



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PERFORADORA HIDRÁULICA PARA POZOS DE AGUA

CHRISTIAN GONZALO PARIENTE
MÁLAGA

Piura, diciembre de 2013

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

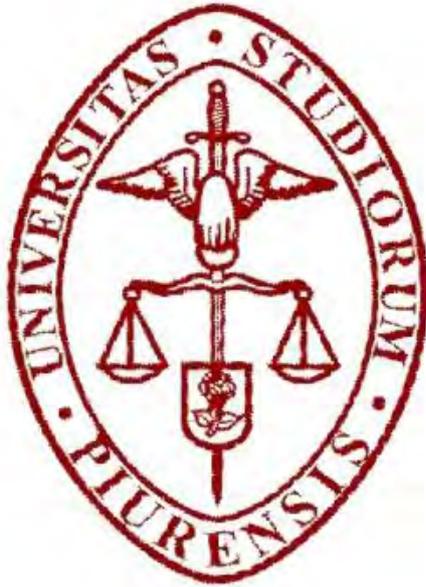
Pariente, C. (2013). *Diseño y simulación de perforadora hidráulica para pozos de agua*. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

U N I V E R S I D A D D E P I U R A
FACULTAD DE INGENIERIA



“Diseño y simulación de perforadora hidráulica para pozos de agua”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico-Eléctrico

Christian Gonzalo Pariente Málaga

ASESOR: Dr. Ing. Miguel Buenaventura Castro Sánchez

Piura, Diciembre de 2013

*A Dios;
por iluminar mi camino.
A mis Padres, Percy y Lucy;
por darme tanto amor durante todos los días de mi vida.
A mi hermana, Andrea;
por su amistad y confianza.
A Cinthya;
por su apoyo incondicional y comprensión.
A mis abuelos, Ovidio, Vilma e Isabel;
por ser un gran ejemplo de vida.*

Prólogo

El agua es un elemento vital para la conservación y desarrollo de todos los seres vivos que habitan el planeta. A pesar que el suministro de agua potable se ha incrementado notablemente como parte vital del desarrollo socio-económico del país, en la actualidad existen grandes grupos poblacionales con carencia de recursos hídricos debido a innumerables factores, entre los que se cuentan los desórdenes climatológicos y contaminación de fuentes superficiales de agua ocasionada por la minería ilegal, la tala indiscriminada de bosques, el inapropiado manejo de las tierras, las grandes demandas del sector agrícola e industrial y el alto crecimiento poblacional.

En las últimas décadas, la explotación de los recursos hídricos subterráneos, se ha convertido en una excelente alternativa para suplir las necesidades de abastecimiento de agua potable en muchas regiones y para algunos sectores económicos del país. No obstante, las comunidades más necesitadas, no han tenido acceso a estos recursos, por los altos costos que involucra la construcción de las obras de captación.

En la Universidad de Piura, el ingeniero Luis Villaseca Carrasco desarrolló una tesis titulada “Diseño y construcción de perforadora manual para pozos”. La cual tiene como fundamento un modelo desarrollado por el Servicio de Voluntarios Internacionales. Este modelo fue modificado, construido y probado en condiciones locales. Este tipo de perforadoras manuales, son de fácil construcción y bajo costo; pero, su avance es lento y la profundidad que alcanza es corta.

En la actualidad se ha dejado de lado las perforadoras manuales y se han desarrollado tecnologías de perforación accionadas por energía hidráulica, neumática y eléctrica, las cuales entregan una mayor eficiencia y mejores resultados. Así pues, se presenta el diseño de una perforadora accionada por energía hidráulica, de fácil construcción y ensamblaje. Para tal efecto, se realizan los cálculos de los esfuerzos mecánicos a los que estarán sometidos todos los elementos principales de la máquina, complementado por el cálculo de las fuerzas hidráulicas necesarias para generar el movimiento de los actuadores. Finalmente para comprobar los resultados obtenidos en el cálculo analítico, se realiza la simulación de las piezas en un *software* basado en la tecnología CAD-CAE.

Esta tesis inicia a partir de la propuesta presentada por el Departamento de Mecánica, de la Universidad de Piura, con el fin de presentar a la comunidad piurana, un avance tecnológico que puede ser utilizado en la construcción de pozos de agua en la región, a un bajo costo y alto rendimiento.

El tesista agradece a Dios por conservarlo bajo su amparo y guiarlo por el camino de la verdad, a todas las personas que me dieron su apoyo durante el desarrollo de la tesis; a mis padres, Percy y Lucy por los grandes consejos y palabras de aliento. A mi hermana Andrea y amigos que me brindaron su apoyo durante mi vida universitaria y profesional.

Al Dr. Miguel Castro, por la enseñanza recibida y la asesoría prestada durante toda la realización de la tesis, agradeciéndole su apoyo incondicional.

Resumen

Cabe mencionar que esta tesis consiste en diseñar una perforadora hidráulica que pueda ser empleada en la construcción de pozos en la región de Piura, así como en otras regiones agrícolas del país, con un diámetro promedio de 60.33 mm y con un alcance máximo de 150 m de profundidad.

En cuanto al desarrollo, para conocer el entorno en el que se va a utilizar la perforadora hidráulica, se realiza una descripción de los yacimientos de agua subterránea, los métodos de captación de agua y el procedimiento para la construcción de un pozo.

Se ha realizado el diseño de la perforadora hidráulica, basado en la arquitectura general de máquinas similares que son comerciales en el mercado. Básicamente toda perforadora hidráulica para pozos de agua cuenta con una unidad de potencia, una bomba hidráulica principal, una unidad de empuje y arrastre, una unidad de rotación, un bastidor o torre de perforación, la tubería o varillaje de perforación, la broca o trepano, una bomba para circulación de lodos y la estructura de soporte y transporte.

También se ha realizado un análisis de esfuerzos en el bastidor de perforación, en la tubería o varillaje de perforación, en la broca y en la estructura de soporte y transporte de la máquina. Del mismo modo, se han calculado las fuerzas hidráulicas necesarias para obtener el movimiento de los actuadores hidráulicos como son, la unidad de rotación, la unidad de empuje y arrastre y el pistón hidráulico para posicionar e bastidor en dirección vertical.

Además, utilizando el *software SolidWorks Simulation* se realiza la modelación de todos los componentes mencionados en el párrafo anterior, para simular el comportamiento estructural debido a las fuerzas aplicadas y de esa manera, comprobar los cálculos obtenidos de forma analítica.

Finalmente se presentan los costos y los planos de descripción, con el objetivo de presentar una máquina de menor costo, comparado con las máquinas comerciales de similar capacidad, y de fácil ensamblaje.

Índice General

Capítulo 1: Aspectos generales de las captaciones de aguas subterráneas	3
1.1	Introducción..... 3
1.2	Clasificación de los yacimientos de aguas subterráneas..... 4
1.3	Estructura de los yacimientos de aguas subterráneas 5
1.3.1	Superficie de aguas subterráneas..... 5
1.3.2	Franja capilar..... 5
1.3.3	Zona de aireación..... 6
1.3.4	Zona de saturación..... 6
1.4	Porosidad en las rocas..... 6
1.4.1	Rocas no consolidadas..... 7
1.4.2	Rocas consolidadas..... 8
1.5	Permeabilidad en las rocas..... 8
1.5.1	Ley de <i>Darcy</i> 9
1.5.2	Permeabilidad en rocas corrientes..... 10
1.5.3	Permeabilidad fuera de la zona de saturación..... 10
1.5.4	Permeabilidad en formaciones areno-arcillosas..... 11
1.6	Circulación de las aguas subterráneas..... 11
1.6.1	Las infiltraciones..... 11
1.6.2	Pérdidas de carga..... 12
1.6.3	Gradiente hidráulico..... 13
1.7	Prospección hidrogeológica..... 14
1.7.1	Mapas para el inventario de las captaciones existentes..... 14
1.7.2	Relación con la escorrentía..... 15
1.8	Prospección eléctrica de superficie..... 16
1.8.1	Principio del método..... 16
1.8.2	Dispositivos de medida..... 19
1.9	Obras de Captación..... 20

1.9.1	Pozos	20
1.9.2	Sondeos	20
Capítulo 2: Generalidades de los equipos de perforación		23
2.1	Clasificación de las perforadoras.....	23
2.1.1	Según el agente de impulsión.....	23
2.1.2	Según el tipo de servicio	24
2.1.3	Según el principio de movimiento	25
2.1.4	Según la dirección de perforación.....	26
2.2	Partes principales de la máquina perforadora.....	28
2.2.1	Unidad de potencia.....	28
2.2.2	Bastidor o torre de perforación.....	28
2.2.3	Sistema de deslizadores o empuje (<i>pull down</i>)	28
2.2.4	Sistema de rotación	29
2.2.5	Tubería de perforación	29
2.2.6	Broca o Trépano	29
2.2.7	Bomba de Lodos.....	30
Capítulo 3: Diseño de perforadora hidráulica.....		31
3.1	Generalidades del diseño	31
3.1.1	Dureza de la roca.....	31
3.1.2	Velocidad de Rotación	32
3.1.3	Fuerza de Empuje Sobre la Roca	32
3.1.4	Diámetro de perforación.....	34
3.1.5	Velocidad y caudal del fluido de barrido de partículas	34
3.1.6	Velocidad del fluido	34
3.1.7	Caudal del fluido	35
3.2	Diseño del bastidor de perforación.....	36
3.2.1	Características	36
3.2.2	Análisis de cargas.....	36
3.2.3	Análisis de esfuerzos	39
3.2.4	Calculo de esfuerzos para el pin en el punto A	51
3.3	Diseño de brocas de perforación.....	55
3.3.1	Perforación rotativa por corte.....	55
3.3.2	Fundamentos de la perforación por corte.....	57
3.3.3	Análisis de la fuerza de corte aplicada sobre la roca.....	58
3.4	Sistema de varillaje de extensión.....	62

3.4.1	Análisis de cargas aplicadas sobre la tubería de perforación	62
3.4.2	Análisis de esfuerzos	65
3.5	Cálculo y selección de los piñones y la cadena	67
3.6	Sistema hidráulico.....	69
3.6.1	Selección del cilindro hidráulico de elevación	69
3.6.2	Selección de la unidad de presión hidráulica.....	71
3.6.3	Selección de motor hidráulico	71
3.6.4	Accionador del motor hidráulico.....	72
3.6.5	Selección de Fluido hidráulico	72
3.7	Panel de Control.....	73
3.8	Motor de combustión interna y sistema de potencia.....	74
3.9	Elementos adicionales del equipo	74
3.10	Diseño del sistema hidráulico	¡Error! Marcador no definido.
3.11	Análisis de costos de fabricación	87
Capítulo 4: Verificación del diseño de perforadora hidráulica.....		89
4.1	Análisis del pin pivote	90
4.2	Análisis de la viga	92
4.2.1	El carro deslizante se encuentra en la parte superior de la viga	93
4.2.2	El carro deslizante se encuentra en el centro de gravedad de la viga	96
4.2.3	El carro deslizante se encuentra en la parte inferior de la viga	99
4.3	El carro deslizante se encuentra en la parte superior de la viga cuando éste asciende	102
4.4	Sarta de perforación	105
4.5	Estructura soporte	107
Anexo A: Introducción al método LRFD (<i>Load and Resistance factor design</i>).....		113
Anexo B: Hoja técnica del acero 4340		117
Anexo C: Características del cilindro hidráulico Marca <i>Rexroth</i> construcción circular		121
Anexo D: Hoja técnica cilindro hidráulico <i>Rexroth</i> CDM1		125
Anexo E: Hoja técnica motor hidráulico <i>Eaton Serie S 103-1540-S</i>		129
Anexo F: Hoja técnica motor hidráulico <i>Eaton Serie 2000 104-1002</i>		133
Anexo G: Hoja técnica bomba hidráulica <i>Sauer Danfoss. Serie 45, modelo J60B</i>....		137
Anexo H: Hoja técnica motor <i>Kubota, Serie 05, modelo V1505-E3B</i>		141

Anexo I: Hoja Técnica bomba hidráulica de <i>General Pumps</i> modelo AT0055	145
Anexo J: Planos referenciales de la perforadora hidráulica	149

Introducción

Se ha desarrollado la siguiente investigación con el fin de obtener un modelo que permita simular el comportamiento de la perforadora hidráulica en distintos terrenos de operación. Adicionalmente, se debe resaltar que el estudio tiene como finalidad ser un precedente, para que posteriormente pueda ser construida a un bajo costo y empleada en la perforación de pozos de agua en la región.

Según un estudio hidrogeológico presentado por el departamento de Zonificación Ecológica del Gobierno Regional de Piura, las condiciones variables de sedimentación en tiempo y espacio en el lecho del río Piura, ha dado origen a la conformación de acuíferos conformados por grava, arena, limo y arcilla, determinando estratos permeables e impermeables como es el caso del Bajo Piura. Menciona que existen 4 reservorios acuíferos, que en conjunto ofrecen una reserva explotable de 743 MMC/año. El de mayor explotación es el que corresponde al valle Alto Piura; en segundo lugar se ubica el acuífero confinado del valle Bajo Piura que viene siendo explotado desde la década del 50 y cuyas aguas son utilizadas para satisfacer el uso doméstico de las ciudades de Piura, Catacaos y poblaciones menores del referido valle. En tercer y cuarto lugar se ubican los acuíferos libres del Bajo Piura y Chira; la explotación de estos acuíferos es aun limitada debido a la disponibilidad de grandes volúmenes de aguas superficiales provenientes del embalse Poechos.

Este trabajo se ha desarrollado en 4 capítulos que a continuación se describen:

El capítulo 1 está dedicado a presentar información sobre los yacimientos de aguas subterráneas, y sobre las formas de extracción de agua.

En el capítulo 2 se presenta un estudio de los equipos de perforación en general y la clasificación de éstos, según su fuente de energía y empleabilidad, identificando las partes que los componen e investigando los avances tecnológicos que se han ido desarrollando en las mismas.

En el capítulo 3 se procede a realizar los cálculos para el diseño de las principales partes de la perforadora hidráulica. Se parte identificando los parámetros de funcionamiento del equipo y el entorno de trabajo. Además se definen las condiciones de operación y seguidamente se procede con el análisis de las partes principales de la perforadora hidráulica, como son: bastidor de perforación, brocas de perforación, sistema de varillaje, estructura de soporte y eje pivotante. Posteriormente, se realizan los cálculos para el diseño

del sistema hidráulico y sus actuadores como son: unidad de rotación, unidad de empuje y arrastre y pistón hidráulico para el posicionamiento vertical del bastidor.

Para poder realizar una comprobación de los resultados obtenidos en el diseño mecánico, en el capítulo 4, se procede a realizar la modelación de las partes de la perforadora y la simulación de las fuerzas aplicadas en la operación de la máquina, utilizando para ello un *software* de simulación llamado *SolidWorks Simulation*. Finalmente se hace una interpretación de los resultados obtenidos en las simulaciones y qué modificaciones se podría adicionar para mejorar la eficiencia y rendimiento de la máquina.

Capítulo 1

Aspectos generales de las captaciones de aguas subterráneas

1.1 Introducción

Las aguas subterráneas en su mayoría tienen un origen como agua meteórica producida por las precipitaciones en forma de lluvia o nieve. El resto de estas precipitaciones es resultante de la evaporización y de la transpiración de las plantas que luego es filtrado en el terreno, primero retenido fijamente en el suelo seco formando una película en la superficie, y posteriormente en los micro-poros de las partículas de dicho suelo.

Las películas de agua llegan a cubrir las partículas sólidas sin embargo el aire todavía está presente en las zonas porosas del suelo la cual es llamada zona insaturada o de aireación, y en este caso el agua que se puede encontrar ahí es conocida como agua gravitacional. En profundidades menores y disponiendo de una cantidad de volumen de agua adecuada, es rellenado todos los huecos y se obtiene una zona de saturación, en la cual se puede encontrar a un nivel mayor la mesa de agua o nivel freático conocido también como nivel del acuífero. Con todo esto, esta zona de saturación es denominada como agua subterránea.

La estructura del suelo y la porosidad presente determinan la clase o tipo de acuífero y también de la circulación de las aguas subterráneas, ya que esta puede circular y llegar a almacenarse alrededor de todo el estrato geológico, por ejemplo se tienen los suelos arenosos, los de piedra y aluvión. Al circular las aguas subterráneas también se pueden almacenar en fallos o fisuras dispersas pertenecientes a las rocas compactas, aquellas que no llegan a ser permeables, por ejemplo se tiene la mayoría de rocas volcánicas y metamórficas, y en el caso de encontrarse con rocas compactas de fisuras de gran tamaño o cavernas estas generalmente son caliza.

En todo el mundo se puede estimar que un aproximado de 3% del agua total es agua dulce, de lo cual el 95% lo constituyen las aguas superficiales, un 3.5% lo hacen las aguas subterráneas, y el 1.5% corresponde a la humedad acumulada en los suelos. Entendiendo también el hecho de que en Sudamérica se halla el 29% de agua dulce que hay en disposición en el mundo, de lo cual la mayor cantidad de estas son aguas subterráneas y en este caso la solución que se presenta al problema de la actual escasez este recurso hídrico.

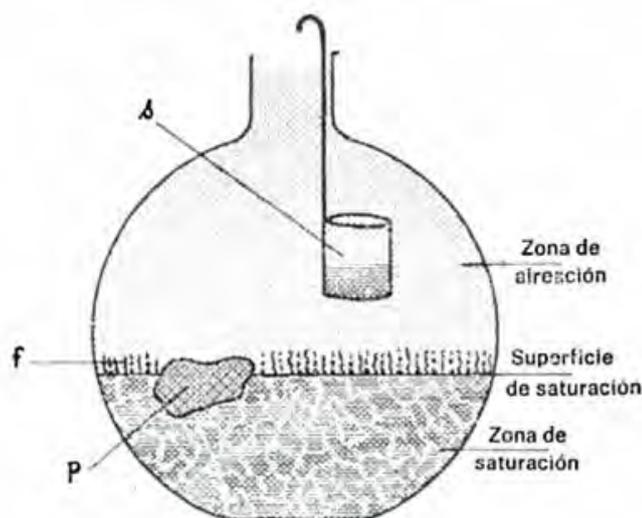
1.2 Clasificación de los yacimientos de aguas subterráneas

Dentro del medio en que vivimos y conocemos, la presencia del agua ha sido vital para nuestra existencia y consumo, por ello el estudio de las aguas y en especial de los yacimientos de aguas subterráneas para su posterior captación, es de vital importancia para la vida humana. Dentro del ciclo del agua se puede mencionar que el agua se desplaza por la superficie del suelo y esta lo hace conforme a su propio peso por efecto de la gravedad, va a su vez infiltrándose por el mismo suelo en todo su recorrido, y de esta manera atraviesa poros, pequeñas fisuras, etc.; es así que el agua llega al subsuelo llenando completamente algunos sectores, hasta ciertas profundidades, y de ahí por encima de ese nivel se puede encontrar parcialmente el llenado de los poros y fisuras de las rocas, hasta llegar a la superficie, donde no es necesario que se pueda apreciar la presencia de agua, incluso la superficie de la región puede ser un lugar muy árido, donde el agua se encuentre a grandes profundidades.

Los yacimientos de agua subterránea son de existencia mundial, y en las diferentes regiones poseen diferentes profundidades de acuerdo a las condiciones que son propias de esos lugares.

En los estudios realizados de cómo se forma y comportan los yacimientos de aguas subterráneas, el geólogo Oscar Meinzer en 1923, realizó un experimento que consistía en lo siguiente, según la Fig. 1.1, donde se muestra un balón que casi en su totalidad contiene arena, luego se le añadió agua, que con el transcurrir el tiempo fue infiltrándose poco a poco, hasta ubicarse en la parte inferior del balón formándose así a su paso por la arena diferentes etapas las cuales se las nombro empezando desde la parte superior como: superficie de aguas subterráneas, zona de aireación, franja capilar, y la zona de saturación, las cuales posteriormente se mencionarán más detalladamente.

Fig. 1.1. Balón de Meinzer. f: franja capilar; s: agua suspendida; p: guijarro no poroso.

