

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“PROF. JORGE A. SABATO”

**SIMULACIÓN DE PROCESOS:
LAMINACIÓN POR PASO PEREGRINO Y
TREFILACIÓN**

Por Brian M.M. Borda

Director del Trabajo

Ing. Claudio Bunte

Trabajo de Seminario - Ingeniería en Materiales

República Argentina

2020

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, por los valores que me transmitieron, la educación que me dieron, por su apoyo y acompañamiento a la distancia durante mis estudios.

También al Profesor Daniel Córdoba, quien no solo fue un profesor de física para mí, fue también un gran amigo y la persona que me inculco su pasión por las ciencias. Hasta siempre Dani.

Agradecimientos

Al Instituto Sabato, la Comisión Nacional de Energía Atómica y a la Universidad Nacional de San Martín por darme la oportunidad de estudiar esta carrera y realizarla en tiempo y forma.

Al Ingeniero Claudio Bunte, quien me brindó la oportunidad de realizar este trabajo en CONUAR-FAE, por toda su ayuda y por permitirme descubrir el estudio sobre simulaciones de procesos.

Al personal de CONUAR-FAE que me brindaron ayuda en todo lo que necesité, charlas y por hacerme sentir cómodo en su ambiente de trabajo.

A la Universidad Nacional de Salta, donde pude formarme para seguir esta carrera.

A Juan Manuel y Patricio, por haberme aguantado y ser mis amigos durante estos cuatros años de carrera.

A todos mis amigos que siempre me apoyaron en todo este proceso.

RESUMEN

Se realizaron simulaciones de laminación por paso peregrino de tubos sin costura de Zircaloy 4 y trefilado de tubos sin costura de aleación de aluminio AA 7075. El desarrollo de las simulaciones fue realizado haciendo uso del software Simufact Forming. Para el diseño de las simulaciones de laminación por paso peregrino se basó en un laminador de dos cilindros en alto, laminadora HPT-32 propiedad de CONUAR-FAE S.A.. Además, tomando como base trabajos anteriores sobre la trabajabilidad de Zircaloy 4 (Zry-4) y el sistema tribológico en este proceso, se evaluó la incidencia de distintos modelos de curvas de flujo y el modelo de anisotropía Hill 48 para describir el Zry-4 en las simulaciones y sus efectos sobre la carga de laminación, daño Latham-Cockroft (LC) calculado y dimensiones. El diseño de las simulaciones de trefilado de tubo se orientó a comparar dos configuraciones de proceso: pasadas múltiples de trefilado contra pasadas únicas, con matrices de distinto ángulo. En base a los resultados obtenidos de cargas de tiro, tensiones residuales, daño LC y dimensiones finales se planteó la mejor configuración para la obtención de un producto con bajas tensiones residuales y bajos valores de daño.

Palabras claves: Paso peregrino, Zircaloy 4, Trefilado, AA 7075, Simulación, Simufact Forming, Daño, Curvas de flujo, cargas.

ABSTRACT

Simulations of lamination by Cold Pilgering for Zircaloy 4 seamless tubes and tube drawing for aluminum alloy AA 7075 were made. The simulations were made using Simufact Forming. The design of the Cold pilgering simulation was based in a two high cylinders pilger mill, a HPT-32 model property of CONUAR-FAE S.A.. Besides strating with previous works about Zircaloy 4 workability and tribological system analisys in this forming process, the incidence of different flow curves and Hill 48 anisotropy model was evaluated in order to describe Zry-4 in the simulations and their effects on laminations' loads, Latham-Cockroft damage and tube dimensions. The design of the tube drawing was oriented to contrast two process configurations: multiple passes and unique pass drawing, using matriz with different characteristic angle. Based on the results of load drawings, residual stresses, damage and product dimensions the best configurations were proposed to get a product with the low residual stresses and damage.

Key words: Cold Pilgering, Zircaloy 4, Tube Drawing, 7075, Simulation, Simufact Forming, Damage, Flow Curves, Loads.

ÍNDICE

RESUMEN	4
OBJETIVOS	6
INTRODUCCIÓN.....	7
Laminación por paso peregrino - Cold Pilgering	7
Descripción del proceso.....	7
Parámetros importantes del proceso.....	11
Planteo teórico de cargas durante laminación.....	12
Trefilación	14
Planteo teórico de fuerzas de tiro	17
Lubricantes	19
Simulaciones de procesos.....	20
Modelos implementados en las simulaciones	21
Anisotropía.....	21
Daño Cockroft-Latham.....	23
Curva de flujo.....	24
DESARROLLO	25
Simufact Forming®	25
Configuraciones de simulaciones	27
Configuración de Simulación de Ensayos de compresión.....	27
Configuración de Simulación de laminación por paso peregrino	31
Configuración de Simulación de Trefilado de tubos.....	36
RESULTADOS	39
Simulaciones de Ensayos de compresión.....	39
Simulaciones de Laminación por Paso Peregrino de Tubos	40
Análisis de cargas de laminación	40
Mediciones de daño en las simulaciones	46
Dimensiones Finales.....	47
Simulaciones de Trefilado de tubos.....	51
Cargas de trefilado.....	51
Tensiones residuales	53
Daño	56
Dimensiones finales	57
CONCLUSIONES.....	59
REFERENCIAS	60

OBJETIVOS

Los objetivos propuestos en este trabajo son:

1. Realizar una recopilación bibliográfica relacionada con:
 - a. los procesos de laminación por paso peregrino y trefilación.
 - b. modelos capaces de ser aplicados en las simulaciones planteadas.
 - c. simulación con softwares de conformado metálico.
2. Capacitación, entrenamiento y aplicación del software Simufact Forming.
3. Confección de planos y diseños de herramental necesario en los procesos a estudiar.
4. Modelizado del proceso de laminación por paso peregrino en Zry-4
5. Modelizado del proceso trefilado en AA 7075.
6. Evaluar la factibilidad de procesos en base a los resultados obtenidos en las simulaciones correspondientes.

INTRODUCCIÓN

Laminación por paso peregrino - Cold Pilgering

La laminación por paso peregrino es un proceso en el cual se reducen simultáneamente, el diámetro y el espesor de tubos con y sin costura (semiseamless). La reducción se realiza mediante dos rodillos (calibres) y un mandril, el cual se posiciona en el interior del tubo. La reducción se puede realizar en caliente o en frío, pero esta última opción resulta más fácil de ejecutar por cuestiones operativas. [1][2]

Este proceso se puede aplicar en un gran rango de diámetro y espesores de tubos de distintos materiales. Su aplicación para la obtención de tubos con muy buena precisión en las dimensiones, con baja excentricidad, muy buen acabado superficial y una baja incidencia de defectos hicieron que reemplazará al proceso de trefilado, el cual era el proceso que en un principio se utilizaba para reducir diámetros y espesores de tubos. [3]

En la actualidad se laminan tubos de una gran cantidad de materiales, entre los cuales podemos agrupar en aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, aleaciones de níquel, acero al carbono, acero inoxidable, aleaciones de titanio y aleaciones de circonio (Zircaloy-4), como las más representativas. La laminación de tubos de cada uno de estas aleaciones requiere consideraciones técnicas y operativas específicas, con el fin de reducir la incidencia de defectos y conseguir un producto que se desempeñe de forma óptima en las sollicitaciones para la que se produjo.

Descripción del proceso

La deformación en el tubo se realiza con el avance y retroceso de los rodillos, a los que se denomina un golpe. Sumado a cada golpe se adiciona un giro, del tubo y del mandril, con determinada amplitud entre cada golpe o entre cada desplazamiento de los rodillos. El objetivo de esta rotación del tubo es homogeneizar la deformación en el tubo y disminuir defectos, como ser la ovalidad del tubo.

Además del giro del tubo, entre cada golpe hay un desplazamiento del mismo sobre el mandril en la dirección de laminación lo que se traduce en una entrada de material en el proceso. Este avance del tubo produce que haya una separación entre la cara interna del mismo y del mandril, con el movimiento hacia adelante de los rodillos se va a producir una reducción en diámetro del tubo hasta que se alcance nuevamente el contacto con el mandril. Alcanzada la superficie del mandril con el movimiento de los rodillos se produce la reducción en pared del tubo. [3]

El herramental necesario para laminar por paso peregrino tubos son rodillos (calibres) y un mandril. Entre ambos componentes se define la reducción final sobre el tubo y en conjunto con otras variables del proceso, como la lubricación, se afecta la incidencia de defectos sobre el producto.

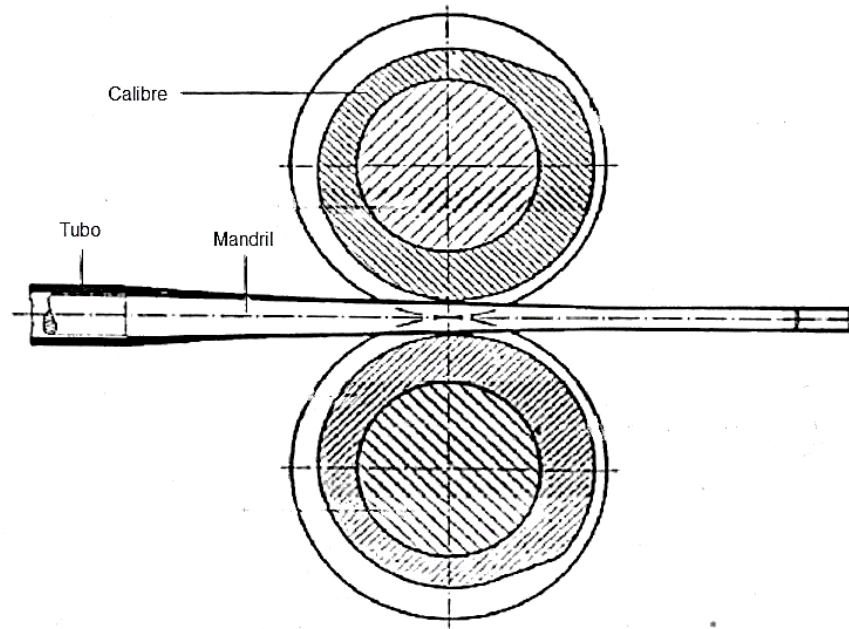


Figura 1. Esquema de herramienta y tubo involucrados en laminación por paso peregrino. corte en sección longitudinal.

Rodillos

Los rodillos (o calibres) en una laminadora por paso peregrino (cold pilger mill) son las piezas que producen la reducción en diámetro externo. Esta reducción se realiza en un canal de perfil variable, en el cual se contempla distintas partes o segmentos que cumplen una función específica. Los segmentos son: Entrada, Reducción, Calibración y Salida. [4]

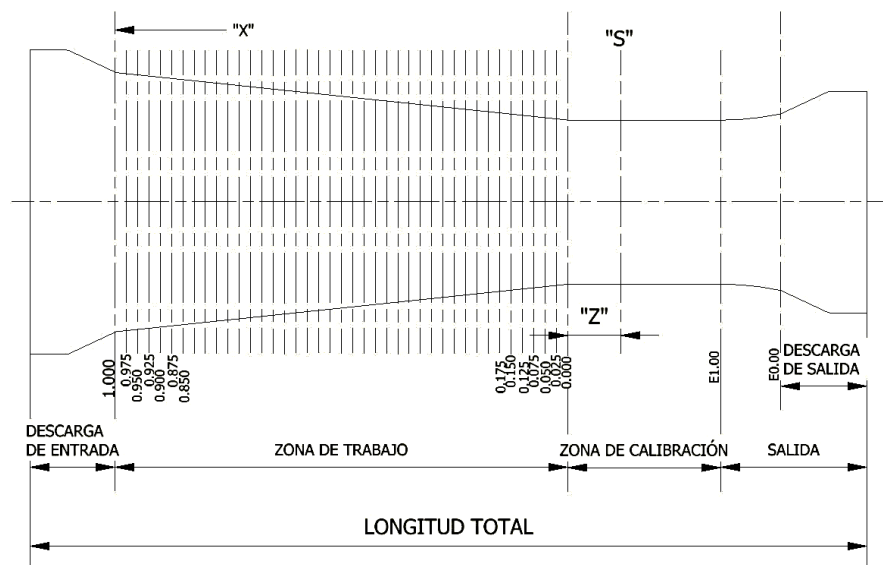


Figura 2. Identificación de áreas en un calibre convencional.

- El segmento de entrada es la primera zona de contacto entre el herramental y el material, la función que cumple esta sección es guiar al tubo entrante hacia la sección de reducción, también permite el giro del tubo entre golpes de tal forma que no se someta al mismo a tensiones de corte.
- El área de reducción, es donde ocurre la deformación sobre el tubo. Esta sección se caracteriza por tener un perfil variable el cual, en diseños actuales de calibres, llega a contar con hasta 41 perfiles que definen el grado de precisión sobre la reducción en el tubo.

Las estaciones que describen el perfil de los rodillos utilizados en laminación por paso peregrino tienen un perfil que varía dependiendo del material y el grado de reducción. En este trabajo, el perfil de los calibres utilizados en FAE para esta etapa de laminación de Zircaloy 4, puede ser descrita mediante cuatro circunferencias de centros desfasados, tanto los diámetros de las circunferencias como su desfase varían según la posición del perfil.

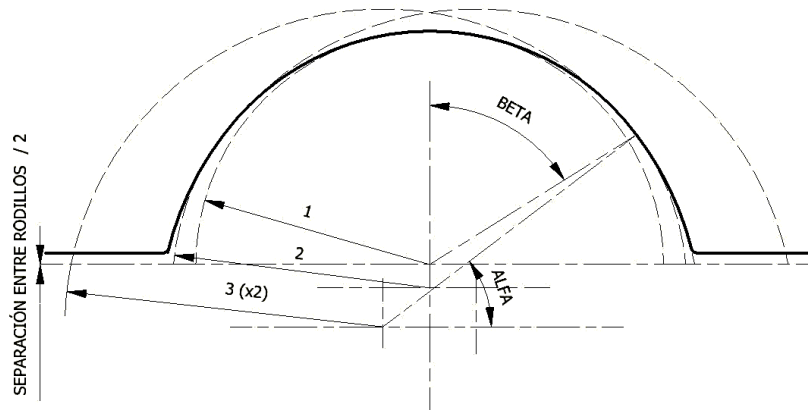


Figura 3. Sección transversal genérica de un calibre en su zona de reducción.

- Zona de calibración, en esta área no se produce tanta deformación como en la zona de reducción. El objetivo de esta sección es el acabado de las dimensiones finales, el enderezado y redondeado del tubo. Sí ocurre deformación, se da en el inicio de esta zona. En esta zona el perfil del calibre es constante y la descarga lateral se reduce.
- Cono de salida, En esta zona el tubo abandona el calibre/rodillo y tiene influencia en la calidad superficial del tubo acabado.
- Salida, en esta zona no debería haber contacto con el tubo ya que se lleva a cabo el giro del tubo, en laminadoras de doble giro.

La laminación por paso peregrino requiere por lo menos dos calibres opuestos, los cuales se van a desplazar de forma lineal y rotativa a la vez sobre el tubo a deformar.

Mandril

El mandril es un herramental que se ubica concéntrico al tubo a reducir, en conjunto al calibre es la causa de la reducción en espesor del tubo. [4]

En el caso del mandril las secciones que lo conforman son el talón, la zona de reducción y la zona de calibración.

El talón es la sección del mandril que posee el mayor diámetro, dicho valor es menor que el diámetro interno del tubo a laminar, lo que asegura que no haya un contacto completo entre el mandril y el tubo. El talón tiene una sección de entrada con diámetro variable que sirve de guía para el tubo entrante.

La zona de reducción del mandril, al igual que en los rodillos, está dividida en estaciones con distintos diámetros. Las zonas de producción y de calibración del mandril y de los rodillos deben estar sincronizadas para asegurar la correcta deformación sobre el tubo.

La sección de calibración cuenta con una tasa de reducción que permite una liberación controlada de la cara superficie interna del tubo y del mandril. Esto evita que se produzcan defectos y asegura que se logren las dimensiones finales.

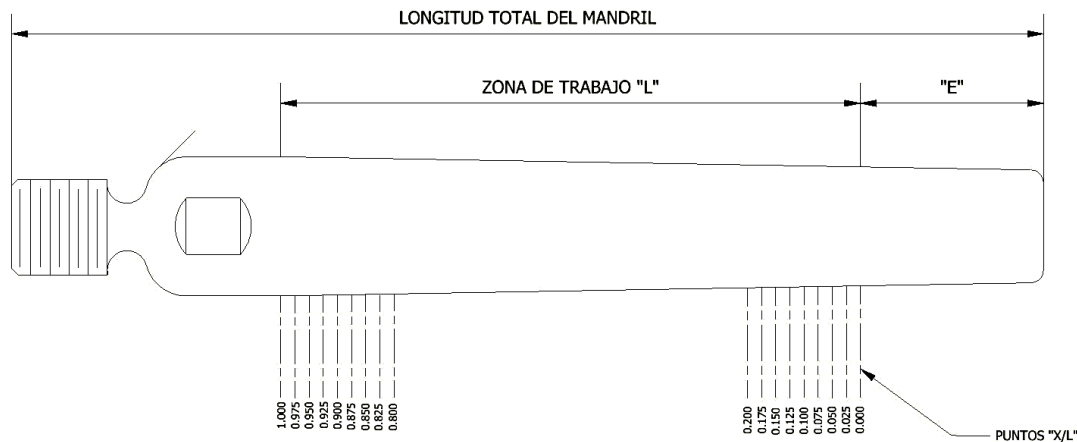


Figura 4. Esquema de zonas generales en un mandril.

Por su parte el mandril no se desplaza, pero gira junto con el tubo de tal forma de no someter al mismo a esfuerzo de corte que puedan producir defectos.

Parámetros importantes del proceso

Avance

El avance entre golpes influye directamente en la cantidad de material a deformar, por lo que aumenta la deformación que se realiza por pasada. Esto puede producir daños en la superficie interna del tubo y puede ocasionar pegado de material sobre el mandril por desprendimientos de material del tubo. [3]

Número de golpes

El número de golpes por minuto es un parámetro que determina la duración del proceso, su control es crítico debido a que la modificación de este parámetro debe estar acompañado de una modificación acorde con respecto al método de refrigeración sobre el proceso. Si se aumenta el número de golpes, hay un aumento de temperatura sobre el el tubo, el mandril y los rodillos. Este aumento de temperatura ocasionado por la mayor liberación de calor producto de la mayor deformación de material, ocasiona una menor eficiencia de la capa de lubricante por lo que ocurre adherencia de material en el herramental. Para evitar esto es necesario una refrigeración con mayor intensidad, lo cual puede estar acotado debido a que, por lo general, el refrigerante es el mismo agente que actúa de lubricante. Esto reduce la solución al calentamiento, a aumentar el flujo de lubricante en el proceso. [3]

Factor Q

El factor Q es una relación que involucra las reducciones en espesor y en diámetro mediante una función. Comúnmente se utiliza para determinar límites en el proceso para asegurar un buen acabado superficial del tubo laminado. [3] [5]

La función de Q, que se utiliza en este trabajo es:

$$Q = \frac{\ln(e_f/e_0)}{\ln(Dm_f/Dm_0)} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde e_0 y e_f son los espesores iniciales y finales, Dm_0 y Dm_f los diámetros medios inicial y final.

en el caso de aleaciones de circonio, que poseen una estructura cristalina hexagonal, el factor Q también brinda información sobre la orientación cristalina en el material debido a que esta incide en la deformación del mismo. En el Zircaloy 4 es preferible que la normal al plano basal esté orientada en sentido circunferencial de tal forma que no se favorezca la propagación de fisuras producto de la precipitación de hidruro [6]

Planteo teórico de cargas durante laminación

Neumann y Siebel [7] plantearon un modelo en el que la carga de laminación es una función de la posición sobre un eje, en la dirección de laminación. La posición se determina respecto del inicio de la zona de trabajo de los rodillos y del mandril.

Lo conveniente de este modelo es que depende únicamente de parámetros operativos, de la geometría del herramental y de la variación de la tensión de fluencia del material.

Este modelo tiene la característica de separar en dos partes la longitud de contacto entre el rodillo, el mandril y el material (figura siguiente). La longitud de contacto en laminación plana es una función del radio de los rodillos y la variación de espesor. En este caso se considera dos longitudes de contacto en la primera, $Ld1$, la porción de tubo está en contacto con el mandril y el rodillo al mismo tiempo. En esta primera sección ocurre una reducción del espesor del tubo y del diámetro exterior. En la segunda longitud de contacto, solo existe interacción entre el tubo y el rodillo, se puede observar en la figura 5, que hay un desplazamiento de material producido por el rodillo.

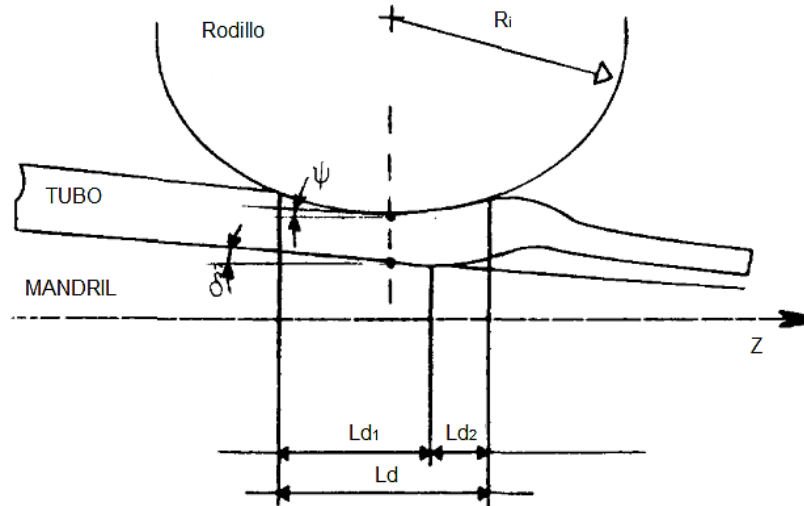


Figura 5. Esquema del modelo planteado por Neumann y Siebel.

Las ecuaciones 2 y 3 son utilizadas para obtener los valores de longitudes de contacto en laminación plana (Ec. 2) y según las consideraciones de Neumann y Siebel (Ec. 3). En esta última ecuación se puede destacar que el último factor hay dos términos, el primero describe la longitud de contacto en la que el tubo tiene interacción con el mandril y el rodillo, por su parte el segundo término describe el segmento en el que hay contacto del tubo y el rodillo únicamente.

$$Ld_{plana} = \sqrt{R\Delta h} \text{ (Ec. 2)}$$

$$Ld = \sqrt{2R(z)m\left(\frac{s_0}{s(z)}\right)} (\sqrt{\varphi(z) - \delta(z)} + \sqrt{\delta(z)}) \text{ (Ec. 3)}$$

En la Ec. 3 $R(z)$ es el radio del fondo del canal del rodillo en cada estación, m es el avance del tubo entre cada ciclo, S_0 es el área inicial de la sección del tubo antes de que se somete a deformación, $S(z)$ es el área de la sección del tubo en la estación z . Los ángulos φ y δ son los ángulos de contacto entre el tubo y respectivamente, el rodillo y el mandril. Las ecuaciones 4 y 5 muestran cómo se calculan:

$$\varphi(z_n) = \tan^{-1}((R_{n-1} - R_n)/2(Z_n - Z_{n-1})) \text{ (Ec. 4)}$$

$$\delta(z_n) = \tan^{-1}(\Delta h_n / (Z_n - Z_{n-1})) \text{ (Ec. 5)}$$

$$\Delta h_n = e_{n-1} - e_n \text{ (Ec. 6)}$$

Donde e es el espesor del tubo en la n -ésima estación.

