, se sigue acumulando Zry sobre la garganta del rodillo. Este material pegado sobre el rodillo (fotos B y C del anexo VI) esta adherido con tanta firmeza, que es como si formara parte del rodillo, por lo que actúa arrancando más material de la superficie exterior del tubo y en este caso esto si se advierte en el control visual. La solución es retocar al rodillo en esta zona.

Para el mandril:

Puede comenzarse por probar el mandril de diseño ruso.

Debe tenerse en cuenta que cuanto mayor sea la diferencia que exista entre la garganta del rodillo recomendada por el diseño ruso y la que se use para cada caso particular, mayor será la diferencia de diámetros del mandril con respecto al diámetro interior del tubo terminado, por lo que será necesario disminuir el diámetro del mandril en la medida necesaria hasta obtener tubos con el diámetro interior deseado.

En cuanto a la conicidad del mandril puede ser la recomendada por el diseño ruso o nula. Ambas opciones presentan ventajas y desventajas.

Si el mandril es cónico, las pequeñas desviaciones de medida del diámetro interior (del orden de milésimas de mm.), que aparecen

durante el proceso, pueden corregirse moviendo la posición del mandril hasta cuatro cm. hacia atrás o hacia adelante. De este modo, como el mandril es cónico, se modifica el diámetro del mandril en el punto donde el tubo deja de tocar al mismo.

Pero el mandril cónico presenta dos desventajas, la primera es que la medida del diámetro interior del tubo, se obtiene en un sólo punto del mandril, lo que disminuye la precisión dimensional. La segunda es que aumenta el esfuerzo de laminación, por aumento de la longitud de contacto.

Si el mandril es cilíndrico, se tiene mayor estabilidad en la medida del diámetro interior del tubo terminado, pero si durante el proceso hay una desviación de este valor, para corregirla hay que disponer de varios mandriles que difieran entre sí algunas milésimas de mm. en su diámetro.

El esfuerzo de laminación con mandril cilíndrico es menor, ya que desaparece la componente de la longitud de contacto debida a la conicidad del mandril.

Propuestas de acción futura:

En el transcurso de 1994 y sobre la base de experiencias realizadas en planta se realizó un análisis que permitió sistematizar los criterios de diseño y evaluación de herramental para las máquinas laminadoras (8/15) que realizan la pasada final de producción de vainas de Zry para elementos combustibles.

Para 1995 se planea:

- 1.- Optimizar el modelo propuesto aplicando resultados experimentales a obtener por laminación plana.
- 2.- Extender el análisis realizado para el paso final a las etapas iniciales e intermedias de laminación (máquinas 15/30 y 32) que presentan mayores demandas de reducción por pasada.
- 3.- Retomar los trabajos experimentales oportunamente iniciados de medición de fuerza separatriz en laminadoras 15/30 a fin de disponer de datos experimentales para validar el análisis.
- 4.- Sistematizar los estudios y observaciones realizados sobre comportamiento en servicio de los distintos tipos de herramental y lubricación con vistas a su optimización.

ANEXO I

FAE: FÁBRICA DE ALEACIONES ESPECIALES

FAE S.A. es una empresa privada con participación accionaria de Conuar S.A. -empresa del grupo Perez Companc- Y de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Es precisamente de esta última que recibe asesoramiento técnico y transferencia de tecnología.

La planta está ubicada en el Centro Atómico Ezeiza, Pcia. de Buenos Aires, con una superficie cubierta de 13.100 m², distribuídas en modernas instalaciones que albergan la más alta tecnología en su especialidad.

La actividad principal de FAE es la fabricación de aleaciones especiales (para esto cuenta con un Horno de Fusión en Vacío) y la elaboración de tubos con y sin costura, fundamentalmente en aleaciones de zircaloy, titanio, aceros inoxidable y superaleaciones.

La fabricación de tubos y otros elementos de zircaloy ha dado origen a la empresa, estando principalmente destinada a la elaboración de combustibles para los reactores de potencia de las Centrales Nucleoeléctricas Argentinas. Dichos tubos se fabrican bajo estrictas normas de calidad establecidas por la Comisión Nacional de Energía Atómica y normas internacionales.

ANEXO II

Características técnicas del laminador HPT 32

Es un laminador de tubos diseñado para laminar en frío (o en tibio) tubos con o sin costura de acero o de aleaciones no ferrosas, teniendo las mismas una tensión de rotura de hasta 100 kg./mm².

Las características del tubo de entrada deben ser las siguientes:

Máximo diámetro exterior	46 mm.
Mínimo diámetro interior	22 mm.
Máximo espesor de pared	6 mm.
Mínimo espesor de pared	1,35 mm.
Máximo diámetro interior	43 mm.
Mínimo diámetro interior	19 mm.
Máxima longitud	5 m.
Mínima longitud	1,5 m.
Peso máximo	30 kg.

El tubo de salida estará comprendido dentro de los siguientes valores:

Máximo diámetro exterior	32 mm.
Mínimo diámetro exterior	16 mm.
Máximo espesor de pared	5 mm.
Mínimo espesor de pared	0,4 mm.
Máximo diámetro interior	31 mm.
Mínimo diámetro interior	8 mm.

Tolerancia en los diámetros	±0,8 %.
Parámetros tecnológicos:	
Número de golpes por minuto	80 a 150
Avance máximo	30 mm.
Avance mínimo	2 mm.
Máxima reducción de área:	
Para aceros al carbono	88%
Para aceros inoxidable	70 %
Fuerza separatriz máxima	80 ton.

Características técnicas del laminador HPT 15-30

Características técnicas:

Diámetro del tubo de entrada	16-28 mm.
Máximo espesor de pared del tubo de entrada	2,5 mm.
Diámetro exterior del tubo acabado	12-23 mm.
Recorrido de la caja de laminación	455 mm.
Número de golpes por minuto	61 -83
Diámetro de los calibres	180 mm.
Productividad:	
De materiales plásticos	80-90 m/hora
De materiales poco plásticos	30-40 m/hora.
Fuerza separatriz máxima	20 ton.

ANEXO III**DESCRIPCION TECNICA DEL LAMINADOR HPTR 8-15****FINALIDAD:**

El tren de laminación en frío de tubos con rodillos HPTR 8-15 está destinado a la obtención de tubos de pared delgada y de pared extradelgada de 8 a 15 mm. de diámetro, hechos de acero al carbono o aleados, de metales no ferrosos y de aleaciones con el método de laminación en frío.

En la figura 1 se da una vista del laminador.

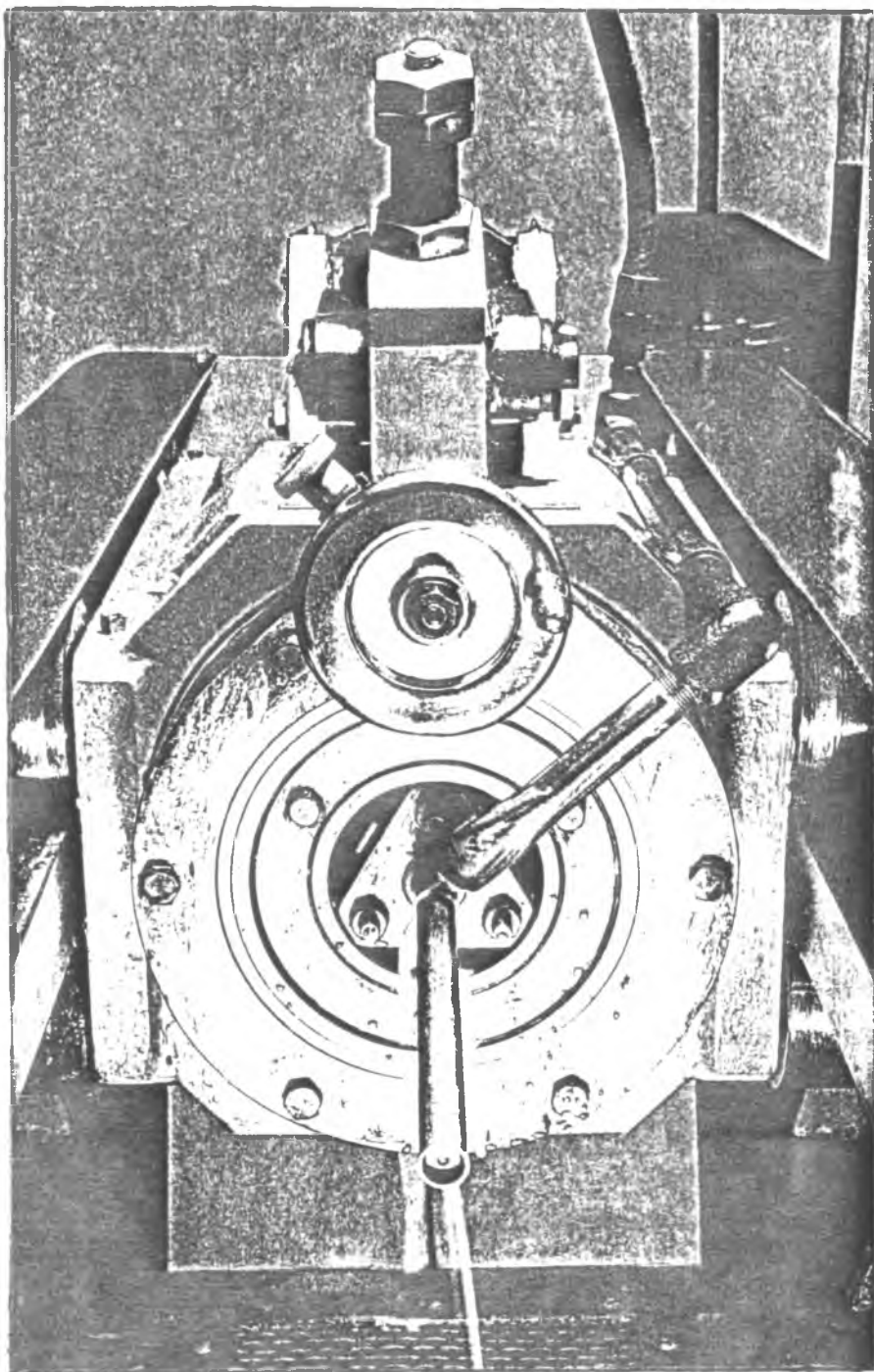
El tren puede ser utilizado para la calibración de tubos de pared gruesa y para su endurecimiento por deformación en frío con el fin de elevar las propiedades mecánicas del material.