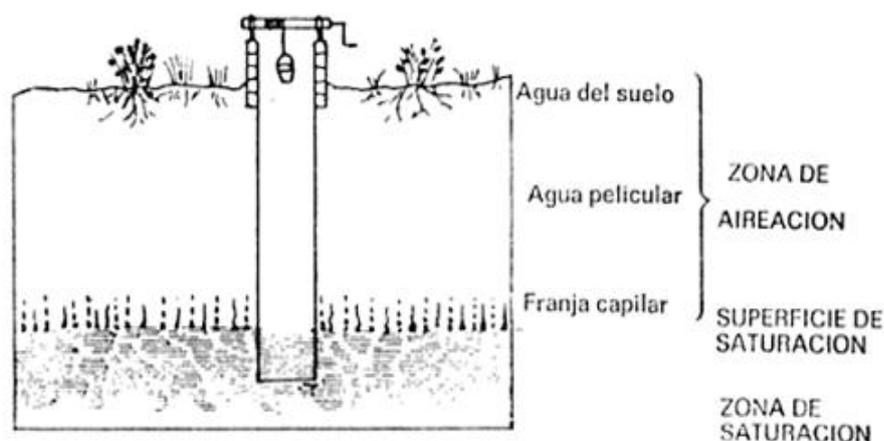


La Fig. 1.1 muestra el balón utilizado por el geólogo Meinzer, y los diferentes comportamientos existentes dentro de un yacimiento de aguas subterráneas. El agua acumulada en el fondo del balón viene a ser la zona de saturación en la cual se puede garantizar la presencia de agua y su segura captación. El guijarro “p” que posee propiedades no porosas hace que el agua circule alrededor de él, mas no llega a penetrarlo.

La franja capilar “*f*” que es la que existe de conexión entre la zona de aireación y la zona de saturación. La zona de aireación la cual no necesariamente contiene agua, sin embargo existe en su gran mayoría de manera parcial. El agua suspendida “*s*” puede hallarse entre pequeñas fisuras de rocas no porosas logrando almacenarlas por encima de la zona de saturación limitando su desplazamiento hacia la parte interna del subsuelo.

Este experimento que se realizó, comprobó que se da de manera muy real en la naturaleza, con lo cual se llegó a un estudio más profundo, dándonos así mucho conocimiento en cuanto a los yacimientos de agua subterránea. Haciendo una comparación ya con un suelo real en la cual se realiza una obra de captación, como por ejemplo un pozo (Fig. 1.2), y la Fig. 1.1 del balón de Meinzer se encuentra gran similitud.

Fig. 1.2. Distribución del agua subterránea.



1.3 Estructura de los yacimientos de aguas subterráneas

1.3.1 Superficie de aguas subterráneas

El estudio constante del suelo nos ha llevado año tras año a determinar las características principales para lo cual en lo que respecta a la red hidrográfica se estudiará la superficie de aguas subterráneas en donde en sus profundidades se pueden hallar en gran cantidad el agua almacenada entre las rocas.

En la superficie de las aguas subterráneas se presenta el fenómeno de la evapotranspiración por la cual, al ser un fenómeno superficial principalmente, se da como caso de estudio y de cálculos prácticos para determinar las características de la región, así como también la posibilidad de hallar agua subterránea.

1.3.2 Franja capilar

La franja capilar se halla ubicada en contacto con la zona de saturación, está también conteniendo agua entre las rocas pertenecientes a ella, la cual se encuentra sometida a fuerzas capilares las cuales son provenientes desde el interior de la zona de saturación, otra

característica de esta zona es que es de poco espesor comparada con la zona de aireación y saturación.

La franja capilar también está en contacto con el nivel freático, el cual es el nivel superior de la zona de saturación, la cual se puede apreciar mejor en el caudal de un río, de acuerdo a su aumento o disminución, es un indicativo del aumento o disminución del nivel freático.

1.3.3 Zona de aireación

La zona de aireación o también llamada vadosa es la que se ubica por encima del nivel freático el cual como ya se mencionó es el perteneciente a la superficie superior de la zona de saturación, y la franja capilar. La característica de esta zona es que no todos los poros llegan a estar llenos de agua, ya que el agua se escurre debido a sus fuerzas gravimétricas hasta la zona inferior en donde llega a almacenarse.

1.3.4 Zona de saturación

La zona de saturación es la que se ubica por encima de la capa impermeable, la cual detiene en su mayoría el paso del agua hacia lugares aún más profundos; y por debajo del nivel freático separa a esta zona con la zona de aireación o vadosa el cual en diferentes circunstancias varía descendiendo en temporadas secas y ascendiendo en temporadas húmedas. El agua se filtra luego de algún fenómeno producido en la superficie, como podría ser luego de una lluvia, esta agua atraviesa la superficie pasando por la zona de aireación y escurriéndose por la franja capilar hasta finalmente llegar a la zona de saturación en la cual llega a rellenar por completo todos los poros de las rocas, mientras que en las demás zona solo llega a llenar parcialmente los poros en las rocas. Es por esto que en la captación de aguas subterráneas, esta es la zona deseada para encontrar por sus propiedades y características de mayor almacenaje de agua.

1.4 Porosidad en las rocas

La porosidad, volumen poroso o volumen de poros, es una propiedad fundamental y elemental que presentan las rocas y consiste en la cantidad de espacios vacíos que se puede encontrar al analizarlas detalladamente. Con este tipo de análisis se pueden dar parámetros que logren cuantificar los materiales rocosos. El parámetro que se emplea es la relación que existe en el volumen de espacios vacíos por unidad de volumen total de la roca, expresado en porcentaje. Se tiene la siguiente tabla con información para ilustrar esta propiedad:

Tabla 1.1. Clasificación de porcentajes de porosidad en las rocas.

POROSIDAD	PORCENTAJE
Muy baja	Menor de 4 %
Baja	4 – 8 %
Media	8 – 16 %
Alta	16 – 32 %
Muy alta	Mayor de 32%

El análisis consiste en el siguiente procedimiento, se lleva una muestra de roca húmeda perteneciente al lugar a ensayar a un horno con lo cual se puede obtener la muestra seca, una vez logrado esto se procede a pesarla; luego de esto se la sumerge en agua hasta que se sature, y al pesarla nuevamente se puede obtener una diferencia de peso que sería equivalente al volumen de los huecos existentes. Existe otro procedimiento para determinar el volumen este se puede realizar por medio de gases, ya que al tratarla con agua existe la posibilidad de que el agua demore en penetrar por completo la roca hasta llegar a tenerla completamente saturada.

A continuación se detallan dos tipos de rocas, las rocas no consolidadas y las consolidadas:

1.4.1 Rocas no consolidadas

Las rocas no consolidadas tienen en su haber lo que es la arena y la arcilla, lo cual entre estos dos tipos la diferencia la cantidad de elementos constituyentes. Para los minerales de tipo arcilla sus partículas llegan a ser pequeñas en su mayoría imperceptibles a un microscopio, lo contrario a lo de las arenas, que poseen formaciones de granos más grandes que en su mayoría llegan a ser de cuarzo redondeado, con un poca cantidad de óxido de hierro negro, lentejuelas de mica brillante, etc. Cuando los constituyentes llegan a ser muy pequeños es cuando predominan los minerales arcillosos, incluso se puede hallar cuarzo tan pequeño que también viene a ser imperceptible al lente de un microscopio. Al mezclar las arenas con las arcillas se obtiene una sustancia conocida como limo. Hay una manera de clasificarlas de acuerdo a su tamaño:

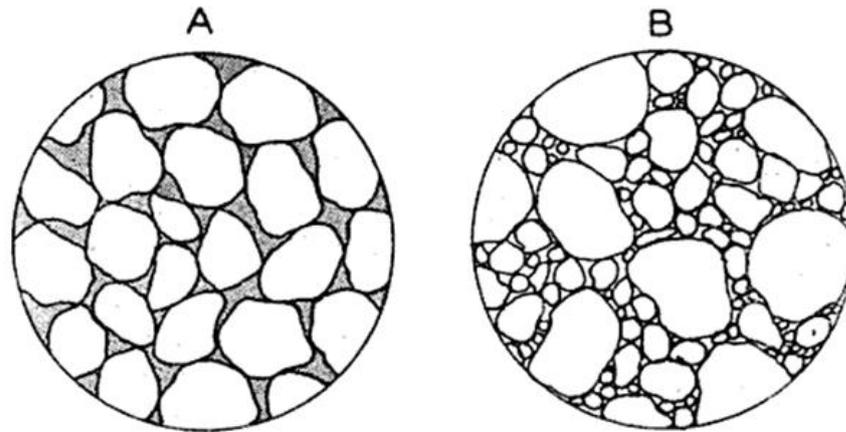
Tabla 1.2. Clasificación de las rocas de acuerdo al tamaño.

DIÁMETROS	MATERIAL
Mayores a 5 mm	Gravas
Comprendidas entre 0.05 mm y 5 mm	Arenas
Menores a 0.05 mm	Limos y Arcillas

Las arenas tienen la propiedad de llegarse a observar con la ayuda de una lupa, al ser colocadas en un ambiente propicio para lograr examinarlas, y se puede apreciar la forma de las partículas pertenecientes a la arcilla, como lo son el cuarzo, con su forma redondeada o con ángulos afilados. Con esta propiedad se puede concluir que la porosidad depende de la isometría de estos granos.

A continuación se tiene la Fig. 1.3, en la cual se puede apreciar que la porosidad es mayor cuando los granos tienden a ser iguales (A), mientras que cuando hay dispersión de tamaños en los granos la porosidad disminuye (B).

Fig. 1.3. Arena isométrica (A) y dispersa (B).



1.4.2 Rocas consolidadas

Las rocas consolidadas tienen propiedades diferentes a las del grupo anterior mencionado, dentro de este grupo se pueden nombrar a las rocas calizas, las cuales se pueden encontrar en el medio en grandes extensiones, en el orden de millares de kilómetros cuadrados, un ejemplo de esto se puede apreciar en los bancos en la cuenca de París la cual se extiende incluso por debajo del canal de la Mancha y llega hasta Inglaterra. El espesor de este ejemplo puede variar en lugares donde es solo algunos centímetros y en otros llega a tener un espesor de 1000 m.

Las rocas calizas tienen estas características y por eso son consideradas rocas consolidadas; entre las calizas se puede tener a dos grupos, distinguidas por su naturaleza permeable, una es la permeabilidad por porosidad que se presenta en las rocas calizas blandas, por ejemplo la que es conocida como la creta, contiene gran cantidad de granos pequeños los cuales solo se pueden apreciar a través de un microscopio, estas tienden a estar mal cementadas y de formación blanca rompible fácilmente, estas pueden compararse muy fácilmente a las arenas. La otra es la permeabilidad por fisuración que se presenta en las rocas calizas compactas, que como su nombre lo dice, son aquellas que casi no poseen poros, un nombre común de este tipo de rocas calizas es el mármol, cuyo nombre real son los cipolinos, son formaciones de cristales de calcita tan bien ordenados que la porosidad llega a ser inferior a 1%, a parte de estas rocas también están las calizas compactas no cristalinas las cuales llegan a tener gran dureza. La propiedad para almacenar agua se da gracias a que estas calizas pueden presentar fisuras las cuales sirven de recipientes para el agua que llega hasta ellas.

1.5 Permeabilidad en las rocas

La permeabilidad se define como la capacidad que presenta un material para dejar que exista paso de flujo de un fluido a través suyo, para nuestro análisis el fluido será agua subterránea y los materiales permeables serán las rocas anteriormente mencionadas. Para esto se tomara en cuenta la porosidad y la existencia de conexiones entre los intersticios,

también el tamaño y la forma de estos conductos, de esto se concluye que la permeabilidad tiene una relación entre la porosidad y el tamaño de los poros, unificando estos conceptos importantes para el estudio de las rocas. Poniendo como ejemplo se puede presentar un material muy poroso pero al mismo tiempo impermeable así como lo es la arcilla que posee estas dos cualidades, por eso es muy importante saber la conexión que habrá entre los poros. También se tiene la lava vesicular la cual posee grandes vesículas y es necesario que exista conexión entre ellas para que sea permeable, estas vesículas se forman por los gases que salen en las lavas, lo que ayuda a que la permeabilidad aumente es la fracturación de las rocas.

Existen cavidades que se presentan en algunas rocas ígneas y pegmatitas al evacuar los fluidos magmáticos, estas cavidades son conocidas como cavidades miarolíticas. En el caso de las aguas meteóricas estas producen que la disolución de algunas rocas que son solubles se junten con las cavidades de solución.

Hay lugares que pueden ser apropiados para cuando se producen deposición de minerales, estas son conocidas como diaclasas dándose en ambientes ígneos o sedimentarios. Por ejemplo, se tiene el caso de encontrar arena y arcilla porosas, se dará que solo la primera será permeable, y en el caso de tener granito fracturado y estas fracturas no llegan a interconectarse entonces no habrá flujo presente y resultara que es una roca impermeable.

1.5.1 Ley de *Darcy*

La ley de *Darcy* fue propuesta por un ingeniero hidráulico de origen francés cuyo nombre era *Henry Darcy*, él fue el primero en publicar sus trabajos en 1956 acerca del estudio que había realizado sobre el flujo de fluidos a través de medios porosos. En sus publicaciones se exponía los estudios experimentales de flujo de agua que eran sometidos en filtros de arena no consolidada.

Henry Darcy utilizó un equipo que consistía en un cilindro de gran tamaño que contenía una cantidad de arena no consolidada de un metro de longitud, y esta se sostenía entre dos pantallas de un material permeable (gaza permeable), en los extremos del cilindro iban conectados dos manómetros que median la presión de entrada y de salida al dejar fluir agua por la arena no consolidada. De este experimento, *Darcy* logró obtener una ecuación conocida como la Ley de *Darcy*, la cual se presenta a continuación:

$$V = K \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right) = K \left(\frac{\Delta h}{L} \right)$$

Donde:

V : Velocidad aparente del flujo (cm/s).

K : Constante de proporcionalidad (permeabilidad).

h_1 : Altura mayor (cm).

h_2 : Altura menor (cm).

Δh : Diferencia de los niveles manométricos (cm).

L : Longitud de la cantidad de arena (cm).

La relación que existe entre la ley de *Darcy* y el caudal se expresa de esta forma:

$$V = Ki$$

$$Q = AV$$

$$Q = AKi$$

Donde:

i : Gradiente hidráulico, el cual se detallará más adelante con más precisión.

1.5.2 Permeabilidad en rocas corrientes

El estudio sobre el coeficiente de permeabilidad ha traído mucha discusión ya que los valores obtenidos por lo general varían en base a muchas características propias del lugar de trabajo, sin embargo los valores que se nombrarán a continuación han sido extraídos del libro titulado “*La Captación de Aguas Subterráneas*”, del autor *Jean Pimienta*, son valores dados para las rocas no consolidadas, y pueden variar de acuerdo con las propiedades de granulometría y de compactación, éstos han sido de constante estudio por lo que tienen gran confiabilidad para nuestro caso:

Tabla 1.3. Coeficiente de permeabilidad de las rocas no consolidadas.

Rocas no consolidadas	$k [1/s*m^2]$
Arcilla limosa cercana a Burdeos	$9.9*10^{-8}$
Limos de Bergerac	1.7 a $2.5*10^2$
Arenas de Arcachon	0.6
Arenas eólicas de la duna de Pyla	0.39 a 0.55
Aluviones fluviales gruesos	12
Arenisca molásica de Aquitania	$3.2*10^{-4}$

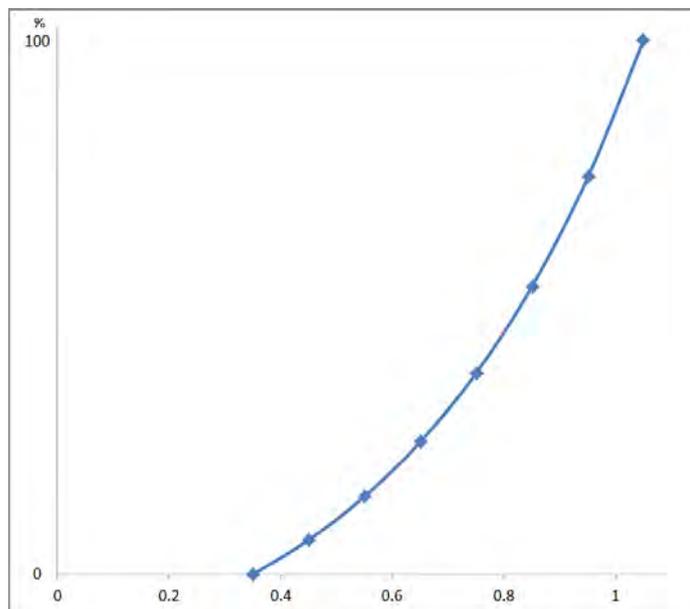
Estos valores para el coeficiente de permeabilidad están expresados en litros por segundo y por metro cuadrado.

1.5.3 Permeabilidad fuera de la zona de saturación

El caso de estudio de la permeabilidad fuera de la zona de saturación tiene relevancia cuando se localiza gran cantidad de agua dentro de la zona de aireación, ya que se puede dar el caso de un aumento de porosidad, pero una disminución de permeabilidad que por lo general, es debido a las burbujas de aire presentes que tratan de salir desplazadas por el agua infiltrándose a las partes más profundas, estas burbujas logran en ocasiones detener la infiltración del agua logrando que esta se almacene en las porosidades.

A continuación se muestra Fig. 1.4 la relación que existe entre la disminución de la permeabilidad y el grado de saturación.

Fig. 1.4. Disminución de la permeabilidad (en abscisa) en función del grado de saturación (en ordenadas).



1.5.4 Permeabilidad en formaciones areno-arcillosas

En las formaciones areno-arcillosas se tienen características que son propias de cada uno de estos materiales, por ejemplo:

La arena es porosa y permeable, posee granos pseudo-esféricos dando como resultado intersticios con sección transversal romboidal. Con esto se puede decir que la eficiencia hidráulica en los conductos será mayor, y eso debido a que las secciones transversales tienen poco perímetro.

1.6 Circulación de las aguas subterráneas

1.6.1 Las infiltraciones

Hay diferentes procedencias de las cuales el agua llega a depositarse en la zona de saturación, entre la cual se puede nombrar a las más notables como el agua procedente de las lluvias, de los deshielos; de éstos parte regresa al mar por medio de la red hidrológica la cual es alcanzada por la escorrentía presente en dicho suceso, la parte sobrante de agua es la que llega a tener presencia en el fenómeno conocido como infiltración. Sin embargo toda esta gran cantidad de agua es sometida también a otros fenómenos conocidos como precipitaciones, evaporaciones, escorrentía de superficie y subterránea, todo esto da forma al conocido ciclo del agua, por ejemplo: luego de una precipitación el agua fluye por la superficie y llega al mar, otra parte se infiltra en el suelo, en la parte superior de la zona de saturación el agua queda expuesta a la evaporación y otra se escurre lentamente hasta llegar también al mar, todo esto hace que exista agua dando vueltas a través de diferentes medios, en diferentes lugares haciendo posible que se pueda encontrar agua subterránea disponible para el uso y consumo humano.

Estos fenómenos son característicos del tipo de clima perteneciente a la región; la llamada evapotranspiración que consiste en la unión del agua evaporada y el agua transpirada emitida por las diversas plantas, es una característica medible que consiste en tener presente la evapotranspiración potencial la cual es la máxima que puede ser posible en la región, se tiene la siguiente expresión utilizada por los agrónomos, la cual nos da a conocer la altura de agua medido en milímetros:

$$b = \frac{p - e}{e}$$

Donde:

b : La altura del agua.

p : La altura de las lluvias.

e : La evapotranspiración potencial.

Evalutando la expresión se puede determinar lo siguiente:

Si se llega a obtener una altura de agua positiva eso representa un exceso de agua la cual indicara que las infiltraciones llegaran a la zona de saturación, teniendo en cuenta que no se llevara a cabo una escorrentía.

