



# REOLOGÍA E HIDRÁULICA

**Reología** es la ciencia que trata de la deformación y del flujo de la materia.

Al tomar ciertas medidas en un fluido, es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura, la presión y la velocidad de corte.

**Reo = Flujo**

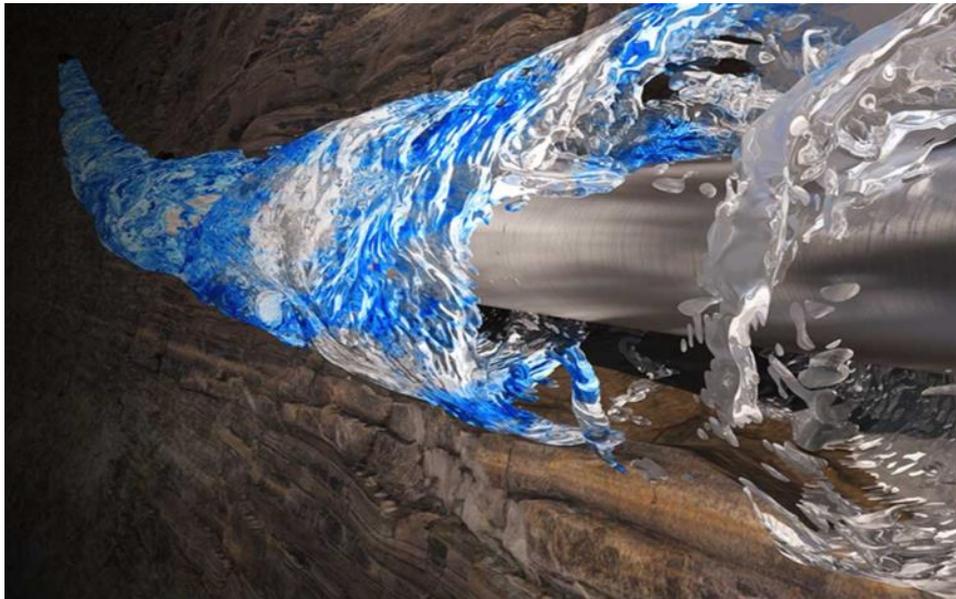
**Logos = Estudio**

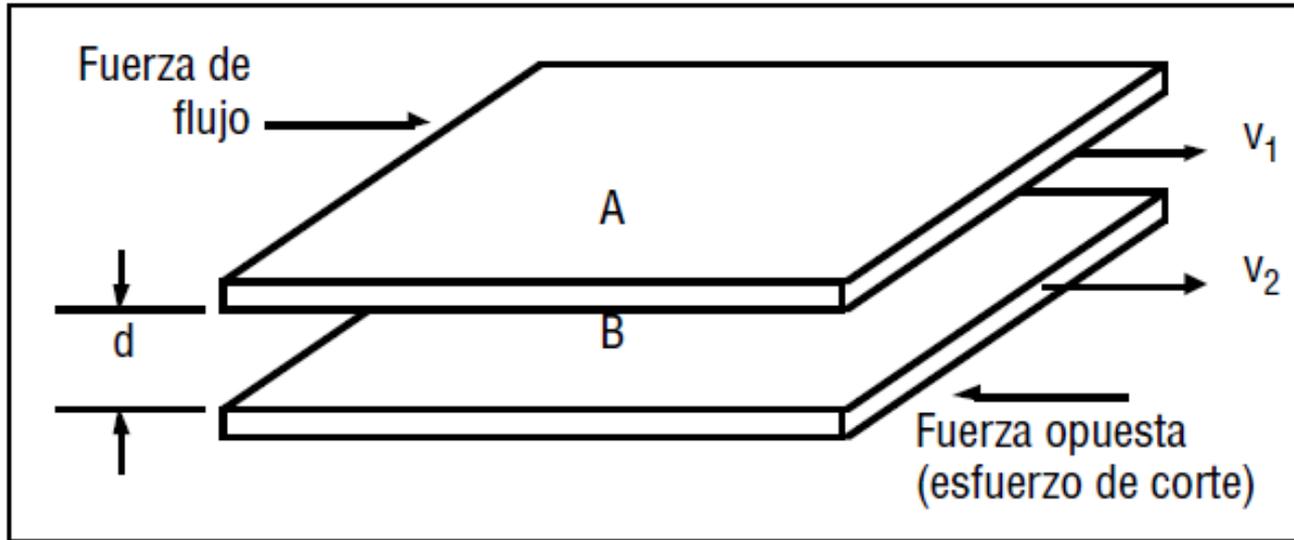
La Reología es el estudio del flujo de fluidos.



Se requiere la Reología para predecir:

- Qué tan bueno es el transporte los recortes afuera del pozo
- Qué tan buena es la limpieza de los recortes en la cara del trépano.
- Cuáles son las pérdidas de presión en el sistema.
- Cómo se comporta el sistema de fluido con los regímenes de flujo que se emplean en el pozo.
- En otras palabras se necesita entender la hidráulica de los fluidos de perforación.





Cuando un fluido está fluyendo, hay una fuerza en el fluido que se opone al flujo. Esta fuerza se llama esfuerzo de corte ( $\tau$ ). Se puede describir como un esfuerzo de fricción que aparece cuando una capa de fluido se desliza encima de otra. Como el corte ocurre más fácilmente entre capas de fluido que entre la capa exterior del fluido y la pared de una tubería, el fluido que está en contacto con la pared no fluye. La velocidad a la cual una capa pasa por delante de la otra capa se llama *velocidad de corte*. Por lo tanto, la velocidad de corte ( $\gamma$ ) es un gradiente de velocidad.

## ESFUERZO O TENSIÓN DE CORTE

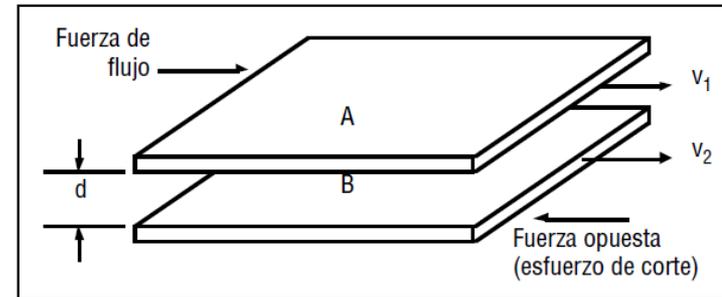
El esfuerzo de corte ( $\tau$ ) es la fuerza requerida para mantener la velocidad de corte. El esfuerzo de corte está expresado en unidades estándar del campo petrolífero, es decir las libras de fuerza por cien pies cuadrados (lb/100 pies<sup>2</sup>).

La fuerza de resistencia o arrastre es el esfuerzo de corte.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

## VELOCIDAD DE CORTE

La velocidad de corte ( $\gamma$ ) es la diferencia en las velocidades dividido entre la distancia. Se mide en (seg<sup>-1</sup>)



$$\gamma = \frac{v_2 - v_1}{d}$$

## VISCOSIDAD

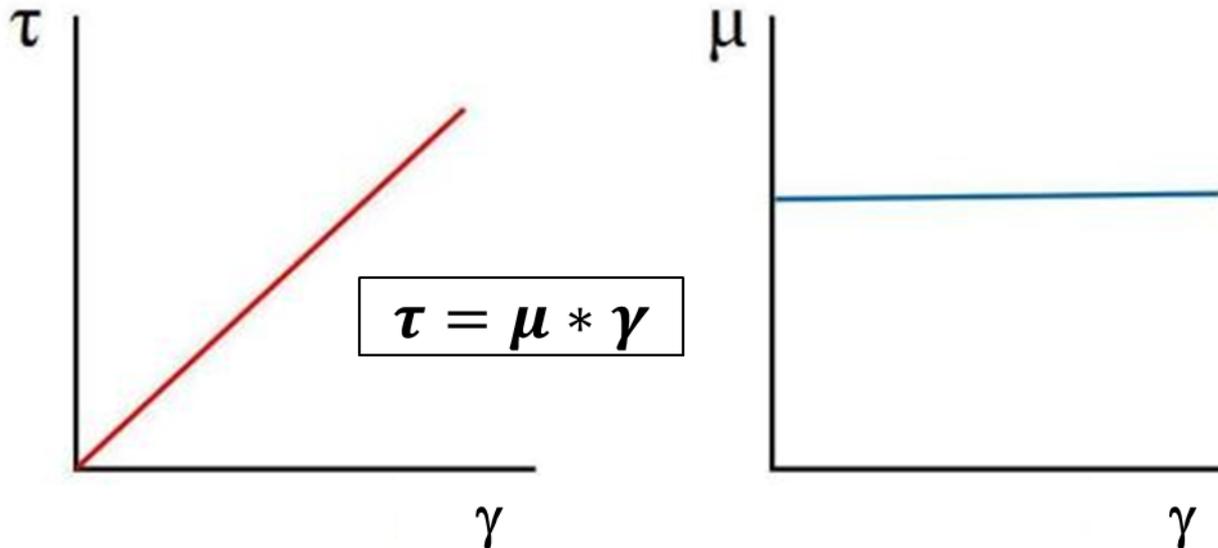
Es la resistencia interna de un fluido a circular. En otros términos, la viscosidad ( $\mu$ ) se pueden describir como la relación del esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y la velocidad de corte ( $\gamma$ ). LA viscosidad se mide en poise, sin embargo, al ser una unidad muy grande, se utilizan los centipoises (cp)

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}$$

## FLUIDOS NEWTONIANOS

Los fluidos Newtonianos son aquellos en los cuales la viscosidad permanece constante para todas las velocidades de corte, siempre y cuando la temperatura y la presión permanezcan constantes.

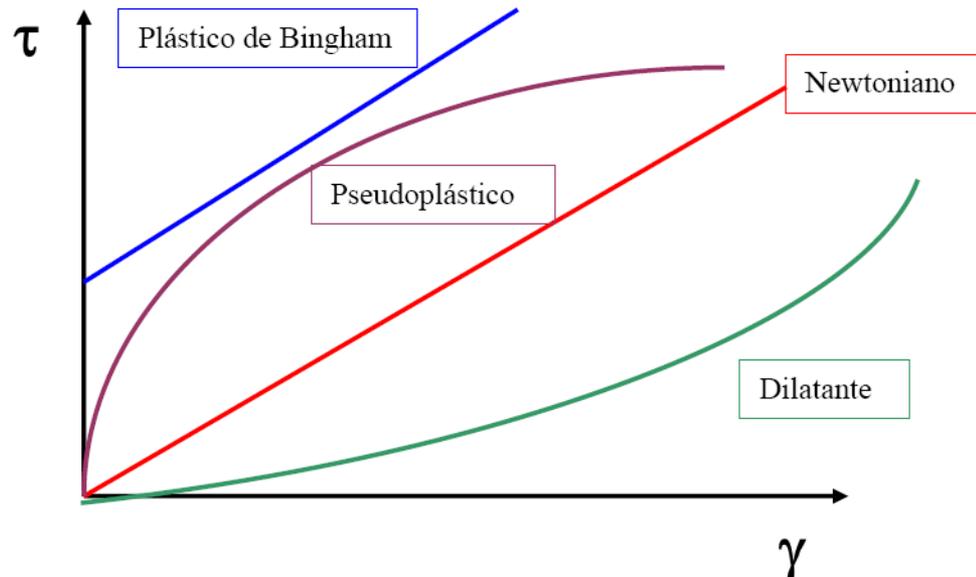
Ejemplos de Fluidos Newtonianos son: el agua, la glicerina y el aceite ligero.



## FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no muestran una proporcionalidad directa entre el esfuerzo de cortante y la velocidad de corte. La mayoría de los fluidos de perforación son no newtonianos.

La viscosidad de un fluido no Newtoniano se conoce como la viscosidad efectiva y para obtener su valor se debe especificar una velocidad de corte específica.



## FLUIDOS NO NEWTONIANOS

### FLUIDO ADELGAZANTE O PSEUDOPLÁSTICO

El fluido adelgazante es aquel fluido cuya viscosidad disminuye al incrementarse la rapidez de deformación o la velocidad de corte. La ecuación que relaciona al esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y a la rapidez de deformación, está dada por:

$$\tau = k * \gamma^n$$

Donde:

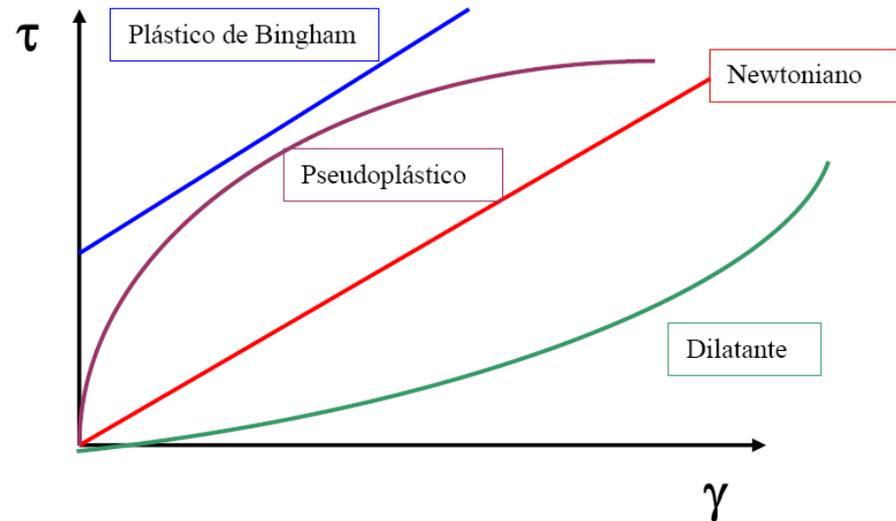
$\tau$  = Esfuerzo de Corte (lb/100ft<sup>2</sup>)

$\gamma$  = Velocidad de corte (seg<sup>-1</sup>)

$n$  = Índice de flujo

$K$  = Índice de consistencia

**$n < 1 \rightarrow$  Fluido Adelgazante**



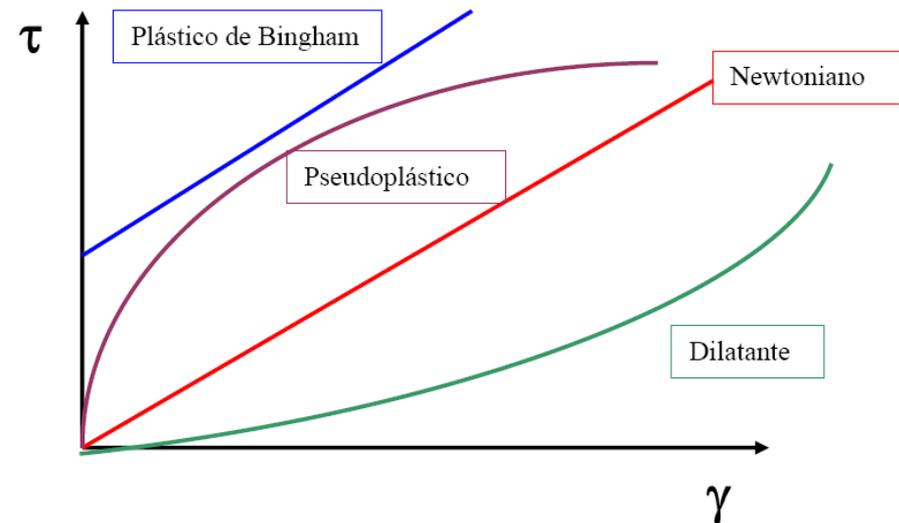
## FLUIDOS NO NEWTONIANOS

### FLUIDO DILATANTE O PLÁSTICO

El fluido dilatante es aquel fluido cuya viscosidad aumenta al incrementarse la rapidez de deformación o la velocidad de corte. La ecuación viene expresada mediante:

$$\tau = k * \gamma^n$$

$n > 1 \rightarrow$  Fluido Dilatante



### FLUIDO PLÁSTICO DE BINGHAM

Los fluidos tipo Bingham son distinguidos porque requieren de un esfuerzo de umbral  $\tau_0$  para que éstos empiecen a fluir, pero una vez que inician el flujo, el comportamiento es newtoniano. La relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación, está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu * \gamma$$

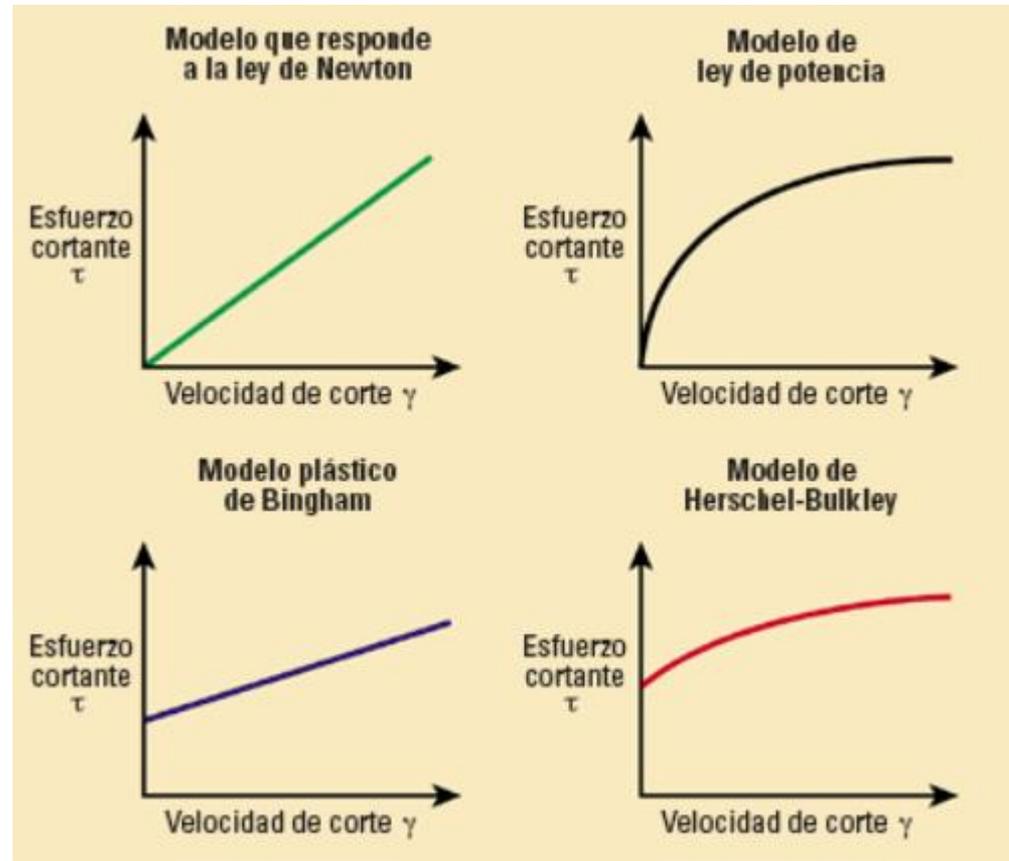
Donde  $\mu$  es la viscosidad newtoniana del fluido y  $\tau_0$  es el esfuerzo de cedencia.

**El esfuerzo de cedencia**  $\tau_0$  está definido como el esfuerzo mínimo necesario para que un fluido empiece a fluir.

Un modelo reológico es una descripción de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

La ley de viscosidad de Newton es el modelo reológico que describe el comportamiento de flujo de los fluidos newtonianos. También se llama modelo newtoniano. Sin embargo, como la mayoría de los fluidos de perforación son fluidos no newtonianos, este modelo no describe su comportamiento de flujo.

En realidad, como no existe ningún modelo reológico específico que pueda describir con precisión las características de flujo de todos los fluidos de perforación, numerosos modelos han sido desarrollados para describir el comportamiento de flujo de los fluidos no newtonianos.

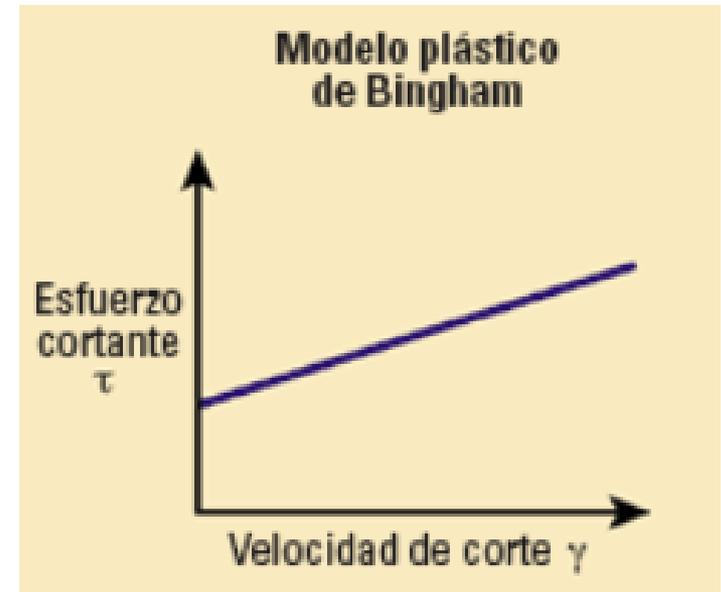


## MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM

Este modelo describe un fluido en el cual se requiere una fuerza finita para iniciar el flujo (punto cedente) y que luego demuestra una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta (viscosidad plástica). La ecuación para el modelo de Flujo Plástico de Bingham es la siguiente:

$$\tau = PC + VP * \gamma$$

Los fluidos de perforación típicos tienen valores más bajos a velocidades de corte bajas. Por lo tanto, el modelo plástico de Bingham no funciona para predecir la reología del lodo en el espacio anular por ejemplo.



## MODELO EXPONENCIAL

El modelo de Ley Exponencial procura superar las deficiencias del modelo de Flujo Plástico de Bingham a bajas velocidades de corte.