El tren asegura la obtención económica y ventajosa de dimensiones geométricas exactas y de alta finura de las superficies exterior e interior de los tubos.

La laminación de tubos se efectúa con ayuda de herramientas, que constan de rodillos, listones de apoyo (también llamadas zapatas) y un mandril. Los parámetros de la herramienta dependen de las dimensiones proyectadas de los tubos acabados.

DATOS TECNICOS:

Diámetro del tubo después de la laminación	8-15 mm.
Espesor de la pared del tubo luego de laminar	0,08-1,5 mm.
Diámetro máximo de la pieza bruta	18 mm.
Longitud de la pieza bruta	1500-4000 mm.
Longitud máxima del tubo acabado	12000 mm.
Velocidad de la caja de laminación	60/80/120 golpes/min.



VISTA FRONTAL DE LA HPTR 8-15

Fig.1

Angulo de giro de la pieza bruta	39, 51, 90, 120 grados
Productividad (según condiciones de trabajo)	15 - 35 m./hora.
Potencia instalada de los motores eléctricos	12 kW.
Consumo de aire	0,4 m ³ /hora

COMPOSICION DEL TREN:

El tren HPTR 8 -15 consta de los siguientes bloques principales:

- 1)Caja de laminación.
- 2)Bancada.
- 3)Accionamiento principal.
- 4)Reductor.
- 5)Mecanismo de avance y giro.
- 6)Patrón de apriete del vástago del mandril.

En la figura 2 está representado un esquema de la máquina.

El tren puede ser fabricado en modelo derecho o izquierdo.

El tren puede ser fabricado en modelo de conexión a la instalación de emulsión de aceite centralizada o con instalación de emulsión de aceite individual.

La herramienta de laminación (rodillos, listones de apoyo, mandriles), no se suministra por la fábrica productora.

Proveer al tren de la herramienta de laminación es obligación de la empresa que explota el tren.

FUNCIONAMIENTO DEL TREN:

- 1) Se efectúa el ajuste del tren para la laminación del tubo de la dimensión requerida.
- 2) La pieza bruta, a través del patrón de apriete, del mecanismo

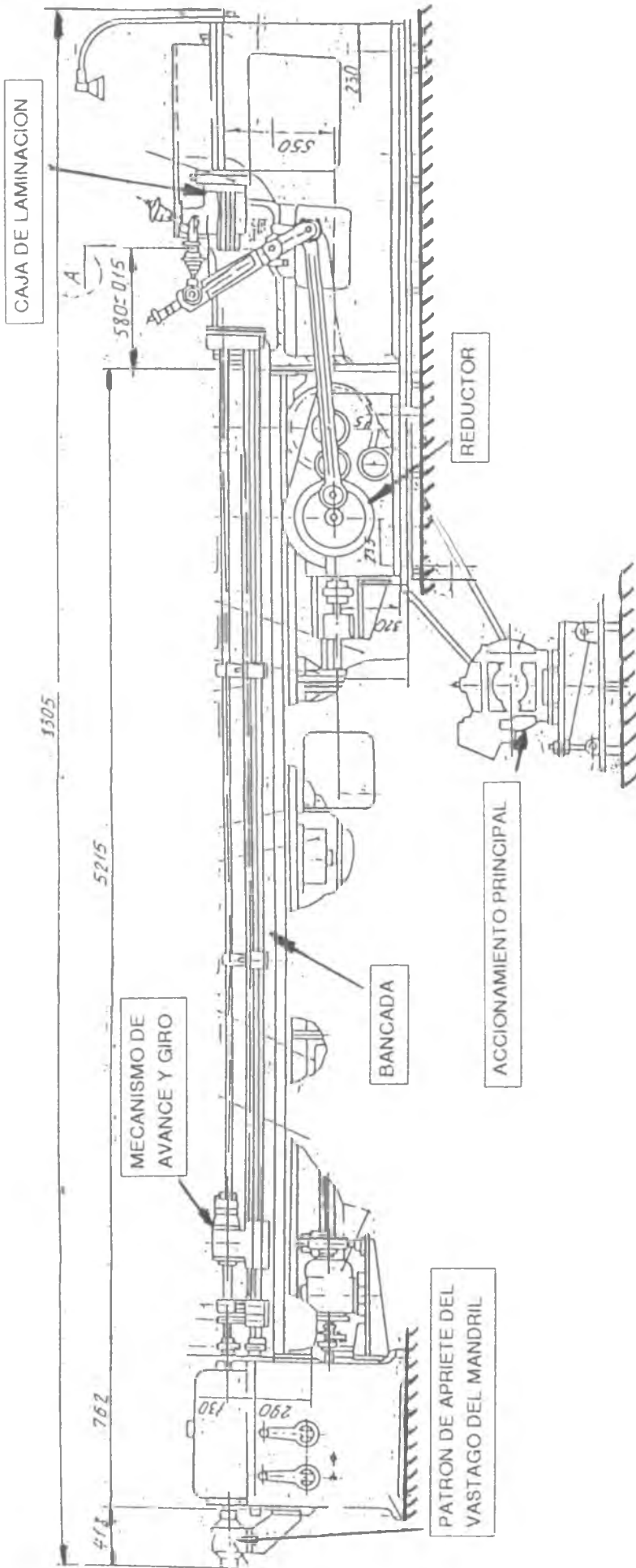


Fig.2

de avance y giro se introduce a mano en el mecanismo de avance y giro.

3) Se debe apretar el vástago del mandril en el patrón de apriete del vástago y apretar la pieza bruta en el patrón de avance.

4) Acercar la pieza bruta a la zona de laminación de la caja, conectando el accionamiento de movimiento acelerado.

5) Conectar la velocidad de carga de la caja de laminación. En este caso la caja de laminación comienza a efectuar movimientos alternativos y la pieza bruta se hace avanzar desde el patrón de avance y giro hacia la caja de laminación en el valor de avance y simultáneamente con el avance se hace girar en el ángulo establecido. El avance y giro de la pieza bruta se efectúa cuando la caja de laminación se encuentra en la posición trasera, en este caso los rodillos de laminación están separados al máximo en dirección radial, lo cual asegura la entrada libre de la parte del tubo no laminada entre los rodillos.

Al comenzar la caja de laminación su movimiento desde el bastidor intermedio, el movimiento de avance y giro de la pieza bruta se termina.

Los rodillos de laminación se acercan guiados por los listones de apoyo de manera que formen un calibre de anillo cerrado, con lo cual se asegura la laminación del diámetro exterior del tubo. El diámetro interior del tubo es controlado por el mandril, que siempre se encuentra en la zona de laminación.

Durante la laminación a la zona de deformación del metal se suministra el líquido lubricante refrigerante (emulsión o aceite).

Al acercarse el patrón de avance y giro a su posición extrema en

la zona de la bancada, la laminación se termina; se debe liberar la pieza bruta del patrón de avance, conectar el movimiento acelerado para el retorno del patrón a la posición inicial, aflojar el patrón de apriete del vástago del mandril y cargar la pieza bruta siguiente de manera que esta haga tope en el extremo del tubo precedente.

En lo que sigue, el proceso de laminación se repite.

