

# CRITERIOS DE FABRICACIÓN APLICABLES A LA PRODUCCIÓN DE VAINAS CAREM

D. R. Bianchi, D. Azzinari, P. Gongora, M. Sabio Calvete, M. Ilarri, M. Perazzo, J. Duarte, A. Duarte, J. Rojas, G. Fleitas, W. C. Szieber, P. Vizcaíno

Dpto. de Tecnología de Aleaciones de Circonio, Centro Atómica Ezeiza, Comisión Nacional de Energía Atómica

e-mail: [dbianchi@cae.cnea.gov.ar](mailto:dbianchi@cae.cnea.gov.ar)

## RESUMEN

En el marco del proyecto CAREM 25, en PPF AE, CNEA, se han desarrollado vainas para los elementos combustibles dicho reactor. Las mismas se utilizarán para construir barras combustibles para luego irradiarlas y evaluar su comportamiento junto con el de las pastillas de uranio.

Entre los alcances del acuerdo firmado entre las autoridades de la CNEA y el Institutt for Energiteknikk (IFE) de Noruega, se contempla irradiar barras combustibles CAREM construidos a partir de estas vainas en el OECD Halden Reactor Project (HRP, emprendimiento que encabeza el IFE e integran más de 16 países).

El trabajo realizado contempló la producción de dos partidas experimentales de vainas. De la segunda se extrajeron las que formaran parte de las barras combustibles.

En el presente trabajo se analizan las secuencias empleadas, los resultados obtenidos y se plantean las condiciones generales para el desarrollo del proceso definitivo que se aplicara en la fase productiva destinada al reactor CAREM 25.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la fabricación de vainas existen una serie de parámetros tales como porcentaje de deformación en área, relación entre deformación en diámetro y deformación en espesor, temperatura de los tratamientos térmicos intermedios y el final, que definen las propiedades mecánicas, las características microestructurales y la calidad superficial y dimensional del producto obtenido.

En este desarrollo se definió una ruta de fabricación en cuatro pasos de laminación utilizando herramental existente. Los dos primeros pasos se realizaron en FAESA con máquinas denominadas HPT, que están diseñadas para reducir prioritariamente el diámetro y en segundo lugar el espesor. Los dos pasos siguientes realizados en PPF AE se hicieron en máquinas denominadas HPTR que reducen prioritariamente el espesor y en segundo lugar el diámetro.

Por otro lado y dado que la resistencia final solicitada era bastante alta para la experiencia habitual, se debieron realizar los últimos dos pasos sin tratamiento térmico intermedio para acumular suficiente deformación antes del tratamiento térmico final. Como parte de este trabajo se comparan los resultados obtenidos en ambas partidas experimentales y su correspondencia con las especificaciones, se analizan las limitaciones que presenta la secuencia empleada y se proponen secuencias alternativas.

Adicionalmente se discute la posibilidad de reducir los pasos de laminación de cuatro a tres y la incidencia económica de este cambio.

## 2. PROCESO DE FABRICACIÓN

En el desarrollo de una secuencia de deformación plástica destinada a la obtención de vainas de Zircaloy-4 para reactores de potencia se tienen en cuenta los siguientes factores:

1. Distribución de la deformación plástica (medida en % de deformación en área) en forma homogénea en los sucesivos pasos de deformación.
2. Deformación plástica lo mas alta posible, sin superar los límites de ductilidad que presenta el material.
3. Obtención de superficies que no presenten defectos superficiales que limiten las propiedades del producto final tanto interior como exteriormente en cada uno de los pasos de deformación aplicados.
4. Relación reducción espesor/reducción en diámetro mayor lo más alto posible durante todo el proceso y mayor de dos para el último paso de deformación (de manera tal de generar una textura cristalográfica acorde a la especificación).

En el caso de las vainas tipo CAREM 25, el proceso de laminación consistió en 4 pasos. Los dos primeros fueron realizados por FAESA, mientras que los dos últimos se hicieron en el PPFAE.

