

TUBERÍA FORZADA (PENSTOCK) PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN EL ECUADOR Y ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE FISURAS.

DESIGN OF A FORCED PIPE (PENSTOCK) FOR POWER GENERATION HYDROELECTRIC IN ECUADOR AND CRACK PROPAGATION ANALYSIS.

José Guillermo Trujillo Jaramillo¹, Herbert Humberto Viñachi Bermeo²

¹Escuela Técnica de la Fuerza Aérea, ²Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas, Javier Espinoza y Av. Amazonas
e – mail: ¹gtrujillo1@espe.edu.ec, ²hvb5467@hotmail.com.

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, VII Edición 2018, No. 12 (14)

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar una tubería forzada (penstock) de 2,5 metros de diámetro, utilizando los criterios de falla tales como: energía de distorsión (Von Mises), de cortante máximo (Tresca) y de Goodman aplicando un factor de seguridad de 2 en aceros T445 y BS1501-223, materiales adecuados para este uso en condiciones climáticas del Ecuador y con una fluctuación del esfuerzo debido al efecto de golpe de ariete de 7500 veces al año.

A través de la suposición de una fisura detectada de 4 mm se analizó en función del material, el proceso de crecimiento o propagación de la falla utilizando la Norma BS7910:2005, para especificar la vida útil de la tubería o tiempo de operación una vez que ha sido detectada la falla y de esta manera recomendar un período de inspección y mantenimiento.

Finalmente, se determinó la relación de fractura del factor de intensidad de tensión elástica aplicada a la tenacidad de la fractura, su condición de colapso plástico para evaluar la falla en el diagrama FAD (Failure Assessment Diagram).

Palabras clave:

Colapso plástico, Criterios de falla, Norma BS7910:2005, Tubería Forzada.

ABSTRACT

The objective of this paper was to design a penstock of 2.5 meters in diameter, using the criteria of failure such as: distortion energy (Von Mises), maximum shear (Tresca) and Goodman, applying a safety factor of 2 in T445 and BS1501-223 steels, that are suitable materials for this use in the Ecuadorean climatic conditions with a fluctuation of the effort due to the effect of water hammer of 7500 times a year.

Through the assumption of a detected crack of 4 mm, the process of growth or propagation of the failure was analyzed according to the material using the BS7910: 2005 standard to specify the useful life of the pipe or operation time once the failure has been detected and, in this way, recommend a period of inspection and maintenance.

Finally, the fracture ratio of the elastic tension intensity factor applied to the fracture tenacity, its plastic collapse condition to assess the failure in the FAD (Failure Assessment Diagram) diagram, was determined.

Keywords:

Plastic Collapse, Failure Criteria, BS7910:2005 Standard, Penstock.

1. INTRODUCCIÓN

El cálculo y diseño de tuberías forzadas o penstock implica la selección del material adecuado en función de las propiedades, dimensiones y costo, siendo un proceso en el que intervienen múltiples variables, razón por la cual se ha considerado disminuir el número de éstas utilizando los criterios de energía de distorsión (Von Mises), de cortante máximo (Tresca) y de Goodman, de manera que el factor de seguridad sea 2, para simplificar el diseño y lograr obtener resultados que se acerquen a la realidad planteada. Además se efectúa el análisis de propagación de fisuras, partiendo de la suposición que se ha detectado una fisura de 4mm por la fluctuación del esfuerzo debido al efecto de golpe de ariete con una ocurrencia de 7500 veces por año, para evitar que se produzca un fallo debido al crecimiento de la fisura detectada en el interior de la tubería en la dirección axial. Estos parámetros calculados permiten especificar la tubería de menor costo, su vida útil y recomendar un período de inspección de la penstock.

2. MATERIALES Y METODOS

Tuberías Forzadas

Las tuberías forzadas llamadas también penstock son aquellas que llevan el agua a presión desde el embalse hasta las turbinas de una central hidroeléctrica, funcionan a plena sección y en las que el movimiento del agua se debe a la presión reinante en el interior, pudiendo presentar por tanto, pendientes y contrapendientes.



Figura 1. Tubería Forzada o Penstock

Una tubería es un conjunto de tubos y accesorios unidos mediante juntas para formar una conducción cerrada. Un tubo es un elemento de sección circular. Los accesorios pueden ser:

- Piezas especiales: Unidades que posibilitan los empalmes, cambios de dirección (codos), derivaciones, variaciones de sección, etc.
- Dispositivos auxiliares: Aparatos que protegen y facilitan el buen funcionamiento de la red hidráulica. Los más importantes son las válvulas y las ventosas.

Tipos de Tuberías

Tubería soldada

- Soldada automáticamente por arco sumergido, tanto helicoidal como longitudinalmente.
- Soldada por inducción o resistencia eléctrica.

Tubería sin soldadura

- Fabricada por extrusión de un producto macizo (lingote, palanquilla o barra) y posteriormente laminado o estirado en caliente o en frío.

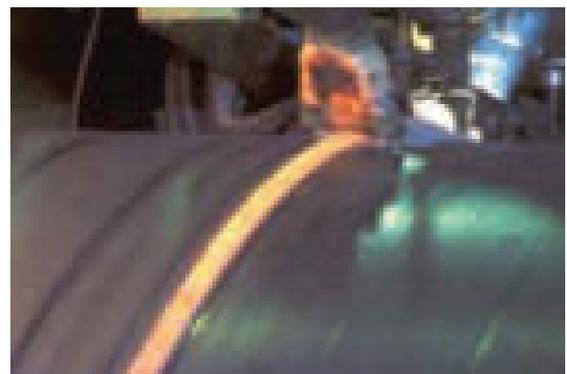


Figura 2. Fabricación de tuberías forzadas soldadas

Dimensiones de los tubos

Los diámetros exteriores varían desde 26,9 mm a 2743 mm y los espesores de los tubos desde 2 a 25 mm, según UNE-EN 10224.

