

Diseño de una Celda Triaxial Verdadera para realizar pruebas de Wellbore Strengthening en Laboratorio con Aplicación a la Estabilidad de Pozos durante la Perforación

Henry Fernando Castro Hernández

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Ingeniería de Hidrocarburos

Director

Emiliano Ariza León. PhD.

Co-Directores

Néstor Saavedra MSc.

Jorge Rojas. MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2022

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1 Estado de Esfuerzos y Esfuerzos Principales.....	19
2.1.1 <i>Esfuerzos Principales σ_v, σ_H, σ_h</i>	21
2.2 Presión de Poro	22
2.2.1 Presión de Formación Normal	23
2.2.2 <i>Presión de Formación Subnormal</i>	23
2.2.3 <i>Presión de Formación Anormal</i>	23
2.3 Ventana de Lodo	24
2.3.1 <i>Wellbore Strengthening (WBS)</i>	25
2.3.2 <i>Modelos Físicos para Wellbore Strengthening</i>	26
2.3.2.1 Jaula de esfuerzos o Stress Cage (SC)	26
2.3.2.2 Esfuerzo de Cierre de Fractura (FCS).....	28
2.3.2.3 Resistencia a la Propagación de Fractura (FPR).....	28
3. Antecedentes de la Investigación.....	30
3.1 DEA 13	31
3.2 GPRI 2000	32
3.3 RCA	34

DISEÑO DE UNA CELDA TRIAXIAL PARA PRUEBAS DE WBS	3
3.4 University of Alberta	36
3.5 Celda Triaxial en Pruebas de Fracturamiento en Yacimientos Geotérmicos	37
3.6 Biao	38
3.7 Zhong	38
3.8 Cheng	40
4. Desafíos y Resultados Experimentales que Antecedieron al Planteamiento del Diseño de un Equipo para Pruebas de Wellbore Strengthening.....	41
4.1 Etapa No 1: Montaje y Ensayo Experimental de Fracturamiento en una Muestra Sintética usando un Core Holder Full Diámetro.....	41
4.1.1 Descripción de Core Holder full Diámetro Seleccionado	41
4.1.2 Diseño y Fabricación de un Núcleo Sintético para Pruebas de Wellbore Strengthening ...	42
4.1.3 Preparación de un Fluido base para Pruebas de Wellbore Strengthening	44
4.1.4 Ensayo de Laboratorio para el Fracturamiento de una Muestra Sintética Full Diámetro.	45
4.1.5 Resultados y Conclusiones de la Etapa No 1.....	46
Figura 21. Propuesta de modificación de Core Holder Full Diámetro con el fin de fracturar la muestra en un proceso de inyección de fluido base	48
4.2 Etapa No 2: Wellbore Strengthening y Fracturamiento a partir de un Core Holder Convencional Modificado.....	48
4.2.1 Diseño y Fabricación para Acondicionar un Core Holder Convencional	48
4.2.2 Preparación y Caracterización de Muestras Berea	51
4.2.3 Brazilian Test.....	54
4.2.4 Resultados y Conclusiones de la Etapa No 2.....	55

DISEÑO DE UNA CELDA TRIAXIAL PARA PRUEBAS DE WBS	4
5. Diseño de una Celda Triaxial Verdadera para Pruebas de Wellbore Strengthening	56
5.1 Selección del Tipo de Equipo	56
5.2 Metodología	58
5.3 Modelos Realizados Previos al Diseño Final.....	59
5.3.1 <i>Parámetros Requeridos para Pruebas de WBS</i>	60
5.3.2 <i>Modelo de 24 Cilindros</i>	63
5.4 Sistema de Empuje para generar 3 esfuerzos Ortogonales sobre la Muestra	64
5.4.1 <i>Selección del Cilindro Hidráulico</i>	67
5.5 Diseño de Estructura o Frame.....	74
5.5.1 <i>Modelamiento Numérico de la Prensa Hidráulica</i>	78
5.5.2 <i>Modelado General y Análisis Estático</i>	82
5.6 Modelado Final con Factor de Seguridad	88
5.6.1 <i>Esquema General Final</i>	94
5.6.2 <i>Planos de Fabricación</i>	95
6. Análisis de Factibilidad para la Fabricación.....	95
6.1 Factibilidad en la Industria.....	95
6.2 Factibilidad Técnica.....	97
6.2.1 <i>Límite Operacional del Diseño</i>	98
6.2.2 <i>Disponibilidad de Materiales y Equipos para Fabricación</i>	99
6.2.3 <i>Ensamble de la Celda Triaxial Verdadera</i>	101
6.3 Factibilidad Económica	101
6.3.1 <i>Costo de Fabricación</i>	103
6.3.2 <i>Relación Costo - Beneficio</i>	106

6.3.3 <i>Flujo de Desembolso</i>	108
6.3.4 Valor Presente Neto (VPN)	109
6.3.5 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	111
7. Conclusiones	112
8. Recomendaciones	116
Referencias Bibliográficas	118
Apéndices.....	123

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Diferencia entre las Técnicas de Wellbore Strengthening</i>	29
Tabla 2. <i>Propiedades del Fluido de Perforación Base para Ensayo de Fracturamiento</i>	45
Tabla 3. <i>Resultado de análisis petrofísico básico en 18 muestras de Berea</i>	52
Tabla 4. <i>Rango de Parámetros requeridos para el diseño de la Celda.</i>	60
Tabla 5. <i>Catalogo Cilindro hidráulico Rexroth Bosch de 125 mm de Diámetro.</i>	69
Tabla 6. <i>Medidas del Cilindro hidráulico Rexroth CDH3 125.</i>	71
Tabla 7. <i>Cálculo de cargas de acuerdo los tipos de perfil Tipo W, C y Cuadrado</i>	77
Tabla 8. <i>Tabla de factores de seguridad. Valores mínimos recomendados.</i>	91
Tabla 9. <i>Resumen de parámetros aplicados por los diferentes autores durante las pruebas.</i>	
<i>Al final se muestra los límites operacionales del diseño propuesto</i>	98
Tabla 10. <i>Check List de disponibilidad de Piezas y Materiales necesarios para la</i> <i>fabricación de la Celda Diseñada</i>	100
Tabla 11. <i>Cotización No 2, 3 y 4 Correspondiente al Diseño Final.</i>	103
Tabla 12. <i>Datos de inicio estimados para Cálculos y Análisis de Factibilidad Económica.</i>	107
Tabla 13. <i>Tabla de flujo de Acumulado.</i>	108
Tabla 14. <i>Resultados del estudio de Costo - Beneficio</i>	110

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. (a) <i>Cuerpo sometido a esfuerzos normal y de cizalla. (b) Cuerpo sometido a esfuerzos principales donde los esfuerzos de Cizalla son nulos.</i>	20
Figura 2. <i>Cuerpo 3D Sometido a 3 esfuerzos Principales</i>	21
Figura 3. <i>Esquema general de Ventana de Lodo</i>	24
Figura 4. <i>Fenómeno físico de Stress Cage. (Sup) Etapa de Depositación, Puenteo y Sellamiento. (Inf) Etapa de Filtración hacia la Formación y Generación de Stress Cage</i>	27
Figura 5. <i>Muestra después del fracturamiento hidráulico.</i>	32
Figura 6. (a) <i>Esquema descriptivo de los aparatos utilizados en laboratorio para proyecto GPRI 2000 para monitoreo y bombeo de materiales WSM's , (b) Esquema de la celda de prueba con fractura variable, y presión de confinamiento.</i>	34
Figura 7. (Izquierda) <i>Equipo de prueba que genera los 3 esfuerzos principales. (Derecha) Cubo de roca con pozo concéntrico y esfuerzos horizontales aplicados (σ_h, σ_H) por acción de 2 pares de estructura movable</i>	35
Figura 8. (Izquierda) <i>Equipo de fracturamiento hidráulico. (Derecha) Manga de caucho que confina la muestra al ser llenado con agua simulando esfuerzos horizontales</i>	36
Figura 11. <i>Pruebas de Fracturamiento Enfocados a la Investigación de Yacimientos Geotérmicos</i>	38
(a) <i>Estructura de la celda. (b) Bomba Teledyne. (c) Bombas hidráulicas manuales para control de esfuerzos de confinamiento. (d) Sistema de adquisición de datos. (e) Muestra de roca cúbica</i>	39

Figura 13. <i>Equipo de fracturamiento Triaxial verdadero: (a) Sistema de inyección. (b) Estructura general con el sistema de confinamiento y calentamiento.</i>	40
Figura 14. <i>Core Holder Full Diámetro, Laboratorio de Análisis petrofísico-especiales – ICP</i>	42
Figura 15. <i>Preparación de una muestra sintética. Cilindro en PVC de 4” de diámetro x 8.5” de longitud</i>	42
Figura 16. <i>Fabricación de un molde en Madera que servirá para la preparación de un molde en material de Cera Parafínica.</i>	43
Figura 17. <i>(a) Muestra sintética con Wellbore y Concentrador de esfuerzos al interior, (b) Montaje de la muestra en el Core Holder al interior de un horno. (c) Sistema de Monitoreo y almacenamiento de datos OPTO 22 y Bombas hidráulicas Jefri</i>	44
Figura 18. <i>Preparación del lodo de perforación en laboratorio de fluidos</i>	44
Figura 19. <i>Gráfico en tiempo real de P. Confinamiento / P Inyección Vs Tiempo, Ensayo de fracturamiento con lodo base</i>	45
Figura 20. <i>Retiro de muestra después del ensayo con lodo base.</i>	46
Figura 22. <i>Comparativo de un Core Holder Full Diámetro utilizado en el experimento No 1 respecto a Core Holder Convencional utilizado para ser modificado.</i>	49
Figura 23. <i>Plano de diseño de cabezotes en material de Acero 316 para fabricación</i>	49
Figura 24. <i>Cabezotes fabricados en material de Acero 316.</i>	50
Figura 25. <i>Acondicionamiento de Core Holder convencional (Figura 26a) a partir de la fabricación de un nuevo diseño de cabezotes (Figura 26b)</i>	50
Figura 26. <i>Corte de plugs para toma de propiedades y ensayos de fracturamiento</i>	51

Figura 27. (a) <i>Gráfico de datos promedio de porosidad versus Permeabilidad Klinkenberg.</i> (b) <i>Gráfico de datos por muestra de porosidad versus Permeabilidad Klinkenberg</i>	52
Figura 28. <i>Distribución de tamaño de garganta de poros</i>	53
Figura 29. <i>Preparación de una Muestra para Posterior Prueba de Brazilian Test.</i>	54
Figura 30. <i>Celda Triaxial</i>	57
Figura 31. <i>Equipo de prueba con 3 pares de platos que generan los 3 esfuerzos principales</i>	58
Figura 32. <i>Mapa de Conceptualización de la Metodología utilizada para la realización de la una Celda Triaxial Verdadera</i>	59
Figura 33. <i>Esquema inicial de una Celda Triaxial para muestras de 20x20x20 cm (izquierda) y panel de inyección (derecha) que consiste de 3 Bombas manuales y 1 Bomba Eléctrica tipo Jeringa</i>	61
Figura 34. <i>Modelos Previos al Diseño Final.</i>	62
Figura 35. <i>Modelo de Celda No 2 para muestras de 20 x 20 x 20 cm.</i>	63
Figura 36. (a) <i>Sección transversal del sistema de empuje diseñado bajo modelo de la figura 36b.</i> (b) <i>Simulación de Análisis Estático del Cilindro o Camisa del pistón del Sistema de empuje en un Modelo de la figura 36b</i>	64
Figura 37. <i>Diagrama de cuerpo Libre de la cara de la muestra.</i>	67
Figura 38. <i>DCL del Cilindro</i>	68
Figura 39. <i>Disposiciones de los cilindros hidráulicos para la longitud del vástago para caculos de la columna.</i>	72

Figura 40. Catálogo de fabricante, Diagrama de medidas del cilindro hidráulico

Rexroth CDH3 125 Seleccionado..... 73

Figura 41. *Modelo de Cilindro en SolidWorks suministrado por el Fabricante REXROTH*

BOSCH..... 73

Figura 42. Diagrama de Fuerzas en Prensa Axial de una Dirección. 74

Figura 43. *Sección transversal de perfiles a usar en el marco de la prensa.* 75

Figura 43. Marco estructural de la prensa con cargas y restricciones en el modelo de

elementos finitos SolidWorks. 78

Figura 44. *Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa hidráulica con un perfil*

tipo W200 x 79

Figura 45. *Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa hidráulica con un perfil*

tipo C8 x 21.25..... 80

Figura 46. *Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa hidráulica con un perfil tipo*

Tubo Cuadrado 200 x 8 mm..... 81

Figura 47. *Diseño Final Celda Triaxial Verdadera*..... 82

Figura 48. *Mallado generado por SolidWorks para la simulación del marco principal* 83

Figura 49. *Propiedades mecánicas del Acero A36 para usar en la simulación.* 84

Figura 50. (a) *Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con*

un perfil tipo W200 x 52 y una sola carga vertical. (b) Deformación en el marco de la

prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y una sola carga vertical 85

Figura 51. (a) *Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un*

perfil tipo W200 x 52 y las tres cargas axiales en cada eje. (b) Deformación el marco

<i>de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y las tres cargas axiales en cada eje</i>	86
Figura 52. <i>Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y las tres cargas axiales en cada eje reforzando el alma del perfil con lámina.....</i>	88
Figura 53. <i>Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo HEA260 y las tres cargas axiales en cada eje reforzando el alma del perfil con lámina.</i>	89
Figura 54. <i>Deformación el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo HEA260 y las tres cargas axiales en cada eje.....</i>	90
Figura 55. <i>Factor de seguridad en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo HEA260 y las tres cargas axiales en cada eje.....</i>	90
Figura 56. <i>Esfuerzos equivalentes en la placa de ataque del cilindro a la muestra parte frontal.....</i>	92
Figura 57. <i>Esfuerzos equivalentes en la placa de ataque del cilindro a la muestra parte posterior.....</i>	93
Figura 58. <i>Deformaciones en la placa de ataque del cilindro a la muestra.....</i>	93
Figura 59. <i>Esquema general de la Celda Triaxial.....</i>	94
Figura 60. <i>Esquema de diseño del camino de flujo de fluido de fracturamiento al interior de la muestra de formación por medio de un tubo metálico y pegado con material epóxico</i>	94
Figura 61. <i>Fuente de datos de Página Oficial ANH. Reservas probadas de petróleo en Colombia 2020.....</i>	96
Figura 62. <i>Pozos de Desarrollo Perforados en el año 2020.....</i>	97

Figura 63. <i>Comparativo de parámetros operacionales de Celdas Existentes vs El modelo de Celda Diseñado</i>	99
Figura 64. <i>Cotización para la Fabricación del Modelo de Celda No 2, que contempla la fabricación de 24 Cilindros de Empuje</i>	102
Figura 65. <i>Comparativo de Costos de fabricación del Modelo final vs Modelo Inicial</i>	106
Figura 66. <i>Flujo Acumulado (USD) Vs Tiempo (Meses)</i>	109

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Planos de Fabricación	123

Resumen

Título: Diseño de una Celda Triaxial Verdadera para realizar pruebas de Wellbore Strengthening en laboratorio con aplicación a la Estabilidad de pozos durante la Perforación de Pozos*.

Autor: Henry Fernando Castro Hernández**.

Palabras Clave: Wellbore Strengthening, Celda Triaxial Verdadera, Pérdidas de Circulación.

Descripción:

Las técnicas de Wellbore Strengthening juegan un papel fundamental en el proceso de prevención y mitigación de pérdidas de circulación durante la perforación de pozos. Por ello, una de las herramientas a utilizar es la evaluación de fluidos en laboratorio antes de ser utilizados en campo. Las celdas triaxiales son equipos diseñados para realizar pruebas de WBS en laboratorio. A partir de este tipo de pruebas surgen resultados y configuraciones de lodos el cual ayudarán al objetivo de perforar con éxito un tipo de formación con determinadas condiciones.

El trabajo de investigación se divide en 3 fases principales, cada una surgiendo como respuesta a necesidades previamente analizadas. Dicho esto; con el objetivo de realizar pruebas de WBS en laboratorio, se llevó a cabo la fabricación de un núcleo sintético y experimentos de inyección utilizando un Core Holder Full diámetro. Se diseñó y modificó un Core Holder Convencional de menor tamaño a partir de la fabricación de 2 Cabezotes con especificaciones que permitan según los análisis de resultados del primer experimento poder fracturar la muestra durante la inyección de fluidos. Se desarrolló el diseño una Celda Triaxial Verdadera para realizar pruebas de WBS como respuesta a las necesidades de los anteriores experimentos, esta vez sobre muestras cúbicas de formación de 6 in. Con el objetivo de verificar la resistencia estructural de la Celda Triaxial diseñada respecto a los parámetros a utilizar en laboratorio, se llevó a cabo simulaciones de Análisis estático basado en elementos finitos a partir del software comercial de SolidWorks. Con base en el dimensionamiento, los materiales y piezas seleccionadas se construyeron planos para una futura fabricación de la Celda diseñada.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Emiliano Ariza León. PhD. Co-Directores: Néstor Saavedra MSc. y Jorge Rojas. MSc.

Abstract

Title: Design of a True Triaxial Cell to perform Wellbore Strengthening tests in laboratory with application to Well Stability during Well Drilling*.

Author: Henry Fernando Castro Hernández**.

Key words: Wellbore Strengthening, True Triaxial Cell, Lost Circulation.

Description:

Wellbore Strengthening Techniques plays a fundamental role in the process of preventing and mitigating lost circulation during Wells drilling. For this reason, one of the tools to be used is the evaluation of fluids in the laboratory before being used in the field. Triaxial Cells are equipment designed to carry out WBS tests in the laboratory. From this type of tests, results and mud configurations arise which will help the objective of successfully drilling a formation with certain conditions.

The research work is divided into 3 main phases, each one as a response to previously analyzed needs. Therefore; for the purpose of performing WBS tests in the laboratory; fabrication of a Synthetic Core and injection experiments using a Full Diameter Core Holder were carried out. A smaller conventional Core Holder was designed and modified from the manufacture of 2 Heads with specifications that allow, according to the analysis of the results of the first experiment, to be able to fracture the sample during the injection of fluids. A True Triaxial Cell design was developed to perform BWS tests in response to the needs of the previous experiments, this time for 6 in Cubic formation samples. In order to validate the design calculations, Static Analysis Simulations based on Finite Elements Method (FEM) was carried out using a commercial SolidWorks software. Based on the dimensioning, the selected materials and parts, plans were built for a future manufacture of the designed True Triaxial Cell.

* Degree Work.

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Emiliano Ariza León. PhD. Co-Directores: Néstor Saavedra MSc. y Jorge Rojas. MSc.

Introducción

Las pérdidas de circulación hacia la formación es uno de los mayores retos a la hora de perforar un pozo. Es tan común el problema que las compañías presupuestan desde un 10% hasta un 20% adicional para destinarlo a NPT's debido a este tipo de evento (Baggini et al. 2015). Entre las causas de las pérdidas de circulación hay diferentes factores como formaciones depletadas, de alta permeabilidad, formaciones fracturadas naturalmente o falla humana tanto en manejo de fluido de perforación como de parámetros operacionales.

Dentro de los métodos de prevención y remediación de las pérdidas de circulación está la implementación de técnicas de Wellbore Strengthening WBS el cual consiste en circular a través de la formación un fluido con características tales que logre sellar la zona afectada, detener la intrusión de fluido de perforación hacia la formación y finalmente fortalecer la pared del pozo. El propósito de las técnicas para el fortalecimiento del pozo (Wellbore Strengthening WBS); consiste en ensanchar o ampliar el rango o ventana de lodo y así poder perforar con un mayor peso de lodo, garantizando de esta manera la estabilidad del pozo, la limpieza durante la perforación y una operación de cementación exitosa.

Diferentes autores alrededor del mundo han investigado sobre técnicas de WBS en laboratorio como en Campo. A pesar de lo anterior, esta técnica es una rama del conocimiento bastante amplia, generando así la necesidad continua de buscar las mejores técnicas y equipos de ensayo en laboratorio que generen valor al conocimiento y soluciones ante las pérdidas de circulación. De acuerdo con lo anterior. El trabajo de investigación se enfoca en el diseño de un equipo para pruebas de Wellbore Strengthening en laboratorio, donde su funcionalidad se basa en el fracturamiento de muestras a partir de la inyección de fluidos.

El equipo servirá para evaluar diferentes técnicas de WBS, fenómenos de sellado de fracturas, diferentes tipos de materiales y lodos, que servirán como ayuda a la prevención de pérdidas de circulación durante las operaciones en Campo.

El capítulo 2 trata de la conceptualización teórica involucrada y que es necesaria para el entendimiento del alcance de este trabajo de investigación. El capítulo 3 hace una revisión de publicaciones hechas respecto a equipos utilizados en pruebas de WBS en laboratorio. El capítulo 4 muestra el paso a paso de los procesos realizados en laboratorio, logros alcanzados y finalmente los resultados que conllevaron a la decisión de diseñar una Celda Triaxial Verdadera. El Capítulo 5 trata de metodología, el proceso de diseño de una Celda Triaxial Verdadera que es técnicamente sustentada desde el punto de vista de la Resistencia de Materiales a partir de la simulación con Métodos de Elementos Finitos (FEM) con un Software comercial. El Capítulo 6 tiene en cuenta un análisis desde el punto de vista de la necesidad, técnico y económico con el fin de determinar qué tan factible es llegar a realizar la construcción de la Celda Triaxial diseñada. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones contempladas en los capítulos 7 y 8 respectivamente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una Celda Triaxial para pruebas de Wellbore Strengthening en laboratorio con aplicación a la estabilidad de pozos durante la perforación.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer los factores de mayor influencia en las pérdidas de circulación, los diferentes modelos físicos de Wellbore Strengthening y avances tecnológicos en cuanto a equipos y pruebas de Wellbore Strengthening en laboratorio con base en la literatura.
- Analizar los desafíos y resultados experimentales que antecedieron y sirvieron como base al planteamiento del diseño de un equipo para pruebas de Wellbore Strengthening.
- Realizar el diseño de un equipo para pruebas de Wellbore Strengthening en laboratorio con capacidad de simular los 3 esfuerzos principales (σ_h , σ_H , σ_v) sobre una muestra de roca cúbica.
- Realizar un análisis de factibilidad para la fabricación de la Celda diseñada, basándose en argumentos técnicos y económicos.

2. Marco Teórico

Antes de abarcar los aspectos metodológicos que conllevan al objetivo principal de este trabajo, se hace necesario referenciar los aspectos teóricos más relevantes con el fin de generar en esta investigación una base conceptual del tema a tratar.

2.1 Estado de Esfuerzos y Esfuerzos Principales

Existen diferentes tipos de esfuerzo; estos son los esfuerzos normales, esfuerzos de corte o de cizalla, esfuerzos invariantes, esfuerzo promedio, esfuerzo desviatorio y esfuerzo hidrostático. En subsuelo; el estado de esfuerzos de un determinado cubo infinitesimal de formación a determinada profundidad está conformado por esfuerzos normales y esfuerzos de cizalla (Calderón, 2012).

Los esfuerzos de cizalla y esfuerzos normales se pueden definir de la siguiente manera:

$$\sigma_n = \text{esfuerzo normal} = \frac{\text{fuerza normal al plano}}{\text{Area del plano}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

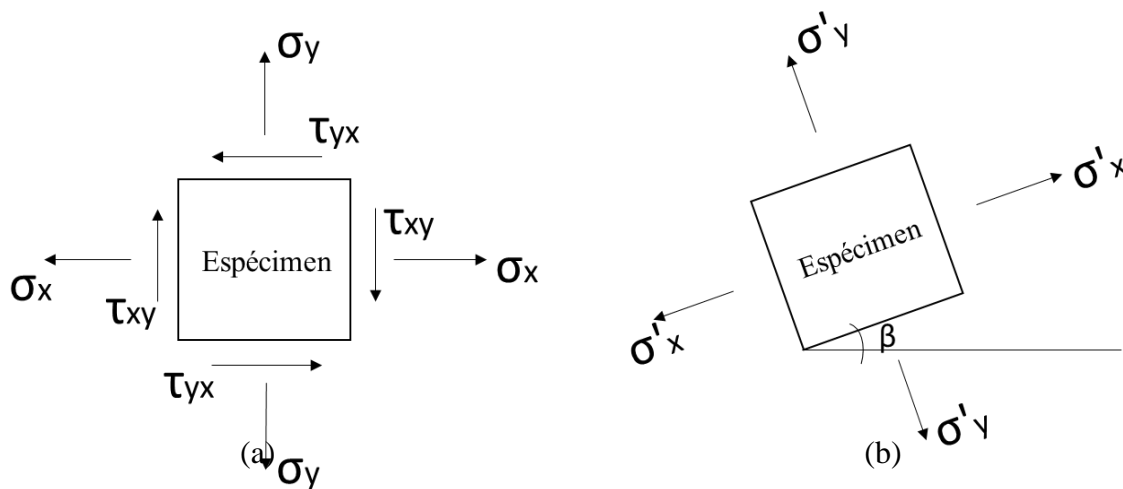
$$\tau = \text{esfuerzo cortante} = \frac{\text{fuerza paralela al plano}}{\text{Area del plano}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Aunque un cuerpo en determinadas condiciones se encuentre bajo esfuerzos normal y de cizalla, en términos geomecánicos es de nuestro interés determinar los esfuerzos principales máximos y mínimos, así como los esfuerzos de cizalla o cortante máximo. Los anteriores nos dan una visión de los límites de falla de los materiales o de determinada formación.

Con el fin de dar una breve explicación de lo que consiste los *Esfuerzos Principales*; tengamos en cuenta un espécimen infinitesimal en 2D como se muestra en la figura 1 bajo un primer plano cartesiano, donde su estado de esfuerzos se compone de esfuerzos normal (σ_x , σ_y) y de corte (τ_{xy} , τ_{yx}). Con el fin de determinar los esfuerzos principales, el cuerpo es girado β grados de tal manera que exista 2 esfuerzos ortogonales entre sí (σ'_x , σ'_y) que actúan perpendicularmente sobre un plano principal a determinada orientación (β) donde los esfuerzos de corte se anulan (τ'_{xy} , τ'_{yx} igual a cero) y los esfuerzos principales (σ'_x , σ'_y) serían el máximo y el mínimo esfuerzo permisible para dicho espécimen.

Figura 1.

(a) Cuerpo sometido a esfuerzos normal y de cizalla. (b) Cuerpo sometido a esfuerzos principales donde los esfuerzos de Cizalla son nulos.



Nota: Esfuerzos Principales en espécimen infinitesimal en 2D.

En un cuerpo en 3D se puede decir que; en cualquier punto de un cuerpo existe por lo menos tres superficies en las cuales los esfuerzos de cizalla desaparecen; estas superficies

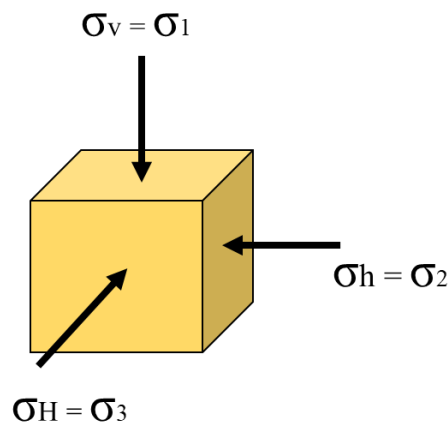
corresponden a las superficies principales, por lo tanto, es posible obtener un set de esfuerzos normales en los cuales los esfuerzos de corte desaparecen y estos esfuerzos que quedan son llamados esfuerzos principales (Davis & Selvadurai, 2002, p. 14).

2.1.1 Esfuerzos Principales σ_v , σ_H , σ_h

Comúnmente los esfuerzos principales se denotan como σ_1 , σ_2 , σ_3 . En términos geomecánicos estos esfuerzos serán σ_v , σ_H , σ_h . Para un caso típico los esfuerzos generados por la sobrecarga o columna litostática es mayor a los esfuerzos horizontales máximo y mínimo. En otras palabras; σ_v corresponde al esfuerzo vertical, σ_H al esfuerzo horizontal máximo y σ_h al esfuerzo horizontal mínimo.

Figura 2.

Cuerpo 3D Sometido a 3 esfuerzos Principales



Nota: Cuerpo 3D Sometido a Esfuerzos Principales σ_v , σ_H , σ_h .

Determinar los esfuerzos principales es un aporte fundamental en las operaciones de perforación de pozos ya que; con base en ellos podemos tener un conocimiento de los límites permisibles de peso de lodo dinámico el cual se debe tener durante las operaciones; si no que

también, con base en esta información se puede realizar una mejor planeación en el programa direccional del pozo a perforar.

En términos de fluidos de perforación, la Academia, Operadoras y empresas de Servicios Petroleros están invirtiendo en la investigación y evaluación de fluidos con materiales anti pérdida o materiales de prevención de pérdidas de circulación con determinados rangos y configuraciones de tamaños de partículas (PSD) con el fin de alterar el estado de esfuerzos en las paredes del pozo, ampliando así la resistencia de las formaciones de estudio. Esto se hace realizando pruebas de laboratorio donde se somete una muestra geológica a ciertas condiciones de esfuerzos (σ_v , σ_H , σ_h), simulando así las condiciones en subsuelo. El procedimiento consiste en la inyección de fluido al interior de la muestra llegando al punto de llevar a cabo un fracturamiento controlado con el fin de evaluar presiones durante la propagación de las fracturas y un posible sellado de estas con las partículas contenidas en el fluido.

2.2 Presión de Poro

La presión de poro o también llamado presión de formación hace referencia a la presión que ejerce los fluidos contenidos en el medio poroso. Dependiendo de la naturaleza del fluido contenido en el medio poroso (Agua, gas o petróleo) y de su condición (conexión de acuíferos, entrapamiento, columna litostática ejerciendo peso sobre los fluidos), esta presión de poro se puede clasificar en 3 clases: como presión de formación normal, presión subnormal o presión de formación anormal. La presión de poro se encuentra en un rango entre la presión hidrostática y la presión de sobrecarga (Ocasionada por el peso de la columna de formación más los fluidos contenidos en ella). En términos prácticos de monitoreo y de manejo de la ventana de lodo, la presión de poro se maneja en unidades de densidad (lbs/gal o ppg).

Para entender el concepto de presión de poro es importante comprender el significado de presión hidrostática. En términos prácticos para la industria y a lo que este trabajo se refiere, podemos decir que la presión hidrostática (psi) es igual a la multiplicación de densidad del fluido por la profundidad vertical verdadera (TVD) y una constante de conversión (0.052) utilizado para expresar la densidad en ppg y la profundidad en pies.

$$P_h (\text{psi}) = \rho (\text{ppg}) * \text{Profundidad (ft)} * 0.052 \quad (\text{Ecuación 3})$$

2.2.1 Presión de Formación Normal

La presión de poro es normal cuando es igual a la presión hidrostática de los fluidos de la formación a determinada profundidad. Corresponde a la presión hidrostática que ejerce la densidad del agua dulce (8.33 lb/gal) o el agua salada (9.0 lb/gal).

2.2.2 Presión de Formación Subnormal

Es la presión de formación cuyo valor está por debajo de la presión hidrostática. Esto se presenta por ejemplo en casos en zonas de yacimientos que han producido por bastante tiempo tal que ha perdido su energía natural y la convierte en zonas débiles y de cuidado en términos de manejo de ventana de lodo (ver figura 3).

