

MODELADO VISCOELÁSTICO DEL PVC PARA ANÁLISIS DE FORMADO EN CALIENTE DE TUBERÍAS (CAMPANEO)

Ing. Guido Quesada, MSc.

Uno de los más importantes logros del Centro de Ingeniería Asistida por Computadora en TERRAMIX S.A. ha sido la capacidad para llevar a cabo una simulación bastante confiable del proceso de campaneado por formado en caliente de tuberías PVC para la fabricación de juntas de tubería, en particular para sistema de empaques de hule tipo Rieber. Mediante las técnicas desarrolladas es posible determinar el perfil de la campana, incluyendo el nicho que se forma alrededor del empaque. Entre los diversos resultados que pueden ser cuantificados están la contracción de la campana luego del formado en caliente, radios de curvatura del perfil, reducción en el espesor de pared de la tubería en la campana, e interferencia de ensamble entre la campana y el empaque.

Este modelado requiere la consideración del comportamiento viscoelástico del PVC, el cual es fundamentalmente elástico a temperatura ambiente y se vuelve más viscoso a medida que aumenta la temperatura. Además requiere otras consideraciones propias del análisis estructural no lineal, como la variación de condiciones en el tiempo, las interacciones de contacto con fricción y el comportamiento hiperelástico del hule.

Actualmente los resultados se usan solamente para determinar dimensiones de campanas y proseguir análisis posteriores, como ensamble de las juntas, pruebas hidrostáticas y simulaciones de las condiciones de operación de la tubería. También se podría usar esta técnica para simular la operación de las máquinas campaneadoras y determinar sus parámetros de operación, como por ejemplo la fuerza requerida para empujar el tubo contra el mandril de formado.

Otras aplicaciones, fuera del campo de interés de TERRAMIX, son operaciones similares de formado en caliente, como campaneado de otros tipos de juntas y tuberías,

termoformado y simulación de condiciones de operación a temperaturas cercanas al punto de transición vítrea.

El objetivo de este reporte técnico es documentar las técnicas que han sido implementadas hasta el momento, su fundamento teórico, su estado actual y los puntos de mejoramiento. En este sentido, el aspecto más importante para mayores desarrollos es la determinación de los parámetros y propiedades de materiales aplicables a cada caso de diseño. Entre estos parámetros se incluyen por ejemplo los coeficientes de series de Prony a la temperatura de transición vítrea.

Descripción del proceso de campaneado

Campaneado es el proceso mediante el cual se forma en caliente una campana en un extremo de un tubo extruido de material plástico, típicamente PVC. En el caso particular del sistema Rieber, la campana se forma alrededor de un empaque de hule con un anillo de refuerzo metálico, el cual queda atrapado dentro de la campana.