Las ecuaciones 4, 5 y 6 si bien son funciones de la distancia al inicio de la zona de trabajo del mandril (Z) estos valores están fijados a cada estación sobre la misma. El subíndice n representa la estación en la que se quiere calcular cualquiera de los ángulos, para lo que se va a requerir valores geométricos de la estación anterior y se utiliza para denotar dichos valores el subíndice $n-1$.

En base a las consideraciones anteriores Neumann y Siebel plantean la carga de laminación como:

$$F(z) = \sigma_0(z) \left(1 + \frac{\mu L d}{2e(z)}\right) D(z) \sqrt{2R(z)m \left(\frac{S_0}{S(z)}\right) \left(\sqrt{\varphi(z) - \delta(z)} + \sqrt{\delta(z)} 2e(z)/D(z)\right)} \text{ (Ec. 7)}$$

Donde $\sigma_0(z)$ es la tensión de fluencia del material en z , μ es el coeficiente de fricción y $D(z)$ el diámetro externo del tubo en z .

Trefilación

El trefilado es un proceso que consiste en la reducción del diámetro de alambres y alambrones, y de espesor en tubos mediante la utilización de punzones. El proceso consiste en deformar el material utilizando una matriz que contiene una matriz con una forma cónica, que es donde se realiza la deformación del material. Por lo general este proceso se realiza en frío ya que no se buscan realizar grandes reducciones y se consigue un mejor afinado de las dimensiones. [8]

Este proceso de conformado que tiene varios siglos de uso, en sus inicios estuvo orientado a la producción de alambres de distintos materiales como cobre, hierro, acero inoxidable, acero quirúrgico, plata y oro. Su expansión con el uso de mandriles y otras geometrías en la matriz de trabajo, se vio influenciada debido a las características finales que se pueden alcanzar. A diferencia de otros procesos de conformado se puede alcanzar dimensiones muy precisas, buen acabado superficial y buenas propiedades mecánicas finales. [9]

Una trefiladora consiste básicamente en una matriz, a la que se acoplan las matrices que producen la deformación en el tubo, un mandril y un carro de tiro. [10]

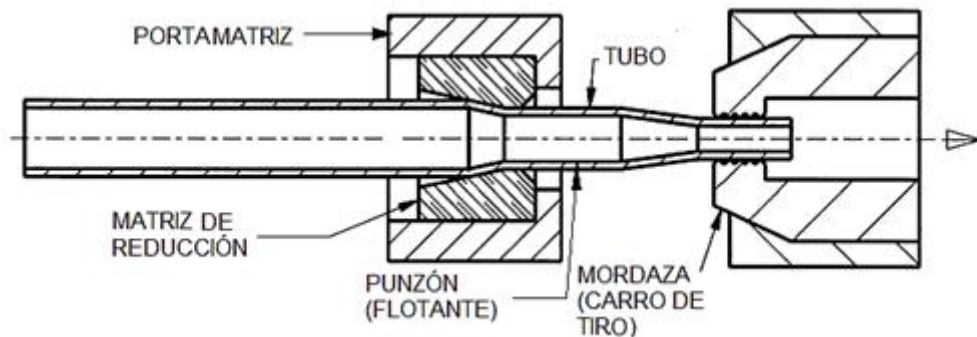


Figura 6. Esquema de herramienta involucrada en trefilación de tubos.

Las matrices de reducción/trefilado por lo general son fabricados mediante sinterizado de carburo de tungsteno, en la figura 7 se muestran las partes características que posee un diseño genérico de matriz de trefilado.

La campana de entrada cumple la función de guiar el tubo o alambre. El ángulo de entrada ayuda en la distribución de lubricante sobre la superficie externa del tubo.

La zona de reducción tiene la función de provocar la deformación del material por las fuerzas inducidas en su interacción con el mismo. Es crítico que el rozamiento en esta zona sea el mínimo.

El cilindro de calibrado se utiliza para calibrar el diámetro externo del tubo, también cumple la función de aumentar la resistencia mecánica de la matriz.

La campana de salida cumple la función de facilitar la salida del lubricante usado. El diseño de esta zona debe ser de cuidado ya que puede producir defectos superficiales sobre la pieza trefilada.

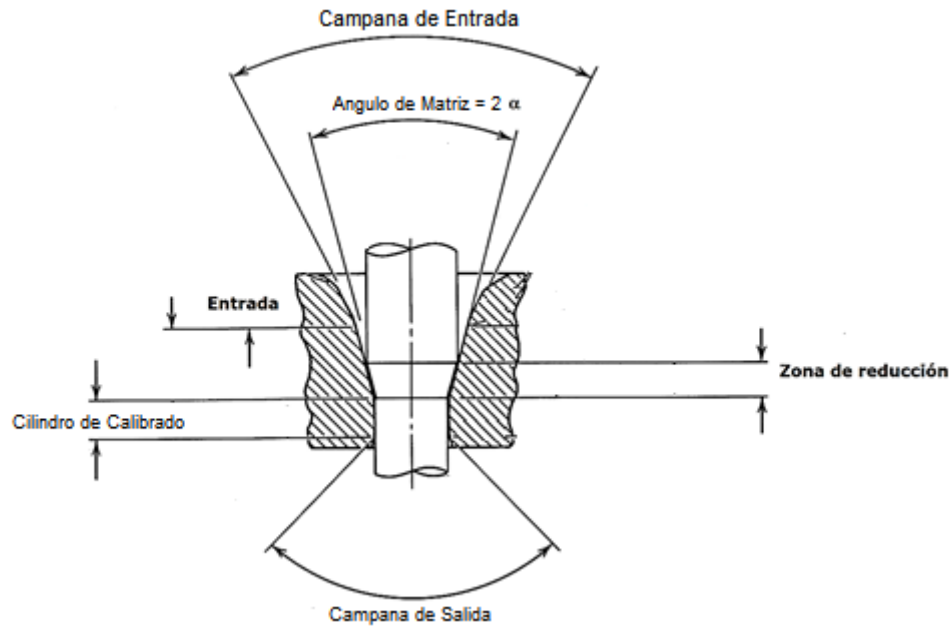


Figura 7. Partes de un diseño genérico de matriz de trefilado. [11]

En el caso de los mandriles, hay de tres tipos: Mandril Fijo, mandril flotante y mandril móvil.

En este trabajo se planteó el uso de un mandril fijo, dicho mandril permanece estático ante el tubo y está acoplado a un soporte. La utilización de este tipo de mandril debe requerir una longitud de tubos a trefilar no tan grande, si esto sucede puede ocurrir la flexión del mandril y producir excentricidad en el tubo trefilado. El mandril puede tener un diseño cilíndrico o cónico. [12]

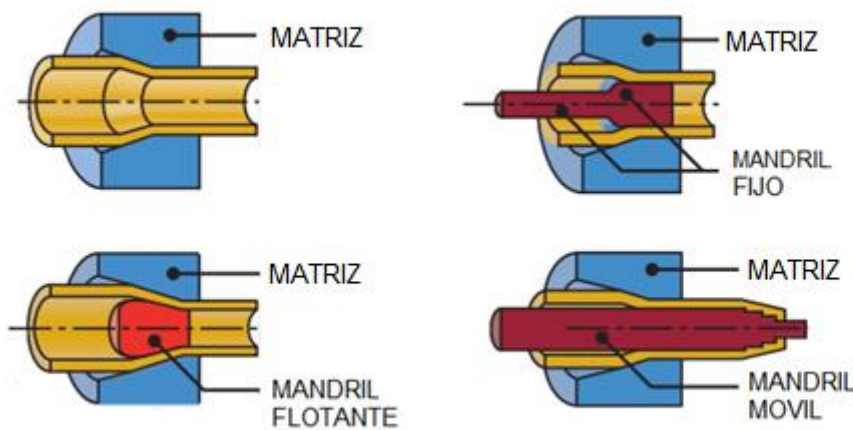


Figura 10. Configuraciones posibles de trefilación de tubos. [13]

El trefilado es un proceso considerado de compresión indirecta, debido a que las cargas aplicadas para la deformación (tracción) inducen esfuerzos de compresión, que producen la deformación del material.

La carga sobre el tubo es aplicada con un carro de tiro/mesada de tiro la cual somete al material a tensiones de tracción, la interacción con la zona de reducción de la matriz produce las tensiones de compresión que producen la deformación del material.

La selección del tipo de mandril que se va a utilizar con el fin de reducir el espesor de pared del tubo depende de cuestiones operativas como ser longitud a trefilar, velocidad de trefilación deseada, etc. [14]

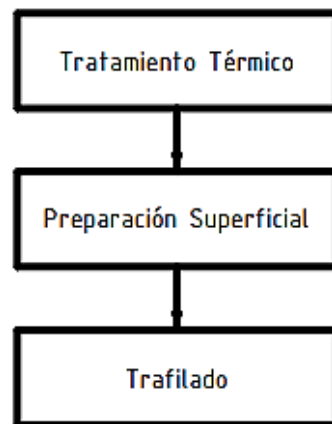


Figura 11. Diagrama de etapas previas al trefilado. [10]

Previo a la trefilación del tubo, el material debe ser tratado térmicamente de tal forma que se obtenga una estructura metalográfica óptima para su procesamiento por trefilación favoreciendo el aumento de ductilidad sin reducir demasiado la tensión de fluencia debido a que esto va a limitar la carga de tiro y por consiguiente la velocidad de trefilado.

Posterior al tratamiento térmico la superficie suele estar oxidada, los óxidos presentes tienen una alta dureza y aumentan el coeficiente de fricción de la superficie, lo cual dificulta su procesamiento. La preparación de la superficie para el trefilado consiste en dos pasos, un decapado y una preparación superficial para evitar problemas durante el proceso.

El decapado se realiza para eliminar los óxidos superficiales y dejar una superficie limpia para la siguiente etapa. El decapado puede ser mecánico, en el caso de alambres, flexionando el alambre entre poleas dispuestas a 90° y posteriormente se realiza un cepillado o granallado. El decapado también puede ser químico, en este caso es aplicable a tanto a tubos, alambres, barras, etc. El proceso consiste en sumergir en un ácido específico que disuelva el óxido superficial y afecte mínimamente el material base, para esto último también es posible el uso de inhibidores de ataque.

La preparación superficial consiste en la aplicación de determinados productos a la superficie del material a trefilar con dos objetivos. El primer objetivo es servir como portante del lubricante utilizado, para esto deben proporcionar determinada rugosidad una vez aplicados. El segundo fin de estos productos es reducir al mínimo la oxidación de la superficie durante las discontinuidades del proceso de trefilación. Los productos que se utilizan se suelen aplicar en baños de soluciones debido a las dificultades se significa manipular prefabricados de gran longitud y hacer una preparación homogénea. Algunos productos utilizados son soluciones saturadas de cal, baños de bórax y baños de fosfato.

Una vez preparado el material para su trefilado, el mismo se coloca en un soporte donde, en el caso de los tubos, se desgasta o se le “saca punta” a un extremo lo que va a permitir el paso de la primera sección por la trefila y luego un juego de mordazas o una pinza va a sujetar y aplicar la fuerza de un sistema hidráulico o mecánico que va a producir el tiro.

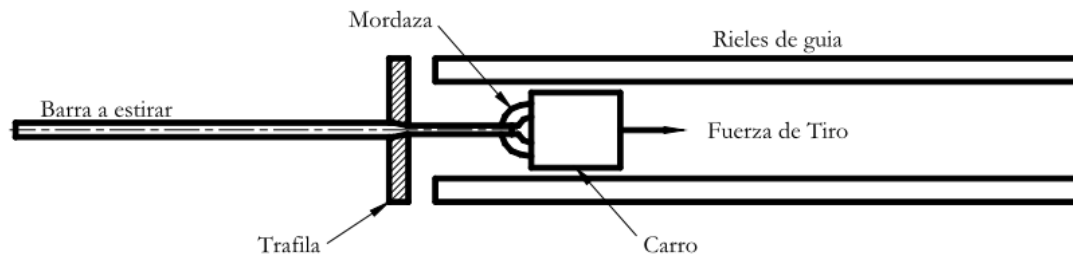


Figura 12. Esquema de mesa de trefilado.

Planteo teórico de fuerzas de tiro

La figura 13 muestra las tensiones que a las que está sometido un elemento de tubo que está siendo trefilado con un mandril fijo. [15]

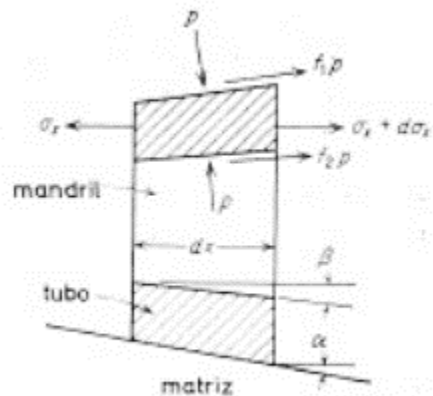


Figura 13. Tensiones sobre un elemento de tubo durante el trefilado con mandril fijo.

La tensión σ_x es la tensión axial de estirado, la presión p se considera igual en la superficie interna y externa del tubo. β es el ángulo del mandril y α el ángulo de la matriz.

Se puede considerar un estado de deformación plana debido a que la deformación tangencial es despreciable frente a las deformaciones longitudinal y radial.

Basado en esto último se puede definir la fluencia como:

$$\sigma_x + p = \sigma_0' = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ec. 8})$$

El equilibrio de fuerzas en dirección longitudinal se establece entre la tensión longitudinal σ_x , las componentes longitudinales de las fricciones de las interfaces mandril-tubo y matriz-tubo y también, con las componentes longitudinales de la presión sobre el mandril y la matriz.

Del planteo anterior se deduce la ecuación diferencial para la tensión axial en función del espesor del tubo h:

$$d\sigma_x / (\sigma_x B' - \sigma'_0(1 + B')) = dh/h \text{ (Ec. 9)}$$

Con

$$B' = (\mu_1 + \mu_2) / (\tan \alpha + \tan \beta) \text{ (Ec. 10)}$$

μ_1 : Coeficiente de fricción entre el tubo y el mandril

μ_2 : Coeficiente de fricción entre el tubo y la matriz

La solución para esta ecuación diferencial es:

$$\sigma_x = \sigma'_0(1 + B')(1 - (h_F/h_0)^{B'}) / B' \text{ (Ec. 11)}$$

En este caso se consideró los coeficientes de fricción iguales en ambas interfaces y un mandril cilíndrico ($\beta=0$), quedando el valor de B' de la Ec. 9

$$B' = \frac{2\mu}{\tan \alpha} \text{ (Ec. 12)}$$

Es necesario aclarar que este modelo considera un material idealmente plástico con valor de tensión de fluencia constante, por lo que el valor de tensión de carga calculado puede dar una idea del orden de magnitud del valor real.

Lubricantes

Los procesos de conformado metálico se caracterizan por tener fuerzas de fricción, que son producto de la interacción/contacto del herramental involucrado y el material a deformar. Frente a estas fuerzas es necesario el uso de lubricantes con el fin de evitar la disminución de la eficiencia del proceso. [16][17]

Entre las funciones del lubricante se consideran

- Reducir la fricción entre las piezas
- Minimizar el desgaste del herramental
- Reducir la temperatura de operación
- Proteger al herramental de la corrosión
- Reducir el consumo energético
- Aumentar la vida útil del herramental

El desempeño de cualquier lubricante (líquido o sólido) depende de que su uso se haga en condiciones que permitan su correcto funcionamiento. Por ejemplo, la eficacia del uso de un lubricante líquido depende de la correcta formación de una capa del mismo entre la matriz y la pieza a deformar, lo cual asegura una correcta distribución de cargas durante la deformación y que no se produzca un efecto intenso de la rugosidad y posibles imperfecciones, de la superficie del herramental.

La fricción en un sistema se puede describir según distintos modelos los cuales se consideraron:

- Fricción deslizante o de Coulomb

El modelo se basa en que la tensión de fricción es menor que la resistencia al corte del material más blando. También plantea que el esfuerzo de fricción es proporcional a la presión normal entre el material y el herramental.

- Fricción adherente o de agarre

Este modelo consiste en que la tensión tangencial sobre las piezas iguala a la resistencia al corte del material más blando, lo cual hace que no tenga mucho sentido el coeficiente de fricción clásico.

En el modelo de fricción adherente se define el coeficiente cortante de fricción interfacial m , que permite evaluar de forma aceptable la fricción sobre interfaces de herramientas y piezas durante el proceso. Este factor m puede tomar valores de 0 a 1, con m igual a 0 no se considera fricción alguna. En el caso de que m sea igual a 1, sobre el material estará aplicado el mayor esfuerzo cortante que pueda soportar asociado a la fricción adherente.

Existe una relación entre el coeficiente de fricción coulombiano (μ) y el factor de fricción (m):

$$m = 3\mu$$

Esta última ecuación permite evaluar el valor de m en función del valor del coeficiente de fricción coulombiano que se puede obtener de condiciones específicas.

Simulaciones de procesos

La simulación de procesos de conformado de piezas metálicas es una herramienta que está tomando un gran valor a la hora de evaluar la factibilidad operativa y económica de un diseño o de un proceso.

La utilización de esta herramienta permite evaluar parámetros operativos, diseños de herramental y evolución del material durante el proceso de conformado. Como resultado es posible reducir los tiempos de puesta a punto y/o optimizado de procesos de manufactura, evaluar la deformación del material en las matrices involucradas y decidir si es necesario o no la implementación de más pasos de conformado.

Con los resultados de la simulación de un proceso de conformado metálico, ya sea en frío ó en caliente, se puede tener un conocimiento previo de la pieza en su estado final en todo su volumen. Dependiendo del software y configuraciones utilizado, se puede conocer la distribución de tensiones residuales, deformación acumulada, temperaturas e incluso la probabilidad de incidencia de defectos lo cual permite la determinación de pasos posteriores en el proceso de producción de la pieza.

Simulación

La simulación de un proceso consiste en la definición de un modelo computacional, este modelo debe estar dividido en tres etapas: pre-procesamiento, resolución y post-procesamiento. [18]

La etapa de pre-procesamiento se caracteriza por ser aquella que define el proceso y las condiciones que se van a simular, en resumen, es la etapa en la que se introducen todos los parámetros del proceso y características del mismo. Se debe tener en cuenta en esta etapa la siguiente ya que la información aquí agregada debe ser la suficiente para obtener resultados representativos en la resolución de la simulación.

La etapa siguiente es la solución (solver en inglés), esta etapa consiste en el uso de un software/paquete matemático que permita la obtención de los resultados mediante la utilización de un modelo teórico. Estos “solvers” tienen la característica de ser independientes lo cual permite el empleo de distintos softwares según lo amerite la situación/modelo a simular. Claro está que para ser utilizado en determinada simulación el solver debe ser compatible con el modelo en cuestión, en el caso de este trabajo al estar relacionado a deformaciones plásticas, las cuales no cumplen modelos lineales, el software utilizado empleaba un solver orientado a modelos no lineales.

La etapa final de post procesamiento consiste en el análisis de los resultados obtenidos en la resolución. en esta etapa se evalúa la consistencia de los resultados con la realidad, si es posible.

La etapa de preprocesamiento es la más compleja debido a que la transferencia de la situación real a la que se va a simular requiere simplificaciones que requiere experiencia y conocimiento ingenieril del proceso a analizar. Estas simplificaciones deben representar de la mejor forma posible la situación para que se pueda introducir información de la misma en el solver. La información requerida queda definida básicamente en geometrías asociadas, material utilizado, cinética involucrada, etcétera.

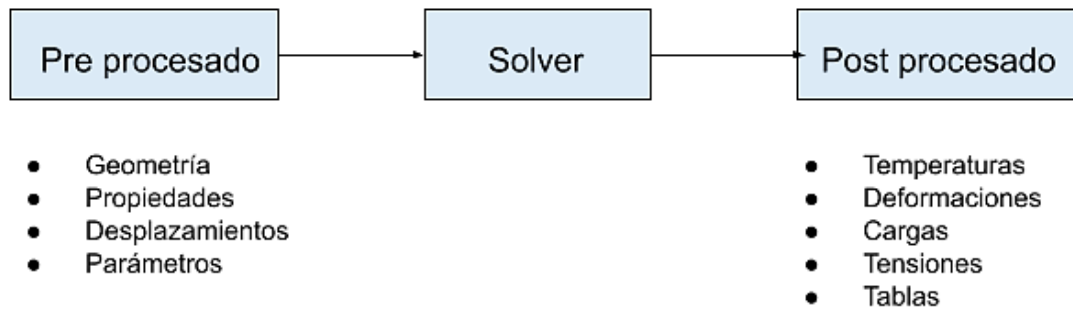


Figura 14. Esquema de proceso de simulación.

Modelos implementados en las simulaciones

Anisotropía

El Zirconio es un material que presenta una transformación alotrópica, una fase alfa HCP y una fase beta BCC. La temperatura de cambio de fase, sin la presencia de aleantes, es de 870 °C.

Las características de cada fase se conservan aún en la presencia de aleantes, los cuales modifican la temperatura de procesamiento en base al efecto que tienen sobre la temperatura de transformación alotrópica (aleantes alfa y aleantes beta).

El Zircaloy 4 es una aleación de circonio que en el procesamiento para su laminación por paso peregrino inicialmente es forjado a una temperatura superior a la beta-transus (temperatura de cambio de fase modificada por la presencia de aleantes) y seguido de un templado desde el campo de fase beta hasta temperatura ambiente. Posteriormente se obtiene mediante extrudado en caliente el TREX que se lamina por paso peregrino.

El material que conforma el TREX se caracteriza por tener una gran cantidad de fase alfa lo que produce, debido a la estructura HCP que caracteriza dicha fase, una fuerte anisotropía plástica que es necesario tener en cuenta a la hora de procesar dicho material mediante laminación. [19]

La anisotropía plástica durante el procesamiento produce que la deformación plástica no sea homogénea, que los valores de tensiones de fluencia y tensiones de rotura difieran bastante dependiendo de la dirección de aplicación de tensiones sobre el material. En el caso de laminación por paso peregrino y trefilación el estado de tensiones es complejo por lo que es necesario tener en consideración esta característica del material.