Si el resultado final llega a ser negativo entonces eso representara que hay un déficit de agua en la región, a partir de los cálculos y resultados obtenidos se puede determinar las estaciones y periodos en los cuales es más favorable el hecho de encontrar agua, o también llegar a determinar si el terreno es un terreno árido, con el tiempo llegar a determinar la tendencia de la región, si su comportamiento está tornándose favorable a las aguas subterráneas o si el comportamiento será árido año tras año.

1.6.2 Pérdidas de carga

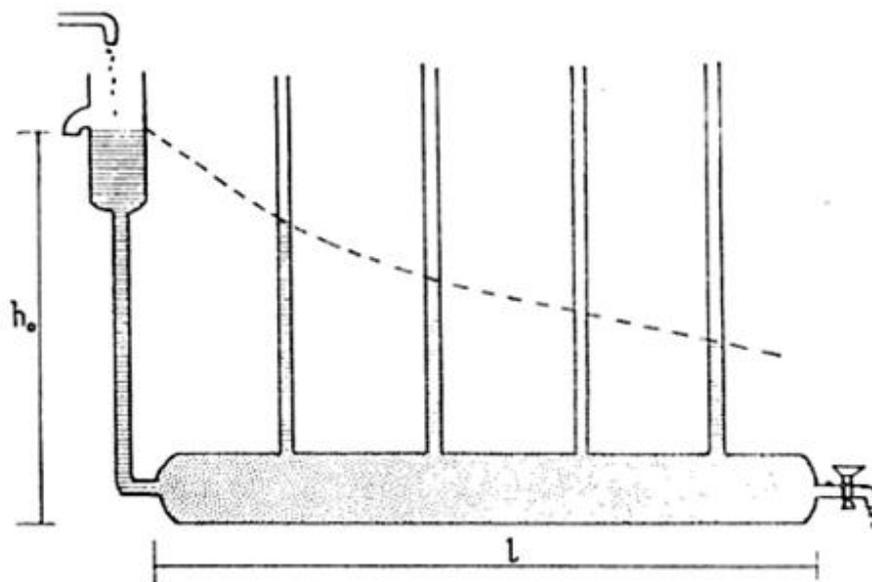
Durante la circulación de los líquidos en general llegan a soportar presión hidrostática, y van perdiendo parte de esa carga, debido a los fenómenos a los cuales son sometidos, como por ejemplo el rozamiento con las paredes. La pérdida de carga presente en los líquidos está relacionada con la propiedad de la viscosidad con lo cual se puede llegar a medir la temperatura del líquido en lugares de donde la geometría es conocida, sin embargo se utiliza formularios y tablas ya conocidas, para lograr obtener las pérdidas de carga para las instalaciones en la cuales el agua está sometida a presión.

Con respecto a las aguas subterráneas y la manera en la que se distribuyen resultaría un poco dificultoso hacer cálculos cuantitativos respecto a las pérdidas de carga sufridas durante el curso de su circulación, ya que si se remite a las rocas no consolidadas estas por ser de carácter poroso tendrán canales que no son apropiados para un cálculo debido, y si se toman a las rocas consolidadas que poseen fisuras que por lo general son de aspecto irregular, de igual manera no se podría hacer un cálculo debido. Para esto se ha ideado el siguiente procedimiento sencillo con el cual se puede realizar una aproximación cualitativa de lo que representa las pérdidas de carga durante la circulación que hace el agua a través de un medio poroso.

Tomando un tubo el cual se llena en su totalidad de arena, y utilizándolo horizontalmente, se vierte agua que se encuentra a un nivel constante, luego se ubican los manómetros de columna a lo largo del tubo y finalmente se conecta un grifo al final del extremo del tubo, esto mostrara en los diferentes manómetros las alturas piezométricas con lo cual se podrá determinar el nivel de las pérdidas de carga.

A continuación la Fig. 1.5, nos ilustra el procedimiento:

Fig. 1.5. Demostración experimental de las pérdidas de carga. A trazos: la línea piezométrica.



1.6.3 Gradiente hidráulico

Estudiando lo que respecta a la zona de saturación, y el nivel que este forma en el subsuelo, el agua va descendiendo de arriba hacia debajo de las cuencas, con esto se nota que a lo largo de un río se puede apreciar que se está dando una inclinación.

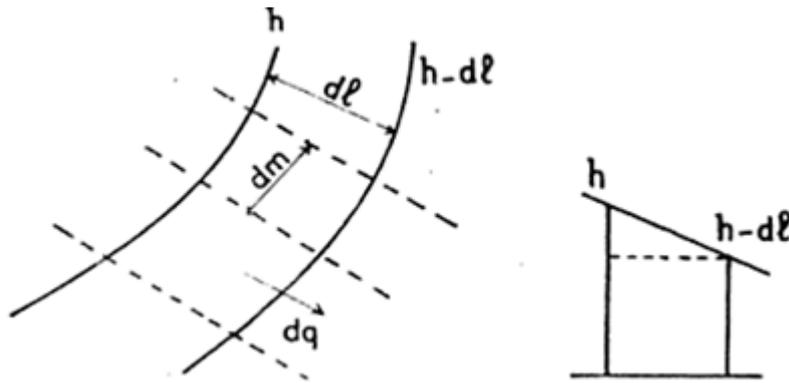
Analizando la relación que existe, entre el coeficiente de permeabilidad del terreno, la pendiente, y el caudal de las aguas subterráneas. Para esto se hace el siguiente análisis:

Suponiendo pequeños diferenciales de hilos de agua de dm avanzando por entre las algunas líneas con el mismo potencial, tomando la ley de *Darcy* y haciendo una aproximación dl igual a dm , entonces tenemos:

$$dq = k * dh$$

A continuación se muestra la Fig. 1.6 el procedimiento descrito:

Fig. 1.6. Circulación jalonada por líneas equipotenciales.



Siendo $dh = h/n$ donde n sería la cantidad de división del mismo potencial existente en l :

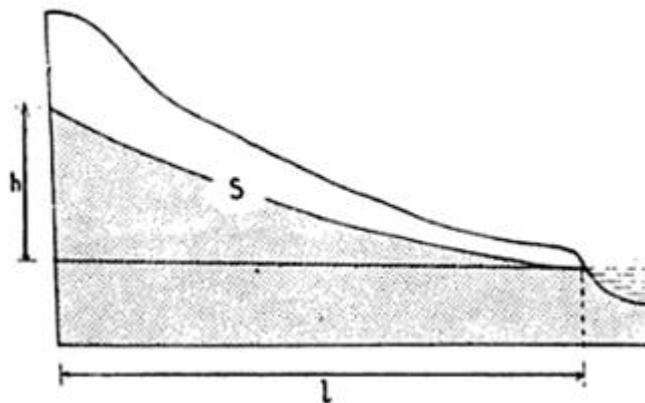
$$q = m * dk = \frac{kmh}{n}$$

Con esta relación se tiene que conocer la permeabilidad del terreno y la pendiente para poder llegar a saber cuál es el caudal.

El gradiente hidráulico definido como: h/l

La Fig. 1.7, nos ilustra mejor esta definición:

Fig. 1.7. Gradiente hidráulico h/l de una cuenca. S: superficie de saturación.



1.7 Prospección hidrogeológica

1.7.1 Mapas para el inventario de las captaciones existentes

A lo largo del estudio de las aguas subterráneas los encargados en hacer llegar sus conocimientos lo hacen a través de mapas, para dar una idea de lo que está sucediendo en los subsuelos, muy por debajo de nuestra visión, para esto se logró formular lo siguiente,

tomando como base a los planos cartográficos, y ubicar allí la circulación de las aguas subterráneas. Al proceder a graficarlos y entenderlos se hace de la manera que también es empleada para los mapas hidrogeológicos, representando en un plano la proyección de la superficie de saturación, incluyendo todo detalle como las deformaciones y las pendientes irregulares que se dan por la circulación, todas estas presentándose por curvas de nivel.

Dentro de estos mapas se puede mencionar que aquellas curvas de nivel que marcan la misma superficie de aguas subterráneas, son llamadas curvas isopiezométricas o isopiezas, por lo que la presión es la misma a lo largo de toda la superficie ya que hay contacto de agua con la atmósfera por medio de los poros y fisuras pertenecientes a la zona de aireación. También algunos estudiosos usan el término “hidroisohipsas”, con el cual también señalan que estas hidroisohipsas muestran los límites del techo de una capa acuífera de gran profundidad.

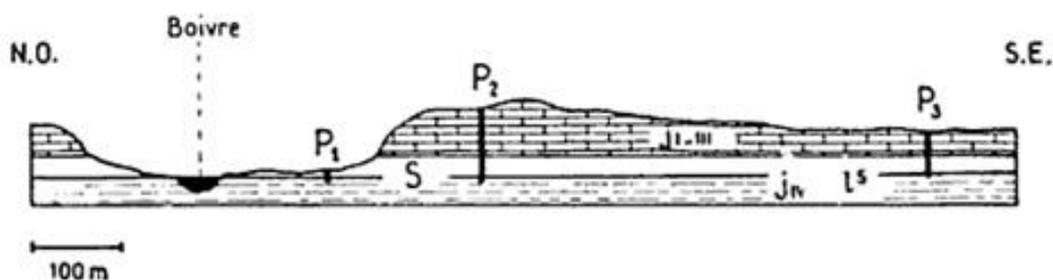
1.7.2 Relación con la escorrentía

El agua que se encuentra en algunos depósitos de la red hidrológica, como pueden ser los ríos que a pesar de estar fluyendo tienden a tener una forma definida durante su curso, y no llegan a tener infiltraciones ya que están en contacto con la zona de saturación, esto también se puede verificar en los grandes lagos cuyas aguas también se encuentran en contacto directo con la zona de saturación, teniendo en cuenta que existen algunas excepciones como el lago *Tchad* y algunos pequeños lagos y estanques cuyas aguas provienen de afloramientos suspendidos.

Teniendo estos conocimientos, se pueden aprovechar para ubicar una zona de saturación próxima a un río, se procede tomando un punto del río de donde se medirá la profundidad y la distancia hacia la superficie del suelo, haciendo algunos cálculos y con algunas aproximaciones se podrá determinar la profundidad a perforar para lograr encontrar la zona de saturación para proceder a la captación del agua subterránea.

A continuación se hace el siguiente ejemplo con la Fig. 1.8:

Fig. 1.8. Corte geológico de un valle de *Poitou* (Francia).



S: superficie de saturación; P₁: fuente (1 m de profundidad); P₂: antiguo pozo galo-romano sobre una colina fortificada de la época (80 m de profundidad aproximadamente); P₃ pozos en explotación (40 m de profundidad).

Se muestra en la Fig. 1.8 un corte hecho en el valle de *Poitou* en Francia por el cual circula el río *Boivre* y se especifican tres pozos que existen en sus proximidades (P₁, P₂ y P₃) de

los cuales, haciendo su respectivo estudio, se puede saber con mucha proximidad la profundidad necesaria para hallar la tan deseada agua subterránea. Con este ejemplo se puede repetir el procedimiento de cálculo y así lograr predecir profundidades para futuros lugares de captación de agua subterránea.

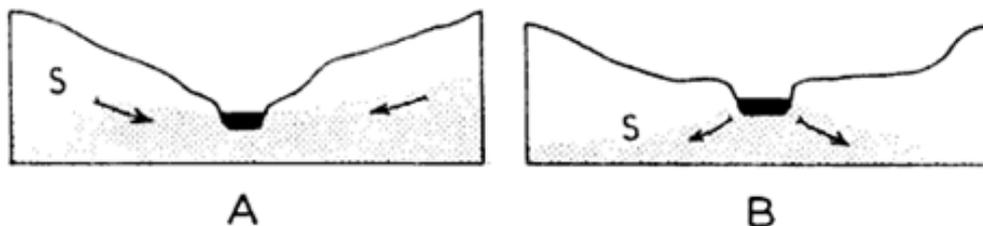
También se mencionará que existe una relación entre la corriente de la superficie y las aguas subterráneas, se realizan sondeos para determinar qué tipo de relación existe entre cada una de las región de estudio.

En estos estudios se ha logrado determinar dos tipos de casos. El caso más común que se presenta es el siguiente, cuando un río al circular sobre una superficie drena las aguas subterráneas. Esto sucede cuando las aguas subterráneas circulan de manera convergente, y la superficie de saturación se eleva logrando que el agua se drene hasta llenar la concavidad del río haciendo que su caudal aumente. Esta característica pertenece a un *río de drenaje* como se le conoce comúnmente, se identifica al realizar captaciones en ambas orillas del río y notar que sus profundidades son menos de lo que se esperaría con respecto al nivel del río.

El otro caso que también se menciona es cuando el río que circula por lo general una región árida, nace en una región de frecuentes lluvias, y empieza a alimentar la región árida llegando a perder agua hasta llegar al mar. Este proceso sucedido en este tipo de región hace posible que las reservas de agua subterránea se alimenten.

Para ilustrar mejor estos dos casos se tiene la Fig. 1.9:

Fig. 1.9. Drenaje (A) o alimentación (B) de una cuenca.



Donde se muestra en la izquierda Fig. 1.9 (A) el primer caso donde circula un río de drenaje, y en la derecha Fig. 1.9 (B) el segundo caso donde circula un río de alimentación.

1.8 Prospección eléctrica de superficie

1.8.1 Principio del método

Durante la circulación de agua subterránea a través de la superficie tanto externa como interna del suelo, ésta llega a tener contacto con gran diversidad de minerales de diferentes tipos, también al quedar depositada en rocas porosas, en fisuras, etc. el agua va adquiriendo las propiedades de un electrolito, claro que de forma variable. Para definir mejor estas propiedades se debe tomar en cuenta la resistividad, la cual para el caso del agua

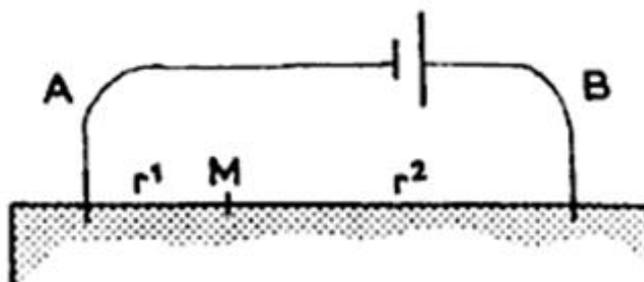
subterránea está en función de la porosidad de la roca, del grado de saturación y de la salinización del agua.

El agua cuando circula y pasa de una zona a otra, por ejemplo de la zona de aireación a la zona de saturación, el agua cambia en su propiedad resistiva, por lo que uno puede llegar a saber la profundidad de la superficie de saturación.

También se conoce que existe una relación inversamente proporcional entre la resistividad y la porosidad de la roca, no tanto en la impermeabilidad puesto que se conoce que existen rocas de gran porosidad y de muy baja resistividad pero también son rocas impermeables, entre estas están ubicadas las arcillas; y también se encuentra un caso contrario, en donde la roca tiene una resistividad muy elevada y sigue siendo una roca muy impermeable, estas pueden ser las conocidas como rocas eruptivas.

Ahora se analiza un caso entre dos puntos ubicados en el suelo, donde se hace circular una corriente y así evaluar de acuerdo a la ley de Ohm, que existe una cierta cantidad de puntos que se encuentran con los mismos valores de potencial, siendo estas superficies equipotenciales. En la Fig. 1.10 se encuentra el siguiente análisis:

Fig. 1.10. Circulación de una corriente eléctrica en el suelo.



Los puntos a considerar en la superficie del suelo son los puntos A y B, los cuales se han conectado para que una corriente eléctrica pueda circular mediante una diferencia de potencial, esto cumpliría la ley de Ohm de la siguiente manera:

$$\Delta V = RI$$

Siguiendo con el análisis, primero se hace en un caso particular el cual sería si el suelo analizado es un suelo homogéneo, para ello, siguiendo con la Fig. 1.10, se nota que se ha incluido un punto M el cual se encuentra entre los bornes A y B a una distancia r_1 del borne A y a una distancia r_2 del borne B, y conociendo que existe una corriente I que circula entre A y B, entrando por A y saliendo por B, entonces se tiene la siguiente expresión para definir el potencial eléctrico en el punto M:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Donde:

ρ : La resistividad del subsuelo.

I : La intensidad de corriente.

Ahora en el caso de tener dos puntos M y N estos serían sus potenciales eléctricos en cada punto:

Para M:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} \right)$$

Para N:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{NA} - \frac{1}{NB} \right)$$

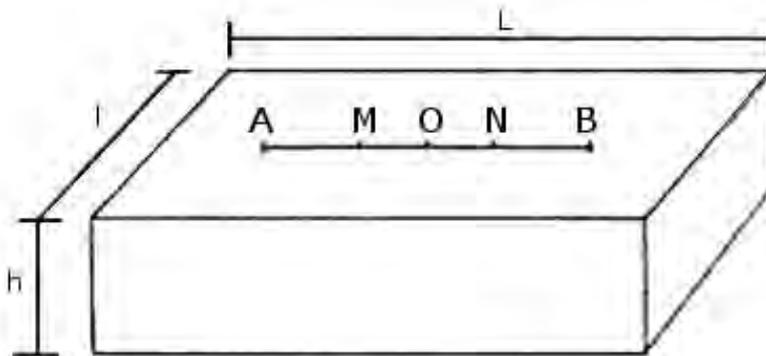
Y si se conecta un galvanómetro entre los puntos M y N, entonces lo que se obtiene estaría de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right)$$

Y en este caso se tendría una resistividad aparente para lo cual también se realiza el análisis con el siguiente caso, donde ahora se aumenta la profundidad de exploración para los electrodos A y B para lograr que el suelo estudiado ahora sea un suelo heterogéneo, donde las características ahora varían, ya que se está trasladando de la zona de aireación a la zona de saturación.

A continuación se representa el siguiente ejemplo con la Fig. 1.11:

Fig. 1.11. Volumen de terreno explorado entre dos electrodos A y B.



$$L = 3 \left(\frac{AB}{2} \right); l = \frac{AB}{2}; h = \frac{AB}{4}$$

Se tienen las dimensiones necesarias para que el suelo estudiado tanto en largo como en ancho y profundidad sea un suelo heterogéneo donde por lo menos hay la seguridad de encontrar dos medios diferentes con distintas características eléctricas.

Entonces se encuentra que en un mismo suelo el cual es formado por dos medios diferentes superpuestos, uno “p” y el otro “q”, con resistividades ρ_p y ρ_q respectivamente, la resistividad aparente estaría definida de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{\rho_p}{\rho_q}$$

1.8.2 Dispositivos de medida

Para lograr medir la diferencia de potenciales entre dos puntos, se han ideado algunos dispositivos que se emplean en la geología para determinar los diferentes medios en los cuales se está trabajando, es muy útil aplicarlos para la captación de aguas subterráneas. Se dispone de colocar dos electrodos cada uno de ellos en cada punto donde se desea medir la diferencia de potencial, y luego se hace uso de los dispositivos, los que se detallan a continuación:

Dispositivo tetrapolar *Wenner*: para este dispositivo es necesario establecer los cuatro puntos mencionados A, M, N y B, equidistantes como esta en la Fig. 1.12:

Fig. 1.12. Dispositivos tetrapolares.



A: dispositivo *Wenner*; B: dispositivo *Schlumberger*.

Donde AM, MN, NB tienen la misma distancia, la que se denominará como “a”, y aplicando la expresión:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{a}$$

Despejando para poder hallar la resistividad:

$$\rho = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) 2\pi a$$

Donde:

ρ : Resistividad (ohm-m).

ΔV : Diferencia de potencial (milivoltios).

I : Intensidad (miliamperios).

Dispositivo tetrapolar *Schlumberger*: Para este dispositivo es necesario que la ubicación de los electrodos A, M, N y B, sean simétrica dos a dos, donde los puntos M y N estén ubicados más cerca uno del otro que de los puntos A y B.

Se llamará a $OA = OB = L$ y $OM = ON = b$:

Aplicando la expresión anterior, y haciendo algunas consideraciones se tiene:

$$\rho = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) 2\pi \left(\frac{L^2 - b^2}{4b} \right) \approx \frac{\Delta V}{I} \pi \frac{L^2}{2b}$$

Este tipo de medida es recomendado sobre todo para sondeos eléctricos, por permitir una mayor presión debido a la pequeña distancia establecida entre M y N.