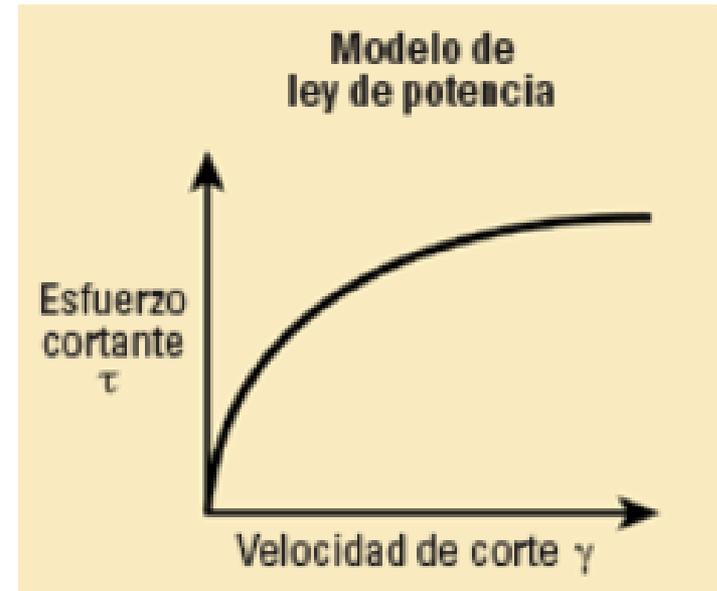
Este modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada.

$$\tau = k * \gamma^n$$

$$n = 3,32 * \log \left( \frac{L_{600}}{L_{300}} \right)$$

$$k = \frac{L_{300}}{511^n}$$

El API ha seleccionado el modelo de Ley Exponencial como modelo estándar.

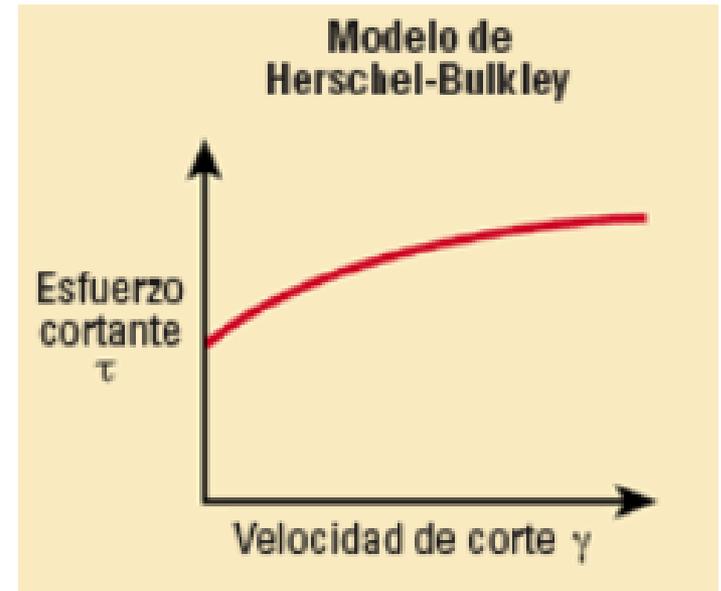


## MODELO EXPONENCIAL MODIFICADO

El modelo de Ley Exponencial no describe totalmente a los fluidos de perforación, porque no tiene un esfuerzo de cedencia. El modelo de Ley Exponencial modificada, o modelo de Herschel-Bulkley, puede ser utilizado para tomar en cuenta el esfuerzo requerido para iniciar el movimiento del fluido (esfuerzo de cedencia).

$$\tau = \tau_0 + k * \gamma^n$$

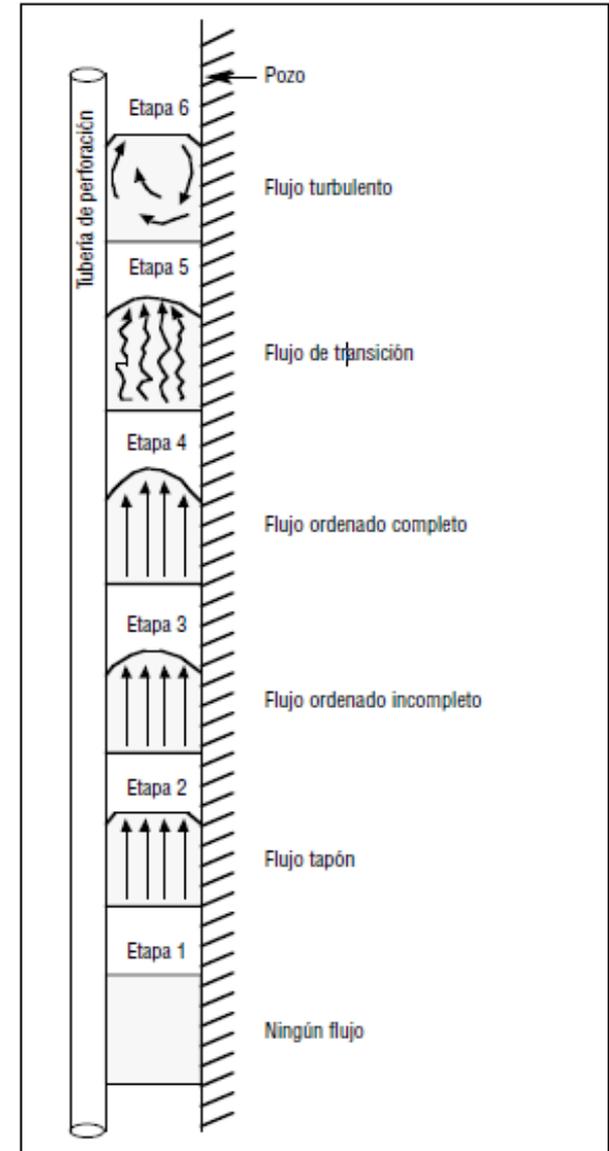
En cada caso, el modelo de Ley Exponencial modificada está ubicado entre el modelo de Flujo Plástico de Bingham, siendo éste el más alto, y el modelo de Ley Exponencial, el más bajo. El modelo de Ley Exponencial modificada es ligeramente más complicado que el modelo de Flujo Plástico de Bingham o el modelo de Ley Exponencial. Sin embargo, este modelo puede aproximarse más al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de los fluidos de perforación.





**Etapa 1 – Ningún flujo.** . La mayoría de los fluidos de perforación resisten con fuerza suficiente al flujo, de manera que es necesario aplicar una presión para iniciarlo. El valor máximo de esta fuerza constituye el esfuerzo de cedencia verdadero del fluido. En un pozo, el esfuerzo de cedencia verdadero está relacionado con la fuerza necesaria para “romper la circulación”.

**Etapa 2 – Flujo tapón.** Cuando se excede el esfuerzo de cedencia verdadero, el flujo comienza en la forma de un tapón sólido. En el flujo tapón, la velocidad es la misma a través del diámetro de la tubería o del espacio anular, excepto para la capa de fluido que está contra la pared del conducto. Muchas veces se hace referencia al flujo de la pasta dentífrica dentro del tubo para describir un ejemplo de flujo tapón. El perfil de velocidad del flujo tapón es plano.



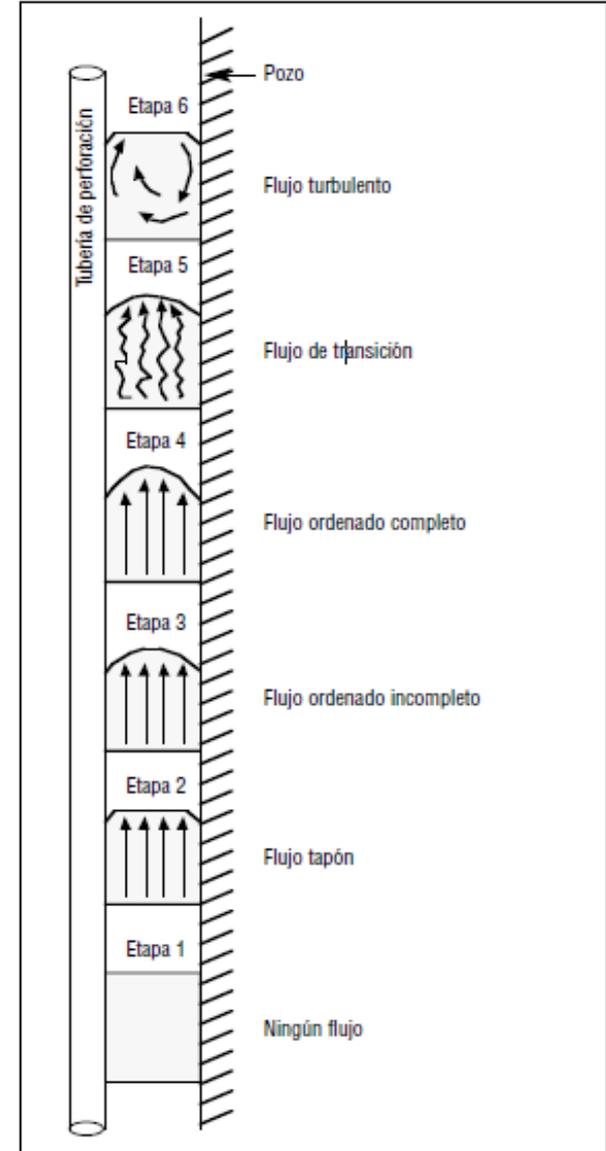
# TIPOS DE FLUJO



Perforación

**Etapas 3 – Transición de flujo tapón a flujo laminar.** A medida que el caudal aumenta, los efectos de corte comenzarán a afectar las capas dentro del fluido y a reducir el tamaño del tapón en el centro del flujo. La velocidad aumentará desde el pozo hasta el borde del tapón central. El perfil de velocidad es plano a través del tapón que tiene la mayor velocidad, y decae o disminuye a cero en la pared del conducto.

**Etapas 4 – Flujo laminar.** A medida que se aumenta el caudal, los efectos del caudal y de la pared sobre el fluido siguen aumentando. A cierto punto, el tapón central dejará de existir. A este punto, la velocidad alcanzará su nivel más alto en el centro del flujo y disminuirá a cero en la pared del conducto. El perfil de velocidad tiene la forma de una parábola. La velocidad del fluido está relacionada con la distancia a partir del espacio anular o de la pared de la tubería. Dentro de una tubería, se puede describir al flujo como una serie de capas telescópicas cuya velocidad aumenta de capa en capa hacia el centro. Todo el fluido a través de la tubería o del espacio anular se moverá en la dirección de flujo, pero a diferentes velocidades. Esta etapa de flujo regular se llama laminar debido a las capas o láminas formadas por las diferentes velocidades.