La figura 1 muestra un esquema elemental de la disposición rodillo, tubo y mandril en las laminadoras tipo HPT (Pilger).

La Figura 2 muestra un esquema elemental de la disposición de la vaina y el herramental, en laminadora HPTR 8-15.

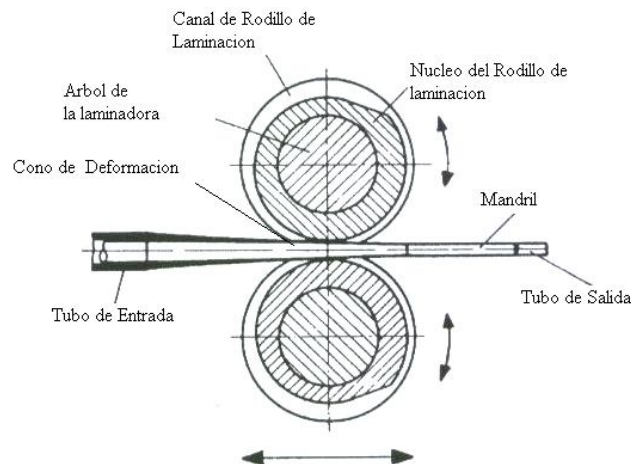


Figura 1. Esquema de la disposición del grupo Rodillo – Tubo - Mandril

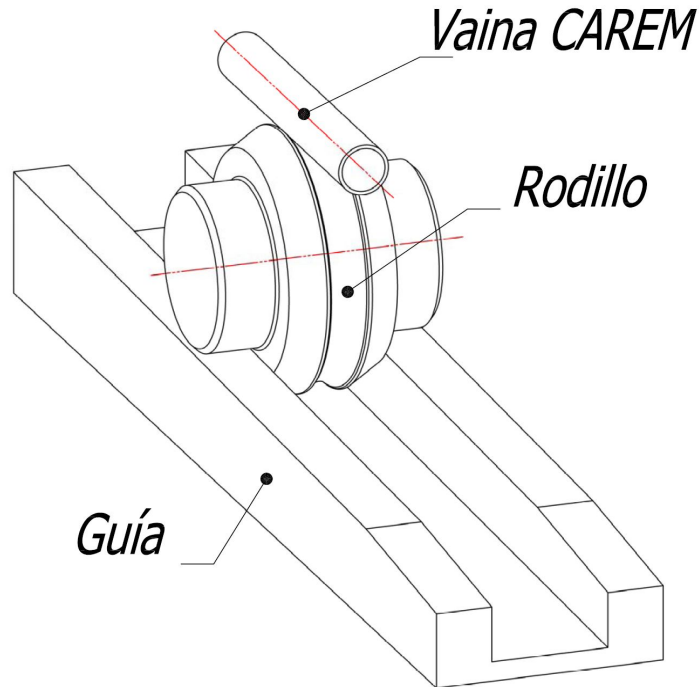


Figura 2. Esquema de la disposición del grupo Vaina-Rodillo-Guía

En el primer paso de deformación se aplicó la misma reducción de área y diámetro que reciben las vainas utilizadas en las centrales de Atucha I, Atucha II y Embalse, mientras que en el segundo se aplicó una reducción ligeramente mayor. Los dos pasos posteriores surgieron del desarrollo del proceso de laminación particular para vainas CAREM 25 que se realizó en PPF AE.

El producto obtenido por FAESA fue un semielaborado de 12 mm de diámetro exterior y 1,5 mm de espesor. Fue necesario, para llegar a este estado, realizar tratamientos térmicos de recuperación, debido a que la alta deformación endurecía mucho al material, comprometiendo las etapas de laminación posteriores. Para llegar a las dimensiones finales de la vaina debíamos aplicar dos pasos de laminación en la máquina HPTR 8-15 en lugar del último paso que se aplica normalmente a las vainas Atucha I, II y Embalse, debido a que en ese rango de diámetros no es posible reducir 3 mm en un solo paso.