2.2.3 Presión de Formación Anormal

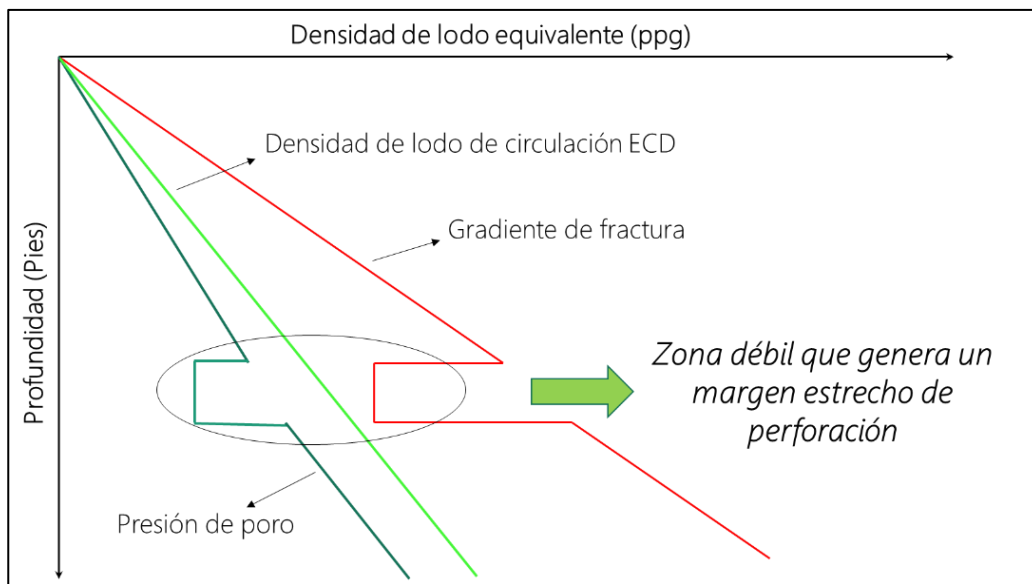
También llamado como geopresiones, la presión de poro anormal ocurre cuando es mayor a la presión hidrostática a determinada profundidad. En otras palabras, la presión anormal es un exceso de presión a la presión normal.

2.3 Ventana de Lodo

El término de “Ventana de Lodo” relaciona los conceptos de presión de poro, Presión de fracturamiento o gradiente de fractura, presión hidrostática, densidad de lodo equivalente o ECD por si siglas en inglés (Equivalent Circulating Density).

Figura 3.

Esquema general de Ventana de Lodo



Nota: presión de poro, Presión de fracturamiento o gradiente de fractura, presión hidrostática, densidad de lodo equivalente o ECD.

La ventana de lodo se define como el intervalo máximo y mínimo que debe tener un fluido o lodo dentro de un hueco abierto en términos de densidad o de presión con el fin de mantener la estabilidad en el pozo. Si la presión del lodo contenido en la columna hidrostática es menor a la presión de colapso, el hueco tenderá a derrumbarse, de la misma manera si la presión del lodo es menor a la presión de poro, la columna hidrostática no tendrá la suficiente contención para evitar un posible descontrol de pozo o reventón. Si la densidad del lodo en condición de circulación

(Densidad de circulación de lodo equivalente ECD) es mayor a la resistencia a la tensión de la cara del pozo (gradiente de fractura) entonces ocurrirá un posible fracturamiento e inyección de fluido hacia la formación llegando a casos no deseados como pérdida total de circulación.

2.3.1 Wellbore Strengthening (WBS)

El término de Wellbore Strengthening o fortalecimiento en la Cara del pozo durante la perforación se define como la capacidad del hombre que con sus acciones o procesos logra modificar el estado de esfuerzos en la cara del pozo, restringiendo así la propagación de fracturas a partir de un incremento en el gradiente de fractura y la ampliación de la ventana de lodo (Mud Window).

El fenómeno de Wellbore Strengthening es logrado a partir de un conjunto de métodos que van desde aumentar los esfuerzos cercanos al pozo a partir de un aumento intencionado de la temperatura hasta incrementar el gradiente de fractura de manera mecánica a partir de la adición de partículas al lodo de perforación con propiedades tales que se introducen entre las fracturas taponando este e incrementando la resistencia a su propagación o en otros casos; aumentando la resistencia de la roca en la pared del pozo.

Expertos en fluidos han desarrollado una variedad de métodos para mejorar la integridad de los pozos y prevenir las pérdidas de circulación. Colectivamente, estas prácticas son llamadas métodos de Wellbore Strengthening el cual incluyen estrategias para alterar los esfuerzos alrededor de la cara del pozo y minimizar las pérdidas de fluido.

Las compañías operadoras emplean un número de técnicas para prevenir las pérdidas de circulación por medios físicos o mecánicos que han sido teorizados para trabajar bajo formas diferentes en cuanto su fundamentación (Cook, 2012). Dicho lo anterior; a continuación, se expone

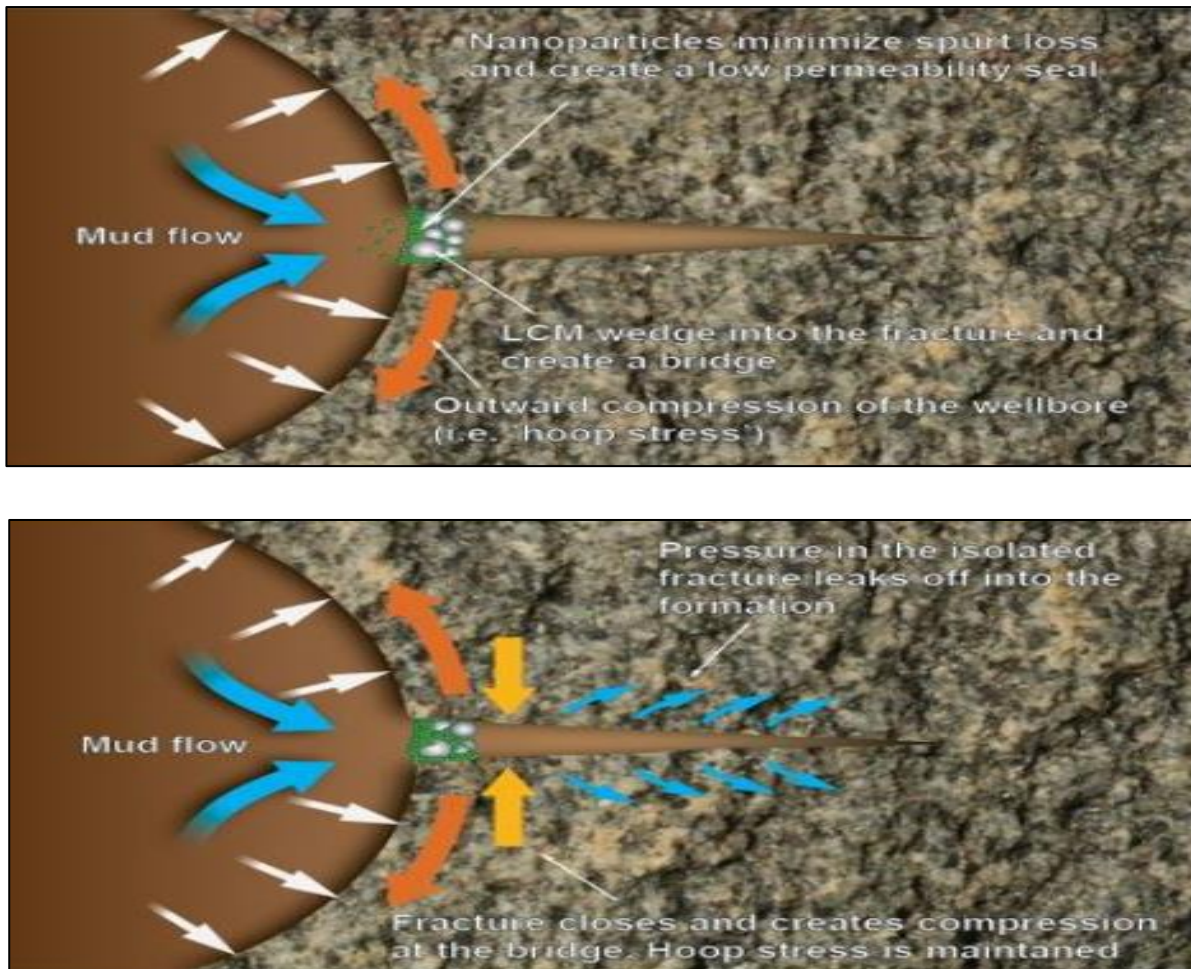
los 3 principales modelos físicos en la industria de la perforación que explican por qué los tratamientos de Wellbore Strengthening pueden “fortalecer” las paredes el pozo (Feng, 2017).

2.3.2 Modelos Físicos para Wellbore Strengthening

2.3.2.1 Jaula de esfuerzos o Stress Cage (SC). Más conocido como *Stress Cage*. Ha sido estudiado por diferentes investigadores desde principio del siglo XX (Weijermars, 2016; Wang et al., 2009; Wang et al., 2008; Soroush and Sampaio, 2006; Song and Rojas, 2006; Aston et al., 2004; Alberty and McLean, 2004). El modelo de *Stress Cage* consiste en depositar en la boca de la fractura un material LCM o LPM (Lost Circulating Material / Lost preventive Material) de características mecánicas y físicas tales que es capaz de generar un aislamiento entre el resto de fractura con el pozo. Teniendo en cuenta una formación permeable, el fluido contenido entre la fractura desde el bloqueo hasta la punta de la fractura tenderá a migrar hacia las zonas adyacentes hasta que la presión dentro de la fractura se iguale a la de formación (presión de poro). Mientras que sucede lo anterior y la fractura tiende a cerrarse; se genera un incremento de esfuerzos por compresión en la boca de la fractura, justo en la zona donde se posicionó el “bloqueo con material LPM”. Este aprisionamiento es transmitido alrededor de la cara del pozo logrando así un incremento en la jaula de esfuerzos o Stress Cage.

Figura 4.

Fenómeno físico de Stress Cage. (Sup) Etapa de Depositación, Puenteo y Sellamiento. (Inf) Etapa de Filtración hacia la Formación y Generación de Stress Cage.



Nota. Mud flow. Tomado de Contreras, (2014).

El modelo de *Stress Cage* también ha sido estudiado en formaciones de Shale (Aston, et al., 2007). La teoría contempla que es posible depositar en la fractura un material LPM con características como tipo de material, tamaño y concentración que sea capaz de adherirse al Shale, logrando solidificarse o “cementarse”, impidiendo a la vez que el fluido contenido detrás del puenteo retorne al pozo cuando esté último por ejemplo no se esté circulando.

2.3.2.2 Esfuerzo de Cierre de Fractura (FCS). El modelo de esfuerzo de cierre de fractura más conocido como FCS (Fracture Closure Stress), Es otra de las teorías que explica el mecanismo de WBS (Dupriest, 2005). El modelo se enfoca en incrementar el esfuerzo de cierre de fractura sobre un plano de fractura y mantiene la fractura cerrada. Esto se logra por el ensanchamiento de la fractura y taponamiento de esta por medio de una masa inmóvil. Primero se crea una fractura en la pared del pozo y se ensancha para incrementar el esfuerzo compresivo o FCS (esto depende de los módulos elásticos de la formación) en la zona adyacente. Una vez se haya ingresado el lodo con material LCM a la fractura, el estado líquido se filtrará hacia las zonas adyacentes y las partículas sólidas de LCM se conglomeran para formar una masa inmóvil que mantiene la fractura abierta aislando la punta de la fractura de la presión del pozo. La masa inmóvil continuara creciendo a medida que hay más pérdidas de la fase líquida por filtrado hasta que se finalmente se crea un empaquetamiento de material hasta la pared del pozo. El incremento del esfuerzo de fractura y aislamiento de la punta de la fractura hace más difícil para que éste se abra o se expanda (Feng y Gray, 2017).

2.3.2.3 Resistencia a la Propagación de Fractura (FPR). El modelo de resistencia a la propagación de fractura, llamado inicialmente como “Modelo de Apantallamiento de la Punta de fractura” por Morita et al., 1990 con el fin de explicar los resultados experimentales del proyecto DEA-13. Más adelante fue también desarrollado por Van Oort et al., 2011 en estudios de WBS durante la perforación. A diferencia de los 2 modelos mencionados “*Stress Cage y FCS*”, el objetivo de este modelo no es alterar los esfuerzos cercanos al pozo para crear una jaula de esfuerzos ni tampoco aumentar el esfuerzo de cierre de fractura, pero si le apunta a incrementar la resistencia de la formación a partir de una resistencia a la propagación de fractura. El modelo FPR

contempla que se puede formar un sellamiento en la punta de fractura “*Fracture Tip*” con la formación de una retorta “*Filter Cake*” que evita una comunicación de presión entre el pozo y el tip (Feng y Gray, 2017).

EL modelo FPR tiene como objetivo incrementar la resistencia a la propagación de fractura. Está basado en el aislamiento del tip de la fractura donde el tipo y el tamaño de los materiales a utilizar (WSM’s) son importantes. El tamaño de las partículas es también dependiente de las propiedades mecánicas de la roca (Contreras, 2014).

A continuación; en la Tabla 1, se muestra las principales características de las diferentes técnicas de expuestas anteriormente.

Tabla 1.

Diferencia entre las Técnicas de Wellbore Strengthening

	Stress Cage	FCS	FPR
Medio Aplicado	Píldora WBM	Píldora Base WBM	WBM o OBM
Técnica de Aplicación	Píldora al Vuelo	Píldora al Vuelo	En el Sistema Activo
¿Esfuerzo de cierre de fractura alterado?	SI	Si	NO
¿Se requiere aislamiento de la punta de fractura?	NO	SI	SI
	Stress Cage	FCS	FPR
¿Se requiere Alta pérdida de fluido?	SI	SI	NO
Resistencia de partícula WSM	Importante	No Importa	No Importa
Tamaño de Partícula WSM	Importante	No Importa	Importante
Tipo de Partícula WSM	Importante	No Importa	Importante

Nota. Differences on techniques for wellbore strengthening. Adaptado de Contreras, (2014).

3. Antecedentes de la Investigación

La necesidad de producir más barriles de petróleo en superficie de una manera económicamente viable significa un desafío que abarca desde el área de exploración, yacimientos hasta finalmente las operaciones de producción.

Entre los grandes desafíos se encuentra las pérdidas de circulación durante las operaciones de perforación. Estas pérdidas se deben a diferentes causas que van desde lo operacional, la naturaleza de la formación y cambios ocurridos dentro de dichas formaciones en el transcurrir del tiempo durante su producción.

Con el fin de evaluar los diferentes mecanismos de pérdidas de circulación y a la vez encontrar tratamientos efectivos; varios autores han trabajado en la búsqueda de diferentes técnicas y adecuación de equipos en laboratorio, buscando realizar pruebas bajo técnicas y materiales que den una mejora en la respuesta al fracturamiento en diferentes muestras geológicas de interés.

Ya que el objetivo de las pruebas de Wellbore Strengthening en laboratorio es llegar a simular las condiciones in situ con el fin de lograr una apreciación cercana de los resultados esperados campo; es importante entonces tomar en cuenta que la respuesta de pruebas de fortalecimiento realizadas en laboratorio depende en gran manera del tipo de equipo y esquema a utilizar.

Una manera de estudiar el fenómeno de WBS es a partir del desarrollo de pruebas de fracturamiento en muestras de formación por medio de la inyección de fluidos a determinadas presiones que dependen tanto de las propiedades de material como de las condiciones al cual se

encuentra dicha muestra. El fracturamiento y su propagación dependerán también de los materiales contenidos en el fluido y los parámetros utilizados.

3.1 DEA 13

Los primeros experimentos WBS; se realizaron bajo un proyecto de la Asociación de Ingenieros de Perforación DEA 13 (Morita et al., 1990, 1996; Fuh et al., 1992; Onyia, 1994) que fue llevado a cabo a finales de los años 80's y principios de los 90's. El objetivo principal fue encontrar una explicación del porque las pérdidas de circulación ocurren en menor frecuencia en lodos base agua que en lodos base aceite y cómo los materiales de pérdida de circulación LCM por sus siglas en inglés, pueden mitigar las pérdidas de circulación. La mayoría de estos experimentos se hicieron en muestras de Arena de 30 x 30 x 30 pulgadas (76.2 cm en cada lado) a los que se les perforó un hueco concéntrico de 1.5 pulgadas (3.81 cm) de diámetro para simular el pozo.

Las muestras fueron sometidas a esfuerzos horizontales (máximo y mínimo) y esfuerzo vertical con el fin de simular las condiciones in situ. Al llevar a cabo los procedimientos de inyección de fluidos y de fracturamiento en muestras de gran tamaño; se logró evidenciar presión de inicio y de propagación de fractura. Las 2 principales observaciones derivadas del proyecto DEA 13 fueron que: 1) La presión de inicio de fractura (FIP) y la presión de reapertura de fractura (FRP) son casi independientes del tipo de lodo y de material LCM usado y 2) La presión de ruptura de la formación (FBP) y la presión de propagación de fractura (FPP) están fuertemente relacionados al tipo de lodo y que estos se incrementan sustancialmente con el uso de LCM como aditivos al lodo.

Figura 5.

Muestra después del fracturamiento hidráulico.



Nota: Core after hydraulic fracturing experiment. *Experimento realizado para corroborar los resultados de DEA-13.*

Se muestra una zona invadida, zona de fractura y zona deshidratada. Adaptado de Wang, (2007).

Las pruebas en el proyecto DEA 13 se llevó a cabo con tamaño de pozo con un diámetro de 1.5 pulgadas el cual es un diámetro pequeño en comparación a un diámetro de pozo en condiciones reales. No se simuló en formaciones fuertes o suaves ya que las muestras utilizadas fueron sobre Berea el cual tienen una resistencia intermedia. La permeabilidad en las muestras de Berea es relativamente alta (100 – 120 mD). La temperatura de formación no fue simulada.

3.2 GPRI 2000

Más tarde el proyecto de la Global Petroleum Reserach Institute 2000 (GPRI 2000) llevó a cabo una investigación sobre las pérdidas de circulación y WBS para finales de los años 90's y principio de los 2000's (Dudley et al., 2001; van Oort et al., 2011). A diferencia del trabajo

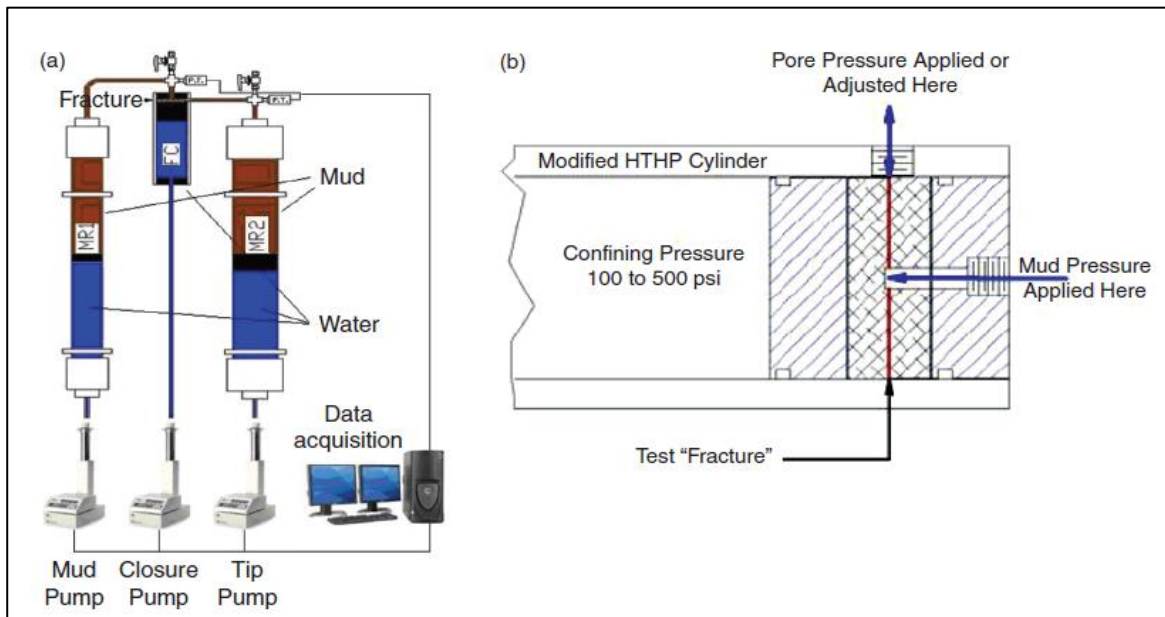
realizado en el proyecto DEA 13 donde se experimentó sobre bloques de roca relativamente grandes (30 x 30 x 30 in), los experimentos del proyecto GPRI 2000 se realizaron en corazones de 4 pulgadas de diámetro y con hueco concéntrico de 5/8 de pulgada de diámetro. Ya que las muestras de roca cilíndricas eran de un tamaño menor al utilizado en DEA-13; los experimentos solo permitieron observar la presión de inicio de fractura (FIP) y la presión de reapertura de fractura (FRP) pero no la presión de propagación de fractura (FPP).

El objetivo principal del proyecto GPRI 2000 fue evaluar la efectividad de diferentes materiales LCM. Como observación importante los resultados arrojaron que la presión FRP se incrementa con la adición de material LCM al lodo, contrario a lo que mostró en los experimentos de DEA-13. Los resultados del experimento también confirmaron que los materiales LCM son más efectivos en lodos base agua que en lodos base aceite o lodos base sintético.

Dando continuación al proyecto GPRI 2000, La figura 2 muestra el equipo utilizado por Van Oort (2011). El equipo es una celda HTHP modificado que simula una roca impermeable con anchos de fractura variable (300 a 1000 micrones. La fractura consistía en 2 platinas, una de ellas movable. Además de permitir observar las presiones de sellamiento de fractura; este equipo permitía durante el experimento medir el filtrado de fluido a través de la fractura.

Figura 6.

(a) Esquema descriptivo de los aparatos utilizados en laboratorio para proyecto GPRI 2000 para monitoreo y bombeo de materiales WSM's , (b) Esquema de la celda de prueba con fractura variable, y presión de confinamiento.



Nota. Avoiding Losses in Depleted and Weak Zones by Constantly Strengthening Wellbores. Adaptado de Van Oort, (2011).

3.3 RCA

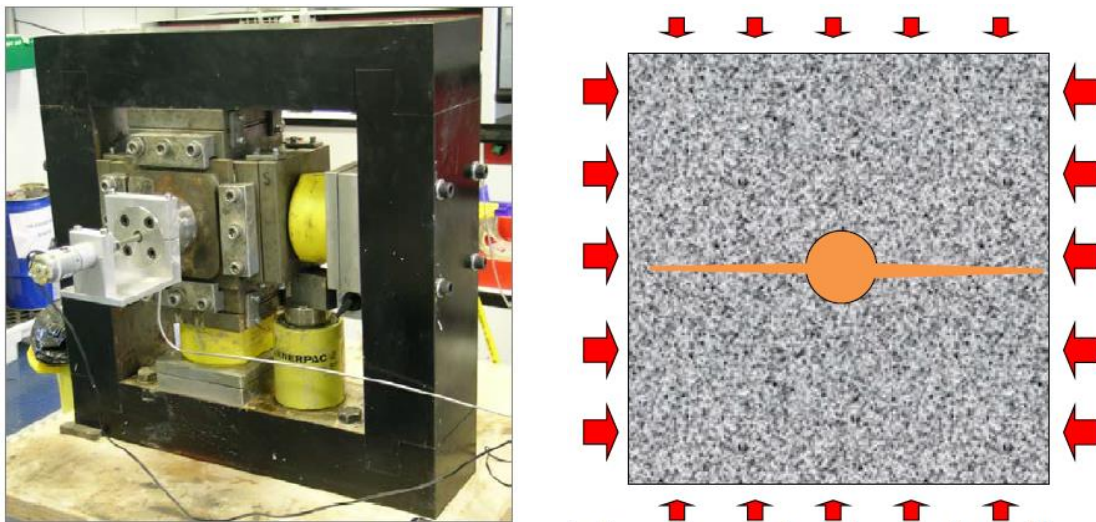
De manera contemporánea al proyecto GPRI, un proyecto experimental llamado Lost Circulation and Wellbore Strengthening Research Cooperative Agreement o Acuerdo corporativo para la investigación de las pérdidas de circulación y fortalecimiento del pozo (RCA) fue conducido por M-I SWACO para finales de la década de 2000's y principios de la década 2010's (Guo et al., 2014, 2009). Los experimentos se realizaron sobre bloques de arena y Shale de 15 x 15 x 15 cm con un hueco (Wellbore) de 2.5 cm. El equipo de prueba permitió simular los 3 esfuerzos principales (σ_v , σ_h , σ_H) por medio de 3 pares de estructura o platos cuadrados que

presionan la muestra por medio de 3 sistemas de bomba independientes una de la otra (Guo et al., 2014).

El objetivo de este proyecto fue investigar sobre como ocurre el mecanismo de fortalecimiento del pozo (WBS), la efectividad de varios métodos de Wellbore Strengthening, y también como método de prevención y remediación. Una limitación de este trabajo experimental es que el tamaño de los bloques era relativamente pequeño, lo que apenas era posible de observar la presión de propagación de fractura ya que las fracturas se propagaban bastante rápido hacia la cara exterior del bloque después de inicio de fractura.

Figura 7.

(Izquierda) Equipo de prueba que genera los 3 esfuerzos principales. (Derecha) Cubo de roca con pozo concéntrico y esfuerzos horizontales aplicados (σ_h , σ_H) por acción de 2 pares de estructura movable.



Nota. A comprehensive experimental Study on Wellbore Strengthening. Adaptado de Guo et al., (2014).

3.4 University of Alberta

Nwaoji (2012), realizó pruebas de Wellbore Strengthening sobre un medio permeable usando fluidos de perforación bajo una combinación de nanopartículas + material LCM, donde se reportó un incremento máximo de presión de ruptura de 70.31% y 36.39% para lodo base agua y base aceite respectivamente.

Más tarde Contreras (2014), realizó pruebas de Wellbore Strengthening usando el mismo equipo utilizado por Nwaoji. A diferencia de lo realizado en el 2012 por Nwaoji, Contreras trabajó inicialmente con un fluido base con material LCM con el fin de mostrar la ventaja a la hora de utilizar fluidos de perforación con una mezcla de material LCM + Nanopartículas. Contreras también abordó sobre el tipo de mecanismo por el cual se generó el efecto de Wellbore Strengthening en sus experimentos.

Figura 8.

(Izquierda) Equipo de fracturamiento hidráulico. (Derecha) Manga de caucho que confina la muestra al ser llenado con agua simulando esfuerzos horizontales.



Nota. Pruebas de Wellbore Strengthening. Adaptado de Contreras (2014).

Liberman (2012), Nwaoji (2012) y Contreras (2014), utilizaron el mismo equipo de prueba. Mientras que Liberman trabajó en núcleos de muestras con diámetro externo de 5 ¾” y hueco interno de 0.5” y de longitud casi igual al diámetro de las muestras; Nwaoji (2012) y Contreras (2014) experimentaron sobre muestras de 5 ¾” de diámetro x 9” de altura y hueco concéntrico de 9/16”.

En comparación al equipo utilizado por Guo (2014), este equipo solo simulaba 2 esfuerzos principales (Esfuerzo de Overburden σ_v y una presión de confinamiento alrededor de la muestra haciendo que los 2 esfuerzos horizontales máximo y mínimo sean iguales que $\sigma_h = \sigma_H$).

El sistema de confinamiento es controlado y ejercido con bomba tipo jeringa modelo Isco DX 100 el cual trabaja con agua. La inyección de fluido de perforación se hace también por medio de una bomba Isco DX 100 el cual bombea primero agua hacia la parte baja del free piston en un acumulador y que en la parte superior recibe fluido de perforación a 60 psi de un recipiente superior que trabaja con aire, finalmente el acumulador es el encargado de la acumulación e inyección de fluido hacia la celda de presión. La presión de overburden fue suministrado por una bomba hidráulica manual. El sistema de adquisición de datos se hizo con el software LabVIEW.

3.5 Celda Triaxial en Pruebas de Fracturamiento en Yacimientos Geotérmicos

Frash et al., (2014), realizó pruebas de fracturamiento enfocados a la investigación de yacimientos geotérmicos. En este caso se tuvo un equipamiento compuesto por 3 placas móviles accionadas por tres Flat Jacks que se inflan y empujan cada una de las placas. El dimensionamiento de este equipo era apto para contener muestras cúbicas de 30 cm. Adicional a esto; se contaba con un sistema de aislamiento en ladrillo que permitía mantener una temperatura determinada durante las pruebas.

Figura 11.

Pruebas de Fracturamiento Enfocados a la Investigación de Yacimientos Geotérmicos



Nota: True Triaxial. Adaptado de Frash, Gutiérrez y Hampton, (2014).

3.6 Biao

Biao Ma et al., 2019 trabajó en un equipo de fracturamiento para muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro y 14 – 15 cm de longitud con hueco concéntrico de 1 cm. En esta ocasión el esquema y funcionalidad del equipo en su naturaleza es similar al utilizado por Liberman (2012).

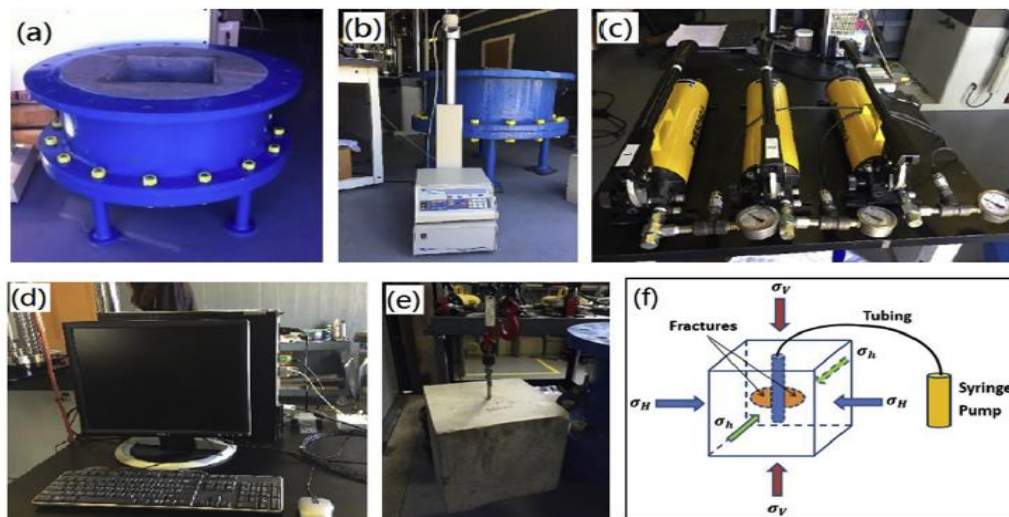
3.7 Zhong

Más adelante Zhong et al., 2019 realizó una investigación experimental acerca Wellbore Strengthening basado en el fracturamiento. Para ello fabricaron una celda triaxial verdadera a gran escala (Large Scale True Triaxial Cell) fundamentado en el equipo utilizado por Frash et al., 2014. La celda triaxial verdadera usada por Zhong tiene la capacidad de contener una muestra cúbica de Berea de 30x30x30 cm. El equipo puede someter dicha muestra a una anisotropía de esfuerzos que consiste en 3 esfuerzos independientes el uno del otro causado por Flat Jacks que finalmente presionan 3 caras de la muestra ortogonales entre sí. 3 bombas hidráulicas manuales son conectadas a los 3 Flat Jacks con capacidad de aplicar presión hasta 2000 psi.

La figura 12b muestra una bomba Teledyne con capacidad de hasta 4000 psi que es utilizada en la inyección del fluido hacia el pozo para crear la fractura. La tasa de inyección o presión es controlada por el programa LabView. El hecho de simular físicamente los 3 esfuerzos principales in situ se logró crear fracturas de lado y lado del pozo en dirección perpendicular al esfuerzo horizontal mínimo. Las dimensiones de la muestra (30 cm³) permitió tener una fractura estable donde se logró identificar presiones de ruptura de la formación (FBP), presión de reapertura de fractura (FRP) y presión de propagación de fractura (FPP).

Figura 12.

(a) Estructura de la celda. (b) Bomba Teledyne. (c) Bombas hidráulicas manuales para control de esfuerzos de confinamiento. (d) Sistema de adquisición de datos. (e) Muestra de roca cúbica.



Nota. Experimental investigation of fracture-based Wellbore Strengthening using a large-scale true triaxial cell.

Adaptado de Zhong et al., (2019).

Un sistema de adquisición de datos de NI (National Instrument) fue utilizado para grabar la presión de fluido, tasa de inyección y otros datos (Zhong, 2019).