Otros diámetros y/o espesores, pueden ser fabricados por acuerdo entre el Fabricante y el Constructor como la propia norma indica, y conforme al proceso propio de fabricación.

Revestimientos de las tuberías

El revestimiento se efectúa normalmente en fábrica, una vez conformada la tubería, en un ambiente propicio, generalmente para una correcta aplicación y

un exhaustivo control de calidad.

Todos los tubos se protegerán tanto exterior como interiormente y en ambos casos las fases a seguir en la ejecución serán las siguientes:

- Preparación de las superficies
- Aplicación del revestimiento

Tipos de Revestimientos

Las grandes familias de productos que aparecen hoy en el mercado, se pueden resumir en:

- Cintas adhesivas
- Polietileno
- Polipropileno
- Pinturas o coatings
- Resinas epóxicas

La investigación considera el diseño de la tubería forzada utilizando los criterios de energía de distorsión (Von Mises), de cortante máximo (Tresca), o de Goodman, de forma que el factor de seguridad sea 2. Este diseño también implica la selección del material adecuado en función de las propiedades, dimensiones y costo.

Se calcula la vida útil y recomienda un período de inspección para evitar que se produzca un fallo debido al crecimiento de la fisura detectada en el interior de la tubería en la dirección axial, considerando que la fluctuación del esfuerzo debido al efecto de golpe de ariete, ocurre 7500 veces por año.

Las condiciones de carga y la longitud medida de la fisura interna son impuestas y se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos para el diseño del tubo forzado (penstock)

Tamaño de la fisura	Diámetro D	Cabeza de presión estática H	Cabeza de presión máxima en ariete H
mm	m	m	m
4	2.5	500	700

Los materiales usados y recomendados en la construcción de estas estructuras se describen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Propiedades de los materiales que se utilizarán en el diseño de la tubería

MATERIAL D	DESCRIPCIÓN P	PROPIEDADES MECÁNICAS			PRECIO (USD/1000 Kg)
		σ_y (Sy) Mpa	σ_{UTS} (Sut) Mpa	Elongación (%)	
ACERO A	QT445 A	700	800 1	8	965
ACERO B	BS1501 -223 Gr.490L	350	500 2	0	525

En la tabla:

$\sigma_y = S_y$: Esfuerzo de fluencia

$\sigma_{UTS} = S_{ut}$: Esfuerzo último a la tracción

Diseño de una tubería forzada

Los criterios de importancia para diseñar la tubería forzada o penstock, son:

Cargas Aplicadas

Las cargas aplicadas sobre el elemento estructural son:

- Presión Interna y Externa
- Cargas Muertas y Cargas Vivas
- Cargas externas aplicadas
- Cargas sísmicas y de viento
- Condiciones Térmicas de carga
- Cargas cíclicas o dinámicas

Las condiciones de operación

Influyen en el diseño de la tubería y las mismas se detallan a continuación:

- Condiciones normales
- Condiciones Intermitentes
- Condiciones de emergencia
- Condiciones excepcionales
- Condiciones de Construcción y test hidrostáticos

Estado de cargas de un cilindro de paredes delgadas sometido a presión interna.



Figura 3. Estado de cargas de un cilindro de paredes delgadas sometido a presión interna.

Donde:

t: Espesor del tubo.

D: Diámetro del tubo.

T: Fuerzas resistentes de tracción que tienden a romper la tubería y que se deben a la presión hidráulica del interior.

P: Presión aplicada.

Se consideró una sección de tubería, sometida a la presión hidráulica interna, tal como lo presenta la figura:

Esfuerzo circunferencial σ_c :

Si la relación del **Diámetro ≥ 10** , considerar un **espesor** cilindro de paredes delgadas, se calcula el esfuerzo circunferencial, que soporta el elemento con:

$$\sigma_c = \frac{P * D}{2 * t} \quad (1)$$

Esfuerzo axial o longitudinal σ_l :

El esfuerzo axial o longitudinal, se calculó utilizando:

$$\sigma_l = \frac{P * D}{4 * t} \quad (2)$$

Clasificación de acuerdo a la presión interna

Según la presión interna que soportan los tubos, éstos se clasifican en:

- De baja presión $< 3 \text{ atm}$
- De media presión $3 - 10 \text{ atm}$
- De alta presión $> 10 \text{ atm}$

Las características que definen los tubos y accesorios son: el espesor, el diámetro y las presiones de trabajo. Basados, en la experiencia en el manejo e instalación de tuberías forzadas, usar las siguientes especificaciones para obtener el espesor de la pared de la tubería (t):

$$t = \frac{D + 20}{400} \text{ (pulgadas) (U.S. Bureau of Reclamation)}$$

$$t = \frac{D + 500}{10000} \text{ (milímetros)} \quad (3)$$

$$t = \frac{D}{288} \text{ (Pacific)} \quad (4)$$



Figura 4. Espesores de tuberías forzadas.

Cálculo del espesor t

Con respecto al cálculo del espesor de pared, por simplicidad, se consideró únicamente los esfuerzos circunferenciales. En ese caso el diseño estático por los métodos de Von Mises y Tresca, se reducen a:

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma_c} \quad (5)$$

Donde:

$N = 2$

σ_y : Esfuerzo de fluencia

σ_c : Esfuerzo circunferencial = $\frac{P_{\text{max}} * D}{2 * t}$

Reemplazando valores en las ecuaciones 1 y 5, para los dos tipos de Aceros planteados, se obtuvieron los siguientes resultados de espesor de la tubería forzada:

Tabla 3. Comparación de los métodos de obtención de los coeficientes de ajuste de fuerzas en carretera a, b y c [1].

