

## Análisis estático y dinámica de fluidos de una cabeza de cementación para pozos petroleros

Static and fluid dynamic analysis of an oil well cementing head

Luis Alberto **Ramírez López**<sup>1</sup>, Jesus **Bermudez Vilchiz**<sup>2</sup>, Iván Enrique **Martínez Merlín**<sup>3</sup>,  
Víctor Augusto **Castellanos Escamilla**<sup>4</sup>, Apolinar **Albiter Hernández**<sup>5</sup>

Tecnológico Superior de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Tlalnepantla, MÉXICO

<sup>1</sup> ORCID: 0009-0009-8286-3371 | M18250509@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0000-0137-0458 | M18250511@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-9030-5024 | iemerlin@hotmail.com

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0001-8511-4477 | victor.ce@tlalnepantla.tecnm.mx

Instituto Mexicano del Petróleo, Ciudad de México, MÉXICO

<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-9097-5981 | aalbiter@imp.mx

Recibido 02-05-2024, aceptado 19-06-2024.

### Resumen

Con base al diseño realizado de una cabeza de cementación de doble tapón para pozos petroleros, se realizó un análisis fluidodinámico considerando los flujos mínimos, máximos y presiones de una unidad de alta presión (UAP) además de análisis por elementos finitos para observar el comportamiento del dispositivo al aplicar diferentes presiones internas, simulando la presión de operación y de prueba hidrostática. El análisis de fluidos permitió observar y detectar los puntos en donde el fluido presenta acumulaciones con la finalidad de modificar la geometría y reducir este efecto mejorando el flujo del cemento evitando la generación de taponamientos y posibles daños al sistema de bombeo de cemento, los resultados obtenidos validaron el diseño de cabeza de cementación, asegurando el cumplimiento de los requisitos específicos de resistencia a las presiones de operación y los valores de flujo de cemento de manera eficiente para su implementación en pozos.

**Palabras clave:** dinámica de fluidos, análisis por elemento finito, cementación, simulación, SolidWorks®.

### Abstract

Based on the design of a double plug cementing head for oil wells, a fluid dynamic analysis was carried out considering the minimum and maximum flows and pressures of a high-pressure unit (HPU) as well as finite element analysis to observe the behavior of the device when applying different internal pressures, simulating the operating and hydrostatic test pressure. The fluid analysis allowed observing and detecting the points where the fluid presents accumulations to modify the geometry and reduce this effect, improving the flow of cement and avoiding the generation of clogging and possible damage to the cement pumping system, the results obtained validated the cementing head design, ensuring compliance with the specific requirements of resistance to operating pressures and cement flow values in an efficient way for its implementation in wells.

**Index terms:** fluid dynamics, finite element analysis, cementing, simulation, SolidWorks®.

## I. INTRODUCCIÓN

Las operaciones de cementación de pozos principalmente constan del bombeo de cemento en un espacio anular para prevenir la filtración de fluidos [1] o pérdida de circulación [2], existen operaciones primarias que aseguran la formación del pozo [3] y secundarias que reparan fisuras y aseguran la integridad [4] de una formación existente [5], para estos procesos es necesario contar con equipos y componentes esenciales que permitan llevarlo a cabo.

La cabeza de cementación es un dispositivo que actúa como un puerto de bombeo que se conecta directamente a la tubería de revestimiento, esta cuenta con una longitud y diámetro variable con conexión roscada que varía dependiendo de cada pozo y tipo de operación, tiene conexiones laterales para líneas de bombeo de cemento y de lodos para el desplazamiento de la lechada de cemento y tapones [6]. Existen cabezas de cementación de un solo tapón (véase Fig. 1) estas permiten desplazar un solo tapón por vez, son más compactas y esencialmente permiten realizar las operaciones de cementación y las de dos tapones (véase Fig. 2) permitiendo de esta forma hacer más ágiles las operaciones que requieran la liberación de múltiples tapones.



Fig. 1. Cabeza de cementación de un tapón [7].



Fig. 2. Cabeza de cementación de doble tapón [8].

Una cabeza de cementación de doble tapón brinda un mejor control de bombeo durante las operaciones de cementación, minimiza en gran medida la posibilidad de contaminación del pozo por lodos asegurando así mayor efectividad y homogeneidad, por esta razón se selecciona este tipo de equipo ya que resulta ideal para el uso en la mayoría de las operaciones en pozo. Este tipo de equipos están sometidos a diferentes condiciones de operación, se manejan diferentes presiones y flujos dependiendo de la operación a realizar [9], son de especial interés las presiones de trabajo y de prueba hidrostática con base en la **NOM-020-STPS-2011** [10] siendo 5,000 y 7,500 psi respectivamente, cada operación requiere de un flujo volumétrico específico o “gasto” ya sea de cemento o fluidos desplazadores [11], de igual forma que con las presiones los datos más relevantes son el flujo mínimo y máximo que pueda brindar la unidad de alta presión (UAP), siendo 3.5 y 7.5 BPM respectivamente de la UAP HT-400 [12], los flujos varían dependiendo de la operación puede ser más o menos lo requerido, en operaciones de *liner* llegan a haber casos que requieren desde 2.5 BPM hasta 8.5 BPM [13].

Estas variables de flujo y de presión ayudan a la selección de los equipos requeridos, entre mayor sea la demanda de presión y flujo requerido las características del equipo van a cambiar para satisfacer las necesidades, sobre todo las operaciones que requieren de liberación secuencial de tapones para poder desplazar los fluidos [14], el hecho de que estos equipos estén sometidos a altas presiones y flujos de distintos tipos de fluidos hace relevante que cada diseño, tenga que ser sometido a diferentes análisis computacionales antes de su fabricación para poder determinar si estos soportarán las variables mencionadas y cumplen con las normativas.

El método de análisis por elementos finitos es muy utilizado en ingeniería para poder analizar sistemas complejos y verificar si estos cumplen con los requisitos de resistencia y normas como ya se ha mencionado, la forma en la que esto se lleva a cabo se basan en cálculos matemáticos que tienen bases como las ecuaciones diferenciales, sistemas de ecuaciones y sistemas matriciales, el primer paso es la discretización y división de los elementos a analizar en muchos más individuales a este, el número de elementos varía dependiendo de la geometría y tamaño del elemento, en el caso hipotético de una viga puede dividirse en tramos rectos de igual magnitud. Posteriormente se realiza la matriz de rigidez de cada elemento seccionado, la fórmula (1) para este caso es la siguiente:

$$K_1 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1a) \qquad K_2 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1b)$$

Donde:

$E$  = módulo de Young

$A$  = área transversal de la sección transversal

$L$  = longitud del elemento

Con las matrices de cada elemento se realiza una matriz global de rigidez, esta va a variar dependiendo de la cantidad de nodos resultantes de la división de elementos, la resolución de la matriz global (2) involucra condiciones de frontera que involucran las fuerzas que actúan en determinados nodos ya sean cargas o puntos de sujeción, estas se presentan como  $u_1, u_2 \dots u_n$ .