Como lo realizado por Frash., 2014; los equipos triaxiales verdaderos de fracturamiento también han tenido una utilidad importante en el estudio de yacimientos geotérmicos donde las

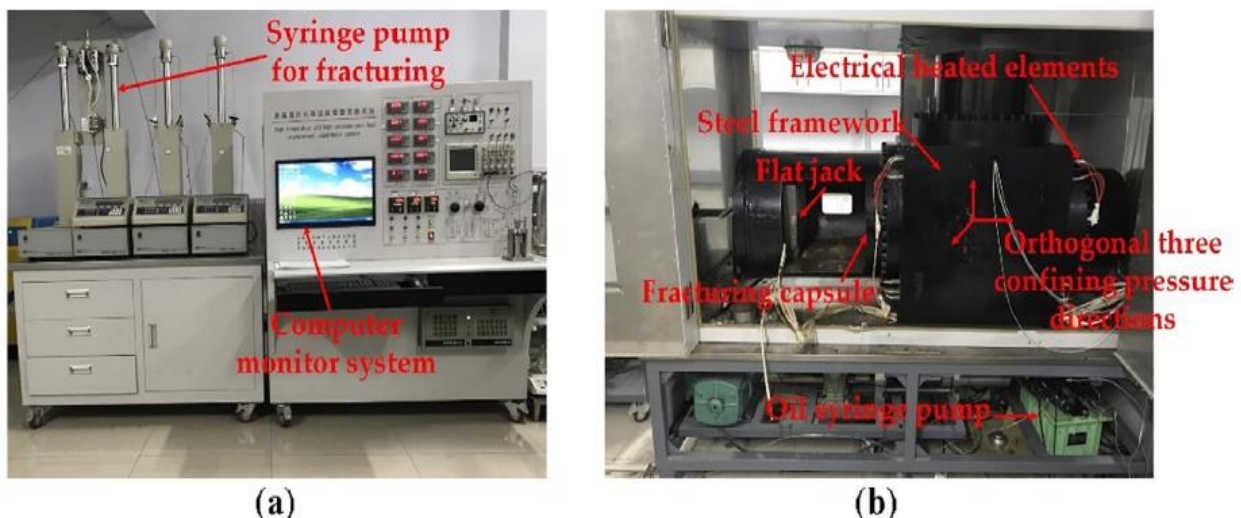
rocas secas calientes o Hot Dry Rock (HDR) son la principal fuente de energía geotérmica. El objetivo de usar estos equipos triaxiales verdaderos es experimentar sobre un espécimen simulando las condiciones in situ para estudiar el comportamiento de un conjunto o ramificación de fracturas generadas que servirán como camino de flujo para producir la energía geotérmica.

3.8 Cheng

Dando continuidad a los trabajos sobre yacimientos geotérmicos, Cheng et al., 2020 realizó experimentos para analizar el comportamiento de las fracturas en muestras de roca de yacimiento HDR. Para ello se utilizó una celda triaxial verdadera diseñada por la universidad de Jilin (China) el cual contiene un sistema de calentamiento de alta temperatura y es apto para fracturar muestras de roca de 30x30x30 cm de alta resistencia y tenacidad (característicos de los yacimientos HDR).

Figura 13.

Equipo de fracturamiento Triaxial verdadero: (a) Sistema de inyección. (b) Estructura general con el sistema de confinamiento y calentamiento.



Nota. An investigation on hydraulic fracturing characteristics in granite geothermal reservoir. Adaptado de Cheng et al., (2020).

Tres (3) Flat Jacks tipo cuadrado ortogonales entre pueden proveer 3 esfuerzos principales (σ_h , σ_H , σ_v) sobre la muestra en estudio simulando un esfuerzo in situ de hasta de 3626 psi (25 MPa). El sistema de inyección puede suministrar una tasa de flujo máxima de 30 ml/min. El sistema de calentamiento puede proveer una temperatura máxima de hasta 150°C.

4. Desafíos y Resultados Experimentales que Antecedieron al Planteamiento del Diseño de un Equipo para Pruebas de Wellbore Strengthening.

Antes de llegar a la etapa de diseño se llevaron a cabo experimentos, ensayos y adecuaciones sobre equipos existentes en laboratorios con el propósito de lograr realizar pruebas de Wellbore Strengthening.

Este capítulo se divide en 2 etapas. La primera consistió en una etapa experimental donde se intentó realizar una prueba base de fracturamiento en una muestra Sintética a partir de un Core Holder Full Diámetro. Y la segunda corresponde al diseño y adecuación de un Core Holder Convencional a la vez de la preparación y caracterización de muestras de Berea que serían utilizadas para realizar pruebas de fracturamiento y posteriores pruebas de WBS. A continuación de detalla cada una.

4.1 Etapa No 1: Montaje y Ensayo Experimental de Fracturamiento en una Muestra Sintética usando un Core Holder Full Diámetro.

4.1.1 Descripción de Core Holder full Diámetro Seleccionado

Con el objetivo de obtener un equipo para pruebas de Wellbore Strengthening a partir de equipos existentes en laboratorio; se procedió a hacer uso de un Core Holder full diámetro, dicho

equipo es normalmente usado para pruebas de Core Flooding, donde se evalúa propiedades de los fluidos en el medio poroso. Básicamente el equipo se compone de 5 elementos: 1 Cilindro, 1 Cabezote, 1 Manga de caucho, Muestra, Líneas de flujo y Accesorios que garantizan la hermeticidad del sistema.

Figura 14.

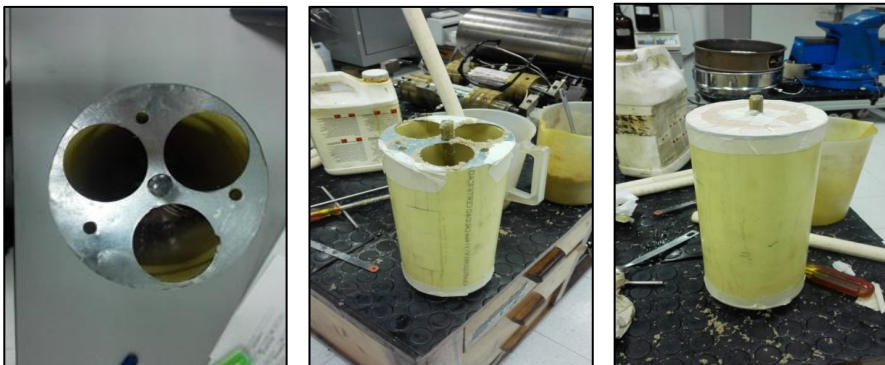
Core Holder Full Diámetro, Laboratorio de Análisis petrofísico-especiales – ICP



4.1.2 Diseño y Fabricación de un Núcleo Sintético para Pruebas de Wellbore Strengthening

En laboratorio se preparó un núcleo sintético a partir de una mezcla de arena 20 – 40 (Micrones), Resina Epóxica y Endurecedor.

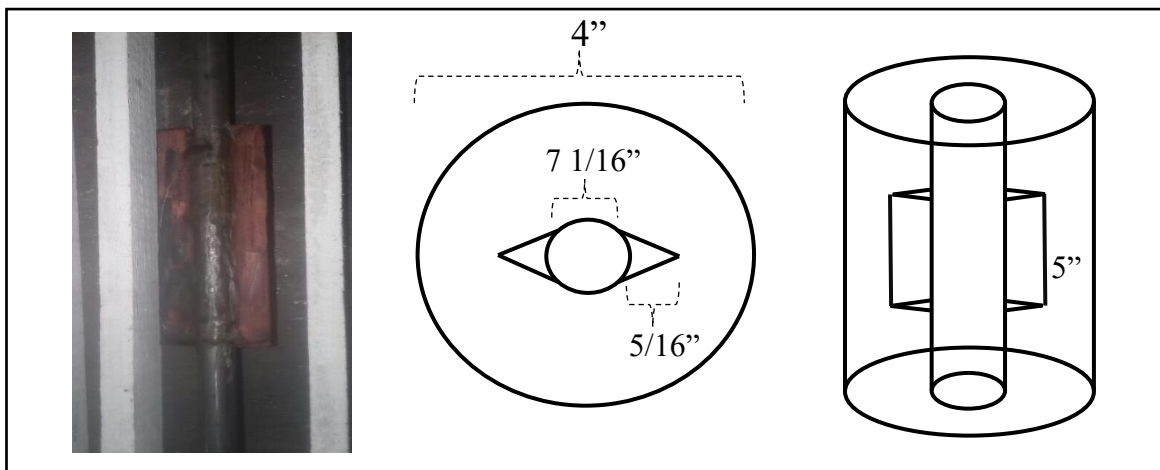
Figura 15. *Preparación de una muestra sintética. Cilindro en PVC de 4” de diámetro x 8.5” de longitud. Una lámina troquelada de un lado y una en madera en la cara posterior que mantiene centrado el molde de Cera mientras se rellena el cilindro.*



Las dimensiones de dicha muestra fueron de 4" de diámetro x 8.5" de longitud, además se elaboró un hueco concéntrico (Wellbore) de 7/16" de diámetro con un Concentrador de Esfuerzos en forma de prisma con longitud de 5" el cual simulaba el inicio de una fractura inducida; lo anterior con el fin de direccionar e inducir más fácilmente las fracturas al momento de inyectar un fluido (Figura 16).

Figura 16.

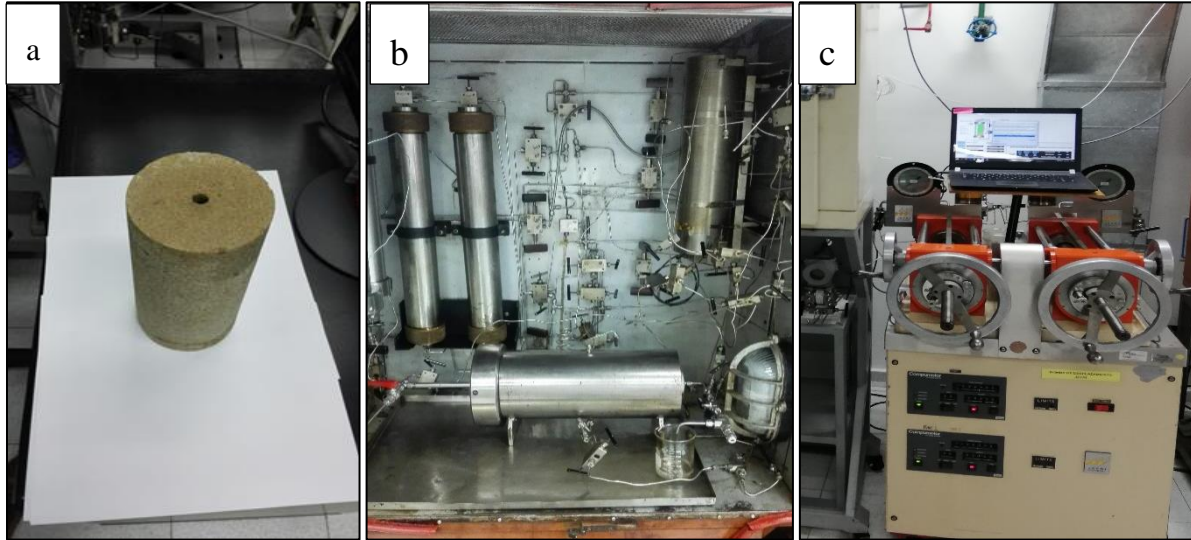
Fabricación de un molde en Madera que servirá para la preparación de un molde en material de Cera Parafínica.



Para lograr obtener el Wellbore + El Concentrador de Esfuerzo al interior de la muestra, se necesitaba diseñar un cuerpo con una material tal que al posicionarlo dentro del tubo PVC y fundir la arena con la resina creara finalmente un espacio vacío que sería el Wellbore con el concentrador de esfuerzos ; para lo anterior se fabricó un molde en madera el cual sirvió para fundir Cera Parafínica y lograr un molde de este material (Figura 17), que, al ser llevado a altas temperaturas, se derretiría y dejaría el espacio y la geometría deseada al interior de la muestra o núcleo.

Figura 17.

(a) Muestra sintética con Wellbore y Concentrador de esfuerzos al interior, (b) Montaje de la muestra en el Core Holder al interior de un horno. (c) Sistema de Monitoreo y almacenamiento de datos OPTO 22 y Bombas hidráulicas Jefri.



4.1.3 Preparación de un Fluido base para Pruebas de Wellbore Strengthening

Con el fin de crear inicialmente una fractura con un fluido base, se preparó en laboratorio de fluidos un lodo base agua sin material LCM con las propiedades presentadas en la tabla 2.

Figura 18.

Preparación del lodo de perforación en laboratorio de fluidos

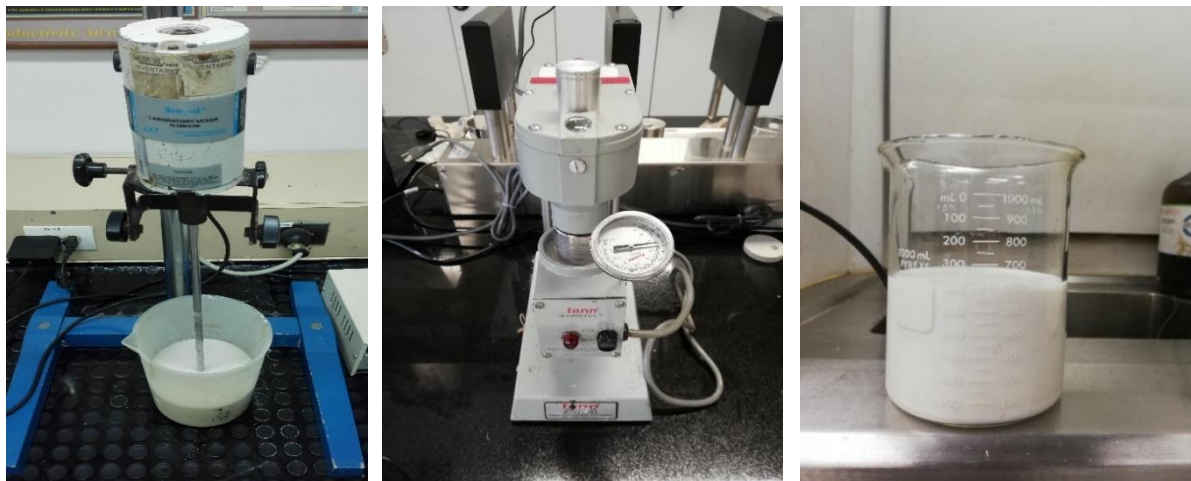


Tabla 2.

Propiedades del Fluido de Perforación Base para Ensayo de Fracturamiento

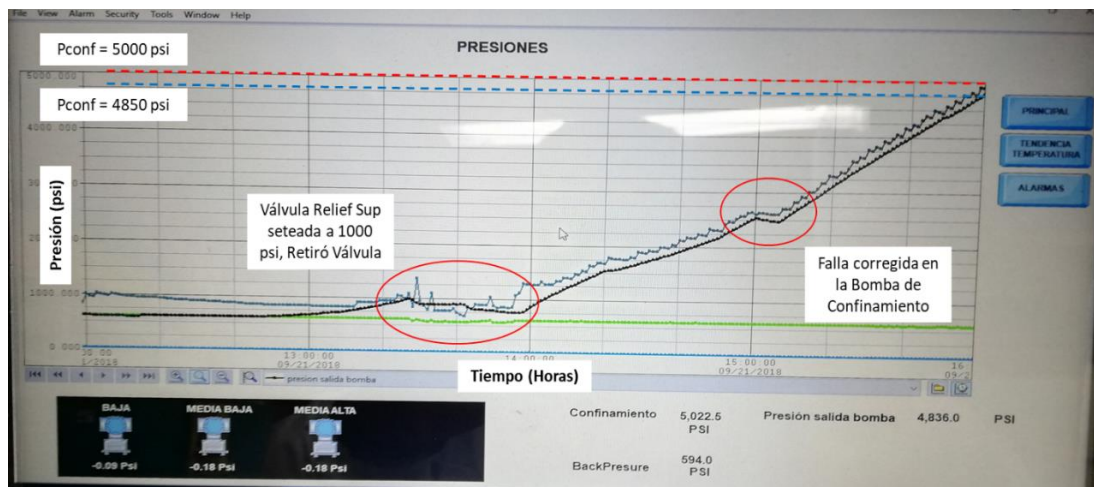
Propiedades del Fluido	
Densidad	9.0 [ppg]
Viscosidad Plástica	12 [cP]
Viscosidad de Embudo	40 [seg/qt]
Geles [10''/10'/30']	6/8/11 [lb/100 ft ²]
Punto Cedente	16 [lb/100 ft ²]
PH	9.8
Filtrado	4.8 [ml/30 min]

4.1.4 Ensayo de Laboratorio para el Fracturamiento de una Muestra Sintética Full Diámetro.

Una vez realizado el montaje de la muestra en el Core Holder, la muestra fue puesta dentro del horno de trabajo donde se precalentó hasta una temperatura de 150 °F. Se procedió a realizar la prueba de inyección de fluido de perforación en la muestra manteniendo control de presiones de inyección, de confinamiento y a tasas de 30 y 40 cm³/hora.

Figura 19.

Gráfico en tiempo real de P. Confinamiento / P Inyección Vs Tiempo, Ensayo de fracturamiento con lodo base.



El mecanismo por el cual trabaja el equipo exigía que, para cada aumento en la presión de inyección, la presión de confinamiento debía incrementarse a un valor mayor para garantizar que el flujo ingresara a la muestra y no hacia la zona exterior entre el diámetro externo de la muestra y la manga. Se continuó inyectando fluido hasta registrar un aumento de la presión de inyección de 5000 psi y una presión de confinamiento de 4859 psi sin observar indicio de fracturamiento alguno. No se continuó inyectando e incrementado presión por limitaciones técnicas de las bombas de inyección.

Figura 20.

Retiro de muestra después del ensayo con lodo base.



4.1.5 Resultados y Conclusiones de la Etapa No 1

La prueba experimental para fracturamiento de una muestra sintética ofreció los siguientes resultados:

- Aunque se aplicó un aumento progresivo de la presión al interior de la muestra para intentar romper la roca, había la necesidad de incrementar la presión de confinamiento, generando éste último un esfuerzo de compresión desde el exterior de la muestra que se transmitía entre partículas e impedía que los esfuerzos de tensión al interior del Wellbore (Específicamente en el

concentrador de esfuerzos) ejercido por el fluido de perforación, promoviera la separación de los granos y por ende el fracturamiento.

- Los resultados mostraron la importancia de eliminar la relación directa que había entre la presión de inyección y la presión de confinamiento ejercida por el fluido hidráulico sobre la Manga y por ende sobre el exterior de la muestra.

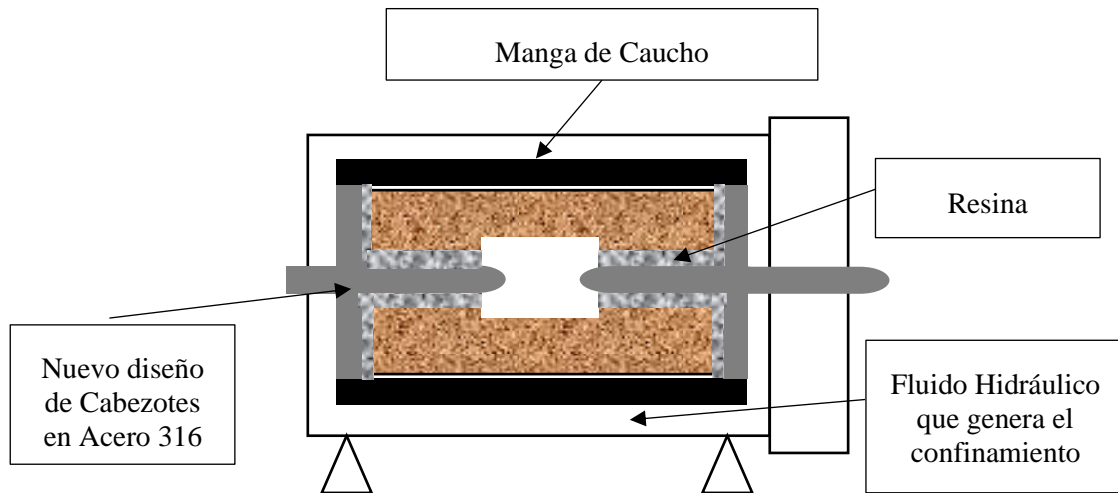
- Aunque se encontró la manera de crear un concentrador de esfuerzos dentro de la muestra, el Core Holder utilizado no permitía simular un esfuerzo axial o de Overburden en las caras superior o inferior de la muestra, solo se logró ejercer un esfuerzo de tensión interna realizada por la presión de inyección de fluido y un esfuerzo radial producto de la presión de confinamiento sobre la muestra el cual simulaba en este caso los esfuerzos horizontales máximo y mínimo que serían iguales en su magnitud.

- La anisotropía de esfuerzos creada por los esfuerzos horizontales y de Overburden no fue simulada. Esta condición anisotrópica juega un papel importante tanto en la creación como en el direccionamiento de la fractura.

- En la figura 17 muestra el esquema de como a partir de la modificación de los cabezotes se puede lograr manipular la presión inyección sin depender de la presión de confinamiento. Estos cabezotes entrarían a la muestra y se cementarían con material epóxico con el fin de inducir presión solamente en el concentrador de esfuerzos y así lograr el fracturamiento de la muestra.

Figura 21.

Propuesta de modificación de Core Holder Full Diámetro con el fin de fracturar la muestra en un proceso de inyección de fluido base



4.2 Etapa No 2: Wellbore Strengthening y Fracturamiento a partir de un Core Holder Convencional Modificado

4.2.1 Diseño y Fabricación para Acondicionar un Core Holder Convencional

Teniendo en cuenta los aspectos técnicos, económicos y resultados a partir de los análisis del anterior experimento; se decidió trabajar en la modificación de un Core Holder convencional de tamaño menor al Core Holder full diámetro utilizado en el experimento No 1.

Figura 22.

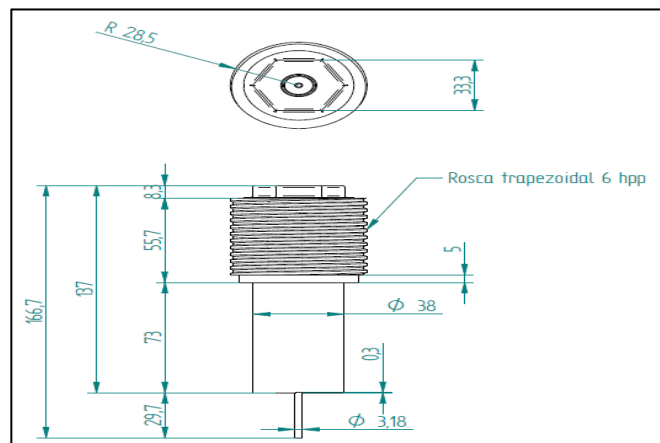
Comparativo de un Core Holder Full Diámetro utilizado en el experimento No 1 respecto a Core Holder Convencional utilizado para ser modificado.



Con el objetivo de lograr superar la limitación encontrada en el experimento No 1 e inyectar fluido al interior de la muestra a una presión mayor e independiente de la presión de confinamiento, se realizó el diseño para la fabricación de 2 cabezotes en material de acero 316 para ser adaptados a cada extremo del cilindro del Core Holder.

Figura 23.

Plano de diseño de cabezotes en material de Acero 316 para fabricación



En la figura 25 se observa los cambios planteados en el Core Holder. A los cabezotes se le realizó una extensión o tubo el cual se introduce en el Wellbore de la muestra simulando el Casing. Al otro lado del cabezote se maquinó de tal forma que permitiera adaptar una llave de copa con el

cual se lograría apretar e inducir un esfuerzo en cada cara de la muestra, simulando de esta manera el esfuerzo de Overbouden que se mediría con un torquímetro.

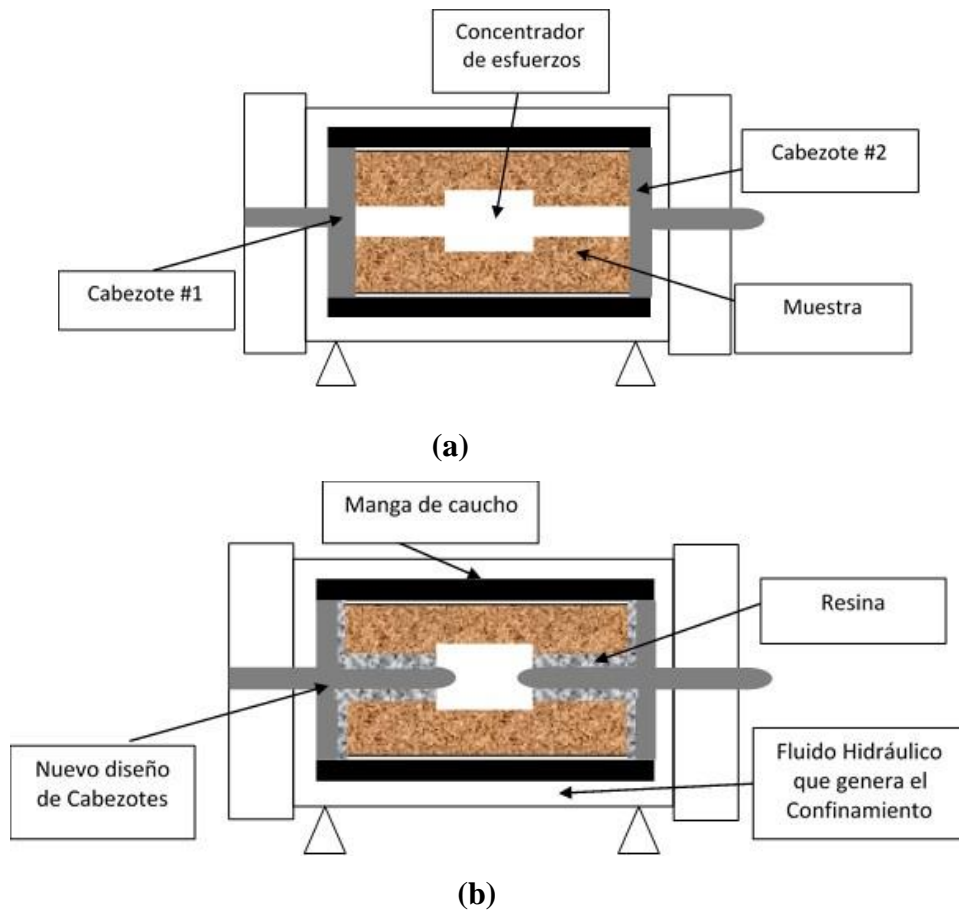
Figura 24.

Cabezotes fabricados en material de Acero 316.



Figura 25.

Acondicionamiento de Core Holder convencional (Figura 26a) a partir de la fabricación de un nuevo diseño de cabezotes (Figura 26b)



4.2.2 Preparación y Caracterización de Muestras Berea

Esta sección consistió en la selección y preparación de muestras para realizar pruebas de fracturamiento usando el equipo acondicionado. Para el experimento fueron asignados 6 plugs de Berea de 11 pulgadas de longitud x 1.5 pulgadas de diámetro. A cada plug se logró extraer 3 muestras de 2.76 pulgadas de longitud y 1 muestra de 2.72 pulgadas para realizar pruebas con inyección de mercurio y ensayos triaxiales.

Figura 26.

Corte de plugs para toma de propiedades y ensayos de fracturamiento



Con el fin de obtener muestras con propiedades similares; se determinaron propiedades tales como Porosidad y Permeabilidad Klinkenberg en laboratorio de análisis petrofísicos básicos. Se tomaron las muestras No 1,3,5 y 6 para el estudio ya que presentaron propiedades similares.

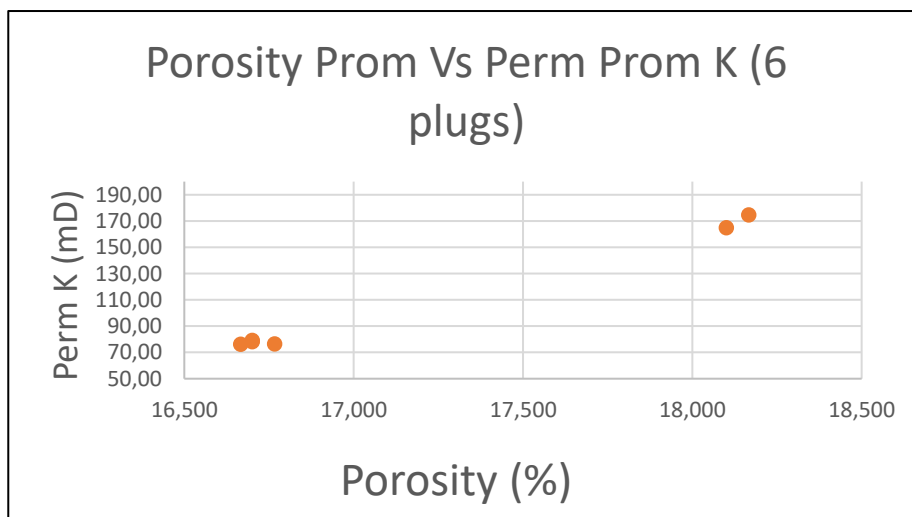
Tabla 3.

Resultado de análisis petrofísico básico en 18 muestras de Berea

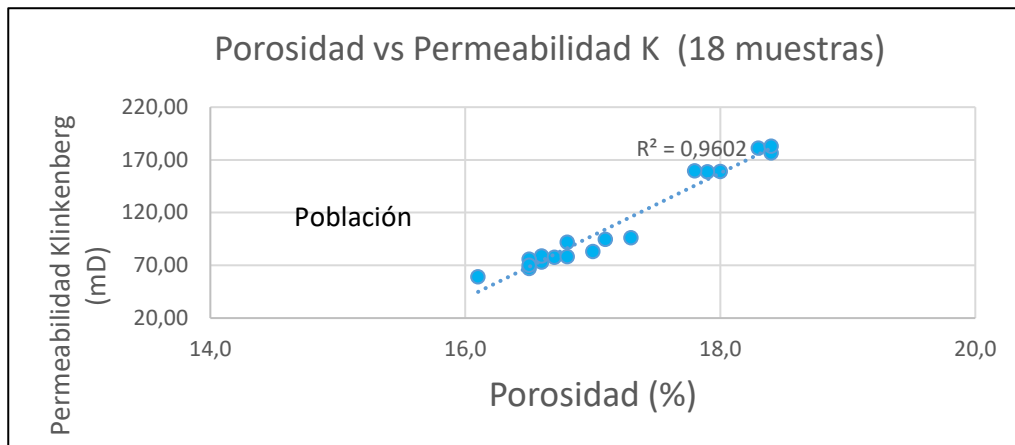
Plug	Sample ID	Identificación	Longitud cm	Diámetro cm	Vol. Poroso cm ³	Promedio porosidad	Promedio permeabilidad d	Porosidad %	Permeabilidad Klinkenberg	
									mD	μm ²
1	1	BE23295A	6,815	3,819	12,954	16,667	76,11	16,6	73,09	7,21E-02
	2	BE23295B	7,373	3,816	13,588			16,1	59,07	5,83E-02
	3	BE23295C	7,102	3,821	14,090			17,3	96,17	9,49E-02
2	4	BE23301A	6,900	3,810	14,133	18,100	164,80	18,0	159,11	1,57E-01
	5	BE23301B	7,399	3,813	15,144			17,9	158,61	1,57E-01
	6	BE23301C	7,237	3,812	15,226			18,4	176,67	1,74E-01
3	7	BE23376A	7,362	3,818	14,006	16,700	78,20	16,6	78,75	7,77E-02
	8	BE23376B	7,229	3,819	13,793			16,7	77,50	7,65E-02
	9	BE23376C	7,418	3,819	14,237			16,8	78,36	7,73E-02
4	10	BE23393A	6,992	3,816	14,667	18,167	174,61	18,3	181,19	1,79E-01
	11	BE23393B	6,931	3,816	14,563			18,4	183,00	1,81E-01
	12	BE23393C	7,154	3,818	14,615			17,8	159,63	1,58E-01
5	13	BE23402A	7,534	3,814	14,239	16,700	79,12	16,5	66,90	6,60E-02
	14	BE23402B	7,458	3,820	14,597			17,1	94,71	9,35E-02
	15	BE23402C	6,996	3,818	13,199			16,5	75,76	7,48E-02
6	16	BE23524A	7,164	3,820	13,815	16,767	76,54	16,8	91,78	9,06E-02
	17	BE23524B	7,246	3,816	13,651			16,5	70,04	6,91E-02
	18	BE23524C	6,834	3,820	13,280			17,0	83,05	8,20E-02

Figura 27.