TEORÍA DE FALLA ELÁSTICA			
MATERIAL	n	WOM MÍNIMO	WOM MÁXIMO
		t espesor (in)	t espesor (in)
ACERO A	2	0.0245	0.0245
ACERO B	2	0.0245	0.0245

Sin embargo, debido a las cargas de cíclicas, el diseño debe ser dinámico en lugar de estático, es decir se debió determinar el esfuerzo medio (σ_m) y esfuerzo amplitud (σ_a) para aplicar el criterio de Goodman, donde el esfuerzo medio y el esfuerzo amplitud se calculan a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (6)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

El esfuerzo mínimo se determinó con la presión estática y el esfuerzo máximo con la presión de ariete. Las presiones estática y de ariete, se obtuvieron a través de la siguiente ecuación:

Donde:

ρ = Densidad del agua (1000 Kg/m³)

g = Gravedad (9.81 m/s²)

h = Cabeza de Presión estática y máxima en ariete

Reemplazando los valores en la Eq. 8 se tiene:

$$P_{est} = 0.867 \text{ MPa}$$

$$P_{ariete} = 1.905 \text{ MPa}$$

Cada una de estas presiones, reemplazadas en la Ec.1, permitió dejar expresiones en función del espesor t:

$$\sigma_{max} = \frac{6.867 * 2.5}{t * 4}$$

CRITERIO DE GOODMAN



$$\frac{1}{N} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \quad (9)$$

Donde:

N = 2 Factor de seguridad

S_e = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * σ_{ut}

Tomando como ejemplo el ACERO A, que tiene un S_{ut} = 800 MPa, en la Ec. 9



Despejando t se obtiene un espesor de la tubería forzada de 0.024525 (m) ó 24.525 (mm).

En la siguiente tabla, se indican los espesores requeridos en los dos aceros, en función del diámetro, presiones, materiales, factor de seguridad y criterio aplicado para el efecto.

Tabla 4: Espesor de la tubería utilizando Criterio de Goodman.

Diámetro (mm)	Presión (MPa)	Material	Espesor (mm)
25	1.905	Acero A	24.525
25	1.905	Acero B	24.525
25	0.867	Acero A	24.525
25	0.867	Acero B	24.525

Cálculo del Costo

Para el efecto, se consideró una densidad para los aceros de 7850 (Kg/m³) y se utilizó el costo por cada 1000 Kg, dato en la investigación.

El área y volumen de la tubería, se calculó en función del espesor obtenido para cada material.

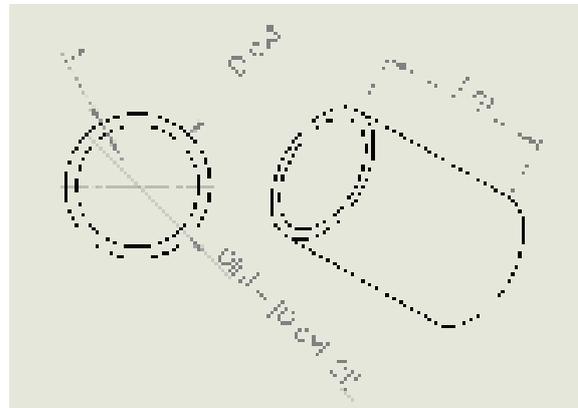


Figura 5. Geometría de la tubería forzada por metro de longitud

El área de la tubería se define como:

$$A = \frac{\pi}{4} * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \quad (10)$$

Con la densidad del material y el volumen calculado de la tubería se calculó la masa en Kg y se determinó el costo de la tubería por metro de longitud. La siguiente tabla muestra el costo calculado para los dos materiales.

Tabla 5: Costo de la Tubería por metro de longitud con el espesor calculado.

Material	Costo (USD/m)
ACERO A	1200
ACERO B	1500

Un primer balance a esta altura del diseño permitió concluir que, el ACERO A, ocupa menos material por tener un menor espesor, este es más caro por lo que, el material que conviene utilizar por costo es el ACERO B; sin embargo falta evaluar el comportamiento de estos dos materiales cuando existe una fisura, por tanto la decisión final aún no está tomada.

Análisis de Propagación de fisuras

Cálculo del factor de intensidad del esfuerzo aplicado k_I

Cuando aparece una fisura, el crecimiento de la misma está dominado por el factor de intensidad de esfuerzo “k”, determinado por:

$$k_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (11)$$

Este factor de intensidad, es función de la geometría, el tamaño y la forma de la grieta o fisura. El valor de Y se define como el factor de modificación de la intensidad del esfuerzo.

Para evaluar la fractura se utilizó la Norma BS 7910:2005 (BRITISH STANDARD. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures), a través de la ecuación:

$$Y_\sigma = (Y_\sigma)_p + (Y_\sigma)_s \quad (12)$$

Donde:

$(Y)_p$: Función de corrección del factor de intensidad de esfuerzo primario (N/mm²)

$(Y)_s$: Función de corrección del factor de intensidad de esfuerzo secundario (N/mm²)

Para este caso, se consideró únicamente esfuerzos primarios, por lo que la ecuación $(Y_\sigma)_p$, está dada por:

$$(Y_\sigma)_p = M \cdot f_w \cdot \left\{ \begin{aligned} &k_{tm} \cdot M_{km} \cdot M_m \cdot P_m + \\ &+ k_{tb} \cdot M_{kb} \cdot M_b [P_b + (k_m - 1)P_m] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Donde:

M: Factor de corrección por pandeo o abultamiento
 f_w : Factor de intensidad de esfuerzos en defectos elípticos

k_{tm} : Factor de concentración de esfuerzo de membrana

M_{km}, M_m, M_{kb}, M_b : Factores de magnificación de intensidad de esfuerzos

P_m : Esfuerzo primario de membrana

k_{tb} : Factor de concentración de esfuerzo de doblado

P_b : Esfuerzo primario de doblado

k_m : Factor de magnificación de esfuerzo debido a desalineación.

Se consideró que solo existe esfuerzo de tracción y no existe flexión, el valor de $M_b=0$; la longitud del tubo es muy grande comparada con las dimensiones de la fisura, entonces f_w, k_{tm} y M_{km} son igual a 1.