Criterios de Fluencia - Hill 48 [20] [21]

Los criterios de Fluencia son ecuaciones fundamentales en el análisis de la deformación plástica cuando se expone al material a estados de tensiones complejos.

El criterio de Hill para materiales anisótropos es una modificación del criterio de Huber-Levy-von Mises-Hencky en el cual se plantean 21 parámetros, las cuales se pueden reducir a considerando un material ortotrópico. El criterio de Hill con los 6 parámetros es:

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2$$

(Ec. 13)

con los parámetros F, G, H, L, M y N dependientes de una variable r.

En Simufact Forming se utiliza un algoritmo basado en sfMarc, que está basado en el criterio de fluencia de Hill. La condición de fluencia es:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{a_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + a_2(\sigma_z - \sigma_x)^2 + a_3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 3a_4\tau_{zx}^2 + 3a_5\tau_{yz}^2 + 3a_6\tau_{xy}^2} / \sqrt{2} \quad (\text{Ec. 14})$$

donde los coeficientes a son se obtienen con los valores de las tensiones normales y las tensiones de corte.

Los datos que requiere el programa son 3 valores correspondientes a las tensiones de fluencia obtenidas en ensayos de tracción, los cuales se deben realizar con dos probetas orientadas perpendicularmente y una tercera a 45° entre estas dos en el plano que forman. Los otros 3 datos corresponden a un coeficiente r, que se obtiene realizando el cociente entre la deformación en el ancho y la deformación en el espesor.

$$r = \varepsilon_{\text{ancho}} / \varepsilon_{\text{espesor}} \quad (\text{Ec. 15})$$

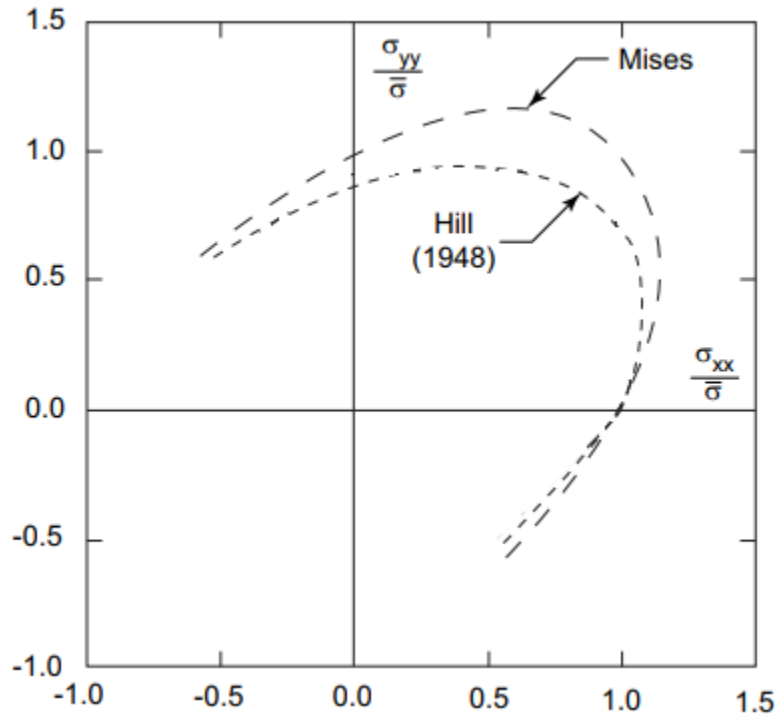


Figura 15. Comparación de superficies/curvas de fluencia obtenidas por las funciones de von Mises y Hill.

Simufact Forming posee la limitación de que el análisis de anisotropía puede realizarse únicamente en láminas de material y no en piezas de gran volumen.

Daño Cockroft-Latham

Durante el conformado de piezas metálicas, los defectos que se evitan con una buena trabajabilidad son la fisuración y la posterior fractura ductil. Pero conociendo los límites de trabajabilidad de un material se puede aprovechar de forma efectiva el procesamiento del material. [22]

Una forma de evaluar los límites de procesamiento de un material sometido a condiciones específicas durante su conformado es mediante una función de daño. Existen distintos modelos de daño, pero el planteado por Latham-Cockroft permite evaluar el daño sobre una pieza durante el proceso y tiene buena correlación con procesos reales.

El primer planteo de este modelo de daño se realizó a un ensayo de tracción, lo cual produjo un análisis/cálculo sobre la curva de tensión vs. deformación hasta la rotura. Se extendió el análisis, según este modelo de daño, a procesos de conformado en base a que la fisuración en el material se atribuye a tensiones de tracción, ya sean propias del proceso ó inducidas.

El daño se calcula (Ec. 16)

$$\int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} d\varepsilon$$

Si el valor de daño alcanza un valor C, determinado en condiciones específicas, se produce fisuramiento.

El daño medido en una simulación y calculado de forma analítica muestran una muy buena correspondencia con la formación de fisuras en ensayos.

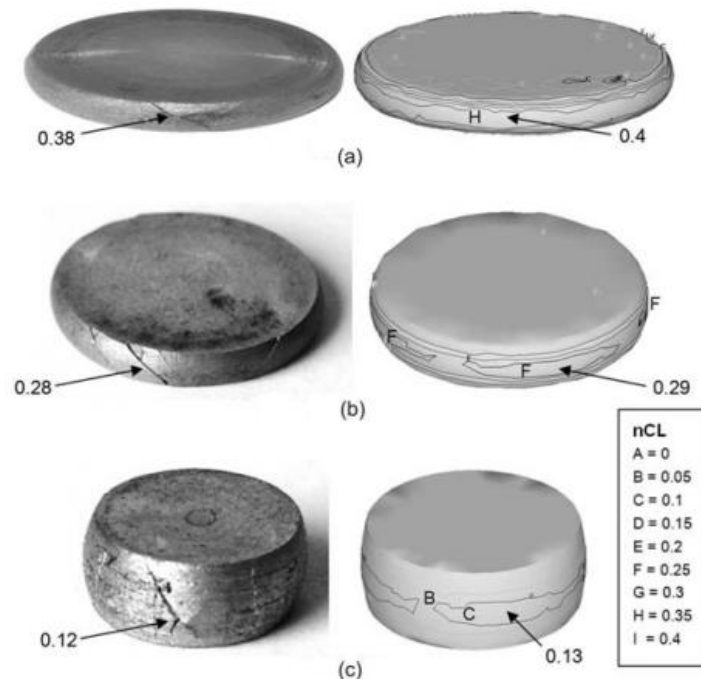


Figura 16. Comparación de mediciones y cálculo de daño en un ensayo de compresión de distintos materiales. a) Acero HSLA, b) Aluminio 6082 T6, c) ALUMIX 321.

La figura 16 muestra la correspondencia que existe entre el daño medido y el calculado analíticamente en ensayos de compresión de muestras de acero de baja aleación de alta resistencia, aluminio 6082 T6 envejecido y ALUMINIX 321, una muestra obtenida por técnicas de pulvimetalurgia. [23]

En laminación por paso peregrino de tubos de Zircaloy 4 es posible el uso de la función de daño Latham-Cockcroft, donde también tiene un buen paralelismo con los defectos superficiales y su severidad. Sin embargo, no guarda una mejor relación con algún defecto en específico, el valor de daño que se obtiene de una configuración de parámetros de procesos tiene una mejor correlación con el número de defectos por unidad de longitud de tubo laminado. [24]

El modelo de daño Latham-Cockcroft también es compatible con simulaciones de trefilado de tubos. En este caso los cálculos de daño durante un proceso de trefilado guardan relación directa con la formación de fisuras y su posterior propagación durante el conformado. En base a esto se puede predecir si los parámetros de proceso son los adecuados para que el producto obtenido no presente fisuras. [25]

Curva de flujo

La curva de flujo de un material es información importante a la hora de plantear y configurar una simulación de un proceso de conformado metálico. Se define como la curva que relaciona la tensión verdadera necesaria para producir que el material se deforme, que se denomina tensión de flujo, y la deformación verdadera. La determinación de la curva de flujo es mediante ensayos que evalúen la trabajabilidad del material según a que estados de tensiones se someta al mismo, además también es afectada por factores como la velocidad de deformación y la temperatura. [15]

DESARROLLO

Simufact Forming®

Descripción

El programa Simufact Forming desarrollado por la empresa MSC software, filial de Hexagon una empresa dedicada al desarrollo de aplicaciones orientadas al diseño e ingeniería, también diseñan software de metrología dimensional para los departamentos de calidad y paquetes de estadística avanzada para la gestión de datos y control de procesos.

El software Simufact Forming es parte de la división de simulación de procesos de manufactura donde ofrecen soluciones para procesos de soldadura (Simufact Welding), manufactura aditiva (Simufact Additive) y conformado en metales (Simufact Forming).

Alcances

Simufact Forming cubre un gran rango de procesos de conformado en metales con una capacidad de representar y analizar en 3D, considerando varios factores propios del proceso como ser:

- Fricción entre el herramental y las piezas a conformar
- Comportamiento no lineal del material durante su procesamiento
- Cinéticas incluidas dentro del proceso
- Variaciones térmicas dentro del proceso, desde condiciones iniciales y la posibilidad de analizar la evolución y el estado final de obtenido.

El programa contiene módulos diseñados para operaciones específicas que se pueden configurar para realizar una simulación en condiciones especiales, entre los módulos se encuentran

- Hot-Forging
- Cold-Forging
- Open Die Forging
- Sheet metal forming
- Rolling
- Ring-Rolling
- Tratamiento Térmicos

El funcionamiento de este software se basa en el Método de Elementos Finitos (MEF), para la mayoría, y el Método de Volúmenes Finitos, reservado para forjado en caliente en procesos complejos.

A su vez este programa incluye herramientas para importar diseños, para definir las geometrías de las matrices y piezas que componen el proceso. Para el análisis se agrega una herramienta de mallado que permite elegir el tipo y tamaño de elemento con el que discretizar las piezas, de esta forma se optimiza la simulación del proceso.

La configuración del proceso a simular abarca muchos parámetros del proceso real, estos parámetros se traducen en variables que caracterizan cada componente, su interacción con otros, su estado inicial en el proceso y su evolución durante el mismo. Algunos de estas variables son:

- El material a deformar,
- la temperatura inicial,
- valores de transferencia de calor (conducción, convección y radiación),
- coeficientes de fricción (entre matrices y con el material a deformar),
- cinemática de las matrices y de la pieza durante el proceso, etc.

También es posible configurar los incrementos temporales/espaciales a fin de optimizar los resultados obtenidos y el tiempo de cálculo. Incluye, además, la posibilidad de seleccionar la cantidad de potencia del equipo que se destinará al cálculo de la simulación.

Configuraciones del material

La selección de materiales para la configuración de parámetros de una simulación se realiza utilizando una base de datos propia del programa, llamada Simufact Material. Dicha base de datos es independiente al software base, por lo que es posible introducir otros materiales a la base de datos predeterminada.

Simufact Material incluye un amplio rango de materiales utilizados en conformado metálico incluidos aleaciones de aluminio, cobre, magnesio, níquel, titanio, zinc y zirconio, además de contar con un amplio registro de aceros, aceros inoxidables y aceros de herramientas (específicamente para su uso en matrices).

El software permite clasificar según diversas características o parámetros del material facilitando la búsqueda. Algunos parámetros para la clasificación son

- Área de aplicación: Distingue entre distintos procesos desde un punto de vista general (Forjado en frío, forjado en caliente, forjado en tibio, soldadura mecánica, soldadura, pulvimetalurgia, etc.
- Rango de temperatura de proceso: En todos los materiales de la base de datos están especificados una temperatura mínima y máxima, las cuales se utilizan para asegurar las propiedades del material dentro de dicho rango.
- Grupo: El grupo de material determina de forma previa algunas propiedades/configuraciones cuando se definen valores de forma automática para emisividad térmica y modelos de fricción.
- Condición del material: Permite elegir entre distintos estados metalúrgicos el material a seleccionar (Recocido, Templado, Normalizado, Fundición).
- Normas de estandarización: Permite seleccionar entre distintos estándares internacionales (AISI, AWS, DIN, GB, JIS).
- Propiedades de materiales: Permite elegir la distinción de datos de materiales según distintas propiedades como modelo de anisotropía, modelo de daño, propiedades electromagnéticas, transformación de fases, propiedades frente al creep, microestructura, etc.

Los parámetros de clasificación funcionan siempre y cuando los materiales de la base de datos posean características de dicho parámetro.

Configuraciones de simulaciones

Configuración de Simulación de Ensayos de compresión

Los ensayos de compresión fueron realizados por J. Manelli en su trabajo de seminario “Control de procesos de laminación por paso peregrino: Evaluación de materia prima, material intermedio y lubricantes “. Este ensayo se llevó a cabo para evaluar la trabajabilidad de un material en procesos de conformado plástico en los cuales las tensiones de compresión predominan.

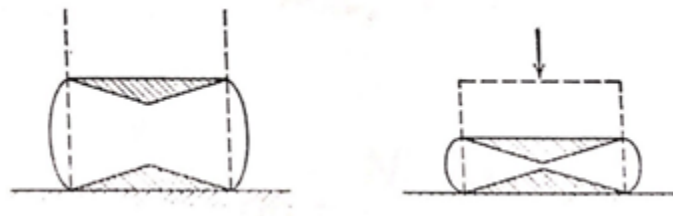


Figura 17. Esquema de ensayo de compresión.

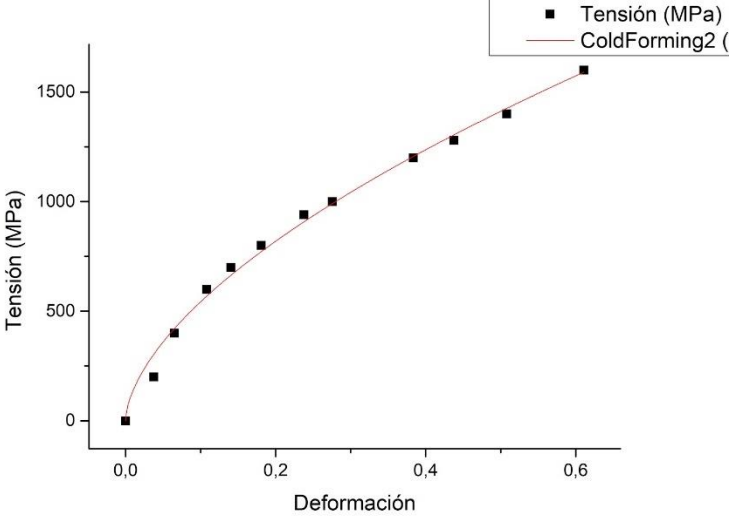
El objetivo de estas simulaciones fue medir el daño según Latham-Cockcroft en las zonas en las que se produjeron fisuras en los ensayos reales, de esta forma definir un valor de daño mínimo para el cual se asocia la formación de fisuras en las simulaciones de laminación posteriores.

Para la simulación se utilizó probetas con una geometría similar a la informada en el trabajo, usando de base un prisma de base cuadrada con el agregado de un canto en cada arista lateral.

Parámetros de simulaciones utilizados:

Geometrías de matrices	Dos matrices cilíndricas de diámetro mayor que el de las probetas.
Geometría de pieza inicial	Se planteó un prisma de base cuadrada, con aristas eliminadas (chaflanado) (Figura 18 – Tabla 1)
Lubricación	Lubricante ETNA con $m=0.459$, en óptimas condiciones de desempeño
Temperatura inicial	20°C en todos los componentes
Transmisión de calor	Transmisión por conducción entre los componentes y por convección al medio ambiente
Cinemática asociada	Velocidad de matriz superior: 5 mm/min
Mallado	Mallado con elementos tetragonales con una arista máxima de 0.45 mm En todas las probetas el número de elementos fue mayor a 20000.
Tiempo de calculo	1-2 horas por simulación

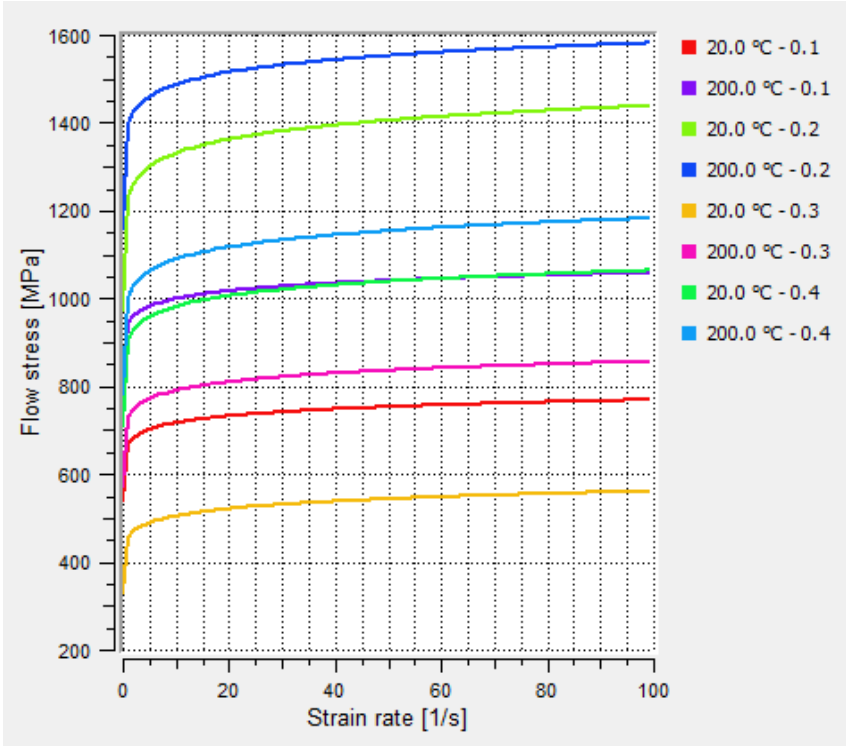
Materiales utilizados:

Material	Zircaloy 4 – Ensayado (*)			
Composición Química	1.20-1.70 Sn - 0.18-0.24 Fe - 0.07-0.13 Cu - 0.12 Omáx			
Propiedades Térmicas	Conductividad Térmica	21.5 W/(m.K)	Calor Específico	0.285 J/(g.K)
Propiedades Mecánicas	Tensión de Fluencia		450 MPa	
	Módulo de Young	99.3 GPa	Módulo de Poisson	0.37
Anisotropía (***) [30]	$r_{0^\circ} = 0.16$ $r_{45^\circ} = 0.60$ $r_{90^\circ} = 0.98$ $\sigma_{0^\circ} = 357.5 \text{ MPa}$ $\sigma_{45^\circ} = 460 \text{ MPa}$ $\sigma_{90^\circ} = 591.7 \text{ MPa}$			
Curva de Flujo	 $\sigma_F = 2153 \text{ MPa } \varepsilon^{0.61} \text{ (Ec.17) (**)}$			

(*) En el anexo 1, se encuentran los fiteos de las curvas de flujo obtenidas de los ensayos de compresión con los cuales se llegó a la ecuación 16.

(**) Los datos de los coeficientes r y las tensiones de fluencia fueron obtenidos, según bibliografía, de tubos de medidas 63.5 x 10.92 mm, las probetas se obtuvieron aplanando una sección de tubo cortada longitudinalmente y luego recocido a 635°C durante 3 horas para eliminar tensiones residuales producidas en el aplanado.

(***) Aclaración: Simufact Material admite curvas de flujo que incluyan la deformación elástica, el solver del software considera deformaciones plásticas para tensiones mayores a la tensión de fluencia indicada en los datos del material.

Material	Zircaloy 4 – BDSM			
Composición Química	1.20-1.70 Sn - 0.18-0.24 Fe - 0.07-0.13 Cu - 0.12 O _{máx} – Zr El resto			
Propiedades Térmicas	Conductividad Térmica	21.5 W/(m.K)	Calor Específico	0.285 J/(g.K)
Propiedades Mecánicas	Tensión de Fluencia		450 MPa	
	Módulo de Young	99.3 GPa	Módulo de Poisson	0.37
Curva de Flujo	 $\sigma_F = C\dot{\phi}^m$			

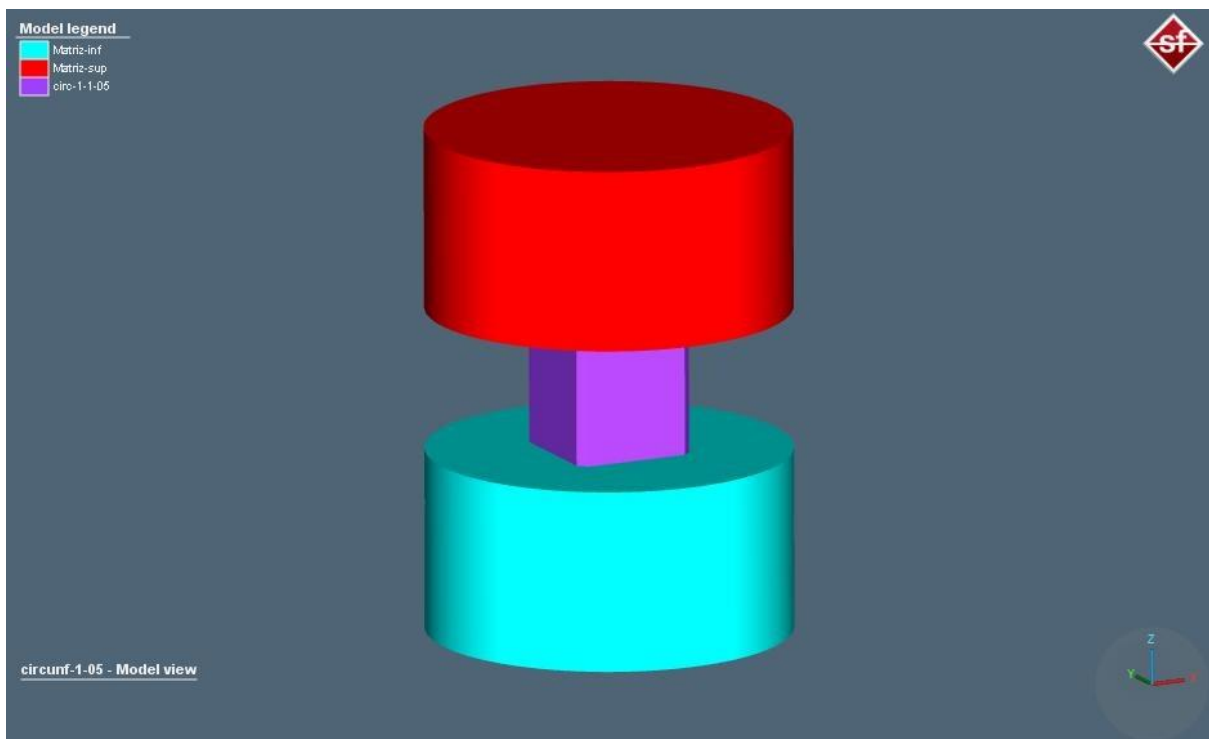


Figura 18. Posición inicial de las matrices y la probeta.