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Un ejemplo de una matriz global (3) para un análisis de 3 nodos y dos elementos es:

$$K = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 \\ -2 & 4 & -2 \\ 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La solución para el sistema de ecuaciones (4) viene dada por:

$$Ku = F \quad (4)$$

Posteriormente se calculan las tensiones (5) de cada elemento con:

$$\sigma_e = \frac{E}{l_e} (u_j - u_i) \quad (5)$$

La unión de los resultados del cálculo de cada elemento dependerá del cuerpo sometido a análisis y la división de este, la interpretación de resultados de tensiones o deformaciones obtenidas dependerá del material y el tipo de elemento sometido a análisis considerando los límites elásticos y condiciones propias del análisis como sus cargas externas aplicadas.

El análisis computacional consiste de igual forma en dividir un objeto real en una gran cantidad de elementos finitos, que pueden llegar a ser miles o incluso cientos de miles, estos se analizan individualmente y se integran sus comportamientos individuales para estimar cómo se comportará el objeto completo en situaciones reales [15], Espinoza *et al.* [16] realizaron un análisis de un componente dentro de un recipiente sometido a presión haciendo uso de la herramienta computacional ANSYS®, observando los desplazamientos de este y los efectos de una presión ejercida en la superficie del elemento analizado, concluyendo que el elemento soportará las presiones esperadas de operación ya que los esfuerzos máximos son inferiores a los admisibles del material.

Andrés González *et al.* [17] analizan un elemento que también forma parte del ramo de los hidrocarburos como lo es la tubería flexible, se analiza por métodos computacionales para poder determinar la integridad estructural obteniendo las deformaciones mínimas y máximas de cada capa que compone la tubería, de esta forma determinar en qué punto fallará cada una de estas y determinar las condiciones óptimas de servicio.

El análisis mostrado a continuación tiene como objetivo analizar un diseño de una cabeza de cementación de doble tapón, sometiendo este diseño a presiones de operación, de prueba hidrostática y pruebas de fluidez de cemento por medio de análisis de fluidos por medio de la herramienta computacional SolidWorks®, así como mostrar las ventajas de modificar aspectos que influyen en la capacidad de fluir del cemento, con esto se espera obtener valores que validen el diseño para su fabricación además de mostrar la importancia de realizar análisis de fluidos a este tipo de equipos.

## II. DESARROLLO

### A. Simulación

El uso de herramientas computacionales como SolidWorks® [18] permiten realizar diferentes tipos de análisis para diversas geometrías y estructuras complejas, de esta forma es posible comprobar el cumplimiento de los requisitos mecánicos y así reducir los costos de producción de piezas que pudieran o no resultar con fallas [19], reduciendo el espesor de los materiales con base a los resultados de las simulaciones pudiendo determinar un espesor ideal de los elementos y de esta forma se podría reducir el costo de producción al usar menos o incluso otro tipo de material.

#### 1) Análisis estático

Los análisis estáticos tienen la finalidad de simular el comportamiento de una estructura, pieza o ensamble para determinar si sus características finales cumplen con las necesidades y/o requisitos mínimos para su fabricación [20], en este punto, el análisis estático se enfoca en la resistencia del equipo cuando está sometido a una presión uniformemente distribuida en el interior, simulando así una prueba hidrostática de seguridad para asegurar que estos funcionarán a una determinada presión y de igual forma someterlos a 1.5 veces más la presión de operación como prueba de seguridad.

Para este análisis se utiliza el material 4140R del cual están fabricados estos y otra gran variedad de equipos usados en pozos petroleros, las propiedades y usos de este tipo de acero pueden obtenerse directamente de los catálogos de proveedores [21] y de la propia librería de materiales de SolidWorks® (véase Tabla 1).

TABLA 1.  
PROPIEDADES DEL ACERO 4140R. FUENTE: SOLIDWORKS®

Propiedad	Valor	Unidades
Modulo elástico	$2.10 \times 10^{11}$	Pa
Coefficiente de Poisson	$2.8 \times 10^{-1}$	N/D
Módulo cortante	$7.9 \times 10^{10}$	Pa
Densidad de masa	7800	$\frac{kg}{m^3}$
Límite de tracción	$1 \times 10^9$	Pa
Límite elástico	$7.5 \times 10^8$	Pa
Conductividad térmica	$1.87247 \times 10^{-1}$	$\frac{W}{m \times K}$
Calor específico	$4.3994 \times 10^2$	$\frac{J}{kg \times K}$

### a) Ejecución e interpretación del análisis

El mallado del diseño es un aspecto fundamental ya que a mayor finura será mayor la exactitud del análisis, varía dependiendo de la geometría del elemento a analizar ya que en geometrías complejas el número de elementos finales aumenta para poder analizar correctamente curvas y formas complejas además, se toma en cuenta la potencia del ordenador ya que a mayor cantidad de elementos es mayor la exigencia al procesador, se realiza el mallado más fino posible (véase Fig. 3) para obtener un resultado más preciso, sin embargo también resultaría útil realizar un análisis de sensibilidad aplicando variaciones en el mallado para comparar los resultados y elegir el mallado óptimo para este sin embargo, por las curvaturas de las conexiones del cuerpo se precisa de un mallado fino para poder analizar de forma más detallada estas zonas, con ayuda del asistente de mallado se obtiene una malla de 145,148 elementos y 232,933 nodos.

5

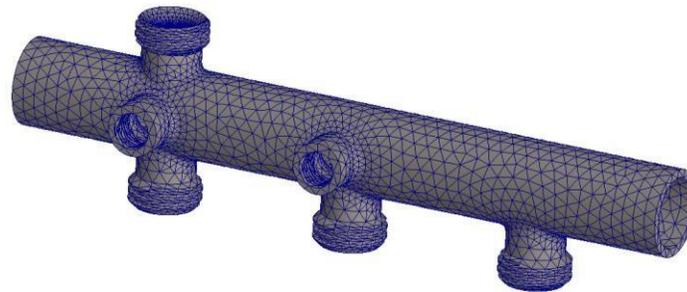


Fig. 3. Mallado del cuerpo.

La forma de aplicar las cargas externas que se aplican en el cuerpo debe ser definida de forma específica, tanto en la forma de distribución como en las unidades que se manejan, en este análisis la carga es uniformemente distribuida debido a que se simula la presión y se considera uniforme en el interior del cuerpo del equipo (véase Fig. 4), este factor y el mallado son de los más importantes ya que de estos depende un correcto análisis.