REQUERIMIENTOS PARA LOS PARAMETROS TECNOLOGICOS DE LAMINACION:

Un trabajo normal y sin averías del tren, asimismo como la obtención de tubos de alta calidad, son posibles a condición de escoger correctamente los parámetros tecnológicos de laminación. Ante los parámetros tecnológicos, se plantean los requerimientos siguientes:

Requerimientos para la pieza bruta:

- a) Aceros, metales no ferrosos y aleaciones que poseen suficiente plasticidad para la laminación en frío pueden servir de material para las piezas brutas.
- b) Las piezas brutas de materiales poco plásticos, deben ser sometidas a tratamiento térmico para disminuir la resistencia a la deformación.
- c) Las piezas brutas no deben tener replegadas, grietas, fisuras, apretaduras, cavidades o trazos profundos, entalladuras u otros defectos. Se debe tener en cuenta que la mayor parte de los defectos indicados de la pieza bruta no se eliminan por la laminación, sino que quedan en la superficie del tubo.
- d) Los extremos de los tubos deben estar cortados perpendicularmente al eje del tubo y no deben tener rebabas.

e) Para obtener resultados positivos de la laminación de tubos, las piezas brutas se someten a revestimientos. En algunos casos la laminación sin revestimiento es irrealizable.

El carácter del revestimiento y la técnica de su aplicación a las piezas brutas dependen del material del tubo y se determina por el productor de tubos.

Requerimientos para el lubricante tecnológico:

a) La utilización del lubricante tecnológico es condición necesaria para la laminación.

b) El carácter del lubricante depende del material de la pieza bruta y se determina por el productor de tubos.

c) Para la lubricación de la superficie interior de la pieza bruta se requieren: altas cualidades adhesivas (adherencia y resistencia a la extrusión) y lubricativas.

d) Para la lubricación de la superficie exterior de los tubos, se requiere: baja viscosidad, suficiente poder lubricante y refrigerante, neutralidad hacia el contacto con metales, goma y plástico fluorocarbúrico.

Requerimientos para la herramienta tecnológica:

La herramienta para laminar incluye:

a) Rodillos de laminación (3 piezas).

b) Listones de apoyo - también llamadas zapatas- (3 piezas).

c) Mandril (1 pieza).

Las dimensiones del rodillo se establecen según el diámetro del tubo a laminar.

Las dimensiones de los listones de apoyo se determinan en base a las propiedades mecánicas del material a laminar y del régimen de laminación.

Las dimensiones del mandril se determinan en base al diámetro interior del tubo a laminar. El diámetro del vástago que sujeta al mandril debe ser 1 a 2 mm. menor que el diámetro del mandril. El material del herramental para laminar debe ser suficientemente sólido, resistente al desgaste y tener la dureza necesaria. La finura de las superficies de trabajo de la herramienta para laminar debe ser suficientemente alta, porque de esta depende la calidad de los tubos terminados. Como regla, la finura de las superficies de trabajo de la herramienta para laminar debe ser 2 a 3 veces más alta que la finura deseada en los tubos terminados.

ANEXO IV**CENTRALES NUCLEARES ARGENTINAS**Central Nuclear Atucha I:

Construída a orillas del Paraná de Las Palmas, en el partido de Zárate, a 100 km. de la Capital Federal.

Fue la primer central de América Latina.

Inicio de operación comercial: 24 de junio de 1974.

Potencia: 340 MW brutos.

Diseño: Siemens-KWU, alemán.

Central Nuclear Embalse:

Está ubicada en embalse Río Tercero, provincia de Córdoba.

Inicio de operación comercial: 20 de enero de 1984.

Potencia: 640 MW brutos.

Diseño: AECL, canadiense.

Central Nuclear Atucha II:

Está ubicada junto a Atucha I

Avance de la obra al 30/12/94 : 84% del total.

Potencia: 692 MW netos.

Diseño: Siemens-KWU, alemán.

La energía de origen nuclear, aporta el 14,8% de la energía total que se consume en el país.

ANEXO V**EJEMPLO DE LA PLANILLA PARA EL CALCULO
DE LA ZAPATA**

CALCULO DE LA ZAPATA

Diametro exterior tubo de entrada:	14.6	Du	29
Espesor " " " :	1	Dk =	40.8
		Dk/Du	1.41
Diametro exterior tubo acabado :	12.92		
Espesor del tubo acabado :	0.58		

Reduccion de area	48.67	Reduc. de espesor:	0.462 mm.
"Q" total lineal :	3.65		
"Q" total logaritmico	4.46		
Estiramiento :	1.90		

ZAPATA RUSA :

DeltapeA 0.042 Espesor corregido de entrada 1.042

Yb =	1.812	Xb =	36		
YP =	0.840	XP =	14		
Y7 =	0.462	X7 =	15		
Y6 =	0.308	X6 =	15	6	0.67
Y5 =	0.225	X5 =	15	5	0.49
Y4 =	0.157	X4 =	15	4	0.34
Y3 =	0.101	X3 =	15	3	0.22
Y2 =	0.058	X2 =	15	2	0.13
Y1 =	0.029	X1 =	15	1	0.06
Y0 =	0.25	X0 =	30		
		XK =	25		

0	21.950
30	22.200
55	22.200
70	22.171
85	22.142
100	22.099
115	22.043
130	21.975
145	21.892
160	21.738
174	21.360
210	20.388

Valores rusos:

x2:	0.01429
x:	0.02057
cte:	0.028

NUMERO DE VUELTAS QUE DA UN PUNTO DENTRO DE LA ZONA DE CALIBRACION

Ingresar Ang. de giro 51 grados
 Ingresar Avance = 2.5 mm.

N de vueltas.....	Longitud de calibracion (mm.)						
	15	25	35	45	55	65	75
	0.41	0.69	0.96	1.24	1.51	1.79	2.06

VALOR SUGERIDO DE LA ZONA DE REDUCCION DE DIAMETRO

Xd = 14.0 mm.

ZAPATA MODIFICADA:

Yb =	1.812	Xb =	35.2			
YP =	0.840	XP =	14		Coeficientes de la zapata modificada	
Y7 =	0.462	X7 =	14.4			
Y6 =	0.297	X6 =	14.4	6		0.64
Y5 =	0.215	X5 =	14.4	5		0.47
Y4 =	0.146	X4 =	14.4	4		0.32
Y3 =	0.090	X3 =	14.4	3		0.20
Y2 =	0.048	X2 =	14.4	2		0.10
Y1 =	0.018	X1 =	14.4	1		0.04
Y0 =	0.25	X0 =	35			
		XK =	25			

210 = 'Longitud total de la zapata modificada

0	21.950	Z
25	22.200	A
60	22.200	P
74.4	22.182	
88.8	22.152	M
103.2	22.110	O
117.6	22.054	D
132	21.985	I
146.4	21.903	F
160.8	21.738	
174.8	21.360	
210	20.388	

Valores modificados:

x2: 0.01429
 x: 0.02057
 cte: 0.005

Valores rusos:

x2: 0.01429
 x: 0.02057
 cte: 0.028

R'/R = 1.72446 Copiar — 1.72

F10: Curva de esfuerzo

COMPONENTES DEL TENSOR DE DEFORMACION DE LA GARGANTA DE LAMINACION

$E_d = 0.06132$ = Deformacion debida a la reduccion de diametro.
 $E_a = 0$ Ingresar valor de deformacion anterior
 $E_i = 0.06132$ = Deformacion inicial al comienzo de la reduccion de espesor
13.844 mm.= Diametro exterior al comienzo de la reduccion de espesor

INGRESAR SIGMA PARA $E = 0$ Y LA FUNCION DE ENDURECIMIENTO:

Sigma 0 26 kg./mm²
K= 39
N= 0.25
Angulo estimado al fin de la deformacio 30 grados

Sigma F(E) 45.4076 Debido a la deformacion inicial

ESTACION Y7-6

E Debido a la reduccion de espesor	0.172	Angulos estimados para Erz en cada estacion
E Debido a la reduccion de diametro	0.013	I
E Debido al estiramiento	0.185	V
E rz estimado	0.108	10.7183 grados
E total Y1	0.242	
Ei+EY1	0.303	
Sigma:	54.934	
Angulo de inclinacion de la estacion	0.011 rad	
Long. que recorre el rodillo sobre el tubo	20.265 mm.	

ESTACION Y6-5

E Debido a la reduccion de espesor	0.098	
E Debido a la reduccion de diametro	0.007	
E Debido al estiramiento	0.105	
E rz estimado	0.053	5.33151 grados
E total Y2	0.133	
Ei+EY1+EY2	0.436	
Sigma:	57.682	
Angulo de inclinacion de la estacion	0.006 rad	
Long. que recorre el rodillo sobre el tubo	20.265 mm.	

ESTACION Y5-4

E Debido a la reduccion de espesor	0.091	
E Debido a la reduccion de diametro	0.006	
E Debido al estiramiento	0.096	
E rz estimado	0.045	4.47435 grados
E total Y3	0.120	
Ei+EY1+EY2+EY3	0.555	
Sigma:	59.665	
Angulo de inclinacion de la estacion	0.005 rad	
Longitud que recorre el rodillo sobre el t	20.265 mm.	

ESTACION Y4-3

E Debido a la reduccion de espesor	0.080	
E Debido a la reduccion de diametro	0.004	
E Debido al estiramiento	0.084	
E rz estimado	0.036	3.61719 grados
E total Y4	0.104	
Ei+EY1+EY2+EY3+Y4	0.659	
Sigma:	61.136	
Angulo de inclinacion de la estacion	0.004 rad	
Longitud que recorre el rodillo sobre el t	20.265 mm.	