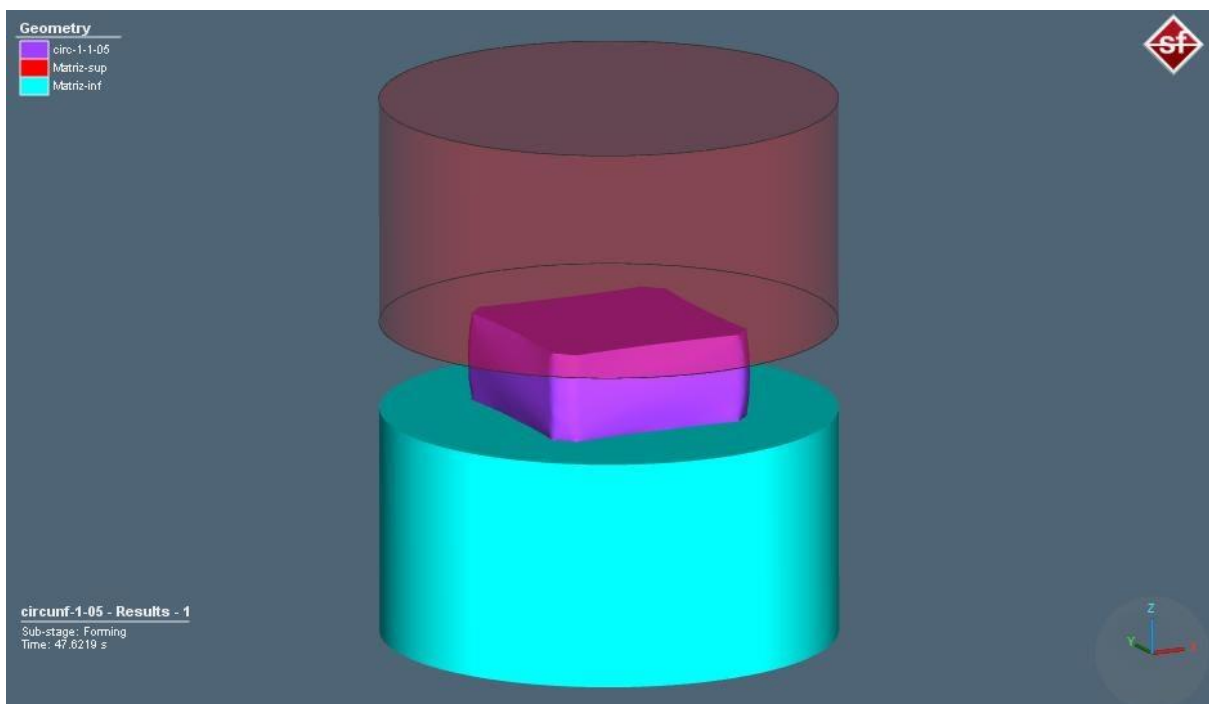


Figura 19. Posición final de las matrices y la probeta.

Probeta	Altura Inicial (mm)	Avance de matriz (mm)	Área Inicial (mm ²)
Circunferencial (1)	7,85	3,96	46,10
Circunferencial (2)	7,47	3,34	56,25
Circunferencial (3)	9,12	3,94	55,34
Transversal (4)	8,95	2,88	52,62
Transversal (5)	9,35	4,65	53,27
Transversal (6)	8,80	5,14	54,30
Radial (7)	7,22	3,86	51,19
Radial (8)	7,24	4,22	53,07
Radial (9)	6,97	3,31	51,97

Tabla 1. Valores geométricos iniciales y finales de las probetas simuladas.

Configuración de Simulación de laminación por paso peregrino

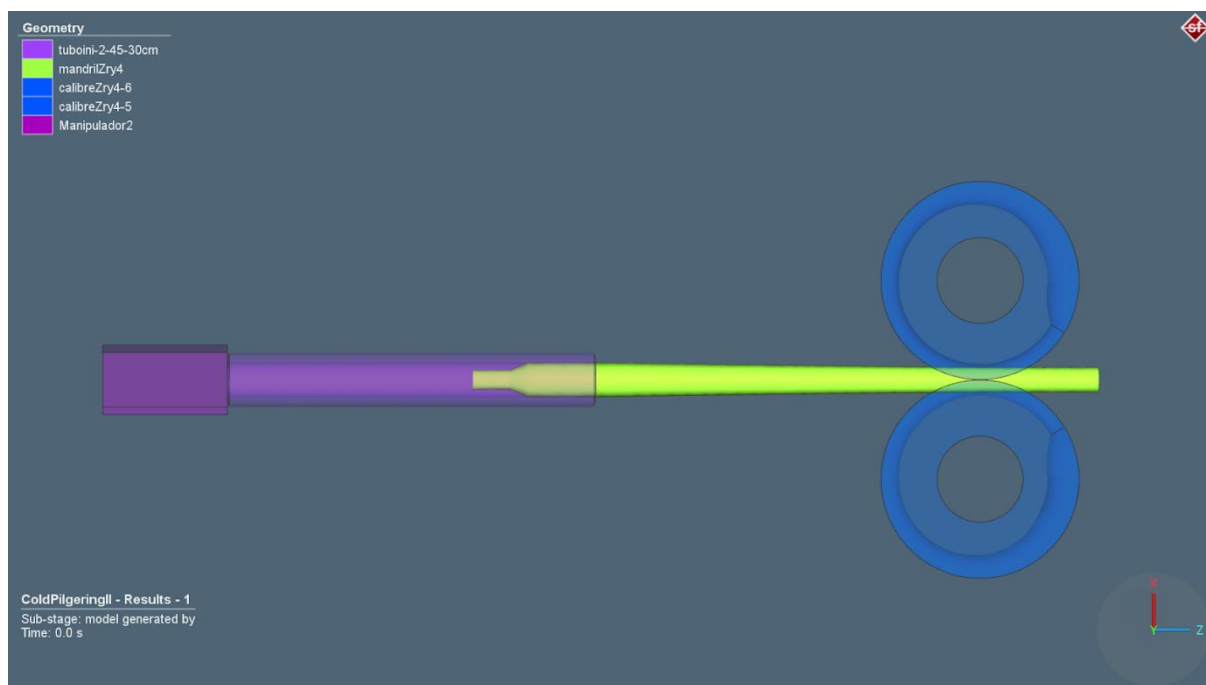


Figura 20. Piezas involucradas en la simulación de laminación por paso peregrino.

La simulación de laminación por paso peregrino de tubos sin costura se realizó basándose en la laminadora HPT 32 de FAE – CONUAR S.A. Esta laminadora tiene una capacidad máxima de fuerza separatriz de 80 toneladas (~800 kN).

El objetivo de estas simulaciones fue comparar valores de carga teóricos y simulados con la aplicación de distintas configuraciones de curva de flujo para obtener una simulación de referencia, esto es que entregue valores de carga y Q_{Dm} similares a los teóricos. Entre estas configuraciones están el uso de distintas curvas de flujo para el material, el modelo de anisotropía Hill 48 y la medición de daño Latham-Cockroft. También se busca observar si hay una relación entre la distribución de daño LC y el valor de Q_{Dm} , debido a que con este último se puede indicar si el acabado superficial del tubo es óptimo o no.

Para poder definir las variables de forma numérica, de tal forma que se pueda plantear en el proceso a simular se realizó algunas simplificaciones sobre el proceso. Las mismas fueron:

La cinemática de los calibres y giro del tubo

El movimiento que se simuló (HPT 32) consiste en una traslación y una rotación al mismo tiempo, por parte de los calibres, en el caso del tubo este se rotaba cierto ángulo, tras cada golpe (desplazamiento) de los calibres. La sincronía de estos movimientos se definió de tal forma que el tubo no se someta a torsión durante el proceso. Por lo que se planteó el giro del tubo tras cada avance y retroceso de los rodillos, a pesar de que en el proceso real existe cierta superposición de estos movimientos por algunas décimas de segundo.

Para determinar las velocidades de desplazamiento y rotación de los calibres junto con la velocidad de rotación del tubo y del mandril, se grabaron varios videos con la laminadora en funcionamiento a velocidad normal y a una velocidad reducida. De los videos obtenidos, usando un reproductor de video que permitió reproducir los mismos a menor velocidad y medir centésimas de segundo se determinó una proporción de tiempos para cada uno de movimientos de los componentes de interés. Con dichas proporciones de tiempo sabiendo que a velocidad normal cada avance y retroceso de los calibres duraba 0.5 segundos se determinó las velocidades necesarias para la simulación

Desplazamiento + Rotación calibre	Rotación Tubo + Mandril
0.35 seg	0.15 seg

Tabla 2. Intervalos de tiempos obtenido para cada avance y retroceso a velocidad normal de laminación.

Las mediciones hechas sobre videos, de los calibres en movimiento, se observan que el tubo se comienza a girar antes de que los mismos queden estáticos, pero la diferencia de tiempo apenas llegaba a décimas de segundos. También se consideró que el avance del tubo entre cada golpe ocurría en el mismo intervalo de tiempo que en él ocurre la rotación del mismo.

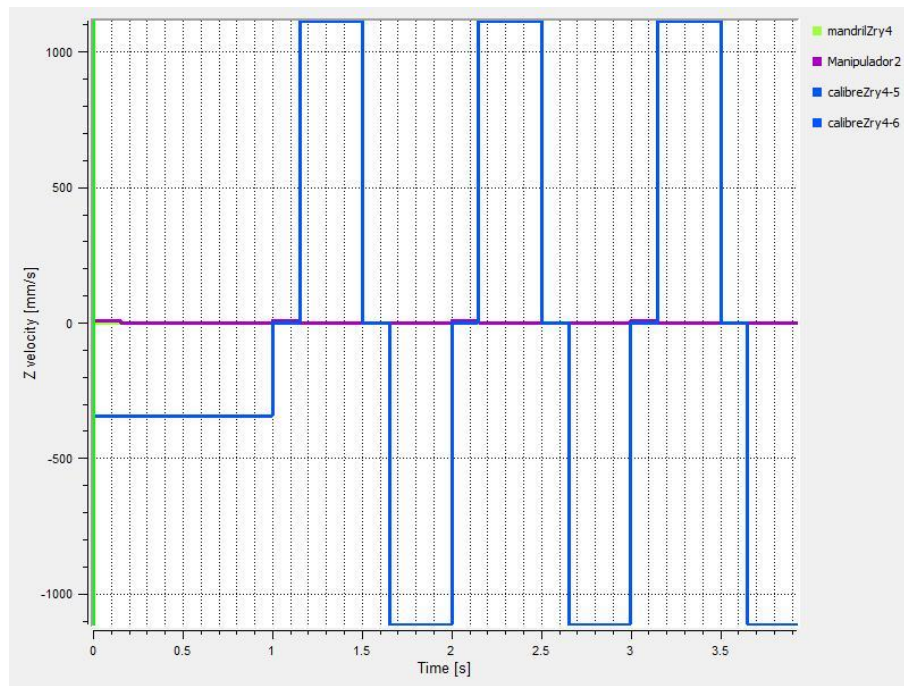


Figura 21. Velocidades de desplazamiento de los componentes. Escala total.

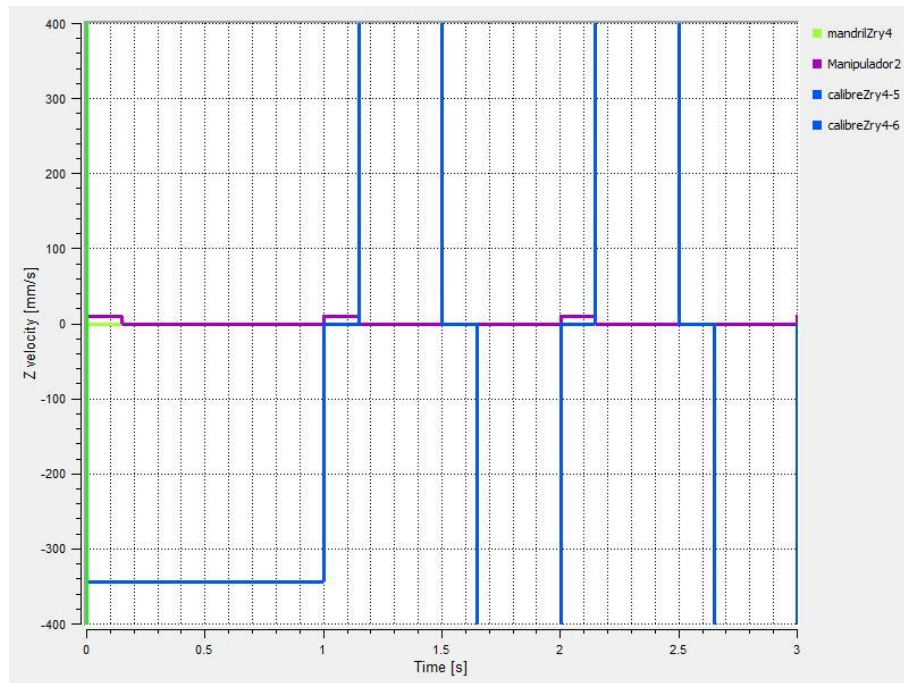


Figura 22. Velocidades de desplazamiento de los componentes. Escala reducida.

El avance y giro del tubo se planteó con otro componente que está en contacto con una base del mismo al cual se le programó una rutina cinemática del giro y traslación correspondiente al tubo. la transmisión de este movimiento al tubo se realizó considerando que entre ambas piezas hay un coeficiente de fricción igual a 1, por lo que la separación de las mismas no ocurrió.

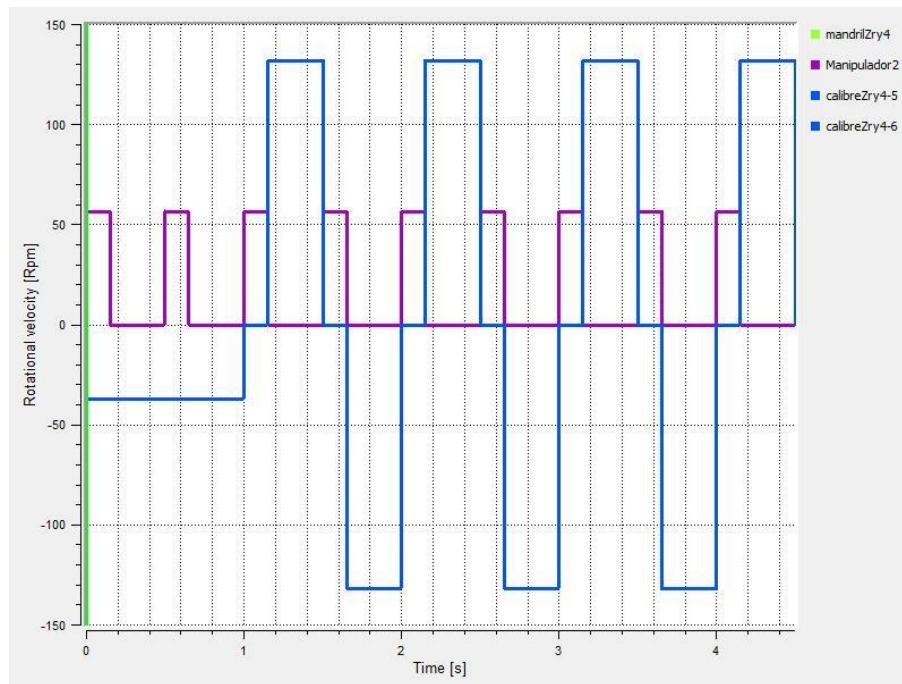


Figura 23. Velocidades angulares de cada componente, las velocidades del tubo y del mandril al ser iguales están superpuestas.

Avance del tubo entre cada golpe = 1.3 mm

Velocidad de avance del tubo = 8.66 mm/seg

Velocidad de rotación del tubo y del mandril = 5.93 rad/seg - 56.6273 rpm

Velocidad de traslación de los rodillos = 1114.28 mm/seg

Velocidad de rotación de los rodillos = 13.8 rad/seg - 131.78 rpm

Velocidad de traslación de los rodillos (*) = -343 mm/seg

Velocidad de rotación de los rodillos (*) = -3.879 rad/seg - -37.0417 rpm

(*) Estos valores no corresponden a la laminadora en régimen de laminación, sino que a un paso inicial que se realiza para verificar que las estaciones de los calibres y del mandril se encuentren bien sincronizados

Parámetros térmicos durante el proceso

Durante el proceso los calibres, el mandril y el tubo son expuestos a los oil-jets que proporcionan la lubricación necesaria en el proceso, donde dicho lubricante también cumple la función de refrigerante. El lubricante utilizado al ser se base agua y al estar en gran cantidad y en constante movimiento se consideró como si la transferencia de calor de los componentes al ambiente fuera como si estuviera en contacto con agua.

Parámetros de simulaciones utilizados:

Geometrías de matrices	Dos rodillos para laminación de tubos, un mandril y un manipulador para producir el avance y rotación del tubo.
Geometría de pieza inicial	Se usó un tubo con las dimensiones del TREX de Zircaloy 4. Dext=44.45 mm, esp= 7.62 mm, Largo= 300 mm
Lubricación	Lubricante ETNA con $m=0.459$, en óptimas condiciones de desempeño
Temperatura inicial	20°C en todos los componentes
Transmisión de calor	Transmisión por conducción entre los componentes La transferencia de calor al medio se consideró en contacto con agua.
Cinemática asociada	Velocidades de rotación: Figuras 21 y 22 Velocidades de traslación: Figura 23
Mallado	Mallado con elementos hexaédricos (Ringmesh, simetría cilíndrica) con una arista máxima de 5.5 mm En todas las simulaciones el número de elementos fue mayor a 17000.
Tiempo de simulación	130 segundos
Incremento	0.0005 segundos
Muestreo de resultados	0.003 segundos
Tiempo de calculo	120-140 horas por simulación

Los diseños de rodillos y mandril para su uso en Simufact Forming se realizaron mediante Inventor Autodesk, usando hojas de datos proporcionados por la división de Ingeniería de FAE-CONUAR.

Se realizaron 4 simulaciones con un avance de tubo entre golpes de 1.3 mm. A su vez se separaron dos grupos para cada curva de flujo y alternando la activación del modelo de anisotropía.

Configuración de Simulación de Trefilado de tubos

La simulación de trefilado se basó en el trefilado con mandril de tubos sin costura de aluminio 7075 T0 (figura 24) a distintas reducciones y distintos ángulos de matriz. Se utilizó el material planteado por Kvačák [26] ya que obtuvo los valores críticos de daño LC y daba información sobre el tratamiento térmico al que se sometió al material.

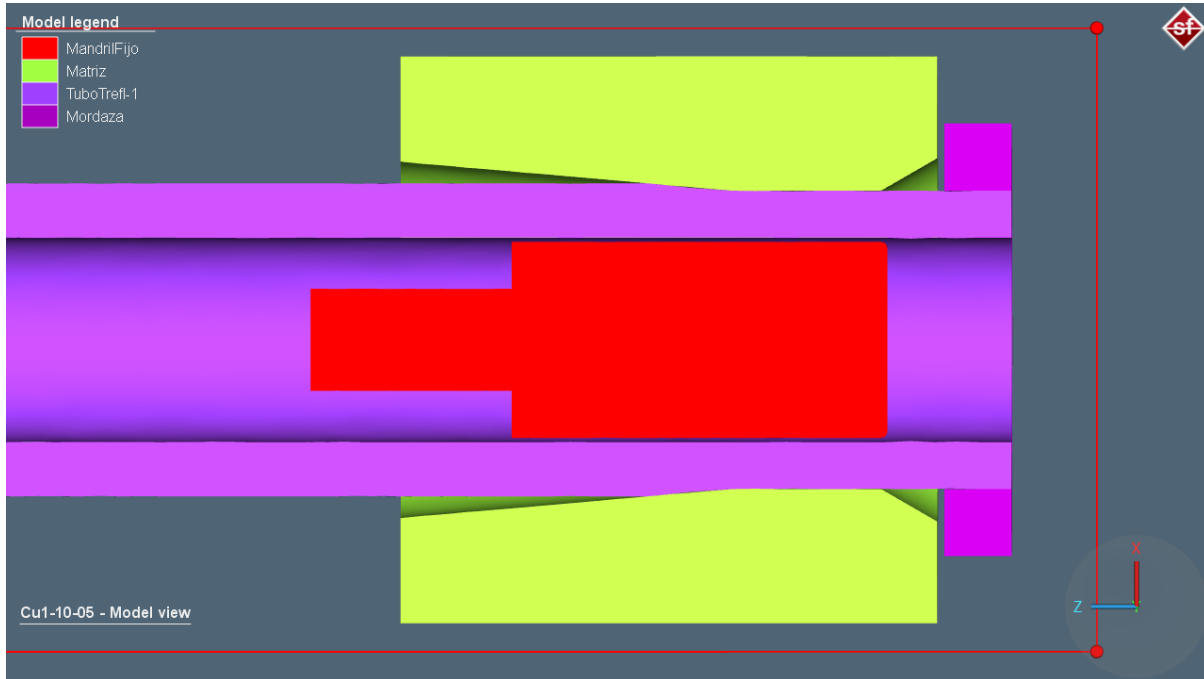


Figura 24. Piezas involucradas en la simulación de trefilado de un tubo sin costura.

Se utilizaron matrices con 5°, 8° y 11° de semiángulo. Para cada matriz se planteó 5 simulaciones, 3 correspondientes a una serie de tres pasadas de un tubo con una reducción en área de 5% por pasada y las otras dos, pasadas únicas de reducción en área de 10% y 15%.