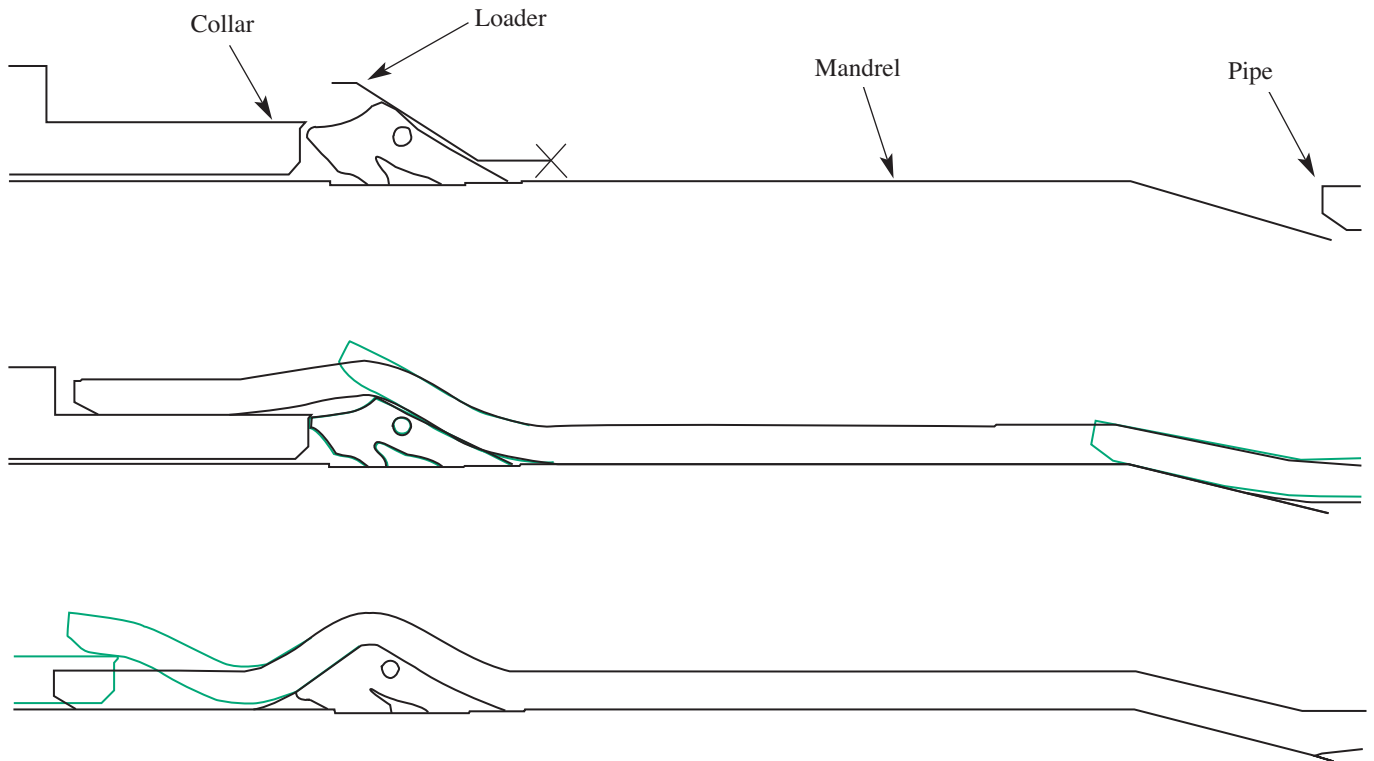
Para hacer esto, el empaque se monta sobre un mandril de acero y se sostiene en posición mediante un collar u otro dispositivo mecánico. El tubo de plástico se calienta hasta una temperatura cercana a la de transición vítrea (se vuelve suave y huloso, aunque no líquido viscoso), luego se forma contra el mandril y el empaque. Típicamente se aplica vacío o presión externa en la región del empaque para obligar al tubo suavizado a copiar el contorno del empaque de la manera más cercana posible. Finalmente se enfría la campana hasta una temperatura lo

suficientemente por debajo de la transición vítrea, de modo que el tubo pierde su comportamiento viscoelástico, y recupera su comportamiento esencialmente elástico manteniendo la forma adquirida en el proceso. La Figura 1 muestra gráficamente los pasos del proceso de campaneo.

Consideraciones generales del modelo viscoelástico

Como polímero, el PVC es un material amorfo, el cual no exhibe una temperatura de fusión. En vez de eso, las propiedades

mecánicas experimentan una transición gradual desde un comportamiento sólido hasta un comportamiento líquido. El punto de referencia de esta transición se conoce como temperatura de transición vítrea T_g . Para PVC, la temperatura de transición vítrea se encuentra alrededor de los 90°C . A temperatura ambiente el PVC se encuentra muy por debajo de esta temperatura, por lo tanto se comporta mayoritariamente como un sólido, obedeciendo la relación esfuerzo-deformación de Young. El PVC de hecho experimenta fluencia viscosa o relajación de esfuerzos a temperatura ambiente, dado el suficiente tiempo, pero este proceso toma



c) Se remueve el collar, se aplica presión externa o vacío y se enfría el tubo hasta una temperatura intermedia, a la cual ya



d) Se remueve el mandril y se enfría el tubo hasta temperatura ambiente.