ESTACION Y3-2

E Debido a la reduccion de espesor	0.066	
E Debido a la reduccion de diametro	0.003	
E Debido al estiramiento	0.069	
E rz estimado	0.027	2.76003 grados
E total Y4	0.084	
Ei+EY1+EY2+EY3+Y4+Y5	0.743	
Sigma:	62.205	
Angulo de inclinacion de la estacion	0.003 rad	
Longitud que recorre el rodillo sobre el t	20.265 mm.	

ESTACION Y2-1

E Debido a la reduccion de espesor	0.048	
E Debido a la reduccion de diametro	0.002	
E Debido al estiramiento	0.050	
E rz estimado	0.019	1.90287 grados
E total Y4	0.061	
Ei+EY1+EY2+EY3+Y4+Y5	0.803	
Sigma:	62.923	
Angulo de inclinacion de la estacion	0.0020 rad.	
Longitud que recorre el rodillo sobre el t	20.265 mm.	

ESTACION Y1-0

E Debido a la reduccion de espesor	0.031	
E Debido a la reduccion de diametro	0.001	
E Debido al estiramiento	0.033	
E rz estimado	0.012	1.19571 grados
E total Y4	0.039	
Ei+EY1+EY2+EY3+Y4+Y5+Y6+Y7	0.843	
Sigma:	63.369 Kg./mm ²	621.646 MPa.
Angulo de inclinacion de la estacion	0.0013 rad	Tension de fluencia
Longitud que recorre el rodillo sobre el t	20.265 mm.	del tubo laminado

Sigma 0.2 del tubo terminado 65.412 Kg./mm² 641.688 MPa.

CALCULO DE LA CURVA DE ESFUERZO

m = 2.5 mm. Ingresar el valor de avance

Diferencia de diametros del mandril	0.040 mm.	en	350 mm.
Diferencia de diametros/2 en zona de tr	0.00811	en	141.854 mm.
Angulo de inclinacion del mandril	5.7E-05 rad.		
Ingresar valor de Recuperacion	0.03 mm.		
Diametro de calibracion del mandril	11.73 mm.		

ESTACION Y7-6

Variacion de espesor	0.0203 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00409		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	13.844		
Seccion inicial	42.3119		
Diametro exterior final	13.5139		
Seccion final	35.2186		
Diametro interior inicial	11.7381		
Seccion interior inicial	108.215		
Diametro interior final	11.7369		
Seccion interior final	108.193		
Longitud de contacto 1	0.81313	1.72	1.06641
Longitud de contacto 2	0.06817	1.72	0.0894
Longitud de contacto total	0.8813		1.15581
Sigma 7	45.4076		
Sigma 6	54.9343		
Promedio x 1,155	57.9475		Espesor al final de
Coefficiente de rozamiento	0.05		la estacion:
Factor de correccion por rozamiento	1.037		0.87694 mm.
Ancho promedio	8.030		
Fuerza separatriz	557.733		
R'/R =	1.72446		1.72

ESTACION Y6-5

Variacion de espesor	0.010 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00204		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	13.5139		
Seccion inicial	35.2399		
Diametro exterior final	13.3497		
Seccion final	31.7966		
Diametro interior inicial	11.7369		
Seccion interior inicial	108.193		
Diametro interior final	11.7358		
Seccion interior final	108.172		
Longitud de contacto 1	0.59497	1.72	0.78029
Longitud de contacto 2	0.07097	1.72	0.09308
Longitud de contacto total	0.66594		0.87337
Sigma 6	54.9343		
Sigma 5	57.6823		
Promedio x 1,155	65.0361		
Coeficiente de rozamiento	0.055		
Factor de correccion por rozamiento	1.037		0.79483
Ancho promedio	7.884		
Fuerza separatriz	464.404		
R'/R =	2.24388		1.72

ESTACION Y5-4

Variacion de espesor	0.008 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00171		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	13.3497		
Seccion inicial	31.7966		
Diametro exterior final	13.2119		
Seccion final	28.9217		
Diametro interior inicial	11.7358		
Seccion interior inicial	108.172		
Diametro interior final	11.7346		
Seccion interior final	108.15		
Longitud de contacto 1	0.5465	1.72	0.71672
Longitud de contacto 2	0.07126	1.72	0.09346
Longitud de contacto total	0.61776		0.81018
Sigma 6	57.6823		
Sigma 5	59.6648		
Promedio x 1,155	67.7679		
Coeficiente de rozamiento	0.06		
Factor de correccion por rozamiento	1.042		0.72593 = Espesor al final de estacion
Ancho promedio	7.796		
Fuerza separatriz	445.936		
R'/R =	2.44334		1.72

ESTACION Y4-3

Variacion de espesor	0.007 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00138		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	13.2119		
Seccion inicial	28.9431		
Diametro exterior final	13.1004		
Seccion final	26.6407		
Diametro interior inicial	11.7346		
Seccion interior inicial	108.15		
Diametro interior final	11.7335		
Seccion interior final	108.129		
Longitud de contacto 1	0.4933	1.72	0.64696
Longitud de contacto 2	0.07169	1.72	0.09401
Longitud de contacto total	0.56498		0.74097
Sigma 4	59.6648		
Sigma 3	61.1361		
Promedio x 1,155	69.7625		
Coefficiente de rozamiento	0.065		
Factor de correccion por rozamiento	1.046		0.67022 = Espesor al final de estacion
Ancho promedio	7.723		
Fuerza separatriz	417.370		
R'/R =	2.69365		1.72

ESTACION Y3-2

Variacion de espesor	0.005 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00105		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	13.1004		
Seccion inicial	26.6621		
Diametro exterior final	13.0154		
Seccion final	24.9184		
Diametro interior inicial	11.7335		
Seccion interior inicial	108.129		
Diametro interior final	11.7323		
Seccion interior final	108.108		
Longitud de contacto 1	0.43278	1.72	0.56758
Longitud de contacto 2	0.07223	1.72	0.09473
Longitud de contacto total	0.50501		0.66232
Sigma 4	61.1361		
Sigma 3	62.2054		
Promedio x 1,155	71.2297		
Coefficiente de rozamiento	0.07		
Factor de correccion por rozamiento	1.047		0.62772 = Espesor al final de estacion
Ancho promedio	7.665		
Fuerza separatriz	378.617		
R'/R =	3.04208		1.72

ESTACION Y2-1

Variacion de espesor	0.003 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00073		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	13.0154		
Seccion inicial	24.9398		
Diametro exterior final	12.9568		
Seccion final	23.7443		
Diametro interior inicial	11.7323		
Seccion interior inicial	108.108		
Diametro interior final	11.7312		
Seccion interior final	108.086		
Longitud de contacto 1	0.36041	1.72	0.47267
Longitud de contacto 2	0.07291	1.72	0.09561
Longitud de contacto total	0.43331		0.56828
Sigma 4	62.2054		
Sigma 3	62.9235		
Promedio x 1,155	72.262		
Coefficiente de rozamiento	0.075		
Factor de correccion por rozamiento	1.045	0.59841	= Espesor al final de estacion
Ancho promedio	7.623		
Fuerza separatriz	327.130		
R'/R =	3.60602		1.72

ESTACION Y 1-0

Variacion de espesor	0.002 mm.		
Conicidad de la zapata	0.00046		
Conicidad del mandril	2.9E-05		
Diametro exterior inicial	12.9568		
Seccion inicial	23.7656		
Diametro exterior final	12.92		
Seccion final	23.0171		
Diametro interior inicial	11.7312		
Seccion interior inicial	108.086		
Diametro interior final	11.73		
Seccion interior final	108.065		
Longitud de contacto 1	0.28464	1.72	0.3733
Longitud de contacto 2	0.07353	1.72	0.09644
Longitud de contacto total	0.35817		0.46974
Sigma 4	62.9235		
Sigma 3	63.3686		
Promedio x 1,155	72.9337		
Coefficiente de rozamiento	0.08		
Factor de correccion por rozamiento	1.041	0.58	= Espesor al final de estacion
Ancho promedio	7.595		
Fuerza separatriz	270.909		
R'/R =	4.31165		1.72

VALORES PARA LA REPRESENTACION DE LA CURVA DE ESFUERZO

El cero de X es el punto donde se comienza a reducir espesor

<u>Distancia[X]</u>	<u>Esfuerzo[ka.]</u>
10.1325	557.733
30.3974	464.404
50.6623	445.936
70.9272	417.37
91.1921	378.617
111.457	327.13
131.722	270.909

ANEXO VI

SUPERFICIES OBTENIDAS LUEGO DEL ÚLTIMO PASO DE LAMINACIÓN

Durante los ensayos sobre las laminadoras 8-15 se obtuvieron distintas calidades de superficies. Las más representativas se muestran a continuación, numeradas del 1 al 12.

A menos que se indique lo contrario la temperatura de recocido del tubo de entrada fue de 700°C.

Excepto en el caso de la foto N° 12 los mandriles utilizados fueron pulidos en la dirección del eje del mandril.