Al no existir pandeo, el factor de corrección por pandeo o abultamiento es $M=1$.

El espesor es muy pequeño comparado con el diámetro por lo tanto se puede considerar esfuerzo plano.

En la sección 4.3. de la Norma BS 7910:2005, podemos encontrar la solución y ecuaciones para tuberías, pero no se puede aplicar para tubos de paredes delgadas en razón de que debería cumplirse: $0.1 < (\text{espesor}/\text{radio}) < 0.25$

Nuestra relación (espesor/radio) está entre los rangos de $(0,02453/1.25=0.019)$ y $(0.03924/1.25=0.031)$.

Por último, el esfuerzo primario de membrana P_m , es el mismo que el esfuerzo de tracción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación del estado de la fisura puede hacerse considerando que esta tiene una forma elíptica como muestra la figura, y que esta crece primero en la dirección radial



Figura 6: Evaluación de estado de la fisura.

Para este caso $a =$ tamaño de la fisura $= 4 \text{ mm}$; $c = a$ y $B =$ espesor de la tubería (mm)

Al reemplazar, todas las consideraciones realizadas anteriormente en la Ec.11, se pudo concluir que Y es igual a M_m , donde este valor se define por la siguiente expresión:

El ángulo θ indica la dirección en la cual se va a evaluar el crecimiento de la fisura. El ángulo sería 0° si se considera el crecimiento de la fisura en dirección axial (no fue nuestro caso) y 90° en dirección radial, que es la dirección que se consideró para este diseño.

Tomando los datos del espesor calculado para el ACERO A, se tiene:

$$a \text{ (tamaño de la fisura)} = 4 \text{ mm} = c, \text{ y}$$

$$B \text{ (espesor de la tubería)} = 24.525 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$M_1 = 1.13 - 0.09(4/4) = 1.04$$

$$M_2 = [0.89 / \{0.2 + (4/4)\}] - 0.54 = 0.20167$$

$$M_3 = 0.5 - 1 / \{0.65 + (4/4)\} + 14 \{1 - (4/4)\}^{24} = -0.1060$$

$$g = 1 + \{0.1 + 0.35(4/4)(4/24.525)^2\}(1 - \sin 90^\circ)^2 = 1$$

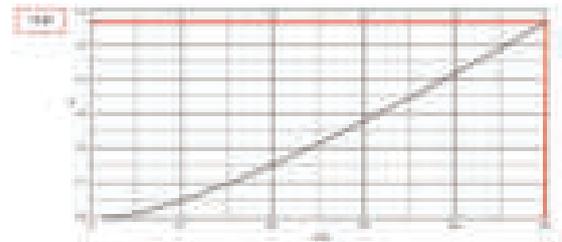
$$f\theta = \{(4/4)^2 \cos^2 90^\circ + \sin^2 90^\circ\}^{0.25} = 1$$

$$\Phi = \{1 + 1.464(4/4)^{1.65}\}^{0.5} = 1.5697$$

Reemplazando todos los valores anteriores en la Ec. 14 se obtuvo:

Tabla 6: Cálculo de M_m

PARÁMETROS PARA CALCULAR M_m (ANEXO M NORMA BS7910:2005)											
MATERIAL	a (mm) FISURA	c (mm)	B (mm) ESPESOR	M1	M2	M3	θ (rad)	g	f θ	Φ	M_m
ACERO A	4	4	24.525	.04	0.20167	-0.10606	1	.00	1	1.56971	0.66591109
ACERO B	4	4	39.240	.04	0.20167	-0.10606	1	.00	1	1.56971	0.66386903



De la misma manera, se pudo obtener una solución gráfica, para calcular M_m :

Para el acero A: $a/B = 0.1631$

Para el acero B: $a/B = 0.102$

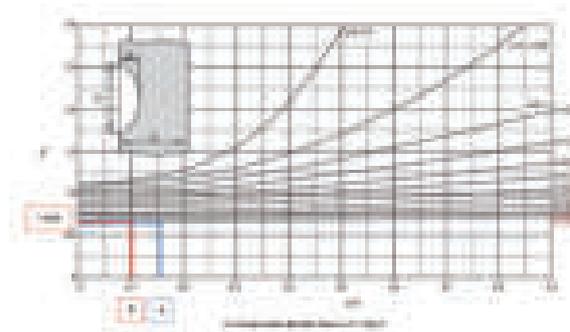


Figura 8: Normograma para obtener M_m .

Se pudo apreciar que la solución gráfica, prácticamente coincide con la solución analítica dada por la Ec.14; así mismo el valor de M_m , prácticamente permanece igual, independientemente del material.

Cálculo del número de ciclos para producir una falla después de que se forme la fisura inicial hasta que llegue al espesor calculado.

De la Ec. 11 se puede determinar:

$$\Delta k_i = \frac{C}{a} \left(\frac{a}{B} \right)^{2m} \quad (15)$$

Si se considera que en la tubería forzada, se ha producido una fisura de 4 mm y que ha iniciado el proceso de propagación de la misma, se advocará a la Ley de Paris.

LEY DE PARIS

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta k_i)^m \quad (16)$$

El crecimiento de la fisura está dominado por el factor de intensidad de esfuerzo k , de la misma manera, el comportamiento del crecimiento de las fisuras en este tipo de aceros ferríticos en contacto con el agua adoptan un valor para C de $2 \cdot 10^{-11}$ (m/ciclo/MPa).

