



## DISEÑO DE CÁMARAS PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DESPUÉS DE LA DETONACIÓN DE CARGAS PREMOLDEADAS

Maribel Colina<sup>1</sup>, Alfredo Navarro<sup>1</sup>, Alexis Delgado<sup>2</sup>, Alirio Mendez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Zulia. Instituto de Investigaciones Petroleras de la Universidad del Zulia

<sup>2</sup> Cameron Venezolana, S.A.

<sup>3</sup> Petroboscan, S.A.

**Correo electrónico:** mcolina@fing.luz.edu.ve  
**Correo electrónico:** alfredoaguztin51@gmail.com  
**Correo electrónico:** ing.alexis.delgado@gmail.com  
**Correo electrónico:** aliriomendez@hotmail.com

Recibido: 08/01/2015 ~ Aceptado 26/02/2015

### RESUMEN

El propósito de esta investigación es diseñar cámaras para la certificación de cargas premoldeadas utilizadas en cañoneos de pozos petroleros bajo condiciones específicas de esfuerzo, considerando la sección cuatro de las Prácticas Recomendadas publicadas en las normas API 19B (2006) y la API-6A (2011) para cabezales de pozos del Instituto Americano del Petróleo (API). La investigación fue proyectiva con diseño documental y se dividió en una etapa inicial que corresponde a la fase de diseño de ingeniería conceptual, seguido de la fase de la simulación de los esfuerzos en función de la presión máxima de trabajo (69,0MPa), utilizando el programa ANSYS, versión 13.0. Se diseñó una cámara de confinamiento para simular el comportamiento del yacimiento con un diámetro nominal de 346,07 mm (13-5/8 pulgadas), y la otra cámara para simular el comportamiento del pozo de 229,0 mm (9 pulgadas) de diámetro. Finalmente, se seleccionó como material más apropiado para su diseño acero AISI 4130, ya que sus propiedades mecánicas resisten las condiciones de trabajo.

**Palabras clave:** Cámara pozo, cámara yacimiento, carga premoldeada, cañoneo de pozos, simulación de esfuerzos de cámaras.

## **CHAMBERS DESIGN FOR MEASURING FLOW AFTER THE DETONATION OF PRECAST CHARGES**

### **ABSTRACT**

The purpose of this research is to design chambers for certification of precast charges used in oil wells perforators under specific stress conditions, considering section fourth of Recommended Practices published in the standards API 19B (2006) and API-6A (2011) for wellheads of American Petroleum Institute (API). The research was of projective type with documentary design and divided into an initial stage corresponding to the conceptual engineering and the second stage, in which the simulation of the stresses made in terms of maximum working pressure of 69,0MPa, using the ANSYS program 13.0 version. Containment chamber was designed in order to simulate the reservoir behavior with a nominal diameter of 346,07 mm (13-5/8 inches) and the other chamber to simulate the behavior of the well of 229,0 mm (9 inches) of diameter. Finally the steel AISI 4130 was selected as most appropriate material because its mechanical properties hold up working conditions.

**Keywords:** well chamber, reservoir chamber, precast charges, well perforators, chambers simulation stresses.

## **CONCEPTION D' CHAMBRE DE MESURE DU DEBIT APRES LA DETONATION DE CHARGES PREFABRIQUES**

### **RÉSUMÉ**

Le but de cette recherche est de concevoir des chambres pour la certification de charges préfabriqués utilisées dans des perforations de puits de pétrole, dans des conditions d'effort spécifiques, tout en prenant en considération la section quatre des recommandations pratiques publiées dans les normes API 19B (2006) et API-6A (2011) pour les tête de puits de l'American Petroleum Institute (API). La recherche a été de type projectif avec une conception documentaire, et elle a été divisée en deux phases: la première correspond à la création d'ingénierie conceptuelle tandis que la deuxième correspond à la simulation des efforts en fonction de la pression maximale de travail (69,0MPa), ceci en utilisant le logiciel ANSYS, version 13.0. Une chambre de confinement avec un diamètre nominal de 346,07mm (13-5/8 pouces) a été créée pour y simuler le comportement du gisement, et une autre a eu lieu pour la simulation du comportement du puits de 229,0mm (9pouces) de diamètre. Finalement, c'est l'acier AISI 4130 qui a été sélectionné comme le matériau le plus adéquat, dû à ses propriétés mécaniques, résistantes aux conditions de travail.