(a) Gráfico de datos promedio de porosidad versus Permeabilidad Klinkenberg. (b) Gráfico de datos por muestra de porosidad versus Permeabilidad Klinkenberg



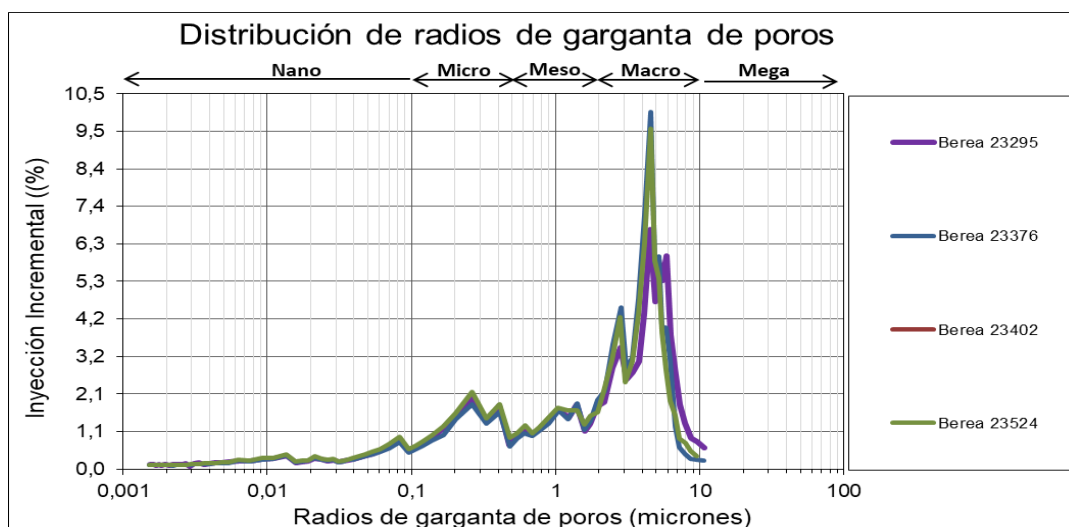
Continúa Figura 27...



Para determinar la distribución de tamaño de poro de las muestras seleccionadas, se llevó cabo ensayo de presión capilar con inyección de mercurio a los 4 plugs seleccionados, haciendo uso de un equipo AUTOPORE IV 9500. La figura 28 muestra gráficamente un resumen de la distribución de radios de garganta de poro para cada plug.

Figura 28.

Distribución de tamaño de garganta de poros. Se tomó una pequeña muestra de cada uno de los 4 plug escogidos para ensayo.



4.2.3 Brazilian Test

Con el objetivo de encontrar una aproximación a la presión el cual las muestras llegarían a fracturar, se hizo necesario recurrir a un ensayo de resistencia a la tensión del material por medio de una Brazilian Test. Dicha prueba consiste en someter una muestra cilíndrica de 1 pulgadas de diámetro x 2 pulgadas de longitud a un esfuerzo uniaxial. Para lograr conseguir el diámetro de 1" a partir de una muestra de 1.5", fue necesario tomar la muestra e introducirla en un recipiente de cartón el cual se le agregó material epóxico. Dicho material se solidificó y de esta manera se logró sostener el cuerpo con una prensa y cortar la muestra con las dimensiones requeridas.

Figura 29.

Preparación de una Muestra para Posterior Prueba de Brazilian Test.



Se llevó a cabo un ensayo de Brazilian Test con el fin de determinar la resistencia a la tensión de la muestra y así tener una aproximación al momento de realizar el primer ensayo de fracturamiento de una muestra de Berea con fluido base usando el Core Holder modificado.

Debido a la alta congestión de trabajos y ensayos pendientes por realizar en el Laboratorio de Rocas, se debió esperar varios meses para la realización de esta prueba. El ensayo fue llevado a cabo por especialistas en esta área.

Debido a las restricciones generadas en laboratorio por causa de la pandemia, el proceso de investigación desde el punto de vista experimental fue detenido. Se emprendió un redireccionamiento del proceso de la investigación basado en los estudios y procedimientos realizados en laboratorio. Por lo anterior se empezó a trabajar en el diseño de un equipo con capacidad de contener muestras de formación dimensionalmente más grandes y a condiciones de esfuerzos más elevados con el fin de realizar pruebas de Wellbore Strengthening.

4.2.4 Resultados y Conclusiones de la Etapa No 2

- Aunque no se logró llegar a la fase de pruebas de fracturamiento con las muestras de Berea Seleccionadas. Se logró adecuar un Core Holder convencional, diseñando unos cabezales que permitan evaluar procesos de fracturamiento y resistencia de la roca.
- El Core Holder Modificado permitirá evaluar pruebas de inyección de fluidos en muestras de Berea (con hueco concéntrico simulando el Wellbore) sometiénolas a un esfuerzo axial simulando el Esfuerzo de Overburden. El modelo tiene similitud a un tamaño de menor escala respecto a los equipos utilizados por Liberman (2012), Nwaoji (2012) y Contreras (2014).
- A pesar de que en el Core Holder Modificado no se puede simular la anisotropía de esfuerzos horizontales (σ_H y σ_h) sobre la muestra; Si se puede lograr un camino preferente de fracturamiento producto de su morfología (Laminación, Deposición de partículas).
- Se puede llegar a evaluar diferentes tipos de fluidos con ensayos de fracturamiento sobre muestras de 1 ½” de diámetro en el Core Holder modificado, a bajas Tasas de Inyección y evaluando parámetros en tiempo real con la ayuda de un Software de detección de datos donde se grafique tendencias de Presión de inyección.

Los resultados concluyeron en la necesidad de diseñar una celda triaxial que permita evaluar sobre muestras de formación cuyo tamaño se pueda lograr no solamente estudiar los diferentes fenómenos de WBS si no también el comportamiento tanto de las fracturas como el sellado de estas bajo condiciones de esfuerzos in situ.

5. Diseño de una Celda Triaxial Verdadera para Pruebas de Wellbore Strengthening

5.1 Selección del Tipo de Equipo

Se puede afirmar que existen 2 tipos principales de equipos en la literatura, donde su diferencia radica en la geometría y en los esfuerzos principales simulados.

El primero corresponde a lo que se refiere a una *Celda triaxial* y el segundo a una *Celda Triaxial Verdadera*. La *Celda Triaxial*, aunque su nombre refiere a 3 componentes; son equipos cilíndricos donde se ejecuta 2 esfuerzos principales sobre la roca en estudio: 1 esfuerzo de confinamiento (Simulando el esfuerzo Horizontal) y 1 esfuerzo axial (Simulando el esfuerzo vertical o de Overburden). Un ejemplo de éste fue el utilizado en los experimentos de Contreras (2014), y que fue descrito en los Antecedentes.

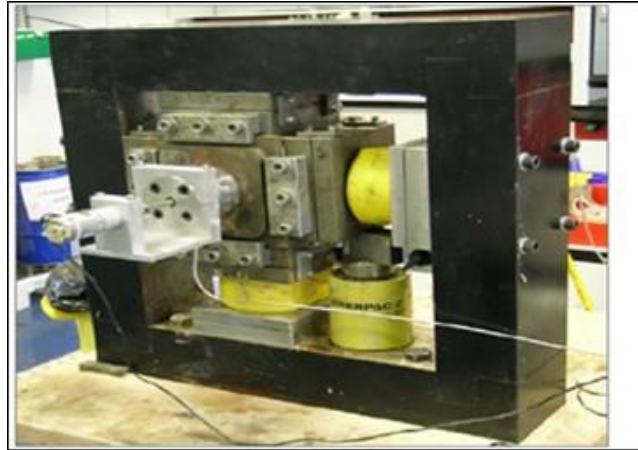
Figura 30.*Celda Triaxial*

Nota. Experimental Investigation on Wellbore Strengthening in Shales by Means of Nanoparticle-Based Drilling Fluids. At the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Amsterdam, The Netherlands. Adaptado de Contreras, Hareland, y Nygaard, (2014).

Por otro lado; *La Celda Triaxial Verdadera* permite simular físicamente los 3 esfuerzos principales in situ actuando sobre la muestra (Esfuerzo Horizontal Máximo, Esfuerzo Horizontal Mínimo y Esfuerzo de Overburden) generando así una mayor similitud a las condiciones reales en un pozo. Un ejemplo de este tipo de equipo fue el utilizado por Guo (2014). La figura 31 muestra una celda bajo una configuración que se puede ejercer los 3 esfuerzos sobre la muestra contenida dentro de ella.

Figura 31.

Equipo de prueba con 3 pares de platos que generan los 3 esfuerzos principales.



Nota. A comprehensive experimental Study on Wellbore Strengthening. Adaptado de Guo et al., (2014).

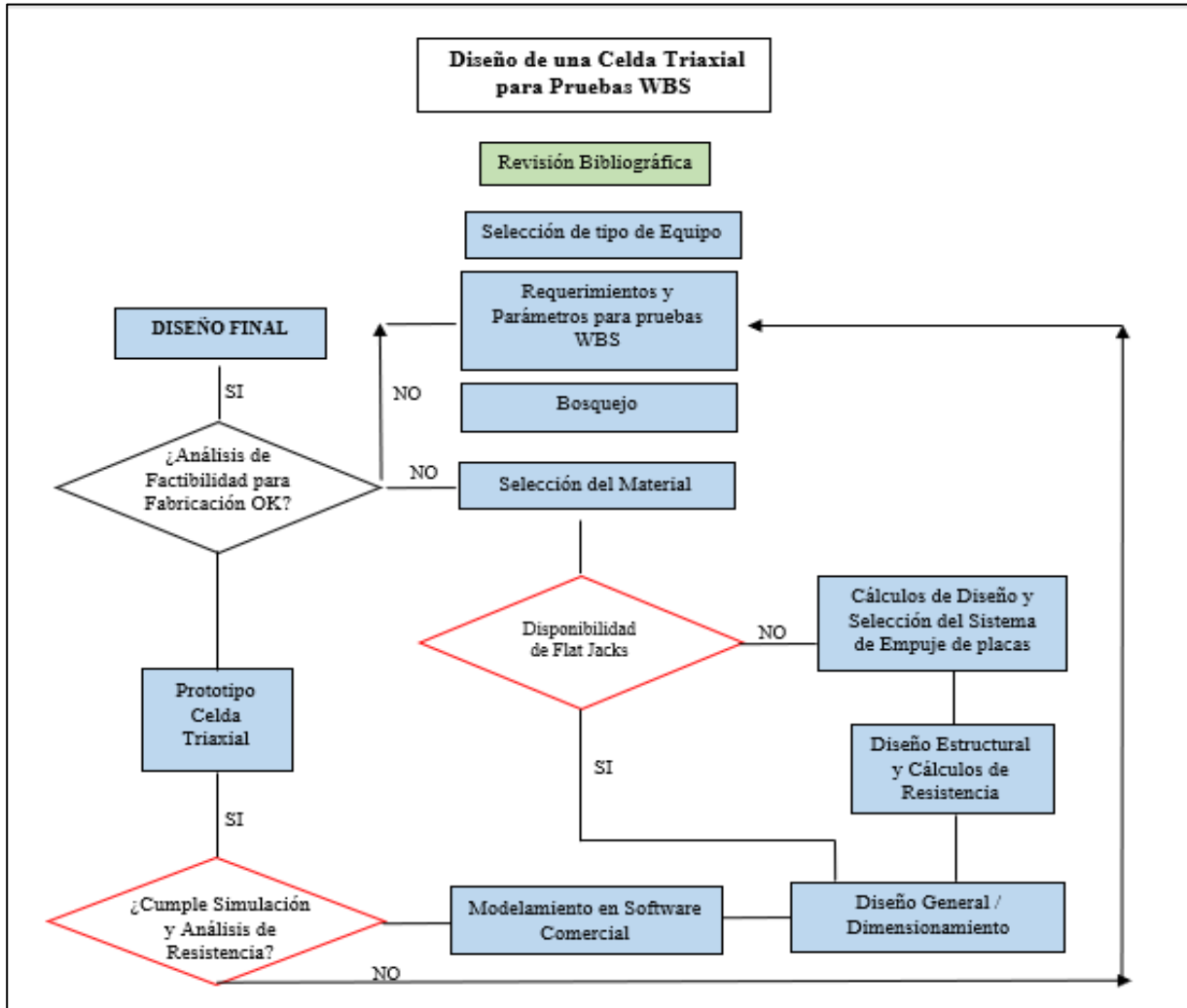
Teniendo en cuenta que simular los 3 esfuerzos principales en un ensayo experimental es acercarse un poco más a las condiciones reales, y teniendo en cuenta que bajo este mecanismo se puede lograr simular una condición de anisotropía, donde los esfuerzos horizontales máximo y mínimo junto con el esfuerzo vertical son protagonistas; se tomó como modelo de diseño a realizar una *Celda Triaxial Verdadera* el cual contendrá muestras de Roca cúbicas.

5.2 Metodología

Se elaboró la metodología mostrada en la figura 32 como herramienta de orientación. La metodología partió desde la revisión bibliográfica disponible, la escogencia del tipo de equipo a diseñar y los requerimientos de parámetros de acuerdo con las pruebas de WBS realizadas en diferentes partes del mundo. Durante el proceso de diseño se elaboraron diferentes modelos de Celdas triaxiales, de los cuales varios fueron descartados debido a su maniobrabilidad, resistencia a parámetros de trabajo, tipo de material, disponibilidad y costos.

Figura 32.

Mapa de Conceptualización de la Metodología utilizada para la realización de la una Celda Triaxial Verdadera.



5.3 Modelos Realizados Previos al Diseño Final

Durante el proceso, surgieron diferentes diseños de Celdas Triaxiales, buscando así 3 objetivos principales:

- Diseñar un equipo que pueda simular 3 esfuerzos ortogonales el uno del otro ejerciendo presión sobre una muestra de roca. Los 3 esfuerzos son ejercidos a partir de una fuente de potencia

hidráulica proveniente de un sistema de 3 Cilindros hidráulicos con capacidad de presión de acuerdo con los requerimientos del diseño.

- Permitir el proceso de inyección de fluidos dentro de la roca a través del Wellbore a una presión tal que se pueda generar un fracturamiento. La inyección será suministrada a partir de una Bomba ISCO DX 100 dual.
- El diseño debe ser compatible con el sistema de líneas de inyección y sistema de monitoreo / adquisición de datos existente en laboratorio (Opto 22).

5.3.1 Parámetros Requeridos para Pruebas de WBS

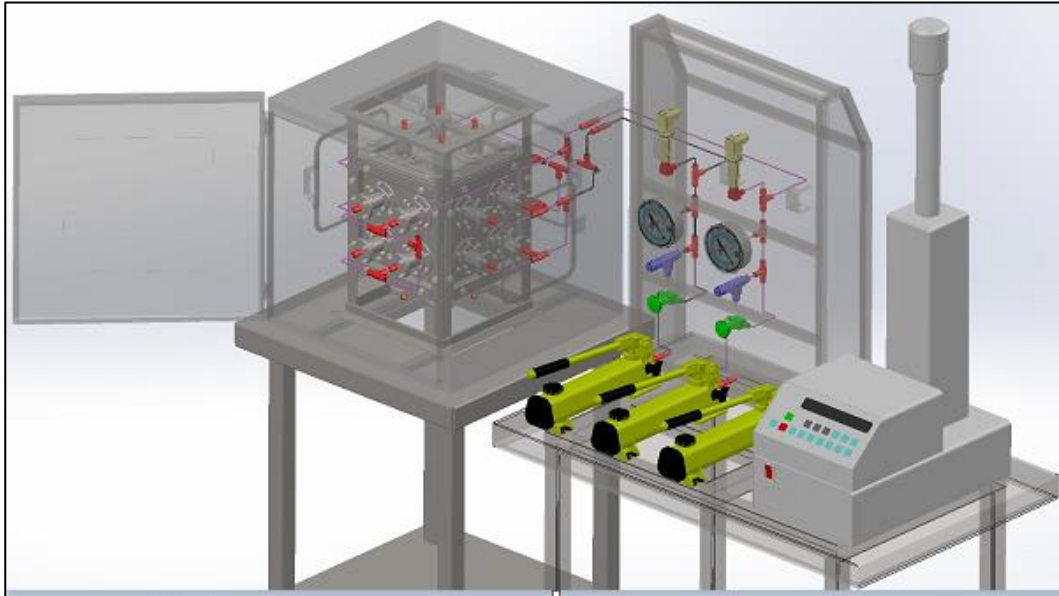
Tabla 4.

Rango de Parámetros requeridos para el diseño de la Celda.

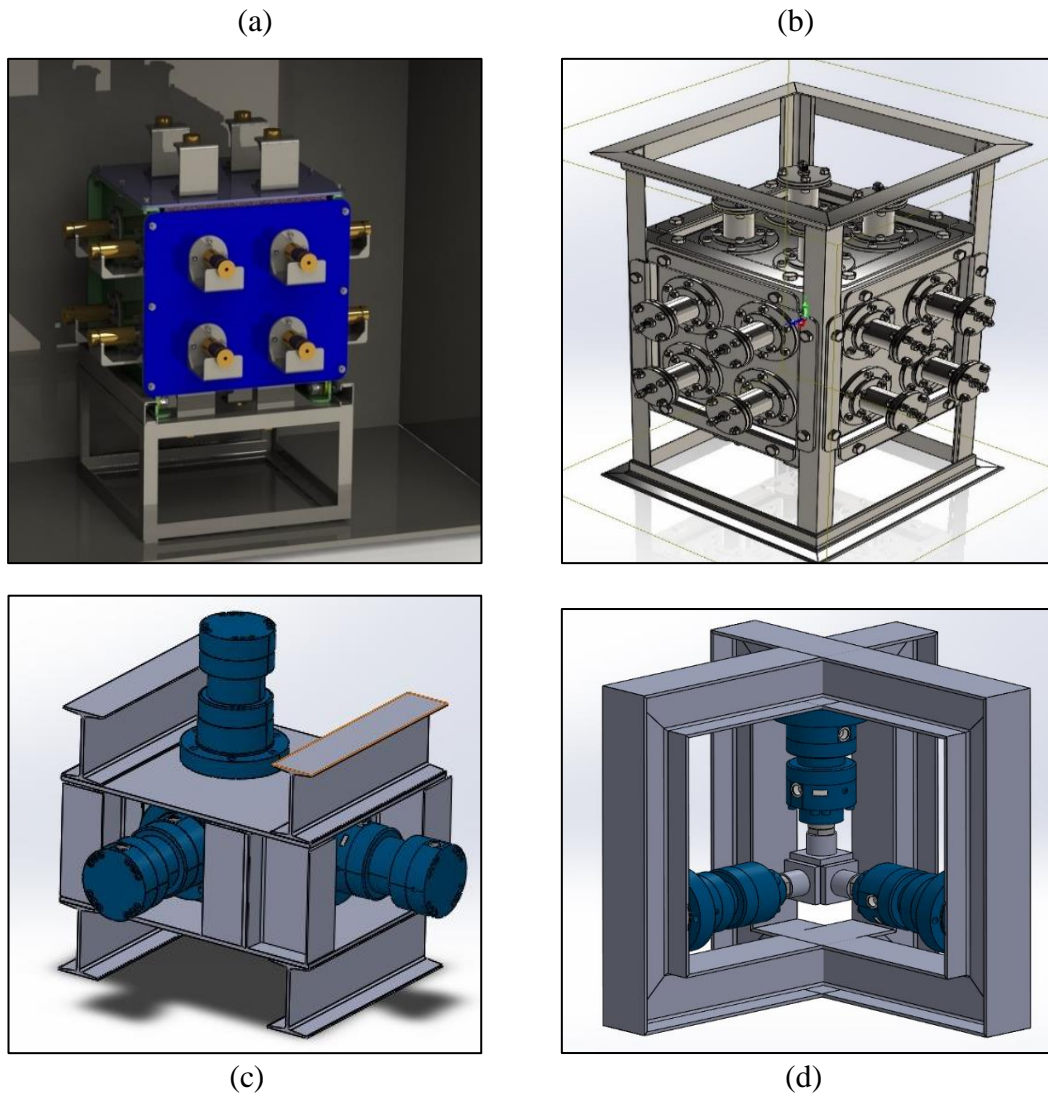
Rango de esfuerzos sobre la Cara de la Muestra	0 – 2500 psi
Tamaño de la muestra	Entre (15 x 15 x 15) cm y (30 x 30 x 30) cm
Mecanismo de Acción de Esfuerzo sobre la Cara de la muestra	Flat Jacks o Cilindros
Sistema de Inyección de fluido de fracturamiento	Bomba tipo jeringa ISCO DX 100
Esfuerzos principales simulados con el diseño	σ_v , σ_H , σ_h
Diámetro del Wellbore para inyectar fluido de prueba	7.5 mm – 10 mm

Figura 33.

Esquema inicial de una Celda Triaxial para muestras de 20x20x20 cm (izquierda) y panel de inyección (derecha) que consiste de 3 Bombas manuales y 1 Bomba Eléctrica tipo Jeringa.



Al inicio se pretendió diseñar una Celda con capacidad de manipular los 3 esfuerzos y operarlos en un rango de presión sobre la cara de la muestra entre 0 y 5000 psi. También se quería trabajar en muestras de 30x30x30 cm. Este rango de presión y de tamaño fue disminuyendo a medida que se realizaban cálculos de diseño, de resistencia, simulaciones de análisis estático y de factibilidad económica.

Figura 34.*Modelos Previos al Diseño Final.*

La figura 34, muestra 4 de los modelos que surgieron durante el proceso de diseño. El diseño fue evolucionando en función de los altos esfuerzos que se manejarían, por ende, la estructura que contendría los Cilindros Hidráulicos fue convirtiéndose con el tiempo cada vez más robusta.

5.3.2 Modelo de 24 Cilindros

Los modelos presentados en las figuras 35a y 35b presentaban 4 cilindros en cada cara de la muestra para un total de 24 Cilindros encargados de empujar. Para ello se desarrolló modelos tanto de los cilindros como de la celda y su estructura. Se realizaron cálculos de diseño y simulaciones de análisis estático en cada uno de los componentes. Los resultados hicieron reconsiderar el modelo y así cambiarlo por un sistema de empuje más sencillo y con cilindros comercialmente disponibles.

Figura 35.

Modelo de Celda No 2 para muestras de 20 x 20 x 20 cm. Cada tapa se conformaba de una placa fija atornillada a la estructura y una placa móvil por acción de los cilindros.

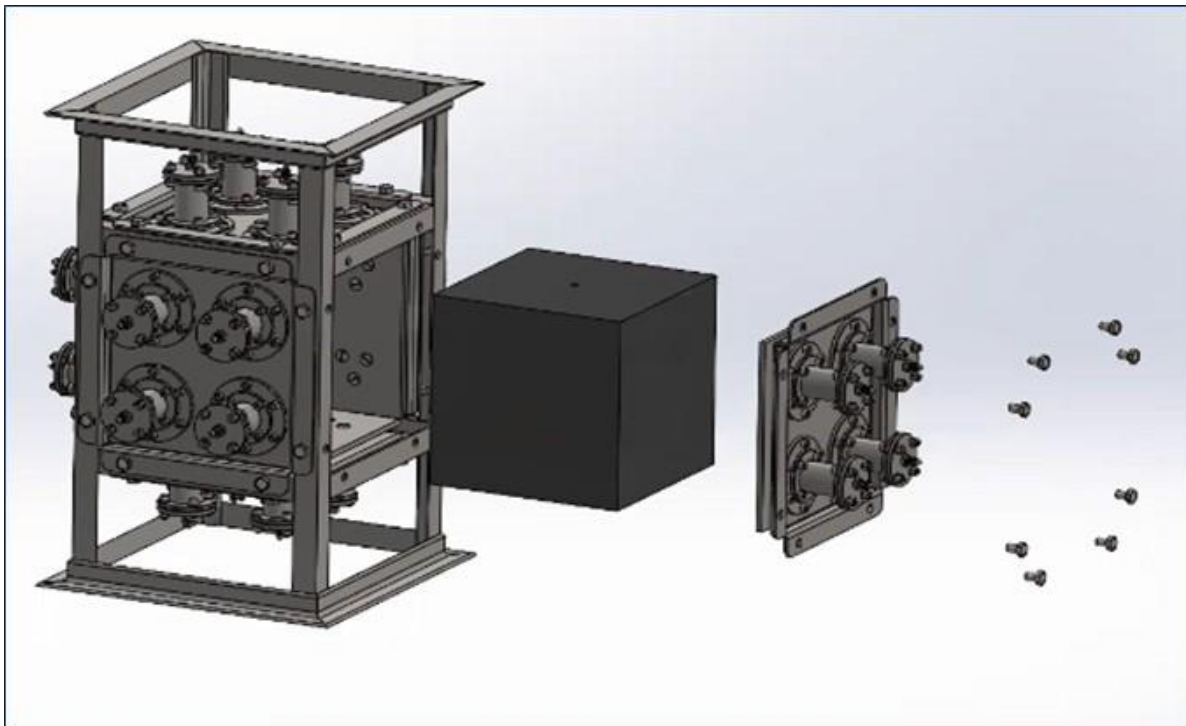
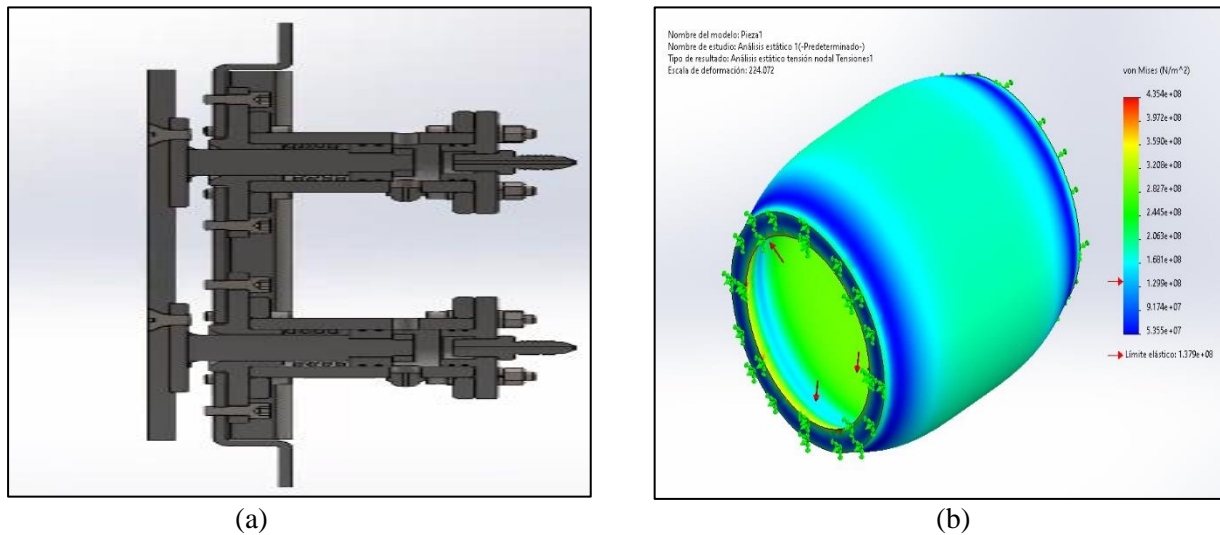


Figura 36.

(a) Sección transversal del sistema de empuje diseñado bajo modelo de la figura 36b. (b) Simulación de Análisis Estático del Cilindro o Camisa del pistón del Sistema de empuje en un Modelo de la figura 36b.



El proceso de diseño de este tipo de modelo se tornó complejo ya que se necesitaba partir desde el diseño de los cilindros, una vez se tuviera los cilindros se debía elaborar el diseño del resto de la estructura considerando los altos esfuerzos requeridos. Teniendo en cuenta la tarea laboriosa, tiempo que demanda y los gastos económicos mayores en comparación de usar cilindros comerciales; se optó por buscar y seleccionar un sistema de empuje comercial que cumpliera con los requerimientos.

5.4 Sistema de Empuje para generar 3 esfuerzos Ortogonales sobre la Muestra

Frash *et al.*, 2014; Zhong *et al.*, 2019; Cheng *et al.*, 2020 trabajaron con equipos triaxiales donde el mecanismo de placas móviles (Para ejercer los tres esfuerzos principales) se realizaba por accionamiento de *Flat Jacks*.

Los *Flat Jacks* consisten básicamente en una almohadilla de presión de acero cargado de aceite y equipado con dos tubos de acero, uno para la conexión de la bomba y otro para vincular otra almohadilla o para conectar un sensor de presión.

Aunque el sistema de empuje por medio de *Flat Jacks* hace que el diseño de la Celda sea práctico y compacto; este fue descartado ya que en la Región donde se le quiere hacer uso no hay la disponibilidad, soporte técnico, repuestos y mantenimiento.

Por otro lado, Guo *et al.*, 2014 realizó pruebas sobre un equipo triaxial cuyo mecanismo de placas móviles consistía en 2 Cilindros hidráulicos comerciales que se accionaban contra un marco de acero cuadrado empujando así los 2 pares de caras de la muestra paralelos al *Wellbore* (Figura 32). El esfuerzo aplicado sobre el tercer par de caras del cubo de roca perpendicular al *Wellbore* es suministrado por dos pares de platos de acero el cual eran apretados hacia el tercer par de caras ejerciendo un esfuerzo mucho menor en comparación a los esfuerzos que podrían ejercer los Cilindros.

Se tomó como referencia los mecanismos anteriormente expuestos para lograr realizar un diseño de empuje de placas cuyos materiales, repuestos y mantenimiento sean asequibles. En este proceso surgieron diferentes modelos de empuje el cual se evaluaron desde el punto de vista de diseño, utilidad, criterios de resistencia y maniobrabilidad.

Para llegar al diseño de una *Celda Triaxial Verdadera*, se basó en la configuración de una prensa hidráulica convencional ya que es uno de los equipos básicos más antiguos que trabajan con presión de aceite. La función de la prensa es transferir fuerza y movimiento a una herramienta o troquel con el fin de formar o troquelar una pieza de trabajo. Dependiendo de su aplicación, la prensa se diseñada para ejecutar un proceso específico.

El diseño de prensa requirió experiencia especial y conocimiento del proceso para lo que es requerido. Las prensas hidráulicas funcionan según los principios de la física usando y distribuyendo la presión hidrostática que actúa sobre una superficie para producir fuerza hidráulica. Las prensas hidráulicas brindan mejor rendimiento y confiabilidad que las prensas mecánicas, aunque las prensas mecánicas se usan comúnmente en aplicaciones tradicionales que son repetitivas y de alta demanda de frecuencia.

Ya que en los laboratorios se dispone de generadores de presión hidráulica (Bombas Hidráulicas) y en lo que respecta al diseño de la Celda; se escogió la potencia hidráulica como punto de partida para la realización del diseño en general.

Las prensas hidráulicas se diseñan como prensas de simple o doble efecto según su función y estructura del cuerpo que pueden ser abiertas o cerradas. Para este caso en particular donde lo que se busca en el diseño es simular 3 esfuerzos (σ_v , σ_h , σ_H) ortogonales entre sí ejerciendo sobre una muestra de formación cúbica, la prensa hidráulica será de simple efecto y con un cilindro que transforma la potencia fluida en fuerza lineal en cada dirección de los 3 ejes principales.

La parte más crítica de una prensa hidráulica es el cuerpo, ya que el tipo y la magnitud de la fuerza que actúa sobre el cuerpo no se pueden definir fácilmente. Los cálculos analíticos son realizados en tres pasos para simplificar el diseño teórico del cuerpo de la prensa.