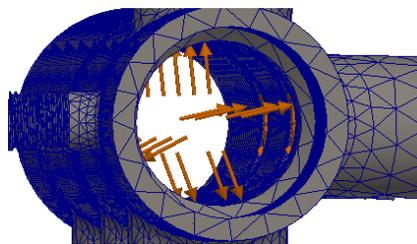
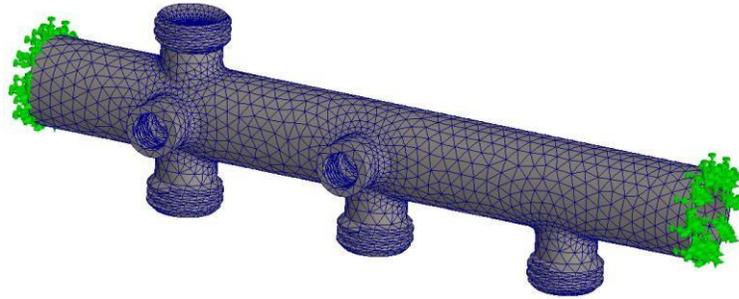


Fig. 4. Distribución uniforme de presión.

En este caso particular se realizan dos análisis con presiones de 5,000 y 7,500 libras por pulgada cuadrada (psi), simulando la presión máxima de operación y la presión de prueba hidrostática a 1.5 veces la presión nominal de trabajo tal como lo estipula la norma **NOM-020-STPS-2011** [10].

Los puntos de sujeción (véase Fig. 5) de una pieza definirán el comportamiento de esta al momento de ejecutar un análisis estático, al momento de aplicar una fuerza el cuerpo tiende a desplazarse ya sea a tensión, compresión o torsión, la forma y el punto en el que se definan las sujeciones va a definir hacia dónde y cómo se llevaran a cabo estos desplazamientos, en este caso la sujeción está en el punto inferior simulando la conexión a pozo y en la parte superior simulando que está sujeta desde su punto de izaje.



6

Fig. 5. Sujeciones.

Los resultados de los análisis estáticos se representan por medio de una escala de colores y la representación de estos en el cuerpo del diseño analizado (véase Fig. 6), esta representación muestra los valores más bajos desde el color azul hasta los valores más altos obtenidos en color rojo, sin embargo no significa que el diseño fracture o presente algún defecto, el límite elástico del material delimita cuál es el límite máximo de tensión que este soporta, si las esfuerzos máximos presentes en el análisis son menores que el límite elástico no habrá ruptura o daños en el diseño, el factor de seguridad y desplazamientos se muestran de igual forma en estas escalas de colores únicamente cambia la información y unidades que estos representan.

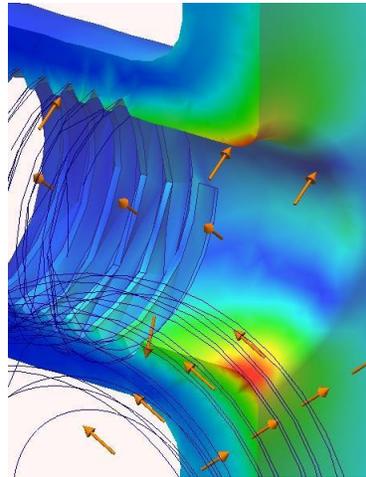


Fig. 6. Representación de resultados.

## 2) Análisis de fluidos

El principio de la prueba de dinámica de fluidos consiste en simular el comportamiento de un fluido en un medio, definiendo parámetros ideales de un fluido específico en este caso, un fluido con las propiedades de cemento clase H [22], el cual es el más usado en operaciones de cementación gracias a que puede ser usado hasta 2,500 metros [23], se espera poder determinar en el cuerpo de la cementadora los puntos críticos de caída de velocidad del fluido y determinar si existen incrementos de presión que puedan afectar al equipo.

Con base a las normas **API SPEC 10A/ISO 10426-1** [24] Specification for Cements and Materials for Well Cementing, **ASTM C150-07** [25] Standard Specification for Portland Cement, **Halliburton Red Book** [26] se determinan los valores de las propiedades del cemento clase H (véase Tabla 2).

TABLA 2.  
 PROPIEDADES DE LÍQUIDO NO NEWTONIANO BASADO EN CEMENTO CLASE H.

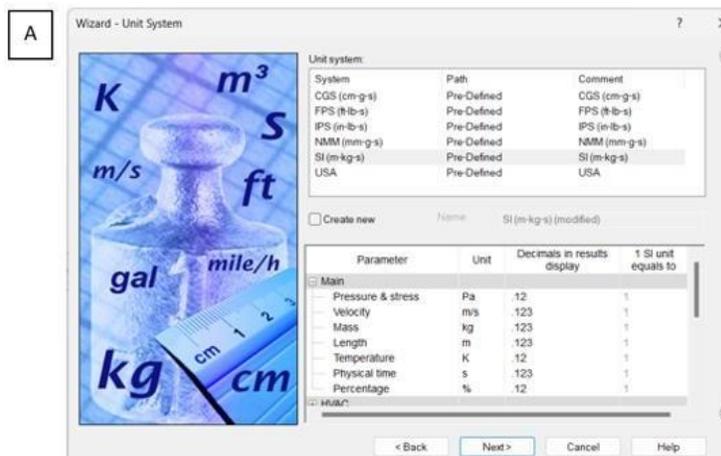
Propiedad	Valor
Densidad	1965.15 $\frac{kg}{m^3}$
Calor específico	920 $\frac{J}{kg \times K}$
Conductividad térmica	1.5 $\frac{W}{m \times K}$
Viscosidad	Modelo Hershel-Bulkley
Coefficiente de consistencia	10 Pa×s
Esfuerzo cortante	12.7 Pa
Power-law index	0.5

7

La alta densidad y las propiedades de un fluido no newtoniano hacen que el estudio del comportamiento de este fluido [27] dentro de la cabeza de cementación adquiera una gran relevancia y evite las acumulaciones de cemento en geometrías complicadas, así como el aglutinamiento o pre fraguado en dichas zonas que pueden llegar a causar taponamientos y daños en el equipo.

a) *Ejecución e interpretación del análisis*

Utilizar el asistente del análisis de fluidos de SolidWorks®, facilita la selección de parámetros básicos como el tipo de análisis, la selección del fluido y las características de este (véase Fig. 7), posteriormente la selección de las caras que tomarán parte esencial del análisis, entre estas las caras planas que se definirán como tapas, las cuales se definirán como entrada, salidas y paredes.