Los pasos de laminación que se realizaron en PPF AE fueron los siguientes:

1. El primero partió del producto antes mencionado: un tubo de 12 mm de diámetro externo, con un espesor de 1.5 mm, y se llegó a un tubo de 10.2 mm de diámetro externo, de espesor 1 mm. Para esto se utilizó un mandril de 8.20 mm de diámetro, con el que se definió el diámetro interno de este paso de laminación.
2. En el segundo y último paso de laminación, se obtuvo el diámetro y espesor definitivo, de 9 mm de diámetro externo, con un espesor de 0.625 mm aproximadamente, según especificación recibida ET-CAREM25F-3-B0610. Para esto se usó un mandril de 7.73 mm de diámetro.

Los pasos de laminación realizados y la configuración de la laminadora HPTR, se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1:** *Parámetros geométricos de laminación de Vainas CAREM 25*

<i>Parámetro</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Paso 1</i>	<i>Paso 2</i>
Diam. ext. antes de laminar	(mm)	12,00	10,2
Diam. ext luego de laminar	(mm)	10,20	9,00
Espesor antes e laminar	(mm)	1,50	1
Espesor luego de laminar	(mm)	1	0,625
Mandril utilizado (diámetro)	(mm)	8,20	7,73
Rodillos utilizados (diámetro)	(mm)	10,50	9,00
Deformación en área	(%)	42	43

## 2.1 Mecanismo de deformación en la laminadora HPTR 8-15

A modo de introducción a la lógica asociada a la laminación de tubos en maquinas HPTR es conveniente analizar la función de un rodillo de laminación.

En la Figura 2a) observamos el perfil del rodillo de laminación. Cuenta con dos apoyos que ruedan sobre la guía en forma de U y un canal circular que trabaja sobre el tubo a deformar, responsable del conformado de la sección final a obtener. En la Figura 2b) se puede observar la configuración de los rodillos y vaina en el momento del laminado.

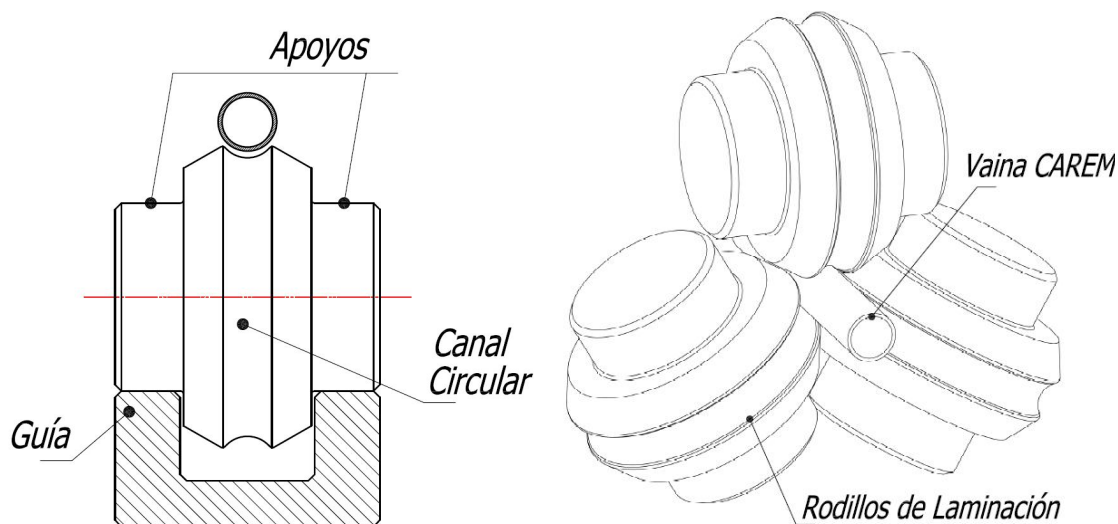


Figura 2. a) Esquema de perfil delantero de un rodillo de laminación. Máquina HPTR. b) Disposición de los rodillos cerrados en la zona de laminación.