**Mots-clés:** et la chambre, chambre de réservoir, charge préfabriqué, efforts de simulation cambres

## Introducción

En las operaciones de la industria petrolera, específicamente en las actividades de perforación y completación de pozos, una de las fases más críticas es el proceso de cañoneo, que permite drenar los fluidos de las arenas productoras. La apropiada selección del sistema de disparos es importante, ya que de esto dependerá la productividad del pozo y la disminución de intervenciones adicionales. En este proceso, el cañoneo (punzonamientos o disparos) de pozos de petróleo, gas o inyectoras, deben diseñarse de modo que permitan una eficiente comunicación entre el pozo y el yacimiento, minimizando así, el daño que puedan causar.

El diseño y la construcción del sistema de disparos, ha evolucionado rápidamente y es posible encontrar en el mercado un gran número de proveedores en la búsqueda para obtener los mejores resultados de sus productos, pero se debe demostrar su eficiencia considerando los esfuerzos a los que son sometidas las cargas, mediante pruebas utilizando cámaras que simulen este comportamiento.

En Venezuela no existen equipos de pruebas necesarios para determinar el desempeño de las cargas explosivas, por lo cual se crea una dependencia tecnológica, aumento en los costos y tiempos de espera de los resultados para la validar el funcionamiento de las mismas. Por consiguiente, esta investigación genera un aporte significativo, debido a que se diseñan cámaras sometidas a esfuerzos que conformarán un equipo para certificar las cargas hueca, representando las presiones del pozo y yacimiento, minimizando los problemas anteriormente mencionados, de igual forma, se podrán realizar diversas investigaciones con respecto al proceso de cañoneo y la producción de los yacimientos venezolanos.

En mejoras de la calidad del cañoneo y eficiencia de las cargas en las cámaras para la medición de flujo después de la detonación, el Instituto Americano del Petróleo (API) publicó las primeras prácticas recomendadas para la evaluación de pozos perforados llamada procedimiento estándar para evaluación de pozos perforados RP-43, la cual llegó hasta la quinta edición (1991); estas fueron mejoradas y sustituidas por la RP-19B (2000) y la actualmente vigente la RP-19B segunda edición (2006), que posee una sección adicional a las cuatro originales en la primera edición, en la que se explica un procedimiento para cuantificar el volumen de detritos que se generan de una carga hueca después de la detonación.

El estudio estará constituido de la siguiente manera: introducción, la metodología constituida por una etapa inicial en la que se realiza el diseño conceptual; seguidamente de la segunda etapa, donde se efectúa la simulación de los esfuerzos de las presiones involucradas en el proceso de cañoneo, fundamentos teóricos y finalmente análisis de los resultados, conclusiones y las fuentes consultadas.

## Metodología

La investigación es de tipo proyectiva, ya que se diseñaron dos cámaras para la medición de flujo después de la detonación de una carga hueca, donde Hurtado (2015) propone soluciones a un escenario determinado mediante el proceso de la investigación, en el que debe existir un evento a modificar y no se necesita llegar al funcionamiento de dicho diseño.

La misma estuvo compuesta por una etapa inicial en la que se realizó el diseño de ingeniería conceptual de las cámaras, considerando la cuarta sección de la norma API PR-19B (2006) sobre la evaluación de cañoneo de pozos y la norma API-6A (2011), correspondiente al diseño de cabezales de pozos con la finalidad de establecer la geometría, dimensiones y ubicación espacial de dichas cámaras que permitirán obtener la tasa de

flujo generada por la perforación de las cargas huecas, y así comprobar tanto la eficiencia de flujo en núcleos de yacimientos (CEF) como el factor de reducción de la permeabilidad (PFR) en una actividad de cañoneo bajo condiciones específicas de esfuerzo, y finalmente determinar la eficiencia de las cargas.