Primero, el patrón de fuerza que actúa en el cuerpo de la prensa se simplifica e ignora las complejidades. En segundo lugar, se tiene en cuenta un alto factor de seguridad para diseñar los componentes de la prensa en plena carga de los cilindros que actúa sobre todo el sistema. El tercer y último paso incluye el cálculo de las dimensiones generales del cuerpo de la prensa. Por ello, el diseño de los componentes de la prensa hidráulica se simplifica considerando estos métodos.

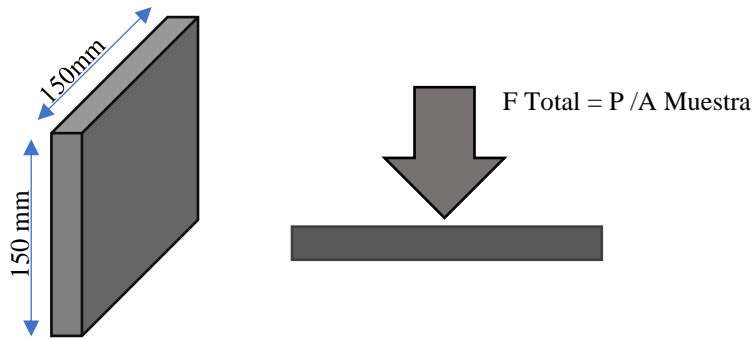
Un proceso de diseño alternativo es también la técnica de modelado u optimización utilizando el método de elementos finitos (FEM) para verificar la resistencia bajo las condiciones operativas requeridas.

5.4.1 Selección del Cilindro Hidráulico

Teniendo en cuenta la presión deseada de 2000 psi en cada una de las tres direcciones sobre la muestra, se realiza el siguiente análisis a partir de Diagrama de Cuerpo Libre DCL.

Figura 37.

Diagrama de cuerpo Libre de la cara de la muestra.



$$\text{Area de la cara de Muestra} = \text{Lado} \times \text{Lado} \text{ (in}^2\text{)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$A \text{ Placa} = 5.9 \text{ in} \times 5.9 \text{ in}$$

$$A \text{ Placa} = 34.81 \text{ in}^2$$

Teniendo el área sobre el cual se ejerce el esfuerzo total, entonces se calcula la fuerza efectiva F_p que debe de ejercer un pistón sobre la cara de la Muestra.

$$F_p = \sigma_p \times A_p \quad (\text{Ecuación 5})$$

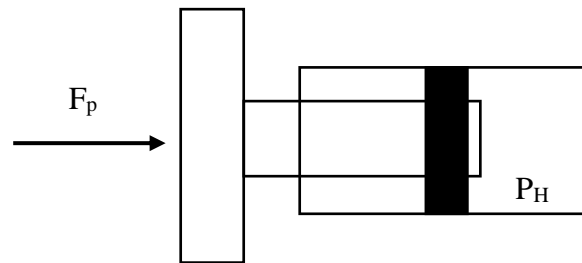
$$F_p = 2000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \times 36 \text{ in}^2$$

$$F_p = 69620 \text{ lbf} = 310 \text{ kN}$$

Teniendo en cuenta la fuerza que se necesita para ejercer 2000 psi en la cara de la muestra. Se procede a realizar un Diagrama de Cuerpo Libre o DCL con el fin de dimensionar el cilindro a utilizar en el diseño. Se puede asumir por *el principio de acción y reacción* que la fuerza F_p sería una fuerza hacia el embolo del Pistón.

Figura 38.

DCL del Cilindro



Para este tipo de sistema de fluido estático, se tiene en cuenta el principio de *Pascal* donde fluido hidráulico ejerce la misma presión en todo el sistema.

Aunque las bombas ENERPAC manuales utilizadas en laboratorio tienen una capacidad de presión de trabajo de hasta 10000 psi, no se encontró cilindros comercialmente disponibles con dicha capacidad. Por lo anterior se tomó entonces una presión máxima de trabajo de 5000 psi (Capacidad de Cilindros comercialmente disponibles). Esta presión se registra en el manómetro de la bomba y por ende también dentro del cilindro. Con la fuerza se puede calcular finalmente el diámetro interno en el Cilindro.

$$A_{\text{cilindro}} = \frac{F_p}{P_{\text{Ejercida por la Bomba}}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$A_{\text{Cilindro}} = \frac{69620 \text{ lb} - f}{5000 \text{ lb}/\text{in}^2} = 13.924 \text{ in}^2$$

$$D_{\text{interno del cilindro}} = \sqrt{\frac{4 * A_c}{\pi}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$D \text{ Interno del Cilindro} = \sqrt{\frac{4 * 13.924 \text{ in}^2}{\pi}} = 4.21 \text{ in} \cong 107 \text{ mm}$$

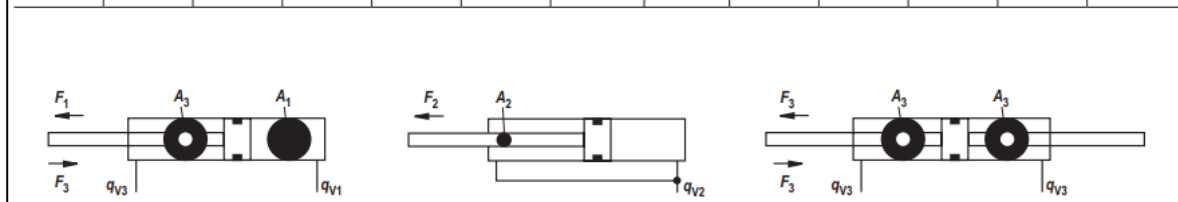
Ya calculado el diámetro interno requerido del cilindro (107 mm) y la fuerza requerida (310 kN) se remitió dicha información a los catálogos de cilindros comercialmente disponibles.

De acuerdo con el catálogo comercial del fabricante REXROTH BOSCH en la Tabla 5, se fabrica cilindros de tipo CDH3 MF3 que trabajan a 5000 psi de presión hidráulica con diámetro interno de 125 mm y una fuerza máxima de 429.52 KN, el cual es superior al máximo requerido, lo que también nos disminuye la presión de trabajo y no se lleva al límite de los empaques del cilindro que nos podría generar fallas prematuras.

Tabla 5.

Catalogo Cilindro hidráulico Rexroth Bosch de 125 mm de Diámetro.

Diameters, areas, forces, flow												
Piston	Piston rod	Area ratio	Areas			Force at 350 bar ¹⁾			Flow at 0.1 m/s ²⁾			Max. available stroke length
			Piston	Rod	Ring	Pressure	Diff.	Pulling	Off	Diff.	On	
ØAL mm	ØMM mm	φ A ₁ /A ₃	A ₁ cm ²	A ₂ cm ²	A ₃ cm ²	F ₁ kN	F ₂ kN	F ₃ kN	q _{v1} l/min	q _{v2} l/min	q _{v3} l/min	mm
40	28	1.96	12.56	6.16	6.40	43.96	21.56	22.40	7.5	3.7	3.8	2000
50	36	2.08	19.63	10.18	9.45	68.71	35.63	33.08	11.8	6.1	5.7	2000
63	45	2.04	31.17	15.90	15.27	109.10	55.65	53.45	18.7	9.5	9.2	2000
80	56	1.96	50.26	24.63	25.63	175.91	86.21	89.71	30.2	14.8	15.4	2000
100	70	1.96	78.54	38.48	40.06	274.89	134.68	140.21	47.1	23.1	24.0	3000
125	90	2.08	122.72	63.62	59.10	429.52	222.67	206.85	73.6	38.2	35.4	3000
140	100	2.04	153.94	78.54	75.40	538.79	274.89	263.90	92.4	47.1	45.3	3000
160	110	1.90	201.06	95.06	106.00	703.71	332.71	371.00	120.6	57.0	63.6	3000
180	125	1.93	254.47	122.72	131.75	890.65	429.52	461.13	152.7	73.6	79.1	3000
200	140	1.96	314.16	153.96	160.20	1099.56	538.86	560.70	188.5	92.4	96.1	3000
220	160	2.12	380.1	201.0	179.1	1330.5	703.7	626.8	228.1	120.7	107.4	6000
250	180	2.08	490.8	254.4	236.4	1718.1	890.6	827.4	294.5	152.7	141.8	6000
280	200	2.04	615.7	314.1	301.6	2155.1	1099.6	1055.6	369.4	188.5	180.9	6000
320	220	1.90	804.2	380.1	424.2	2814.9	1330.5	1484.4	482.5	228.1	254.4	6000



Por lo tanto, el espesor del tubo del cilindro hidráulico también se puede encontrar utilizando la formulación de estructura de paredes delgadas de la siguiente manera;

$$S_o = \sqrt{\frac{1.7 \cdot d_i \cdot P_b \cdot S}{200 \cdot \sigma_y}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, p. 132).

Donde σ_y es el límite elástico del material, P_b la presión de trabajo del cilindro en pascales (5000 psi) y S es el factor de seguridad de 2 en este caso de acuerdo con los valores mínimos recomendados según Faires en el libro de Diseño de Máquinas el cual sugiere un valor entre 1.5 y 2 para materiales dúctiles.

$$S_o = \sqrt{\frac{1.7 \cdot 0.125m \cdot 3.5 \times 10^7 Pa \cdot 2}{200 \cdot 240 \times 10^6 Pa}} = 0.017 m = 17 mm$$

En consecuencia, el diámetro del cilindro hidráulico d_a , se puede encontrar de la siguiente manera;

$$d_a = d_i + 2 \cdot S_o \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$d_a = 125 + 2 \cdot 17 = 159 mm$$

Si corroboramos con la tabla No 6, se observa que el diámetro exterior del cilindro seleccionado es de 160 mm.

Tabla 6.*Medidas del Cilindro hidráulico Rexroth CDH3 125.*

Dimensions														
Round flange at head CDH3/CGH3: MF3 (dimensions in mm)														
ØAL	ØMM	KK 5)	A 5)	KK 6)	A 6)	NV	ØD	ØDA	ØD4 2)	EE 4; 16)	EE 4; 17)	Y	PJ	X1
40	28	M22x1,5	22	M24x2	35	22	92	52	34	G1/2	M22x1,5	91	120	43
50	36	M28x1,5	28	M30x2	45	30	108	62	34	G1/2	M22x1,5	90	120	51.5
63	45	M35x1,5	35	M39x3	55	36	140	78	42	G3/4	M27x2	117	133	67
80	56	M45x1,5	45	M50x3	75	46	148	100	42	G3/4	M27x2	124	146	71.5
100	70	M58x1,5	58	M64x3	95	60	186	125	47	G1	M33x2	119	171	90.5
125	90	M65x1,5	65	M80x3	110	75	235	160	58	G1 1/4	M42x2	170	205	114
140	100	M80x2	80	M90x3	120	85	258	175	58	G1 1/4	M42x2	186	219	126
160	110	M100x2	100	M100x3	140	95	292	200	65	G1 1/2	M48x2	210	240	142.5
180	125	M110x2	110	M110x4	150	110	325	220	65	G1 1/2	M48x2	241	264	159.5
200	140	M120x3	120	M120x4	160	120	350	245	65	G1 1/2	M48x2	262	278	172.5
220	160	M120x3	120	M120x4	160	140	375	292	65	G1 1/2	M48x2	262	326	185
250	180	M130x3	130	M150x4	190	160	440	324	65	G1 1/2	M48x2	272	336	218
280	200	-	-	M160x4	200	180	460	368	65	G1 1/2	M48x2	282	366	228
320	220	-	-	M180x4	220	200	490	406	65	G1 1/2	M48x2	287	391	243

El diámetro mínimo del vástago del pistón d_3 , de un cilindro de retorno por resorte de simple efecto también se puede calcular en función del pandeo a partir de Euler. Este tipo análisis nos lleva a considerar el vástago como una columna en términos de construcción ya que por un extremo el vástago se sometería a la presión hidráulica y por otro lado a la cara de la muestra de Roca. Teniendo en cuenta lo anterior, se expresaría de la siguiente manera.

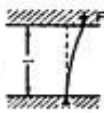


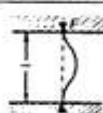

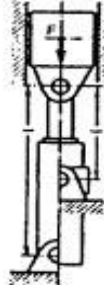
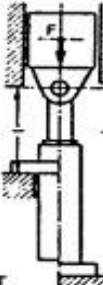
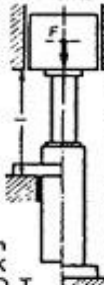
$$d_3 = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot F \cdot S \cdot S_k^2}{\pi^3 \cdot E}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, p. 132).

Donde S_k es la longitud del vástago del pistón, que, de acuerdo con el modelo de Euler y el modelo escogido, debe multiplicar el Valor de S_k por 2, donde S_k es la longitud desde la punta del vástago hasta el punto de sujeción del cilindro. (Ver Figura 40) S es el factor de seguridad que para Euler es 3.5; E es el módulo de elasticidad del material del vástago.

Figura 39.

Disposiciones de los cilindros hidráulicos para la longitud del vástago para caculos de la columna.

Solicitaciones según Euler				
Solicitaciones según Euler	Caso 1	Caso 2 (básico)	Caso 3	Caso 4
	Un extremo libre, un extremo fijo	Dos extremos articulados	Un extremo articulado, un extremo fijo	Dos extremos fijos
Gráfico				
Longitud libre de pandeo	$s_K = 2l$	$s_K = l$	$s_K = l \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$	$s_K = \frac{l}{2}$
Situación de montaje del cilindro	 Forma de sujeción C, D, F, H, K L, M, N, P, Q, T	 Forma de sujeción B, E, G, R, S	Indicación: Guiado cuidadoso de la carga, posible bloqueo  Forma de sujeción C, D, F, H, K L, M, N, P, Q, T	Indicación: Desfavorable; gran posibilidad de bloqueo  Forma de sujeción C, D, F, H, K L, M, N, P, Q, T

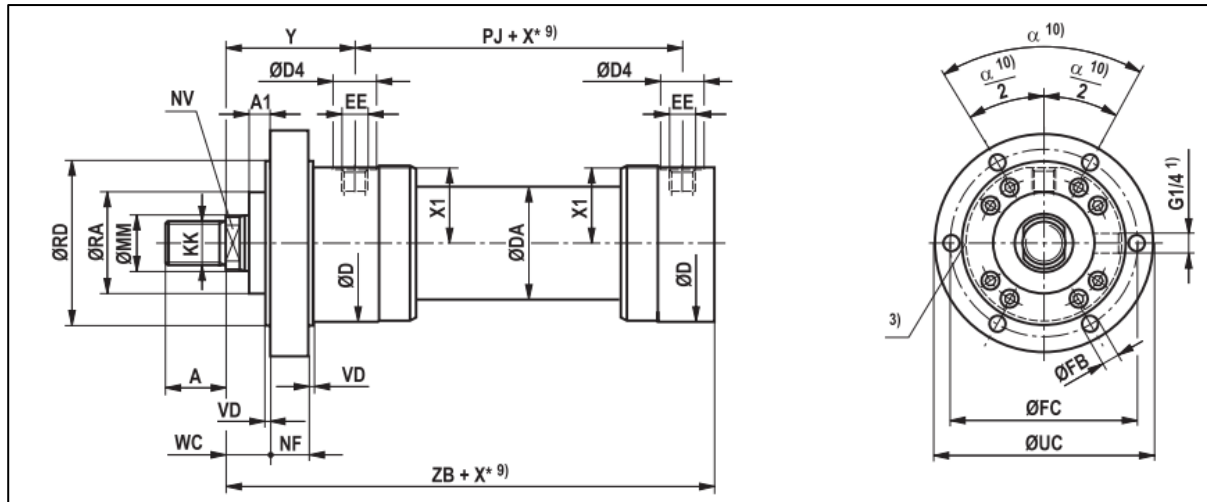
Entonces la expresión se desarrollaría así:

$$d_3 = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot F \cdot S \cdot S_k^2}{\pi^3 \cdot E}} = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 429.52 \times 10^3 \cdot 3.5 \cdot (2 \times 0.215)^2}{\pi^3 \cdot 2.07 \times 10^{11} \text{ pascal}}}$$

$$d_3 = 2 \cdot \sqrt[4]{1.7323 \times 10^{-7}} = 2 \cdot 0.02 = 0.04 \text{ m} = \mathbf{40 \text{ mm}}$$

Figura 40.

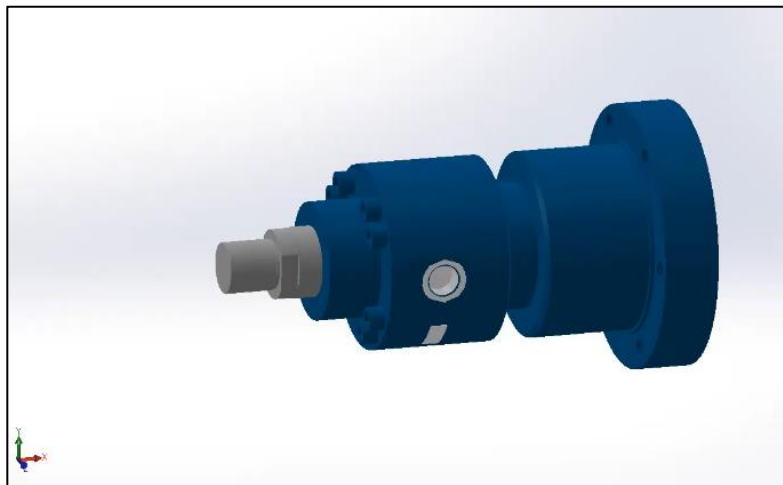
Catálogo de fabricante, Diagrama de medidas del cilindro hidráulico Rexroth CDH3 125 Seleccionado.



Revisando las especificaciones del cilindro tipo Rexroth CDH3 125 seleccionado en la Tabla 6 podemos corroborar que el diámetro exterior de la camisa es de 160 mm y el diámetro del vástago es de 90 mm, lo que nos garantiza que está acorde a los cálculos básicos. A continuación, se muestra en la figura 41 el modelo suministrado por el fabricante.

Figura 41.

Modelo de Cilindro en SolidWorks suministrado por el Fabricante REXROTH BOSCH

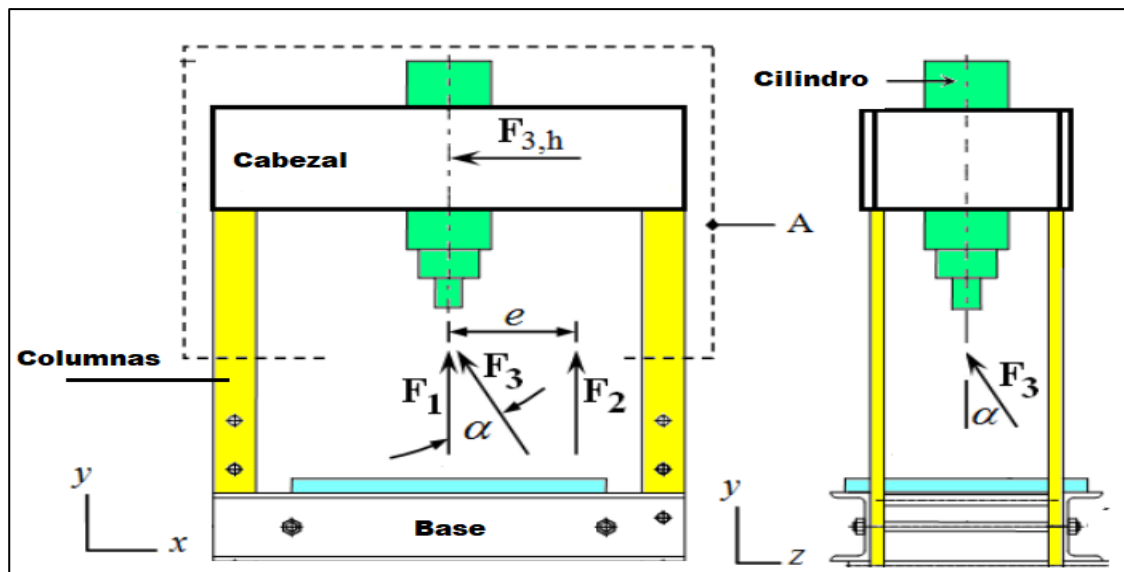


5.5 Diseño de Estructura o Frame

Se diseña una combinación de prensa hidráulica con diferentes configuraciones estructurales con una capacidad de 310 kN de compresión en una dirección para evaluar qué tipo de perfil es el adecuado. Para ello se hace un esquema representado en la Figura 42 Donde el Cabezal, las Columnas y la Base son diseñadas con el mismo tipo de material (Acero DIN 17100 St360-2) y el mismo tipo de perfil. El cilindro en este caso estará sujeto al cabezal.

Figura 42.

Diagrama de Fuerzas en Prensa Axial de una Dirección.

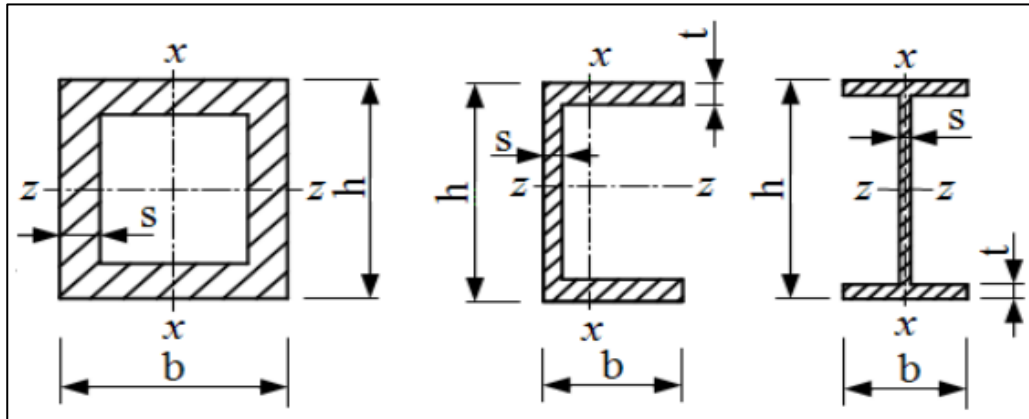


Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, p. 132).

Se evalúa 3 secciones de perfiles diferentes el uno del otro con áreas transversales semejantes y dimensiones que se ajusten para ensamblar con el cilindro hidráulico seleccionado previamente.

Figura 43.

Sección transversal de perfiles a usar en el marco de la prensa.



Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, p. 131).

Para determinar las tensiones normales para los tipos de prensa bajo carga axial, F_1 , despreciando los efectos de cabeza, las columnas se someten exclusivamente a tensión de tracción, σ_t , en los planos xy e yz . Por lo tanto, las tensiones normales se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\sigma_{xy}, \sigma_{yz} = \sigma_t = \frac{F_1/2}{A_a} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, pp. 147, 151).

De manera similar, los componentes de tensión bajo carga excéntrica F_2 , ejercida sobre la prensa se pueden calcular considerando las columnas de prensa despreciando los efectos de cabeza. Las columnas están sujetas a esfuerzos tanto de tracción σ_t , como flexión $\sigma_{b,columna}$, en el plano xy , y esfuerzos de tracción σ_t , en el plano yz de la siguiente manera:

$$\sigma_{xy} = \sigma_t + \sigma_{b,columna} = \frac{F_2/2}{A_a} + \frac{(F_2/2 \cdot L/2) \cdot c_1}{I_{z,c}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_t = \frac{F_2/2}{A_a} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, p. 130).

Los esfuerzos bajo carga oblicua, F_{3xy} , se obtienen descomponiendo F_3 en componentes horizontales y verticales, $F_{3,h}$ y $F_{3,v}$ en direcciones paralelas a los ejes X e Y, respectivamente. Las columnas debajo de F_3 están sujetas a esfuerzos de tracción σ_t , y de flexión $\sigma_{b,columna}$, en el plano xy y esfuerzos de tracción σ_t , en el plano yz. El $F_{3,h}$ también conduce a la tensión de flexión $\sigma_{b,cabeza}$, en la cabeza o viga superior. En consecuencia, la combinación de los esfuerzos en condiciones de carga estática se puede calcular aplicando las reglas de la mecánica de la siguiente manera:

$$\sigma_{xy} = \sigma_t + \sigma_{b,columna} + \sigma_{b,cabeza} = \frac{F_{3v}/2}{A_a} + \frac{(F_{3h} \cdot L) \cdot c_1}{2 \cdot I_{z,c}} + \frac{(F_{3h} \cdot L_p) \cdot c_2}{I_{z,h}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_t = \frac{F_{3v}/2}{A_a} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, p. 200).

Donde $I_{z,c}$ y $I_{z,h}$ son los momentos de inercia de la sección de columna y de la viga soporte del cilindro en la cabeza, respectivamente y que para nuestro diseño son del mismo perfil. C_1 y C_2 son las distancias exteriores desde el eje neutro de las secciones transversales. L y L_p son distancias desde el punto aplicado F_{3h} (centro de la cabeza) hasta la base de la prensa y el extremo del vástago

del pistón hidráulico, respectivamente. Los esfuerzos bajo carga oblicua, F_{3yz} , también se pueden calcular de manera similar. Al despreciar o asumir el esfuerzo cortante igual a cero, el esfuerzo cortante, el valor promedio del esfuerzo normal se puede obtener de la ecuación 16.

$$\sigma_{ave_normal} = \frac{\sigma_{xy} + \sigma_{yz}}{2} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Nota. Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. Adaptado de Aydin, & Kisioglu, (2013, pp. 56, 200).

Por lo tanto, las tensiones combinadas se pueden calcular considerando las Ecuaciones 14 y 15. La fuerza se tomó como $F=310$ kN, y las secciones transversales promedio de las columnas se tomaron de cada perfil. Los valores del momento de inercia dependen de cada sección a usar. Las distancias de los parámetros L y L_p , se especificaron como 600 mm y 250 mm, respectivamente. Los efectos del momento de flexión debido a la fuerza oblicua (F_3) aplicada a la cabeza se calculan considerando las distancias de L y L_p desde el punto aplicado $F_{3,h}$ (transferido al centro del cabezal) hasta la base de la prensa y el extremo del vástago del pistón hidráulico, respectivamente (ver Figura 42).

Con el fin de simplificar los cálculos analíticos, se asume que la rigidez del banco de trabajo de la prensa no tiene afectación alguna. Por lo tanto, las tensiones máximas y mínimas combinadas de todo el modelo de prensa se calculan y se dan en la siguiente Tabla.

Tabla 7.

Cálculo de cargas de acuerdo los tipos de perfil Tipo W, C y Cuadrado

Esfuerzo Combinado, σ total (MPa)	Carga Axial	Carga Excéntrica	Carga Oblicua
Perfil Tipo W	26.31	224.71	319.21
Perfil Tipo C	43.24	571.4	822.9
Tubo cuadrado	33.65	362.39	518.93

En la tabla 7 se puede observar que con perfiles del mismo tamaño y características similares; el mejor tipo de perfil para este tipo de cargas en el W, ya que maneja mejor las cargas excéntricas y combinadas. Adicionalmente las caras planas del perfil ayudan para el montaje de los cilindros y de las placas, reciban y contrarresten las fuerzas de este.

5.5.1 Modelamiento Numérico de la Prensa Hidráulica

Con el fin de corroborar los cálculos realizados para la selección del tipo de perfil de la Celda a diseñar; se empleó el código informático basado en elementos finitos de *SolidWorks* para el Análisis Estático y simulaciones de resistencia del material del diseño de la prensa hidráulica en una dirección. La estructura se maneja como un sólido rígido que nos garantice un cálculo muy real de la estructura, generando así los modelos de elementos finitos como se muestra en la Figura 44. En donde se aplica la fuerza al marco principal 310 kN en las secciones transversales analizadas matemáticamente y donde se fija la parte baja de la prensa.

Figura 43.

Marco estructural de la prensa con cargas y restricciones en el modelo de elementos finitos SolidWorks.

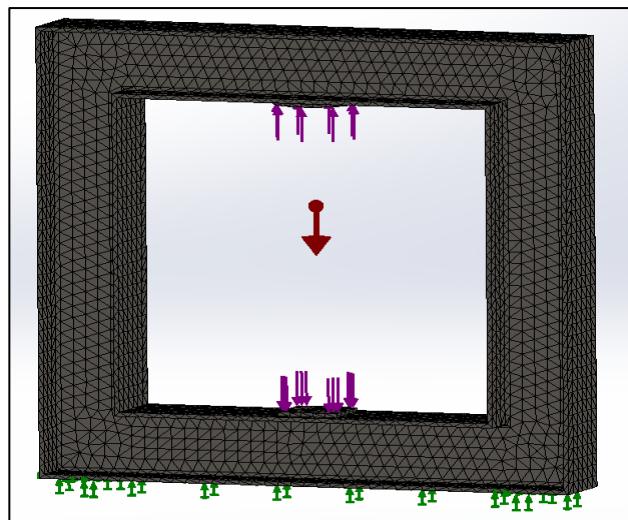
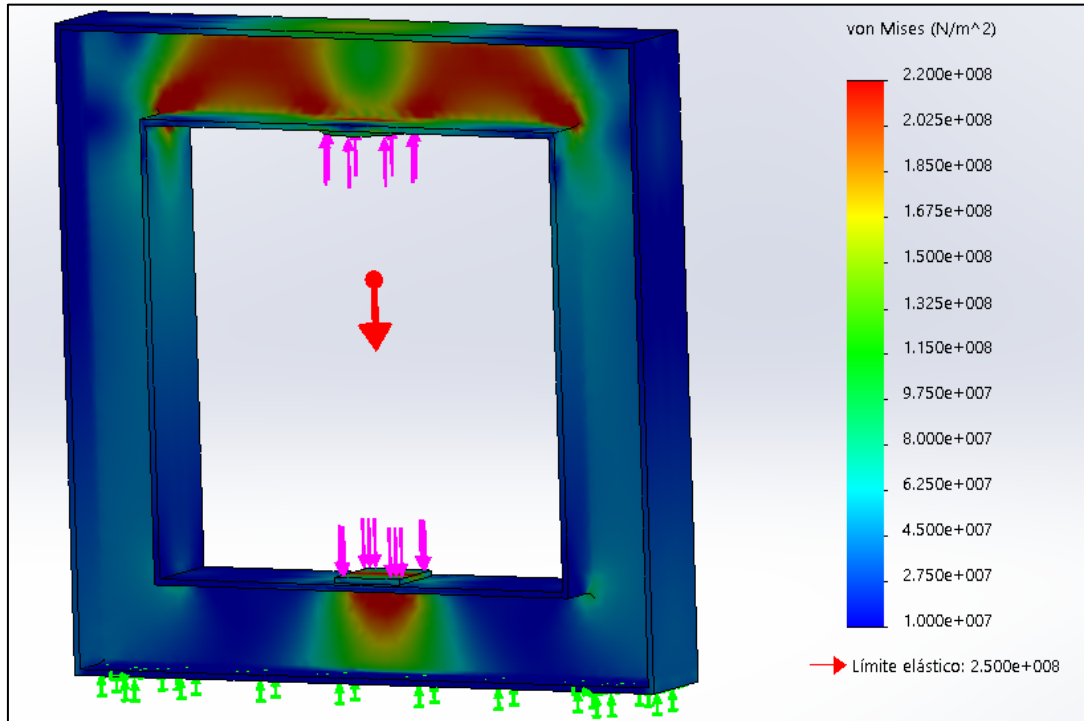


Figura 44.