1.9 Obras de Captación

1.9.1 Pozos

Los pozos son obras tradicionales que por lo general tienen una profundidad de 10 a 12 metros, esto independientemente del procedimiento de perforación. También se caracterizan por poseer un diámetro mayor a un metro.

1.9.2 Sondeos

Los sondeos son obras de captación tubular, esta se caracteriza por poseer diámetro pequeño comparado con los pozos, y puede alcanzar grandes profundidades hasta incluso los 1000 m, también es necesario la utilización de todo un equipo para la extracción como por ejemplo de gran cantidad de varillas y una motobomba.

- **Técnicas de sondeo**

Las técnicas de sondeos tienen por objeto reconocer las diferentes propiedades que presenta el terreno en las capas a medida que la profundidad aumenta. Durante este proceso se realiza la extracción de rocas del suelo a las cuales se les denomina testigos, los cuales sirven para su posterior estudio, a fin de conocer características como el coeficiente de permeabilidad (el ensayo realizado es conocido con “Lefranc” para suelos y “Lugeon” para rocas), o saber las características mecánicas (el ensayo realizado es conocido como ensayo “in situ”), por lo general para la extracción de testigos el diámetros empleado es pequeño.

Los equipos de perforación se los diferencia por el dispositivo tractor en la cual estén trabajando, pueden ser: un camión, una máquina sobre orugas o también puede ser una máquina apeada la cual es la que no posee tractor.

- **Sondeos a percusión**

Esta técnica de sondeo a percusión, se realiza en suelos de propiedades granulares, y también en suelos de propiedades cohesivas. La perforación realizada puede llegar a tener una profundidad de 30 y 40 m, sin embargo lo más comúnmente realizado es entre 15 a 20 m. Este método se efectúa por medio de constantes golpes de una maza, a una cantidad de fuerza y altura definidas, la cantidad de golpes realizados son contabilizados cada cierto tramo corte por ejemplo de 20 cm, y se hace para conocer qué tan compacto es el suelo.

Este tipo de sondeo es empleado en suelos no coherentes, entre los cuales se pueden encontrar a los limos, arenas, gravas, bolos y mezclas de los mismos, se utiliza un tomamuestras con el cual se puede obtener un testigo continuo para su posterior análisis. A pesar de ser una técnica de sondeo, por lo general no es tan recomendable ya que es una perforación lenta, además que el costo requerido es elevado.

- **Sondeos a rotación**

Esta técnica de sondeo a rotación tiene la característica de poder perforar a cualquier tipo de suelo o roca, logrando tener hasta grandes profundidades, e incluso se puede realizar a diferentes tipos de inclinaciones. También es importante mencionar que la extracción de testigos en este caso es continua. Algunos materiales pueden quizá ser un poco dificultosos para el sondeo a rotación, entre estos pueden ser: las gravas y las arenas finas que se encuentran bajo la superficie de saturación. Para un sondeo a rotación se necesita un equipo que contenga: cabeza, tubo portatestigos, extractor, manguito portaextractor y la corona de corte.

Esta perforación a rotación, también necesita hacer junto con un lodo de perforación, puede ser agua, bentonita en lodo, o también puede ser en seco. La circulación de este lodo se lleva a cabo en forma descendente, por medio de una cavidad que se encuentra en la varilla de perforación.

El funcionamiento de este equipo dependerá mucho de las condiciones del terreno en el que se encuentre operando, ya que el tipo de suelo puede variar, por lo que la velocidad de rotación, la presión necesaria, y otras maniobras también necesitaran de ajustes continuos a medida que se lleve a cabo la perforación.

- **Sondeos a rotopercusión**

Esta técnica de sondeo a rotopercusión es por lo general empleada para terrenos de características muy duras, además que se puede alcanzar grandes velocidades de avance (en condiciones ideales se puede alcanzar hasta 50 m/h), por medio de la sarta de perforación la cual está constituida por las varillas y el martillo de fondo, con lo cual se combina rotación y percusión dando a sí una gran ventaja para llegar a una profundidad de 400 m hasta 1000 m. A diferencia del sondeo a rotación que existe un lodo de perforación, en esta técnica también se puede hacer circular aire el cual desciende por el interior de la varilla y posteriormente asciende arrastrando así el detritus de perforación.

Capítulo 2

Generalidades de los equipos de perforación

2.1 Clasificación de las perforadoras

Existen gran cantidad de tipos de perforadoras, las cuales dependen de muchos factores y características que hacen que se diferencien unas de otras, por ejemplo, de su tipo de impulsión, el tipo de servicio que prestan, el movimiento que emplean, y la dirección de perforación, se tienen los siguientes conceptos de ellas:

2.1.1 Según el agente de impulsión

2.1.1.1 Perforadora manual

La perforación manual es parte de la perforación artesanal, se logra por medio de un barreno o también conocido como barreno chupado, el cual es sostenido por el ayudante, mientras que el operario lo golpea con una comba, para que luego el ayudante lo haga girar un cierto ángulo, y todo el ciclo entre el ayudante y el operario se repiten nuevamente. Este tipo de perforación también lo puede hacer una sola persona.

2.1.1.2 Perforadora neumática

Este tipo de perforadora utiliza aire comprimido como fluido que proporciona energía, el cual se manipula variando las presiones, esto se logra por medio de un equipo compresor con el cual se aumenta o disminuye la presión en las líneas, para lograr los movimientos que se necesitan para la perforación.

Se utilizan barrenos con punta bisel o cincel, los cuales se encargan de triturar las rocas al interior de la cavidad de perforación, esto mediante los golpes producidos y el giro presente, es así como se desarrolla la perforación neumática.

También es importante mencionar que el desplazamiento del material roto, se logra por medio del aire comprimido que por tener alta presión logra limpiar el área de trabajo.

2.1.1.3 Perforadora hidráulica

Este tipo de perforadora, tiene mucha similitud con la perforadora neumática, ya que posee el mismo principio de funcionamiento y también trabaja con un fluido, especificando que este fluido ya no es aire comprimido sino aceite, por lo que se emplea un motor que en conjunto con un grupo de bombas se encarga del funcionamiento de la perforadora, haciendo variar la presión, aumentándola o disminuyéndola, dependiendo de la utilidad.

Inicialmente las perforadoras hidráulicas fueron empleadas para trabajos subterráneos, pero poco a poco también han sido aplicadas a la superficie por lo que han jugado un papel muy importante junto con las perforadoras neumáticas.

2.1.1.4 Perforadora eléctrica

Este tipo de perforación como el mismo nombre lo indica es de accionamiento eléctrico, por lo que se requiere que exista un generador que alimente el equipo. En este tipo de perforación se utiliza un barreno helicoidal con el cual se puede lograr tener capacidad de perforar rocas. Un inconveniente para la utilización de este tipo de perforadora es lograr sostenerlo para mantenerlo fijamente en la posición de perforación.

2.1.1.5 Perforadora mecánica

Este tipo de perforación tiene por característica ser impulsado por el poder de motores diesel, lo cual le da la capacidad suficiente para realizar los trabajos requeridos. Es también importante mencionar que entre sus partes comunes se encuentran: el cabestrante, la mesa giratoria, la bomba de lodos, etc. todas ellas funcionan simultáneamente.

2.1.2 Según el tipo de servicio

2.1.2.1 Perforadoras para minería

El tipo de perforación que presta servicio en la minería, es uno de los tipos que tienen gran demanda hoy en día ya que los trabajos mineros se han desarrollado grandemente, a lo largo de todo el mundo, y en especial en el Perú, ya que es una de las principales actividades económicas.

Las perforadoras para minería puede realizarse manualmente en los casos donde el terreno de trabajo imposibilita que los equipos de gran volumen no pueden realizar su trabajo, sin embargo el avance es menor ya que estos equipos manuales son pequeños y tiene capacidad de manejo de una persona.

Las perforadoras para minería por lo general son de gran volumen montadas sobre estructuras metálicas dándole mayor comodidad de manejo al operador, estos tienen la capacidad de perforar grandes espacios de terreno, teniendo un gran avance diario. Para darle facilidad de trabajo también se hace uso de explosivos, y así lograr que la roca sea penetrada, y evitar el desgaste de los barrenos empleados. Con este tipo de perforación se

logran realizar túneles, galerías, chimeneas, etc. cuando es necesario para que el proceso de extracción se lleve a cabo.

2.1.2.2 Perforadoras para exploración y extracción de petróleo

La extracción de petróleo ha sido una actividad que se lleva a cabo ya hace varios años, debido a la gran demanda existente en el medio de este combustible fósil al cual se somete casi toda la población mundial, por lo que ha sido necesario que se vaya desarrollando con el transcurrir de los años hasta nuestra actualidad.

Los equipos de exploración de petróleo son de menor tamaño en comparación con los equipos de extracción, ya que son usados para la localización del petróleo y el estudio del suelo con ese mismo fin. Una vez localizado el yacimiento petrolífero los equipos de mayor tamaño entran en operación para la posterior extracción.

Los equipos de perforación para la extracción de petróleo por lo general son de gran tamaño, montados sobre plataformas que dan gran seguridad a la estructura de la perforadora, y así se realiza el proceso de extracción de petróleo. Estas plataformas se pueden instalar en el suelo como también se han desarrollado para instalar en el lecho marino donde ya es necesario un desarrollo aun mayor de la producción por las dificultades que se pueden presentar debido al agua de mar y las corrientes existentes.

2.1.2.3 Perforadoras para exploración y extracción de agua

El uso de agua es algo que acompaña netamente a la existencia de todo ser viviente, y esta necesidad ha sido de gran preocupación para los seres humanos, que con sus deseos de exploración de nuevos territorios en los cuales se carecía de esta sustancia vital para la vida, ha lleva a desarrollarse la capacidad de extraerla desde el subsuelo, haciéndolo de manera tradicional. Los conocidos pozos de agua son el producto de este dilema, han servido de gran fuente de vida de muchas civilizaciones antiguas, incluso existen en la actualidad muchos de ellos, algunos en actividad y otros ya dejaron de poseer ese líquido. En la actualidad se ha desarrollado aún más esta actividad, logrando así tener extracciones desde profundidades mayores a 1000 m.

El equipo empleado para la exploración y extracción, consta desde perforadoras pequeñas hasta perforadoras de gran tamaño montadas sobre camiones, orugas o plataformas fijas, todas estas con el fin de realizar una exploración basada en los estudios hechos en cuanto al subsuelo para lograr determinar la existencia de yacimientos de agua, la profundidad a la cual se encuentran y la cantidad de extracción que se podrá lograr. Posterior a este proceso se lleva a cabo la perforación del pozo para la captación del agua.

2.1.3 Según el principio de movimiento

2.1.3.1 Martillo o percusión

Este tipo de perforación es uno de los métodos más antiguos de perforación ya que se remonta incluso hasta los 4000 a. C. y ha ido evolucionando hasta la actualidad con la incorporación de nuevas tecnologías y materiales modernos. Es uno de los métodos más

utilizados para la explotación, investigación y captación de yacimientos de agua, esto por presentar ventajas que los equipos modernos aún no han podido igualar.

El funcionamiento de este tipo de perforación consiste en un constante movimiento alternativo de bajada y subida de parte de una masa pesada que cada vez que cae va golpeando la roca de tal manera que logra desintegrarla en tamaños variados, y son extraídos posteriormente por medio de alguna válvula o cuchara.

2.1.3.2 Rotación

Este tipo de perforación se realiza de dos maneras, y eso depende si la perforación se da por trituración o por corte, en el caso que se dé por trituración se empleará un tricono, y esto depende de las características del terreno, principalmente de la dureza, debe ser una dureza media a alta, y el otro caso de perforación hace uso de brocas especiales, donde la dureza del terreno se da cuando hay presencia de rocas blandas.

Hay gran ventaja en la utilización de este método ya que comprende una gran gama de desarrollo de terrenos, desde las más blandas hasta las más duras; inicialmente este método fue empleado solo para rocas blandas, lo que su posterior estudio determinó que también se podía emplear en rocas duras.

2.1.3.3 Rotación – percusión

Este método es uno de los más empleados y al igual que la perforación por rotación también posee una gran gama de utilización en las variedades de rocas, este método emplea un martillo que se sitúa tanto en la cabeza como en el fondo del barreno.

Las perforadoras roto-percutivas se clasifican de dos maneras, o en dos grandes grupos los cuales se determinan por medio de la posición en la cual se encuentre el martillo, y según esta clasificación se tiene:

- Si el martillo se ubica en el fondo, entonces las funciones rotativas y percutivas se producirán fuera del barreno, y son transmitidas por medio de barras hasta lograr la perforación, en este caso los martillos pueden ser en base a un funcionamiento hidráulico o neumático.
- El otro caso es cuando la ubicación del martillo se da en la cabeza, dando así la posibilidad de que la percusión se dé directamente sobre la roca y la rotación en el exterior al barreno. En este caso el movimiento del pistón se realiza por medios neumáticos, y lo que es la rotación puede llegar a darse por medios tanto neumáticos como también hidráulicos.

2.1.4 Según la dirección de perforación

2.1.4.1 Perforación en posición indistinta o *Drifter*

Este tipo de perforación en posición indistinta o también conocido como *drifter*, tiene como característica principal la capacidad de adoptar cualquier tipo de posición para su posterior trabajo de explotación.

2.1.4.2 Perforación vertical hacia abajo o *Jack Hammer*

Este tipo de perforación vertical hacia abajo o también conocida como *Jack Hammer* es utilizada para lograr perforaciones principalmente verticales sin embargo también puede existir una inclinación y de igual manera la perforación sería hacia abajo. El avance de este tipo de perforación se da por medio del peso propio de la misma perforadora.

Fig. 2.1. Perforación vertical hacia abajo o *Jack Hammer*.



2.1.4.3 Perforación vertical hacia arriba o *Stoper*

Este tipo de perforación vertical hacia arriba o también conocida como *Stoper*, tiene como principal función el proveer de chimeneas y tejado durante las labores de explotación. Se logra adosando la perforadora a la barra de avance logrando así una unidad compacta y firme para lograr el trabajo requerido.

2.1.4.4 Perforación horizontal o *Jack Leg*

Este tipo de perforación horizontal o también conocida como *Jack Leg*, se logra por medio de una barra de avance que sostiene la perforadora la cual proporciona gran comodidad para la operación, también mediante el uso de esta barra de avance se realizan los huecos o

cavidades de perforación de manera horizontal principalmente, sin embargo también se puede utilizar de manera inclinada. El empleo de este tipo de perforación es por lo general para la construcción de galerías, subniveles, rampas, etc.

Fig. 2.2. Perforación horizontal o Jack Leg.



2.2 Partes principales de la máquina perforadora

En el punto anterior, se dio a conocer que existen diferentes configuraciones de perforadoras, para distintos usos y técnicas de perforación. Ahora se realizará una descripción de las partes que comprende una perforadora hidráulica para pozos de agua.

2.2.1 Unidad de potencia

La unidad de potencia es necesaria para generar el movimiento de los diferentes componentes hidráulicos utilizados en la perforación de pozos. Según la fuente de energía, pueden estar compuestas de un motor eléctrico o un motor de combustión que va a transmitir energía mecánica mediante un eje a la bomba hidráulica principal y a la bomba de lodos.

2.2.2 Bastidor o torre de perforación

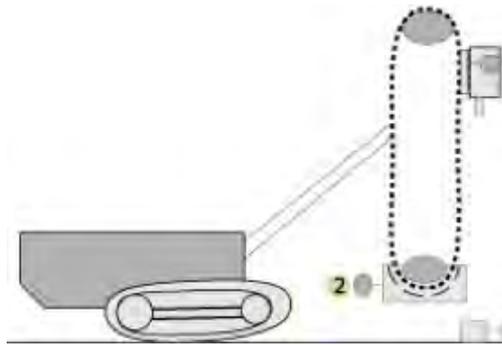
Está compuesto por una viga de perfil “I” o “Rectangular” que tiene la función de encarrilar el collarín deslizante que soporta el cabezal de rotación cuando realiza un movimiento descendente o ascendente. También se utiliza para soportar el sistema de deslizadores de la perforadora.

2.2.3 Sistema de deslizadores o empuje (*pull down*)

Es utilizado para generar un avance mecanizado de las tuberías de perforación. Trabaja en ambas direcciones (ascendente y descendente), según se requiera.

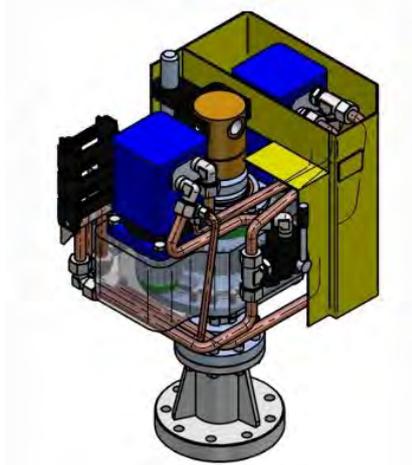
Este sistema está conformado por una cadena que se desplaza por dos piñones y es arrastrada por un motor hidráulico, a través de un reductor y piñón de ataque. La cadena actúa sobre la parte inferior del collarín que soporta el cabezal de rotación que se desplaza sobre el bastidor.

Este sistema es muy utilizado por su bajo costo y facilidad de reparación, además que tiene posibilidad de lograr grandes longitudes de perforación.

Fig. 2.3. Sistema deslizante por cadena.

2.2.4 Sistema de rotación

El sistema de rotación está compuesto por un motor hidráulico y un cabezal de rotación que genera el movimiento circular en la tubería de perforación. El giro del cabezal puede ser horario o antihorario.

Fig. 2.4. Sistema de rotación.

2.2.5 Tubería de perforación

Es uno de los componentes más importantes del equipo de perforación. Pues se trata de una estructura que transmite el movimiento circular generado por la perforadora hacia la broca. Está compuesta de los siguientes elementos: adaptor de culata, y barras de extensión.

2.2.5.1 Barras de extensión

Consiste en una serie de barras de acero tubulares interconectadas entre sí mediante uniones roscadas. Este conjunto, además de transmitir sentido de rotación a la broca, ubicada en el extremo inferior de la columna, permite además la circulación de los fluidos de perforación o lodo.

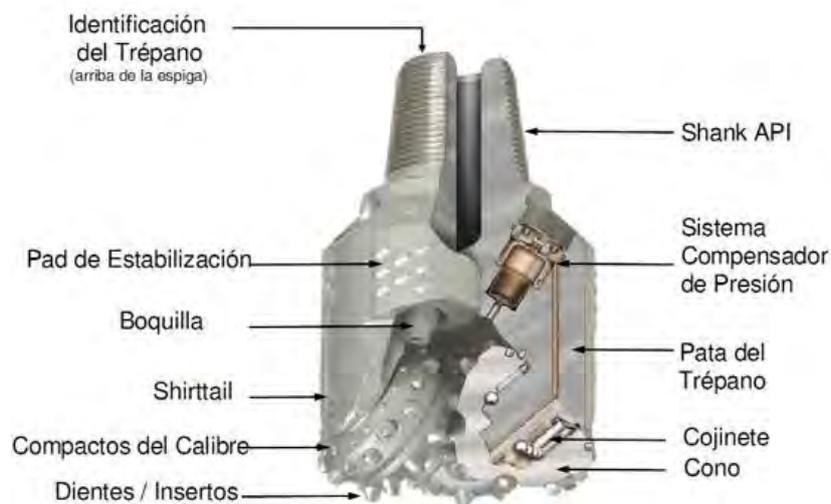
2.2.6 Broca o Trépano

La broca o trépano es una herramienta de corte que permite perforar. Su diseño es

continuamente modificado a fin de obtener la geometría y el material adecuados para vencer a las distintas y complejas formaciones del terreno (arenas, arcillas, yesos, calizas, basaltos),

Existen trépanos de 1, 2 y hasta 3 conos montados sobre rodillos o bujes de compuestos especiales; estos conos, ubicados originariamente de manera concéntrica, son fabricados en aceros de alta dureza, con dientes tallados en su superficie o con insertos de carburo de tungsteno u otras aleaciones duras: su geometría responde a la naturaleza del terreno a atravesar.