La determinación del desempeño de la carga, es más representativa si se determina considerando las condiciones de fondo, es decir, simular los esfuerzos a los que estará sometido el yacimiento cuando se realiza el disparo (presión de poro, presión del pozo y la presión de sobrecarga), estas son consideradas en la sección cuarta de la norma API PR-19B, lo cual ha sido demostrado en laboratorios foráneos entre ellos en el Schlumberger Rosharon Campus (SRC) (Baumann, et al. (2014).

La segunda etapa estuvo constituida por la simulación numérica, donde se desarrolló el modelo tridimensional de las cámaras, utilizando la aplicación computacional Autodesk Inventor versión 2011, con la finalidad de diseñar las cámaras con sus correspondientes dimensiones. Luego se procedió a exportar la información al simulador, utilizando el programa computacional ANSYS versión 13.0, considerando el método de elementos finito, basado en la teoría del criterio de falla de Von Mises citado en Norton (1999), para finalmente determinar los esfuerzos a los cuales estarán sometidos los materiales que componen las cámaras.

El esfuerzo de la explosión se simuló a través de presiones estáticas en todas las paredes internas de las cámaras, utilizando valores críticos de 69,0 MPa (10000 lpc), con el objeto de calcular los esfuerzos a los que estarán sometidas. En este estudio, se consideraron las cámaras como un equipo compuesto por: cámara yacimiento, cámara pozo, cámara adaptadora, barras tensoras, disco de acople, placa superior, pernos, tuercas, y orings.

Las dimensiones iniciales de las cámaras o bridas fueron establecidas con la norma API-6A, donde existen 2 tipos 6B y 6BX, estas presentan un rango de tamaño nominal que dependerá de la presión de trabajo utilizada, donde el tipo 6BX soportan mayores presiones y abarcan la presión de trabajo seleccionada en las cámaras.

La longitud de cada cámara, será planificada a conveniencia del diseñador, sin embargo, la cámara yacimiento, estará limitada por la longitud del núcleo de arenisca de berea directamente relacionada con la profundidad máxima de cañoneo (penetración en la formación), específicamente de la carga seleccionada como límite, la cual dependerá de la cantidad de explosivo utilizado y del tipo de carga, ya sea de alta penetración o diámetro de orificio grande. Las cargas de orificio grande presentan poca penetración y no limitarán la longitud del diseño de la cámara yacimiento, solo se debe estudiar la cantidad de carga que al detonar no sobrepase la presión de trabajo.

## **Fundamentación Teórica**

Las cargas explosivas premoldeadas (huecas) o perforadores a chorros, son utilizadas en la actualidad en sustitución de la bala, para atravesar el revestidor del pozo, estas fueron desarrolladas en función del armamento utilizado durante la Segunda Guerra Mundial a altas presiones (Bellarby, 2009).

Según Baxter, et al. (2009), la operación del cañoneo (disparo o punzado) dentro del pozo productor o inyector en el área petrolera, consiste en disparar un cañón con cargas explosivas premoldeadas, para establecer comunicación entre el pozo y el yacimiento; de igual forma Behrmann et al. (2007), exponen que tanto el daño, como la configuración del disparo influyen significativamente en la caída de presión en las cercanías del pozo; considerando en la geometría del cañoneo el número de disparos,

penetración en la formación, tamaño del orificio y el ángulo entre las cargas.

Asimismo, Baumann, et al. (2012) afirman que la eficiencia de este procedimiento dependerá del tamaño de los cañones, tipo de la carga, el procedimiento realizado, entre otros parámetros. Este proceso permite generar disparos más limpios en condiciones de bajo balance dinámico, alcanzando una mayor limpieza y un mejor desempeño en la producción de los pozos. Este arreglo repercute en el índice de productividad de los pozos, por lo cual, al optimizar dichos parámetros y considerar un diferencial negativo (presión del pozo menor a la presión del yacimiento), se logra maximizar dicha productividad.