$m^{1/2})^m$ y $m=3$ (según Reid, C.N. and Baikie, B.L., "Choosing a Steel for Hydroelectric Penstocks"). Reemplazando la Ec.15 en la Ec. 16 y considerando la hipótesis de que el valor de Y permanece constante se tuvo:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})^m$$

$$\int_0^{N_f} dN = \frac{1}{C \cdot Y^m \cdot \Delta \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot \left(\frac{m}{2} - 1\right)} \int_{a_0}^{a_f} a^{-m/2} da$$

$$N_f = \frac{1}{C \cdot Y^m \cdot \Delta \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot \left(\frac{m}{2} - 1\right)} \left[\frac{1}{a^{m/2-1}} - \frac{1}{a_0^{m/2-1}} \right] \quad (17)$$

Donde:

N_f = Número de ciclos para producir una falla después que se forme la grieta inicial.

a_0 = Longitud inicial de la grieta = 0.004 m.

a_f = Longitud final de la grieta = t (espesor de la tubería)

Tomando los datos para el acero A y reemplazando en la Ec.17, se obtuvo $N_f = 573255.84$ ciclos.

Considerando el dato de la condición de trabajo de 7500 fluctuaciones / año, se llegó a la conclusión de que una vez iniciada la grieta, para que se propague hasta la totalidad del espesor, pasarán 76.4 años. A continuación, se presenta una tabla resumen de esta sección con los dos materiales propuestos.

Tabla 7: Cálculo del número de ciclos para propagación de una fisura y Vida útil.

Materiales	Ciclos	Vida útil (años)
Acero A	573255.84	76.4
Acero B

Para el cálculo del valor de k_{Ic} , se consideró los datos en el Ecuador de las anomalías en las temperaturas otorgadas por el INAMHI en donde se puede apreciar valores mínimos de entre -2 a -1 °C entre los años 2007 al 2015.

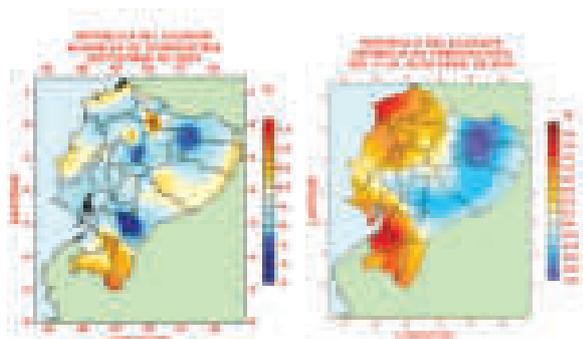


Figura 9: Datos temperaturas mínimas en Ecuador (2007 – 2015).

Es conveniente, desarrollar los cálculos para obtener k_{Ic} con una Temperatura de -10 °C. La tenacidad a la fractura para el material A se obtiene a partir de datos de ensayos de laboratorio que se muestran en la siguiente figura, en unidades de $MPa \cdot m^{1/2}$.

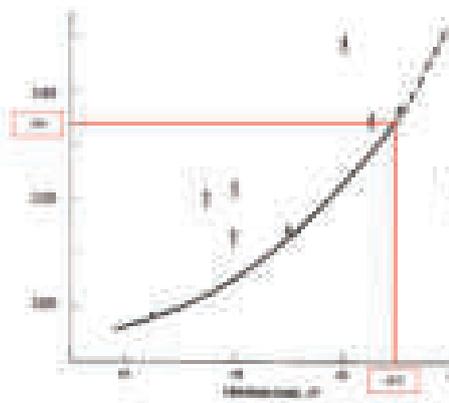


Figura 10: Datos experimentales de la tenacidad a la fractura del material A.

Trabajando con una temperatura de -10°C, se obtuvo un valor de $k_{Ic} = 134$ ($MPa \cdot m^{1/2}$), para el Acero A.

Debido a que no existen datos publicados de tenacidad a la fractura del material B, se pudo utilizar una correlación empírica entre la energía de impacto absorbida Cv y el espesor de la muestra B, tal como lo indica el anexo J de la Norma BS 7910:2005 (BRITISH STANDARD. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures):

$$k_{Ic} = \left[(12 \sqrt{Cv} - 20) \left(\frac{25}{B} \right)^{0.25} \right] + 20 \quad (18)$$

Tabla 8: Valores de energía de impacto medidos a diferentes temperaturas.

Temperature	RT 0 °C	15°C	30°C
Charpy Energy J	61	55	41

Interpolando los datos de la Tabla 8 para la temperatura seleccionada para el Acero A, se tiene un valor de energía de impacto a -10°C igual a 45.66 J y este valor se reemplazó en la Ec. 18 obteniendo:

$$k_{Ic} = \left[(12 \sqrt{45.66} - 20) \left(\frac{25}{39.210} \right)^{0.25} \right] + 20$$

$$k_{Ic} = 74.57 \text{ (Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}\text{)}$$

Bajo la alternancia de cargas aplicadas, las grietas pueden crecer o propagarse hasta llegar a una longitud crítica. Se calculó la longitud crítica de la fisura

para los dos tipos de aceros, para lo cual se utilizó la expresión de la intensidad de esfuerzo (Ec.11) orientado a los valores críticos.

$$K_{ic} = Y\sigma (\pi \cdot a_c)^{1/2} \quad (19)$$

Donde σ es el esfuerzo de diseño el mismo que es igual a $2/3 S_y$.

Para el acero A, reemplazando valores y despejando de la Ec. 19 se tiene el valor de a_c .

$$134 \text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2}) = 0.6659 \cdot 466.57 \text{ (MPa)} \cdot (\pi \cdot a_c)^{1/2}$$

$$a_c = 0.0592 \text{ m}$$

Tabla 9: Cálculo de a_c

Variable	Valor	Unidad
K_{ic}	134	MPa·m ^{1/2}
Y	0.6659	-
S_y	466.57	MPa
a_c	0.0592	m

Cálculo de k_r (relación de fractura del factor de intensidad de tensión elástica aplicada a tenacidad a la fractura)

El eje Y en FAD LIMIT CURVE es la relación fractura de factor de intensidad de tensión aplicada a la tenacidad a la fractura. Este valor se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$k_r = \frac{K_{Ic}}{Y\sigma (\pi \cdot a_c)^{1/2}} \quad (20)$$