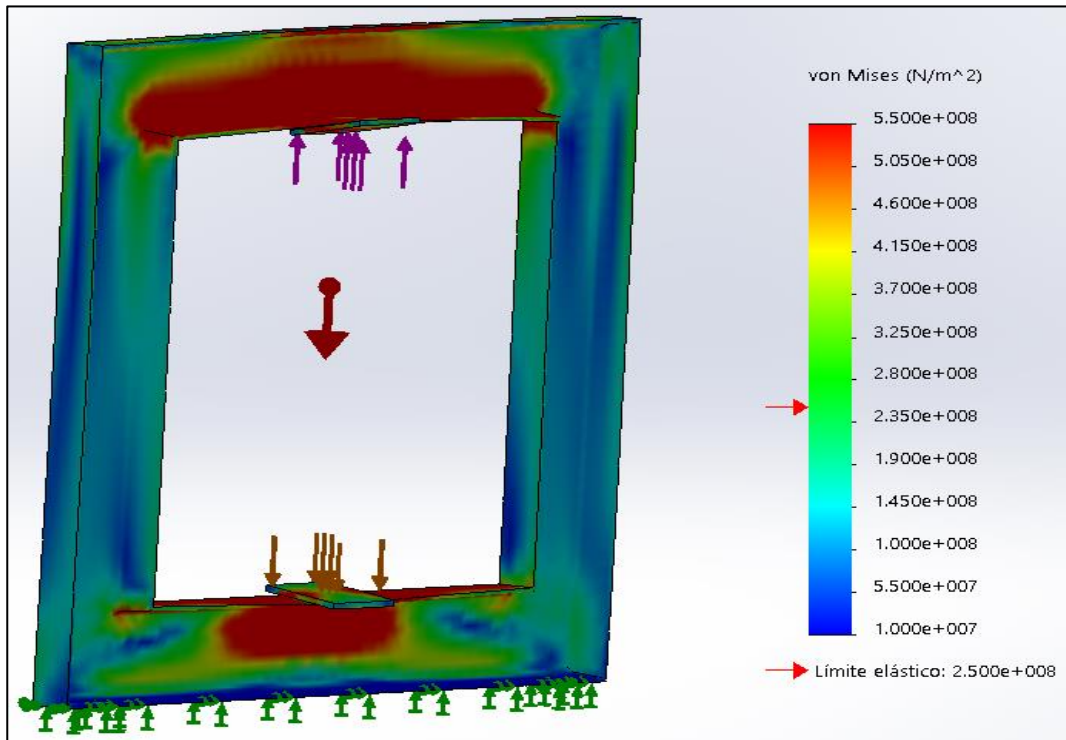
Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa hidráulica con un perfil tipo W200 x 52



En la figura 44 se muestra que el máximo esfuerzo recibido sobre la estructura es 220 MPa el cual es menor al límite elástico que es 250 Mpa. Esto significa que la estructura no fallará bajo las condiciones de esfuerzo establecidas. Cabe anotar que el valor obtenido de la simulación es similar al obtenido en los cálculos manuales correspondientes al perfil de Tipo W (Tabla 7).

Figura 45.

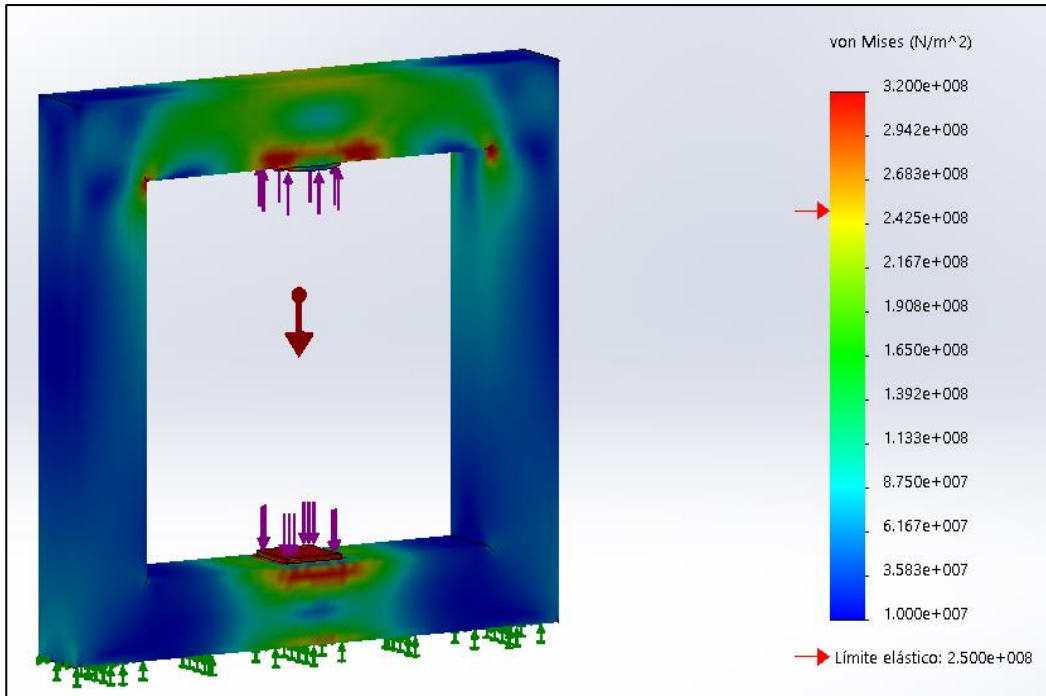
Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa hidráulica con un perfil tipo C8 x 21.25



La figura 45 muestra el análisis estático para un Perfil Tipo C. Los resultados arrojan que, para las condiciones de esfuerzo requeridas, el perfil va a fallar, teniendo así esfuerzos muy por encima del límite elástico.

Figura 46.

Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa hidráulica con un perfil tipo Tubo Cuadrado 200 x 8 mm



La figura 46, muestra que el perfil Tipo Tubo, aunque tuvo una resistencia al esfuerzo mayor que el perfil Tipo C, no alcanzó lo suficiente para soportar el esfuerzo requerido para el presente diseño.

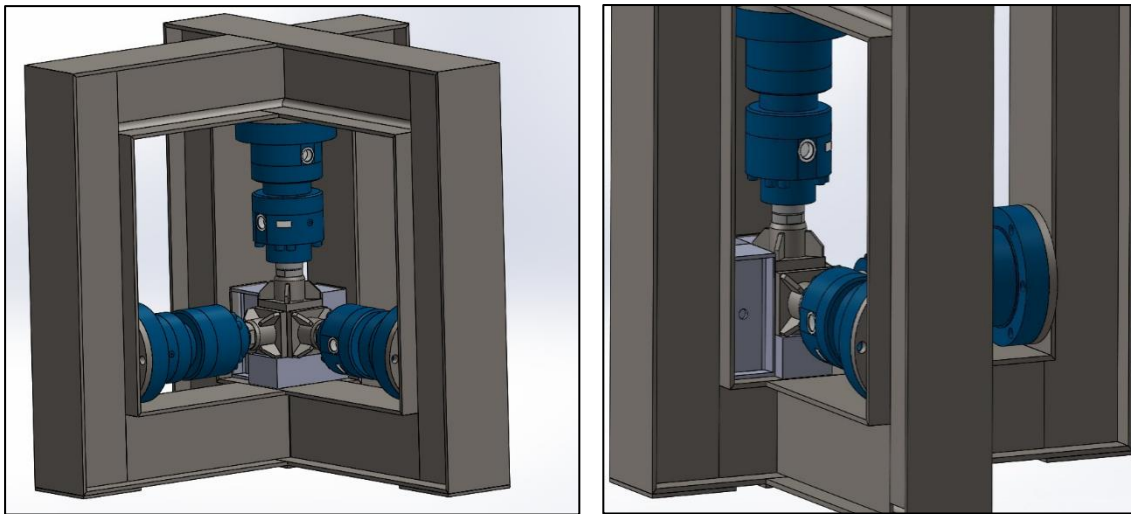
Los resultados computacionales son semejantes a los cálculos matemáticos realizados respecto a cuál es el perfil que mejor se ajusta a la prensa, donde en este caso sigue siendo el perfil Tipo W. La alta inercia y los esfuerzos más bajos nos garantiza un perfil más pequeño, en consecuencia; el marco general que se diseñe será más compacto. Adicionalmente este tipo de perfil se puede reforzar agregando placas en determinados espacios que nos genere y reduzca esfuerzos puntuales.

5.5.2 Modelado General y Análisis Estático

Revisados los esfuerzos en un marco unidimensional; se procede a realizar el diseño de la Celda con los tres ejes principales que van a soportar las cargas que se aplican sobre la muestra de roca que es un cubo 150 mm de lado y al cual es necesario aplicar la carga de 2000 psi. El diseño base se observa en la siguiente imagen.

Figura 47.

Diseño Final Celda Triaxial Verdadera



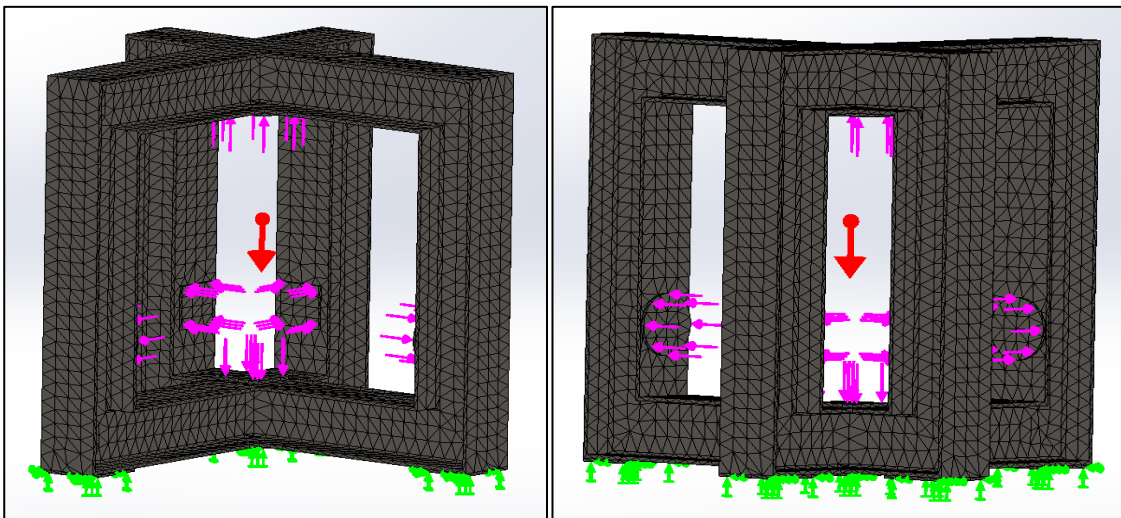
La estructura principal está conformada por dos submarcos cuadrados entrecruzados en perfil W200 que como se observa en la imagen apoyan los cilindros hidráulicos en la parte trasera. En la parte del vástago del cilindro se acondiciona una placa tipo horquilla que va a aplicar la fuerza en la muestra. La muestra de roca se apoya en una base que sirve de guía para las placas de los cilindros contrarios y se apoya al marco en perfil. Luego podemos observar una estructura cerrada que nos y compacta que resiste todas las cargas y que van a tener esfuerzos combinados tanto de tracción, como de flexión y esfuerzos cortantes puntuales en cada componente. La base del marco se fijará a suelo o placa de concreto con el fin de no permitir desplazamientos.

Para efectos de la simulación en SolidWorks se realiza un mallado que garantice una correcta distribución. Se define un elemento tetraédrico parabólico mediante cuatro nodos angulares, seis nodos centrales y seis aristas. Cada nodo en un elemento sólido tiene tres grados de libertad que representan las traslaciones en tres direcciones ortogonales. El software utiliza las direcciones X, Y y Z del sistema de coordenadas cartesiano global para la formulación del problema, realizando el análisis de todos los esfuerzos. Todos los elementos se configuran en modo sólido debido a que van a soportar cargas combinadas.

Como se puede observar en la Figura 49, el mallado es de forma homogénea y en todas las piezas del marco se aplican las restricciones en la parte baja donde va a estar fijo el marco a la placa de concreto. Las 3 fuerzas generadas por los cilindros hidráulicos son aplicadas junto con su respectiva reacción con un valor de 310 KN. La fuerza de gravedad se tiene en cuenta también para la simulación.

Figura 48.

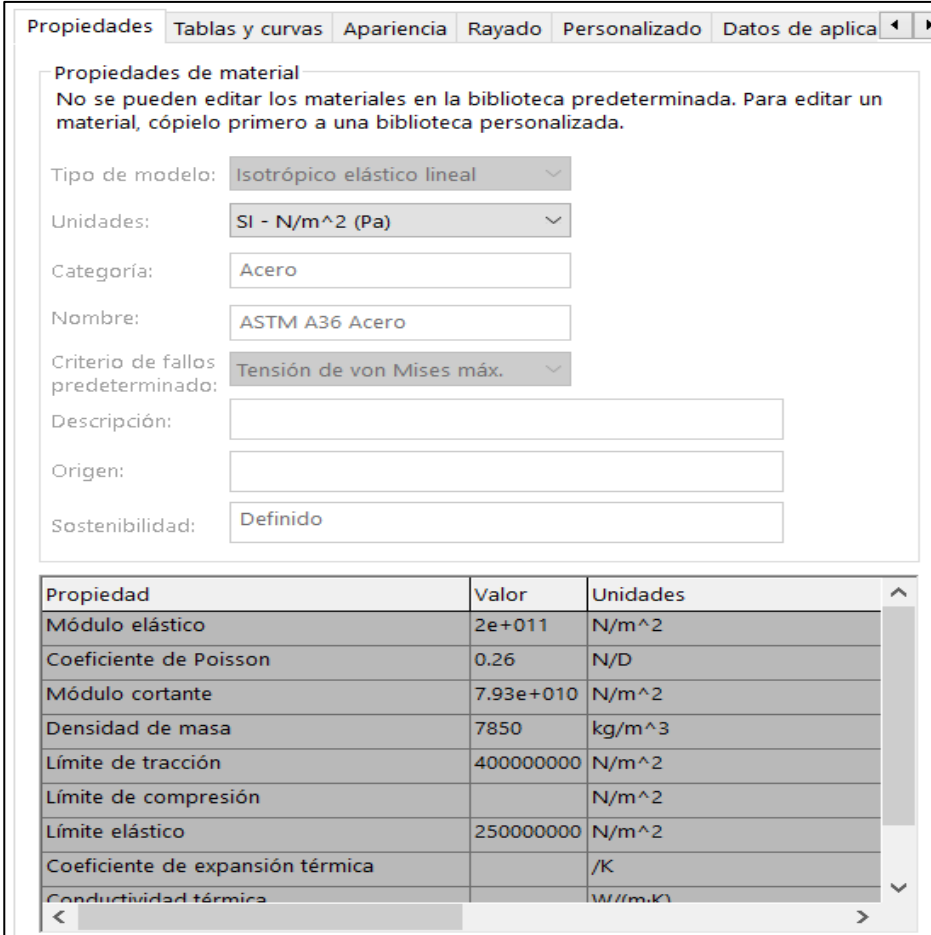
Mallado generado por SolidWorks para la simulación del marco principal



Las propiedades para el material a usar son las del *Acero A36*. Estas propiedades vienen predeterminadas por defecto en la biblioteca de *SolidWorks* y se pueden ver en la figura 49: Modulo de Elasticidad 2.07×10^5 MPa, Limite elástico 250 MPa, Limite ultimo a tracción 400 MPa.

Figura 49.

Propiedades mecánicas del Acero A36 para usar en la simulación.



Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de aplica

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal

Unidades: SI - N/m² (Pa)

Categoría: Acero

Nombre: ASTM A36 Acero

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción:

Origen:

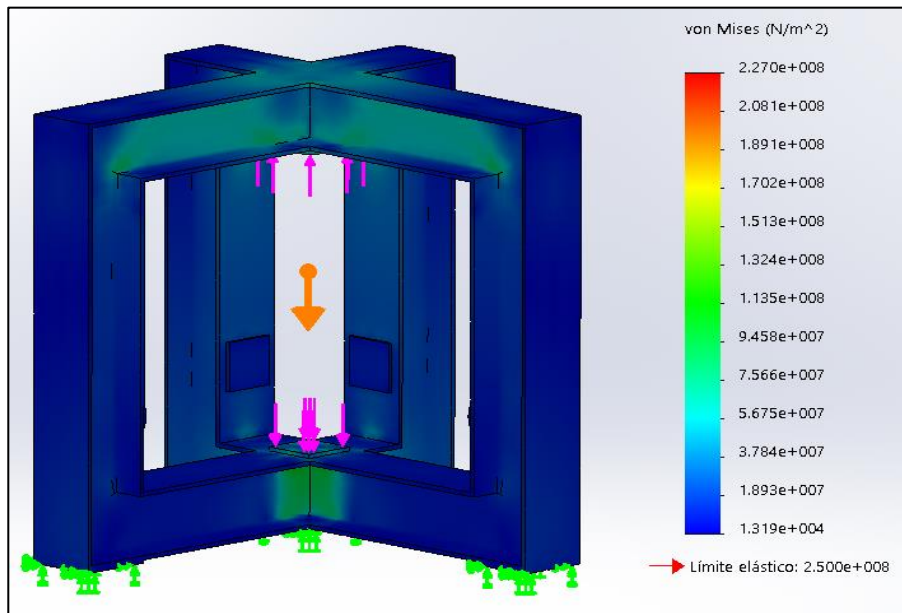
Sostenibilidad: Definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+011	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.26	N/D
Módulo cortante	7.93e+010	N/m ²
Densidad de masa	7850	kg/m ³
Límite de tracción	400000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	250000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica		W/(m·K)

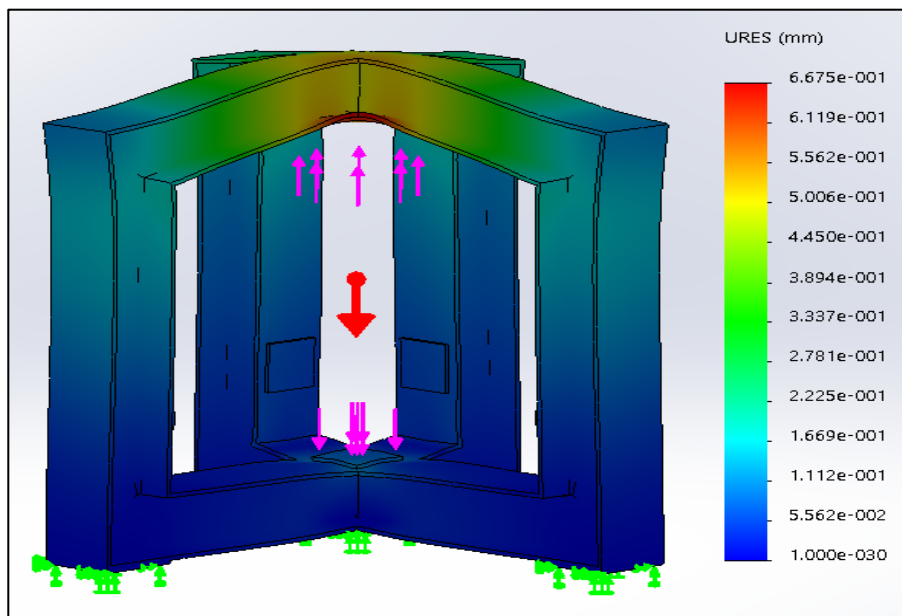
Se efectuó el análisis del marco simulando solo las cargas de un cilindro hidráulico con una fuerza de 310 KN en la dirección del eje y. Podemos observar que el máximo esfuerzo no sobrepasa el límite elástico (Figura 50a) y que el desplazamiento máximo es menor a 1 mm (Figura 50b).

Figura 50.

(a) Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y una sola carga vertical. (b) Deformación en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y una sola carga vertical



(a)

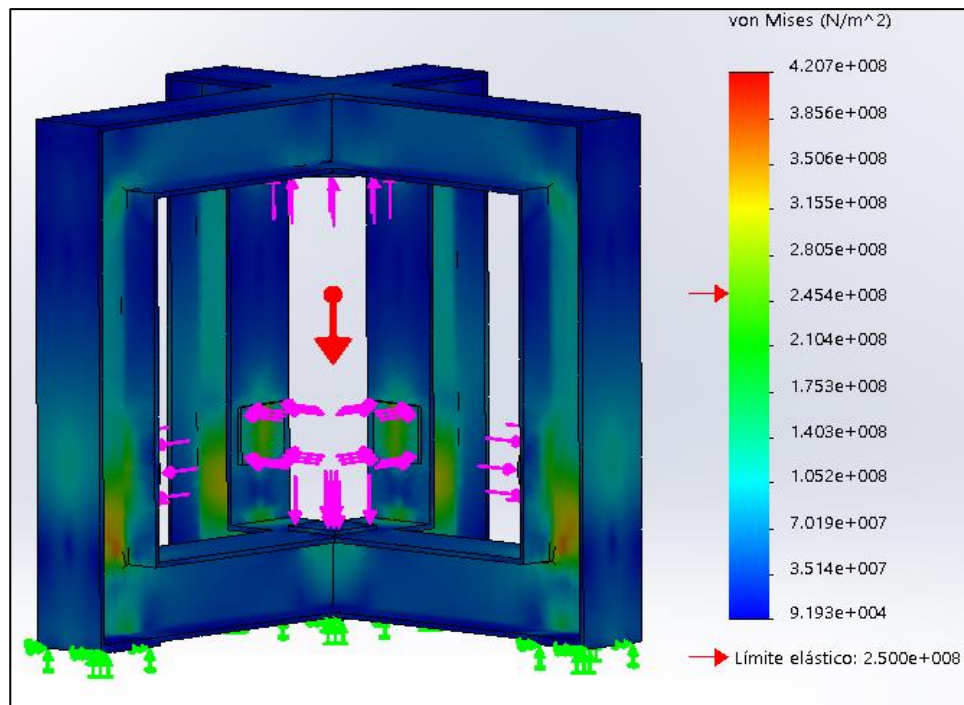


(b)

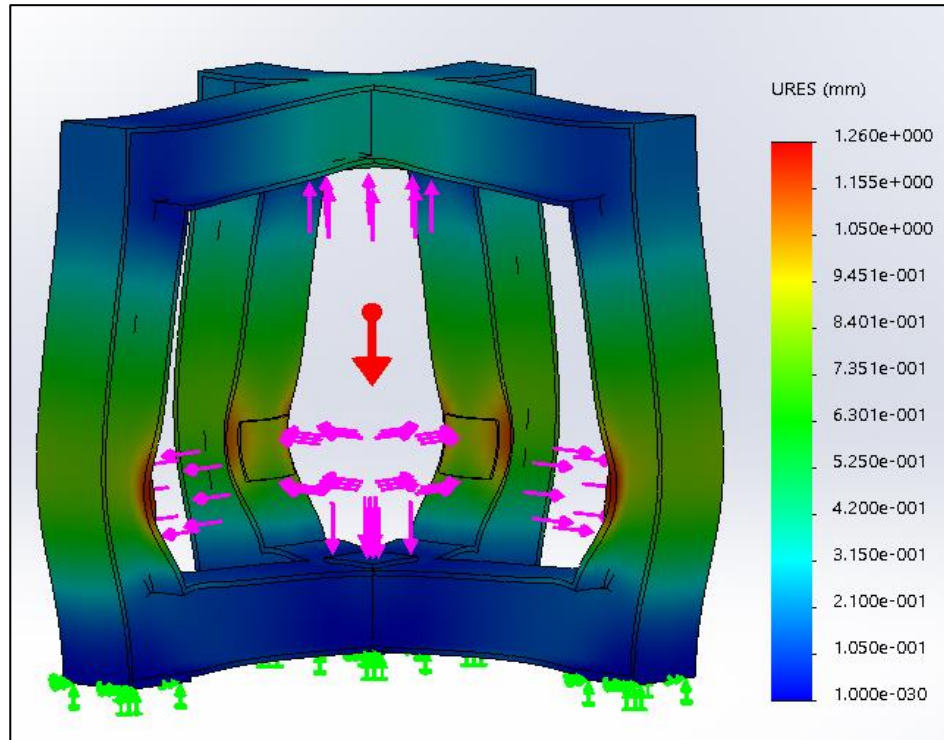
Seguidamente y comprobando que el perfil soporta las cargas de tracción y de elección en los elementos, se procede a cargar el marco con las fuerzas en los tres ejes principales x, y, z lo que nos dará como resultado que todos los elementos estarán expuestos a carga combinada. Las fuerzas tienen una magnitud de 310 KN respectivamente.

Figura 51.

(a) Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y las tres cargas axiales en cada eje. (b) Deformación el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y las tres cargas axiales en cada eje.



(a)



(b)

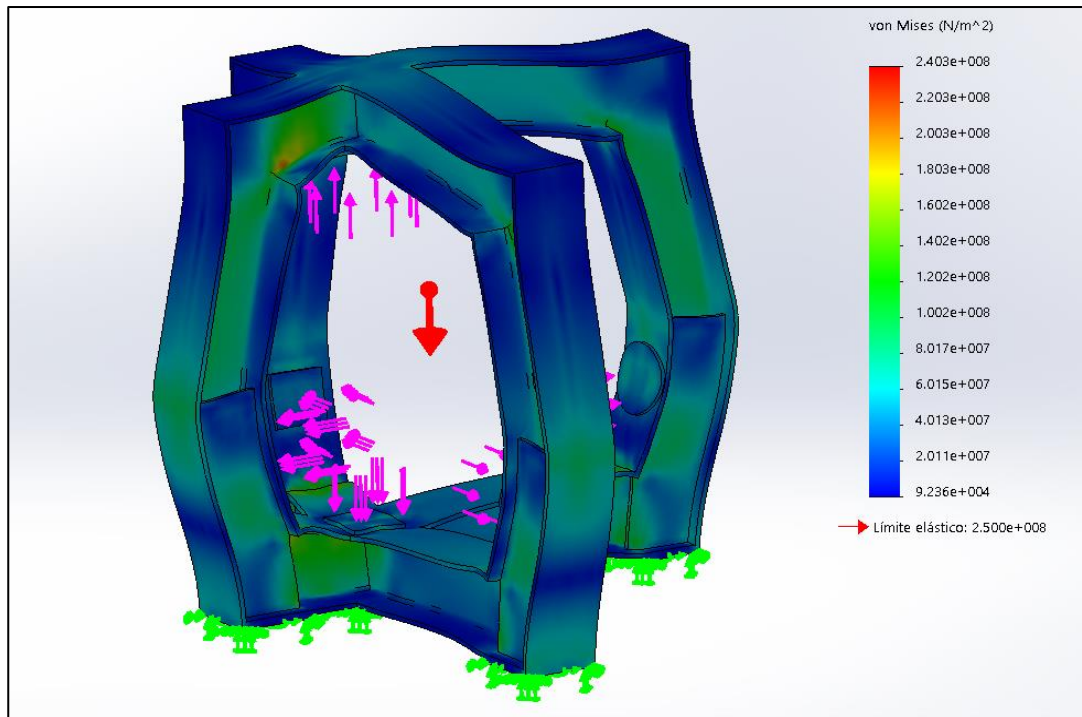
Los esfuerzos claramente se incrementaron por los efectos de las cargas combinadas llegando al límite elástico de 250 MPa y el desplazamiento supera el milímetro por efecto tanto de tracción como de flexión en la base de los cilindros que están en los ejes x y z.

Para reducir los esfuerzos sería necesario aumentar el momento de inercia de la sección transversal del perfil o reforzando estas secciones donde se encuentra las deformaciones por aplastamiento; de esta última manera no se incrementa el tamaño de la estructura.

Se realiza nuevamente análisis estático con un modelo que contempla la instalación de unos refuerzos que van casi hasta la mitad de las columnas. En este caso los resultados muestran que aunque la estructura resiste los esfuerzos de trabajo, estos quedarían cerca al límite elástico del Material. (Figura 52).

Figura 52.

Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo W200 x 52 y las tres cargas axiales en cada eje reforzando el alma del perfil con lámina.



5.6 Modelado Final con Factor de Seguridad

Teniendo en cuenta las capacidades ofrecidas por el cilindro tipo Rexroth CDH3 125 seleccionado en la sección 5.4.1 y que tiene una capacidad de suministrar una presión de 2500 psi sobre la cara de la muestra. Se procedió a seleccionar un perfil con capacidad de resistir dicha condición.

Seleccionando un perfil comercial y con un poco más de inercia y área transversal que reduzca los esfuerzos, se selecciona un perfil de la misma sección tipo HEA 260. Se refuerza con placas en lámina de calibre 3/8" en todas las almas verticales. En las imágenes (Figura 55) podemos observar que los esfuerzos están en la mayor parte de la estructura con un factor de

seguridad superior a 3, y en la parte baja de las columnas donde van apoyados los cilindros, por el efecto cortante tenemos un factor de seguridad de 2 que es la sección más crítica de la estructura. Basados en los análisis estáticos computacionales de SolidWorks tenemos una estructura robusta que tiene un máximo de deformaciones de 0.4 mm (Figura 54).

Figura 53.

Esfuerzos equivalentes en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo HEA260 y las tres cargas axiales en cada eje reforzando el alma del perfil con lámina.

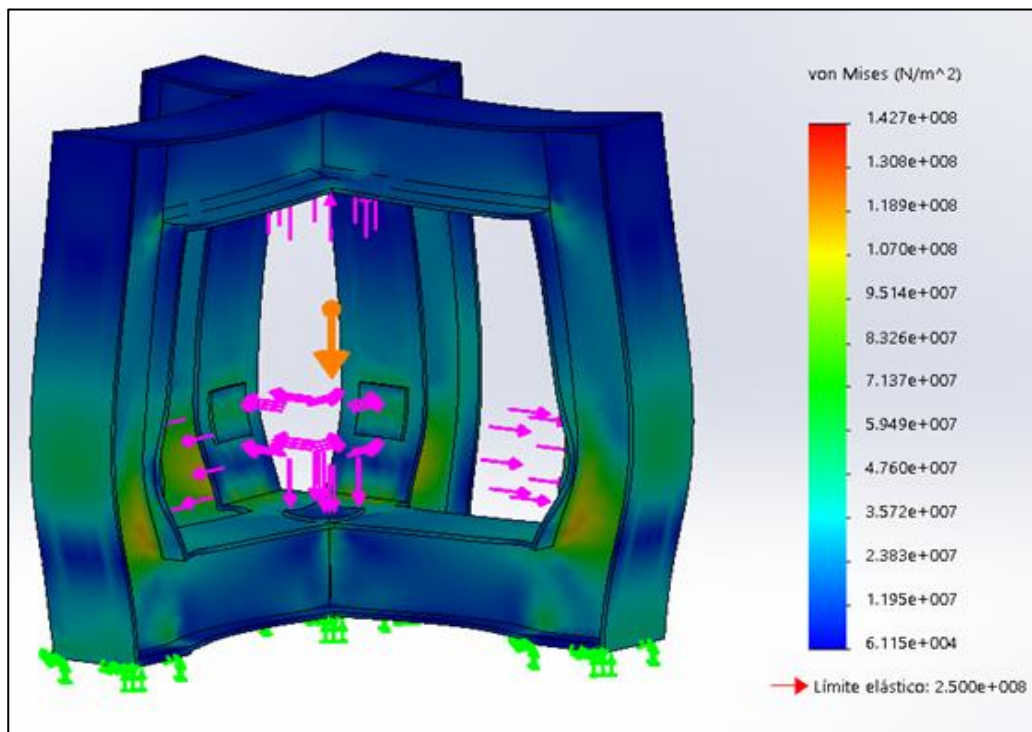
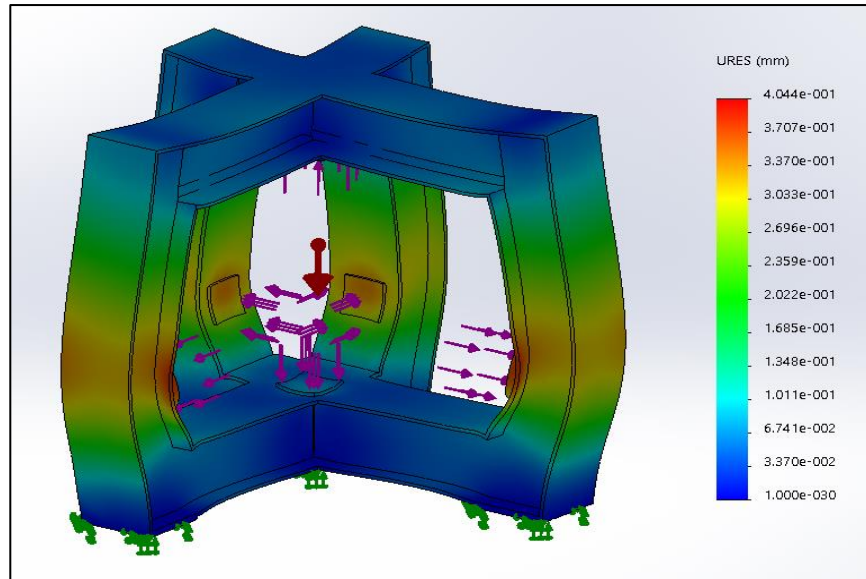
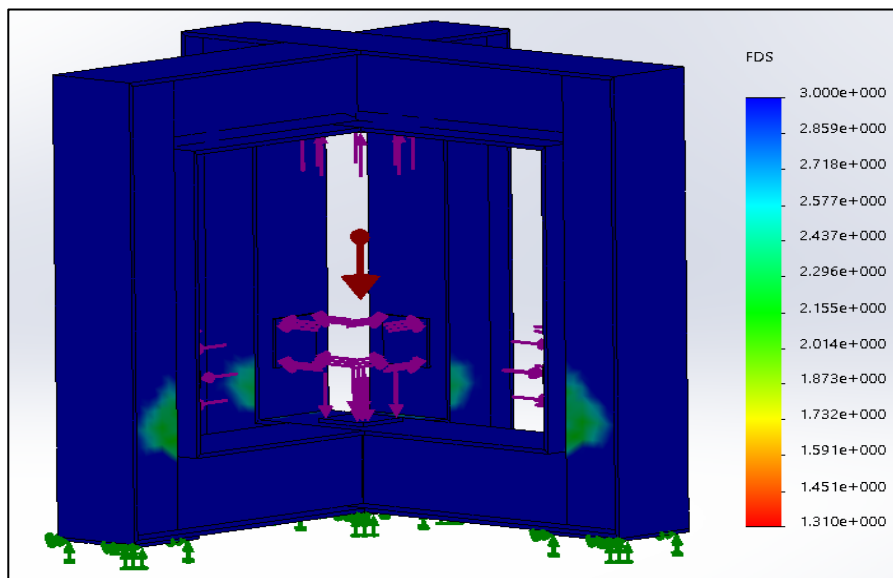


Figura 54.