8

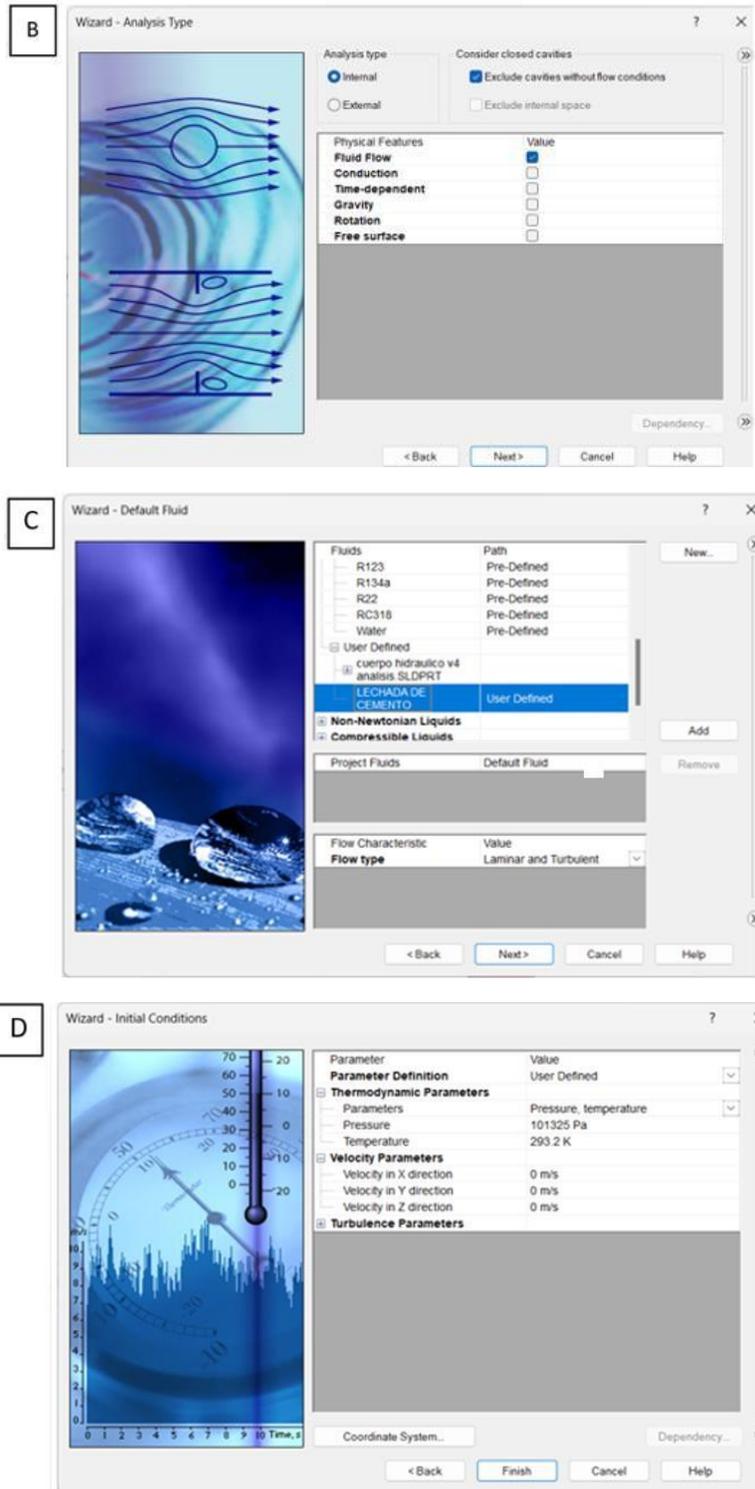


Fig. 7. Definición de tipo de análisis. A) unidades B) tipo de análisis C) tipo de fluido D) condiciones.

La preparación del diseño para el análisis de fluidos comienza con la creación de tapas (véase Fig. 8), estas delimitan el espacio por donde correrá el fluido, estas tapas se colocan en caras planas únicamente y sirven además para poder especificarlas como entradas de fluido, taponos o puntos abiertos a la presión y temperatura atmosférica.

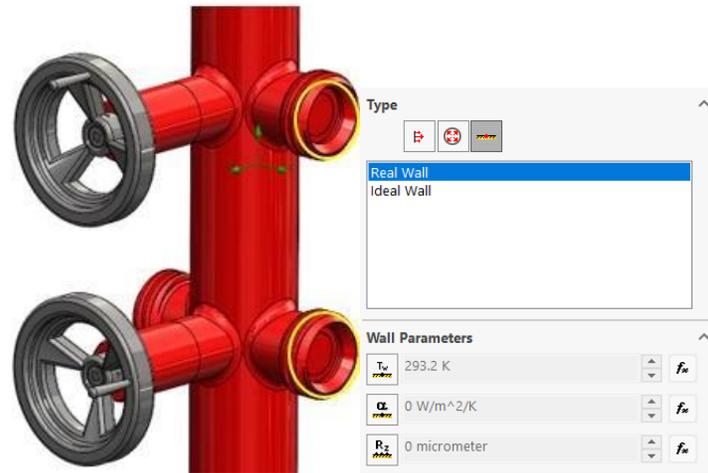


Fig. 8. Selección de caras y definición de tapas.

Con las tapas delimitadas en las caras planas abiertas del diseño se definen las caras que actuarán como paredes, estas paredes serán todas las caras que no admitirán entrada ni salida de fluido.

La salida del fluido es un punto importante a la hora de definir estos parámetros debido a que al ser un sistema “abierto” la presión que entra debe ser igual a la presión que sale ya que no se analiza como un recipiente a presión al ser un análisis dinámico, la tapa inferior deberá ser la indicada (véase Fig. 9) en este caso como salida del fluido ya que será la que se conecta a la sarta de revestimiento, en esta se definirá como presión total y se le dará el valor de la prueba a realizar para observar el comportamiento del fluido.

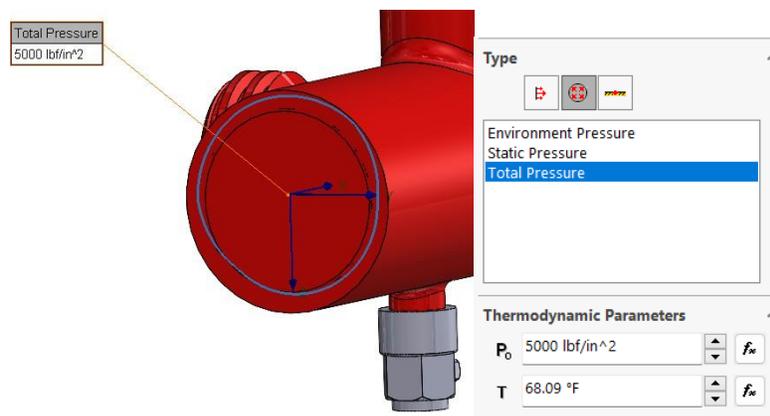


Fig. 9. Definición de cara de salida, presión total.