El criterio de Von Mises, según Norton (1999), llamado también criterio de la máxima energía de distorsión, es un criterio de resistencia estática, el cual, es aplicado a materiales dúctiles, donde el material no fluirá en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto, no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción. El criterio de resistencia se escribe matemáticamente como:

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left( (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right)} < S_y \quad (1)$$

Donde  $S_y > 0$  es el límite de fluencia a tracción.  
 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  representan las tensiones principales.

Esta ecuación permite evaluar el criterio de falla del material en función de los esfuerzos principales que se producen en las cámaras a diseñar, cuando estas son sometidas a presión y al comparar el esfuerzo de fluencia del material con el esfuerzo de Von Mises se determina la posibilidad de falla del material.

Por otra parte, el Método de Elementos Finitos (MEF) citado por Fonseca (2011), es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería, hoy comúnmente empleado para la resolución de incógnitas que involucran un alto grado de complejidad, de matemáticas aplicadas, así como las físico-matemática; ya que la gran mayoría de los inconvenientes que se presentan en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, para realizar una discretización espacial de la región en estudio y la determinación de propiedades de materiales, entre otros parámetros.

Así mismo, ANSYS (2013) es una herramienta computacional que permite diseñar modelos óptimos, utilizando el MEF y el criterio de Von Mises a partir de la evaluación numérica para determinar distribución de tensiones generadas por los efectos de carga axial y por consiguiente los esfuerzos estáticos permisibles en estructuras. Este software permite conocer los riesgos y el desempeño de un elemento u equipo antes de ser manufacturado minimizando el tiempo de su construcción (Osorio, et al.: 2010).

Es importante resaltar, que los núcleos de arenisca de berea provienen de una formación de los EEUU que afloran en una banda que abarca desde el norte de Kentucky pasa por la ciudad de Berea, en Ohio y luego ingresa en Pensilvania (Baxter, et al.:2009). Estos son utilizados oficialmente para realizar pruebas de cañoneo bajo condiciones de fondo, que están establecidas en la sección cuarta de las normas API 19B (2006).

## Resultados y Análisis

La primera cámara diseñada en forma cilíndrica, ubicada a la izquierda, llamada cámara pozo, estará sometida en la prueba a la presión del pozo inicial de 6,89 MPa (1000 lpc), y a la presión de la explosión de la carga 69,0MPa máxima, razón por la cual estará constituida por un acumulador de gas, que disipará la presión generada por el gas del explosivo, como se observa en la figura 1.



**Figura 1. Distribución areal de la cámara yacimiento y de la cámara pozo**  
Fuente: Elaboración propia (2015).

Así mismo, se observa la segunda cámara en forma cilíndrica, llamada cámara yacimiento ubicada a la derecha de la figura 1, sometida a la presión de yacimiento o presión de poro con 10,34 MPa (1500 lpc) y una presión de sobrecarga de 31,03MPa (4500 lpc). La presión del pozo sugerida para la prueba en la norma API RP 19B es de 7 MPa (1000 lpc), sin embargo con el propósito de desarrollar otros trabajos de investigación, la cámara se diseñó con una presión máxima de 69,0MPa; éstas podrían ser diseñadas a una presión mayor de trabajo, pero aumentarían sus dimensiones y el presupuesto de construcción.

Por consiguiente, un óptimo diseño de la carga pozo se realizó con la presión máxima a la cual se desea trabajar, también se utilizó información sobre las características de las cargas huecas a certificar, como lo son tamaño de orificio para la adaptación en la cámara del porta carga; cantidad de carga, para saber la magnitud de la presión de la explosión; y longitud de la penetración para dimensionar el tamaño del núcleo de arenisca de berea que será atravesado por la carga. Se utilizaron presiones bajo balance como se exige en la norma API RP-19B (2006), con un desbalance a favor de la cámara yacimiento de 3,45MPa (500 lpc), o la condición sobre balance para otras investigaciones.