La siguiente tabla, muestra los resultados para los dos tipos de acero, de los cálculos realizados para determinar la relación de fractura del factor de intensidad de tensión elástica aplicada a tenacidad a la fractura

Tabla 10: Cálculo de k_r

Material	K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})	Y	S_y (MPa)	a_c (m)	k_r
Acero A	134	0.6659	466.57	0.0592	0.01287
Acero B	100	0.6659	466.57	0.0592	0.01071

El eje X en FAD LIMIT CURVE es la relación de carga aplicada sobre la carga permitida. De acuerdo con la Norma BS 7910: 2005, se puede calcular dividiendo la tensión de referencia de colapso plástico por el esfuerzo de fluencia, como se muestra en la Ec 21.

$$\sigma_{ref} = \frac{F_b + 3S_y a^2 + \left[(F_b + 3S_y a^2)^2 + 3S_y^2 (1 - a^2)^2 \right]^{0.5}}{3(1 - a^2)} \quad (21)$$

La tensión de referencia se obtiene de las ecuaciones dadas en el literal P.3.2 del anexo P de la Norma BS7910: 2005 para la geometría seleccionada mostrada en la figura 5.

$$\sigma_{ref} = \frac{F_b + 3S_y a^2 + \left[(F_b + 3S_y a^2)^2 + 3S_y^2 (1 - a^2)^2 \right]^{0.5}}{3(1 - a^2)}$$

Para seleccionar la ecuación apropiada, se tomaron las siguientes consideraciones:

- No existe esfuerzo de flexión
- La longitud de la tubería penstock, es demasiado grande en comparación con el espesor.

Con estas consideraciones la ecuación para calcular el σ_{ref} es:

$$\sigma_{ref} = \frac{3S_y}{1 + \frac{F_b}{S_y}} \quad (22)$$

Donde:

$$a = \frac{r}{R}$$

Ahora, la máxima relación de carga está dada por

$$L_r \text{ máx} = \frac{\sigma_{ref} + S_y}{2S_y} \quad (23)$$

Tomando los datos para el acero A y reemplazándolos en las Ec.21 - 23, se tiene:

$$a = \frac{24.525}{1 + \left(\frac{24.525}{24} \right)} = 0.01287$$

$$\sigma_{ref} = \frac{3 \cdot 466.57}{2 \cdot (1 + 0.01287)} = 687.1$$

$$L_r = \frac{687.1 + 466.57}{2 \cdot 466.57} = 1.071$$

$$L_r \text{ máx} = \frac{800 + 700}{2 + 700} = 1.071$$

A continuación, se presenta una tabla resumen de esta sección con los dos materiales propuestos:

Tabla 11: Cálculo de L_r . (Colapso plástico)

Material	L_r
Acero A	1.071
Acero B	1.071

Evaluación de la falla en el diagrama FAD

La siguiente ecuación es independiente del material, geometría, estado de carga o tamaño de las fisuras. Útil cuando se conoce únicamente los esfuerzos de fluencia y resistencia a la tracción.

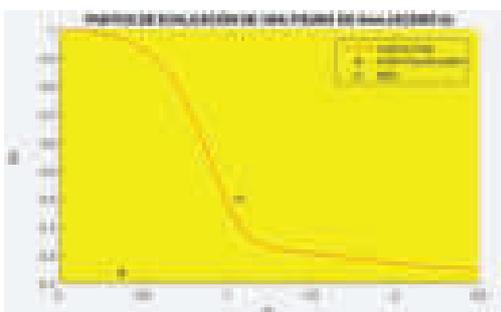
$$K_r = [(1+0.5L_r^2)]^{-0.5} [0.3 + 0.7\exp(-0.6L_r^6)]$$

De la misma forma, con los datos obtenidos en las tablas anteriores, a través de una proyección lineal, se pudo obtener el valor de $k_{m\acute{a}x}$.

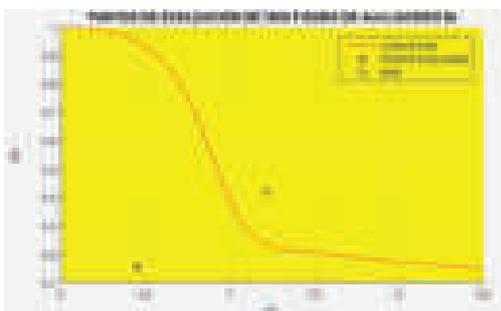
Tabla 12: Cálculo de $k_{m\acute{a}x}$

Material	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Flaw Size (mm)	$k_{m\acute{a}x}$
ACERO A	355	510	4	0.85
ACERO B	355	510	4	0.85

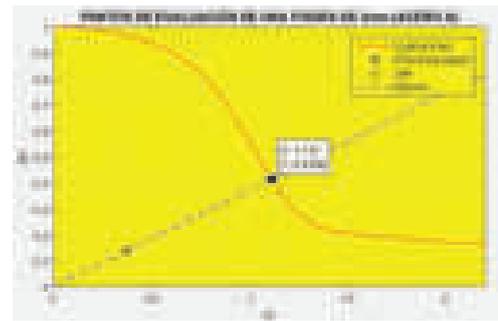
Los resultados para relación de fractura de valor K_I aplicado a K_{IC} y la proporción de carga aplicada al rendimiento de carga, obtenida en las secciones anteriores para un tamaño de fisura o grieta detectada de 4 mm, se representan gráficamente en la curva FAD que se presenta a continuación.