Parámetros de simulaciones utilizados:

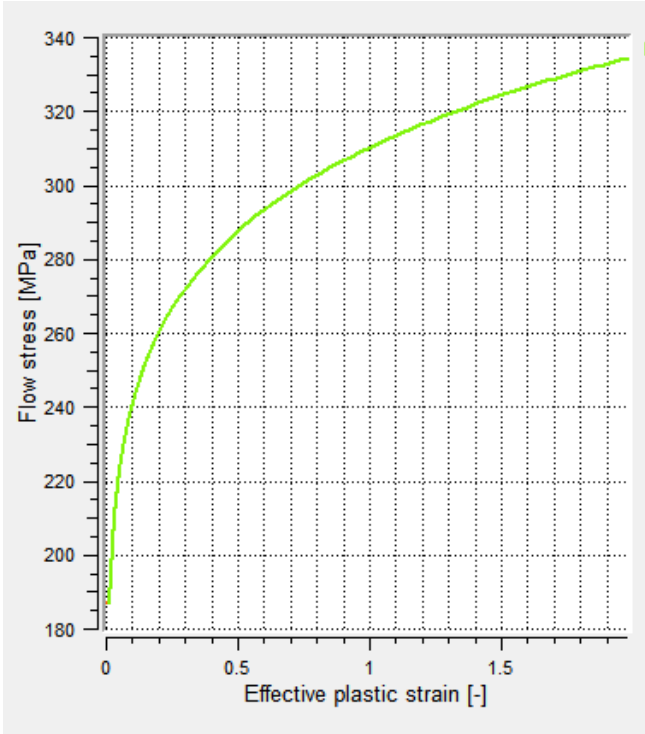
Geometrías de matrices	Matrices con distintos valores de ángulos, diámetro y longitud de zona de calibración (igual al diámetro de la matriz), el ángulo de campana de salida constante (60°), empalme de zona de trabajo y cilindro de 0.1 mm. Mandriles cilíndricos de distintos diámetros y una mordaza.
Geometría de pieza inicial	Se usó un tubo con dimensiones: Dext=25.40 mm, esp= 2.54 mm, Largo= 160 mm
Lubricación	Coeficiente de fricción teórico asociado a una buena lubricación para el proceso, $\mu=0.05$
Temperatura inicial	20°C en todos los componentes
Transmisión de calor	Transmisión por conducción entre los componentes La transferencia de calor al medio se consideró en contacto con agua.
Cinemática asociada	La velocidad de la mordaza en todas las simulaciones es de 4 m/min
Mallado	Mallado con elementos cuadrados (Quadmesh) con una arista máxima de 0.25 mm En todas las simulaciones el número de elementos fue mayor a 6000.
Tiempo de simulación	Depende de la simulación, pero siempre menor a 4 segundos
Incremento	0.003 segundos
Muestreo de resultados	0.03 segundos
Tiempo de calculo	0.5-1 horas por simulación

Las reducciones planteadas fueron:

	Diámetro exterior (mm)	Espesor
1er Pasada de reducción (1/3)	25.00	2.45
2da Pasada de reducción (2/3)	24.50	2.38
3er Pasada de reducción (3/3)	24.00	2.31
Reducción de 10%	24.50	2.38
Reducción de 15%	24.00	2.31

Tabla 3. Diámetros y espesores esperados para cada simulación.

Materiales utilizados:

Material	Aluminio 7075 T0 (*)			
Composición Química	5.65 Zn - 1.70 Cu - 0.23 Cr - 0.34 Fe - 0.40 Si 0.30 Mn – 2.50 Mg – Al El resto			
Propiedades Térmicas	Conductividad Térmica	130 W/(m.K)	Calor Específico	0.96 J/(g.K)
Propiedades Mecánicas	Tensión de Fluencia		180 MPa	
	Módulo de Young	71 GPa	Módulo de Poisson	0.33
Valor crítico de daño Latham-Cockroft [26]	0.28/0.32			
Curva de Flujo [26]	 $\sigma_F = 310 \text{ MPa } \varepsilon^{0.11} \text{ (Ec.18)}$			

(*) El material planteado se encontraba recocido. El tratamiento térmico consistía en un recocido a 413°C durante 150 minutos y luego enfriado a 260 °C a razón de 30°C/min. El ensayo de compresión se realizó a 12 mm/min.

RESULTADOS

Simulaciones de Ensayos de compresión

Los resultados de las simulaciones con las dos curvas de flujo arrojaron distintas mediciones de daño en las caras de las probetas. La figura 25, obtenida con el material con curva de flujo obtenida de ensayos, se observa como el daño es mínimo, si bien hay medidas en las caras de la probeta suele haber lugares que presentan un pico mayor de daño, pero ocurre en los bordes y se atribuye a un efecto geométrico.

En el caso de las simulaciones con el material de la base de datos, figura 26, el mayor daño se encuentra en las caras de las probetas lo cual corresponde con la presencia de fisuras en las probetas ensayadas, figura 27. Además, no se produce el abarrilamiento en la probeta durante el ensayo.

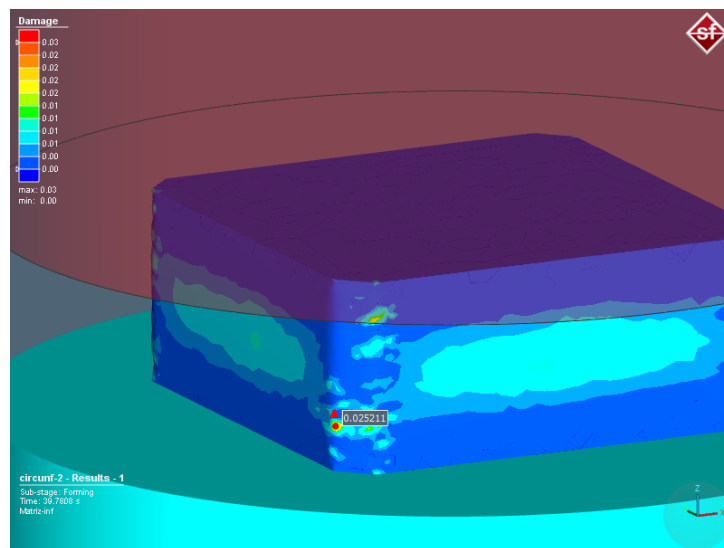


Figura 25. Daño LC en probeta circunferencial 2, con curva de flujo obtenida de ensayos de compresión.

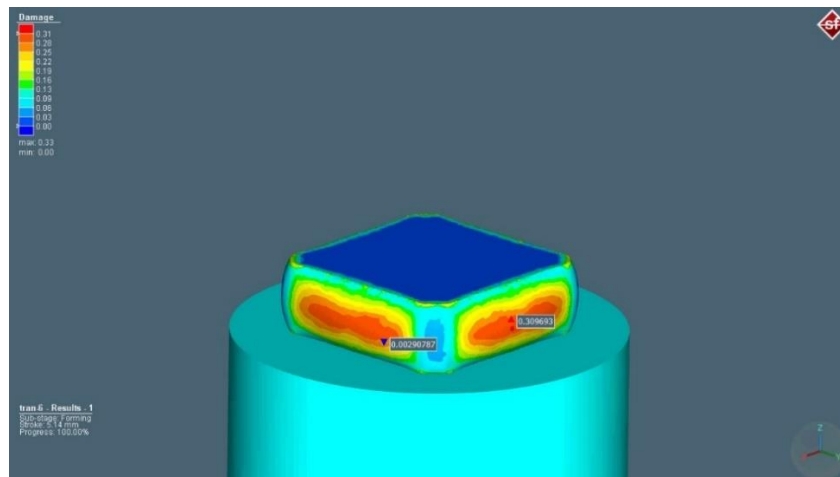


Figura 26. Daño LC en probeta transversal 6, con curva de flujo del material de la base de datos del programa.

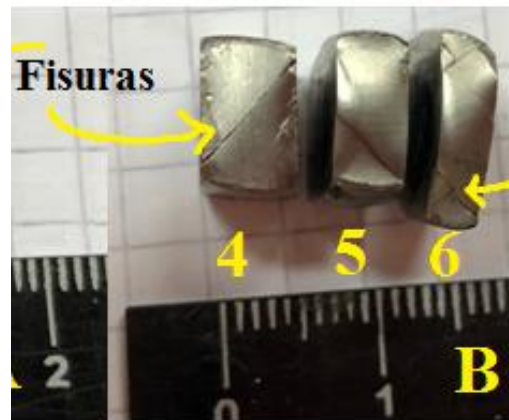


Figura 27. Probetas ensayadas. [17]

La tabla 4, muestra las medidas de daño en cada probeta simulada. La diferencia de resultados entre curvas de flujo utilizadas es notable. Esta diferencia se puede deber a limitaciones de la curva de flujo obtenida por ser determinada a una única velocidad de deformación, lo que dificulta la descripción de la deformación debido a distintas velocidades de deformación interna durante la deformación. [27] [28]

N° de Probeta	Zircaloy 4 – BDSM		Zircaloy 4 – Ensayo
	Daño Medio	Daño Máximo	Daño Máximo
1	0.22	0.24	0.02
2	0.20	0.20	0.01
3	0.25	0.25	0.03
4	0.17	0.18	0.01
5	0.24	0.26	0.02
6	0.29	0.31	0.02
7	0.18	0.20	0.01
8	0.21	0.22	0.01
9	0.25	0.25	0.02

Tabla 4. Valores medios y máximos de daño en las simulaciones.

Simulaciones de Laminación por Paso Peregrino de Tubos

Análisis de cargas de laminación

Las mediciones de carga de laminación se realizaron aprovechando características del software, con muy buena correlación con valores experimentales medidos, según Zheng, Weijun et. al. [29] [30] [31]

En las figuras 28 a 33 se graficaron las cargas de laminación obtenidas de las simulaciones en un avance de rodillos, además la curva de carga calculada en base al modelo teórico.

En todas las figuras se observan fluctuaciones de distinta magnitud de los valores de carga. La presencia de estas fluctuaciones también se observó en la bibliografía consultada, pero con menor intensidad.

Se asoció esta variación de las cargas durante la laminación a la definición del material, específicamente a la curva de flujo utilizada ya que esta se definió con una única velocidad de deformación y no brinda información de la respuesta del material a distintas velocidades de deformación (caso del material ensayado). En el caso de la carga de laminación con el material de la base de datos del programa se observa una menor variación en las cargas, pero valores de carga menores. Otra posible causa de estas fluctuaciones podía haber sido la falta de otros componentes acoplados a los calibres que aumenten la rigidez sobre los mismos, pero esto se desestimó debido a que, en los trabajos de Zheng, Weijun, et.al. [29] [30] [31], sin la consideración de componentes estructurales se obtenían valores de carga de laminación bastante cercanos a los reales.

A fin de poder hacer un análisis aproximado de las curvas de carga se usó una línea de tendencia sobre cada curva. Tanto la curva de carga teórica, como la mayoría de las demás curvas muestran un pico entre 0.3 y 0.4 de la zona de trabajo.

	Zircaloy 4 - Ensayo	Zircaloy 4 – Ensayo c/An.
R^2	0.629	0.460

Tabla 5. Valores de coeficiente de determinación de la curva de tendencia en la figura 28.

Las figuras 29, 30, 32 y 33 son gráficos obtenidos de separarlos de curvas completas en intervalos 1-0.4 y 0.4-0.0.

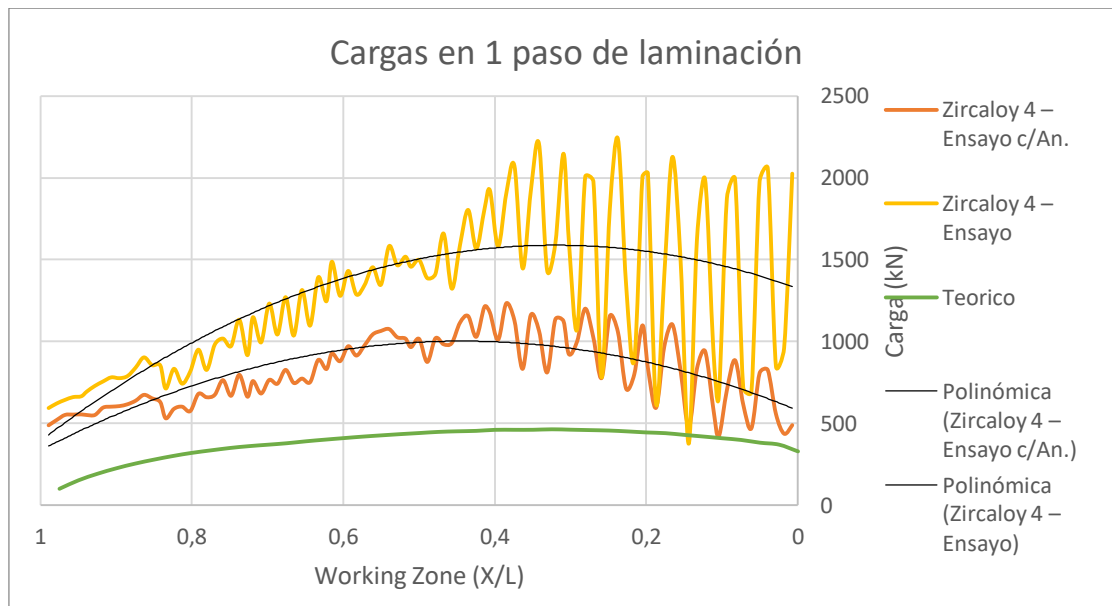


Figura 28. Cargas de laminación con curva de flujo de ensayo, completas.

Curvas de carga de laminación del Zircaloy 4 - Ensayo

Las curvas de tendencia en la figura 28 muestran que el perfil de cargas de laminación de las simulaciones sigue el teórico, aunque con valores de carga superiores que se atribuyeron al modelo de curva de flujo, el cual plantea un endurecimiento potencial con la deformación. A pesar de esta diferencia de valores de carga se debe observar que hay una disminución de la misma en el tramo 0.4-0 lo cual corresponde con la disminución de la deformación durante la laminación del tubo.

En cuanto al efecto de la anisotropía con este modelo de curva de flujo se observa una disminución de las cargas y de la fluctuación de las misma.

	Zircaloy 4 - Ensayo	Zircaloy 4 – Ensayo c/An.
R^2	0.918	0.915

Tabla 6. Valores de coeficiente de determinación de la curva de tendencia en la figura 29.

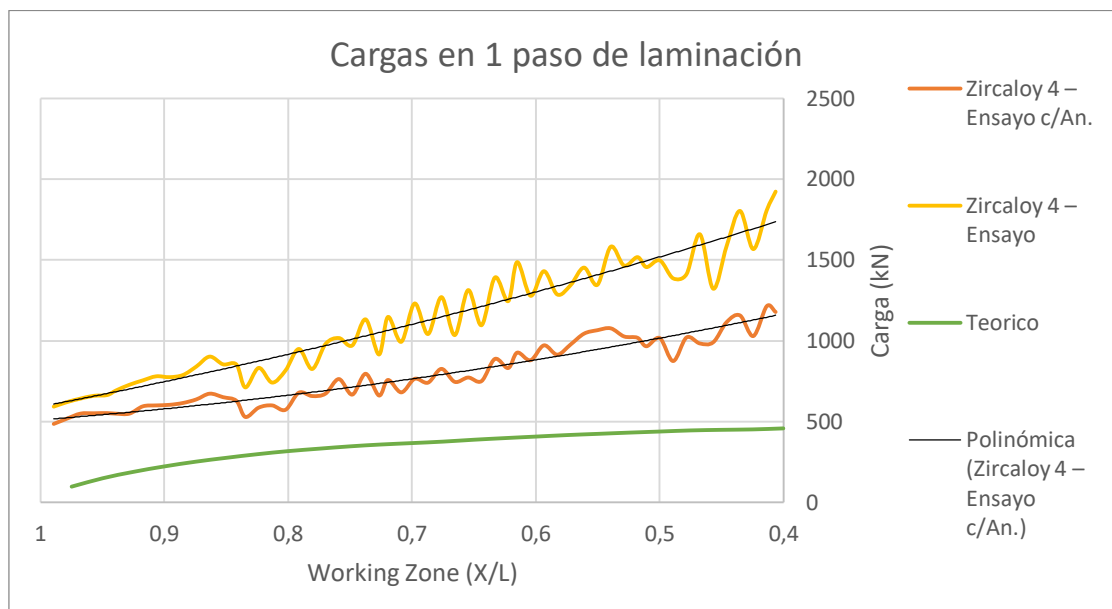


Figura 29. Cargas de laminación con curva de flujo de ensayo, intervalo 1-0.4.

En las figuras 29 y 30 se utilizó otra curva de tendencia para observar la evolución de la carga, en el intervalo 1-0.4 (fig. 29) las curvas muestran un comportamiento similar al de la teórica en este mismo intervalo.

En el intervalo 0.4-0 la curva de tendencia del material sin el modelo de anisotropía activado no sigue el descenso de carga que muestra la curva teórica y el material con anisotropía, pero también se debe observar que la línea de tendencia no tiene un buen coeficiente de determinación (tabla 30).

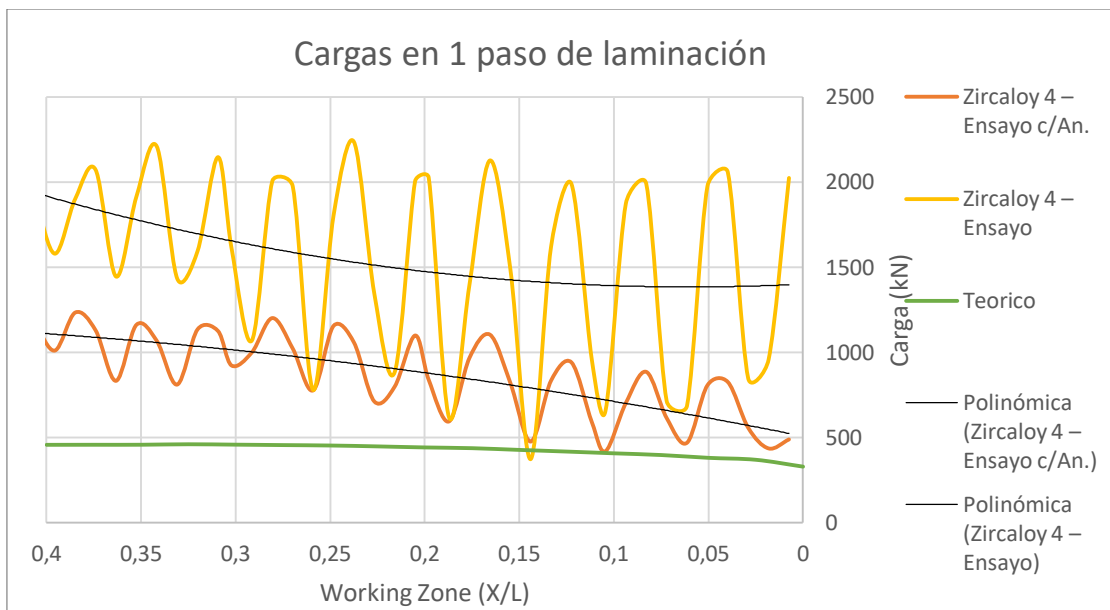


Figura 30. Cargas de laminación con curva de flujo de ensayo, intervalo 0.4-0.

	Zircaloy 4 - Ensayo	Zircaloy 4 – Ensayo c/An.
R^2	0.098	0.541

Tabla 7. Valores de coeficiente de determinación de la curva de tendencia en la figura 30.

Curvas de carga de laminación del Zircaloy 4 – BDSM

Las curvas obtenidas con el material de la base de datos del programa muestran un comportamiento distinto al de las obtenidas con el material ensayado. La curva del material sin anisotropía se descartó del análisis debido a su variación hasta valores demasiado bajos de cargas.

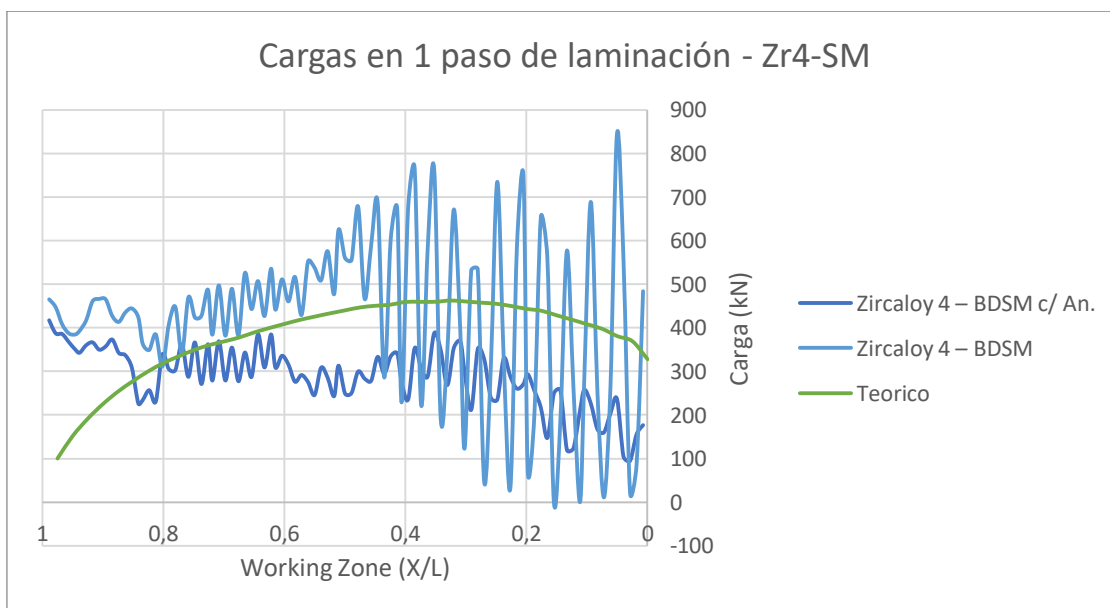


Figura 31. Cargas de laminación con curva de flujo proporcionada por el software. Intervalo completo.

	Zircaloy 4 - BDSM	Zircaloy 4 – BDSM c/An.
R^2	0.629	0.478

Tabla 8. Valores de coeficiente de determinación de la curva de tendencia en la figura 32.

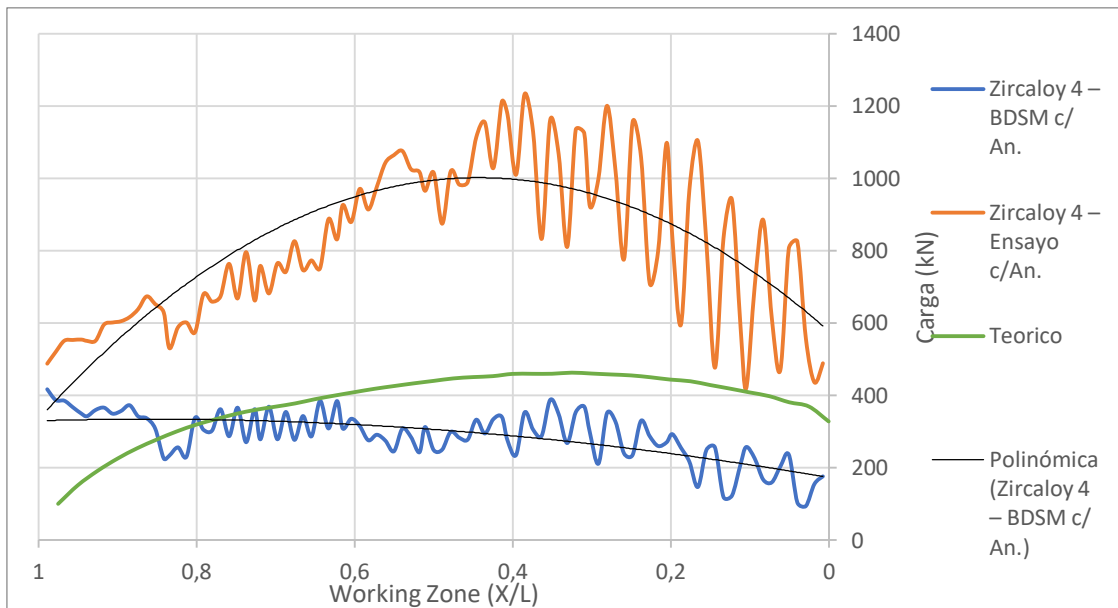


Figura 32. Cargas de laminación con curva de flujo de ensayo y del software, ambas con el modelo de anisotropía activado. Intervalo completo.