En la Figura 3 se muestra un esquema del perfil del rodillo de laminación. Éste se compone por un arco circular de 90°, que empalma con dos rectas tangentes a los lados, formando entre ellas un ángulo de 90°. El diámetro del arco es el mismo que el diámetro final de la vaina que se está laminando.

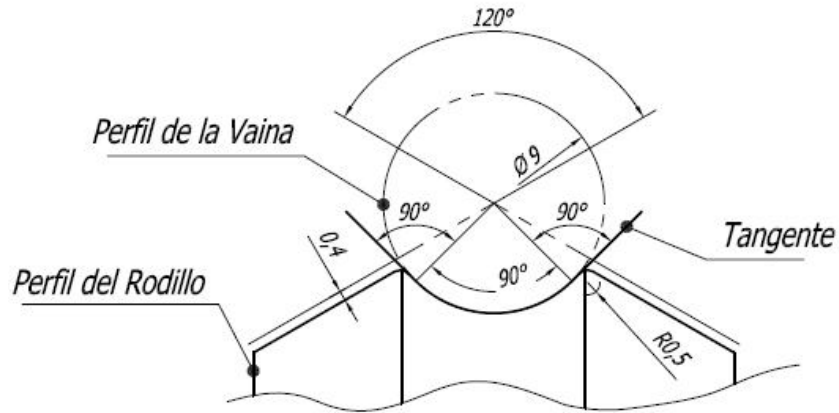
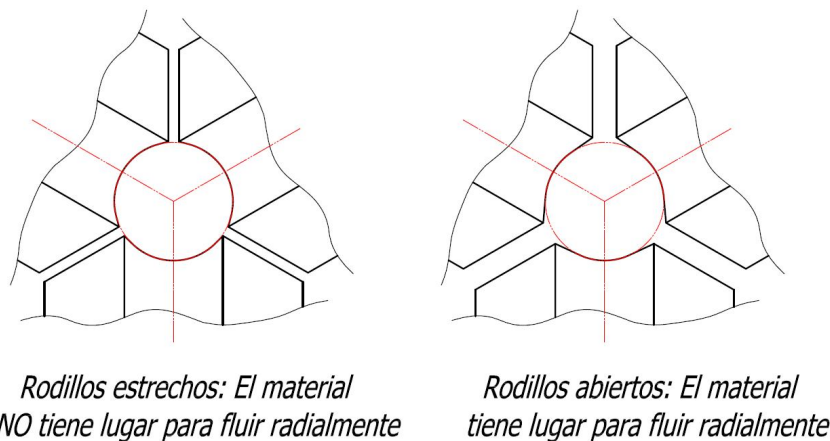


Figura 3 Detalle de la zona del canal. Se observa la zona cilíndrica cubierta por el ángulo de  $90^\circ$  y las tangentes al cilindro.

En la medida que el arco de círculo disminuye su ángulo, las rectas tangentes con las que se compone el perfil del rodillo se van abriendo, dejando de ser  $90^\circ$  el ángulo entre ellas para ser de un valor mayor. Caso contrario si el ángulo del arco aumenta, se producen perfiles de rodillo más estrechos. De esta forma se juega con el ángulo del arco, abriéndolo o cerrándolo un par de grados, para obtener rodillos más o menos estrechos.

Si analizamos geoméricamente los efectos de la variación del ángulo de este arco, en el momento de establecer contacto con la vaina a laminar, veremos que al disminuirlo, la zona de contacto entre vaina y rodillo se desplaza hacia el punto de encuentro entre la tangente y el arco de circunferencia. Esto trae como consecuencia que cuando los tres rodillos se cierran, el material tiene la capacidad de fluir lateralmente, ya que se producen ciertos espacios en la sección de laminación. En forma simultánea, el arco de contacto vaina-rodillo se reduce (Figura 4).