Deformación el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo HEA260 y las tres cargas axiales en cada eje.

**Figura 55.**

Factor de seguridad en el marco de la prensa triaxial hidráulica con un perfil tipo HEA260 y las tres cargas axiales en cada eje.



El factor de seguridad es un número entero mayor que 1. El FS cubre la necesidad de cierta incertidumbre en los diseños y nos indica la capacidad en exceso que tiene el elemento diseñado sobre sus esfuerzos aplicados. Aplicando el factor de seguridad en los diseños se absorberá posibles errores en el modelo matemático, características de los materiales utilizados o la teoría de fallas que se utilizó. Los elementos de la estructura de la Celda Triaxial fueron diseñados para que su funcionamiento esté dentro de la zona elástica del material, lo que garantiza que al cese de la carga sobre la pieza esta regresará a su estado inicial (esingenieria.pro. (2021). Cómo aplicar el Factor de Seguridad sobre el diseño Mecánico + SolidWorks. El aula del Ingeniero)

Se utilizó un Factor de Seguridad entre 1.5 y 2 para análisis realizados en metales dúctiles de acuerdo con el criterio de Faires en el libro de Diseño de Máquinas. Para el análisis computacional de Solid Works basado en esfuerzos Von Mises y en límites de fluencia del material, se seleccionó un Factor de Seguridad mínimo de 2 y que se puede evidenciar en la figura 55 en donde la mayor parte de la estructura se obtiene un factor de seguridad superior a 3.

Tabla 8.

Tabla de factores de seguridad. Valores mínimos recomendados.

Tipo o Clase de Carga	Acero, Metales Dúctiles		Carga Excéntrica	Carga Oblicua
	Basado en la Resistencia Máxima	Basado en la Resistencia Fluencia	Basado en la Resistencia	
Carga muerta o Carga variable bajo Análisis por Fatiga	3 – 4	1.5 – 2	5 - 6	7

Nota: Diseño de Elementos de Máquinas. Adaptada de Faires, (1995). (4ta. Ed.). México: Ediciones Limusa.

Respecto a la placa que transmite y transforma la fuerza del cilindro hidráulica a presión contra la cara respectiva en cada eje de la muestra; se diseña una placa base de 1” de espesor en

acero SAE 1045 y la cual debe ser maquinada según tolerancias para roscar en el vástago. Se refuerza con carteras en las diagonales para evitar deformaciones en las esquinas y rigidizar el elemento. Se aplica la carga de 90000 lb en el lado plano de la placa y se apoya contra el vástago como sujeción fija. Como se puede observar en las imágenes se concentran algunos esfuerzos en las partes que tienen cambios de sección, pero que en la fabricación se redondearán para liberar esos esfuerzos y evitar acumulaciones.

Figura 56.

Esfuerzos equivalentes en la placa de ataque del cilindro a la muestra parte frontal.

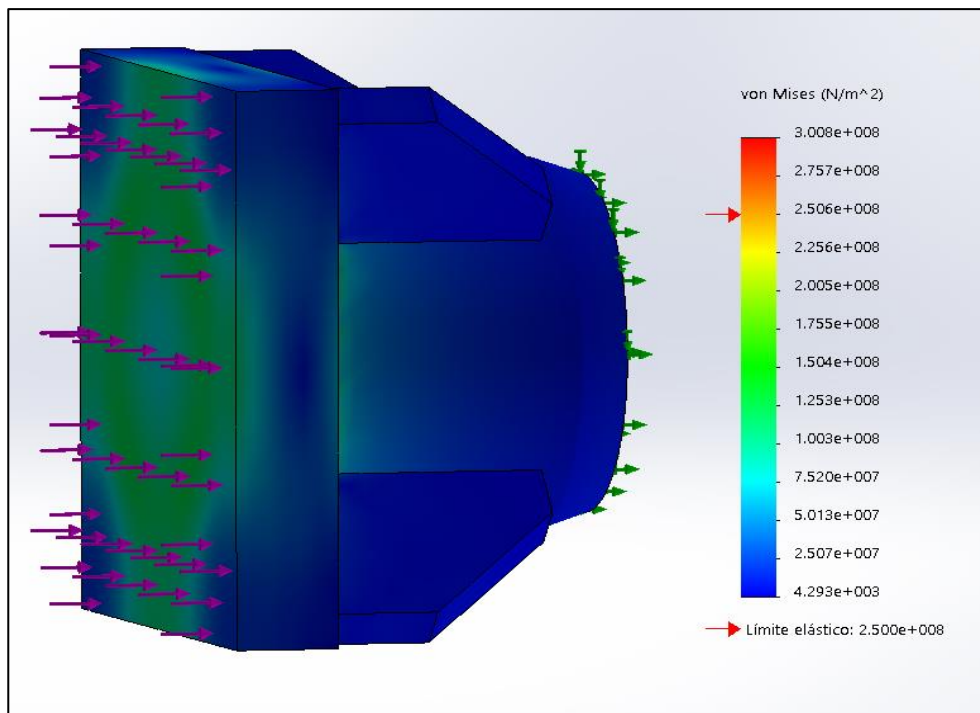


Figura 57.

Esfuerzos equivalentes en la placa de ataque del cilindro a la muestra parte posterior.

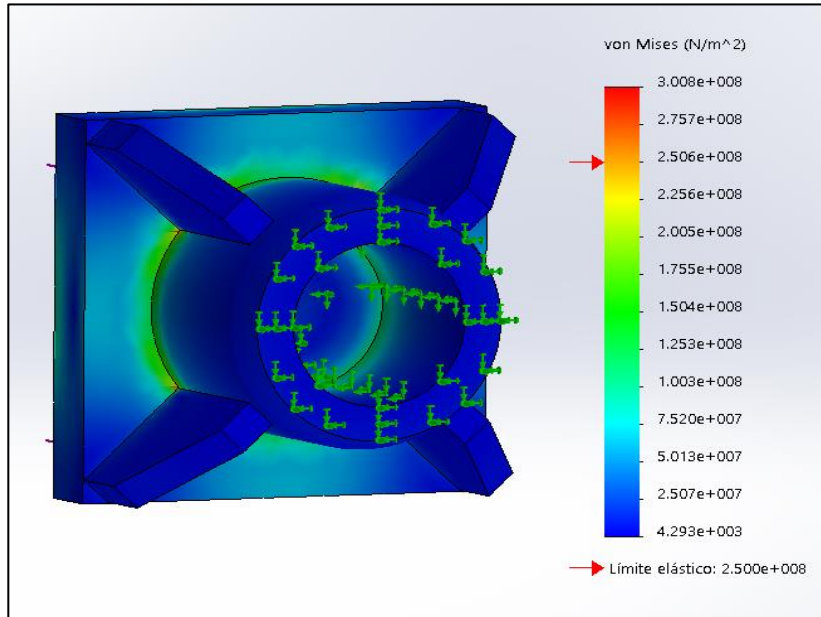
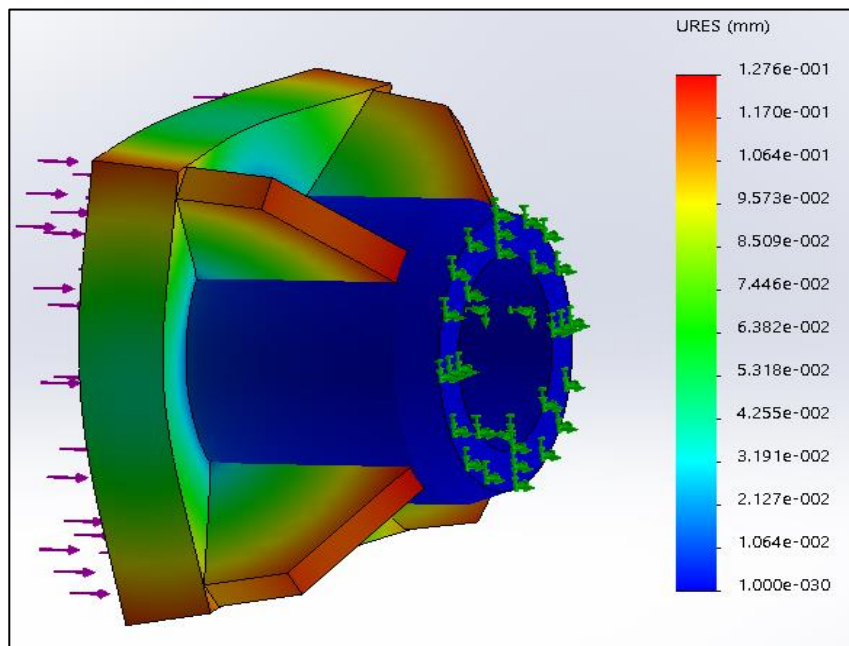


Figura 58.

Deformaciones en la placa de ataque del cilindro a la muestra.



5.6.1 Esquema General Final

Figura 59. Esquema general de la Celda Triaxial, Panel de Manipulación de las 3 bombas Enerpac y Bomba Isco DX100 para Inyección de fluido de fracturamiento.

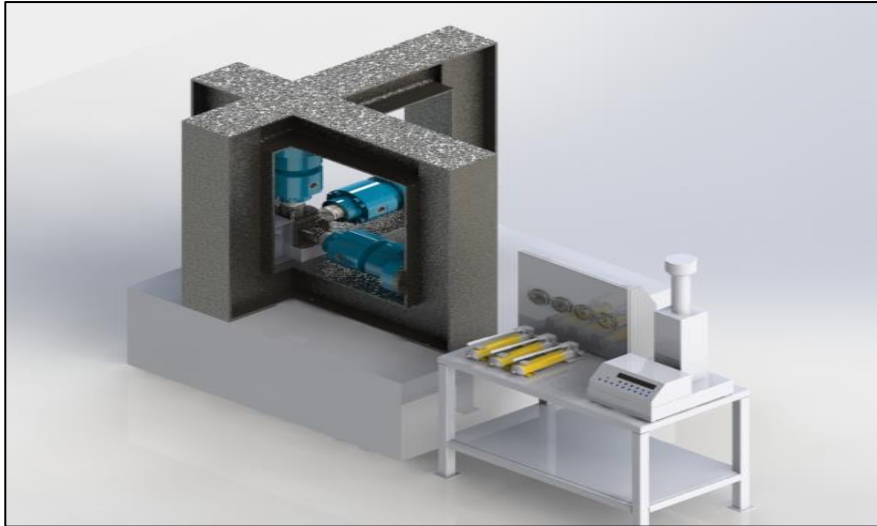
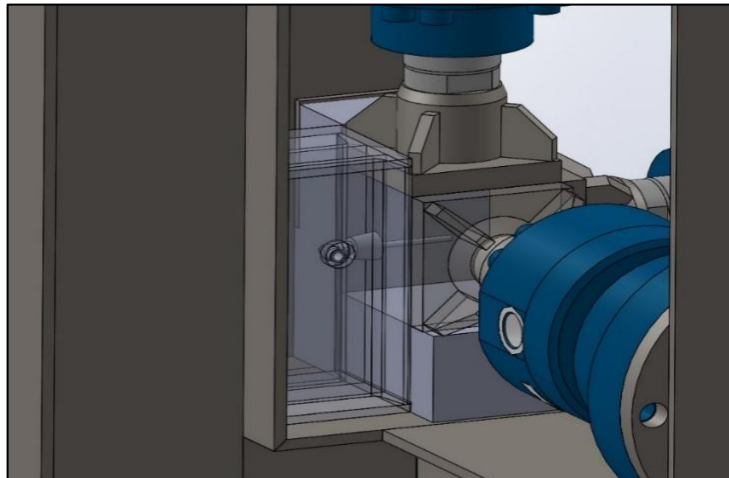


Figura 60.

Esquema de diseño del camino de flujo de fluido de fracturamiento al interior de la muestra de formación por medio de un tubo metálico y pegado con material epóxico (Simulando un Casing cementado) hasta la mitad de la muestra.



5.6.2 Planos de Fabricación

Se realiza planos de detalle de cada una de las piezas que se encuentran nombradas en el ensamble general, estos planos son distribuidos en procesos de mecanizados específicos ya que las piezas necesitan ser procesadas con ayuda de diferentes máquinas; por lo tanto, los planos referidos tendrán que contener información de los procesos requeridos para su construcción, además de contener distancias referidas a los centros de cada pieza para facilitar la toma de medidas por el operario. Estas distancias deberán tener información precisa de la posición de agujeros, dobleces, roscas, etc. Los planos realizados para la fabricación de las piezas se encuentran en la sección de Apéndices.

6. Análisis de Factibilidad para la Fabricación

Los expertos en proyectos de inversión sugieren que un Análisis de factibilidad se puede llevar a cabo en 3 fases, para nuestro caso sería: Factibilidad en la Industria, Factibilidad Técnica y Factibilidad Económica.

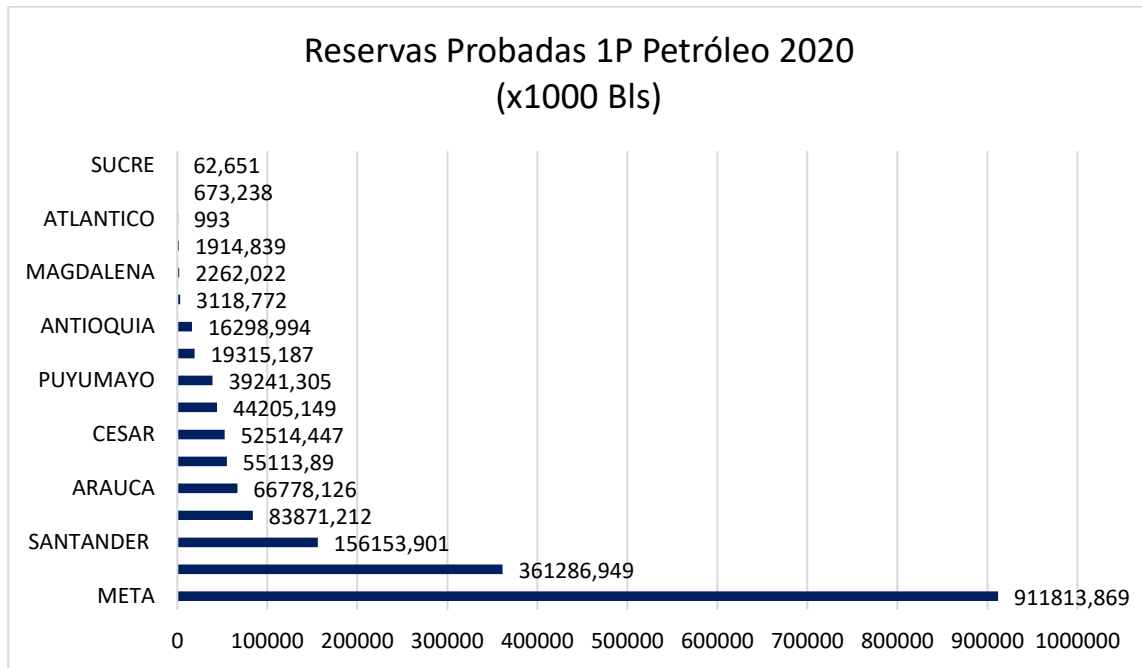
6.1 Factibilidad en la Industria

No es un secreto la necesidad de invertir en investigación para contrarrestar los grandes desafíos que surgen durante la perforación de pozos cuyas presiones generan un margen de lodo estrecho. Las pruebas de WBS en muestras de formación con equipos que simulen estados de esfuerzo hacen parte del proceso de investigación que, junto con la simulación numérica y las

tecnologías aplicadas en campo, ayudan a ensanchar el margen estrecho (o ventana de lodo estrecha) y así lograr perforar estas zonas con éxito.

Figura 61.

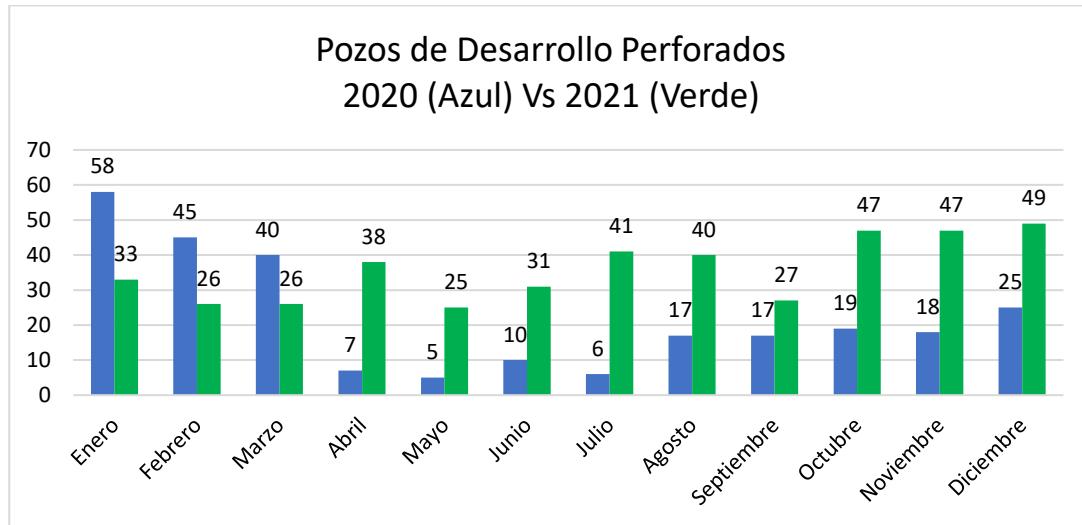
Fuente de datos de Página Oficial ANH. Reservas probadas de petróleo en Colombia 2020.



Para tener una idea de su potencial aplicación en Colombia, se consultó los datos estadísticos de la ANH (Figura 62). En Colombia más de un 50% de las reservas probadas pertenecen a campos cuyos pozos son propensos a pérdidas desmesuradas de lodo durante la perforación. Aunque se esté implementando tecnologías como *MPD*, *Perforación Bajo – Balance*, *Near Balance con Lodo Nitrogenado* es necesario profundizar a la vez en optimizar Configuraciones de lodo y su Distribución de Tamaño de Partículas (PSD).

Figura 62.

Pozos de Desarrollo Perforados en el año 2020.



Nota: Pozos de Desarrollo Perforados 2020 (Azul) Vs 2021 (Verde). Adaptado de ANH, (2022).

Como se observa en las figuras 61 y 62. En Colombia sigue existiendo una campaña de perforación de pozos de desarrollo considerable. A medida que un campo produce, las Ventanas Operacionales durante la perforación son más estrechas y por lo tanto aumentará el número de pozos que deberán ser perforados con fluidos de alta tecnología cuyas configuraciones y PSD sean óptimos para las operaciones. Tener la disponibilidad de una Celda Triaxial Verdadera permitirá evaluar la efectividad de diferentes tipos de fluidos antes de usarlos en campo.

6.2 Factibilidad Técnica

La factibilidad técnica determina si se dispone de los conocimientos, habilidades, equipos o herramientas necesarios para llevar a cabo los procedimientos, funciones o métodos involucrados en un proyecto (Rus, 2020). Dicho esto; para llegar al punto de diseño de la Celda se debió contar con un equipo profesional y experto en las ramas de la ingeniería de Perforación, Geomecánica,

Ingeniería Mecánica y Diseño. Se contó con el equipo tecnológico y de Software necesario para la ejecución del diseño (SolidWorks).

6.2.1 Límite Operacional del Diseño

Para un análisis de factibilidad técnica también se debió determinar si el diseño tendrá la utilidad y los requerimientos necesarios para la realización exitosa en cuanto a pruebas de WBS en laboratorio. A continuación, se muestra los parámetros y condiciones llevados a cabo en diferentes pruebas alrededor del mundo.

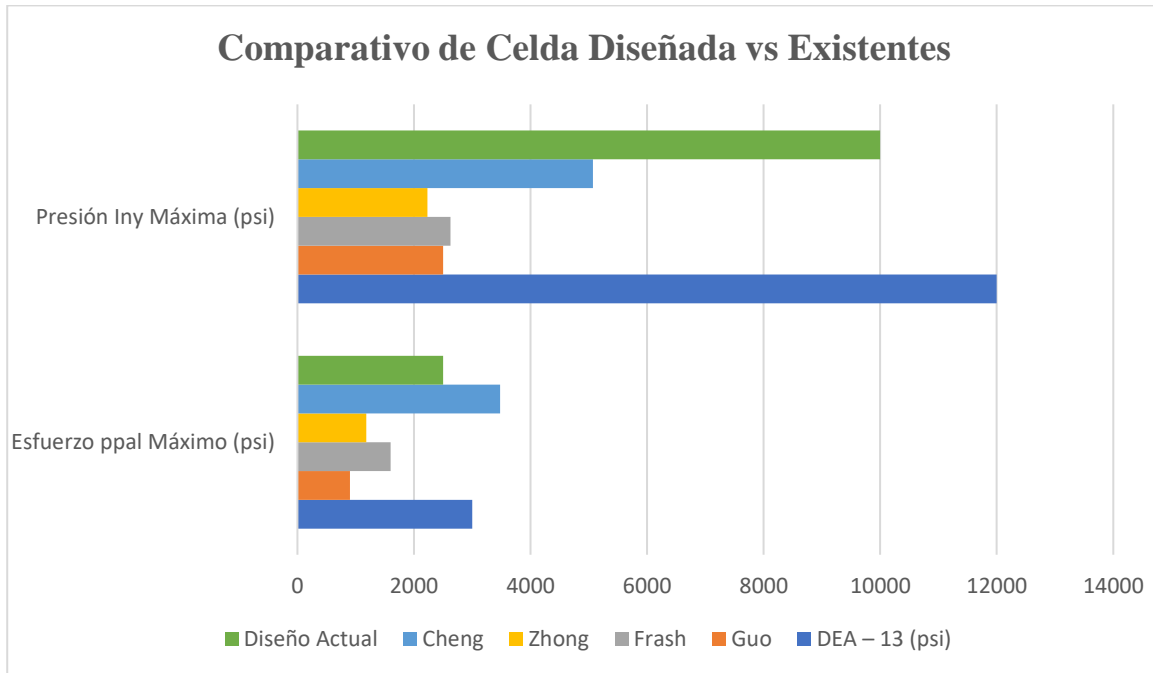
Tabla 9.

Resumen de parámetros aplicados por los diferentes autores durante las pruebas. Al final se muestra los límites operacionales del diseño propuesto

Autor	Esfuerzos Principales Máximo Aplicado	Presión de Inyección Máximo Aplicado	Tamaño y Tipo de muestra
DEA – 13: Morita; Fuh; Onyia, Wang (1990 - 2007)	σ_v : 3000 psi σ_H : 2000 psi σ_h : 1800 psi	Hasta 12.000 psi	Berea 30 x 30 x 30 in
Guo et al., 2009, 2014 TTS	σ_H : 900 psi σ_h : 300 psi	Hasta 2500 psi	Arena y Shale 15 x 15 x 15 cm
Frash et al., 2014	σ_v : 1600 psi σ_H : 1500 psi σ_h : 1250 psi	Hasta 2625 psi	Granito y Berea 12 x 12 x 12 in
Zhong et al., 2019	σ_v : 1180 psi σ_H : 800 psi σ_h : 110psi	Hasta 2230 psi	Berea 12 x 12 x 12 in
Cheng et al., (2020)	σ_v : 1160 psi σ_H : 2300 psi σ_h : 3480 psi	Hasta 5070 psi	Granito de HDR 11.8 x 11.8 x 11.8 cm
Castro., (2022)	σ_v : 2500 psi σ_H : 2500 psi σ_h : 2500 psi	Hasta 10.000	Muestras de 6x6x6 in

Figura 63.

Comparativo de parámetros operacionales de Celdas Existentes vs El modelo de Celda Diseñado.



La figura 63 y la tabla de datos 8, evidencia que la celda diseñada (Barra de color Verde) cumple por encima de los requerimientos promedio de los experimentos realizados en las últimas décadas. Cabe anotar que las pruebas realizadas por Frash et al., (2014), y por Cheng et al., (2020), fueron enfocados al estudio de formación de fracturas sobre muestras de Roca HDR pertenecientes a Yacimientos geotérmicos que poseen alta resistencia a la fractura en comparación de las demás muestras utilizadas para pruebas de Wellbore Strengthening (WBS).

6.2.2 Disponibilidad de Materiales y Equipos para Fabricación

Los materiales, piezas y equipos necesarios es parte fundamental para el alcance de una futura fabricación. Para ello se realizó un estudio de disponibilidad tanto de materiales como de empresas candidato para la fabricación. Para este propósito; los datos requeridos se basaron

durante el proceso de cálculos de ingeniería y Simulaciones de Análisis Estático. Esto quiere decir que cada vez que se planteaba un material, este tendría el requisito de ser comercialmente disponible en la Zona. Esto mismo sucedió respecto a las piezas y Accesorios requeridos.

Tabla 10.

Check List de disponibilidad de Piezas y Materiales necesarios para la fabricación de la Celda Diseñada.

Material y Accesorios	Disponibilidad
Perfil Estructural HEA360	Disponible comercialmente en Colombia
Lamina C3/8 A36 HR 4*8	
Lamina C1 inc SAE 1045 200x200 mm	
Soporte en C de 4 Inc	
Tornillería para Cilindros	
Eje redondo 4 inch SAE 4540	
Soldadura 7018	
Base anticorrosiva	
Elementos consumibles: discos de corte, pulido, plasma, lijas, brocas, etc...	
Pintura tipo esmalte de alta calidad	
Cilindros Hidráulicos Rexroth CDH3 125.	Producto Alemán con Distribuidor Autorizado en Colombia / Tiempo de importación de 1 mes.
Manguera de 3 metros con respetivos racores rápidos debidamente grafada de 1/4 inch para 10000 psi.	Disponible comercialmente en Colombia
Manómetros de 4 inch para 10000 psi con accesorios	
Mesa para posicionamiento de Bombas hidráulicas y de inyección. Fabricada en tubo cuadrado de 70 x 70 mm, y lamina plegada C 14. Pintura tipo esmalte.	
Maquinados a piezas y elementos	
Fabricación según planos y ensamblaje de la prensa / Empresas de Metalmecánica	

Como se muestra en la Tabla 9, el único ítem sin disponibilidad inmediata son los Cilindros marca Rexroth, pero si se cuenta con un distribuidor autorizado en la zona, así como el respaldo técnico, de mantenimiento y repuestos. El tiempo de importación de esta serie de Cilindros oscila entre 20 y 30 días.

6.2.3 Ensamble de la Celda Triaxial Verdadera


El ensamble consistirá en cortar y soldar los perfiles de acuerdo con los planos de Fabricación (Anexos). La parte crítica durante la construcción de la Celda será la alineación de los Cilindros. Respecto a los demás equipos requeridos como las bombas manuales, bomba de inyección ISCO DX 100 y software de adquisición de datos, ya se encuentran disponible en laboratorio. Para la ejecución de esta tarea se seleccionaron 2 empresas el cual se postularon y tienen experiencia en el área de la construcción de equipos de laboratorio en la industria de los hidrocarburos.

6.3 Factibilidad Económica

Como se mencionó en el capítulo 5, surgieron diferentes modelos. En este proceso se logró evidenciar que era mucho más económico seleccionar y comprar Cilindros comerciales que fabricarlos. Una muestra de ello fue el modelo No 2 donde una empresa de Metalmecánica presentó una cotización para fabricación y ensamble (Figura 64). El costo era de alrededor de 330 millones de pesos.

Figura 64.

Cotización para la Fabricación del Modelo de Celda No 2, que contempla la fabricación de 24 Cilindros de Empuje.

COTIZACIÓN NO. 3324																		
CIUDAD Y FECHA:			Bucaramanga, 09 de septiembre de 2021															
CLIENTE:			UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER															
			Atn. Ing. Henry Fernando Castro Hernandez															
REF: CELDA AXIAL																		
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANT	TIEMPO DE ENTREGA (DÍAS)	Vr UNITARIO	Vr. TOTAL												
1	FABRICACION DE CELDA AXIAL PARA PRUEBAS DE FRACTURAMIENTO EN MUESTRAS GEOLÓGICAS DE 25 CM3 Y EVALUACIÓN DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN, DE ACUERDO A PLANO ADJUNTO SUMINISTRADO POR EL CLIENTE (FHWS REV 03) <u>Especificaciones técnicas:</u> * Fabricacion del Horno * NO INCLUYE BOMBA * Fabricacion de estructuras para la instalacion de sensores digitales de presion <u>Incluye</u> *Manual de operacion *Hoja de datos *Ficha tecnica	UND	1	60	\$ 335.417.362	\$ 335.417.362												
SUBTOTAL						\$ 335.417.362												
Vigencia de Cotización: 30 días calendario  Gerente: Pbx. 6 71 marloni@unindustrial.edu.co www.unindustrial.edu.co																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #0056b3; color: white;">CONDICIONES DE VENTA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #e0e0e0;">TIEMPO DE ENTREGA (DÍAS)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #e0e0e0;">MONEDA</td> <td>PESOS COLOMBIANOS</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #e0e0e0;">LUGAR DE ENTREGA</td> <td>PLANTA MULTINDUSTRIAL</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #e0e0e0;">IMPUESTOS</td> <td>19% IVA</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #e0e0e0;">CONDICIONES COMERCIALES</td> <td>100% 30 DÍAS FACTURA</td> </tr> </tbody> </table>							CONDICIONES DE VENTA		TIEMPO DE ENTREGA (DÍAS)	60	MONEDA	PESOS COLOMBIANOS	LUGAR DE ENTREGA	PLANTA MULTINDUSTRIAL	IMPUESTOS	19% IVA	CONDICIONES COMERCIALES	100% 30 DÍAS FACTURA
CONDICIONES DE VENTA																		
TIEMPO DE ENTREGA (DÍAS)	60																	
MONEDA	PESOS COLOMBIANOS																	
LUGAR DE ENTREGA	PLANTA MULTINDUSTRIAL																	
IMPUESTOS	19% IVA																	
CONDICIONES COMERCIALES	100% 30 DÍAS FACTURA																	

Cabe mencionar que al fabricar nuestros propios cilindros se crearía un vacío técnico de respaldo en comparación de un cilindro comercial el cual lo respalda empresas con trayectoria y certificadas en esta área.

6.3.1 Costo de Fabricación

Con conocimiento de los materiales y piezas necesarias, se realizó un Check List y se cotizó con 3 diferentes empresas. Los valores llegaron a diferenciarse una empresa respecto a otra hasta en un 10%. A continuación, se evidencia las cotizaciones.