Fig. 2.5. Estructura de un trepano tricono.



2.2.7 Bomba de Lodos

La bomba de lodos tiene la función de realizar la recirculación del lodo o fluido de perforación, que es una suspensión de arcilla en agua, con los aditivos necesarios para cumplir las siguientes funciones:

- Extraer el detritus o ripio de la perforación.
- Refrigerar la herramienta de corte.
- Sustener las paredes de la perforación.
- Estabilizar la columna o sarta de perforación.
- Lubricar el rozamiento de ésta con el terreno.

Se distinguen diversos tipos de lodos en función de su composición. Por una parte están los denominados "naturales", constituidos por agua clara (dulce o salada) a la que se incorpora parte de la fracción limoso-arcillosa de las formaciones rocosas conforme se atraviesan durante la perforación. Se utilizan especialmente en el sistema de circulación inversa (en la circulación directa se requieren lodos de mayor densidad y viscosidad).

Capítulo 3

Diseño de perforadora hidráulica

3.1 Generalidades del diseño

Para poder realizar un diseño eficiente de la máquina perforadora, es necesario conocer los parámetros o variables de operación del equipo. Las variables de operación inherentes al sistema, que inciden en su eficiencia (velocidad de penetración), son las que se identifican a continuación:

- Velocidad de rotación (rpm).
- Fuerza de empuje.
- Diámetro de perforación.
- Velocidad y caudal del aire de barrido.
- Desgaste de los trépanos.

A su vez, estas variables dependen de un factor externo al sistema: la dureza o resistencia de la roca.

3.1.1 Dureza de la roca

No existe una clasificación universalmente aceptada de las rocas en función de su resistencia a la compresión (Sc). En la literatura técnica sobre el tema se encuentran diversas proposiciones. Algunas muy simples, que sólo diferencian entre rocas blandas, medianas y duras. Otras más sofisticadas, incluyen hasta seis o siete categorías. Haciendo una síntesis, para los efectos del análisis que sigue, se adoptará la clasificación que se enuncia en el cuadro siguiente.

Tabla 3.1. Clasificación de la dureza de las rocas.

TIPO DE ROCA	Sc [kg/cm ²]	Sc [MPa]
Muy blandas	< 400	< 40
Blandas	400 – 800	40 – 80
Medianas	800 – 1.200	80 – 120
Duras	1.200 – 2.000	120 – 200
Muy duras	> 2.000	> 200

Para el análisis se supondrá la perforación sobre una roca del tipo muy blanda, con una resistencia a la compresión (Sc) igual a 18 MPa.

3.1.2 Velocidad de Rotación

La velocidad de rotación (N), expresada en [rpm], es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión de la roca (Sc).

Tabla 3.2. Velocidades de rotación según la dureza de las rocas.

TIPO DE ROCA	Sc [kg/cm ²]	N [rpm]
Muy blandas	< 400	120 – 100
Blandas	400 – 800	100 – 80
Medianas	800 – 1.200	80 – 60
Duras	1.200 – 2.000	60 – 40
Muy duras	> 2.000	40 – 30

Para una roca muy blanda, según la tabla anterior, se trabajará con una velocidad de rotación igual a 100 rpm.

3.1.3 Fuerza de Empuje Sobre la Roca

La fuerza de empuje necesaria (F), aumenta directamente con la dureza de la roca, y debe alcanzar una magnitud suficiente para sobrepasar su resistencia a la compresión. Por otra parte, esta fuerza no puede exceder un determinado valor límite, para evitar daños prematuros en la herramienta de perforación.

En formaciones rocosas duras o muy duras, una fuerza excesiva conduce a la destrucción de los insertos de la corona, lo que significa el término de la vida útil del instrumento.

A su vez, la mayor o menor resistencia de los insertos en la corona depende del tamaño de la herramienta o, por consiguiente, del diámetro de perforación. A mayor diámetro, más grande es la corona de perforación y por consiguiente más robustos y resistentes son sus insertos. En compendio de lo mencionado, la fuerza de empuje es función de dos variables: la dureza de la roca y el diámetro de perforación. Según la dureza de la roca, la fuerza de empuje mínima necesaria para vencer su resistencia a la compresión, está dada por la ecuación (3.1):

$$F_{\min} = 28.5 * Sc * \varphi \text{ [lb]} \quad (3.1)$$

Donde:

Sc : Es la resistencia de la compresión de la roca [MPa].

φ : Es el diámetro de perforación [pulg].

La fuerza de empuje se acostumbra a expresarla en libras-peso [lb] por unidad de diámetro de la herramienta, expresado en pulgadas.

En la Tabla 3.3 se comparan los valores mínimos que resultan de aplicar la ecuación anterior con los valores observados en la práctica minera según la dureza de la roca.

Tabla 3.3. Fuerza de empuje según tipo de roca.

TIPO DE ROCA	Sc [kg/cm ²]	F_{\min} [lb/pulg]	$F_{\text{práctica}}$ [lb/pulg]
Muy blandas	< 400	< 1.150	< 1.500
Blandas	400 – 800	1.150 – 2.300	1.500 – 3.000
Medianas	800 – 1.200	2.300 – 3.400	3.000 – 5.000
Duras	1.200 – 2.000	3.400 – 5.700	5.000 – 7.000
Muy duras	> 2.000	> 5.700	7.000 – 9.000

- Cálculo de la fuerza de empuje mínima (F_{\min}):

$$F_{\min} = 28.5 * Sc * \varnothing_{\text{barrena}}$$

$$F_{\min} = 28.5 * 18 \text{ MPa} * 6 \text{ pulg}$$

$$F_{\min} = 3078 \text{ lb}$$

$$F_{\min} = 13.69 \text{ kN}$$

Donde:

F_{\min} : Fuerza de empuje mínima.

Sc : Resistencia a la Compresión (MPa).

$\varnothing_{\text{barrena}}$: Diámetro de la barrena (pulg).

- Cálculo de la fuerza de empuje máxima (F_{\max}):

$$F_{\max} = 2 * F_{\min}$$

$$F_{\max} = 6156 \text{ lb}$$

$$F_{\max} = 27.38 \text{ kN}$$

- Cálculo de la fuerza de empuje limite (F_{\lim}):

$$F_{\lim} = 810 * \varnothing_{\text{barrena}}^2$$

$$F_{\lim} = 29160 \text{ lb}$$

$$F_{\lim} = 129.73 \text{ kN}$$

Para fines de cálculo de esfuerzos en la tubería, se tomará un valor de fuerza de empuje igual a 18 kN.

3.1.4 Diámetro de perforación

El diámetro de perforación elegido es de 150 mm por ser el diámetro de pozo más común en la región. (Memoria hidrológica de la Región Piura).

Las brocas comerciales se dimensionan en pulgadas, por lo tanto la broca equivalente que se utilizará para la perforación del pozo tendrá un diámetro exterior de 6 pulg.

3.1.5 Velocidad y caudal del fluido de barrido de partículas

El agua que se inyecta por el interior de la columna de barras hacia el fondo del barreno, cumple los siguientes objetivos:

- Refrigeración y lubricación de la herramienta de perforación.
- Remoción o barrido del detritus desde el fondo del tiro.
- Extracción del detritus hacia fuera.

El barrido y extracción del detritus de perforación se realiza a expensas de la energía cinética del fluido que circula por el espacio anular comprendido entre las barras y las paredes del pozo. Por lo tanto, la eficiencia del proceso depende, en lo esencial, de la velocidad del agua (V) en este espacio anular y del caudal (Q) que circula por el sistema.

Por otra parte, la refrigeración de la corona se obtiene por efecto de la expansión o caída de presión que se produce durante el paso del fluido por la herramienta de perforación, que a su vez depende de la presión con que llega el agua hacia la corona del taladro.

3.1.6 Velocidad del fluido

La velocidad ascensional mínima para la extracción del detritus es función de la densidad de la roca y del tamaño promedio de las partículas.

A continuación se exponen las ecuaciones que permiten estimar esta velocidad.

$$V = 573 \left(\frac{\delta r}{\delta r + 1} \right) d^{0.6}$$

Donde:

V : Es la velocidad ascensional mínima [m/min].

δr : Es la densidad de la roca [gr/cm³].

d : Es el diámetro promedio de las partículas [mm].

En etapa de proyecto, las fórmulas anteriores tienen limitadas posibilidades de aplicación, dadas las dificultades para obtener datos confiables acerca del tamaño promedio del detritus de perforación. No obstante, según la práctica minera, las velocidades de fluido atendiendo al tipo de roca, son las que se indican en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Velocidad ascensional del fluido según el tipo de roca.

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD MÍNIMA		VELOCIDAD MÁXIMA	
	[m/min]	[m/min]	[m/min]	[m/min]
Blandas	1.200	4.000	1.800	6.000
Medianas	1.500	5.000	2.100	7.000
Duras	1.800	6.000	2.400	8.000

La velocidad ascensional máxima indicada obedece al problema de desgaste de las barras o tubos de perforación. El flujo de agua que circula por el espacio anular lleva en suspensión un material que puede ser altamente abrasivo, especialmente si hay presencia de cuarzo u otros minerales de gran dureza, como ocurre frecuentemente en la minería metálica. Es sabido que en los fenómenos de flujo de material articulado, el desgaste por roce es proporcional al de la velocidad de dicho material.

3.1.7 Caudal del fluido

El caudal de agua de barrido de partículas (Q) se calcula a partir de la fórmula básica que lo relaciona con la sección del ducto de circulación y con la velocidad de flujo.

$$Q = \left[\frac{\pi(\varphi^2 - D^2)}{4 * 10^6} \right] V \quad [\text{m}^3/\text{min}] \quad (3.2)$$

$$Q = \left[\frac{\pi(\varphi^2 - D^2)}{4 * 144} \right] V \quad [\text{pies}^3/\text{min}] \quad (3.3)$$

$$Q = \text{Área de la sección transversal} * \text{Velocidad de flujo}$$

En el caso que aquí se analiza, se obtiene las ecuaciones (3.2) y (3.3) según las unidades utilizadas:

Donde:

Q : Es caudal del líquido [m^3/min] o [pies^3/min].

φ : Es el diámetro de la herramienta [mm] o [pulg].

D : Es el diámetro exterior de las barras [mm] o [pulg].

V : Es la velocidad del fluido [m/min] o [pies/min].

Otro factor a considerar en relación con este tema, es el área de la sección anular por donde circula el líquido o, planteado de manera más práctica, se trata de la diferencia entre el diámetro de perforación y el diámetro exterior de las barras o varillas. Dado que a medida que aumenta la resistencia de la roca el tamaño del detritus es más pequeño, la práctica operacional aconseja adoptar los valores dados en la siguiente tabla.

Tabla 3.5. Área de sección anular para la circulación del fluido

TIPO DE ROCA	[$\phi - D$]	
	[pulg]	[mm]
Blandas	3	76
Medianas	2	51
Duras	1 1/2	38

3.2 Diseño del bastidor de perforación

Para diseñar el bastidor de la perforadora, se escoge una viga comercial que tenga la capacidad de soportar la fuerza de empuje que va a aplicar la cadena de arrastre, la fuerza de reacción que va a aplicar la tubería sobre el cabezal hidráulico al momento de la perforación y el peso de los elementos que están unidos a esta (motor de giro, motor de arrastre, estructura de soporte, catalinas, cadena, etc.)

3.2.1 Características

La columna que se ha seleccionado para utilizarla como guía del bastidor, es de un perfil comercial de 6 x 3 x 3/16 pulgadas y tomada de la norma del instituto americano de construcción en acero (*American Institute of Steel Construction*).

Cuyas características se detallan a continuación:

- Esfuerzo de tensión para evitar la fluencia: $\sigma_y = 46 \text{ Ksi} = 315 \text{ MPa}$
- Área del perfil rectangular: $A_p = 3.14 \text{ pulg}^2 = 2.026 * 10^{-3} \text{ m}^2$
- Momento de inercia respecto al eje "x": $I_x = 14.3 \text{ pulg}^4 = 5.95 * 10^{-6} \text{ m}^4$

Para analizar las especificaciones LRFD, se tomara en cuenta que el siguiente calculo estima el valor del esfuerzo debido a las cargas sometidas producto de la perforación y del peso mismo de la estructura (D), sin embargo los otros parámetros mencionados en las especificaciones LRFD, tendrán el siguiente valor:

- $L = 0$, producido por la carga viva.
- $S = 0$, producido por la nieve.
- $L_r = 0$, producido por la carga viva del techo.
- $R = 0$, producido por la lluvia.
- $E = 0$, producido por los terremotos.
- $W = 0$, producido por el aire.

3.2.2 Análisis de cargas

3.2.2.1 Análisis de cargas externas aplicadas sobre el sistema

El análisis de fuerzas externas aplicadas en el cabezal de rotación se va a analizar en 2 situaciones distintas.

A. Primera situación de trabajo

Se da cuando el carro deslizante está descendiendo y se tiene una fuerza de compresión aplicada sobre el cabezal de rotación, resultado de la reacción que produce el suelo.

- **Cálculo de la fuerza de compresión:**

La fuerza de compresión será una fuerza de reacción por acción del empuje de la broca sobre el suelo.

$$F'_E = F_{\text{trabajo}} = 18 \text{ kN}$$

Sin embargo para el análisis se debe también considerar que existen diferentes factores que modifican esta fuerza de compresión, como por ejemplo, el tipo de roca, la temperatura, etc., para fines de cálculo se considera un aumento de la tercera parte de la fuerza de empuje, así se tendrá que:

$$F_E = \frac{4}{3} F'_E = 24 \text{ kN}$$

Así también se analizan las condiciones de acuerdo a las especificaciones LRFD mencionadas en el *Manual of Steel Construction* (Anexo A), con lo cual se modifican los esfuerzos aplicados sobre el bastidor originando también un cambio en la fuerza de compresión, este análisis será propuesto más adelante, pero igual se menciona el valor con la cual se trabajará:

$$F_E = 24 \text{ kN}$$

B. Segunda situación de trabajo

Se da cuando el carro deslizante está ascendiendo y se tiene una fuerza de tensión que está dado por el peso de la tubería y la broca de perforación.

- **Cálculo de la fuerza de tensión**

La fuerza de tensión se va a dar cuando el cabezal tiene la tubería y la broca de perforación suspendidas por el efecto del levante de la extracción de las mismas.

Para este caso se debe tomar en cuenta el peso de la tubería de perforación, el peso de la broca, el peso del terreno impregnado en la tubería y el peso del lodo de perforación dentro de la tubería.

- Cálculo del peso del tubo ($W_{\text{tubería}}$):

El peso máximo de la tubería se va a dar cuando la longitud de la misma sea 150 m.

Peso nominal de la tubería: 6.65 kg/m

$$W_{\text{tubería}} = 6.65 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 150 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_{\text{tubería}} = 9.785 \text{ kN}$$

- Cálculo del peso de la broca (W_{broca}):

$$D_o = 0.15 \text{ m}$$

$$D_i = 0.10 \text{ m}$$

$$L = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho_{ac} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{broca}} = \rho_{ac} \left(\frac{\pi D_o^2}{4} - \frac{\pi D_i^2}{4} \right) * L * 9.81$$

$$W_{\text{broca}} = 7850 (0.15^2 - 0.10^2) * \frac{\pi}{4} * 0.2 * 9.81$$

$$W_{\text{broca}} = 151.21 \text{ N}$$

- Cálculo del peso del terreno (W_{terreno}):

$$\rho_{\text{terreno arenoso}} \approx 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{\text{terreno}} = V_{\text{broca}} * L_{\text{terreno}}$$

$$W_{\text{terreno}} = \frac{\pi}{4} * 0.15^2 * 0.2 * 2500 * 9.81$$

$$W_{\text{terreno}} \approx 100 \text{ N}$$

- Cálculo del peso que ejerce el lodo sobre la broca (W_{lodo}):

Considerado un lodo de perforación de densidad: 1.08 gr/cm³ (1080 kg/m³).

$$P_{h, \text{máx}} = \frac{p * h}{10} = \frac{1.08 * 150}{10} = 16.2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$W_{\text{lodo}} = P_{h, \text{máx}} * A_{\text{broca}}$$

$$W_{\text{lodo}} = 16.2 * \frac{\pi}{4} * (15^2 - 6.33^2) * 9.81$$

$$W_{\text{lodo}} \approx 23.1 \text{ kN}$$

- Cálculo de la fuerza de tensión aplicada en el cabezal de rotación:

$$F_{\text{tc}} = W_{\text{tubería}} + W_{\text{broca}} + W_{\text{terreno}} + W_{\text{lodo}}$$

$$F_{\text{tc}} = 9.785 + 0.152 + 0.1 + 23.1$$

$$F_{\text{tc}} = 33.137 \text{ kN}$$

3.2.2.2 Análisis de cargas internas aplicadas al sistema

- Cálculo de la fuerza ejercida por la cadena

$$T_c [\text{N} \cdot \text{m}] = \frac{P [\text{HP}] * 7.121 * 10^3}{n [\text{rpm}]}$$

$$T_c = \frac{D}{2} * F_{\text{cadena}}$$

Igualando:

$$T_c = \frac{P * 7.121 * 10^3 * 2}{n * D} = \frac{D}{2} * F_{\text{cadena}}$$

Despejando F_{cadena} :

$$F_{\text{cadena}} = \frac{P * 7.121 * 10^3 * 2}{n * D}$$

$$V = \frac{\pi D * n}{60} \rightarrow D * n = \frac{60 * V}{\pi}$$

$$D * n = \frac{60 * 0.083}{\pi} = 1.59$$

Utilizando una potencia de 8 HP y reemplazando:

$$F_{\text{cadena}} = \frac{8 * 7.121 * 10^3 * 2}{1.59}$$

$$F_{\text{cadena}} = 71.84 \text{ kN}$$

3.2.3 Análisis de esfuerzos

Para este caso se analiza el carro deslizante y el cabezal de rotación como un “elemento rígido” que está unido a la viga.

De la misma manera que el punto anterior, en el análisis se va a realizar estudio del comportamiento mecánico del sistema cuando el carro deslizante desciende y cuando asciende.

3.2.3.1 Esfuerzos en la viga cuando el carro deslizante está descendiendo

Para realizar un estudio más completo del sistema del comportamiento de la viga del bastidor, se van a calcular los esfuerzos a los que se somete dicha viga cuando el carro deslizante está en la parte superior de la viga, cuando pasa por el centro de gravedad de la viga y cuando está en la parte inferior de la misma.

A. Esfuerzos en la viga cuando el carro deslizante se encuentra en la parte superior

Fig. 3.1. Diagrama de cuerpo libre del bastidor en la posición inicial.