FIGURA 1. Pasos del proceso de campaneo en el sistema Rieber.

miles de horas y se puede considerar despreciable en la mayoría de los casos de diseño.

A medida que el PVC se aproxima a la temperatura de transición vítrea, empieza a comportarse más como un elastómero, con un módulo de elasticidad mucho más bajo, mayor tolerancia a la deformación, buena recuperación elástica y una relajación de esfuerzos relativamente rápida hasta un estado que sigue siendo elástico, no plástico, es decir la deformación no es permanente. Más allá de la temperatura de transición vítrea, se convierte gradualmente en un fluido superenfriado, el cual exhibe una elasticidad instantánea o aparente, pero es capaz de relajarse o fluir indefinidamente en forma viscosa. A medida que sigue aumentando la temperatura, el comportamiento elástico llega a desvanecerse y el material se comporta completamente con un fluido viscoso.

Para efectos de campaneado, el PVC se calienta cerca pero debajo de la temperatura de transición vítrea. A esta temperatura, puede ser fácilmente manipulado como un sólido, pero también deformado hasta obtener la forma de la campana. Cuando el material se enfría, la viscosidad y el módulo de elasticidad recuperan sus valores originales a temperatura ambiente. Si la deformación se sostiene mediante un mandril o un molde mientras el material se enfría, la forma adquirida quedará, por así decirlo, congelada bajo el efecto de la alta viscosidad a baja temperatura.

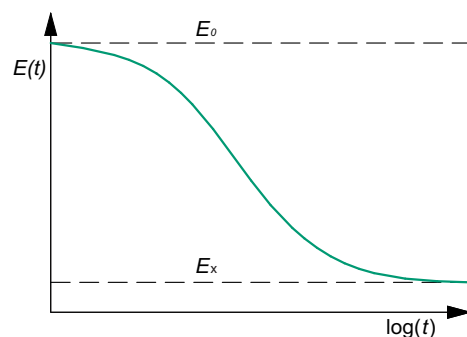


FIGURA 2. Relajación del módulo de elasticidad a través del tiempo.

Vale la pena notar que durante este proceso, el monto de deformación plástica o permanente es bastante bajo, incluso despreciable. Si el tubo se calienta otra vez, la viscosidad volverá a disminuir, liberando casi totalmente el perfil original del tubo. Esto es lo que se conoce como la “memoria” del PVC.

A fin de modelar este comportamiento, es necesario usar un modelo viscoelástico. Este modelo combina el comportamiento elástico inicial o instantáneo, con un módulo de elasticidad E_0 relativamente alto, y un comportamiento viscoso que permite una relajación de esfuerzos a través del tiempo hasta un módulo de elasticidad E_∞ mucho más bajo, como se muestra en la Figura 2.

El efecto de la temperatura es una reducción en el módulo de elasticidad, pero también un corrimiento de la curva de relajación viscosa en la escala logarítmica de tiempo. A temperaturas más altas la curva se correrá hacia la izquierda, de modo que la relajación ocurre más rápido, y viceversa. Nótese que este comportamiento se verifica solamente cerca de la temperatura de transición viscosa. A temperatura ambiente el comportamiento viscoso se desvanece y el PVC se modela mejor como un sólido elástico (a menos que se estudien efectos a largo plazo), mientras que a temperaturas de inyección el comportamiento elástico se desvanece y el PVC se modela mejor como un fluido viscoso.