El diámetro interno mínimo mecanizado de la cámara yacimiento se fijó en 304,8mm (12 pulgadas), según la norma PR-19B (2006), limitadas a la máxima presión de trabajo. En esta investigación las cámaras se diseñaron para soportar una presión de 69,0 MPa, con la finalidad de ahorrar costos y minimizar complicaciones en la construcción del equipo.

En ese estudio, se realizó la simulación con el software ANSYS 13.0 considerando el criterio de Von Mises, que predice que el modelo, falla cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen supera el límite de fluencia del material (Norton, 1999). Posteriormente se sometieron las cámaras a la presión de trabajo (69,0 MPa), determinando la cantidad de nodos para obtener los cálculos de esfuerzo y un factor de seguridad mayor a uno (1); utilizando tipo de Acero 4130, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la simulación de las cámaras (ANSYS 13.0)

ELEMENTO	MATERIAL	ESFUERZO DE FLUENCIA	NODOS	PESO (lbm)	FACTOR DE SEGURIDAD
Cámara pozo	4130	60	89507	1076	>1
Cámara yacimiento	4130	60	185859	3683	>1

Fuente: Elaboración propia (2015).

Igualmente, la figura 2 representa una escala de colores que va desde el color azul, que muestra las zonas menos esforzadas del sistema, hasta el rojo que muestra las zonas más críticas donde se concentran los mayores esfuerzos indicando la posible cedencia del material. Esta simulación presenta como resultado que el equipo diseñado y ensamblado con todos sus componentes, no falla en ninguno de sus elementos, demostrando la integridad del equipo debido a que la figura no muestra colores rojos.

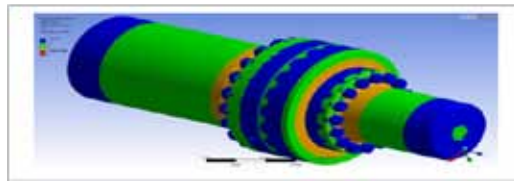


Figura. 2. Factor de seguridad en el equipo utilizando Acero 4130 (ANSYS 13.0)

Fuente: Elaboración propia (2015).

Finalmente, se recomienda utilizar Acero 4130 para la construcción de las cámaras, debido a que el material soporta los esfuerzos y mantiene un factor de seguridad aceptable; sin embargo se puede trabajar con Acero 4140, si se quiere aumentar el factor de seguridad y la presión de trabajo, pero aumentaría el costo asociado a la construcción de las cámaras.

Después de haber realizado la simulación, las dimensiones básicas de la cámara pozo, se establecieron con un máximo diámetro interno de 229,0 mm (9 pulgadas), un diámetro externo 373,1 mm (14,69pulgadas), con una tolerancia de +/- 3 mm y longitud de 633,5 mm (24,4 pulgadas). Las dimensiones básicas de la cámara del yacimiento, se fijaron con un diámetro interno de 346.07 mm (13-5/8 pulgadas), un diámetro externo 550,9 mm (21,69 pulgadas), con una tolerancia de +/- 3, finalmente con una longitud de 1194, 6 mm (47,03 pulgadas), como se observan en las figuras 3 y 4.

La cámara yacimiento, estará constituida por el porta núcleos con capacidad 914,14 mm (36 pulgadas) de longitud, sometida a la presión de yacimiento y la de sobrecarga; ambas cámaras soportarán un máximo de 69,0 MPa.

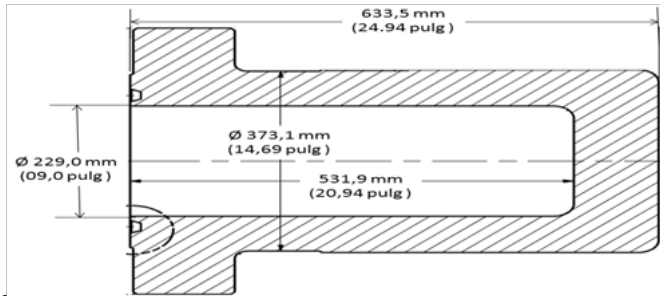


Figura 3. Dimensiones de la cámara pozo (materia prima)

Fuente: Elaboración propia (2015).