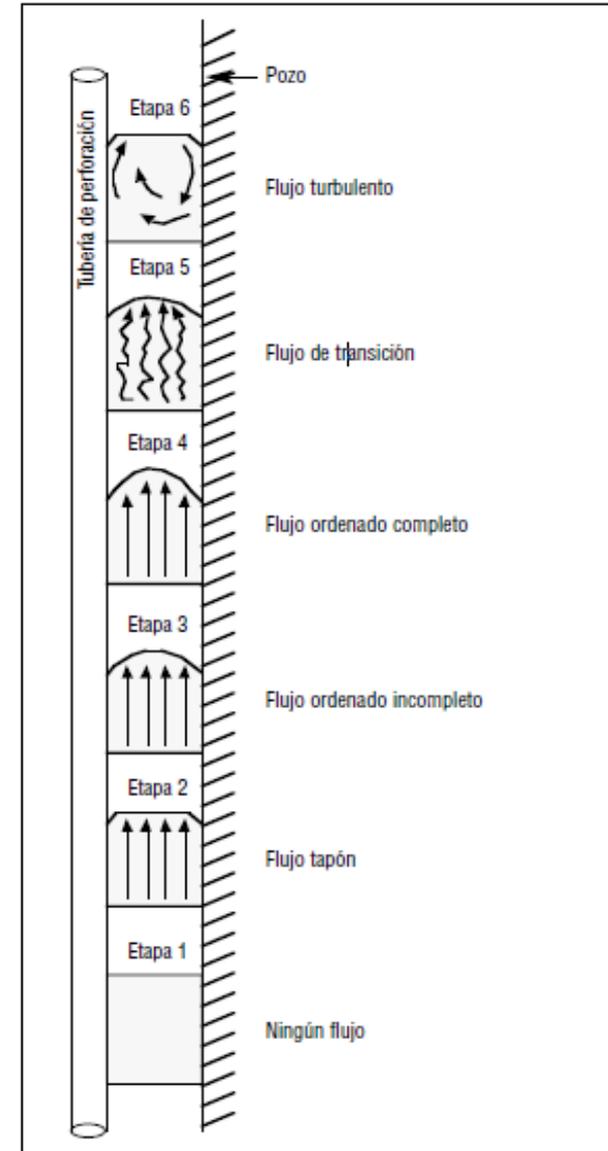
# TIPOS DE FLUJO



Perforación

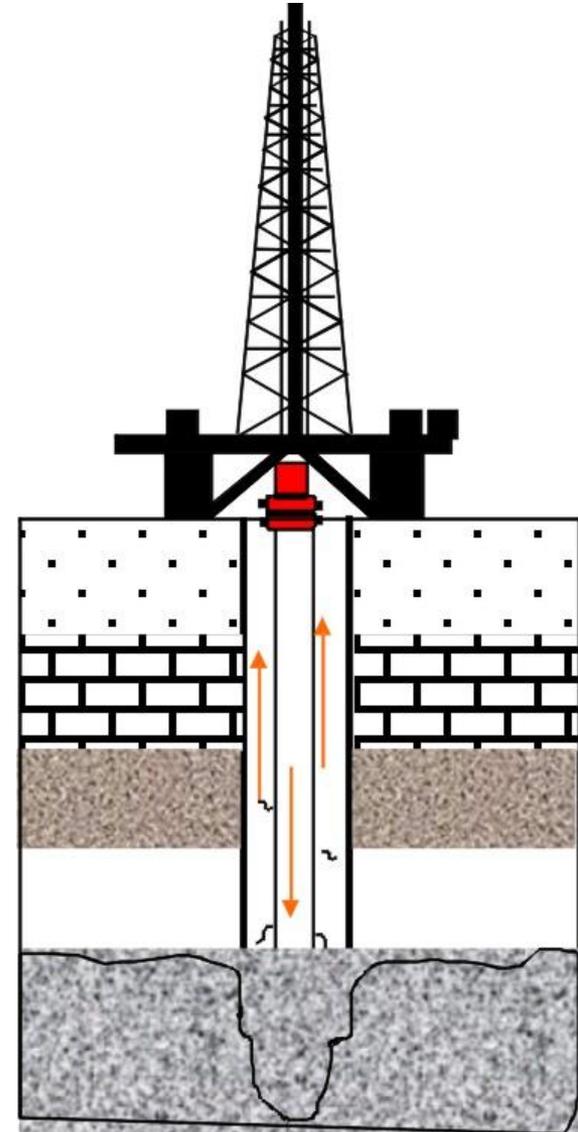
**Etapa 5 – Transición de flujo laminar a flujo turbulento.** A medida que el caudal aumenta, el flujo regular comienza a descomponerse.

**Etapa 6 – Flujo turbulento.** Cuando el caudal sigue aumentando, el flujo regular se descompone totalmente y el fluido tiene un flujo vertical y turbulento. El movimiento del fluido total sigue siendo a lo largo del espacio anular o de la tubería en una dirección, pero la dirección del movimiento será imprevisible en cualquier punto dentro de la masa del fluido. Bajo estas condiciones, el flujo es turbulento. Una vez que estas condiciones han sido alcanzadas, cualquier aumento del caudal producirá simplemente un aumento de la turbulencia.

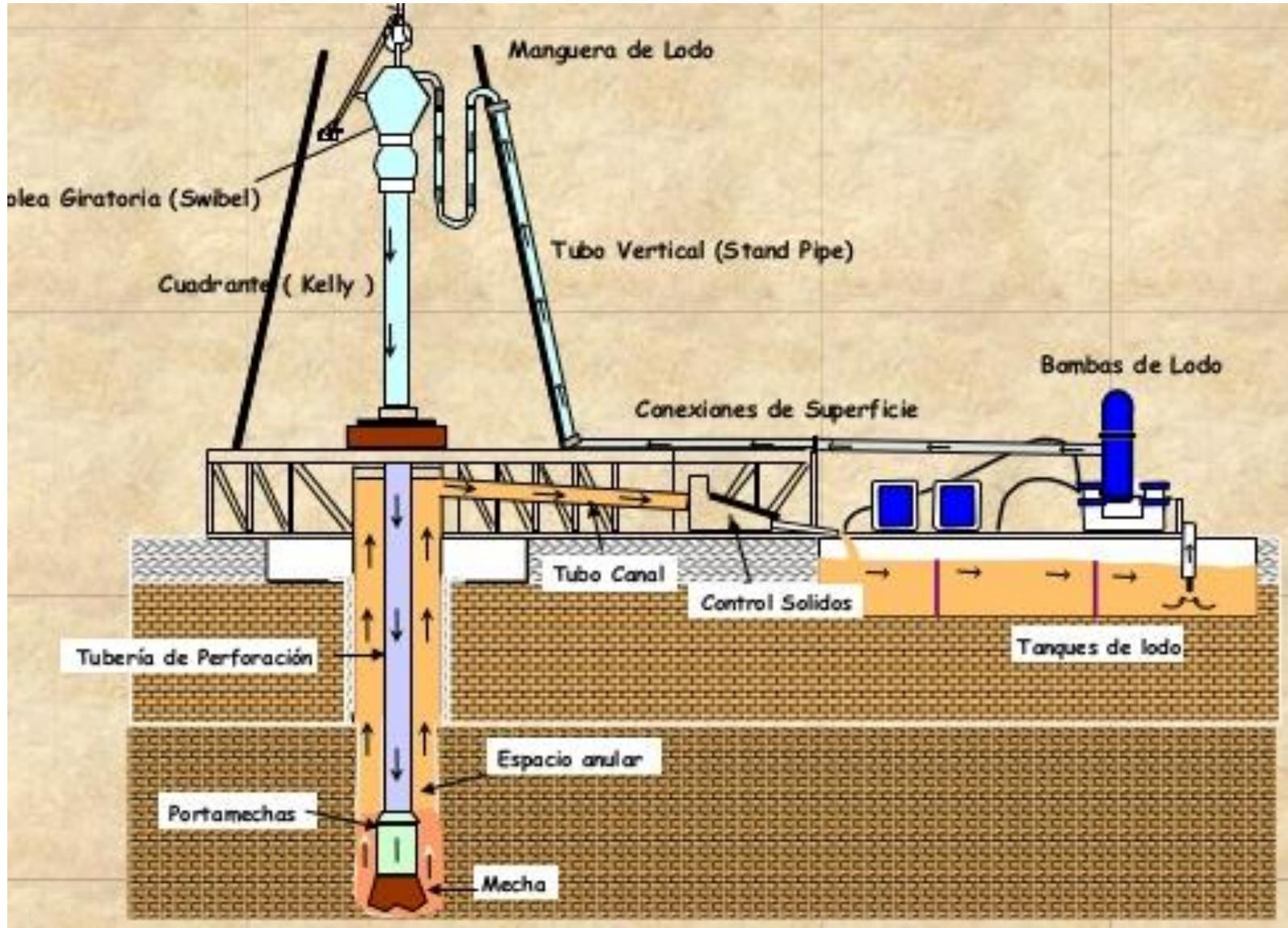


En la perforación de pozos el fluido de perforación juega un papel preponderante en el avance de la tasa de penetración (ROP), sin embargo esta importancia no se observa de manera considerable si no se asocia al fluido de perforación con el estudio de la hidráulica de perforación, fundamentalmente la tasa de perforación de un pozo, está gobernada por la eficiencia en la remoción de los recortes, desde el fondo del pozo hasta la superficie, adicionalmente con una óptima combinación de velocidad de rotación y peso sobre el trépano.

**Hidráulica es el estudio de un fluido en movimiento.**



# SISTEMA DE CIRCULACIÓN

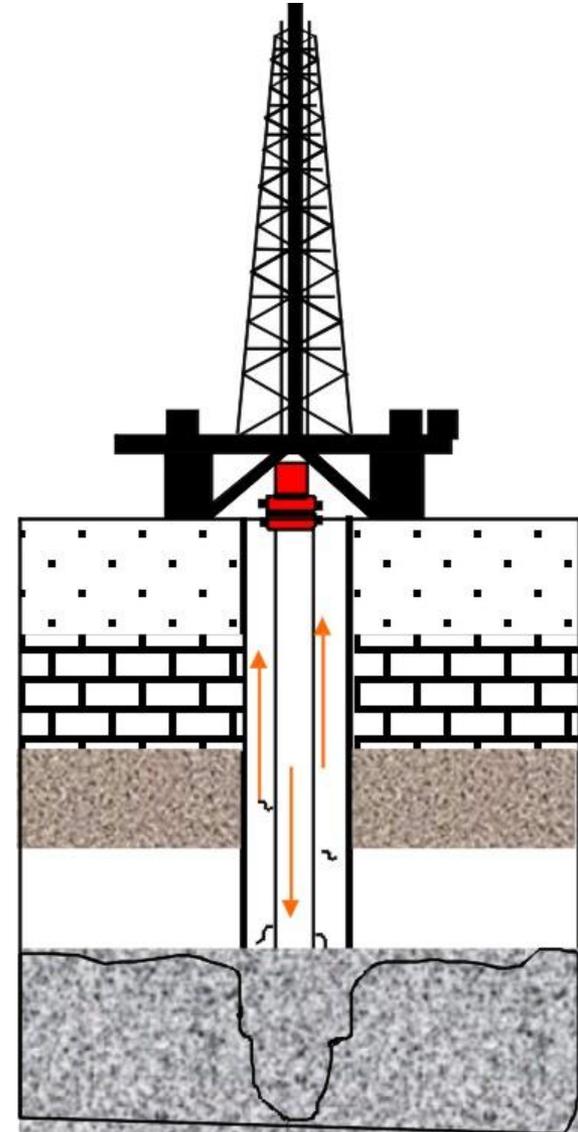


## CIRCULACIÓN DE FLUIDOS:

La circulación del fluido tiene que diseñarse para remover los recortes con eficiencia y también para enfriar la cara de la barrena.