Ecuaciones básicas del modelo viscoelástico

Modelo de elasticidad lineal isotrópica

Aunque la orientación de los polímeros puede tener un efecto significativo sobre las propiedades del material, el modelo elástico lineal isotrópico normalmente es suficiente para efectos de PVC y campaneado. Podría ser necesario un modelado ortotrópico o anisotrópico solamente si existiera un significativo alineamiento de las cadenas de polímeros en una dirección particular (por ejemplo en tubos que son extruidos a un

diámetro pequeño y luego expandidos a su diámetro definitivo). Por lo tanto, la relación general de esfuerzo-deformación se puede escribir como:

$$\sigma = \mathbf{E} \varepsilon \quad [1]$$

Donde σ es el vector de esfuerzo, ε es el vector de deformación y \mathbf{E} es la matriz de rigidez del material, incluyendo términos del módulo de elasticidad E y el módulo de Poisson ν , los cuales a su vez son dependientes de la temperatura (para ser más formales, σ , ε , \mathbf{E} deberían ser denominados tensores, en vez de vectores y matrices).

Como datos de entrada para efectos de Análisis por Elementos Finitos (AEF), se toman valores de E y ν para al menos dos temperaturas diferentes (por ejemplo a 23°C y a 60°C) en la zona de comportamiento elástico, a fin de que el sistema de análisis por elementos finitos utilizado pueda interpolar entre ellas.

Una relación esfuerzo-deformación más general en forma tensorial es preferida para efectos de análisis por elementos finitos, a fin de poder agregar el comportamiento viscoelástico:

$$\sigma = 2G \mathbf{e} + \mathbf{I} K \phi \quad [2]$$

Donde G es el módulo de cortante, \mathbf{e} es el tensor de deformación deviatorica, \mathbf{I} es el tensor identidad, K es el módulo de volumétrico y ϕ la deformación volumétrica. Las propiedades del material están relacionadas de la siguiente manera:

$$E = 9GK/(3K+G) \quad [3a]$$

$$\nu = (3K-2G)/(6K-2G) \quad [3b]$$

Nótese que el comportamiento elástico lineal desprecia el efecto del tiempo, tanto para efectos de inercia (se considera estado estático o cuasiestático) como para efectos viscosos. Por ejemplo, efectos a largo plazo, como cedencia y relajación viscosa, son ignorados.

Modelo viscoelástico lineal isotrópico

A fin de tomar en cuenta los efectos del tiempo, la variable tiempo debe ser introducida en el modelo elástico lineal básico. En comportamiento viscoelástico,

los esfuerzos dependen no solamente de las deformación actuales, sino también de cuanto tiempo tomó desarrollarlas, o durante cuánto tiempo han estado presentes, incluso cómo han cambiado a través del tiempo (historia en el tiempo). Varios aspectos dependientes del tiempo en el comportamiento viscoelástico pueden ser reconocidos con cierta facilidad:

Comportamiento inmediato: a fin de producir deformaciones inmediatas, deben generarse esfuerzos relativamente grandes.

Comportamiento a largo plazo: se manifiesta de dos maneras diferentes aunque intrínsecamente relacionadas. **Fluencia:** si se mantiene constante cierto nivel de esfuerzo, eventualmente se desarrollarán deformaciones relativamente grandes, dado suficiente tiempo. **Relajación:** si se mantiene constante cierto nivel de deformación, el nivel de esfuerzo decaerá en el tiempo, desde el valor generado por el comportamiento inmediato hasta un valor inferior.

En el caso general, esfuerzo y deformación no se aplican inmediatamente, ni se mantienen constantes, sino que cambian con el tiempo, a medida que evolucionan las condiciones de carga o a medida que se lleva a cabo el proceso de manufactura. Por lo tanto el comportamiento inmediato y el comportamiento a largo plazo deben estar inmersos en una formulación hereditaria integral:

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G(\tau - \tau') \frac{d\mathbf{e}}{dt'} dt' + I \int_0^t K(\tau - \tau') \frac{d\phi}{dt'} dt' \quad [4]$$

donde τ es el tiempo reducido (por efecto de la temperatura), evaluado en un tiempo t que es el tiempo presente, y τ' es el tiempo reducido evaluado en un tiempo t' que es una variable de integración. Para calcular el tiempo reducido por efecto de temperatura, se utiliza la siguiente función de desplazamiento o corrimiento del tiempo:

$$\tau = \int_0^t \frac{dt'}{A_\theta(\theta(t'))} \quad [5]$$

donde θ es la temperatura y A_θ es la función de corrimiento. Por ejemplo, si $A_\theta = 1$, $\tau = t$,

esto significa que si no hay cambio en la temperatura (con respecto a la temperatura alrededor de la cual se evalúa A_θ), no hay corrimiento en el tiempo. A fin de cuentas, el efecto general de la función de corrimiento es este: a mayor temperatura, la relajación o la fluencia ocurren más rápido.

La función de corrimiento usada es la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF), que tiene la siguiente forma:

$$-\log(A_\theta) = \frac{C_1(\theta - \theta_0)}{C_2 + (\theta - \theta_0)} \quad [6]$$

Donde θ_0 es una temperatura de referencia, típicamente igual a la temperatura de transición vítrea θ_g , C_1 y C_2 son constantes, las cuales varían ligeramente de un polímero a otro. Nótese que a medida que la temperatura θ se aproxima al valor $\theta_g - C_2$, la función de corrimiento tiende a cero, y el tiempo efectivo de relajación tiende a infinito. Por debajo de esta temperatura, la ecuación WLF no es válida. A fin de lidiar con esta singularidad matemática, para temperaturas $\theta \leq \theta_g - C_2$, se acostumbra descartar el modelo viscoelástico y el modelo se vuelve totalmente elástico.

Las funciones de relajación que se usan para expresar la variación de los módulos de cortante y volumétrico G y K con respecto al tiempo se basan en una serie normalizada de exponenciales, conocida como la serie de Prony:

$$G(t) = G_0 \left(g_\infty + \sum_{i=1}^n g_i e^{-t/\tau_i} \right) \quad [7a]$$

$$K(t) = K_0 \left(k_\infty + \sum_{i=1}^n k_i e^{-t/\tau_i} \right) \quad [7b]$$

Donde g_i y k_i son los módulos relativos de cada término i . Nótese que, por ser una serie normalizada, $g_\infty = 1 - \sum g_i$ y $k_\infty = 1 - \sum k_i$. Por lo tanto, dependiendo del sistema de análisis por elementos finitos, g_∞ y k_∞ podrían no ser requeridas como datos de entrada; τ_i son los tiempos de relajación correspondientes a cada término i y n es el número de términos utilizado.

Las funciones de relajación del módulo de cortante G y el módulo volumétrico K

decaen exponencialmente desde G_0 y K_0 hasta $G_\infty = G_0 g_\infty$ y $K_\infty = K_0 k_\infty$, de manera similar a la mostrada en la Figura 2 para el módulo de elasticidad E .

Software utilizado

A fin de poder resolver el comportamiento no lineal de este modelo, debe utilizarse un software análisis por elementos finitos general no lineal bastante robusto, el cual pueda resolver efectos no lineales como:

1. Variación de las cargas en el tiempo
2. Aplicación de varios pasos sucesivos de análisis (aparición y eliminación de interacciones, cargas y condiciones de frontera)
3. Interacciones de contacto con fricción de Coulomb, con y sin deslizamiento
4. Alta deformación (cambios en la geometría de referencia)
5. Comportamiento hiperelástico (en el caso de que incluya empaques de hule)
6. Comportamiento viscoelástico

Para los casos resueltos en TERRAMIX se utilizó ABAQUS/Standard, desarrollado por Hibbit, Karlsson y Sorensen, versión 5.8.16, y posteriores. Otros sistemas que podrían resolver este tipo de problemas son MSC/MARC, de McNeal-Schwendler Corporation y ANSYS, de ANSYS, Inc.