*Rodillos estrechos: El material NO tiene lugar para fluir radialmente*

*Rodillos abiertos: El material tiene lugar para fluir radialmente*

Figura 4: Importancia del ángulo del arco de la circunferencia en el rodillo de laminación.

La deformación lateral de las vainas, se debe a que los rodillos, al laminar, no cubren los  $360^\circ$  de circunferencia de la vaina. De esta forma, la vaina se deforma como se observa en la Figura 5, donde aparecen unas “puntas” en las zonas donde los rodillos no alcanzan a

laminar. En el proceso de laminación, se rota la vaina sobre su eje para que resulte una deformación homogénea y así obtener una vaina circular.

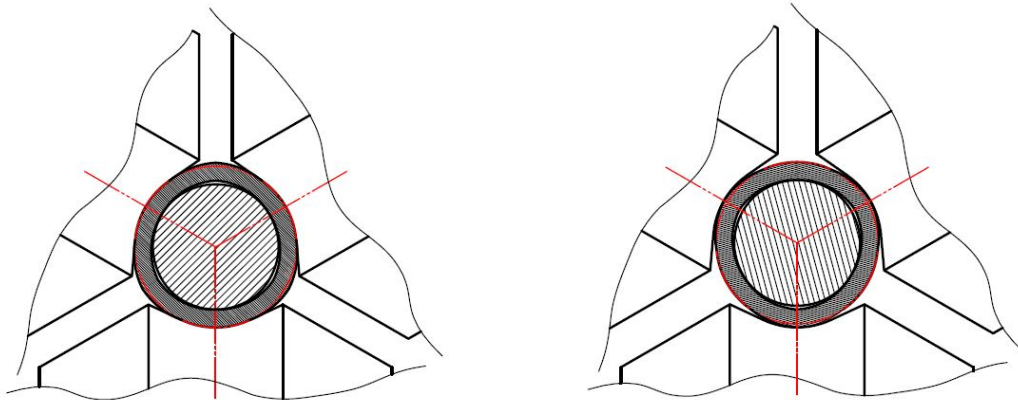
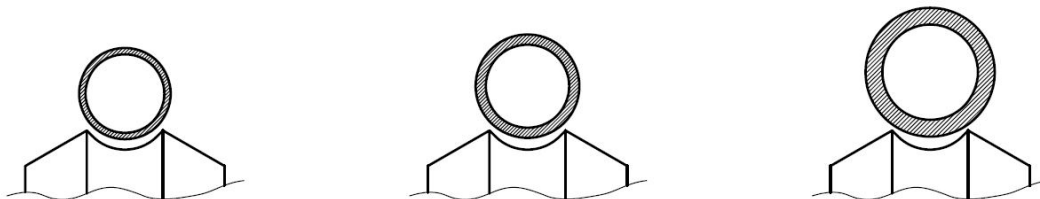


Figura 5 a) Deformación lateral de la vaina debido a las fuerzas de laminación. b) Cuando la vaina gira, la zona con deformación lateral es laminada.

Si se tiene en cuenta que las tensiones contra el mandril (que establece el diámetro interno de la vaina) serán menores, ya que el material tiene más espacio para fluir radialmente, encontraremos que la presión de contacto entre mandril y vaina será menor. Esto permite una mejor lubricación, y reduce la tendencia al engrane que se generaría por altas presiones. De esta manera la superficie interna del tubo se adhiere poco al mandril, permitiendo controlar la calidad superficial de la vaina.

Como eventuales efectos no deseados de un arco de contacto más pequeño tenemos que, si el mandril trabaja menos ajustado a la vaina, se puede permitir un movimiento relativo entre ellos que puede generar un facetamiento interior y una evolución poco controlada del diámetro interior, sobre todo cuando la recuperación elástica aumenta por la utilización de una materia prima mas dura (cuando se aplican tratamientos térmicos intermedios a menor temperatura).