Con las tapas definidas en todo el cuerpo, se elige la boca de entrada del cemento (véase Fig. 10) definiendo el flujo y presión con el que este entrará al cuerpo de la cementadora, este flujo va a variar dependiendo del análisis.

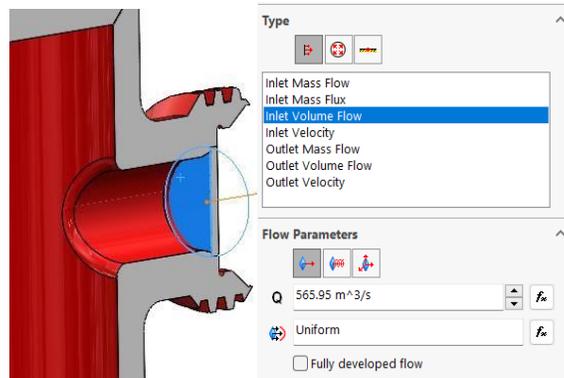


Fig. 10. Definición de tipo de flujo y cara de entrada.

La herramienta computacional determina el espacio entre las tapas como la entidad cerrada por la cual pasará el fluido, una vez definidos todos los parámetros se ejecuta el análisis (véase Fig. 11).

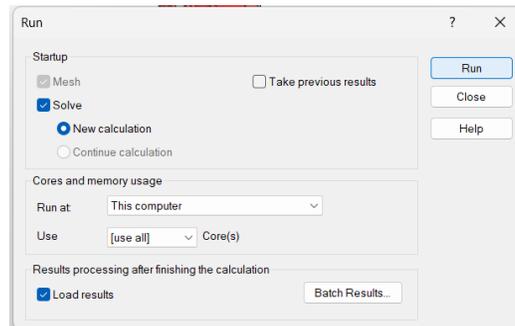


Fig. 11. Ejecución de análisis.

La interpretación de los datos viene dada por las líneas de flujo, estas líneas simulan la trayectoria del fluido definido, en diferentes tipos de análisis sirven para observar como el comportamiento cambia dependiendo de la viscosidad o densidad del fluido en cuestión, estas líneas hay que insertarlas (véase Fig. 12) en el interior del cuerpo del análisis especificando el número y tamaño de líneas que necesitamos para observar el trazado que el flujo tendrá.

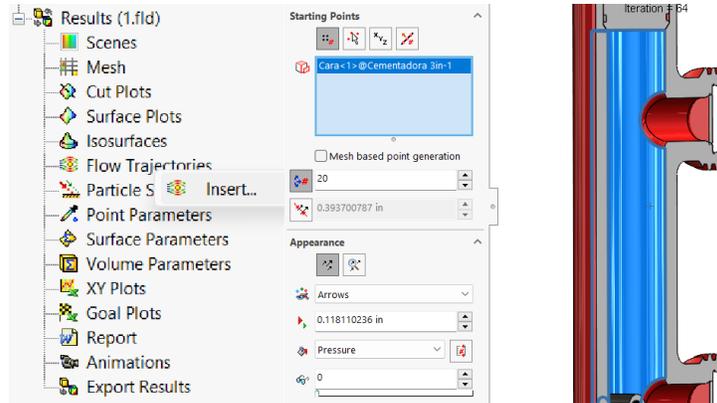


Fig. 12. Selección de trayectoria y cara interior para trazado.

Con las secciones de entrada, salida y las delimitaciones de tipo pared definidas se eligió la entrada superior para el cemento, definiendo el flujo y presión de entrada al cuerpo de la cementadora, este flujo cambiará dependiendo del análisis (véase Fig. 13), SolidWorks® determina el espacio entre las tapas y el interior del cuerpo como el área por la cual pasará el fluido, una vez definidos todos los parámetros se ejecuta el análisis.

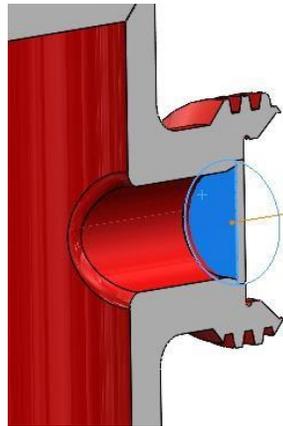


Fig. 13. Definición de entrada de fluido A) cara seleccionada para la entrada de fluido. B) definición de tipo de flujo.

Los resultados de los análisis de dinámica de fluidos se representan por medio de líneas o flechas que se distribuyen a lo largo del cuerpo en el cual se definió el paso del fluido, de igual forma que en el análisis estático los colores representan las magnitudes ya sea de presión o velocidad que presenta el fluido en los puntos por los que pasan las líneas o flechas (véase Fig. 14).

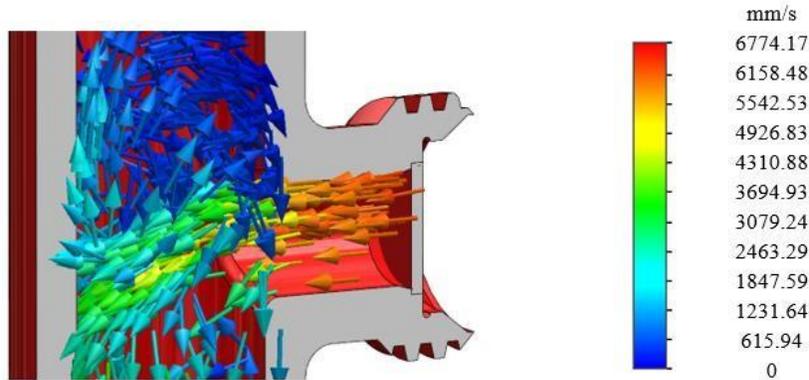


Fig. 14. Representación de resultados de análisis de fluidos.

### III. RESULTADOS

#### A. Análisis estático

Al aplicar una presión 3,447,372.4 Pa (5,000 psi) al interior del cuerpo de forma uniforme genera una tensión máxima de 422,828,127.08 Pa, representada en el cuerpo y en la gráfica en color rojo (véase Fig. 15), este resultado está muy por debajo del límite elástico que es 749,999,997.95 Pa obteniendo un factor de seguridad mínimo en puntos críticos de 1.774, lo cual, valida el diseño a una presión de 3,447,372.4 Pa (5,000 psi).