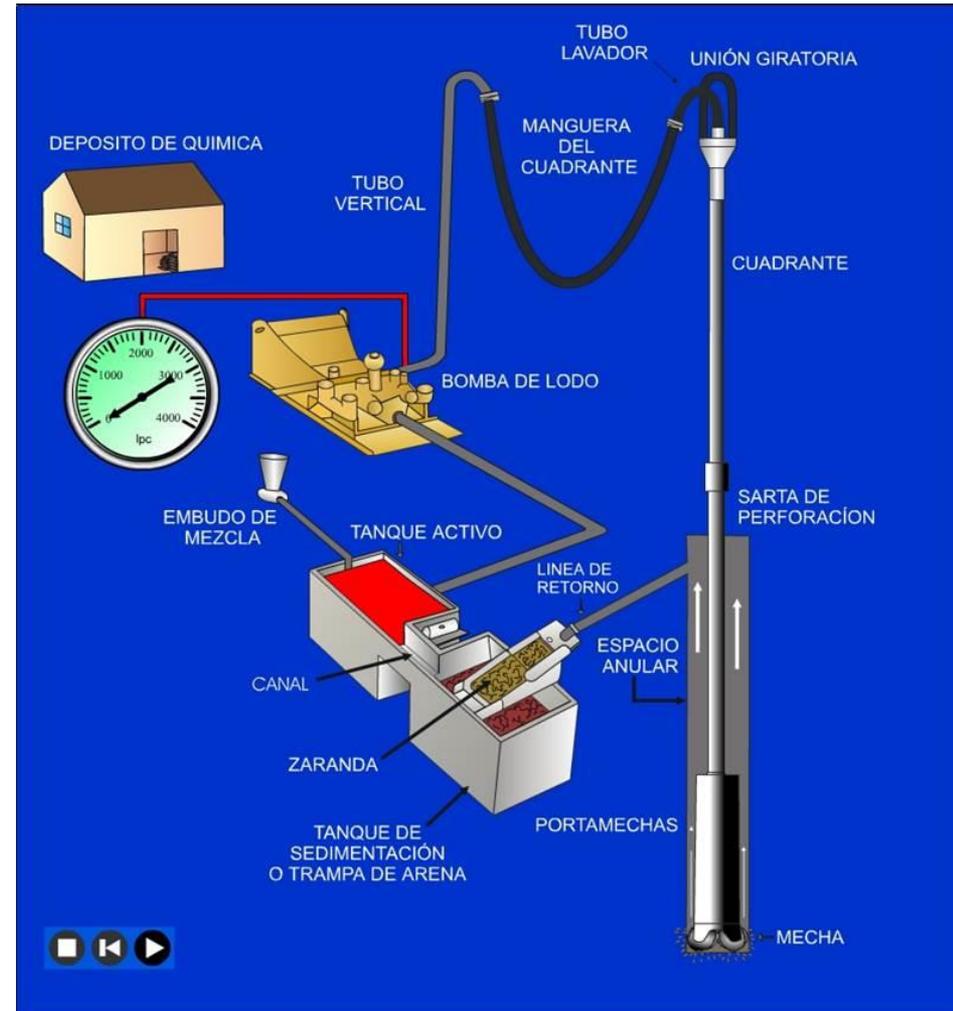
Estos requerimientos pueden satisfacerse al aumentar el caudal o gasto de la bomba.

Sin embargo, el incremento en la velocidad de bombeo del fluido (gasto) puede causar una erosión excesiva de la cara y una falla prematura de la barrena.



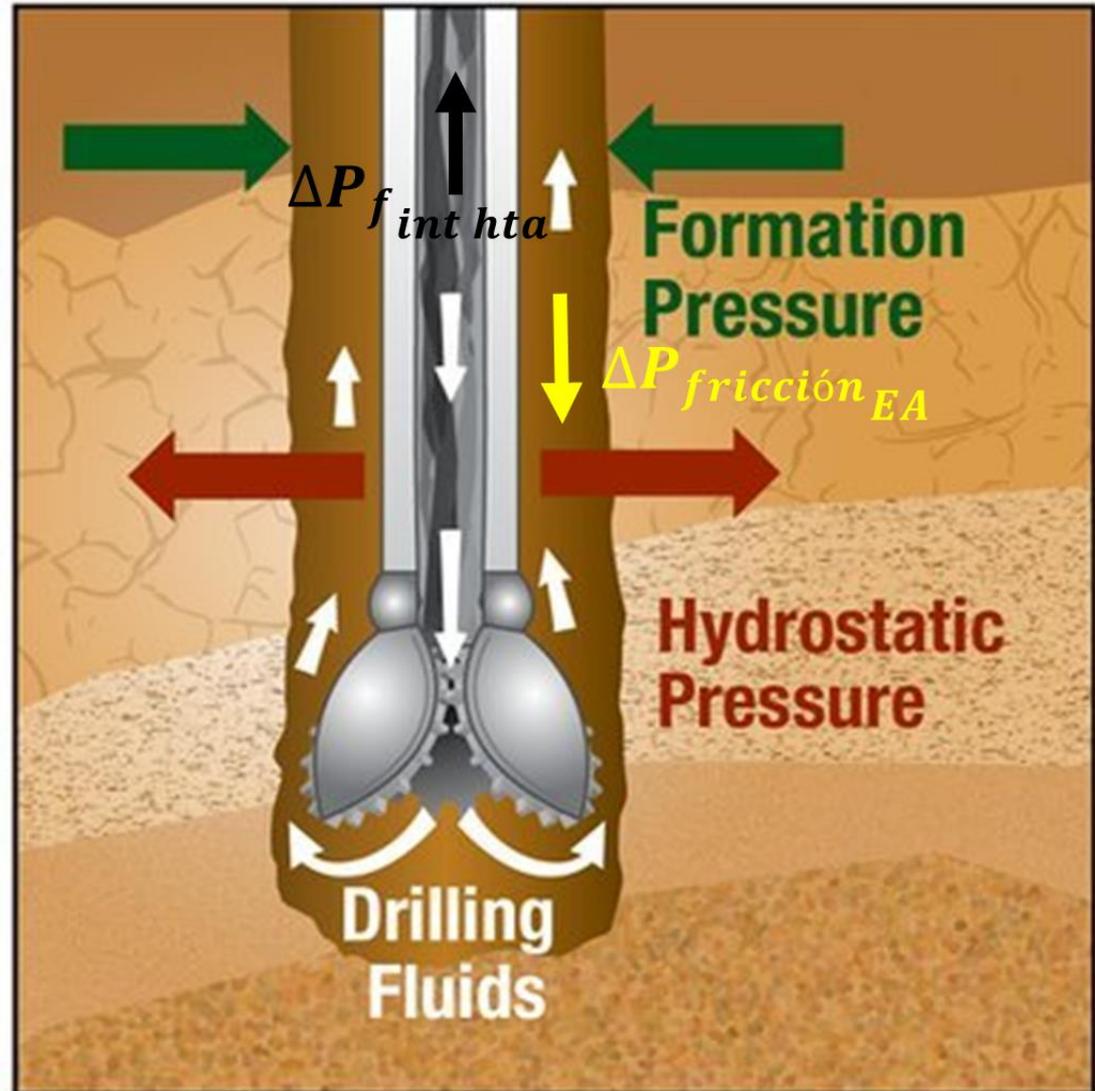
## IMPORTANCIA DE UNA BUENA HIDRÁULICA PARA PERFORAR:

- Óptima ROP durante la perforación.
- Remoción de recortes en el espacio anular, óptima limpieza en el espacio anular (>50%)
- DEC (Densidad Equivalente de Circulación)
- Presiones de Surgencia / suaveo durante los viajes de entrada y salida de la sarta en el pozo.
- Limitación de la capacidad de bombeo.



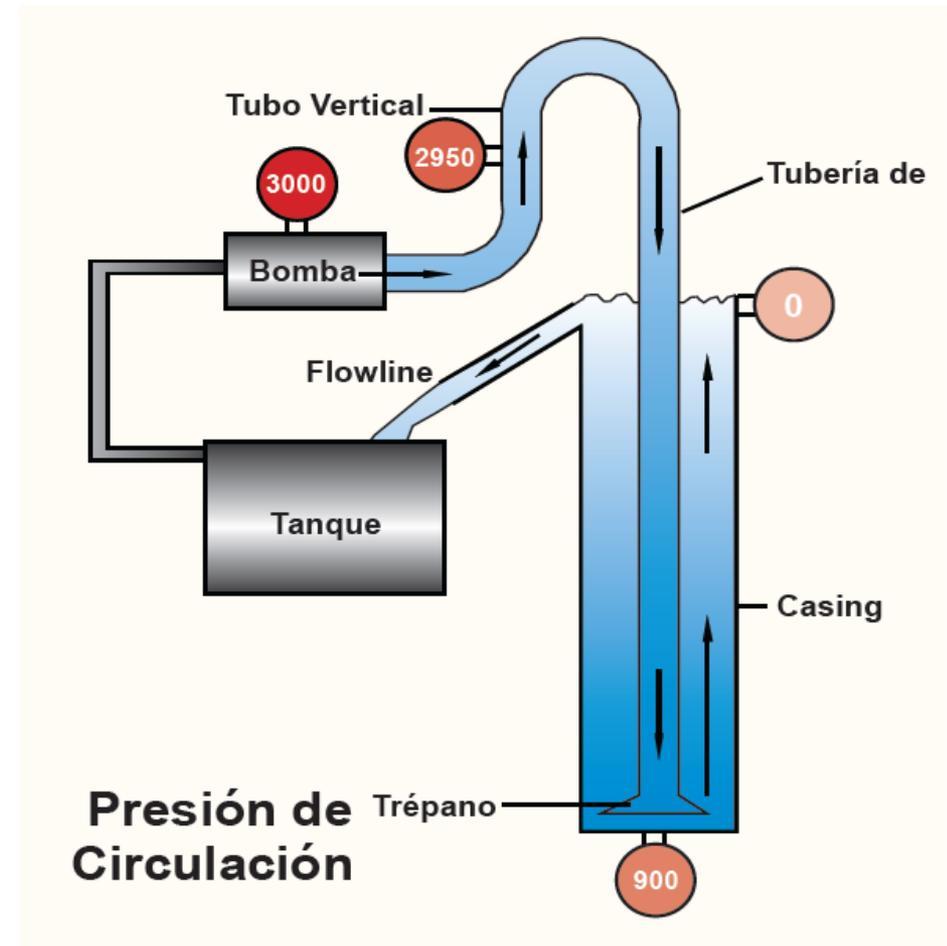
Fricción es, la resistencia al movimiento. Para superar la fricción y mover cualquier objeto es necesario aplicar fuerza o presión, la cantidad de fuerza que se utiliza para superar la fricción se denomina pérdida por fricción y depende de muchos factores, tales como: densidad, tipo y rugosidad de las dos superficies en contacto, área de superficie, propiedades térmicas y eléctricas de las superficies, y la dirección y velocidad de los objetos.

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción que hay entre el líquido y la pared de la tubería; tales energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo.