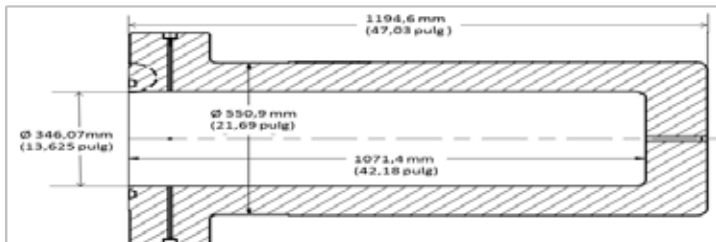


Figura 4. Dimensiones de la cámara yacimiento (materia prima)

Fuente: Elaboración propia (2015).

## Conclusiones

El diseño de estas cámaras ensambladas como equipo, permitirán la medición de flujo después de la detonación de una carga premoldeada, con la finalidad de determinar su efectividad como un ensayo previo a la certificación, mediante el API.

El material sugerido para la construcción de las cámaras es Acero 4130, debido a que los resultados obtenidos en la simulación numérica utilizando el software comercial denominado ANSYS V13.0, determinaron la integridad de las cámaras con una presión de trabajo de 69,0 MPa, y finalmente arrojaron un factor de seguridad aceptable, que logró validar el diseño propuesto.

El diseño de la cámara yacimiento estará en la capacidad de realizar pruebas con núcleos de areniscas de berea con una longitud adaptada a la penetración promedio de las cargas premoldeadas comerciales utilizadas para cañonear pozos revestidos en los yacimientos venezolanos.



## **Fuentes consultadas**

- American Petroleum Institute (1991). **Recommended Practice for Evaluation of Well Perforators (API RP 43)**. Quinta edición. Washington D.C.
- American Petroleum Institute (2000). **Recommended Practice for Evaluation of Well Perforators (API RP 19B)**. Primera edición. Washington D.C.
- American Petroleum Institute (2006). **Recommended Practice for Evaluation of Well Perforators (API RP 19B)**. Segunda edición. Washington D.C.
- American Petroleum Institute (2011). **Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment (API 6A)**. Vigésima edición. Washington D.C.
- ANSYS (2013). **Element Reference, Canonsburg, PA, USA, ANSYS Inc.** <http://www.ansys.com>. <http://www.autodesk.com/products/inventor/overview>.
- Baumann (2012). **Perforating on Wareline - Weak-Point load Prediction.SPE Review 152431**. Viena. Austria. ppt.13, 1-13.
- Baumann C. et al. (2014). **Perforating Innovations—Shooting Holes in Performance Models. Oilfield Review. Autumn** .Vol. 26, n. 3.ppt.74, 14-31. Houston. Texas.
- Baxter D. et al. (2009). **Operaciones de Disparo: Cuando falla el Objetivo. Oilfield Review. Autumn**. Vol. 21, n. 3.p.p. 55, 4-17.
- Behrmann, L. et al. (2007). **Sistemas de Fluidos Óptimos para las Operaciones de Disparos. Oilfield Review. Summer**. Vol. 19, n. 1.ppt. 69, 14-25.
- Bellarby, J. et al. (2009). **Well Completion Desing, Vol. 56**.Primera edición. Hungría. Editorial Elsevier.
- Fonseca, Z. (2011). **El Método de los Elementos Finitos: Una Introducción**. Fondo Venezuela. Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta.
- Hurtado J. (2015). **El Proyecto de Investigación**. Octava edición. Venezuela. Editorial Quirón.
- Norton R. (1999). **Diseño de Máquinas**. Primera edición. México. Editorial Pearson.
- Osorio A. et al. (2010). **Análisis Numérico de una Placa para Fijación de Fracturas de Radio Distal utilizando el Método de Elementos Finitos**. Revista Ingeniería UC, Vol. 17, n. 1. ppt. 94, 28-36.