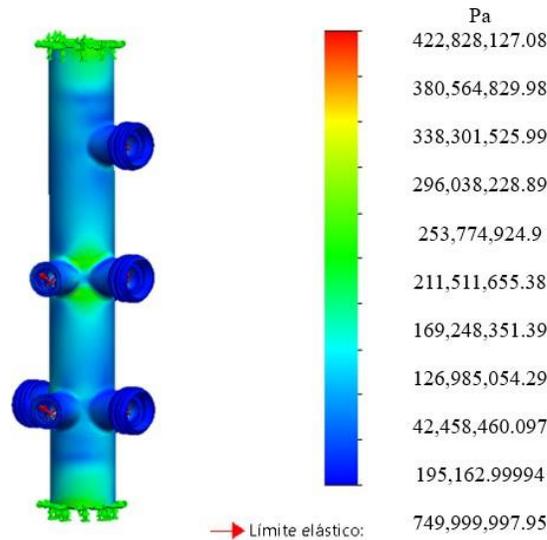


Fig. 15. Esfuerzos resultantes del análisis a 5,000 psi.

Para calcular el factor de seguridad (6) y (7) se realiza una división del límite elástico del material entre el valor máximo de esfuerzos obtenidos, este sencillo cálculo se realiza para ambos análisis estáticos:

$$Factor\ de\ seguridad = \frac{limite\ elástico}{esfuerzo\ máximo} \quad (6)$$

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{749,999,997.95 \text{ Pa}}{422,828,127.08 \text{ Pa}} = 1.774 \quad (7)$$

El factor de seguridad valida el diseño con un valor superior a 1 obteniendo un valor mínimo de 1.7 en los puntos críticos de concentración de esfuerzos (véase Fig. 16), dichos puntos se encuentran en las uniones de las entradas de cemento, sin embargo, el factor de seguridad elevado valida este diseño como seguro.

13

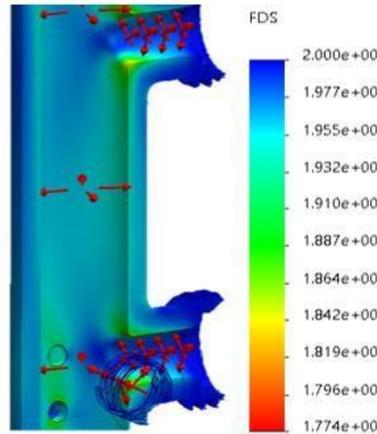


Fig. 16. Factor de seguridad del análisis a 5,000 psi.

Con base a la norma **NOM-020-STPS-2011** se ejecuta el análisis estático nuevamente, pero con 1.5 veces la presión de trabajo, los 51,710,586.19 Pa (7,500 psi) de presión en el interior del equipo generan un máximo de tensión en puntos críticos de 633,206,131.98 Pa (véase Fig. 17) que, aún se encuentra por debajo de los 749,999,997.95 Pa del límite elástico del material, esto valida el diseño a la presión de una prueba hidrostática.

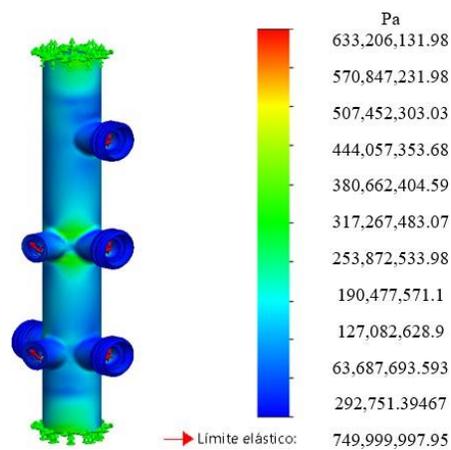


Fig. 17. Esfuerzos resultantes del análisis a 7,500 psi.

El factor de seguridad mínimo en los puntos críticos (8)-(9) de las entradas de cemento tiene un valor de 1.18 lo cual, valida el diseño en estas condiciones de presión (véase Fig. 18), los puntos en los que existe la concentración máxima de esfuerzos son mínimos y se presentan en las uniones de las entradas de cemento, esto puede cambiar dependiendo del proceso y calidad de la soldadura que se aplique en estas uniones.

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{limite elástico}}{\text{tensiones máximas}} \quad (8)$$

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{749,999,997.95 \text{ Pa}}{633,206,131.98 \text{ Pa}} = 1.184 \quad (9)$$

14

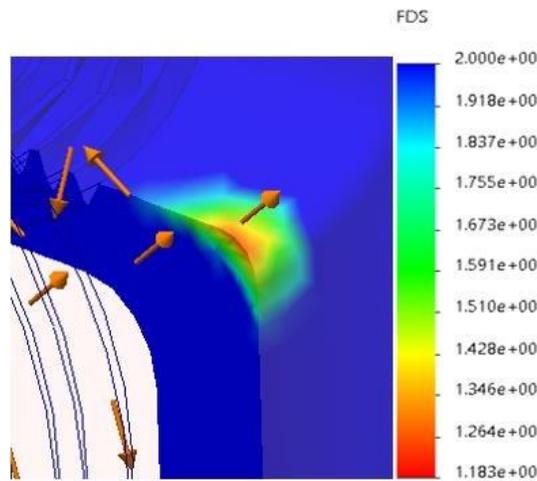


Fig. 18. Factor de seguridad del análisis a 7,500 psi

### B. Análisis de fluidos

Los análisis de fluidos se realizarán tomando como base el flujo y presión mínimos y máximos de la unidad de alta presión para considerar el comportamiento del fluido en ambos regímenes de presión y caudal, mencionado esto, el factor principal por el cual se realiza este tipo de análisis es para reducir el efecto que tiene la geometría en la entrada del cemento ya que por la geometría existe un desvío importante de fluido a la zona superior (véase Fig. 19), eso puede provocar taponamientos como se ha mencionado anteriormente.

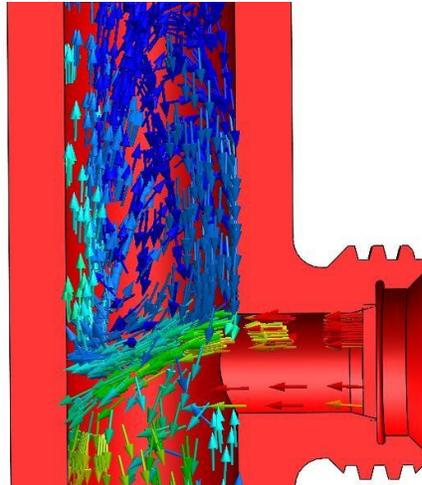


Fig. 19. Desvío superior.

Con base a los desvíos apreciados se reduce la distancia entre el tapón superior y la primera entrada de cemento con el objetivo de reducir lo más posible este efecto del fluido, se realizaron dos análisis, uno a caudal mínimo y otro al máximo de una unidad de alta presión utilizando el fluido diseñado de cemento clase H para observar las líneas en cada uno, de esta forma determinar si existirá alguna acumulación de cemento, pérdida o incremento de presión ya con la modificación.