Datos de entrada

Las propiedades de materiales que se muestran en el Cuadro 1 pueden servir como ejemplo de la información requerida para correr un análisis de este tipo. Estos datos son usados en casos reales en TERRAMIX.

Nótese que se utilizan series de Prony con solamente un término y con un tiempo de relajación τ muy pequeño. Además, el valor de k_1 es irrelevante, puesto que la deformación volumétrica en este caso es despreciable y se puede asumir que el material se mantiene incompresible durante todo el proceso. Esto podría no ser cierto en otros casos y debe considerarse con cautela. ABAQUS calcula internamente el módulo

CUADRO 1. Propiedades de materiales requeridas para el modelado viscoelástico del PVC.

Modelo constitutivo	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Elástico, dependiente de temperatura	Módulo de Young @23°C	E_{23}	1900	MPa
	Módulo de Poisson @23°C	ν_{23}	0,38	
	Módulo de Young @60°C	E_{60}	1330	GPa
	Módulo de Poisson @60°C	ν_{60}	0,38	
Expansión termal	Coefficiente de expansión térmica	α	$5,4 \cdot 10^{-5}$	1/°C
Viscoelástico, series Prony	Coefficiente de Prony para cortante	g_1	0,999	
	Coefficiente de Prony volumétrico	k_1	0,05	
	Tiempo de relajación	τ	0,0001	
Viscoelástico, Williams-Landel-Ferry	Temperatura de transición vítrea	T_g	90	°C
	Constantes de WLF a T_g	C_1	17,44	°C
		C_2	51,6	°C

de cortante G y el volumétrico K a partir de el módulo de elasticidad E y el de Poisson ν a partir de las leyes de elasticidad lineal isotrópica [3a, 3b].

Los valores de g_1 y τ fueron convenientemente seleccionados para hacer que el tubo se relajara muy rápidamente (más rápido que en la realidad), a un valor bastante bajo del módulo de elasticidad de largo plazo. Esto se hace simplemente con el fin de que el análisis se complete en poco tiempo, en este caso no interesa averiguar el tiempo de proceso, solamente el perfil final de la campana. En caso de que sea necesario obtener valores realistas del tiempo y de las fuerza de formado, deben

obtenerse valores reales de los coeficientes de Prony a partir de pruebas de laboratorio.

De acuerdo con los datos usados, la temperatura por debajo de la cual el PVC se vuelve puramente elástico es 38,4°C. Dado que los coeficientes de relajación no son verdaderos, existe cierto riesgo de que el PVC exhiba cierta memoria no deseada si se saca del molde o del mandril por encima de dicha temperatura. Sin embargo este problema no se ha manifestado. Por prueba y error para obtener resultados razonables, y por comparación con información de pruebas reales, se seleccionaron las temperaturas de proceso que se muestran en el Cuadro 2.

Finalmente, la presión de vacío, que de hecho en el modelo se aplica como una presión externa, es 0,09 MPa.

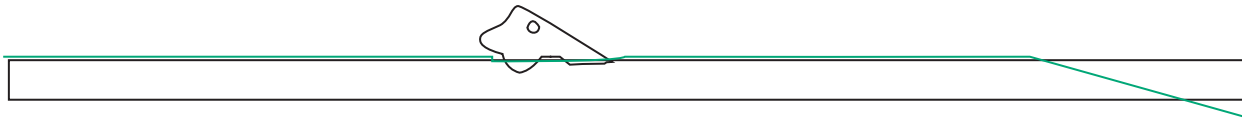
Descripción	Valor (°C)
Temperatura ambiente y del tubo frío	23
Temperatura de la región de tubo suavizado	85
Temperatura en la región de transición entre la zona fría y la zona caliente del tubo	55
Temperatura intermedia a la cual se remueve el tubo formado del mandril	55

Modelo abreviado "Quick Belling"