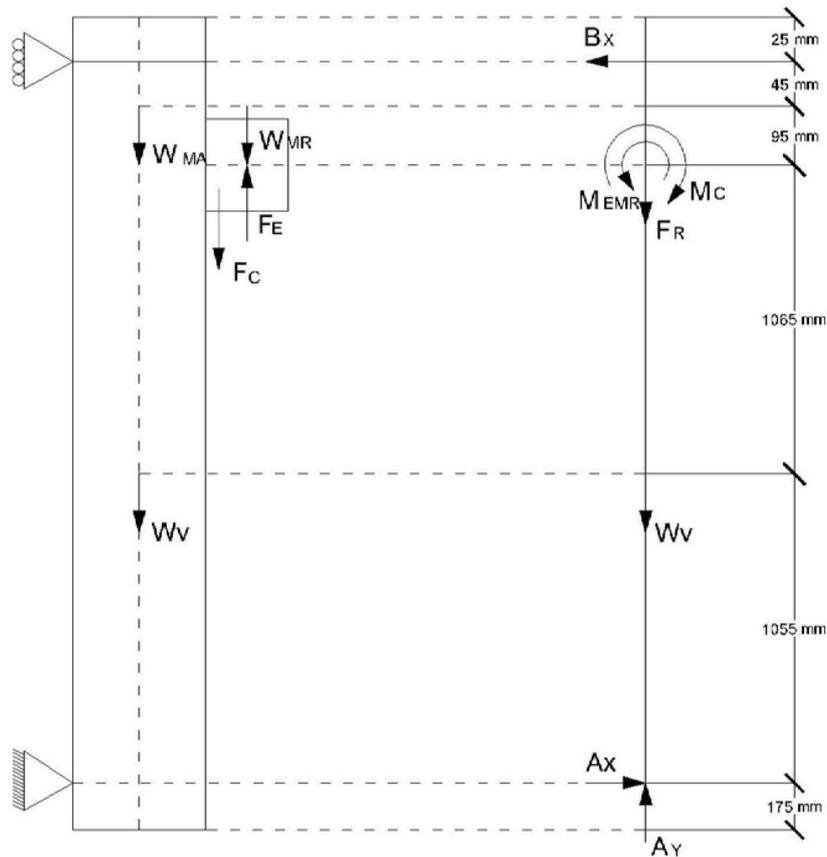
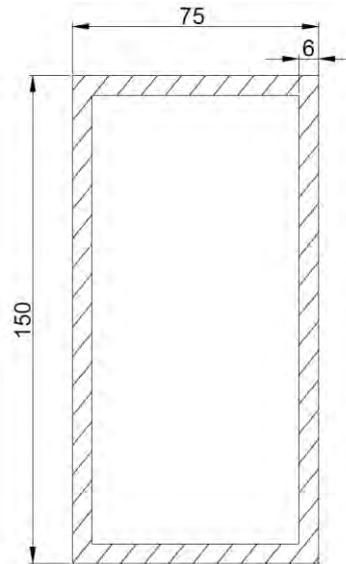


Fig. 3.2. Perfil de la viga del bastidor seleccionada (medidas en mm).



Datos:

$$F_E = 24 \text{ kN}; F_{\text{cadena}} = 71.84 \text{ kN}; M_{\text{EMR}} = 3.20 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$W_{\text{MR}} = 200 \text{ N}; W_{\text{VIGA}} = 430 \text{ N}; W_{\text{MA}} = 150 \text{ N}$$

$$A_p = 2.026 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2; Y_p = 0.0762 \text{ m}$$

$$I_x = 5.95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4; Q = 2.68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Siendo:

F_E : Fuerza de empuje debido a la reacción del suelo.

F_{cadena} : Fuerza de arrastre desarrollada en la cadena.

M_{EMR} : Momento de sumatoria de fuerzas aplicadas en el cabezal de rotación aplicado en el eje de la viga.

W_{MR} : Peso del conjunto de rotación.

W_{MA} : Peso del conjunto de arrastre.

A_p : Área transversal de la viga.

Y_p : Distancia del eje neutro al extremo de la viga respecto al eje "x".

I_x : Momento de Inercia de la viga respecto al eje "x".

Q : Primer momento de área respecto al eje "x".

- **Cálculo de las fuerzas en los soportes de la viga**

$$\sum M_A = 0$$

$$2.26B_x + M_{EMR} = M_C$$

$$B_x = \frac{5.98 \text{ kN} \cdot \text{m} - 3.20 \text{ kN} \cdot \text{m}}{2.26 \text{ m}}$$

$$B_x = 1.23 \text{ kN} (\leftarrow)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y = F_R + W_{\text{VIGA}} + W_{\text{MA}}$$

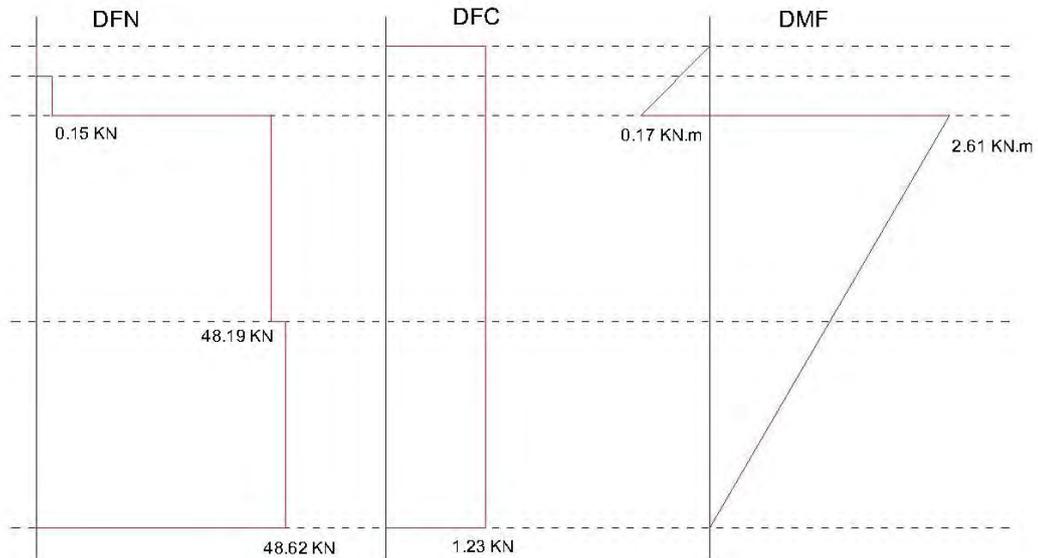
$$A_y = 48040 + 150 + 430$$

$$A_y = 48.62 \text{ kN} (\uparrow)$$

$$\sum F_x = 0$$

$$A_x = 1.23 \text{ kN} (\rightarrow)$$

Fig. 3.3. Diagrama de fuerzas normales, cortantes y momento flector posición 1.



- **Cálculo del esfuerzo normal**

$$\sigma_n = \frac{N}{A_p} = \frac{48.19 \cdot 10^3}{2.026 \cdot 10^{-3}}$$

$$\sigma_n = 23.79 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo cortante**

$$\tau_v = \frac{VQ}{It} = \frac{(1.23 \cdot 10^3) \cdot (2.68 \cdot 10^{-5})}{(5.95 \cdot 10^{-6}) \cdot (4.763 \cdot 10^{-3})}$$

$$\tau_v = 1.17 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo por flexión**

$$\sigma_f = \frac{M_f Y_p}{I_x} = \frac{(2.61 \cdot 10^3)(0.0762)}{5.95 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_f = 33.47 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises**

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_n)^2 + 3\tau_v^2}$$

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(33.47 + 23.79)^2 + 3(1.17)^2}$$

$$\sigma'_{eq} = 57.29 \text{ MPa}$$

- **Haciendo el cálculo según las especificaciones LRFD**

El valor $D = \sigma'_{eq} = 57.29 \text{ MPa}$

$$1.4D = 1.4 \cdot 57.29 = 80.21 \approx 80 \text{ MPa}$$

El valor que se tomará en cuenta es el máximo resultado en valor absoluto, entonces el $\sigma'_{eq} = 80 \text{ MPa}$.

El material del bastidor es acero ASTM A36 y tomando un factor de seguridad $n_d = 3$ para comparar el esfuerzo admisible del material.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{3} = 80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \text{Si cumple para el diseño}$$

B. Esfuerzos en la viga cuando el carro deslizante se encuentra en el centro de gravedad de la viga

Datos:

$$F_E = 24 \text{ kN}; F_{\text{cadena}} = 71.84 \text{ kN}; M_{\text{EMR}} = 3.20 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$W_{\text{MR}} = 200 \text{ N}; W_{\text{VIGA}} = 430 \text{ N}; W_{\text{MA}} = 150 \text{ N}$$

$$M_C = 5.98 \text{ kN}\cdot\text{m}; F_R = 48.04 \text{ kN}$$

$$A_p = 2.026 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2; Y_p = 0.0762 \text{ m}$$

$$I_x = 5.95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4; Q = 2.68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Siendo:

F_E : Fuerza de empuje debido a la reacción del suelo.

F_{cadena} : Fuerza de arrastre desarrollada en la cadena.

M_{EMR} : Momento de sumatoria de fuerzas aplicadas en el cabezal de rotación aplicado en el eje de la viga.

W_{MR} : Peso del conjunto de rotación.

W_{MA} : Peso del conjunto de arrastre.

A_p : Área transversal de la viga.

Y_p : Distancia del eje neutro al extremo de la viga respecto al eje "x".

I_x : Momento de Inercia de la viga respecto al eje "x".

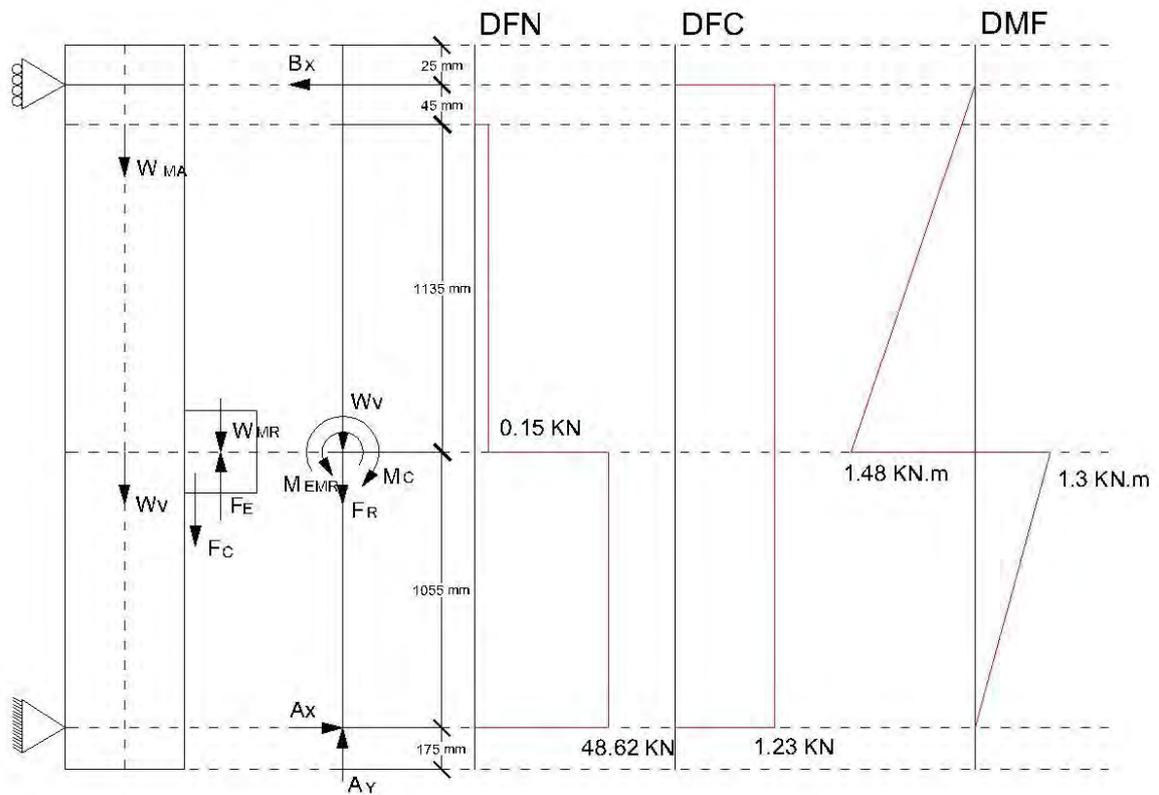
Q : Primer momento de área respecto al eje "x".

$$A_x = 1.23 \text{ kN} (\rightarrow)$$

$$B_x = 1.23 \text{ kN} (\leftarrow)$$

$$A_y = 48.62 \text{ kN} (\uparrow)$$

Fig. 3.4. Diagrama de fuerzas normales, cortantes y momento flector posición 2.



- **Cálculo del esfuerzo normal**

$$\sigma_n = \frac{N}{A_v} = \frac{48.62 \cdot 10^3}{2.026 \cdot 10^{-3}}$$

$$\sigma_n = 23.71 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo cortante**

$$\tau_v = \frac{VQ}{It} = \frac{(1.23 \cdot 10^3) \cdot (2.68 \cdot 10^{-5})}{(5.95 \cdot 10^{-6}) \cdot (4.763 \cdot 10^{-3})}$$

$$\tau_v = 1.17 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo por flexión**

$$\sigma_f = \frac{M_f Y_p}{I_x} = \frac{(1.49 * 10^3)(0.0762)}{5.95 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_f = 19.02 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises**

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_n)^2 + 3\tau_v^2}$$

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(19.02 + 23.71)^2 + 3(1.17)^2}$$

$$\sigma'_{eq} = 42.78 \text{ MPa}$$

- **Haciendo el cálculo según las especificaciones LRFD**

El valor $D = \sigma'_{eq} = 42.78 \text{ MPa}$

$$1.4D = 1.4 * 42.78 = 59.90 \approx 60 \text{ MPa}$$

El valor que se tomará en cuenta es el máximo resultado en valor absoluto, entonces el $\sigma'_{eq} = 60 \text{ MPa}$.

El material del bastidor es acero ASTM A36 y tomando un factor de seguridad $n_d = 3$ para comparar el esfuerzo admisible del material.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{3} = 80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \text{Si cumple para el diseño}$$

C. Esfuerzos en la viga cuando el carro deslizante se encuentra en la parte inferior

Datos:

$$F_E = 24 \text{ kN}; F_{cadena} = 71.84 \text{ kN}; M_{EMR} = 3.20 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_{MR} = 200 \text{ N}; W_{VIGA} = 430 \text{ N}; W_{MA} = 150 \text{ N}$$

$$M_C = 5.98 \text{ kN} \cdot \text{m}; F_R = 48.04 \text{ kN}$$

$$A_p = 2.026 * 10^{-3} \text{ m}^2; Y_p = 0.0762 \text{ m}$$

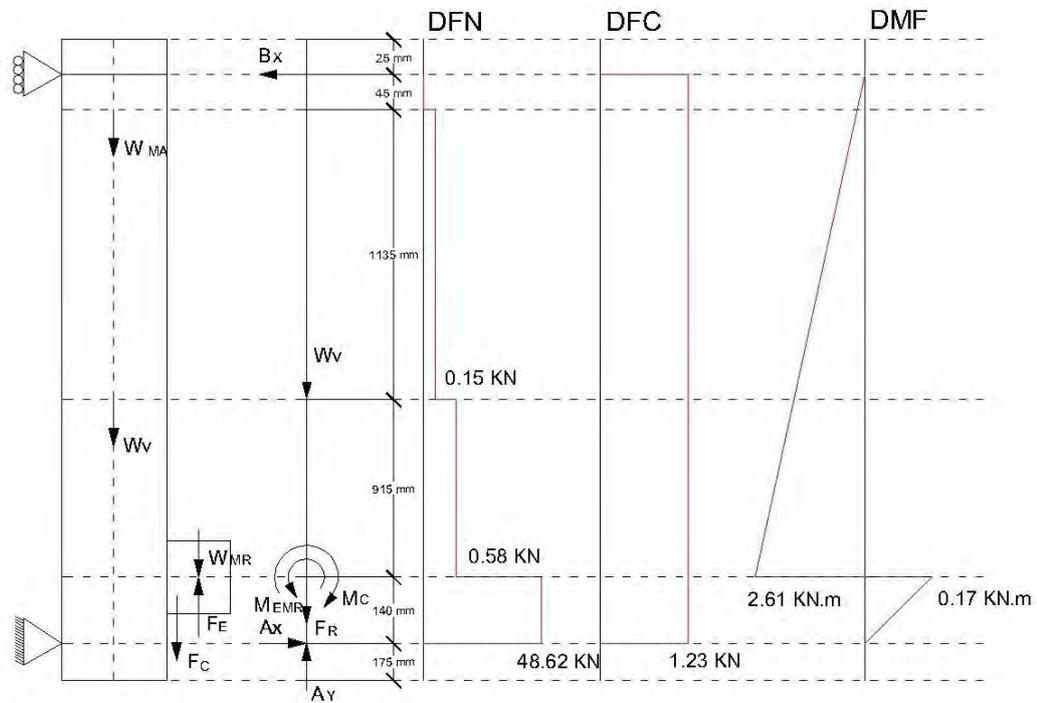
$$I_x = 5.95 * 10^{-6} \text{ m}^4; Q = 2.68 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$A_x = 1.23 \text{ kN} (\rightarrow)$$

$$B_x = 1.23 \text{ kN} (\leftarrow)$$

$$A_y = 48.62 \text{ kN} (\uparrow)$$

Fig. 3.5. Diagrama de fuerzas normales, cortantes y momento flector posición 3.



- **Cálculo del esfuerzo normal**

$$\sigma_n = \frac{N}{A_v} = \frac{48.62 \cdot 10^3}{2.026 \cdot 10^{-3}}$$

$$\sigma_n = 23.71 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo cortante**

$$\tau_v = \frac{VQ}{It} = \frac{(1.23 \cdot 10^3) \cdot (2.68 \cdot 10^{-5})}{(5.95 \cdot 10^{-6}) \cdot (4.763 \cdot 10^{-3})}$$

$$\tau_v = 1.17 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo por flexión**

$$\sigma_f = \frac{M_f Y_p}{I_x} = \frac{(2.61 * 10^3)(0.0762)}{5.95 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_f = 33.47 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises**

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_n)^2 + 3\tau_v^2}$$

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(33.47 + 23.71)^2 + 3(1.17)^2}$$

$$\sigma'_{eq} = 57.22 \text{ MPa}$$

- **Haciendo el cálculo según las especificaciones LRFD**

El valor $D = \sigma'_{eq} = 57.22 \text{ MPa}$

$$1.4D = 1.4 * 57.22 = 80.1 \approx 80 \text{ MPa}$$

El valor que se tomará en cuenta es el máximo resultado en valor absoluto, entonces el $\sigma'_{eq} = 80 \text{ MPa}$.

El material del bastidor es acero ASTM A36 y tomando un factor de seguridad $n_d = 3$ para comparar el esfuerzo admisible del material.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{3} = 80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \text{Si cumple para el diseño}$$

3.2.3.2 Esfuerzos en la viga cuando el carro deslizante está ascendiendo

Datos:

$$F_{tc} = 33.137 \text{ kN}; F_{cadena} = 71.84 \text{ kN}; M_{tcMR} = 4.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$W_{MR} = 200 \text{ N}; W_{VIGA} = 430 \text{ N}; W_{MA} = 150 \text{ N}$$

$$M_C = 5.98 \text{ kN} \cdot \text{m}; F_R = 38.51 \text{ kN}$$

$$A_p = 2.026 * 10^{-3} \text{ m}^2; Y_p = 0.0762 \text{ m}$$

$$I_x = 5.95 * 10^{-6} \text{ m}^4; Q = 2.68 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

Siendo:

F_{tc} : Fuerza debido a la tensión producida por el paso de la columna de perforación.

F_{cadena} : Fuerza de arrastre aplicado por la cadena.

M_{tcMR} : Momento de sumatoria de fuerzas aplicadas en el cabezal de rotación aplicado en el eje de la viga.

W_{MR} : Peso del conjunto de rotación.

W_{MA} : Peso del conjunto de arrastre.

A_p : Área transversal de la viga.

- **Cálculo del esfuerzo normal**

$$\sigma_n = \frac{N}{A_v} = \frac{38.36 * 10^3}{2.026 * 10^{-3}}$$

$$\sigma_n = 18.93 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo cortante**

$$\tau_v = \frac{VQ}{It} = \frac{(0.67 * 10^3) * (2.68 * 10^{-5})}{(5.95 * 10^{-6}) * (4.763 * 10^{-3})}$$

$$\tau_v = 0.63 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo por flexión**

$$\sigma_f = \frac{M_f Y_p}{I_x} = \frac{(1.41 * 10^3)(0.075)}{5.74 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_f = 18.09 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises**

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_n)^2 + 3\tau_v^2}$$

$$\sigma'_{eq} = \sqrt{(18.09 + 18.93)^2 + 3(0.63)^2}$$

$$\sigma'_{eq} = 32.86 \text{ MPa}$$

- **Haciendo el cálculo según las especificaciones LRFD**

El valor $D = \sigma'_{eq} = 32.86 \text{ MPa}$

$$1.4D = 1.4 * 32.86 = 46 \text{ MPa}$$

El valor que se tomará en cuenta es el máximo resultado en valor absoluto, entonces el $\sigma'_{eq} = 46 \text{ MPa}$.