En el primer análisis se hace pasar cemento a presión y 3.5 BPM y 344,738 Pa (50 psi), al ingresar el cemento al cuerpo de la cementadora impacta directamente en el interior, se desplaza hacia arriba y abajo del cuerpo, la variación de presión como se aprecia no representa un incremento importante sin embargo ayuda a apreciar el desplazamiento de las flechas representativas de flujo (véase Fig. 20).

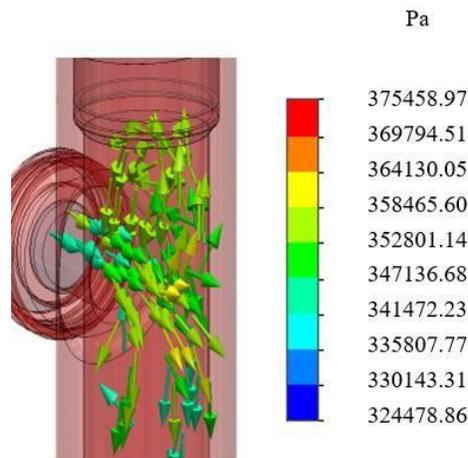


Fig. 20. Resultados de prueba a 344,738 Pa y 3.5 BPM.

La pérdida de velocidad de desplazamiento del fluido afecta directamente el comportamiento del cemento a inyectar en el pozo ya que podría conllevar taponamientos en puntos importantes de la operación por lo que las líneas flujo se modifican para observar este fenómeno, incluyendo también la gráfica de variación y el punto

más representativo de la caída de velocidad, la velocidad en la entrada del fluido alcanza un punto mínimo crítico de 0 in/s, a pesar de esto la extensión de estas líneas no es tan larga por obvias razones, lo que significa que la modificación reduce el flujo del cemento a la zona superior (véase Fig. 21) y la recirculación del fluido es más sencilla.

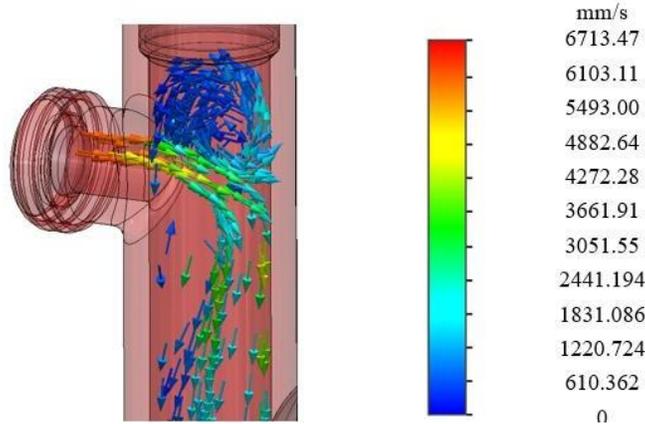


Fig. 21. Representación de caída de velocidad a 50 psi, 3.5 BPM.

El comportamiento de la velocidad del fluido es importante (véase Fig. 22), se observa que debido a la densidad y al hecho de que el cemento entra e impacta con las paredes de la cementadora se presenta una disminución drástica de la velocidad, esto está representado en las líneas de color azul ya que muestran el nivel más bajo de velocidad que alcanza el cemento observado en la gráfica de cambio, sin embargo, se mantiene en un punto estable a lo largo del cuerpo de la cementadora manteniendo un flujo constante.

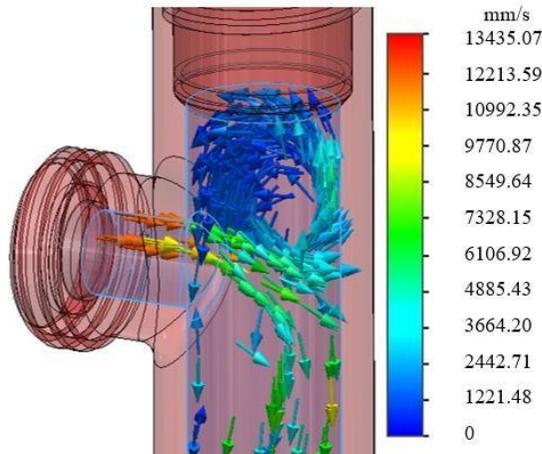


Fig. 22. Resultados de velocidad de la prueba a 7 BPM y 51,710,586.19 Pa.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se reportan los análisis de esfuerzos y fluidos realizados a una cabeza de cementación. Los resultados del análisis de esfuerzos con una presión de  $3.4474 \times 10^7$  Pa (5,000 psi) muestran esfuerzos máximos de 422,828,127.08 Pa contra un límite elástico de 749,999,997.95 Pa, proporcionando un factor de seguridad mínimo de 1.8 en puntos críticos de concentración de esfuerzos. Fuera de estos puntos, el factor supera un valor de 2, que sugiere la posibilidad de reducir el diámetro exterior del equipo para disminuir su peso.

17

Por otro lado, el análisis bajo presión de prueba hidrostática de 51,710,586.19 Pa (7,500 psi) arroja un valor máximo de esfuerzos de 633,206,131.98 Pa, acercándose al límite elástico y resultando en un factor de seguridad de 1.18. A pesar de este incremento de presión, el equipo puede soportar los esfuerzos resultantes de la prueba estática, validando el diseño para su fabricación.

El análisis de fluidos se realizó con un fluido no newtoniano con propiedades de un cemento tipo H, el más común en operaciones de cementación. Esto permitió observar que la geometría inicial provocaba un desvío significativo hacia la zona superior, lo que podría causar taponamientos debido a la disminución de la velocidad del fluido llegando a tener un estancamiento representado con líneas de velocidad de 0 mm/s. Estas acumulaciones pueden reducir la eficiencia de bombeo de la lechada y obstruir el paso en el cuerpo y las mangueras conectadas, la propuesta es reducir la distancia entre el tapón superior y la primera entrada de fluido mostrando una disminución importante de este desvío y mejorando el flujo dentro del equipo.

En este estudio, se realizaron análisis por elementos finitos y de dinámica de fluidos sobre una cabeza de cementación, evaluando su comportamiento bajo presiones operativas y de prueba hidrostática. Los resultados demuestran que el equipo soporta adecuadamente los esfuerzos impuestos, validando su diseño para condiciones de campo. Sin embargo, el margen de seguridad reducido bajo prueba hidrostática sugiere oportunidades para optimizar el diseño, especialmente en términos de reducción de peso sin comprometer la integridad estructural. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para mejoras futuras y garantizan la viabilidad del equipo en aplicaciones reales.