La foto N° 12 corresponde a un defecto solo detectable por ultrasonido debido a su pequeño tamaño.

Las fotos A, B y C corresponden a la superficie del rodillo que trabaja sobre el tubo. Esta superficie es la garganta del rodillo.

La foto C muestra picaduras de corrosión sobre la garganta del rodillo. Son causadas por microorganismos de tipo lipolíficos (atacan los compuestos grasos) que producen compuestos de degradación agresivos como el SH₂, altamente corrosivo.

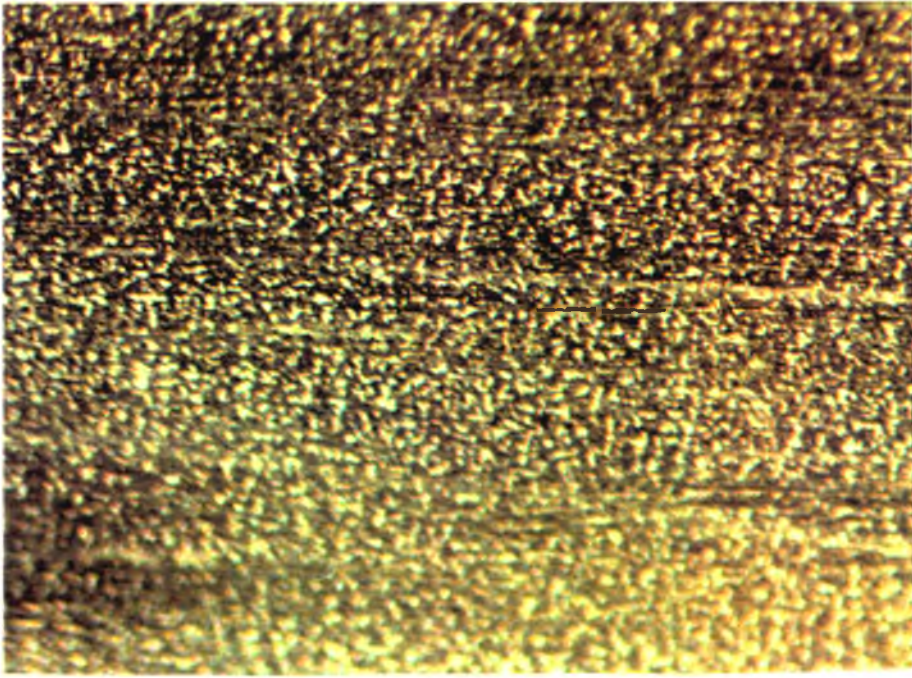


Foto 1. Superficie interior normal obtenida luego de laminar un tubo cuya temperatura de recocido fue de 700°C. 40X.

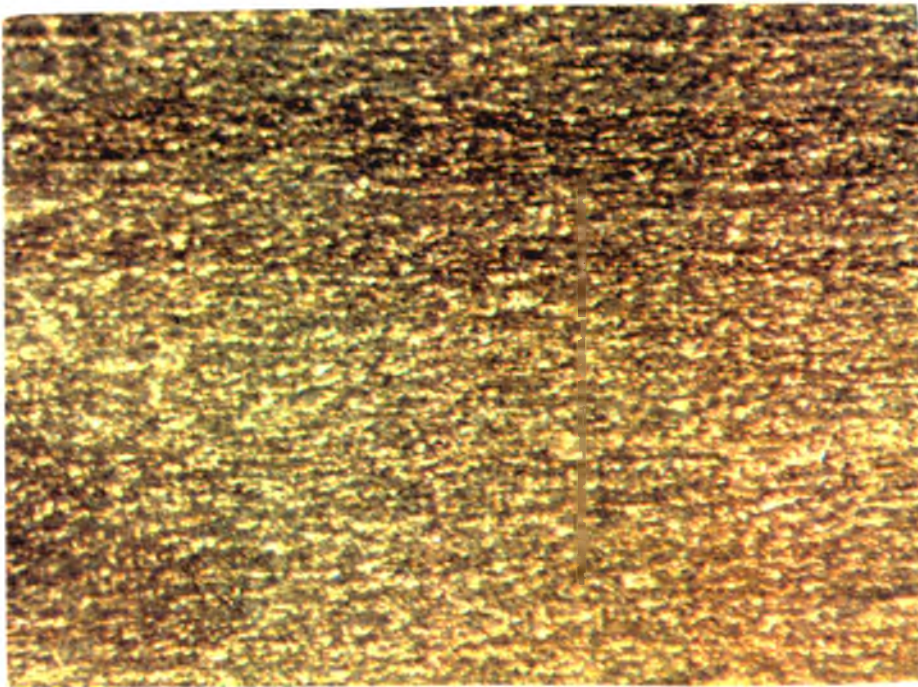


Foto 2. Superficie interior obtenida luego de laminar un tubo cuya temperatura de recocido fue de 650°C. 40X.

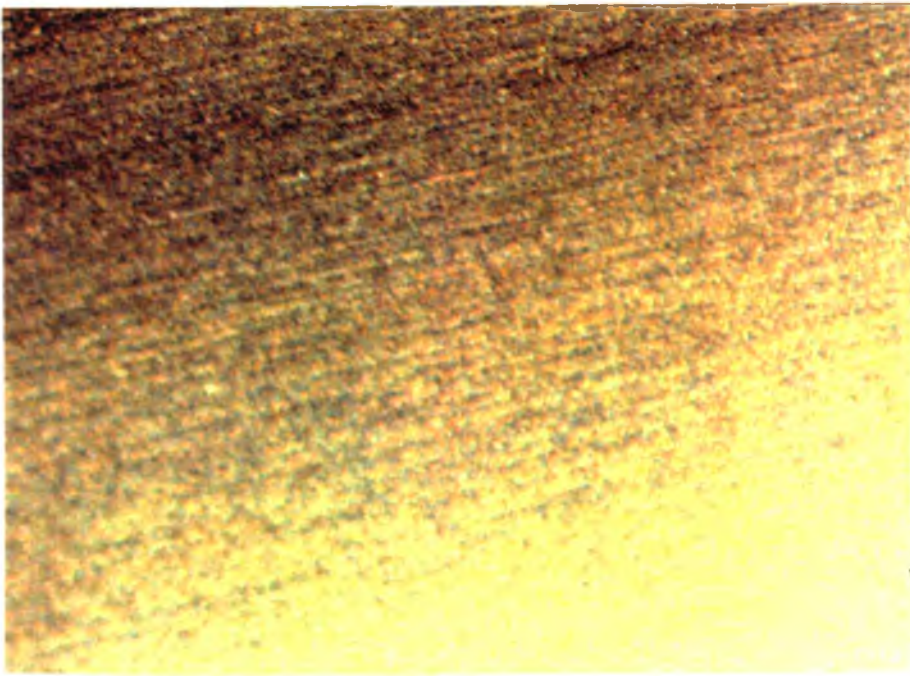


Foto 3. Muy buena superficie interior obtenida en un tubo tipo Candú 3 pasos. Se han dado las condiciones ideales de mandril, lubricación y rodillos. 40X.

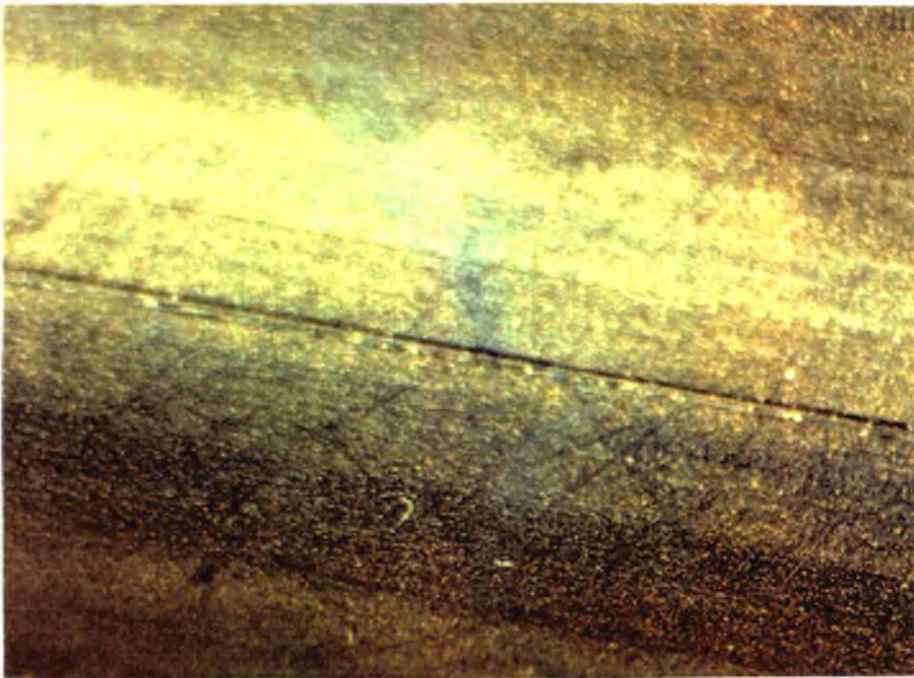


Foto 4. Superficie interior de una garganta. Se observa una raya longitudinal debida a un rodillo muy cerrado. (diseño inapropiado). 10X