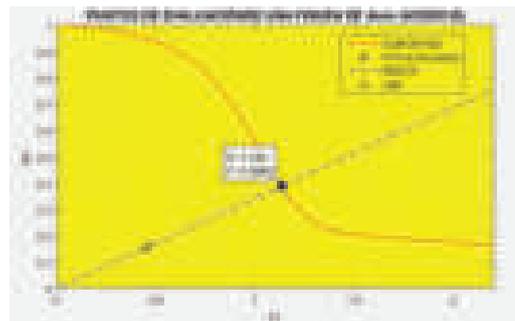
a) Evaluación del Punto (ACERO A)



b) Evaluación del Punto (ACERO B)



c) Evaluación Gráfica en el punto límite de la curva FAD (ACERO A)



d) Evaluación Gráfica en el punto límite de la curva FAD (ACERO B)

Figura 11: Punto de evaluación de una grieta detectada del tamaño de 4 mm

La posición del punto de evaluación, varía según el crecimiento de la fisura; esta variación indicó si el modo de falla conduce a una falla por fractura o colapso plástico. La siguiente figura permitió ver el comportamiento que tienen los materiales utilizados cuando el valor de la fisura crece en un rango dado.

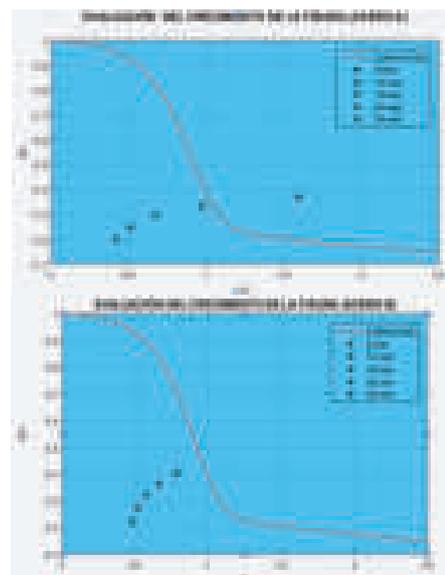


Figura 12: Evaluación del crecimiento de la fisura (8 -24 mm)

La figura 12 muestra que la propagación de la fisura

en el Acero A, se proyecta a tener un comportamiento con tendencia a colapso plástico, mientras que con el Acero B se proyecta a tener una tendencia a fallar por fractura.

Para obtener el factor de seguridad, se utilizó la relación que se indica en la siguiente figura:

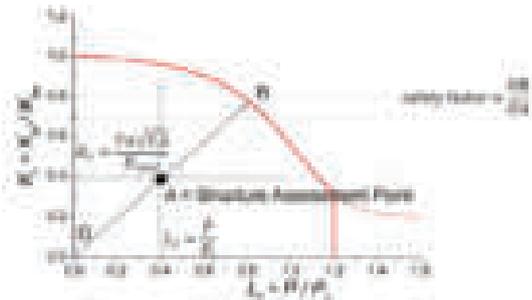


Figura 13: Determinación del Factor de seguridad

El factor de seguridad se lo pudo calcular, desde el diagrama de evaluación FAD, para cada tamaño de fisura.

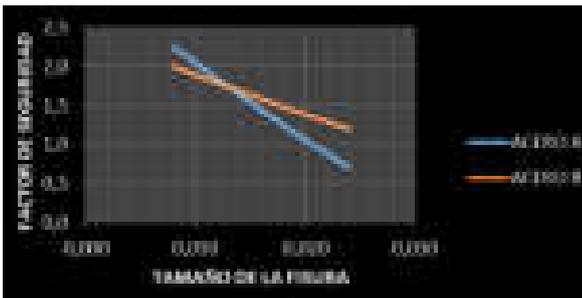


Figura 14: Factor de seguridad para diferentes tamaños de fisura.

Cálculo del tiempo de operación previo a la reparación, una vez que ha sido detectada la falla.

Afirmando el criterio de tener un Factor de Seguridad de 2 en todas las fases del diseño, y utilizando los datos de la Figura 14 y Ec.16 -17, se calculó el número de ciclos que se cumplirán previo a una reparación de la tubería forzada o penstock.

Tabla 13: Cálculo del número de ciclos previo a la reparación.

Tamaño de la fisura (mm)	Acero A	Acero B
0	10000	10000
10	5000	5000
20	2500	2500
30	1500	1500
40	1000	1000

El factor de corrección de la intensidad del esfuerzo Y , variará con el incremento del tamaño de la fisura; esta variación se determinó en la siguiente figura.

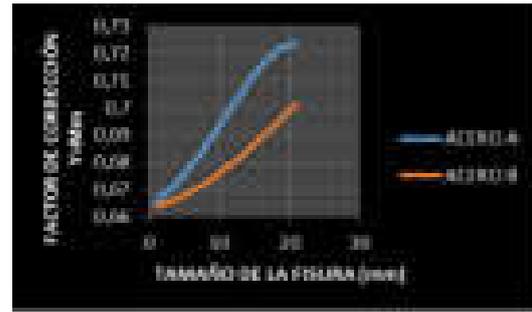


Figura 15: Variación del factor de corrección de la intensidad del esfuerzo con el incremento de la fisura

Como se puede apreciar, la variación de Y no es considerable conforme crece el valor de la fisura, por lo que se ratifica la hipótesis planteada de que para este diseño se considera el valor de $Y=M_m$ como constante.

Reparación

Para la reparación de una tubería Pentstock, se debe seguir las siguientes fases:

- ✓ Localización de la avería
- ✓ Cierre del servicio
- ✓ Reparación de la avería
- ✓ Apertura del servicio

Los sistemas de reparación en tuberías de acero, se clasifican en:

- ✓ Sistemas de reparación sin corte de tubería
- ✓ Sistemas de reparación con corte de tubería

En la reparación de tuberías de acero, es común la utilización de soldadura para realizar la reparación o sustitución de la tubería, para esta reparación es importante que no exista presencia de agua. En caso de que esto no sea posible, la reparación se debe realizar necesariamente con piezas mecánicas.

Si se realiza la reparación mediante soldadura, se deberá tener en cuenta que:

- ✓ No debe existir presencia de agua.
- ✓ Todas las soldaduras deberán realizarse por soldadores calificados y con experiencia demostrada.