La Presión de la bomba de lodo es la energía necesaria para hacer circular el fluido a través del sistema de circulación, es decir:

- Conexiones superficiales.
- Interior de la Sarta de Perforación
- Boquillas del Trépano.
- Espacio Anular

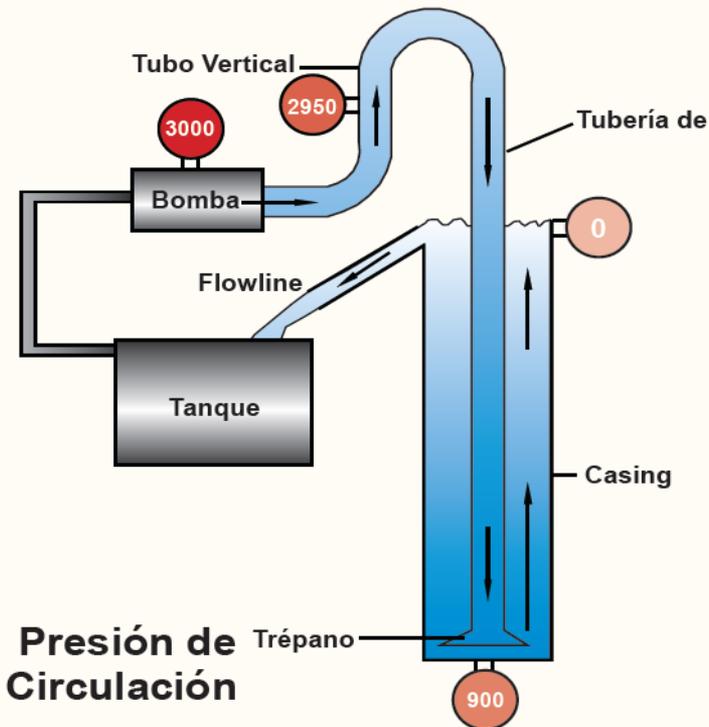


# PRESIÓN DE BOMBA



$$P_B = \sum \Delta P_{\text{fricción}}$$

$$P_B = \Delta P_{f_{\text{con sup}}} + \Delta P_{f_{\text{int hta}}} + \Delta P_{f_{\text{bit}}} + \Delta P_{f_{EA}}$$



Donde:

$\Delta P_{f_{\text{con sup}}}$  = Pérdida de Presión por fricción en conexiones superficiales.

$\Delta P_{f_{\text{int hta}}}$  = Pérdida de Presión por fricción en el interior de la herramienta.

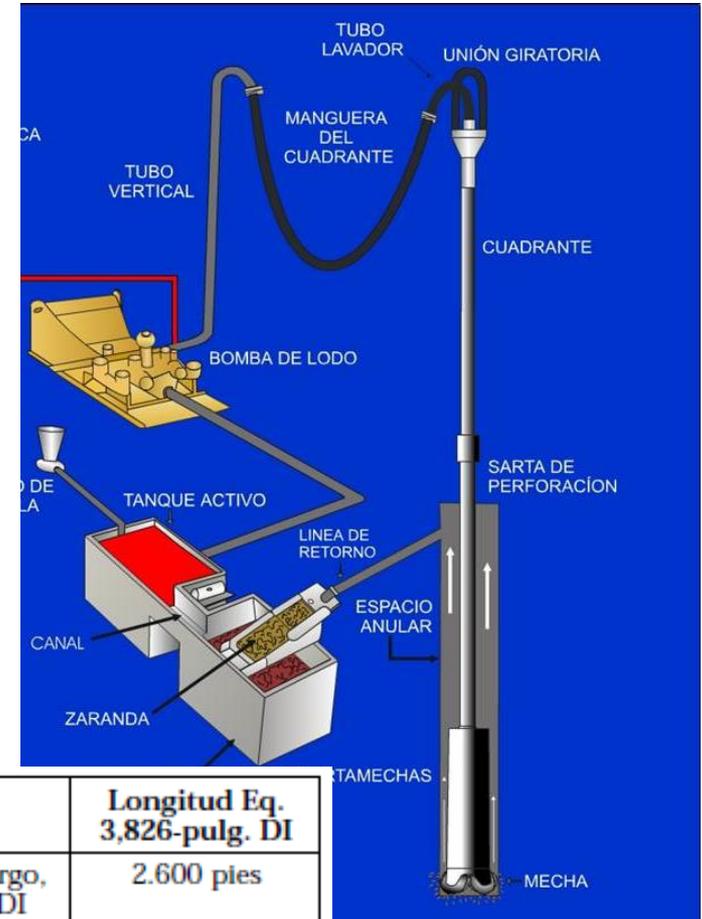
$\Delta P_{f_{\text{bit}}}$  = Pérdida de Presión por fricción en el trépano.

$\Delta P_{f_{EA}}$  = Pérdida de Presión por fricción en el Espacio anular.

# PÉRDIDA DE PRESIÓN CONEXIONES SUPERFICIALES



En la práctica, únicamente hay sólo cuatro tipos de Equipos de Superficie. Cada tipo se caracteriza por las dimensiones del “stand pipe”, la kelly, la manguera rotaria y la unión giratoria. La tabla que sigue resume los cuatro tipos de Equipo de Superficie y su equivalencia en longitud con una tubería de 3.826 pulgadas de ID.

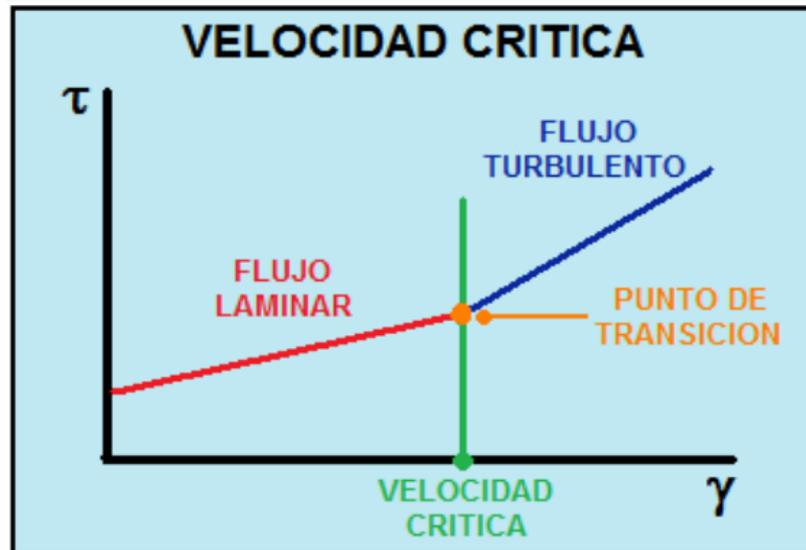
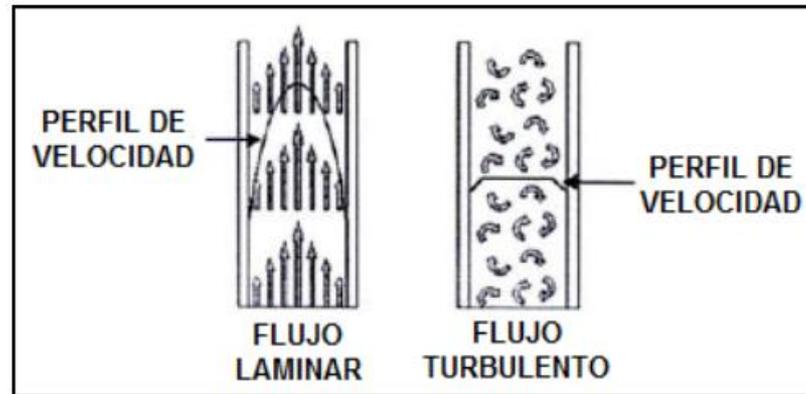
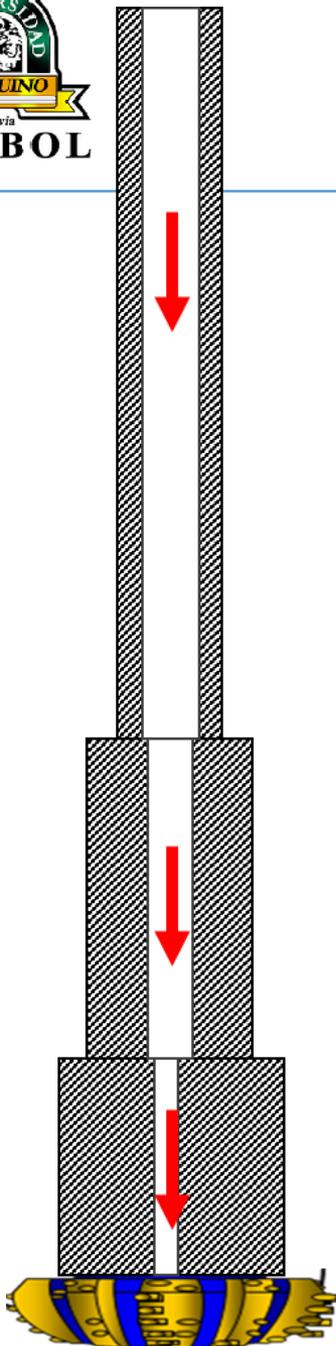


Caso	Tubo Vertical	Manguera	Unión giratoria, etc.	Kelly	Longitud Eq. 3,826-pulg. DI
1	40 pies de largo, 3-pulg. DI	45 pies de largo, 2-pulg. DI	20 pies de largo, 2-pulg. DI	40 pies de largo, 2.25-pulg. DI	2.600 pies
2	40 pies de largo, 3.5-pulg. DI	55 pies de largo, 2.5-pulg. DI	25 pies de largo, 2.5-pulg. DI	40 pies de largo, 3.25-pulg. DI	946 pies
3	45 pies de largo, 4-pulg. DI	55 pies de largo, 3-pulg. DI	25 pies de largo, 2.5-pulg. DI	40 pies de largo, 3.25-pulg. DI	610 pies
4	45 pies de largo, 4-pulg. DI	55 pies de largo, 3-pulg. DI	30 pies de largo, 3-pulg. DI	40 pies de largo, 4-pulg. DI	424 pies