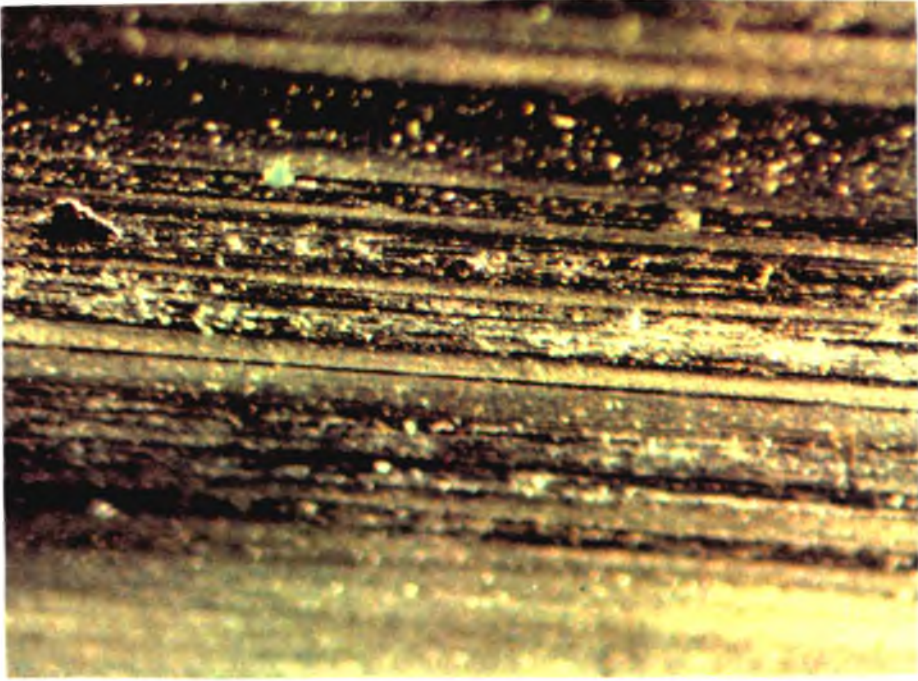


Foto 5. Desgarros y rayas por agarre sobre el mandril.
Arranque de material. 40 X.

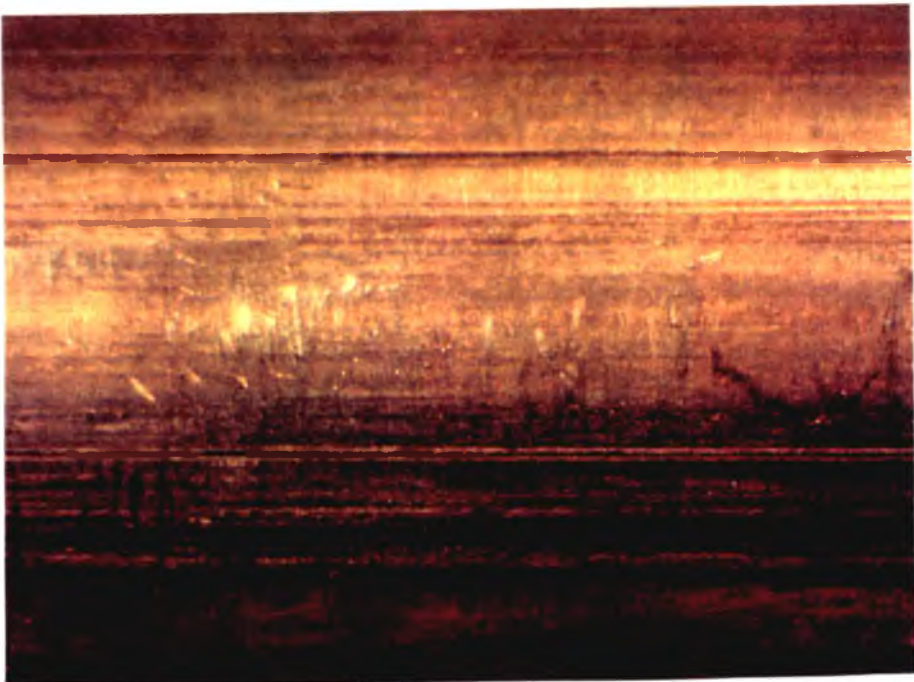


Foto 6. Rayas en el interior de la garganta debido a rodillos
muy cerrados con respecto al diámetro del tubo de
entrada. 20X.

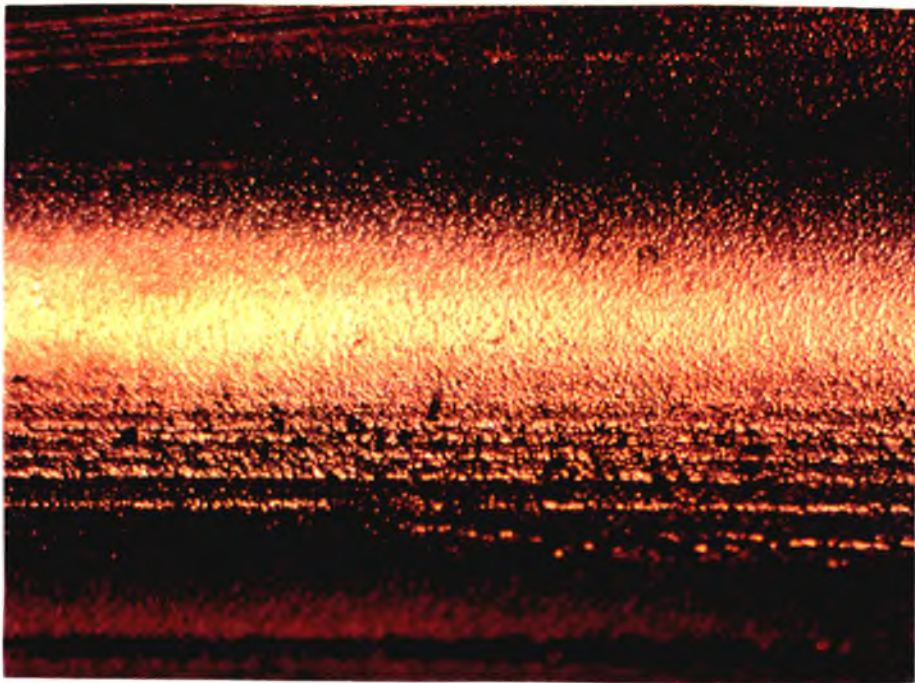


Foto 7a. Superficie interior de un tubo de entrada con muchos defectos. Se observan: rayas y material arrancado (manchas negras). El aspecto granular de la superficie que se observa claramente en el centro de la foto se debe al tratamiento de decapado. 10X.

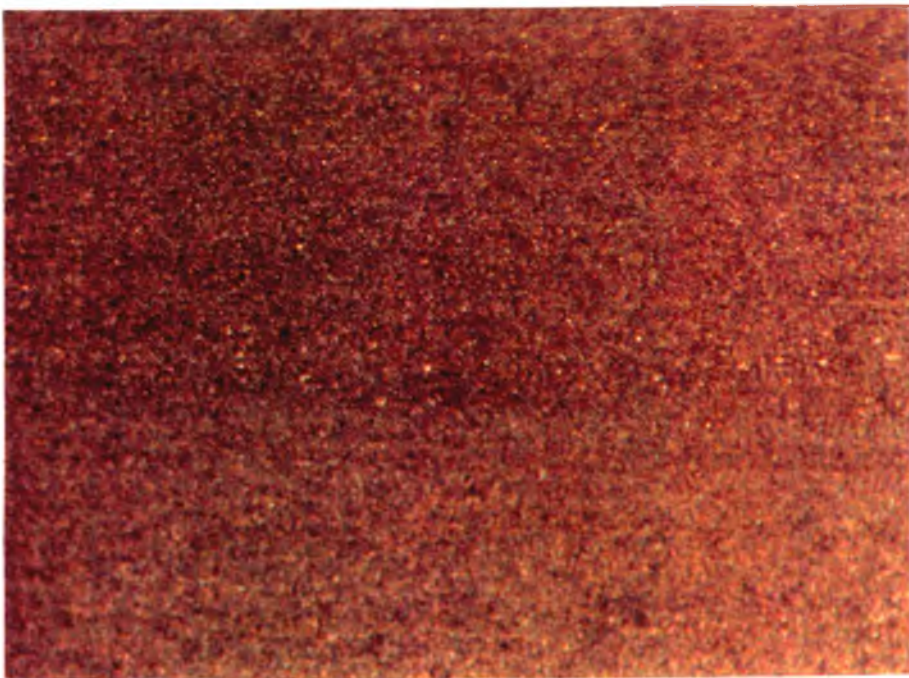


Foto 7b. Superficie interior obtenida luego de laminar el tubo anterior. La superficie no presenta defectos. Que la superficie del tubo de salida mejore notablemente es lo normal en laminación. 10X.