Por el contrario, si se mantiene el ángulo en  $90^\circ$  y se desea reducir mucho el diámetro exterior, el vértice de intersección de la tangente a la zona cilíndrica del canal de laminación con el chaflán a  $60^\circ$  se inserta en el tubo, como se esquematiza en la Figura 2.6, generando una entalla longitudinal sobre el mismo al inicio de la deformación con consecuencias impredecibles sobre el tubo terminado.



a.- Encastre Perfecto

b.- Reducción del ángulo

c.- Clavado del canal en el tubo

Figura 6: Influencia de la relación entre el ángulo del arco del rodillo y el diámetro de la vaina a laminar.

En resumen podemos decir que para despegar a la vaina del mandril existen dos opciones de aplicación limitada y controlada, que pueden ser utilizadas individualmente, o en conjunto:

- 1) Aumentar la dureza de la materia prima (también en forma proporcional la recuperación elástica) realizando el tratamiento térmico de la misma a menor temperatura.
- 2) Reducir el ángulo que abarca el arco cilíndrico del canal de laminación del rodillo.

Por otra parte queda claro que los rodillos tienen limitaciones geométricas que circunscriben la reducción en área aplicable y que cuando menor es el diámetro que se lamina menor es la reducción en diámetro que se puede aplicar.

## 2.2 Comportamiento cinemático de la laminadora

En todo de laminación existentes gradientes entre la velocidad tangencial del material y distintas zonas del rodillo de laminación.

En particular en la laminación de tubos esta es el gradiente máximo sobre el rodillo se produce entre el fondo del canal y la superficie mas exterior. Dado que en el momento del calibrado del tubo la zona de mayor contacto con el herramental es la del fondo del canal, es allí donde se hacen coincidir por diseño la velocidad relativa del tubo y el rodillo. No obstante ello a veces es necesario desplazar el punto donde se igualan las velocidades subiéndolo un poco hacia la superficie externa del canal. Para modificar estas variables se deben alterar las relaciones geométricas del sistema de brazos y palancas que transmiten el movimiento y establecen las relaciones de velocidad entre las distintas piezas móviles. Se observa en la Figura 8 un esquema de la laminadora donde se realizan los tubos. Se puede ver que si se cambia la longitud de la palanca vertical y la distancia a la que están conectadas las bielas que conectan el torpedo porta-guías y la caja porta-rodillos, los parámetros dinámicos de todo el conjunto, varían. Esto permite mover de posición el centro instantáneo de rotación del rodillo, observando cómo cambia la distribución de velocidades en cada caso.

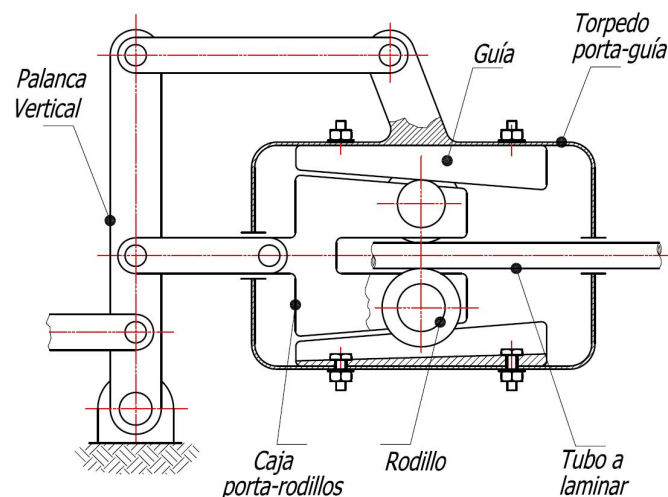


Figura 8: Esquema de sistema de palancas de laminadora HPTR.

Resulta claro que mediante la variación acotada de los parámetros descritos es posible corregir eventuales defectos superficiales debidos al deslizamiento relativo entre la vaina y el rodillo.