# PÉRDIDA DE PRESIÓN INTERIOR DE LA SARTA



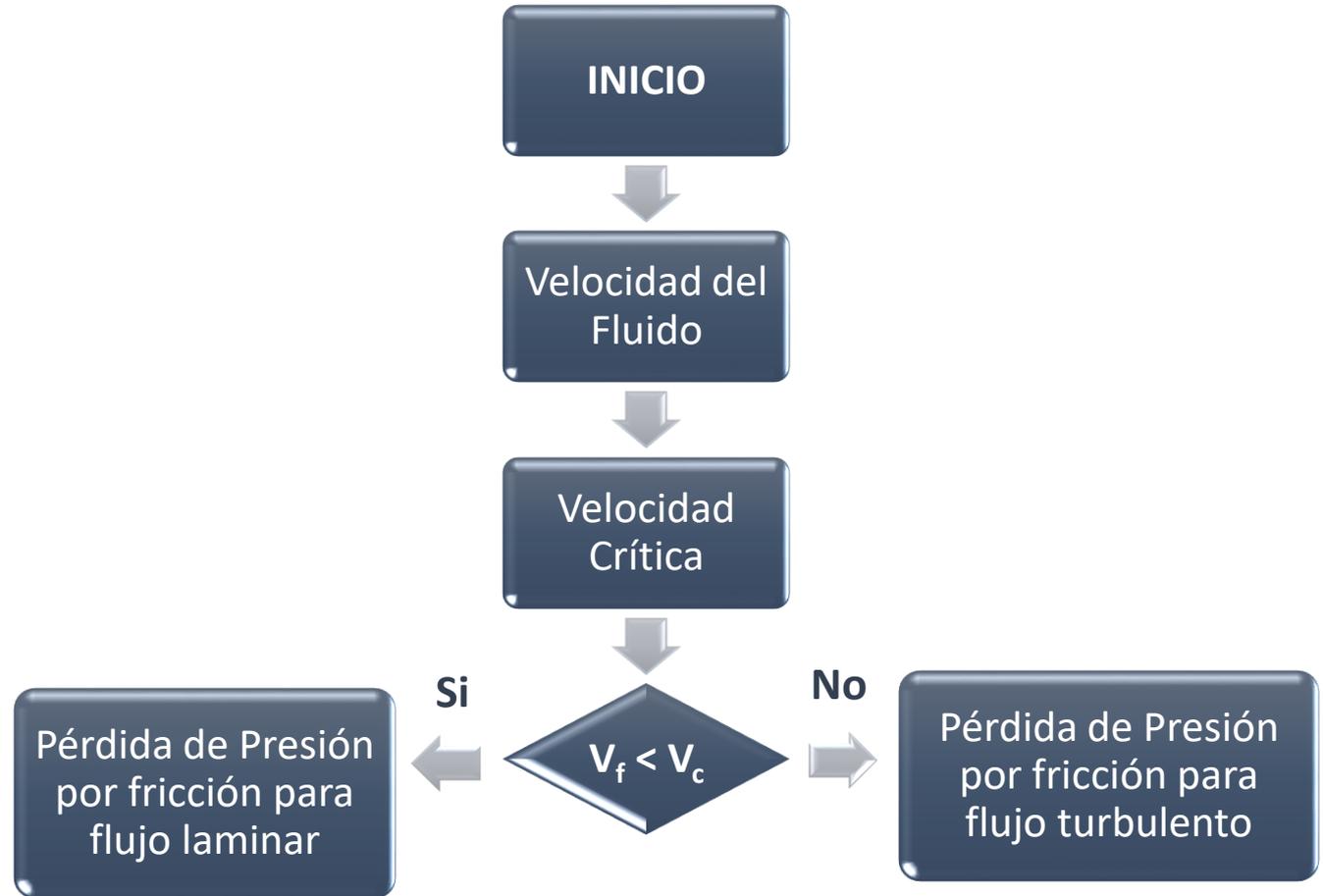
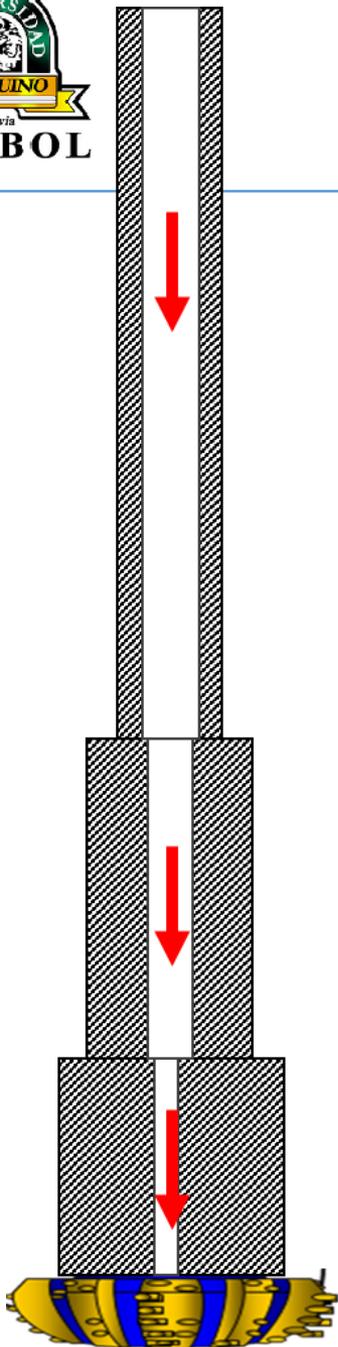
Para el cálculo de las pérdidas de presión por fricción se utilizará el modelo exponencial.



## VELOCIDAD CRÍTICA

Es la velocidad a la cual, el régimen de flujo pasa de laminar a turbulento.

# PÉRDIDA DE PRESIÓN INTERIOR DE LA SARTA



# PÉRDIDA DE PRESIÓN INTERIOR DE LA SARTA

VELOCIDAD DEL FLUIDO (ft/min)

$$V_f = \frac{24,5 * Q_B}{ID^2}$$

VELOCIDAD CRÍTICA (ft/min)

$$V_C = \left( \frac{5,82 \times 10^4 * k}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{2-n}} * \left( \frac{1,6 * (3n + 1)}{ID * 4n} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

$V_f < V_C \rightarrow$  Flujo Laminar

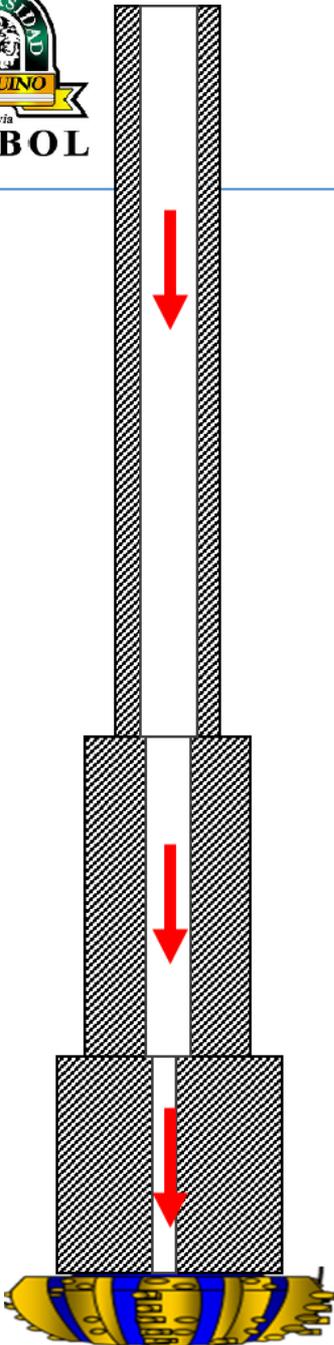
$V_f > V_C \rightarrow$  Flujo Turbulento

PÉRDIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN PARA FLUJO LAMINAR (psi)

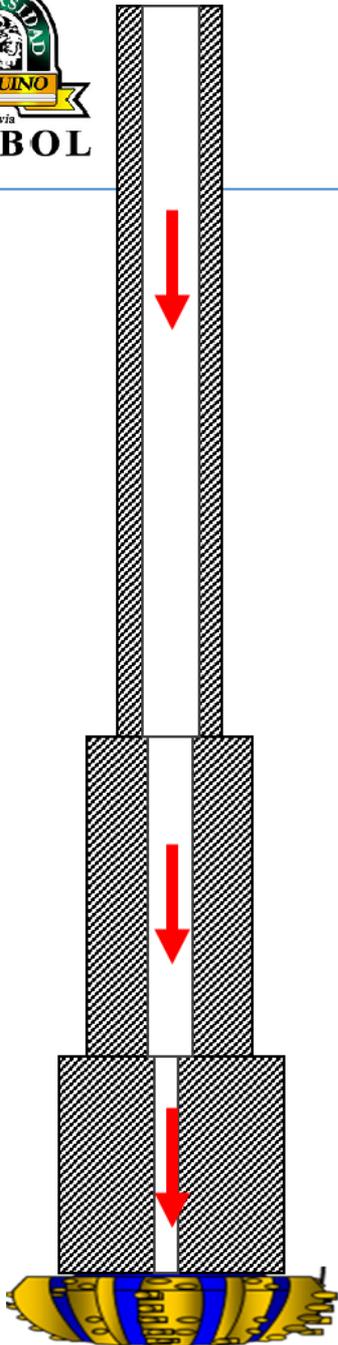
$$\Delta P_f = \left( \frac{1,6 * V_f * (3n + 1)}{ID * 4n} \right)^n * \frac{k * L}{300 * ID}$$

PÉRDIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN PARA FLUJO TURBULENTO (psi)

$$\Delta P_f = \frac{2,27 \times 10^{-7} * \rho_L^{0,8} * V_f^{1,8} * VP^{0,2} * L}{ID^{1,2}}$$



# PÉRDIDA DE PRESIÓN INTERIOR DE LA SARTA



## NOMENCLATURA

$V_f$  = Velocidad del fluido (ft/min)

$Q_B$  = Caudal de la bomba (GPM)

$ID$  = Diámetro Interno de la herramienta (pulg)

$V_C$  = Velocidad crítica (ft/min)

$n$  = Índice de flujo

$k$  = Índice de consistencia

$\rho_L$  = Densidad del lodo (ppg)

$\Delta P_f$  = Pérdida de presión por fricción

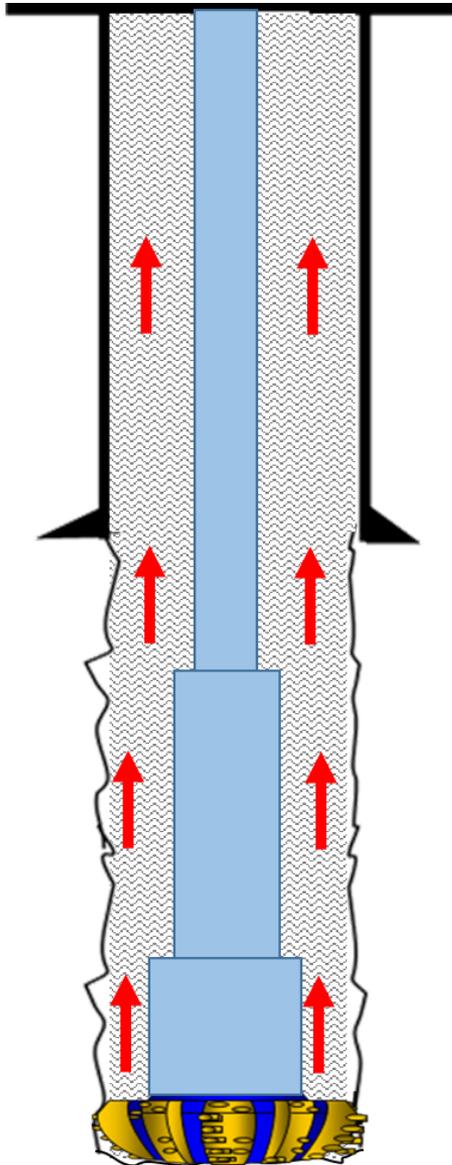
$L$  = Longitud de la sección (ft)

$VP$  = Viscosidad Plástica (cp)

# PÉRDIDA DE PRESIÓN ESPACIO ANULAR



Perforación



**VELOCIDAD DEL FLUIDO (ft/min)**

$$V_f = \frac{24,5 * Q_B}{D_H^2 - OD^2}$$

**VELOCIDAD CRÍTICA (ft/min)**

$$V_C = \left( \frac{3,878 \times 10^4 * k}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{2-n}} * \left( \frac{2,4 * (2n + 1)}{(D_H - OD) * 3n} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