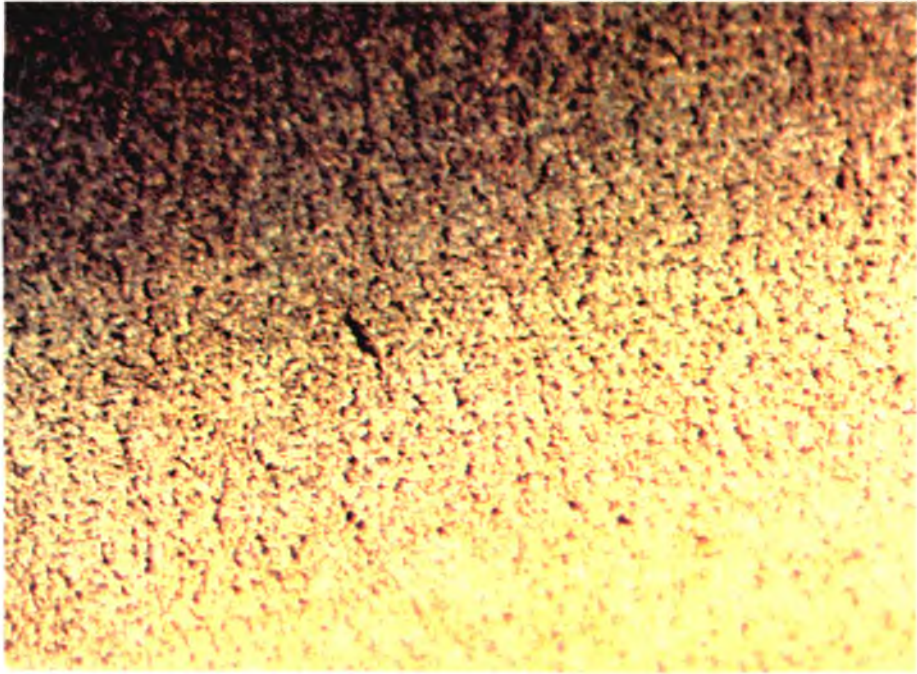


Foto 8. Superficie interior obtenida con zapatas rectificadas para que la zona de reducción de espesor sea una recta. Se observan desgarros. La superficie obtenida es peor a la del tubo de entrada, contrariamente a lo que ocurre normalmente. 40X.

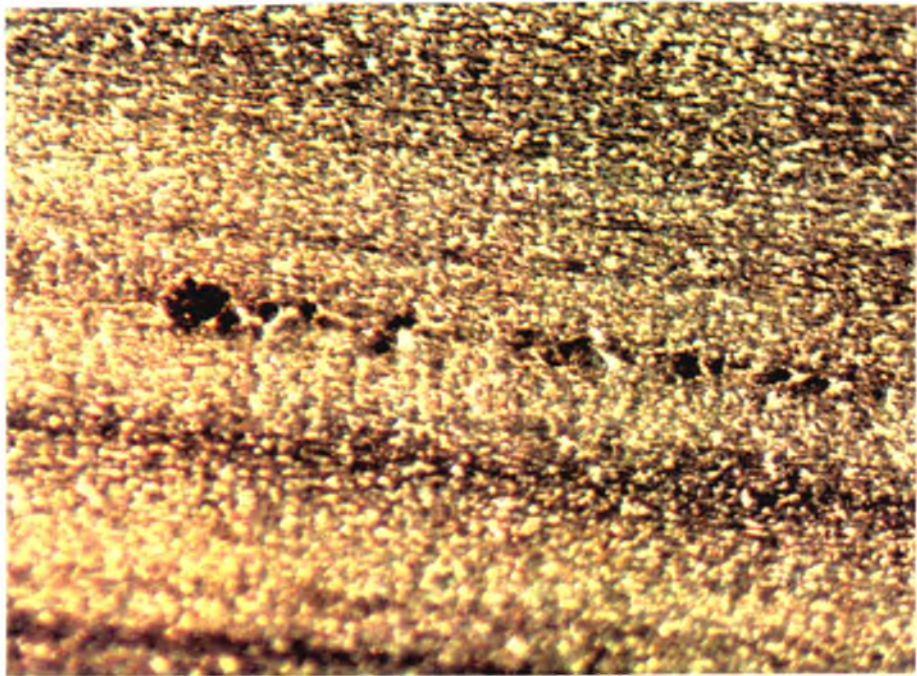


Foto 9. Sucesión de material arrancado en el interior de una garganta de laminación. 40X.

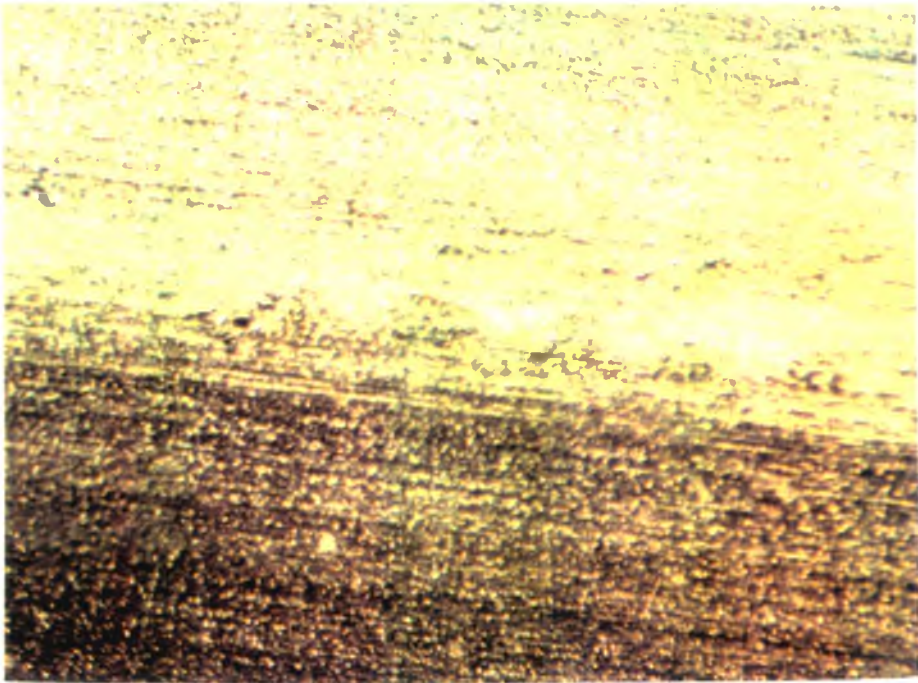


Foto 10. Material arrancado de la superficie exterior de un tubo. Esto es raro que ocurra en el último paso de laminación. 40X.

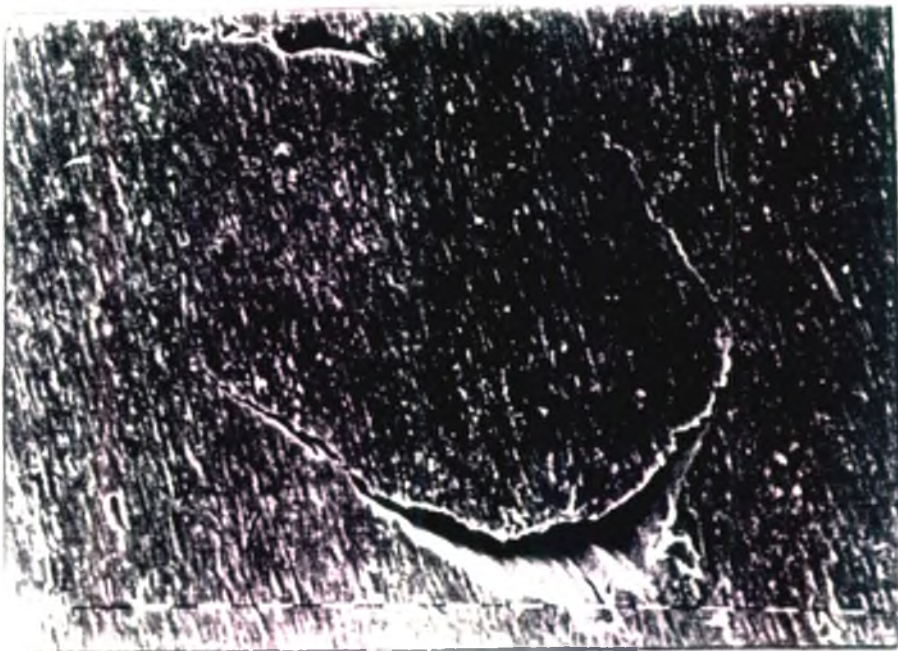


Foto 11. Partícula de material pegado (Zry) y laminado sobre la superficie exterior del tubo. 400X.