En caso de que exista presencia de agua y la reparación se encuentre en la parte superior del tubo, se puede realizar normalmente el tapado de la fisura con un trozo de acero soldado ya que no supone ningún

impedimento el agua que se encuentra a un nivel inferior al de la zona de trabajo.

En el caso de que la zona a reparar se encuentre en la zona baja del tubo y haya presencia de agua, se tendrán que realizar algunas intervenciones especiales como puede ser la de hacer una ventana por el lado superior del tubo y frenar el agua con un pequeño dique, sacando el agua con una bomba. Después de soldar la zona afectada se retira el dique y se suelda la pequeña ventana como en el caso anterior.

Realizada la reparación se protegerán los tubos con los mismos o similares recubrimientos exteriores, con el fin de evitar ataques por el exterior de las tuberías. También, se realizará la comprobación de la soldadura con diferentes tipos de Ensayos No Destructivos como son los líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografía o ultrasonido. En caso de no disponer de ningún ensayo para realizar dicha comprobación se pondrá en servicio la tubería y se comprobará si existen pérdidas. Si se observa alguna pérdida por la soldadura, se descargará la tubería y se reparará la falla o fisura.

Luego se deberá reponer el revestimiento conforme las especificaciones del producto, debiendo controlar el espesor del mismo.

No se deberá poner la tubería en funcionamiento hasta no estar comprobada la reparación.



Figura 18: Reparación de una Pentstock

4. CONCLUSIONES

Debido a las cargas de cíclicas, el diseño se consideró como dinámico en lugar de estático, por lo que se tuvo que aplicar el criterio de Goodman para su ejecución. Una vez evaluada la penstock bajo el estado de cargas dado, se determinó que el material que brinda las mejores condiciones de implementación es el BS1501-223 Gr.490L (ACERO B), ya que aunque se requiera un espesor mayor para soportar el trabajo que va a realizar, definitivamente es más barato y su tiempo de vida útil es mucho mayor una vez que se haya identificado una fisura de 4 mm.

Revisado los catálogos de las casas fabricantes que proveen este tipo de Acero, para la construcción de Penstocks, se pudo verificar que si existe el material con las condiciones geométricas para obtener la tubería requerida para el diseño planteado.

La variación de Y no es considerable conforme crece el valor de la fisura, por lo que se consideró el valor de $Y=Mm$ como constante.

El tiempo requerido previo a una reparación de la tubería una vez detectada la fisura de 4mm, es de 152.5 años.

La propagación de la fisura en el Acero A, se proyecta a tener un comportamiento con tendencia a colapso plástico, mientras que con el Acero B se proyecta a tener una tendencia a fallar por fractura.

El Factor de Seguridad para el acero BS1501-223 Gr.490L basado en el análisis realizado en el diagrama FAD cuando la fisura de 4 mm es detectada, tiene un valor de 2.49.

Aunque los cálculos realizados, demuestran que pasará un tiempo considerable previo al proceso de Reparación; como diseñadores se recomienda que el proceso de Reparación y Mantenimiento de la Tubería Forzada se lo realice cada 10 años, tiempo en el cual el costo utilizado para esta actividad no representaría un valor considerable.

Además, se recomienda que se proyecten investigaciones futuras acerca:

Evaluación de la tenacidad a la fractura en aceros para tuberías penstock para probetas compactas de diferentes espesores.

Evaluación de la tenacidad a la fractura en aceros para tuberías penstock para probetas de flexión bajo la Norma ASTM E-399.

Realizar un estudio sobre análisis de convergencia y refinamiento de mallas en tuberías penstock sometidas a Mecánica de la Fractura.

Los autores agradecen al MSc Luis Andrade, Docente de la asignatura Diseño Avanzado del Programa de Maestría en Manufactura y Diseño asistidos por computador de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, por compartir sus conocimientos y experiencias referente a la temática planteada.

5. REFERENCIAS

- [1] Andrade, L. (2015). Mecánica de la Fractura. Módulo de Diseño Avanzado. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.
- [2] Arana J, González J. (2002). Mecánica de Fractura. Bilbao: Universidad del País Vasco.
- [3] Hosford W. (2005). MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS. (págs. 227 - 245). USA: Cambridge.
- [4] Bambei John,(2012), Steel Penstocks, United States of America, Second Edition, ASCE.
- [5] Budynas-Nisbett, (2006), Shigley's Mechanical Engineering Design, United States of America, Eighth Edition, Mc Graw-Hill
- [6] Norton L. Robert, (1999), Diseño de Máquinas, México, Primera Edición en español, Pearson.
- [7] British Standard Institution. (2005). Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Structures. BS7910:2005.
- [8] ASME (2007), Code for Pressure Piping: Power Piping. B31.1-2004
- [9] Hou Jian-Guo, An Xu-Wen, He Ying- Min, (2004), Comments on Design Methods of Penstocks,

Scholl of Civil Engineering, Wuhan University, P.R.China. ASME Digital Collection.

- [10] Reid, C.N.and Baikie, B.L., "Choosing a Steel for Hydroelectric Penstocks" Case Histories Involving Fatigue and Fracture Mechanics, ASTM STP- 918,C.M.Hudsonand T.P.Rich,Eds, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

- [11] <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/clima>

6. BIOGRAFÍAS



¹José Guillermo Trujillo Jaramillo.

Nació en Quito provincia de Pichincha, Ecuador. Magíster en Manufactura y Diseño asistidos por computador, Diploma Superior de cuarto nivel en Pedagogías Innovadoras,

Diplomado Internacional de Gestión por competencias Ingeniero Mecánico, Docente / Instructor Tiempo Completo de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea - Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.



²Herbert Humberto Viñachi Bermeo.

Nació en Otavalo provincia de Imbabura, Ecuador. Magíster en Docencia de la Matemática, Doctor en Docencia de la Matemática, Ingeniero Civil, Docente /Instructor Tiempo

Completo de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea - Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	22 septiembre 2018
Fecha aceptación	19 noviembre 2018