Comparación del efecto de la anisotropía entre curvas de flujo

En el caso del material de la base de datos del programa agregando modelo de anisotropía Hill 48, en comparación a la curva teórica y la correspondiente a obtenida con la curva de flujo del material ensayado (figura 32), tiene valores de carga más bajos y no sigue el comportamiento de las otras dos curvas, salvo en el intervalo 0.4-0.

	Zircaloy 4 - Ensayo c/An.	Zircaloy 4 – BDSM c/An.
R^2	0.915	0.240

Tabla 9. Valores de coeficiente de determinación de la curva de tendencia en la figura 33.

	Zircaloy 4 - Ensayo c/An.	Zircaloy 4 – BDSM c/An.
R^2	0.541	0.573

Tabla 10. Valores de coeficiente de determinación de la curva de tendencia en la figura 34.

En este caso se puede observar que la línea de tendencia (Zry-4 BDSM c/An.) no muestra un máximo en valores cercanos de 0.4, pero si lo hace la curva original.

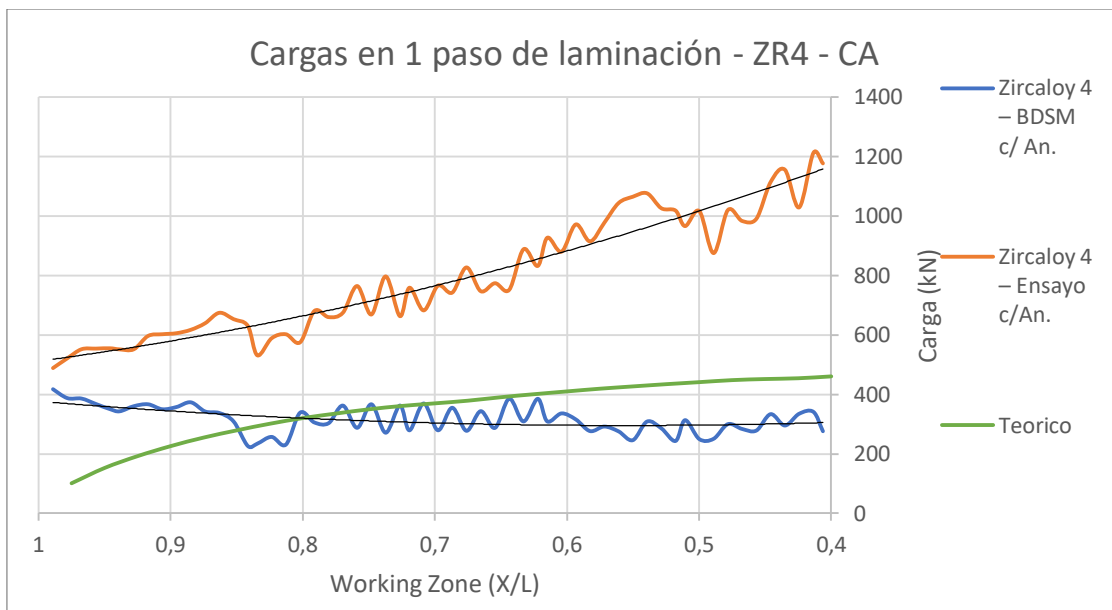


Figura 33. Cargas de laminación con curva de flujo de ensayo y del software, ambas con el modelo de anisotropía activado. Intervalo 1-0.4.

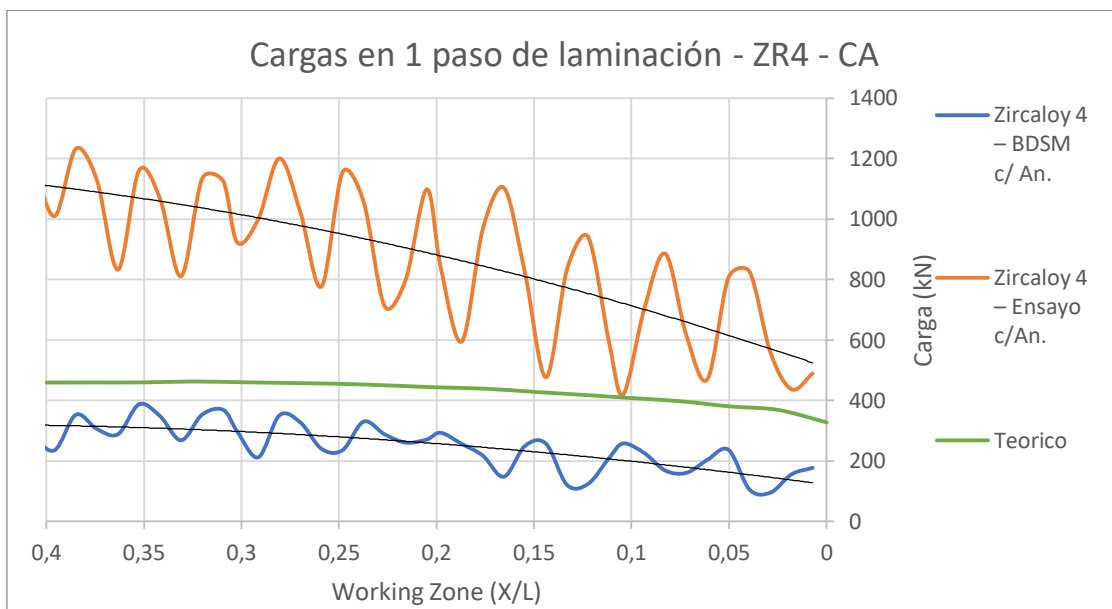


Figura 34. Cargas de laminación con curva de flujo de ensayo y del software, ambas con el modelo de anisotropía activado. 0.4-0.

Las curvas de carga de laminación obtenidas de las simulaciones muestran que modelos de curva de flujo dependiente únicamente de la deformación y de velocidad de deformación, por separado, no son suficientes para describir las cargas durante la laminación de tubos de Zircaloy 4 por paso peregrino. Por lo que no se puede definir de forma certera si es posible su procesamiento en base a límites operativos de laminadoras por paso peregrino.

El uso del modelo de anisotropía Hill 48 muestra un efecto favorable reduciendo las cargas y la fluctuación de las mismas en las simulaciones, lo que es muy notable en la figura 28. Según bibliografía, este modelo es compatible con simulaciones de Zircaloy 4, pero en este trabajo no se puede llegar a una conclusión sobre su implementación para la descripción de las cargas de laminación, debido a que su efecto se ve opacado por el que produce el modelo de curva de flujo utilizado.

Mediciones de daño en las simulaciones

El daño en las simulaciones presenta ciertos patrones dependiendo de la configuración utilizada, en la figura 35 se observa un pico de daño acompañado de una distribución lineal que ocurrió en todas las simulaciones con el modelo de anisotropía Hill 48. En cambio, en las simulaciones sin este modelo de anisotropía (figura 36) el daño tiene una distribución más dispersa, por sobre todo el tubo, pero el pico de daño es mayor.

Las mediciones de daño en cada simulación fueron:

Simulación	Daño base	Daño Pico
Zircaloy 4 – BDSM c/ Ani.	0.40	2.39
Zircaloy 4 – BDSM	6.00	6.73
Zircaloy 4 – Ensayo c/ Ani.	0.30	2.11
Zircaloy 4 – Ensayo	2.00	4.92

Tabla 11. Valores de daño en las simulaciones.

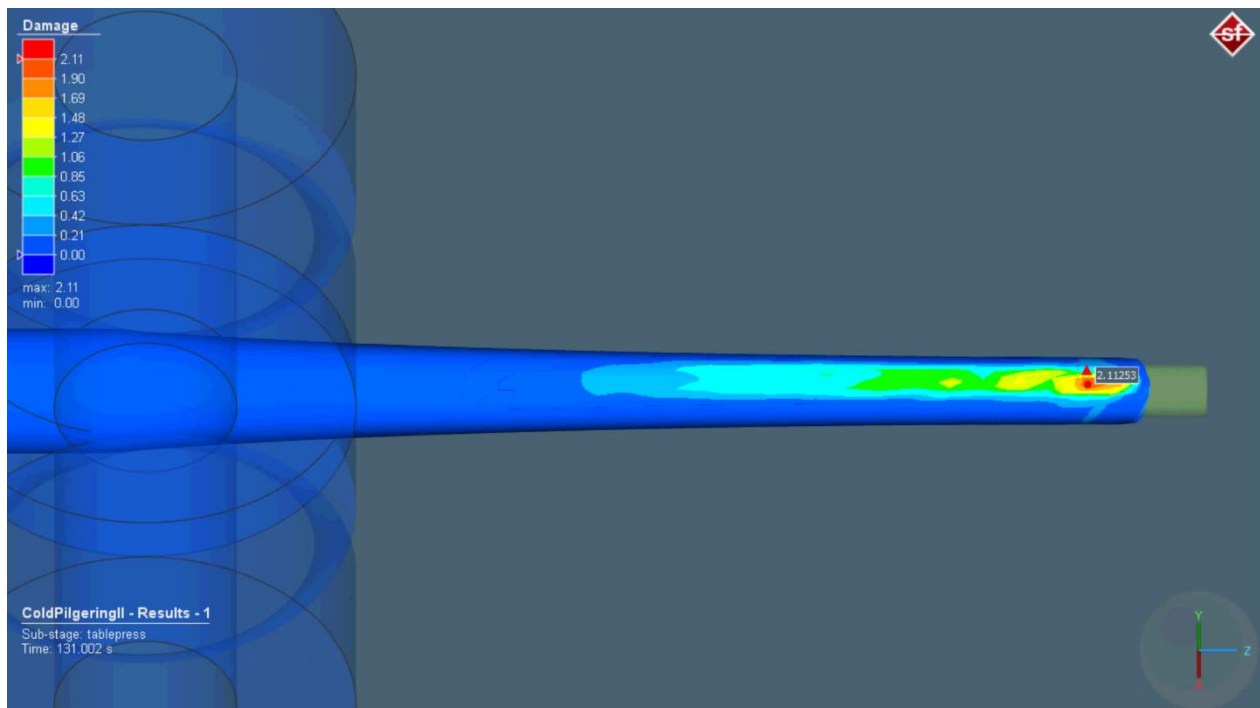


Figura 35. Daño sobre garganta, Zircaloy 4 – Ensayo c/anisotropía.

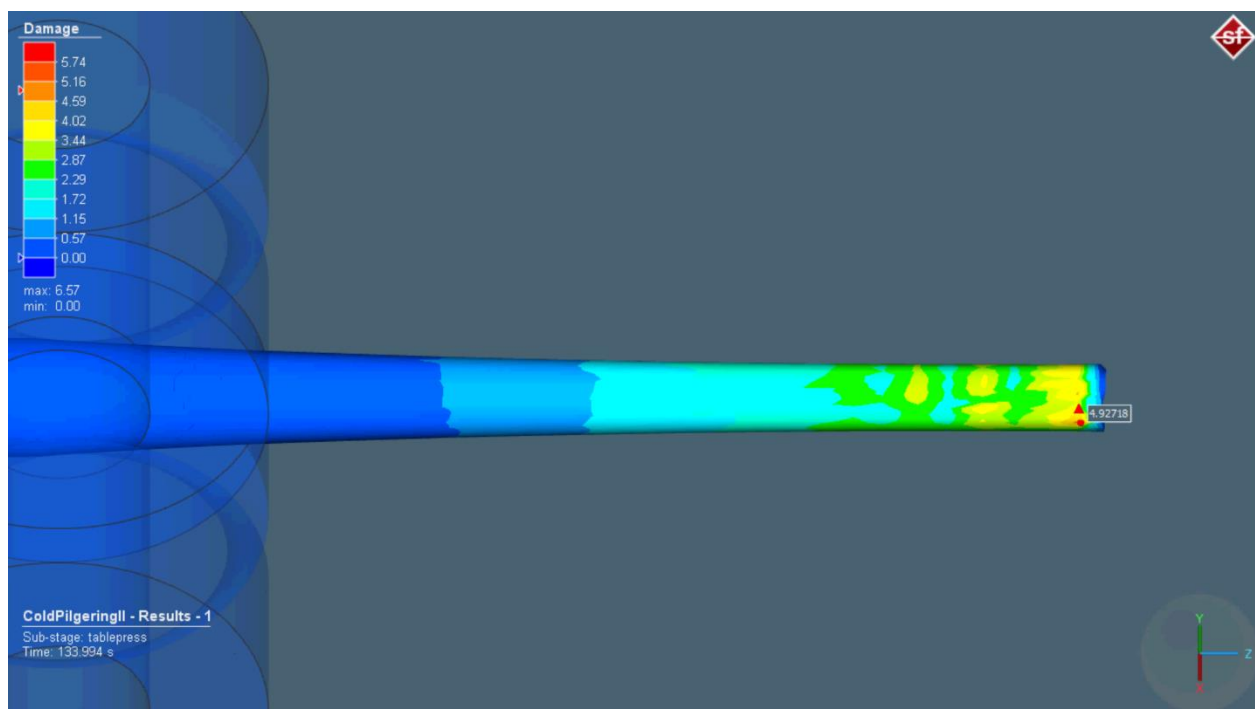


Figura 36. Daño sobre garganta, Zircaloy 4 – Ensayo s/anisotropia.

Dimensiones Finales

Las dimensiones finales de los tubos obtenidos en las simulaciones se midieron utilizando herramientas del software, en la tabla 12 se observan los valores de diámetro exterior , espesor, reducción en área y Q correspondientes. A todas las mediciones se les debe considerar un error de 0.02 mm.

Simulación	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Reducción en área (%)	Q
Zircaloy 4 – BDSM c/ Ani.	25.36	2.62	76.3	2.219
Zircaloy 4 – BDSM	25.50	2.49	77.0	2.378
Zircaloy 4 – Ensayo c/ Ani.	25.42	2.53	76.9	2.318
Zircaloy 4 – Ensayo	25.64	2.59	76.2	2.303

Tabla 12. Valores obtenidos de las simulaciones.

Las dimensiones de diámetro y espesor obtenidas de las simulaciones no tienen semejanza entre si y solo un diámetro es próximo al valor especificado para el proceso. Esto muestra otro efecto en los resultados de la simulación del uso de distintas curvas de flujo del material.

La figura 37 muestra que la mayor reducción tanto en área como en espesor y diámetro del proceso ocurre en casi el 60% inicial de la zona de trabajo del mandril/rodillos. Este perfil de reducción es muy similar en todas las simulaciones.

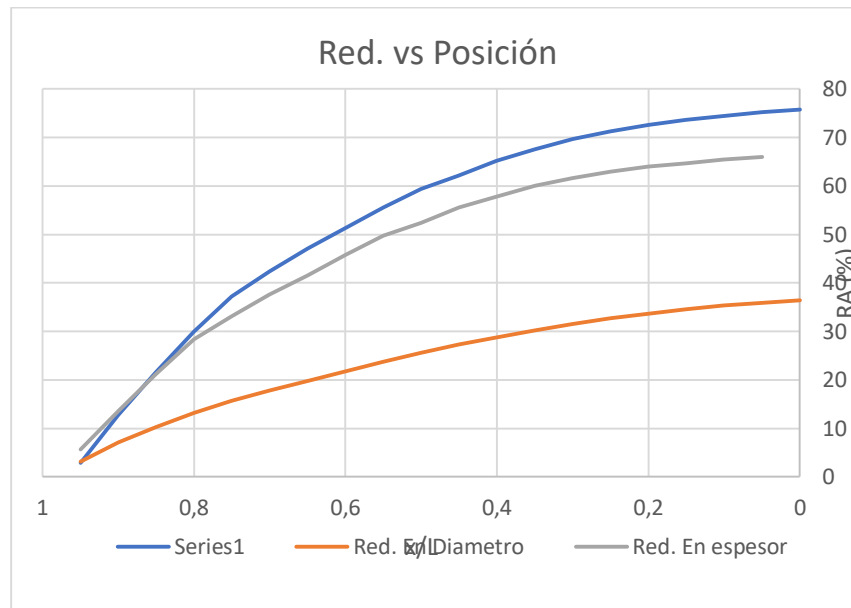


Figura 37. Evolución de la reducción en área, en diámetro y en espesor sobre la zona de trabajo, simulación con Zircaloy 4 – Ensayo c/ anisotropía.

Los valores finales de Q no alcanzan al valor teórico de 1.801 (según Ec. 1), los valores se encuentran en la tabla 6, mientras que en la figura 38 se observa la variación de Q a medida que se avanza con la deformación del tubo. En todas las simulaciones el valor de Q tiende a disminuir lo cual se explica con la insuficiente reducción en espesor hacia el final de la zona de trabajo. Los valores de Q dentro de los intervalos 0.9-0.5 y 0.2-0 muestran cierta variación, esto demuestra que las reducciones en espesor y en diámetro dependen de las curvas de flujo definidas.

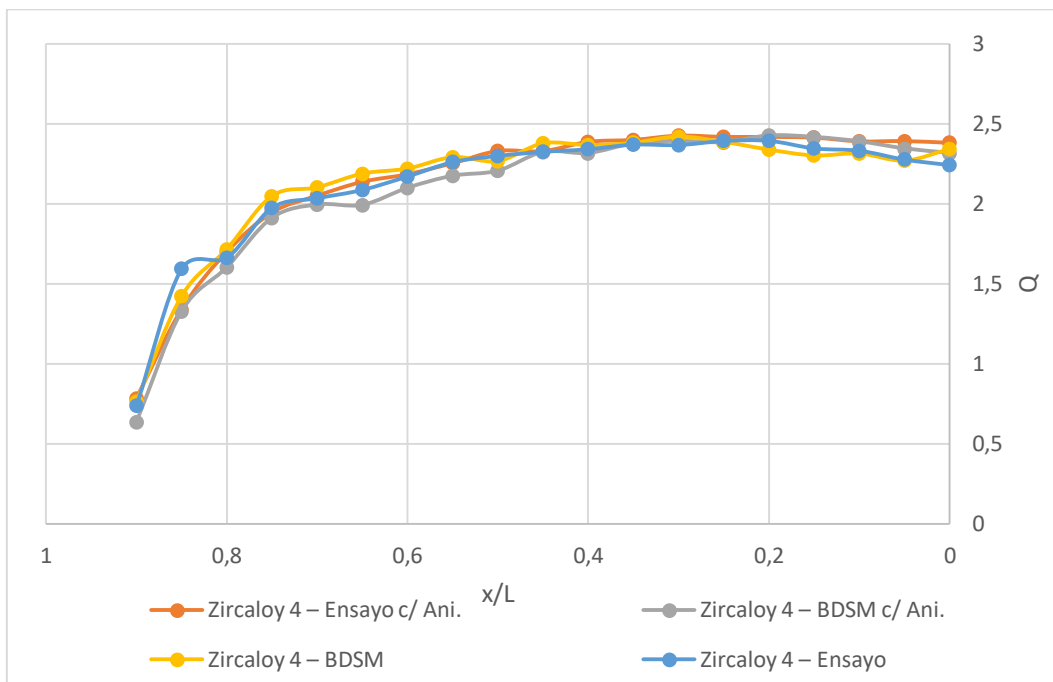


Figura 38. Variación de Q en la zona de deformación.

En la figura 39 se graficaron los valores finales de Q de cada simulación en un gráfico que define una zona en la que no se forman fisuras en la superficie del tubo laminado por paso peregrino [32]. Los valores de Q obtenidos con las reducciones en área correspondientes entran en la zona de valores apropiados para el proceso.

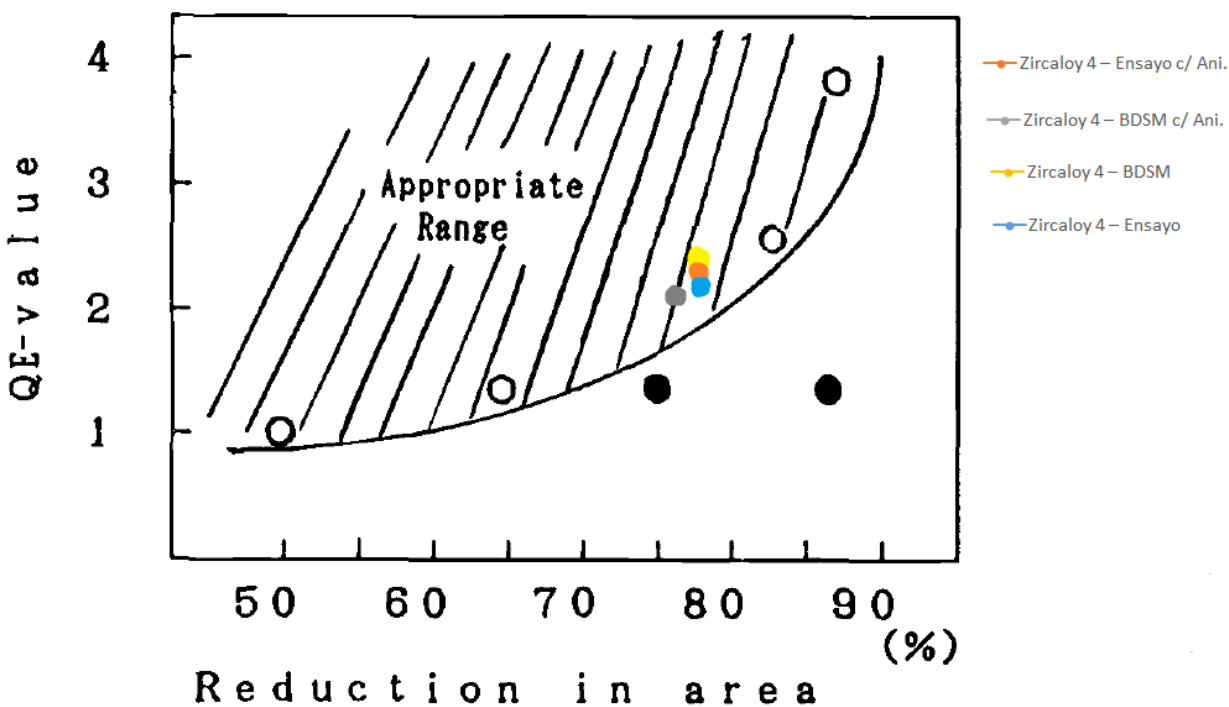


Figura 39. Rango de valores de Q sin la formación de fisuras superficiales. [32]

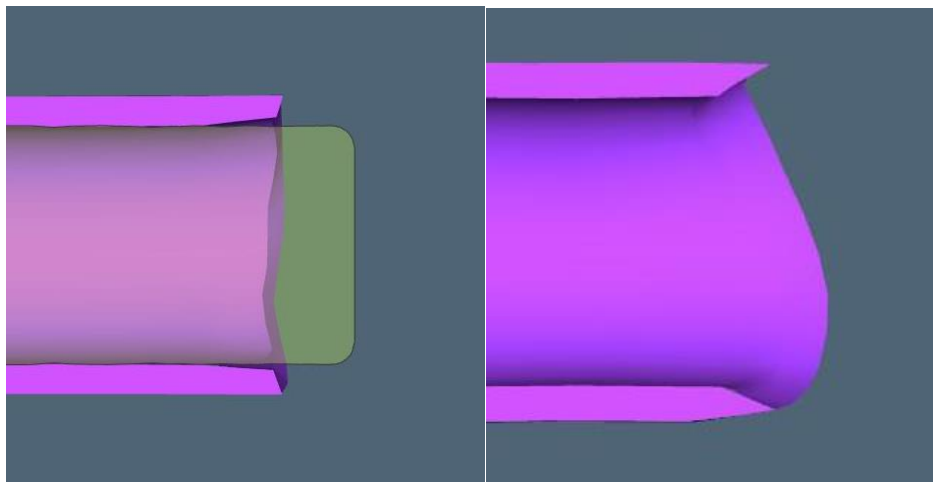


Figura 40. Extremo de tubo simulado, izquierda sin anisotropía, derecha con anisotropía.