$V_f < V_C \rightarrow$  Flujo Laminar

$V_f > V_C \rightarrow$  Flujo Turbulento

**PÉRDIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN PARA FLUJO LAMINAR (psi)**

$$\Delta P_f = \left( \frac{2,4 * V_f * (2n + 1)}{(D_H - OD) * 3n} \right)^n * \frac{k * L}{300 * (D_H - OD)}$$

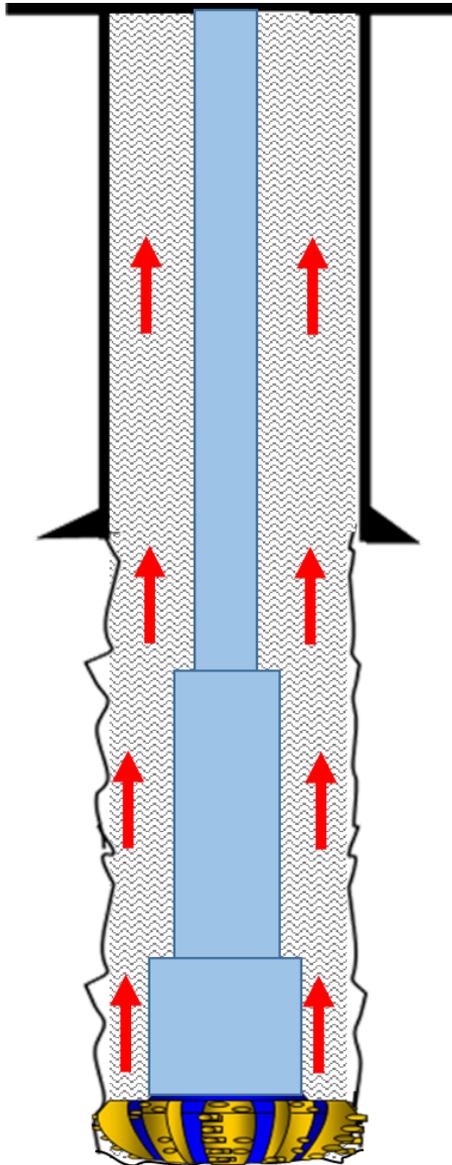
**PÉRDIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN PARA FLUJO TURBULENTO (psi)**

$$\Delta P_f = \frac{7,7 \times 10^{-5} * \rho_L^{0,8} * Q_B^{1,8} * VP^{0,2} * L}{(D_H - OD)^3 * (D_H + OD)^{1,8}}$$

# PÉRDIDA DE PRESIÓN ESPACIO ANULAR



Perforación



## NOMENCLATURA

$V_f$  = Velocidad del fluido (ft/min)

$Q_B$  = Caudal de la bomba (GPM)

$OD$  = Diámetro Externo de la herramienta (pulg)

$D_H$  = Diámetro del agujero

- Agujero Abierto OH  $\rightarrow \phi_{bit}$
- Agujero Entubado CH  $\rightarrow ID_{cañ}$

$V_C$  = Velocidad crítica (ft/min)

$\rho_L$  = Densidad del lodo (ppg)

$n$  = Índice de flujo

$k$  = Índice de consistencia

$\Delta P_f$  = Pérdida de presión por fricción

$L$  = Longitud de la sección (ft)

$VP$  = Viscosidad Plástica (cp)

# PÉRDIDA DE PRESIÓN TRÉPANO



ÁREA DE FLUJO TOTAL (pulg<sup>2</sup>)

$$TFA = \frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{1304}$$

VELOCIDAD EN LAS BOQUILLAS (ft/seg)

$$V_{bit} = \frac{0,32 * Q_B}{TFA}$$

PÉRDIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN EN EL TRÉPANO (psi)

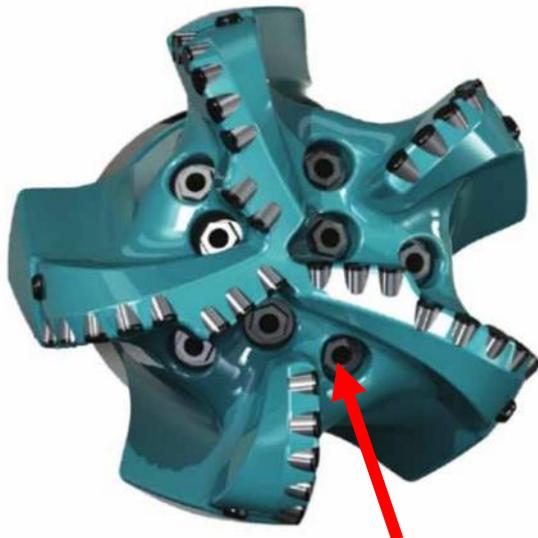
$$\Delta P_{f_{bit}} = \frac{\rho_L * V_{bit}^2}{1120}$$

## NOMENCLATURA

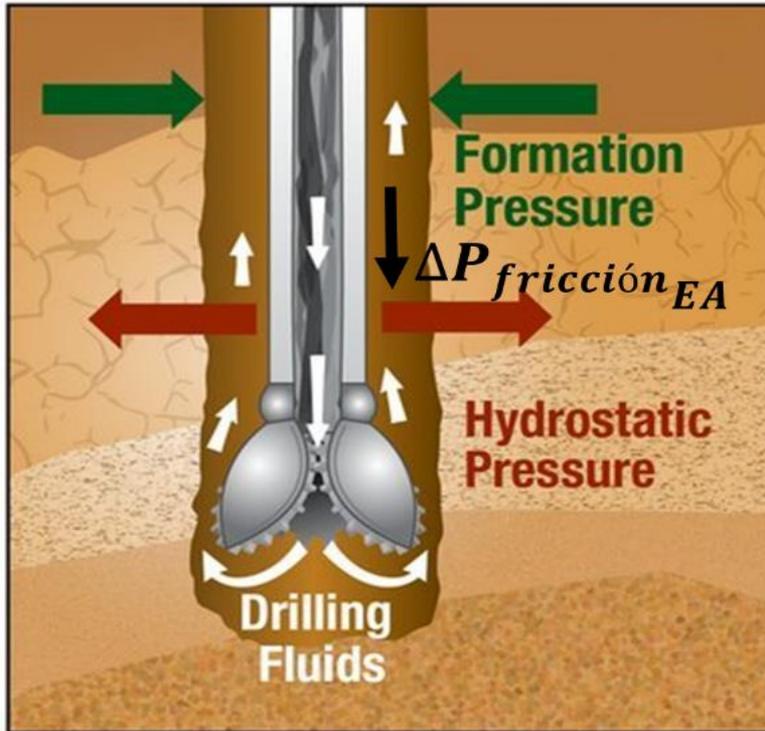
$d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2$  = Diámetro de las boquillas del trépano (pulg)

$Q_B$  = Caudal de la bomba (GPM)

$\rho_L$  = Densidad del lodo (ppg)



**Boquillas**



$$\begin{array}{cc}
 \downarrow & \downarrow \\
 PH & \Delta P_{fricción_{EA}}
 \end{array}$$

$$P_{fondo} = PH + \Delta P_{fricción_{EA}}$$

@ CONDICIONES ESTÁTICAS

$$P_{fondo} = PH = 0.052 * \rho_{Lodo} * h_{TVD}$$

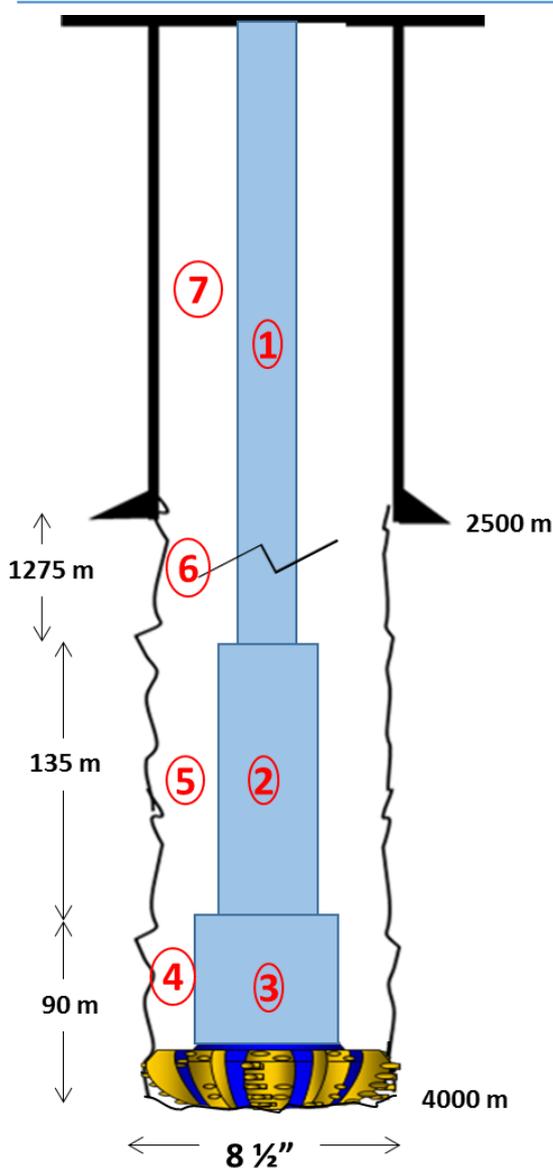
@ CONDICIONES DINÁMICAS

$$P_{fondo} = PH + \Delta P_{fricción_{EA}}$$

# PRESIÓN DE CIRCULACIÓN



Perforación



## PRESIÓN DE BOMBA

$$P_B = \Delta P_{f_{con\ sup}} + \Delta P_{f_{int\ hta}} + \Delta P_{f_{bit}} + \Delta P_{f_{EA}}$$

## PRESIÓN EN EL MANÓMETRO DEL STAND PIPE

$$SPP = P_B - \Delta P_{f_{con\ sup}}$$

## DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN

$$\rho_{EDC@fondo} = \rho_L + \frac{\Delta P_{fricción_{EA@fondo}}}{0.052 * h_{TVD}}$$

$$\rho_{EDC@zap} = \rho_L + \frac{\Delta P_{fricción_{EA@zap}}}{0.052 * h_{zap}}$$

# FLASH RECORDATORIO



Perforación

- *El rendimiento de la perforación está directamente relacionado con las restricciones mecánicas impuestas por el equipo de perforación.*
- *Al controlar las propiedades reológicas del lodo, se puede optimizar el rendimiento, operando dentro de los límites mecánicos impuestos por el equipo de perforación.*
- *Las propiedades reológicas del lodo deberían ser controladas para que se pueda transmitir a la barrena la mayor parte posible de la presión máxima admisible de circulación del equipo de perforación, reduciendo las pérdidas de presión parásitas en las conexiones superficiales, la columna de perforación y el espacio anular, sin perjudicar la limpieza del pozo o la suspensión de los sólidos.*
- *Se debe mantener una óptima hidráulica de perforación a fin de mantener una máxima limpieza en el agujero y se logre un alto ROP durante las operaciones de perforación.*