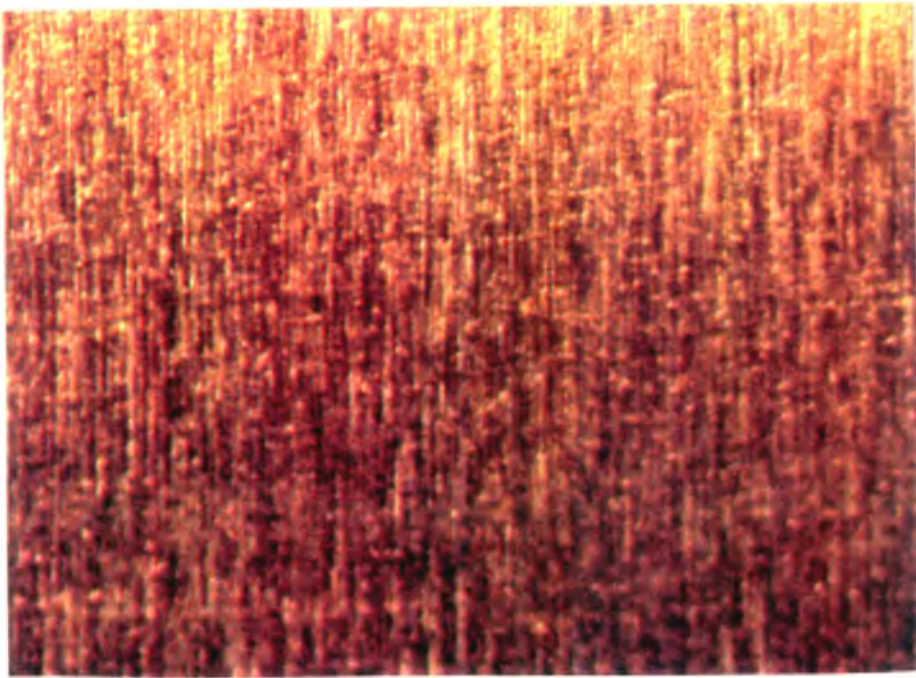


Foto 12. Superficie interior de un tubo laminado con mandril rectificado (sin pulir). Se observa sobre la superficie de la muestra la impresión de las rayas de rectificado pero no defectos. Las rayas son perpendiculares al eje del mandril. 40X.

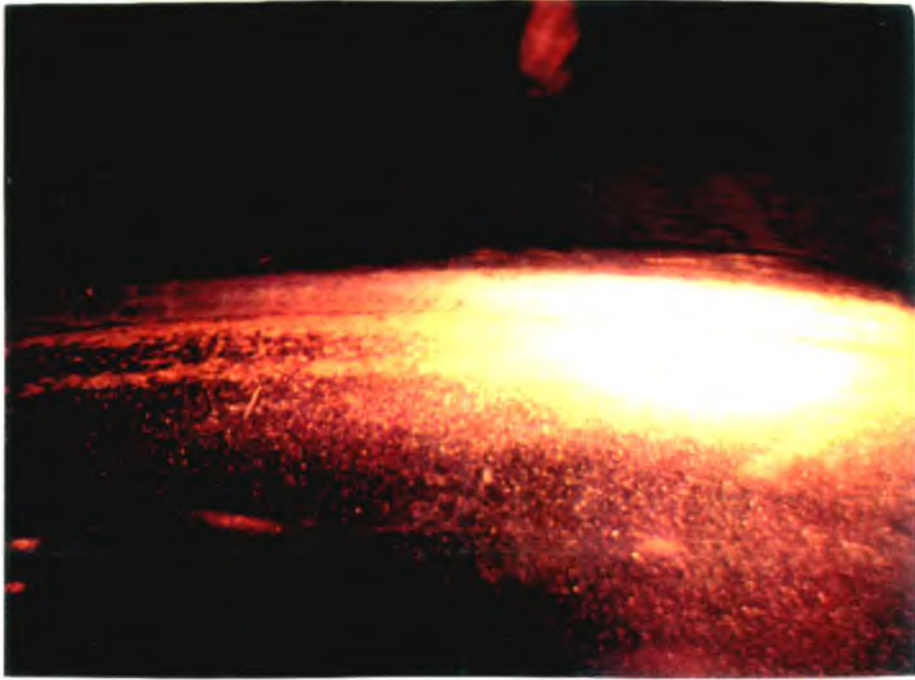


Foto A. Rodillo con marcas cerca del borde de la garganta. Estas marcas aparecen cuando el rodillo no tiene suficiente zona de descarga. Se deben al quemado del lubricante sobre la superficie del rodillo que deja restos de hollín y a la adhesión de pequeñas partículas de ZRy en forma de polvo que se van acumulando durante la laminación. La solución es retocar el rodillo en esta zona. 6,6X.



Foto B. Material pegado (Zry) sobre la garganta de un rodillo. El material pegado se reconoce tanto sobre el rodillo como sobre el mandril por su aspecto brillante. 6,6X.

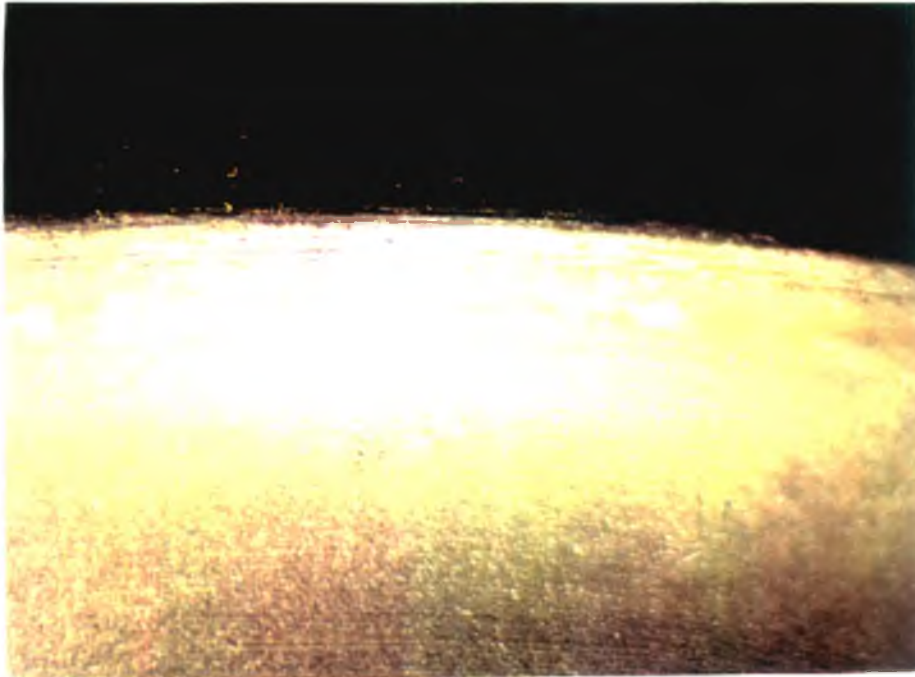


Foto C. Garganta de rodillo que presenta las mismas características que los de las fotos A y B. Se observa además hacia el centro de la foto picaduras en la superficie. Esto se debe a la corrosión debido a un ácido que producen bacterias que proliferan en el lubricante. Esto se combate con la adición de bactericidas.

REFERENCIAS:

- [1] Folleto CNEA. Julio de 1983.
- [2] Vaina de Zry-4. Ingeniería de elementos combustibles.
H.F. Helbing. 1984.
- [3] IAEA/CNEA International Seminar on Heavy Water Fuel
Technology, página 60. 1983.
- [4] Simposio: Tubos para la energía nuclear, Bs. As. Marzo de
1981. Dictado por A. Dunnewald de la empresa Mannesmann.
- [5] Información dada por el fabricante francés de TREX (Cezus).
- [6] The Manufacture of Zircaloy and Stainless Steel Canning
Tubes. Por B. Larson, Sandik, Sandviken, Sweden. 1972.
- [7] Quality Control and Inspection on PHWR Cladding Tubes Made
by Hot Extrusion and Cold Pilgering Process. Por R.K.
Mistry, R.E. Srivastava, V.A. Chandramculi. Nuclear Fuel
Complex, Hyderabad, India.
- [8] Etude Mecanique et Tribologique du Laminage a Pas de Pelerin.
Por Didier Farrugia. Tesis. Ecole Nationale Superieure des
Mines de Paris, Francia. 1990.
- [9] Deformability of Zirconium-Lined Cladding Tube In Cold
Pilgering. H. Abe, H. Tarui, T. Kobayasui, M. Honji and T.
Konishi. Sumitomo Metal Industries, Japan. 1990.
- [10] Laminación de tubos en máquinas HPT. Documento CNEA-FAE.
Por Ing. Lucio Iurman.
- [11] Laminación de tubos en máquinas HPTR. Documento CNEA-FAE.
Por Ing. Lucio Iurman.
- [12] Production of Zirconium or Zirconium Alloy Tubes on HPT
or HPTR Mills. Anónimo. Origen ruso.
- [13] Folleto del fabricante de rectificadoras de calibres
Granlund.

[14] Comunicaciones FAE-Sandvik. 1990.

[15] Modelling of Damage in Cold Pilgering. J.L. Aubin,
E. Girard and P. Montmitonnet. Francia. 1993.

[16] Informe interno FAE. Por O. Brunner.