Se debe destacar que se observó diferencias entre los extremos de los tubos dependiendo del uso de un material con y sin anisotropía (fig. 40)

En base a las simulaciones realizadas planteando como variable la curva de flujo de material, los resultados de carga y daño muestran que la capacidad de simular este proceso de forma efectiva depende en gran medida del modelo de curva de flujo con la que se describe al material. En el caso de laminación de tubos por paso peregrino donde se somete al material a un estado de tensiones complejo y las velocidades de deformación varían ampliamente, es necesario considerar esto a la hora de realizar ensayos para determinar la curva de flujo del material. Desde este trabajo se puede determinar que modelos de curvas que usen como variables independientes la deformación plástica o la velocidad de deformación por separado, no se llega a resultados que se puedan contrastar de forma efectiva con lo observado en los procesos reales.

El efecto de la curva de flujo sobre el daño no permitió relacionar la distribución del mismo sobre los tubos simulados con el factor Q , a pesar de que estos últimos tienen valores aceptables.

El material Zircaloy 4 de la base de datos del software resultó no ser adecuado para su uso en simulaciones de laminación por paso peregrino, además de no contar con referencias sobre su origen, para obtener información como, por ejemplo, el tratamiento térmico previo del material para la obtención de las curvas de flujo.

Simulaciones de Trefilado de tubos

Cargas de trefilado

Las cargas de trefilado se obtuvieron mediante el software considerando las mismas como las cargas en la dirección Z sobre la mordaza.

En la figura 40, se observan las curvas de carga obtenidas con una matriz de ángulo de 22° . En todas las simulaciones se obtuvieron patrones de curvas similares en donde se pueden observar distintos estadios del proceso. Tomando como ejemplo la curva de cargas de trefilado de la simulación de Reducción de 15% (celeste), se observa cómo se hay un aumento de cargas hasta una meseta donde no hay una gran variación en los valores. El aumento de carga corresponde al inicio de deformaciones en el tubo con la matriz y al aumento de fricción con el mandril debido a su mayor contacto con el mismo. El valor de cargas alcanza determinado valor en el cual la suma de fuerzas en el conjunto mordaza, mandril y matriz es igual a cero y se logra el estado estacionario del proceso.

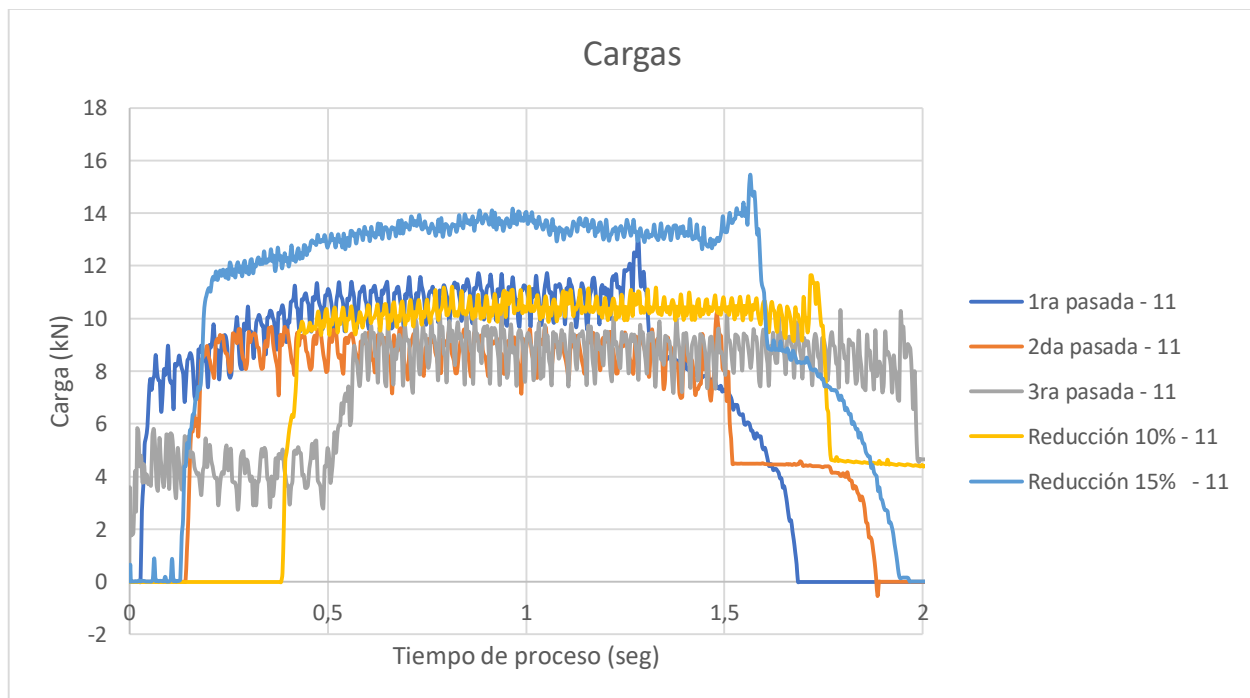


Figura 40. Cargas de trefilado de las simulaciones realizadas con un valor de $\alpha = 11^\circ$.

En el caso de la curva de la simulación de la tercera pasada de trefilado del tubo (gris), al comienzo de la misma se observan una meseta previa, el origen de la misma se debe a que la tercera pasada necesito una simulación previa para introducir el tubo en la matriz de dicha etapa. Realizada la simulación de introducción del tubo se realizó la simulación de trefilado acoplando la mordaza al extremo obtenido por delante de la matriz. Las curvas de carga de trefilado presentan similitud con las obtenidas mediante medición con una celda de carga por Boutenel [33]

Para el análisis y comparación de cargas de trefilado se calculó el promedio de cada meseta y la desviación. Los resultados obtenidos se observan en la tabla 13.

Cargas promedio de simulación (kN)						
Simulación	5°		8°		11°	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
1ra Pasada	12,25	0,27	8,16	0,72	10,30	1,01
2da Pasada	9,33	0,17	7,98	0,37	8,86	0,53
3ra Pasada	8,33	0,28	8,30	0,60	8,84	0,70
10% Red.	26,96	0,65	11,26	0,73	10,02	1,22
15% Red.	28,12	---	24,67	0,67	13,15	0,60

Tabla 13. Valores promedios y desviación de cargas de trefilado obtenidos de las simulaciones correspondientes

La simulación de reducción de 15% con $\alpha=5^\circ$ no se completó debido a que se produjo la fluencia del material. El valor de carga mostrado en la tabla 13 corresponde con el valor máximo, este aumento de carga se debe a que a menor ángulo de matriz es mayor la fuerza de fricción entre el tubo con el mandril y la matriz.

Del cálculo teórico de las cargas de trefilado se obtuvieron los valores de la tabla 14, en la misma esta la diferencia con los valores correspondientes a las simulaciones.

Se observa una diferencia que varía desde el 38% al 168%, esta diferencia se atribuye a que el modelo planteado para el cálculo de la carga considera deformación plástica ideal del material y no realiza ninguna estimación sobre el trabajo redundante durante la deformación. En la figura 41 se observa como con un semiángulo de 8° se obtienen valores menores de carga, salvo por las simulaciones de 15% de reducción, esto tiene buena relación con lo planteado por Boutenel [33], siendo que 8° es el semiángulo recomendado para trefilado de aluminio [10] y que este mínimo de cargas está relacionado a un mínimo de la suma de trabajos de deformación plástica, redundante y por fricción.

Cargas promedio de simulación (kN)				Diferencias entre cargas calculadas y medidas (kN)		
Simulación	5°	8°	11°	5°	8°	11°
1ra Pasada	5,95	4,79	4,26	106%	70%	142%
2da Pasada	5,50	4,42	3,92	70%	81%	126%
3ra Pasada	5,83	4,68	4,16	43%	77%	113%
10% Red.	10,06	8,15	7,25	168%	38%	38%
15% Red.	13,73	11,19	9,99		121%	32%

Tabla 14. Valores de carga de trefilación teóricos y diferencia con los valores obtenidos de las simulaciones.

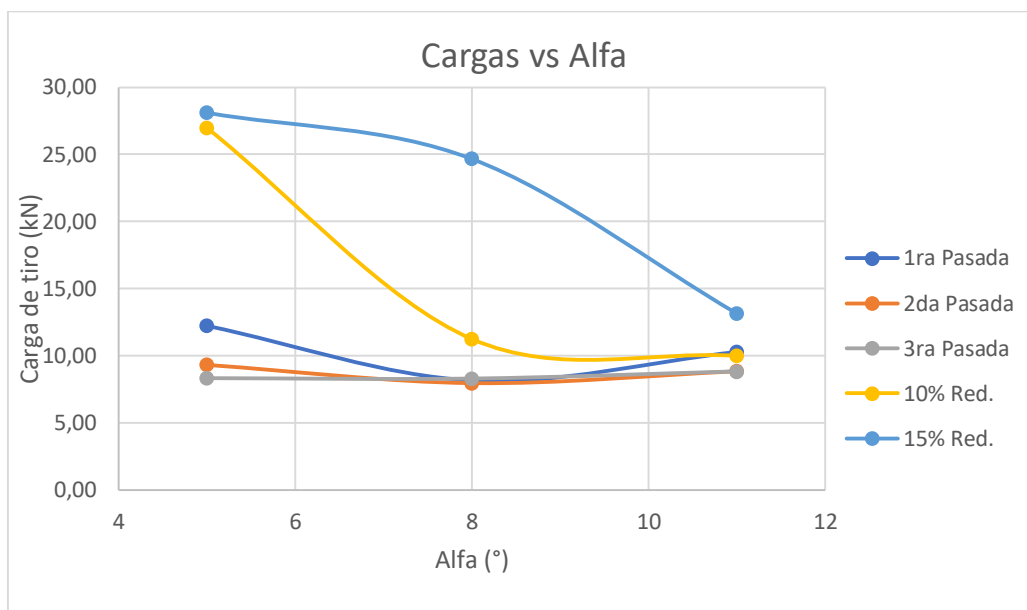


Figura 41. Cargas de trefilación de las simulaciones en función del semiángulo de la matriz.

La fluctuación de la carga, observada en la fig.40, se puede asociar un aumento con el semiángulo de la matriz (fig. 40). Esta desviación de valores al ser grande se puede manifestar en el proceso real como un avance anormal/inestable del carro de trefilado.

Tensiones residuales

Se midieron las tensiones residuales circunferenciales y longitudinales en el espesor de los tubos simulados.

Tensiones Circunferen. (MPa)	5°		8°		11°	
	Sup. Interna	Sup. Externa	Sup. Interna	Sup. Externa	Sup. Interna	Sup. Externa
2da pasada	-27,9	120,2	-111,8	130,5	-127,7	169,9
3ra pasada	-34,7	124,4	-112,9	141,7	-156,0	173,9
10% Red.	-22,4	13,3	-34,7	104,4	-32,6	121,0
15% Red.			-34,1	35,5	-41,9	94,3

Tabla 15. Tensiones circunferenciales de los tubos simulados.

Tensiones Longitudinal. (MPa)	5°		8°		11°	
	Sup. Interna	Sup. Externa	Sup. Interna	Sup. Externa	Sup. Interna	Sup. Externa
2da pasada	-83,1	218,1	-278,5	248,3	-288,2	266,2
3ra pasada	-92,1	226,0	-292,4	266,8	-308,6	260,3
10% Red.	-46,4	27,7	-92,4	182,1	-89,3	223,5
15% Red.			-76,1	50,8	-115,7	162,4

Tabla 16. Tensiones longitudinales de los tubos simulados.

De las medidas hechas resalta el caso de las simulaciones de reducción de 10% con 5° y 15% con 8°, las cuales tienen los valores de tensiones más bajos.

Las figuras 42 a 45 muestran los perfiles de las tensiones residuales longitudinales y circunferenciales obtenidos de las simulaciones. Se graficó en base a posiciones relativas en el espesor, donde 0 representa la superficie interior del tubo. Los perfiles de tensiones son similares a los obtenidos mediante simulación por Palkowski [34]. Se observa que las tensiones residuales más bajas corresponden a las simulaciones de 10% de reducción con 5° de matriz (amarillo) y 15% de reducción con 8° de matriz (gris).

De todo proceso de deformación en frío se busca que las tensiones residuales sean de compresión, y en el caso que sean de tracción lo más bajas posibles para evitar la propagación de fisuras. En caso de que las tensiones residuales sean de tracción y de un valor considerable, es necesario someter a la pieza conformada a un tratamiento térmico de relevado de tensiones.

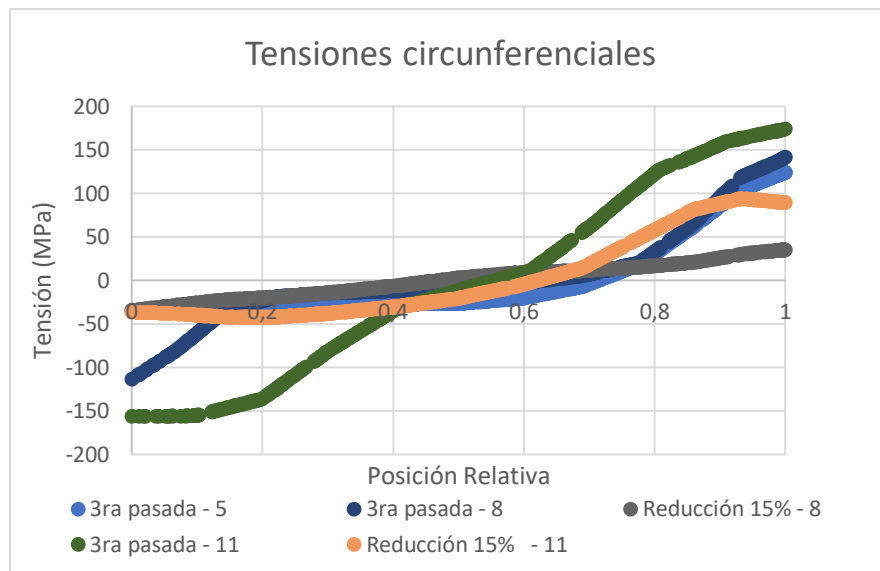


Figura 42. Tensiones Residuales circunferenciales de las simulaciones de 15% de reducción y 3 pasadas de trefilado.

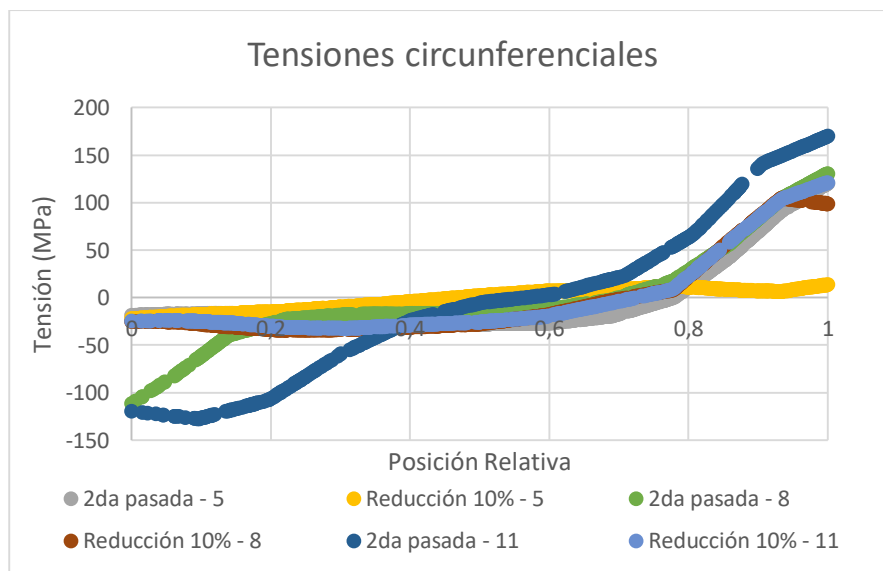


Figura 43. Tensiones Residuales circunferenciales de las simulaciones de 10% de reducción y 2 pasadas de trefilado.

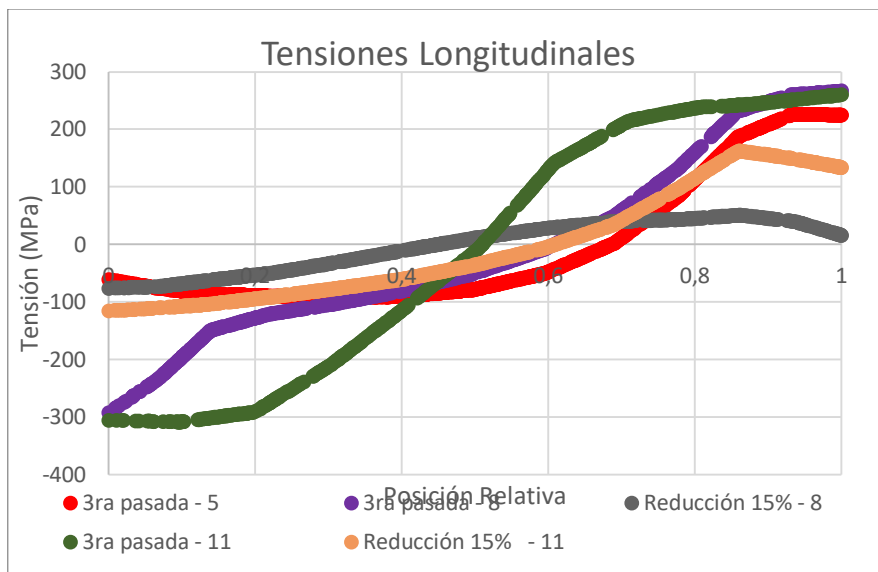


Figura 44. Tensiones Residuales longitudinales de las simulaciones de 15% de reducción y 3 pasadas de trefilado.

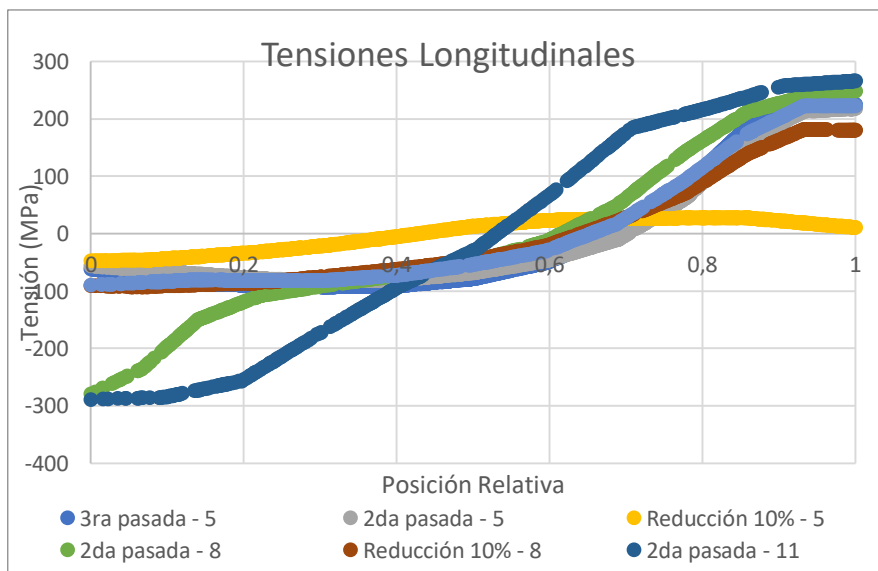


Figura 45. Tensiones Residuales longitudinales de las simulaciones de 12% de reducción y 2 pasadas de trefilado.

Daño

Los valores de daño fueron tomados de las superficies internas y externas de los tubos simulados, que fue donde presento mayores valores.

Daño máximo			
Simulación	5°	8°	11°
2da pasada	0,10/0,07	0,14/0,12	0,15/0,11
3ra pasada	0,15/0,11	0,21/0,15	0,25/0,22
10% Red.	0,05/0,09	0,09/0,13	0,13/0,12
15% Red.	----	0,10/0,11	0,14/0,18

Tabla 17. Valores de daño obtenidos de las simulaciones, valor en la superficie interna / superficie externa.

Los valores mínimos se obtuvieron en las simulaciones de 10% de reducción con 5° de matriz y 15% de reducción con 8° de matriz.

Si bien los valores de daño obtenido sobre los tubos resultados de las simulaciones no superan el límite de 0.32, lo que estaría asociado a la formación de fisuras, se debe considerar que también puede describir la probabilidad de incidencia de defectos superficiales. En el caso del tubo obtenido con la simulación de 15% de reducción con $\alpha=11^\circ$ (fig.46), se observó una distribución daño en forma de anillos sobre la superficie externa e interna del tubo. Esta distribución es muy similar al bulging, el cual es un defecto superficial que se caracteriza por formar marcas circunferenciales completas.

Dado que el valor límite de daño fue definido en un ensayo de compresión, junto con la curva de flujo del material, solo se puede asociar dicho valor a fisuras. De ser posible el uso del mismo material en una experiencia de trefilado de tubos con las dimensiones o reducciones planteadas en este trabajo, se podría definir intervalos de daño menores correspondientes a defectos superficiales como ser el observado en la figura 47, que es el bulging obtenido en una práctica de trefilado de Zircaloy 4.