### 3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Se realizaron en FAESA en el horno con atmosfera de vacio que habitualmente se utiliza en la fabricación de todas las vainas que salen de dicha planta. En la primera partida se utilizaron las mismas temperaturas y tiempos que aplica habitualmente FAESA en la producción de todas sus vainas luego de los dos primeros pasos, mientras que para el último tratamiento estos parámetros surgieron de múltiples ensayos realizados en hornos de laboratorio.

Para la segunda partida se mantuvo el tratamiento para el primer paso y se realizaron tres tratamientos distintos luego del segundo paso, mientras que el tratamiento térmico final sufrió leves modificaciones.

Es importante mencionar el comportamiento del horno, pues, para una carga normal en la que la carga de la bandeja esquematizada en la Figura 11 está llena (en los TT de este desarrollo solo se cubrió una fila de esta bandeja), su distribución de temperaturas en función de la geometría que presenta el apilamiento de las vainas. Cuando las vainas entran al horno, tienen una inercia térmica, es decir, necesitan un cierto tiempo para llegar a la temperatura de tratamiento.

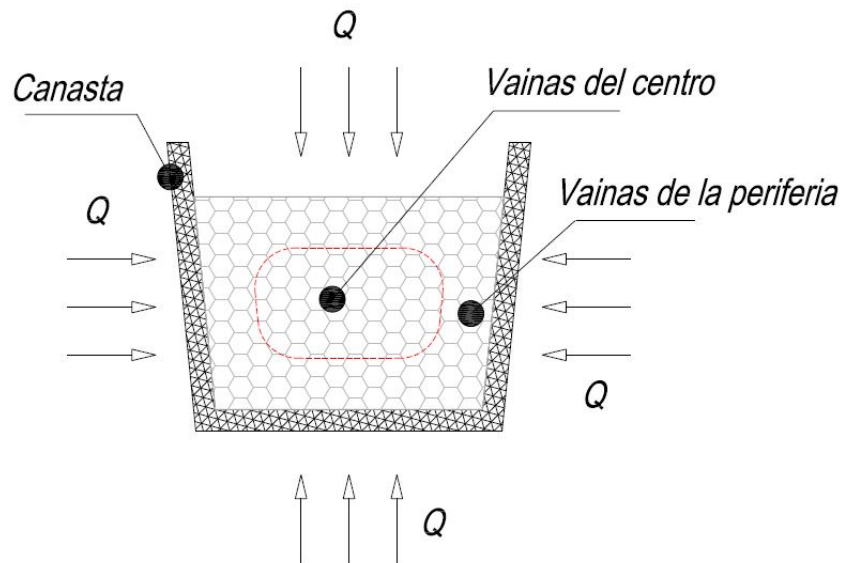


Figura 11. Corte transversal del horno donde se realizará el TT de las vainas. Se esquematizó una zona central, donde las vainas demoran más en alcanzar la temperatura de tratamiento que en la zona periférica.

La configuración transversal de este horno, se puede ver en la Figura 11, allí se observa que las que se encuentran en el centro del conjunto que se está tratando, necesitan más tiempo para llegar a su temperatura que las que están en la periferia. Según estudios realizados por FAESA se necesita aproximadamente una hora para que las vainas del centro tomen la temperatura que tienen las de la periferia.



**En el caso que nos ocupa la cantidad de vainas recocidas es limitado, se las pudo ubicar en una sola fila, de manera que el efecto de apantallamiento en este caso no existió. De cualquier manera, la variación de las propiedades mecánicas que se espera entre el centro de la bandeja y el borde (considerando la bandeja llena) no producirá un gradiente significativo en las mismas.**

#### **4. DIFICULTADES OBSERVADAS EN EL DESARROLLO**

Como ya se ha expresado en la primera partida se utilizó el mismo primer paso de deformación que se aplica en las otras vainas producidas por FAESA. Dado que como sabemos debemos obtener una vaina de relativamente menor diámetro a las habituales y de mayor espesor, el hecho de realizar un segundo paso donde se redujo mucho el diámetro y poco el espesor produjo una superficie interior con una morfología relativamente irregular. Previo al inicio de los dos pasos de deformación finales se realizó un tratamiento térmico a la temperatura que utiliza habitualmente FAESA, que luego evaluamos que resultó relativamente baja y que al sumarle la deformación del primer paso hizo que durante el segundo paso la recuperación elástica fuera alta y la conformabilidad relativamente baja. Esto dificultó el control de las dimensiones.