El material del bastidor es acero ASTM A36 y tomando un factor de seguridad $n_d = 3$ para comparar el esfuerzo admisible del material.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{3} = 80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \text{Si cumple para el diseño}$$

3.2.4 Cálculo de esfuerzos para el pin en el punto A

Sabiendo de los cálculos anteriormente realizados que el momento más crítico de la perforación ese caso se da cuando el cabezal está descendiendo ubicado en la parte superior.

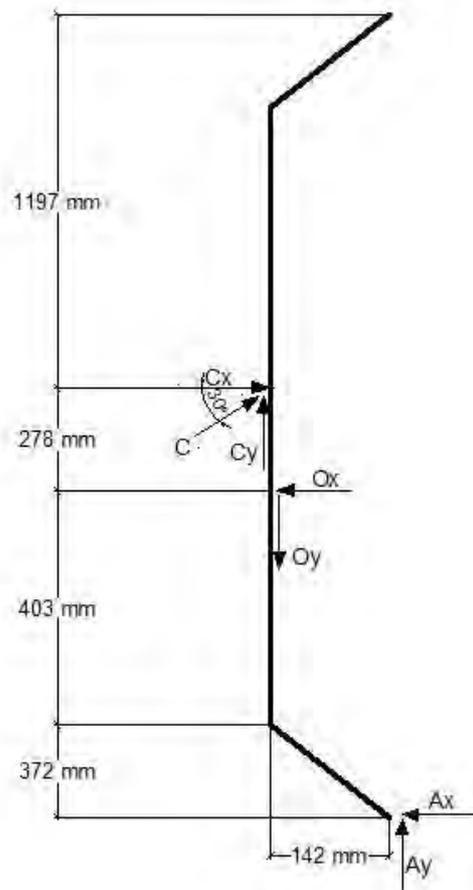
Para ello se toman los cálculos de los esfuerzos en el punto A:

$$A_x = 1.23 \text{ kN}$$

$$A_y = 48.62 \text{ kN}$$

Realizando el diagrama de cuerpo libre para hallar las fuerzas en el pin y en el cilindro:

Fig. 3.7. Diagrama de cuerpo libre para determinar las cargas en el pin.



Siendo:

C_x : Fuerza ejercida por el Pistón hidráulico en el eje "x".

C_y : Fuerza ejercida por el Pistón hidráulico en el eje "y".

$$\sum F_x = 0$$

$$O_x = C_x$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y + O_y = C_y$$

$$48.62 + O_y = C \sin(30^\circ)$$

$$O_y = 0.5C - 48.62$$

$$\sum M_o = 0$$

$$1147A_x + 142A_y + 825B_x = 278C_x$$

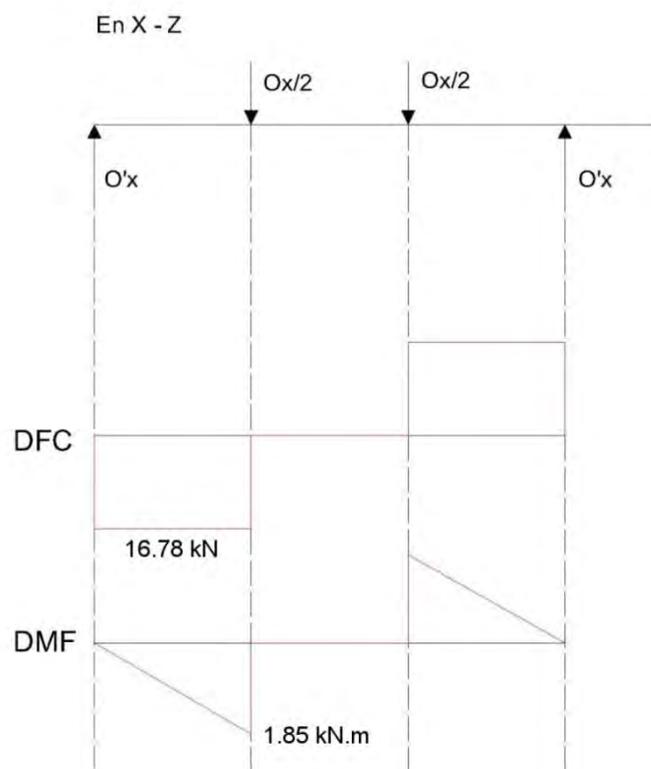
$$C_x = C \cos(30^\circ)$$

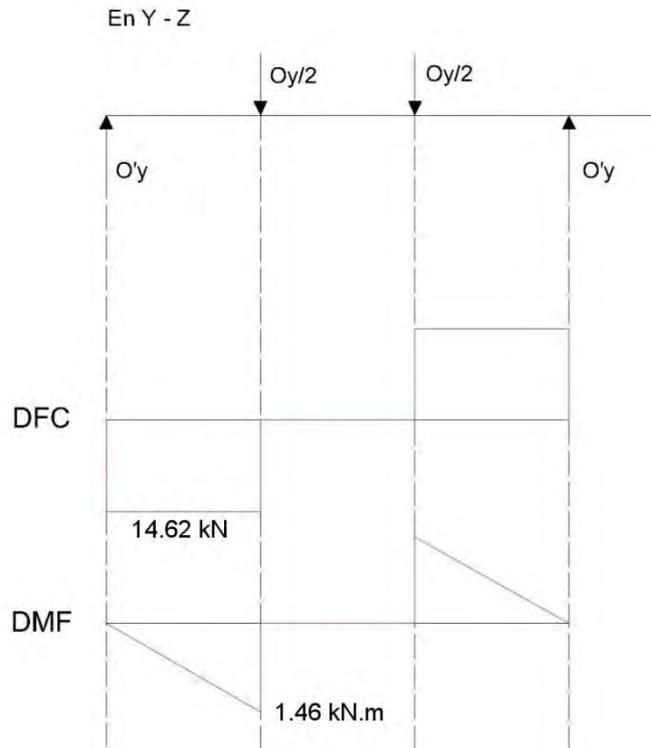
$$C = 38.75 \text{ kN}$$

$O_y = 29.24 \text{ kN}$ (\uparrow) Fuerza vertical que actúa en el pin.

$O_x = 33.56 \text{ kN}$ (\leftarrow) Fuerza horizontal que actúa en el pin.

Fig. 3.8. Diagrama de esfuerzos





3.2.4.1 Selección del material del pin

El material seleccionado para soportar las fuerzas actuantes directamente sobre el pin pivotante es el 40NiCrMo7 según Norma DIN o AISI/SAE 4340. Acero de buena templabilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga. Se suministra en estado bonificado con una dureza aproximada de 260HB a 320HB, ideal para fabricar piezas y herramientas expuestas a tracción, torsión, flexión y que además estén expuestas a altos esfuerzos dinámicos y mecánicos, según *Catálogo comercial Thyssen Krupp Aceros y Servicios S.A* (Anexo B).

Tabla 3.6. Composición química (valores promedio, %) para el acero AISI/SAE 4340.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
0.38 - 0.43	0.15 - 0.3	0.6 - 0.8	0.7 - 0.9	1.62 - 2	0.2 - 0.3	≤ 0.04	≤ 0.035

Material pin: AISI/SAE 4340: $\sigma_u = 710$ MPa; $\sigma_t = 1110$ MPa; $\tau = 355$ MPa (asumiendo

$$\tau = \frac{\sigma_u}{2})$$

3.2.4.2 Cálculo del diámetro del pin

Cálculo previo:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_u}{FS} = \frac{710}{5} = 157.8 \text{ MPa}$$

Cálculo definitivo:

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi d^3} \leq \sigma_{adm}$$

$$\frac{32 * 1.84 \text{ kN}}{\pi d^3} \leq 157.8 \text{ MPa}$$

$$d \geq 0.049 \text{ m}$$

Por lo tanto se asume un $d = 50 \text{ mm}$:

$$A_{pin} = 1.96 * 10^{-3} \text{ m}^2; I_{xx} = I_{yy} = 3.07 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

3.2.4.3 Esfuerzos en el pin debido a las fuerzas aplicadas en el plano XZ

- **Cálculo del esfuerzo normal**

$$\sigma_{n(xz)} = \frac{N}{A_v} = 0$$

- **Cálculo del esfuerzo cortante**

$$\tau_{v(xz)} = \frac{O_x / 2}{A} = 8.56 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo por flexión**

$$\sigma_{f(xz)} = \frac{M_{f(xz)} Y_p}{I_x} = \frac{1.85 \text{ kN} \cdot \text{m} * 0.025 \text{ m}}{3.07 * 10^{-7} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{f(xz)} = 150.3 \text{ MPa}$$

- **Cálculo del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises**

$$\sigma'_{eq(xz)} = \sqrt{(\sigma_{f(xz)} + \sigma_{n(xz)})^2 + 3\tau_{v(xz)}^2}$$

$$\sigma'_{eq(xz)} = \sqrt{150.3^2 + 3 * 8.56^2}$$

$$\sigma'_{eq(xz)} = 151 \text{ MPa} \leq 180 \text{ MPa}$$

Tomando un factor de seguridad de 4.5:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_u}{4.5} = 157.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq(xz)} \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \text{Si cumple para el diseño}$$

3.2.4.4 Esfuerzos en el pin debido a las fuerzas aplicadas en el plano YZ

- Cálculo del esfuerzo normal

$$\sigma_{n(yz)} = \frac{N}{A_v} = 0$$

- Cálculo del esfuerzo cortante

$$\tau_{v(yz)} = \frac{O_y / 2}{A} = 7.46 \text{ MPa}$$

- Cálculo del esfuerzo por flexión

$$\sigma_{f(yz)} = \frac{M_{f(yz)} Y_p}{I_y} = \frac{1.46 \text{ kN} \cdot \text{m} * 0.025 \text{ m}}{3.07 * 10^{-7} \text{ m}^{-7}}$$

$$\sigma_{f(yz)} = 119.1 \text{ MPa}$$

- Cálculo del esfuerzo equivalente por el método de Von Mises

$$\sigma'_{eq(yz)} = \sqrt{(\sigma_{f(yz)} + \sigma_{n(yz)})^2 + 3\tau_{v(yz)}^2}$$

$$\sigma'_{eq(yz)} = \sqrt{119.1^2 + 3 * 7.46^2}$$

$$\sigma'_{eq(yz)} = 119.8 \text{ MPa} \leq 180 \text{ MPa}$$

Tomando un factor de seguridad de 4.5:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_u}{4.5} = 157.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq(yz)} \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \text{Si cumple para el diseño}$$

3.3 Diseño de brocas de perforación

Para realizar un buen diseño y selección de las brocas de perforación; así como los esfuerzos a las que estos están sometidos, es necesario conocer los fundamentos de la perforación por corte.

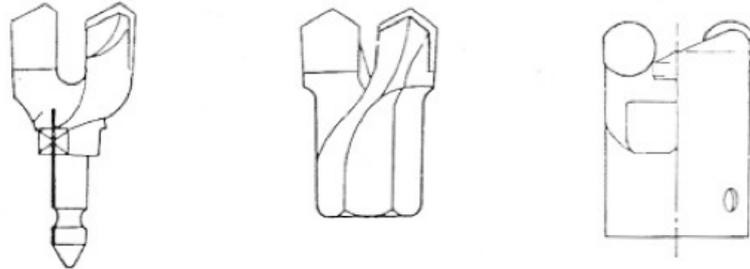
3.3.1 Perforación rotativa por corte

Este tipo de perforación se realiza utilizando brocas cuya estructura dispone de elementos de carburo, tungsteno u otros materiales de mayor tecnología como son los diamantes

sintéticos policristalinos y son clasificados según su forma y ángulo de ataque. A continuación se detalla los diferentes tipos de broca.

- a. Brocas bilabiales o de tenedor, en diámetros desde 36 mm hasta 50 mm.

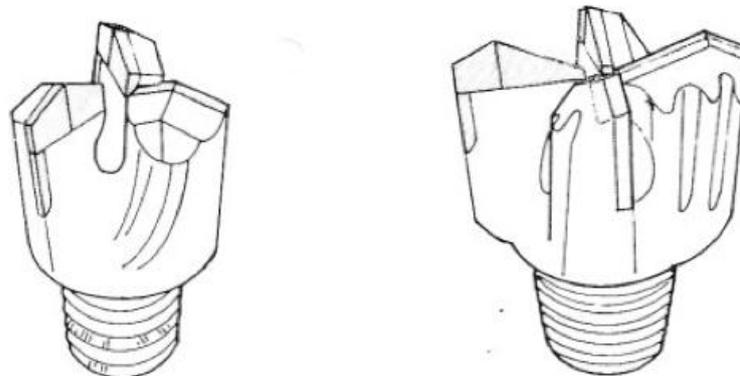
Fig. 3.9. Brocas bilabiales.



(Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas)

- b. Brocas trialetas o multialetas, en diámetros desde 50 mm hasta 115 mm.

Fig. 3.10. Brocas trialetas.



- c. Brocas de labios reemplazables con elementos escarificadores y perfil de corte escalonado en diámetros desde 150 mm hasta 400 mm.

Fig. 3.11. Brocas de labios reemplazables.

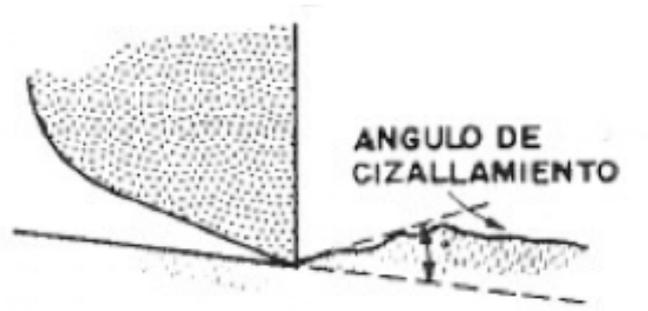


3.3.2 Fundamentos de la perforación por corte

Según *Fish* (Manual de perforación y voladura de rocas), cuando se realiza el corte de la roca, la broca se ve sometida a las siguientes acciones:

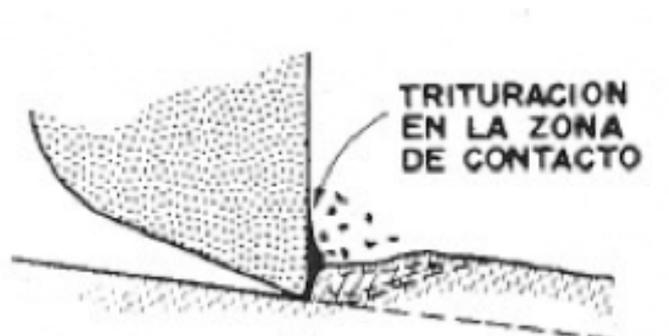
- a. Deformaciones elásticas por las tensiones debidas a la deflexión angular de la broca y la torsión a la que se somete la misma.

Fig. 3.12. Deformaciones elásticas.



- b. Liberación de las tensiones de deformación, con un impacto subsiguiente del elemento de corte sobre la superficie de la roca disminución en el tamaño de las partículas.

Fig. 3.13. Liberación de las tensiones de deformación.



- c. Incremento de tensiones en la zona de contacto broca – roca con desprendimiento de uno o varios fragmentos que una vez evacuados, permiten reiniciar nuevamente el ciclo.

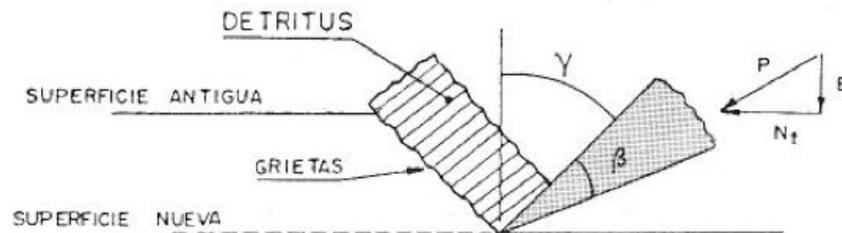
Fig. 3.14. Incremento de tensiones en la zona de contacto broca.



3.3.3 Análisis de la fuerza de corte aplicada sobre la roca

El análisis de la fuerza de corte en el campo de las perforaciones de pozos, es similar al análisis de la fuerza de corte aplicada en la perforación de elementos maquinados utilizando taladros de banco. Esta fuerza se descompone en dos: una fuerza tangencial, (N_t) y otra vertical, conocida como fuerza de empuje (F_E).

Fig. 3.15. Análisis de la fuerza de corte.



(Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas)

3.3.3.1 Fuerza de empuje (F_E)

En el punto 3.1.3 se realizó el cálculo de la fuerza de empuje mínima para poder realizar el corte de una roca blanda, con un diámetro de broca igual a 6", obteniendo como resultado una fuerza de empuje igual a 13.69 kN.

$$F_{\min} = 13.69 \text{ kN}$$

3.3.3.2 Fuerza tangencial (N_t)

La fuerza tangencial es la que vence el esfuerzo resistente de la roca frente a la rotación de la broca. Para poder hallar la fuerza tangencial, es necesario conocer el valor del par resistente (T_r), medido en el eje del elemento de perforación y corresponde al producto de la fuerza tangencial por el radio de la broca.

Para calcular el par resistente, se utiliza la siguiente fórmula.

$$T_r = \frac{2}{3} \mu F_E \left(\frac{r_0^3 - r_i^3}{r_0^2 - r_i^2} \right)$$

Donde:

T_r : Par resistente.

μ : Coeficiente de fricción de la roca.

F_E : Fuerza de empuje sobre la broca.

r_o : Radio exterior de la broca.

r_i : Radio interior de la broca.

Considerando un coeficiente de fricción de la roca igual a la tangente del ángulo de corte. El ángulo de fricción de las rocas varía entre 25° y 45° para las de mayor dureza. Para este análisis se tomará un ángulo de corte igual a 30°.

Fig. 3.16. Peso de materiales por unidad de volumen.

Material	Peso kN/m ³	Ángulo	Material	Peso kN/m ³	Ángulo
Arena	14 a 19	30°	Carbón en leña de trozos	4	45°
Arena de piedra pómez	7	35°	Hulla		
Arena y grava	15 a 20	35°	briquetas amontonadas	8	35°
Cal suelta	13	25°	briquetas apiladas	13	-
Cemento clinker suelto	16	28°	en bruto, de mina	10	35°
Cemento en sacos	15		pulverizada	7	25°
Escoria de altos homos			Leña	5,4	45°
troceada	17	40°	Lignito		
granulada	12	30°	briquetas amontonadas	7,8	30°
triturada, de espuma	9	35°	briquetas apiladas	12,8	-
Poliéster en resina	12	-	en bruto	7,8 a 9,8	30° a 40°
Poliétileno, poliestirol granulado	6,4	30°	pulverizado	4,9	25° a 40°
Resinas y colas	13	-	Turba negra y seca		
Yeso suelto	15	25°	muy empaquetada	6 a 9	-
Agua dulce	10	-	amontonada y suelta	3 a 6	45°

⁽¹⁾ En la ENV 1990 pueden encontrarse valores adicionales de materiales agrícolas, industriales y otros.

En el punto 3.1.4, se indica que el diámetro de la broca a seleccionar debe ser de 6 pulg de diámetro por ser el diámetro más pequeño de los pozos de agua existentes en la región Piura.

Por lo tanto el radio externo (r_o) de la broca será de 3 pulg. Para el diámetro interno ($2r_i$) se va a considerar el diámetro de la tubería de perforación que es 2-3/8 pulg.