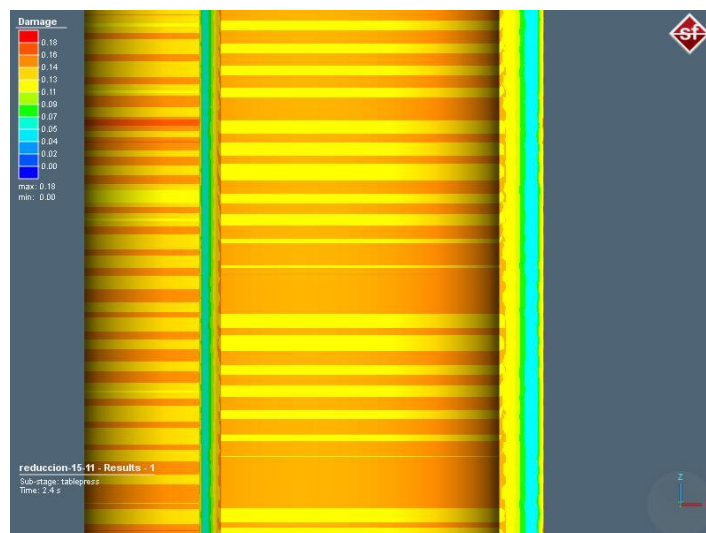


Figura 46. Imagen de la distribución de daño en el tubo obtenido con la simulación de 15% de reducción con 11° de semiángulo de matriz.



Figura 47. Bulging en tubo de Zircaloy 4 trefilado.

Dimensiones finales

Los valores obtenidos de diámetros y espesores de las simulaciones se encuentran en la tabla 18. El error que se puede considerar debido a la obtención de los valores con el software es de 0.001 mm. En las simulaciones $\alpha=11^\circ$, se podían percibir ciertas variaciones en los diámetros externos debido a que en las zonas de mayor daño que se observan en la figura 46, el diámetro es menor difieren en promedio 0.005 mm.

	5°		8°		11°	
Simulación	Diametro Ext (mm)	Espesor (mm)	Diametro Ext (mm)	Espesor (mm)	Diametro Ext (mm)	Espesor (mm)
2da pasada	24,496	2,380	24,496	2,380	24,464	2,358
3ra pasada	23,992	2,307	23,980	2,301	23,940	2,276
Reducción de 10%	24,506	2,383	24,496	2,380	24,478	2,371
Reducción de 15%	---	---	24.000	2,310	23,994	2,308

Tabla 18. Dimensiones de tubos obtenidos en las simulaciones

Las dimensiones alcanzadas con las matrices con semiángulo de 5° y 8° son bastantes cercanas a las deseadas, especialmente las obtenidas con $\alpha=8^\circ$. En el caso de las matrices de 11° los diámetros son menores y a esto se suma el hecho de las variaciones de diámetro.

En base a los resultados obtenidos de daño y tensiones residuales se puede determinar que los mejores parámetros para el trefilado de tubos de aluminio con reducciones de 10 y 15 %, son con matrices de 5° y 8° de semiángulo respectivamente, en una única pasada. El trefilado con una matriz de semiángulo de 11° no está recomendado debido a que no se alcanza de forma precisa las dimensiones finales.

En el caso que la limitación sea la capacidad operativa de la trefiladora, (fuerzas de tiro menores a 20 kN) se pueden usar las opciones de varias pasadas de trefilado de los tubos con ambos

semiángulos de matriz (5° y 8°), pero es necesario un tratamiento térmico de relevado de tensiones en ambas opciones. En el caso del uso de una matriz de $\alpha=8^\circ$ puede ser necesario pruebas de trefilado previas, debido a los valores de daño obtenidos en las simulaciones que, si bien no se acercan a valores de predicción de fisuras, podrían describir defectos superficiales como marcas.

CONCLUSIONES

1. Este trabajo fue útil para conocer la metodología, información y conocimientos necesarios para el planteo y la configuración de simulaciones de procesos de conformado metálico.
2. Los trabajos previos de J. Manelli y F. Cornacchiulo brindaron información importante sobre la trabajabilidad del Zircaloy 4 y las condiciones de lubricación del material durante su procesamiento que fueron utilizados para las configuraciones de las simulaciones realizadas.
3. Modelos de curvas de flujo basadas únicamente en deformación plástica y velocidad de deformación no son suficientes para definir el Zircaloy 4, para su procesamiento por laminación por paso peregrino.
4. Para determinar una curva de flujo para Zircaloy 4 es necesario considerar ensayos a distintas velocidades de deformación y un modelo de curva que contemple dependencia con ambas variables puede ser óptimo para en este proceso, debido a dos cuestiones: el endurecimiento del Zircaloy 4 con la deformación y las distintas velocidades de deformación a las que se somete el material durante el proceso.
5. A pesar de no poder analizar eficientemente los efectos de anisotropía impuesta con el modelo Hill 48 y el daño que se produce, según el modelo de Latham-Cockcroft, en laminación por paso peregrino se puede determinar que ambos modelos tienen una fuerte dependencia con la curva de flujo del material definida.
6. Los resultados obtenidos de las simulaciones de laminación por paso peregrino mostraron valores aproximados, en cuanto a cargas de laminación y dimensiones finales. La capacidad de simular este proceso con este material y el uso de Simufact Forming está demostrada con los trabajos de [29] [31], pero es crítica la descripción adecuada del material
7. La simulación de ensayos para verificar la configuración del material permite conocer fácilmente si existe correlación con la realidad.
8. El uso de una curva de flujo para aluminio 7075 T0 [26] permite obtener resultados de simulaciones que son comparables con valores teóricos y poder evaluar la factibilidad de un proceso según los parámetros elegidos.
9. El análisis de daño durante las simulaciones de trefilado de tubos de aluminio 7075 T0, mostró un patrón que puede estar relacionado con un defecto. Para su correcta asociación es necesario la prueba a escala real del proceso simulado.

REFERENCIAS

- [1] - Simulación de Procesos. EcuRed. (2019). <https://www.ecured.cu/>
- [2] - Introducing cold pilger mill technology. (2016, 11 Julio). The FABRICATOR. <https://www.thefabricator.com>
- [3] - Stapleton G., Cold Pilger Technology, 1996.
- [4] - Duhalde J.C, Diseño de herramental para la laminación en frío de tubos de Zry, 1995.
- [5] - Gurao, N.P., Akhiani H., y Szpunar J.A. (2014). Pilgering of Zircaloy-4: Experiments and simulations. Journal of Nuclear Materials (453), pp. 158-168.
- [6] - Abe, H., & Furugen, M. (2012). Method of evaluating workability in cold pilgering. Journal of Materials Processing Technology, 212(8), 1687–1693. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.012>
- [7] - E. Siebel and F.W. Neumann, Das kaltpilgern von Rohren Versuchsergebnisse und Untersuchungen über dem Walzvorgang, Stahl und Eisen, 74, 3 (1954) 139-145
- [8] - Torres, J. (2018b, Mayo 25). Trefilado: Proceso, Tipos y Aplicaciones. Lifeder. <https://www.lifeder.com/trefilado>
- [9] - Newbury, B. D. (2004, Febrero). The history and evolution of wiredrawing techniques. Academia. <https://www.academia.edu>
- [10] - Lancestremere, J.C. Mareglia, J. Barr (2004), “Fundamentos de la trafilación”, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, Argentina.
- [11] – G. E. Dieter et al. Handbook of workability and process design. 2003 ASM International. www.asminternational.org Pág. 278. Matriz de trefilado [Grafico]. DOI:10.1361/hwprd2003p278
- [12] - Teoría de trefilado. (2017). <https://cadcamiutjaa.files.wordpress.com>
- [13] - Kalpakjian, S. R. Schmid, (2008), “Manufactura, ingeniería y tecnología”, Monterrey, México, Ed. Pearson.
- [14] - Tube drawing principles. (2007, 13 Marzo). The Fabricator. <https://www.thefabricator.com>
- [15] - Dieter, G. (1986). Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Education.
- [16] - Análisis tribológico en procesos de deformación en frío: Laminación por paso peregrino y Trefilación de tubos sin costura, Franco Cornachiulo, 2019.
- [17] - P. Kumar, G. Agnihotri, Cold Drawing Process –A Review- International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) Vol. 3, Issue 3, May-Jun 2013, pp.988-994
- [18] - Andreas Öchsner, Marco Öchsner, 2018, A First Introduction to the Finite Element Analysis Program MSC Marc/Mentat, Springer International Publishing
- [19] - Control de procesos de laminación por paso peregrino: Evaluación de materia prima, material intermedio y lubricantes, Julian Manelli

- [20] - Hill, R. (1948). A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193 (1033), 281–297. doi:10.1098/rspa.1948.0045
- [21] - Manual de aplicaciones, Simufact Forming.
- [22] - M. G. Cockroft and D. J. Latham, “Ductility and the Workability of Metals,” *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 96, 1968, pp. 33-39.
- [23] - Kvačkaj, Tibor & Tiza, J. & Kováčová, Andrea & Kočíško, Robert & Bacso, J.. (2014). Determination of ductile fracture criteria for bulk and PM materials. *Kovove Materialy*. 52. 249-254. 10.4149/km_2014_5_249.
- [24] - Aubin, J. L., Girard, E., and Montmitonnet, E, "Modeling of Damage in Cold Pilgering," *Zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium*, ASTM STP 1245, A. M. Garde and E. R. Bradley, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994, pp. 245-263.
- [25] - Quan, G. Z., Wang, Y. X., Zhou, J., & Chen, B. (2010). A Study on Al-6061-T6 Tube Drawing Limit Based on Critical Damage Value. *Advanced Materials Research*, 102-104, 69–73. doi:10.4028/ www.scientific.net/amr .102-104.69
- [26] - Kvačkaj, T., Tiža, J., Bacsó, J., Kováčová, A., Kočíško, R., Pernis, R., Fedorčáková, M., & Purcz, P. (2014). Cockcroft-Latham Ductile Fracture Criteria for Non Ferrous Materials. *Materials Science Forum*, 782, 373-378. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.782.373>
- [27] - K. Osakada. Effects of Strain Rate and Temperature in Forming Processes of Metals. *Journal de Physique IV Colloque*, 1997, 07 (C3), pp.C3-XXXVII-C3-XLIV. ff10.1051/jp4:1997302ff. ffjpa-00255375
- [28] - E., Kuhn, H. A., & Semiatin, S. L. (2003). *Handbook of Workability and Process Design*. ASM International.
- [29] - Deng, S., Song, H., Zheng, C., Zhang, S., & Chu, L. (2018). A model to describe hardening behavior of Zircaloy-4 tube during cold pilgering process. *International Journal of Material Forming*, 12(2), 321-329. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1420-9>
- [30] - Gaihuan, Y., Baifeng, L., Lian, W., Linhua, C., & Qing, L. (2018). On the Pilger Rolling of Zr-4 Alloy: Finite Element Modeling and Plastic Deformation Behavior. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47(1), 82-88. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(18\)30076-6](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(18)30076-6)
- [31] - Zheng, C., Song, H., Deng, S., & Zhang, S. (2017). Force Analysis during cold pilgering process for Zircaloy tube by both experiments and 3D FE simulation. *Procedia Engineering*, 207, 2346-2351. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1006>
- [32] - Abe, H., Matsuda, K., Hama, T., Konishi, T., Furugen, M., (1994). Fabrication process of high nodular corrosion-resistant Zircaloy-2 tubing. *ASTM Spec. Tech. Publ.* (1245), pp. 285-306.
- [33] - Boutenel, F., Delhomme, M., Velay, V., & Boman, R. (2018). Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. *Comptes Rendus Mécanique*, 346(8), 665-677. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.06.005>

[34] - Palkowski, H., Brück, S., Pirling, T., & Carradò, A. (2013). Investigation on the Residual Stress State of Drawn Tubes by Numerical Simulation and Neutron Diffraction Analysis. *Materials*, 6(11), 5118-5130. <https://doi.org/10.3390/ma6115118>

ANEXO 1

Fiteo de curvas de ensayos de compresión de probetas de Zircaloy 4

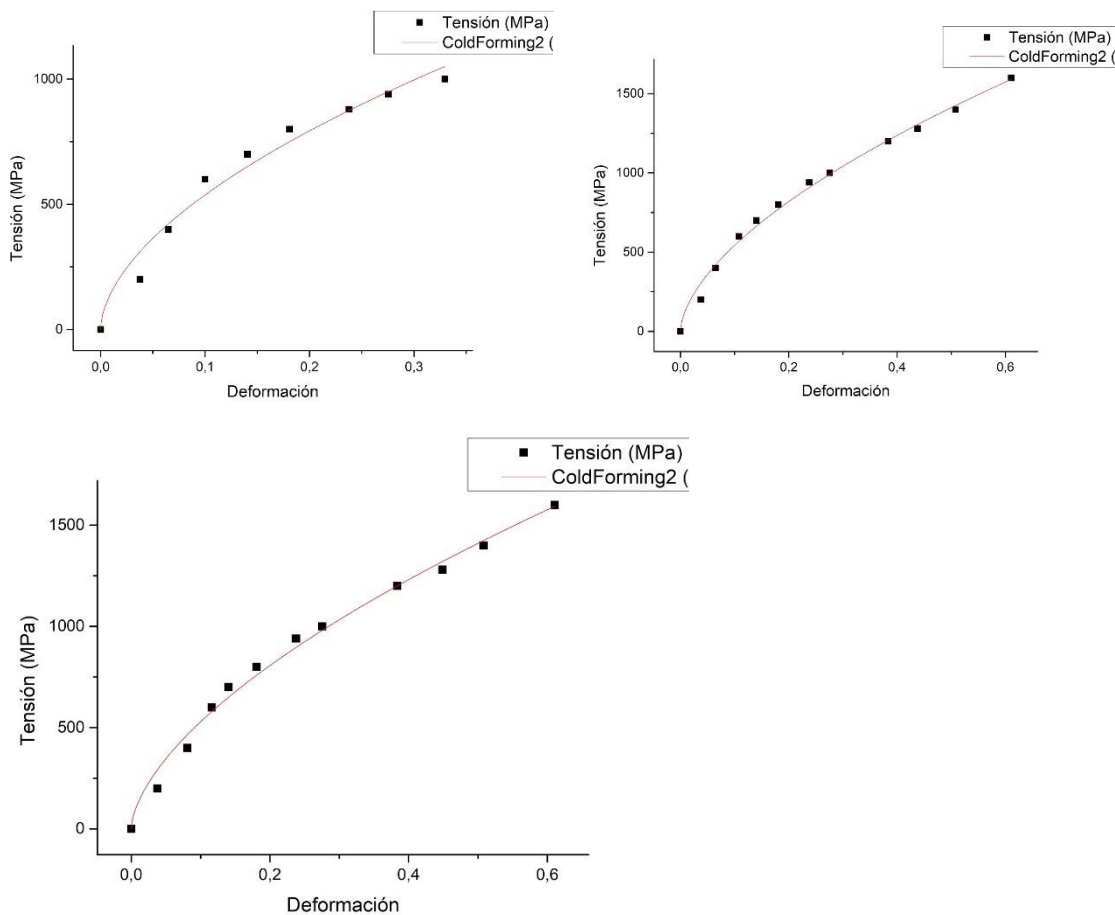
Se realizó el fiteo de las curvas del trabajo de J.Manelli según la expresión:

$$\sigma_F = C \varepsilon^n$$

Donde σ_F la tensión de fluencia luego de la deformación, C la tensión de fluencia sin deformación, ε la deformación real y n el coeficiente de endurecimiento por deformación.

C (Mpa)		n		
Valor	Error Estándar	Valor	Error Estándar	Adj.R ²
1961	183	0,56	0,06	0,9711
2132	55	0,59	0,02	0,99297
2153	64	0,61	0,03	0,99093

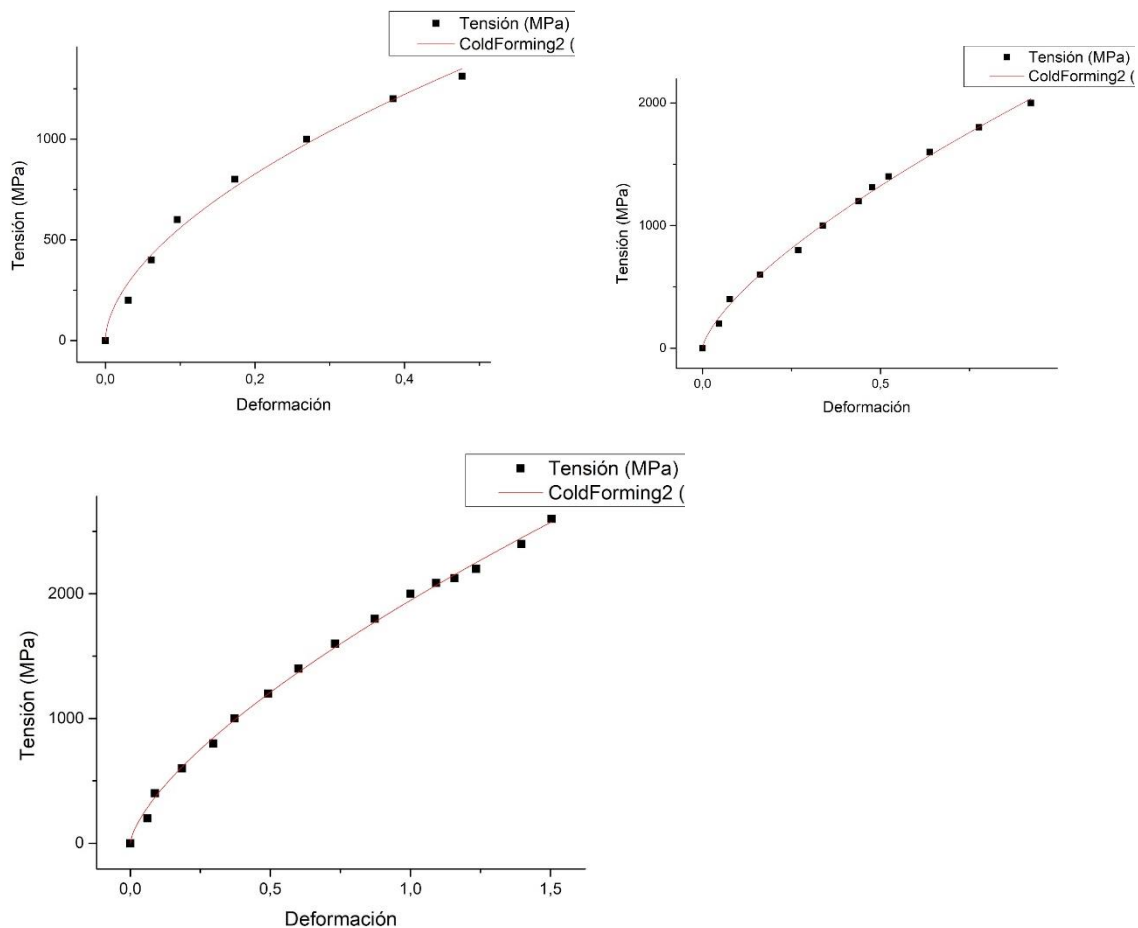
Tabla 13. Valores obtenidos del fiteo de las curvas correspondientes a los ensayos de probetas circunferenciales.



Figuras 46. Curvas de datos y fiteos de los ensayos de compresión de probetas circunferenciales. En orden Probetas 1, 2 y 3.

C (Mpa)		n		
Valor	Error Estándar	Valor	Error Estándar	Adj.R ²
2049	98	0,56	0,04	0,9892
2152	27	0,70	0,02	0,99708
1947	12	0,69	0,01	0,99763

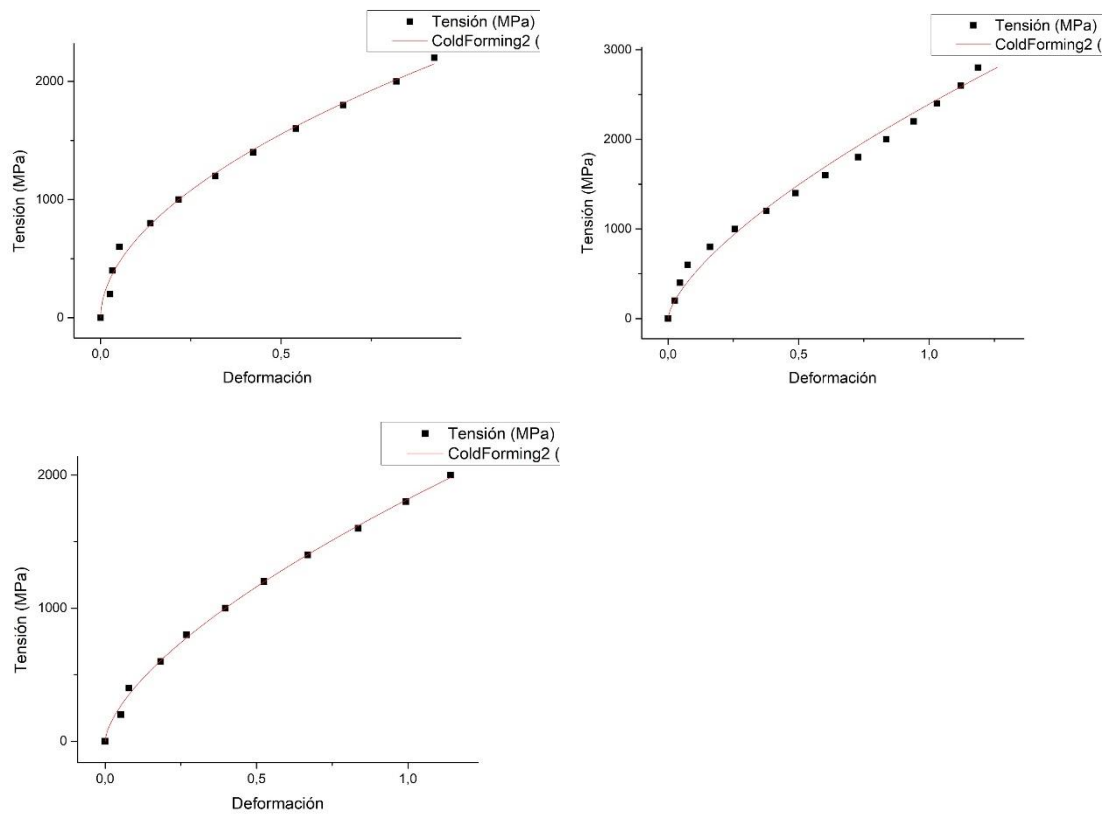
Tabla 14. Valores obtenidos del fiteo de las curvas correspondientes a los ensayos de probetas transversales.



Figuras 47. Curvas de datos y fiteos de los ensayos de compresión de probetas transversales. En orden Probetas 4, 5 y 6.

C (Mpa)		n		
Valor	Error Estándar	Valor	Error Estándar	Adj.R ²
2239	42	0,53	0,02	0,99263
2393	39	0,68	0,04	0,98668
1819	17	0,65	0,02	0,99779

Tabla 15. Valores obtenidos del fiteo de las curvas correspondientes a los ensayos de probetas radiales.



Figuras 48. Curvas de datos y fiteos de los ensayos de compresión de probetas radiales. En orden Probetas 7, 8 y 9.