Tabla 11.

Cotización No 2, 3 y 4 Correspondiente al Diseño Final.

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Cotización No 2				
Perfil Estructural HEA360	m	12	\$ 595.000	\$ 7.140.000
Lamina C3/8 A36 HR 4*8	unidad	2	\$ 1.200.000	\$ 2.400.000
Lamina C1 inc SAE 1045 200x200 mm	unidad	6	\$ 280.000	\$ 1.680.000
Soporte en C de 4 Inc	unidad	1	\$ 600.000	\$ 600.000
Tornillería Cilindros	unidad	18	\$ 8.000	\$ 144.000
Eje redondo 4 inch SAE 4540	m	0,5	\$ 245.000	\$ 122.500
Soldadura 7018	kg	25	\$ 36.000	\$ 900.000
Base anticorrosiva	Galón	2	\$ 29.000	\$ 58.000
Elementos consumibles: discos de corte, pulido, plasma, lijas, brocas, etc...	unidad	1	\$ 420.000	\$ 420.000
Pintura tipo esmalte de alta calidad	Galón	3	\$ 64.000	\$ 192.000
Cilindros Hidraulicos Rexroth CDH3 125.	unidad	3	\$ 8.300.000	\$ 24.900.000
Manguera de 3 metros con respetivos racores rápidos debidamente grafada de 1/4 inch para 10000 psi.	unidad	3	\$ 950.000	\$ 2.850.000
Manómetros de 4 inch para 10000 psi con accesorios	unidad	3	\$ 1.230.000	\$ 3.690.000
Mesa de posicionamiento de Bombas. Fabricada en tubo cuadrado de 70 x 70 mm, y lamina plegada C 14. Pintura tipo esmalte.	unidad	1	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000
Maquinados a piezas y elementos	unidad	1	\$ 1.800.000	\$ 1.800.000
Fabricación según planos / Mano de Obra	unidad	1	\$ 16.500.000	\$ 16.500.000

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Bombas Enerpac P110	unidad	3	\$4.147.200	\$12.441.600
			SUB TOTAL	\$ 80.638.100
			IVA 19%	\$ 15.321.239
			TOTAL	\$ 95.959.339

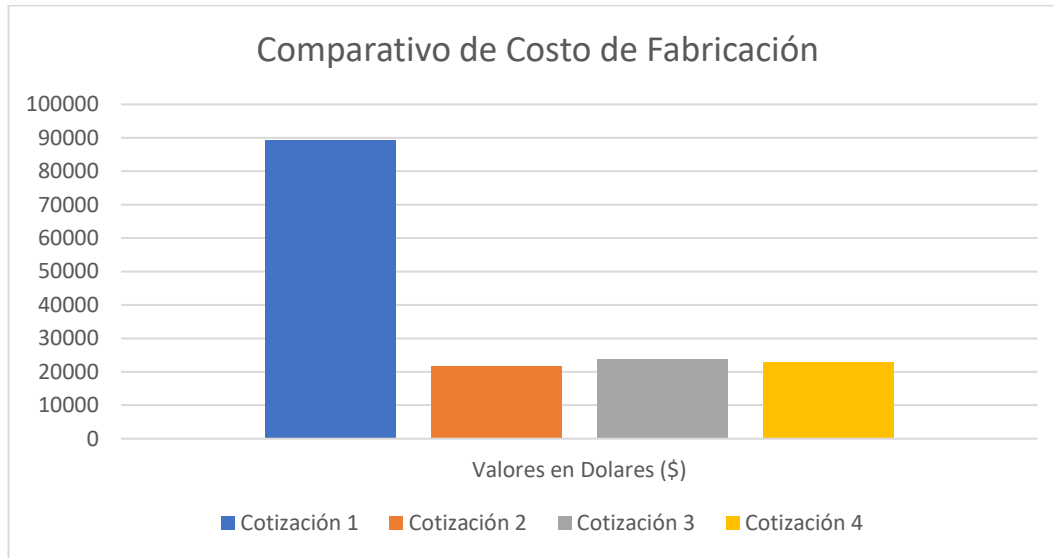
Cotización No 3

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Perfil Estructural HEA360	m	12	\$ 660.450	\$ 7.925.400
Lamina C3/8 A36 HR 4*8	unidad	2	\$ 1.164.000	\$ 2.328.000
Lamina C1 inc SAE 1045 200 x 200 mm	unidad	6	\$ 310.800	\$ 1.864.800
Soporte en C de 4 Inc	unidad	1	\$ 666.000	\$ 666.000
Tornilleria Cilindros	unidad	18	\$ 8.880	\$ 159.840
Eje redondo 4 inch SAE 4540	m	0,5	\$ 271.950	\$ 135.975
Soldadura 7018	kg	25	\$ 39.960	\$ 999.000
Base anticorrosiva	Galón	2	\$ 32.190	\$ 64.380
Elementos consumibles: discos de corte, pulido, plasma, lijas, brocas, etc...	unidad	1	\$ 466.200	\$ 466.200
Pintura tipo esmalte de alta calidad	Galón	3	\$ 71.040	\$ 213.120
Cilindros Hidráulicos Rexroth CDH3 125.	unidad	3	\$ 9.047.000	\$ 27.141.000
Manguera de 3 metros con respetivos racores rapidos debidamente grafada de 1/4 inch para 10000 psi.	unidad	3	\$ 1.054.500	\$ 3.163.500
Manómetros de 4 inch para 10000 psi con accesorios	unidad	3	\$ 1.365.300	\$ 4.095.900
Mesa de posicionamiento de Bombas. Fabricada en tubo cuadrado de 70 x 70 mm, y lamina plegada C 14. Pintura tipo esmalte.	unidad	1	\$ 5.328.000	\$ 5.328.000
Maquinados a piezas y elementos	unidad	1	\$ 1.998.000	\$ 1.998.000
Fabricación según planos / Mano de Obra	unidad	1	\$ 18.315.000	\$ 18.315.000
Bombas Enerpac p110	unidad	3	\$4.147.00	12.441.600
			SUB TOTAL	\$ 87.305.715
			IVA 19%	\$ 16.588.085

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
			TOTAL	\$ 103.893.801
Cotización No 4				
Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Perfil Estructural HEA360	m	12	\$ 600.950	\$ 7.211.400
Lamina C3/8 A36 HR 4*8	Unidad	2	\$ 1.212.000	\$ 2.424.000
Lamina C1 inc SAE 1045 200x200 mm	Unidad	6	\$ 282.800	\$ 1.696.800
Soporte en C de 4 Inc	Unidad	1	\$ 606.000	\$ 606.000
Tornillería Cilindros	Unidad	18	\$ 8.080	\$ 145.440
Eje redondo 4 inch SAE 4540	m	0,5	\$ 247.450	\$ 123.725
Soldadura 7018	kg	25	\$ 36.360	\$ 909.000
Base anticorrosiva	Galón	2	\$ 29.290	\$ 58.580
Elementos consumibles: discos de corte, pulido, plasma, lijas, brocas, etc....	Unidad	1	\$ 424.200	\$ 424.200
Pintura tipo esmalte de alta calidad	Galón	3	\$ 64.640	\$ 193.920
Cilindros Hidráulicos Rexroth CDH3 125.	Unidad	3	\$ 9.545.000	\$ 28.635.000
Manguera de 3 metros con respetivos racores rápidos debidamente grafada de 1/4 inch para 10000 psi.	Unidad	3	\$ 959.500	\$ 2.878.500
Manómetros de 4 inch para 10000 psi con accesorios	Unidad	3	\$ 1.242.300	\$ 3.726.900
Mesa de posicionamiento de Bombas. Fabricada en tubo cuadrado de 70 x 70 mm, y lamina plegada C 14. Pintura tipo esmalte.	Unidad	1	\$ 4.848.000	\$ 4.848.000
Maquinados a piezas y elementos	Unidad	1	\$ 1.818.000	\$ 1.818.000
Fabricación según planos / Mano de Obra	Unidad	1	\$ 16.665.000	\$ 16.665.000
Bombas Enerpac P110	Unidad	3	\$4.147.00	12.441.600
			SUB TOTAL	\$ 84.806.065
			IVA 19%	\$ 16.113.152
			TOTAL	\$ 100.919.217

Figura 65.

Comparativo de Costos de fabricación del Modelo final vs Modelo Inicial.



Continuando con el análisis económico de acuerdo con las cotizaciones suministradas (Cotizaciones 1, 2, 3 y 4); se pudo observar un ahorro de casi un 70% en dinero al optar por la fabricación del diseño final; evidenciando así el tiempo y trabajo dedicado al diseño de un prototipo económico, confiable y con condiciones operacionales óptimas.

6.3.2 Relación Costo - Beneficio

Es de anotar que la fabricación de la Celda Triaxial tiene un interés meramente científico, que es una necesidad y por ende surgió el objetivo de este trabajo de investigación. Al igual que otros equipos en laboratorio, para su operación; surgirá un nuevo procedimiento. Esto significa que demandará gastos económicos tanto de mano de obra calificada como demás gastos (utilización de Software, corte de muestras, preparación de muestras, aditivos de fluidos a estudiar etc.).

Teniendo en cuenta lo dicho, se puede llegar a evaluar la factibilidad económica del equipo mediante los futuros ingresos por concepto de cobro de cada prueba realizada. Para ello se usó el concepto de análisis *Costo – Beneficio*. Para propósitos de cálculos es necesario determinar hipotéticamente los siguientes datos:

Tabla 12.

Datos de inicio estimados para Cálculos y Análisis de Factibilidad Económica.

Inversión Inicial (I_0)	\$ 100.000.000 = \$26.624.74 USD
Ingreso por cada prueba	\$7.000.000 = \$1863.73 USD
Egreso por gastos vinculados a cada prueba	\$4.000.000 = \$1064.99 USD
Número de pruebas por Mes	1
Tasa de Oportunidad (k)	10% Anual ó 0.83% Mensual

Los datos en la tabla 11 son basados en la comparación respecto a pruebas de otro tipo pero que incluyen flujo de fluidos (Special Core Analysis) el cual se practican en laboratorio pero que en lo común sería el tiempo de prueba dedicado por cual se llega a cobrar entre 8 millones y 12 millones de pesos. Por lo tanto, los datos pertenecen a un escenario bastante conservador, de esta manera no incurriríamos en falsas expectativas.

Es de conocimiento común que el dinero pierde valor con el tiempo y eso está relacionado a la inflación, esto quiere decir que la capacidad adquisitiva disminuye con el transcurrir del tiempo.

Para estudiar cómo será el comportamiento de los ingresos en el tiempo y si estos justifican la inversión inicial realizada, aplicaremos los siguientes conceptos económicos: *Valor presente Neto VPN, Punto de equilibrio PE, Flujo de desembolso FCL y Tasa Interna de Retorno TIR*. Estos indicadores revelan si la inversión es viable o no.

6.3.3 Flujo de Desembolso

El flujo de Desembolso es una herramienta que sirve para evaluar la recuperación de la inversión con el tiempo. Para este caso se recurrió a valores en dólares americanos con TRM respecto al peso colombiano con el fin de tener números más reducidos.

Tabla 13.

Tabla de flujo de Acumulado.

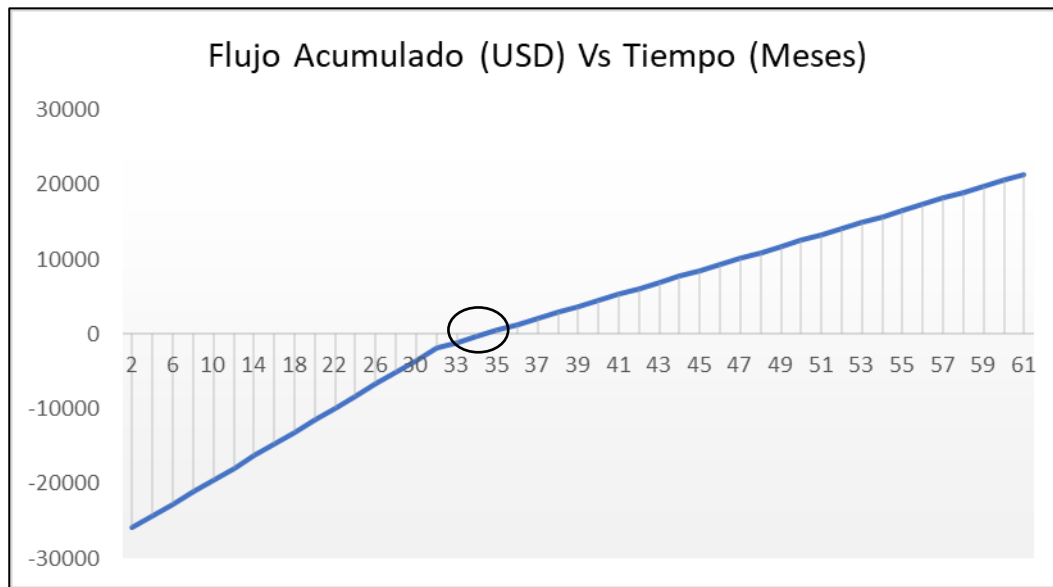
Tiempo (Meses)	Ingreso (USD)	Egreso (USD)	Ingreso Acumulado (USD)	Egreso Acumulado (USD)	Flujo Acumulado (USD)
0	0,0	26691,5	0,0	26691,5	-26691,5
3	5605,2	3203,0	5605,2	29894,5	-24289,3
6	5605,2	3203,0	11210,4	33097,5	-21887,0
9	5605,2	3203,0	16815,6	36300,5	-19484,8
12	5605,2	3203,0	22420,9	39503,4	-17082,6
15	5605,2	3203,0	28026,1	42706,4	-14680,3
18	5605,2	3203,0	33631,3	45909,4	-12278,1
21	5605,2	3203,0	39236,5	49112,4	-9875,9
24	5605,2	3203,0	44841,7	52315,4	-7473,6
27	5605,2	3203,0	50446,9	55518,3	-5071,4
30	5605,2	3203,0	56052,2	58721,3	-2669,2
33	5605,2	3203,0	61657,4	61924,3	-266,9
36	5605,2	3203,0	67262,6	65127,3	2135,3
39	5605,2	3203,0	72867,8	68330,3	4537,6
42	5605,2	3203,0	78473,0	71533,2	6939,8
45	5605,2	3203,0	84078,2	74736,2	9342,0
48	5605,2	3203,0	89683,5	77939,2	11744,3
51	5605,2	3203,0	95288,7	81142,2	14146,5
54	5605,2	3203,0	100893,9	84345,2	16548,7
57	5605,2	3203,0	106499,1	87548,1	18951,0
60	5605,2	3203,0	112104,3	90751,1	21353,2

La tabla 12 y la Figura 67 muestra específicamente el momento donde se recupera la inversión inicial, este punto también llamado *Punto de Equilibrio PE* indica entonces es el número mínimo de pruebas que se necesita realizar para que el beneficio sea cero, es decir cuando los

egresos totales son igual a los ingresos totales por prueba. Para nuestro caso de estudio, se observa que el *Punto de Equilibrio* se alcanza en el mes 34, que también corresponde al mismo número de pruebas acumuladas.

Figura 66.

Flujo Acumulado (USD) Vs Tiempo (Meses).



6.3.4 Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto (VPN), también conocido como Valor Actual neto (VAN) o Valor Neto Actual (VNA), es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder con la misma. El VPN es, por tanto, una medida del beneficio que rinde un proyecto de inversión a través de toda su vida útil (Grael, 2021).

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)^1} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n} \quad (\text{Ecuación 16})$$

La fórmula 16 del *Valor Presente Neto VPN o VAN* depende, por tanto, de las siguientes variables:

Inversión inicial previa (Io): Es la inversión inicial que la empresa hará para la construcción de la Celda Triaxial.

Flujos netos de efectivo (Ft): representa la diferencia entre los ingresos y gastos que podrán obtenerse por la ejecución de pruebas de WBS en laboratorio durante su vida útil.

Tasa de oportunidad (k): también conocida como costo o tasa de descuento. Es la tasa de retorno requerida sobre una inversión. Refleja la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente.

Número de periodos que dure el proyecto (n): Este valor es Igual a 60 Meses o 5 años, pero se sobre entiende que la vida útil y operatividad del equipo es mayor. Se tomó 5 años teniendo en cuenta un futuro hipotético pesimista donde a partir del año sexto la industria de los hidrocarburos en Colombia no exista (Granel, 2021).

Normalmente la *Tasa de Oportunidad (k)* se mide en porcentaje en periodos anuales. Para este caso de estudio y de acuerdo la gráfica de *Flujo Acumulado*, vemos que los periodos se pueden establecer en meses. La Tasa de oportunidad está ligada a la inflación, por ello se le asignará un valor de 10% anual o 0.833 % mensual; lo que significa que está por encima de la inflación promedio de los últimos 10 años. A continuación, se resuelve el *VPN* y *Costo – Beneficio*.

Tabla 14.

Resultados del estudio de Costo - Beneficio

Tasa de Oportunidad (k)	0.833%
VNA Ingresos	\$ 88.018,71
VNA Egresos	\$ 50.296,40
VNA Egresos + Inversión	\$ 76.987,91
Costo- Beneficio	1,14327957

Los Analistas sugieren que para que un proyecto de inversión en un periodo de tiempo determinado sea considerado o ejecutable, el valor de *Costo – Beneficio* debe ser mayor a 1 (Váquiro, 2010). A pesar de que los datos establecidos al inicio (Tabla 11) fueron bastante conservadores; el resultado de *Costo – Beneficio* fue de 1.14.

6.3.5 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR) es la rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. Está muy relacionada con el valor actualizado neto (VAN). De hecho, la TIR también se define como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado (Sevilla, 2014).

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)^1} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Como se puede observar; calcular el TIR manualmente es una tarea muy laboriosa ya que se genera una ecuación del mismo orden que periodos analizados. Teniendo en cuenta esto, se acude a la herramienta de Excel para calcularlo. Entonces basado nuevamente en la Tabla 12 el TIR sería calculado y daría así:

TIR	6%
-----	----

Un TIR de 6% es significativamente mayor a la tasa de oportunidad establecida (0.833 %), lo que indica nuevamente que la fabricación es viable.

7. Conclusiones

Los resultados en laboratorio concluyeron en la necesidad de diseñar una celda triaxial que permita evaluar sobre muestras de formación cuyo tamaño se pueda lograr no solamente estudiar los diferentes fenómenos de WBS si no también el comportamiento tanto de las fracturas como el sellado de estas bajo condiciones de esfuerzos en 3 direcciones ortogonales el uno del otro, simulando así una anisotropía de esfuerzos similar a las condiciones in situ.

Se diseñó una Celda Triaxial basado en los parámetros operacionales y resultados de diferentes experimentos alrededor del mundo. Con el presente diseño se logrará obtener un equipo que simule una anisotropía de esfuerzos ya que se puede manipular 3 esfuerzos sobre una muestra y ortogonales una de la otra en un rango entre 0 y 2500 psi.

La Celda Triaxial se diseñó para contener muestras de 6 x 6 x 6 in. El tamaño permitirá obtener más número de muestras y por lo tanto mayor número de pruebas en comparación de muestras de 30 x 30 30 cm utilizadas por otros autores.

Con el procedimiento de diseño, cálculos mecánicos y computacionales. Se seleccionaron los componentes óptimos para la Celda Triaxial Verdadera, diseñando así una estructura con dimensiones adecuadas, pero evitando los sobredimensionamientos que finalmente terminan en gastos mayores.

Se evidenció que la simulación basada en Elementos Finitos con el Software SolidWorks es una herramienta fundamental a la hora de analizar sistemas complejos. Para una buena manipulación del software, se hace necesario tener un conocimiento previo en Resistencia de materiales.

Los análisis estructurales de resistencia mecánica se basan en el estudio de elementos ideales, es por esto que un modelo de análisis estático como el usado por SolidWorks se convierte en un gran referente a la hora de analizar cargas complejas, ya que tiene la propiedad de incluir muchas variables que afectan el comportamiento del material.

En el proceso de diseño, se estandarizó los materiales y elementos usados en el prototipo con el ánimo de adquirirlos fácilmente en el mercado, además de simplificar el modelo con geometrías sencillas que faciliten la producción, disminuyendo así el tiempo de fabricación y los costos.

Se diseñó un equipo el cual será la base fundamental para una futura fabricación. Con la Celda Triaxial Verdadera se logrará evaluar técnicas de prevención y de Wellbore Strengthening (WBS) para mitigar las pérdidas de circulación durante la perforación, por lo tanto, será una herramienta para la investigación que ofrece competitividad a nivel tecnológico.

Con el fin de realizar pruebas de WBS. El presente trabajo muestra el proceso de aprendizaje desde la utilización de equipos existentes en laboratorio, pasando por la modificación de los mismos y finalmente el proceso de diseño de una Celda Triaxial. Cada fase fue una respuesta a la necesidad del anterior.

Se realizó simulaciones de Análisis Estático del modelo diseñado con dimensiones y materiales seleccionados, así como también planos de Fabricación necesarios para la futura construcción de la Celda Triaxial Verdadera.

El diseño estructural de la Celda fue realizado con un factor de seguridad mayor que 2, lo que indica una excelente resistencia respecto a lo sugerido por Faires en el Libro de Diseño de Maquinas. Esto se puede visualizar de manera general en el capítulo 5.6, figura 55 de acuerdo con el modelamiento realizado con SolidWorks.

El análisis económico mostró un ahorro de casi un 70% en dinero al optar por la fabricación del diseño final. Esto evidencia el tiempo y trabajo dedicado al diseño de un prototipo económico, confiable y con condiciones operacionales óptimas.

Se demostró mediante la conceptualización de la Factibilidad Económica, la Viabilidad Técnica, y de Mercado para la fabricación futura del prototipo diseñado.

La etapa No 1 del Capítulo 4 correspondiente a la prueba experimental para fracturamiento de una muestra sintética ofreció las siguientes conclusiones:

- Aunque se aplicó un aumento progresivo de la presión al interior de la muestra para intentar romper la roca, había la necesidad de incrementar la presión de confinamiento, generando éste último un esfuerzo de compresión desde el exterior de la muestra que se transmitía entre partículas e impedía que los esfuerzos de tensión al interior del Wellbore (Específicamente en el concentrador de esfuerzos) ejercido por el fluido de perforación, promoviera la separación de los granos y por ende el fracturamiento.
- Los resultados mostraron la importancia de eliminar la relación directa que había entre la presión de inyección y la presión de confinamiento ejercida por el fluido hidráulico sobre la Manga y por ende sobre el exterior de la muestra.
- Aunque se encontró la manera de crear un concentrador de esfuerzos dentro de la muestra; el Core Holder utilizado no permitía simular un esfuerzo axial o de Overburden en las caras superior o inferior de la muestra, solo se logró ejercer un esfuerzo de tensión interna realizada por la presión de inyección de fluido y un esfuerzo radial producto de la presión de confinamiento sobre la muestra el cual simulaba en este caso los esfuerzos horizontales máximo y mínimo que serían iguales en su magnitud.

- La anisotropía de esfuerzos creada por los esfuerzos horizontales y de Overburden no fue simulada. Esta condición anisotrópica juega un papel importante tanto en la creación como en el direccionamiento de la fractura.

La Etapa No 2 del Capítulo 4 correspondiente al diseño y adecuación de un Core Holder convencional; arrojó las siguientes conclusiones:

- Aunque no se logró llegar a la fase de pruebas de fracturamiento con las muestras de Berea Seleccionadas. Se logró adecuar un Core Holder convencional, diseñando unos cabezales que permitan evaluar procesos de fracturamiento y resistencia de la roca.

- El Core Holder Modificado permitirá evaluar pruebas de inyección de fluidos en muestras de Berea (con hueco concéntrico simulando el Wellbore) sometiénolas a un esfuerzo axial simulando el Esfuerzo de Overburden. El modelo tiene similitud a un tamaño de menor escala respecto a los equipos utilizados por Liberman (2012), Nwaoji (2012) y Contreras (2014).

- A pesar de que en el Core Holder Modificado no se puede simular la anisotropía de esfuerzos horizontales (σ_H y σ_h) sobre la muestra; Si se puede lograr un camino preferente de fracturamiento producto de su morfología (Laminación, Deposición de partículas).

- Se puede llegar a evaluar diferentes tipos de fluidos con ensayos de fracturamiento sobre muestras de 1 ½” de diámetro en el Core Holder modificado, a bajas Tasas de Inyección y evaluando parámetros en tiempo real con la ayuda de un Software de detección de datos donde se grafique tendencias de Presión de inyección.

8. Recomendaciones

Con base en los planos de fabricación. Se recomienda llegar a la construcción de la Celda Triaxial Verdadera con el fin de realizar pruebas de WBS en laboratorio.

Se recomienda diseñar un sistema de calentamiento asociado al presente diseño, con el fin de simular temperaturas in situ durante las pruebas de WBS.

Se recomienda trabajar y establecer un procedimiento de preparación y alistamiento de muestras, así como procedimientos durante las pruebas de WBS en laboratorio.

De ser necesario y para efectos de comercialización futura del prototipo diseñado, se haría necesario realizar la construcción de la Celda Triaxial bajo una norma internacional vigente (por ejemplo, la ASTM). Para el presente trabajo de investigación, se diseñó un prototipo diferente a los existentes alrededor del mundo para uso exclusivamente institucional con fines de investigación a nivel de pruebas de fracturamiento y pruebas de WBS.

Glosario de Palabras

FEM: Finite Elements Method

FBP: Presión de ruptura de la fractura

FDS: Factor de Seguridad

FROP: Presión de reapertura de fractura

HDR: Hot Dry Rock ó Enhanced Geothermal Systems (EGS).

LCM: Lost Circulating Material

LPM: Lost Preventive Material

WBS: Wellbore Strengthening

WSA: Wellbore Strengthening Augmentation

TVD: True Vertical Depth

TIR: Tasa Interna de Retorno

VAN: Valor Actualizado Neto

Referencias Bibliográficas

- Alberty, M., & McLean, M. (2004). A Physical Model for Stress Cages. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. doi:<https://doi.org/10.2118/90493-MS>
- Alsaba, M., Dushaishi, M., Nygaard, R., Nes, O., & Saasen, A. (2017). Updated Criterion to Select Particle Size Distribution of Lost Circulation Materials for an Effective Fracture Sealing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 641-648. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.027>
- Alsaba, M., Nygaard, R., Saasen, A., & Nes, O. (2014). *Lost Circulation Materials Capability of Sealing Wide Fractures*. Galveston, Texas, USA: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. doi:<https://doi.org/10.2118/170285-MS>
- Aydin, M., & Kisioglu, Y. (2013). Hydraulic press design under different loading conditions using finite element analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 16(3), 129-138.
- Barba, L., & Reyes, O. (2017). *Cálculo y diseño de una prensa hidráulica tipo "C" con capacidad de 20 toneladas*. (Trabajo de Grado Ingeniería Mecánica). Instituto Politécnico Nacional. México.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. McGraw Hill.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw-Hill Companies.
- Calderón, Z. (2014). Introducción a la mecánica de rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo. *Ediciones UIS*.

- Cao, C., Pu, X., Zhao, Z., Wang, G., & Du, H. (2018). Experimental Investigation on Wellbore Strengthening Based on a Hydraulic Fracturing Apparatus. *Journal of Energy Resources Technology, 140*(5). doi:<https://doi.org/10.1115/1.4038381>
- Cheng, Y., Zhang, Y., Yu, Z., Hu, Z., & Yang, Y. (2020). An investigation on hydraulic fracturing characteristics in granite geothermal reservoir. *Engineering Fracture Mechanics, 237*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107288>
- Contreras, O., Hereland, G., Husein, M., Nygaar, R., & Alsaba, M. (2014). Experimental Investigation on Wellbore Strengthening in Shales by Means of Nanoparticle-Based Drilling Fluids. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. doi:<https://doi.org/10.2118/170589-MS>
- Contreras, O., Hereland, G., Husein, M., Nygaar, R., & Alsaba, M. (2014). *Wellbore Strengthening by Means of Nanoparticle-Based Drilling Fluids*. (Doctoral Thesis). University of Calgary. Texas, USA. doi:<http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/28684>
- Davis, R. (2009). *Plasticity and Geomechanics*. New York: Cambridge University Press.
- Dubs, R. (2012). *Una Estrategia Metodológica para el Proyecto Factible*. Estado de Aragua, Venezuela: Entretemas. Campus Upel.
- Dupriest, F. (2005). Fracture Closure Stress (FCS) and Lost Returns Practices. *SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands*. doi:<https://doi.org/10.2118/92192-MS>
- Faires, V. (1995). *Diseño de Elementos de Máquinas* (4ta ed.). México: Ediciones Limusa.
- Frash, L., Gutiérrez, M., & Hampton, J. (2014). True-triaxial apparatus for Simulation of Hydraulically Fractured Multi-Borehole Hot Dry Rock Reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.05.017>

Granel, M. (23 de Julio de 2021). *¿Cómo calcular el valor presente neto?* Obtenido de Rankia:

<https://www.rankia.cl/blog/analisis-ipsa/3892041-como-calcular-valor-presente-neto-ejemplos>

Guo, Q., Cook, J., Way, P., Ji, L., & Friedheim, J. (2014). A comprehensive experimental Study on Wellbore Strengthening. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. doi:<https://doi.org/10.2118/167957-MS>

Hamrock, B., Jacobson, B., & Schmid, S. (1999). *Elementos de Máquinas*. México D.F.: McGraw-Hill.

Keith, R. B. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. McGraw Hill.

Liberman, M. (2012). *Hydraulic fracturing experiments to investigate circulation losses*. (Master Theses). Missouri S&T Library and Learning Resources .

Morita, N. (1990). *Theory of Lost Circulation Pressure*. New Orleans, LA: In 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers Held. doi:<https://doi.org/10.2118/20409-MS>

Mudennavar, G., Chalageri, G., & Patil, P. (2018). Design and Analysis of 12 Ton Hydraulic Pressing Machine. *International Journal of Scientific Development and Research*, 3(8), 109-117.

Muñoz, E. (2019). *Análisis y factibilidad de costos en proyectos de construcción sostenible*. (Tesis de Investigación Maestría en Construcción). Universidad Nacional de Colombia.

Razavi, O., Vajargah, A. O., Aldin, M., & Sudarshan, G. (2016). Optimum Particle Size Distribution Design for Lost circulation control and Wellbore Strengthening. *Journal of*

- Natural Gas Science and Engineering*, 35, 836-850.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.038>
- Razavi, O., Vajargah, A., Oort, E., Aldin, M., & Patterson, R. (2015). How to Effectively Strengthen Wellbores in Narrow Drilling Margin Wells: An Experimental Investigation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. doi:<https://doi.org/10.2118/174976-MS>
- Rus, E. (12 de Septiembre de 2020). *Factibilidad Técnica*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/factibilidad-tecnica.html#:~:text=La%20factibilidad%20t%C3%A9cnica%20determina%20si,m%C3%A9todos%20involucrados%20en%20un%20proyecto>
- Sevilla, A. (15 de Julio de 2014). *Tasa interna de retorno (TIR)*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>
- Song, J., & Rojas, J. (2006). *Preventing Mud Losses by Wellbore Strengthening*. Moscow, Russia: SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition.
- Van, E., Friedheim, J., & Pierce, T. L. (2011). Avoiding Losses in Depleted and Weak Zones by Constantly Strengthening Wellbores. *SPE Drilling & Completion*, 26(04), 519-530. doi:<https://doi.org/10.2118/125093-PA>
- Váquiro, J. (23 de Febrero de 2010). *La relación beneficio costo*. Obtenido de Pymes Futuro: <https://www.pymesfuturo.com/costobeneficio.html>
- Vickers, Eaton Hydraulics Training Services. (2008). *Manual de Hidráulica Industrial 935100-A*. México D.F.: VYCMEX.
- Zhong, R., Miska, S., Yu, M., Meng, M., Ozbayoglu, E., & Takach, N. (2019). Experimental Investigation of Fracture-Based Wellbore Strengthening using a Large-Scale True Triaxial

Cell. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 691-699.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.081>

Apéndices.

Apéndice A. Planos de Fabricación