Futuros estudios podrían enfocarse en realizar análisis dinámicos que consideren los efectos de las cargas cíclicas y las variaciones térmicas, las cuales podrían influir en el comportamiento a largo plazo del equipo. Además, sería valioso explorar diferentes materiales o tratamientos superficiales que podrían mejorar la resistencia a la fatiga y a la corrosión, factores críticos en entornos operativos severos.

#### REFERENCIAS

- [1] F. Carlos, J. Guzmán, L. Gonzalez, K. Malave, “Aplicación de cementación remedial para solucionar problemas de producción en pozos petroleros,” Tesis Ingeniería, Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2012, Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19720>
- [2] Schlumberger Co. “Cementación.” glossary.slb.com/es. Energy Glossary. Accessed: Oct. 4th 2023. [Online]. Available: <https://glossary.slb.com/es/terms/c/cementing>
- [3] J. A. Aizprúa Borbor, M. E. Quinde Mero. “Cementación primaria del pozo Jame ubicado en el campo Mina del oriente ecuatoriano.” Tesis Ingeniería, Ingeniero en Petróleo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2014. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/29893>
- [4] B. E. Estrada Estrada. “Cementaciones forzadas en reparaciones menores y mayores.” Tesis Ingeniería. Ingeniería Petrolera. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2019. Available: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/16499>
- [5] E. B. Nelson, D. Guillot, *Well Cementing*. Texas, USA: Schlumberger, 2006. Available: <https://www.slb.com/resource-library/book/well-cementing>
- [6] D. Albarrán Flores, L. A. Hernández Sandoval, “Cementación de pozos petroleros en aguas profundas,” Tesis Ingeniería. Ingeniería Petrolera. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2012. Available: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1790>

- [7] Focus Technology Co., “Casing Single Plug Cementing Head for Well Drilling China API,” Petroleum Machinery Parts. Accessed: Oct. 8th 2023. [Online]. Available: <https://lakepetro.en.made-in-china.com/product/kFWTmcoDvtfQ/China-Casing-Single-Plug-Cementing-Head-for-Well-Drilling-China-API.html>
- [8] Focus Technology Co., “Double Plug Casing Cementing Head,” Petroleum Machinery Parts. Accessed: Oct. 8th 2023. [Online]. Available: <https://lakepetro.en.made-in-china.com/product/SFifDjeoZTtY/China-Double-Plug-Casing-Cementing-Head.html>
- [9] F. Guerra Chávez, “Cementación de pozos de petróleo,” Tesis Ingeniería, Ingeniería de Petróleo, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 1961.
- [10] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, “NOM-020-STPS-2011,” México, 2011. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/138731/NOM-020-STPS-2011.pdf>
- [11] M. V. Avilés Ramírez, D. Hernández Camacho, A. Hernández Plaza, H. A. Oropeza García, A. Suárez Velasco, “Cementación de pozo en aguas profundas,” Tesis Ingeniería, Ingeniería petrolera, Instituto Politécnico Nacional, 2018.
- [12] Olam Energy, “UAP HT-400,” Catálogo de productos. Accessed: Aug. 22nd 2024. [Online]. Available: <https://olamenergy.com/productos/#se6>
- [13] O. Vicente Aguirre, J. López, H. Muñoz, X. Vargas, “Diseño, corrida y cementación de línea de producción en el pozo ESPOL X-4H En El Oriente Ecuatoriano,” Tesis Ingeniería, Ingeniero en Petróleo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2012. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/20959>
- [14] P. A. Herzog Zambrano, K. K. Camba Holguín, M. L. Salinas Merchán, X. E. Vargas Gutiérrez, “Metodología en operaciones de cementación primaria y forzada utilizando nuevas tecnologías,” Tesis Ingeniería, Ingeniero en Petróleo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2011. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14816>
- [15] Autodesk, “Análisis de elementos finitos.” latinoamerica.autodesk.com. Accessed: Nov. 15th 2023. [Online]. Available: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/finite-element-analysis>
- [16] L. Espinoza, O. Andrés González Estrada, C. Graciano, C. Graciano Análisis, “Análisis de un interno tipo brida de un recipiente horizontal a presión utilizando elementos finitos,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 3, 2019, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019015>
- [17] O. Andrés González-Estrada, J. D. Leal-Enciso, J. D. Reyes-Herrera, J. D. Reyes-Herrera Análisis, “Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 15, no. 2, 2017, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016009>
- [18] Dassaut Systemes, “Solidworks,” 3ds.com. 2023. Available: <https://www.3ds.com/products/solidworks>
- [19] Grupo Carman, “Análisis estático,” grupocarman.com/blog/. Accessed: Nov. 26th 2023. [Online]. Available: <https://grupocarman.com/blog/2014/11/06/analisis-estatico/>
- [20] Grupo Carman, “Método de elementos finitos con Solidworks simulation,” grupocarman.com/blog/. Accessed: Nov. 26th 2023. [Online]. Available: <https://grupocarman.com/blog/2013/06/18/solidworks-simulation/>
- [21] Redacción Aceromafe, “Conoce las características y usos del Acero 4140,” aceromafe.com/. Accessed: Nov. 26th 2023. Available: <https://www.aceromafe.com/acero-4140-caracteristicas/>
- [22] Cementos Tequendama, “¿Cuáles son los tipos de cementos para pozos petroleros?” cetesa.com.co. Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: <https://cetesa.com.co/blog/cuales-son-los-tipos-de-cementos-para-pozos-petroleros/>
- [23] A. H. Erazo Flores, “Estudio de la cementación remedial del pozo Tiguino 3,” Tesis ingeniería, Ingeniería en Petróleo, Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador, 2010.
- [24] American Petroleum Institute, “Specification for Cements and Materials for Well Cementing,” Mar. 2019
- [25] American Society for Testing and Materials, “Standard Specification for Portland Cement,” astm.org. 2012. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [26] Halliburton, “Halliburton Technical Data Calculations, Formulae and Slurry Tables.” ir.halliburton.com. 2001. Available: <https://ir.halliburton.com/>
- [27] A. Lavrov, M. Torsæter, “Properties of Well Cement,” in *Springer Briefs in Petroleum Geoscience and Engineering*, USA: Springer Nature, 2016, pp. 9-23. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43165-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43165-9_2)
- [28] S. Montenegro, P. Nicoletti, A. Villanueva, J. Ganiele, S. Lingeri, L. Quinteros, D. Anello, M. Melo, L. Ponzoni, “Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical mediante Solidworks Flow Simulation para hallar los coeficientes estáticos de torque,” *Innova Untref, Revista Argentina de Ciencia y Tecnología*, vol. 1 no.8, 2021. Available: <https://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1235>