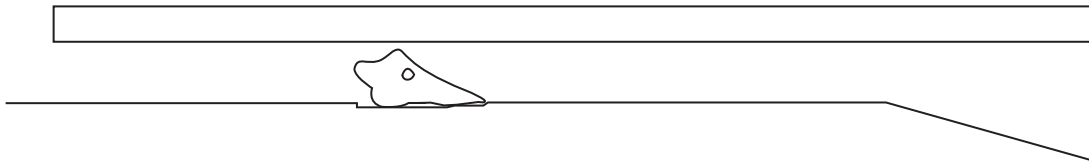
Se ha encontrado que el costo computacional de empujar el tubo sobre el mandril es muy alto, debido a la gran distancia de deslizamiento e importantes problemas de convergencia que aparecen. Cuando el único interés del análisis es

determinar el perfil final de la campana, para usarlo posteriormente en otros análisis, como ensamble de la junta y prueba

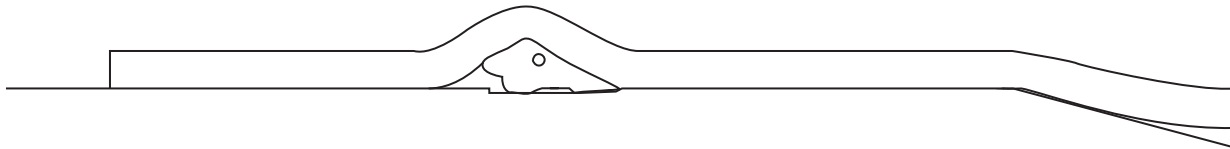
hidrostática, se puede usar una versión abreviada del proceso. Este modelo se denomina "Quick Belling".



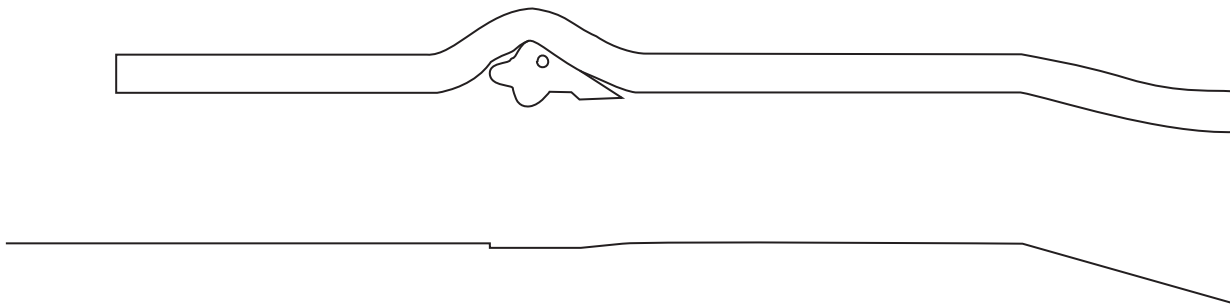
- a. Mandril, tubo y empaque se superponen en su configuración libre de deformación.



- b. Se ajusta la posición del empaque sobre el mandril, activando la interacción de contacto entre ellos. Al mismo tiempo se calienta el tubo y se expande mediante presión interna ficticia hasta un diámetro mayor que el externo del empaque. Las interacciones entre el tubo y otras partes permanecen inactivas.



- c. Se activa la interacción de contacto del tubo contra el empaque y el mandril. Luego se elimina la presión que expandía el tubo y se le permite contraerse contra el tubo y el empaque. Se aplica la presión externa que se usa para ayudar el campaneado. Se enfría el tubo hasta la temperatura intermedia.



- d. Se contrae ficticiamente el mandril para alejarlo de la campana y el empaque. Se enfría el tubo hasta temperatura ambiente.

FIGURA 3. Modelo abreviado de proceso "Quick Belling".

En la figura 3 se muestran los pasos involucrados en el modelo abreviado.