##### **4.1 Ajustes del proceso y resultados obtenidos**

Luego de analizar los inconvenientes observados en la primera partida se programó la segunda partida que contempló cambios dirigidos a resolver los inconvenientes detectados en la primera.

Para ello en el primer paso subdividimos el lote fabricando tubos con dos espesores distintos. El primer sublote se fabricó con dimensiones iguales a las del primer lote, mientras que el segundo sublote se laminó a mayor espesor a los efectos de que cuando se realizara la segunda deformación se aumente la relación entre el porcentaje de reducción en espesor y el porcentaje de reducción en diámetro (coeficiente Q).

Luego se los decapó interiormente para mejorar la calidad superficial.

Posteriormente, en el segundo paso, se subdividió la partida en tres sublotes tratados térmicamente a 650°C, 680°C y 700°C a los efectos de obtener luego del primer paso en HPTR sublotes de tubos de menor dureza que permitan luego en el paso final mejor conformabilidad y menor recuperación elástica. Luego del primer paso en HPTR se incorporó un decapado para mejorar la superficie final de la vaina.

Finalmente se aumentó en 5°C la temperatura del tratamiento térmico final y en una hora el tiempo total del tratamiento con el objeto de bajar ligeramente la resistencia y aumentar la ductilidad.

Analizando los resultados de los cambios introducidos observamos lo siguiente:

El aumento de espesor en el primer paso no dio los resultados esperados, pues la calidad superficial interior del tubo presentó irregularidades, presumiblemente porque el herramental utilizado no se comportó de acuerdo a lo esperado. En el futuro será necesario experimentar con herramental diseñado específicamente para esta secuencia.

Los decapados intermedios solo mejoran parcialmente la calidad superficial interior.

Contar con tubos de tres durezas distintas luego del segundo paso permitió optimizar los últimos dos pasos de laminación mejorando la conformabilidad y reduciendo ligeramente

la recuperación elástica del último paso. Esta variante sumada a la incorporación de un decapado previo al último paso de conformado mejoró la estabilidad dimensional y calidad superficial interior de las vainas.

## **5. CONCLUSIONES**

El proceso aplicado permitió obtener vainas que cumplen con la especificación. Los resultados de la primera partida pudieron ser mejorados en la segunda mediante la modificación de algunos procesos y la incorporación de otros nuevos.

La realización de un primer paso de deformación común a todas las vainas limita en forma importante las posibilidades de variar los parámetros de fabricación y por ende compromete la posibilidad de mejora de la calidad superficial obtenida.

## **6. PROYECCIONES HACIA UNA FABRICACIÓN INDUSTRIAL**

De los resultados obtenidos se desprende que:

- Se debe desarrollar una secuencia de fabricación específica para la vaina CAREM. Esta secuencia debería propender a la aplicación de coeficientes  $Q$  altos en todas las etapas de laminación. Resulta poco probable que se puedan obtener los resultados buscados manteniendo el primer paso de laminación que hoy se aplica a todas las vainas que se producen en FAESA.
- Se debería realizar un solo paso de deformación en HPTR aplicando porcentajes de deformación en área del orden del 60% o más para obtener las propiedades mecánicas especificadas.
- De la experimentación con nuevo herramental surgirá si estos objetivos se pueden cumplir total o parcialmente con tres pasos de laminación. En caso contrario deberemos incorporar un paso de deformación extra, lo que conlleva un aumento en el costo de producción que deberá ser evaluado oportunamente.