- **Cálculo del coeficiente de fricción (μ)**

$$\mu = \tan(\varphi)$$

$$\mu = \tan(30^\circ)$$

$$\mu = 0.577$$

- **Cálculo del par resistente (T_r)**

$$T_r = \frac{2}{3} \mu F_E \left(\frac{r_o^3 - r_i^3}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

$$T_r = \frac{2}{3} * 0.577 * 13.69 \left(\frac{0.0762^3 - 0.0302^3}{0.0762^2 - 0.0302^2} \right)$$

$$T_r = 0.4464 \text{ KN} \cdot \text{m} = 446.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- **Cálculo de la fuerza tangencial (N_t)**

$$N_t = r_o T_r$$

$$N_t = 446.4 * 0.0762$$

$$N_t = 34.02 \text{ N}$$

- **Cálculo de la fuerza de corte (P)**

$$P = \sqrt{F_E^2 + N_t^2}$$

$$P = \sqrt{13690^2 + 34.02^2}$$

$$P = 13690.04 \text{ N}$$

3.3.3.3 Velocidad de penetración (VP)

La velocidad de penetración para una roca determinada y para un diámetro de perforación específico es linealmente proporcional a la fuerza de empuje y a la velocidad de rotación.

Para el cálculo de la velocidad de penetración, se han ido deduciendo fórmulas empíricas basadas en experiencias realizadas en campo y se han ido modificando a lo largo del tiempo.

De todas las fórmulas empíricas, se tomará la deducida por *R. Praillet* en 1978, la cual indica:

$$VP = \frac{63.9 * F_E N_r}{S_c^2 \varnothing^{0.9}}$$

Donde:

VP : Velocidad de penetración (m/h).

F_E : Fuerza de empuje sobre la roca (kg).

N_r : Velocidad de rotación (RPM).

S_c : Resistencia a la compresión de la roca (MPa).

\varnothing : Diámetro de la broca (mm).

En el punto 3.1.1 apartado a) se designó una resistencia a la compresión igual a 30 MPa y en el apartado b), se definió una velocidad de rotación igual a 100 rpm, para el caso de la perforación sobre rocas blandas.

- **Cálculo de la Velocidad de penetración**

$$VP = \frac{63.9 * F_E N_r}{S_c^2 \varnothing^{0.9}}$$

$$VP = \frac{63.9 * 1395.5 * 100}{18^2 * 152.4^{0.9}}$$

$$VP = 298.98 \text{ m/h} \approx 4.98 \text{ m/min}$$

3.3.3.4 Potencia de rotación (HP_r)

La potencia de rotación en HP, necesaria para hacer girar la broca, se calcula de utilizando la siguiente formula:

$$HP_r = 8.55 * 10^{-9} \varnothing^2 N_r F_E^2$$

Donde:

HP_r : Potencia de rotación (HP).

\varnothing : Diámetro de la broca (mm).

N_r : Velocidad de rotación (RPM).

F_E : Fuerza de empuje sobre la roca (kN).

- **Cálculo de la potencia de rotación**

$$HP_r = 8.55 * 10^{-9} \varnothing^2 N_r F_E^2$$

$$HP_r = 8.55 * 10^{-9} * 152.4^2 * 100 * 13.69^2$$

$$HP_r = 3.72 \text{ HP}$$

3.3.3.5 Ángulos de diseño de la broca

La eficiencia del proceso de corte de una roca depende en gran medida del diseño de la broca, de acuerdo al tipo de suelo que se va a perforar. Por ese motivo, es necesario conocer los ángulos de la geometría de la broca y que se detallan a continuación:

- Angulo de arranque “ α ”
Varía generalmente entre 110° y 140° , y va aumentando en relación a la dureza de la roca, para evitar el astillamiento del metal duro.
- Angulo de labio “ β ”
Varía entre 75° y 80° en relación a la dureza de la roca.
- Angulo de corte “ γ ”
Varía entre -6° y 14° , siendo positivo en rocas blandas y negativo en rocas duras.

- Ángulo de desahogo efectivo “ ω ”
Está dada por la siguiente fórmula: $\omega = 90^\circ - \beta$
- Ángulo de hélice “ ε ”
Dado por un punto de la broca situado a una distancia “ r ” cuyo recorrido describe la forma de una hélice cuyo ángulo está dado por la siguiente fórmula:
$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{p}{2\pi r}\right)$$
. Siendo “ p ” el avance de la broca en cada giro completo.

3.4 Sistema de varillaje de extensión

Para el varillaje de extensión, se ha seleccionado una tubería de diámetro externo 2-3/8 pulg, por ser la de menor diámetro según la norma API para tuberías de perforación. Las características de la tubería se hallan en la siguiente tabla.

Propiedades de la tubería de perforación			Unidades Imperiales		Unidades Métricas
Diámetro externo	DE	2-3/8	in	60.33	mm
Diámetro interno	DI	1.815	in	46.1	mm
Espesor	t	0.28	in	7.11	mm
Peso por unidad de long.	W	6.65	lb/ft	9.9	kg/m
Área transversal	A_o	1.843	in ²	1188.90	mm ²
Mandril		1.628	in	41.34	mm
Esfuerzo permisible de fluencia	σ_y	75	ksi	517	MPa
Esfuerzo permisible de rotura	σ_r	100	ksi	689	MPa
Resistencia máxima a la torsión	τ_u	6300	ft-lb	8 541.653	N.m
Resistencia máxima a la tensión	f_u	138200	lb	63000	kg
Resistencia máxima al colapso	σ_c	15600	psi	107.6	MPa
Presión interna	p_i	15470	psi	106.7	MPa

3.4.1 Análisis de cargas aplicadas sobre la tubería de perforación

La tubería de perforación estará sometida a cargas indirectas que se transmitirán por medio de la broca de perforación y por medio del motor hidráulico de rotación, así como cargas directas que aparecerán como resultado de la fricción entre ésta y las partículas de rocas que irán ascendiendo hacia la superficie. Para el análisis se considera el caso cuando la tubería de perforación se encuentra a la máxima profundidad.

A. Fuerza de reacción al empuje sobre la roca

Esta fuerza se producirá para un empuje máximo.

$$F_E = F_{\text{máx}}$$

$$F_E = 27.38 \text{ kN}$$

B. Fuerza debido al peso de la tubería y componentes

Esta fuerza está compuesta por el peso de la tubería, el peso de la broca, el peso del terreno y el peso del lodo.

$$F_{tc} = W_{\text{tubería}} + W_{\text{broca}} + W_{\text{terreno}} + W_{\text{lodo}}$$

$$F_{tc} = 9.785 + 0.152 + 0.1 + 23.1$$

$$F_{tc} = 33.137 \text{ kN}$$

C. Fuerza de corte debido al par torsor aplicado por el motor de giro

El par torsor aplicado sobre la tubería será el mismo que se aplica en el eje de la broca y que se calculó en la sección 3.3.3.2. $T_r = 446.4 \text{ N} \cdot \text{m}$

$$F_c = T_r \cdot \varnothing_{\text{tubería}}$$

$$F_c = 446.4 * 0.060325$$

$$F_c = 26.93 \text{ N}$$

D. Fuerza de corte debido al rozamiento de las partículas de la broca

Para calcular la fuerza de corte, se supondrá una densidad de la tierra igual a 2500 kg/m^3 .

Para hallar dicha fuerza por unidad de longitud, se debe calcular previamente el volumen de la tubería de perforación para una altura máxima de 150 m.

$$V_{\text{tubería}} = L_{\text{tubería}} * \frac{\pi}{4} (\varnothing_o^2 - \varnothing_i^2)$$

$$V_{\text{tubería}} = 150 * \frac{\pi}{4} (0.06033^2 - 0.0461^2)$$

$$V_{\text{tubería}} = 0.178 \text{ m}^3$$

Donde:

$V_{\text{tubería}}$: Volumen de la tubería (m^3).

$L_{\text{tubería}}$: Longitud de la tubería (m).

\varnothing_o : Diámetro externo de la tubería (m).

\varnothing_i : Diámetro interno de la tubería (m).

Para calcular la masa de suelo que hace contacto con la tubería de perforación se hace uso de la siguiente formula:

$$M_t = \rho_{\text{terreno}} V_{\text{tubería}}$$

$$M_t = 2500 * 0.178$$

$$M_t = 445 \text{ kg}$$

Donde:

M_t : Masa de roca triturada en contacto con la tubería (m).

ρ_{terreno} : Densidad de la roca perforada (kg/m^3).

La fuerza de corte va a estar dada por el peso de las partículas de roca repartido a lo largo de toda la tubería.

$$F_t = M_t * 9.81$$

$$F_t = 4365.45 \text{ N}$$

Donde:

F_t : Fuerza de corte sobre la tubería por efecto de la roca triturada (N).

E. Fuerzas internas debido a la presión hidráulica del lodo de perforación

El lodo de perforación que fluye por el interior de la tubería con el fin de ser expulsado por las toberas de la broca para llevar expulsar hacia la superficie las partículas de roca que son removidas, produce que la pared interior de la tubería este sometida a fuerzas internas.

Primero se calcula la presión hidráulica que ejerce el lodo sobre la tubería, para un lodo de perforación con una densidad igual a 1080 kg/m^3 .

$$P_{h, \text{máx}} = \rho_{\text{lodo}} * g * h_{\text{tubería}}$$

$$P_{h, \text{máx}} = 1.08 * 150 * 9.81$$

$$P_{h, \text{máx}} = 1589220 \text{ N/m}^2 = 1589 \text{ kN/m}^2$$

Donde:

$P_{h, \text{máx}}$: Presión hidráulica máxima en la tubería (N/m^2).

ρ_{lodo} : Densidad del lodo de perforación (kg/m^3).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

$h_{\text{tubería}}$: Altura de la tubería de perforación (m).

Conociendo la presión hidráulica y el área de la pared interna de la tubería, se puede calcular la fuerza interna debido a la presión hidráulica generada por el lodo.

F. Torque debido a la fuerza de corte producida por el rozamiento de las partículas sobre la broca

El torque que se produce será igual a la fuerza ya calculada anteriormente por el radio respectivo exterior a la tubería.

$$T_o = r * F_t$$

$$T_o = 0.0302 * 4365.45$$

$$T_o = 131.84 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3.4.2 Análisis de esfuerzos

- Cálculo de las propiedades geométricas de la sección:

Área:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} (60.33^2 - 46.1^2) = 1189.5 \text{ mm}^2$$

$$A \approx 1.89 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Momento de inercia:

$$I_x = I_z = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) = \frac{\pi}{64} (60.33^4 - 46.1^4) = 4.3 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

- Cálculo de esfuerzo normal debido a la fuerza de empuje aplicado a la roca:

$$\sigma_n = \frac{F_{tc} - F_e}{A} = \frac{33.137 * 10^3 - 27.38 * 10^3}{1.189 * 10^{-3}} = 4.84 \text{ MPa (tracción)}$$

- Cálculo del esfuerzo cortante debido al momento de torsión aplicado sobre la broca y el suelo:

$$\tau_t = \frac{T_B}{J} = \frac{T_r + T_o}{J} = \frac{T_B r_o}{\frac{\pi}{2} (r_o^4 - r_i^4)}$$

$$\tau_t = \frac{(446.4 + 131.8) * 0.0302}{\frac{\pi}{2} (0.0302^4 - 0.02305^4)} = 20.23 \text{ MPa}$$

- Cálculo del esfuerzo debido a la fuerza de presión hidráulica:

$$\sigma_n = \frac{P_{h, \text{máx}} * r}{t} = \frac{1589 \text{ kN/m}^2 * 0.02305 \text{ m}}{0.00715 \text{ m}} = 5.12 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo equivalente por el método del círculo de *Mohr*.

Para obtener el círculo de *Mohr*, se necesita definir los esfuerzos que intervienen en la tubería de perforación, para un estado de esfuerzos triaxiales, ubicado en la parte inferior de la tubería por ser el punto crítico.

Para los esfuerzos normales:

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_y = \sigma_h = 5.12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = \sigma_n = 4.84 \text{ MPa}$$

Para los esfuerzos cortantes

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\tau_{yz} = \tau_t = 20.23 \text{ MPa}$$

$$\tau_{zx} = 0$$

Despejando la matriz de esfuerzos, y hallando el polinomio característico:

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 20.23 \\ 0 & 5.12 & 0 \\ 20.23 & 0 & 4.84 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = 0 + 5.12 + 4.84 = 9.96$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 5.12 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 5.12 & 0 \\ 0 & 4.84 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 20.23 \\ 20.23 & 4.84 \end{bmatrix} = -384.47$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 20.23 \\ 0 & 5.12 & 0 \\ 20.23 & 0 & 4.84 \end{bmatrix} = -2095.37$$

$$-\sigma^3 + 9.96\sigma^2 + 384.47\sigma - 2095.37 = 0$$

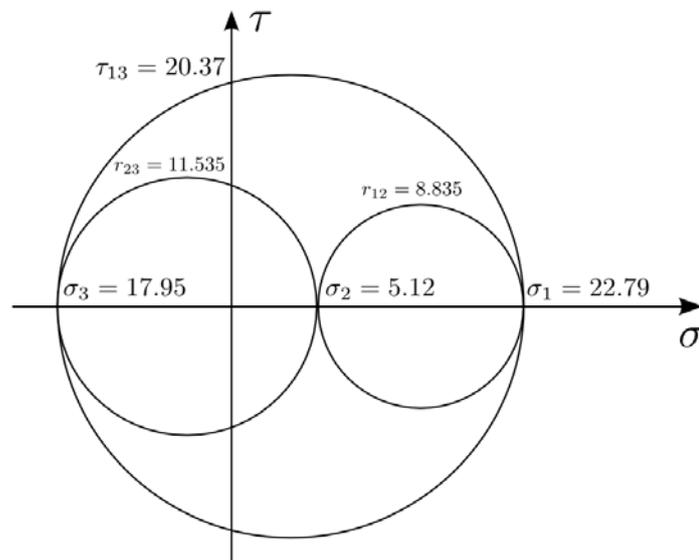
$$\sigma_1 = 22.79$$

$$\sigma_2 = 5.12$$

$$\sigma_3 = -17.95$$

Graficando el círculo de *Mohr*:

Fig. 3.17. Círculo de *Mohr*.



En el gráfico se puede apreciar que el esfuerzo máximo producido cuando la tubería de perforación tiene una profundidad máxima de 150 m, es de $\sigma_1 = 22.79$ MPa, lo cual menor que el esfuerzo permisible a la fluencia.

3.5 Cálculo y selección de los piñones y la cadena

La transmisión de potencia mediante el accionamiento por cadena y piñón, constituye un sistema seguro y óptimo, cuando se hace una correcta selección de la cadena y piñones respectivos.

Ventajas de la transmisión de potencia por cadenas:

- No se produce deslizamiento, $i = \text{cte}$.
- La relación de velocidades es constante.
- El rendimiento del sistema es elevado: 98%
- Es compacta y no requiere tensión inicial como en el caso de las correas.
- La clásica elasticidad de la cadena, sumada a la película lubricante que se forma en las partes móviles, amortiguan los golpes por cargas intermitentes.
- Si está bien diseñada es mucho más duradera que las correas.
- Permite trabajar con menores distancias entre centros de poleas, con la consiguiente ventaja económica.
- Ante una rotura de uno o varios eslabones es de fácil arreglo.
- Son poco sensibles al medio en que trabajan.

Para seleccionar una cadena es preciso conocer:

- La potencia a transmitir.
- Las revoluciones por minuto del árbol motor y del conducido.

- Las condiciones de trabajo, las cuales harán que la potencia a transmitir sea mayor con un coeficiente obtenido de la siguiente tabla:

Tabla 3.7. Coeficiente de mayoración de la potencia transmitida.

	Motor hidráulico	Motor eléctrico	Motor de combustión
Sin sacudidas	1.0	1.0	1.2
Sacudidas ligeras	1.2	1.3	1.4
Sacudidas violentas	1.4	1.5	1.7

Para el cálculo de cadena y piñones se conoce:

Potencia de entrada: $H_{\text{nom}} = 3 \text{ HP}$

Velocidad de rotación: $N = 50 \text{ rpm}$

Factor de diseño: $n_d = 1.5$

Condiciones de trabajo: $K_s = 1.2$ (motor hidráulico con sacudidas leves)

Cálculo de la potencia corregida:

$$H_{\text{tabla}} = \frac{n_d K_s H_{\text{nom}}}{K_2}$$

$$H_{\text{tabla}} = \frac{1.5 * 1.2 * 3}{K_2}$$

$$H_{\text{tabla}} = \frac{5.4}{K_2}$$

Para 1 torón ($K_2 = 1$) se tiene $H_{\text{tabla}} = 5.4$

Para 2 torón ($K_2 = 1.7$) se tiene $H_{\text{tabla}} = 2.8$

Para 3 torón ($K_2 = 2.5$) se tiene $H_{\text{tabla}} = 1.88$

Para 4 torón ($K_2 = 3.3$) se tiene $H_{\text{tabla}} = 1.4$

De la tabla en la Fig. 3.18 se elige una cadena de paso 1" y un piñón de 17 dientes.

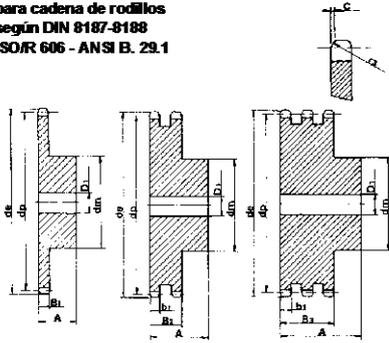
Fig. 3.18. Piñones dentados 16B.

PIÑONES DENTADOS 16B

Calidad, dimensiones y acabados según normas DIN-ASA-ANSI

Z	d _e	d _p	SIMPLE			DOBLE			TRIPLE		
			d _m	D ₁	A	d _m	D ₁	A	d _m	D ₁	A
8	77,0	66,37	42	16	35						
9	85,0	74,27	50	16	35						
10	93,0	82,19	55	16	35	55	20	70			
11	99,5	90,14	61	16	40	63	20	70	63	25	100
12	109,0	98,14	69	16	40	72	20	70	72	25	100
13	117,0	106,12	78	16	40	80	20	70	80	25	100
14	125,0	114,15	84	16	40	88	20	70	88	25	100
15	133,0	122,17	92	16	40	96	20	70	96	25	100
16	141,0	130,20	100	20	45	104	20	70	104	30	100
17	149,0	138,22	100	20	45	112	20	70	112	30	100
18	157,0	146,28	100	20	45	120	20	70	120	30	100
19	165,2	154,33	100	20	45	128	20	70	128	30	100
20	173,2	162,38	100	20	45	130	20	70	130	30	100
21	181,2	170,43	110	20	50	130	25	70	130	30	100
22	189,3	178,48	110	20	50	130	25	70	130	30	100
23	197,5	186,53	110	20	50	130	25	70	130	30	100
24	205,5	194,59	110	20	50	130	25	70	130	30	100
25	213,5	202,66	110	20	50	130	25	70	130	30	100
26	221,6	210,72	120	20	50	130	25	70	130	30	100
27	229,6	218,79	120	20	50	130	25	70	130	30	100
28	237,7	226,85	120	20	50	130	25	70	130	30	100
29	245,8	234,92	120	20	50	130	25	70	130	30	100
30	254,0	243,00	120	20	50	130	25	70	140	32	105
31	262,0	251,08	120	25	50						
32	270,0	259,13	120	25	50	145	32	75			
33	278,5	267,21	120	25	50						
34	287,0	275,28	120	25	50						
35	296,2	283,36	120	25	50	145	32	75	140	32	105
36	304,6	291,44	120	25	50	145	32	80	140	32	105
37	312,6	299,51	120	25	50						
38	320,7	307,59	110	25	65	140	39	70	152	32	114
39	328,8	315,67	120	25	50						
40	336,9	323,75	120	25	50						

Piñón 1" x 17,02 mm
para cadena de rodillos según DIN 8187-8188
ISO/R 606 - ANSI B. 29.1



PIÑÓN	ISO mm	ASA-50 mm
Radio diente r ₃	26	27
Ancho radio C	2,5	3,2
Ancho radio piñón B ₁	16,2	14,6
Ancho radio piñón b ₁	15,8	14,1
Ancho radio piñón B ₂	47,7	43,4
Ancho radio piñón B ₃	79,6	72,7

CADENA	mm	mm
Paso	25,4	25,4
Ancho interior	17,02	15,88
Ø Rodillo	15,88	15,88

3.6 Sistema hidráulico

A continuación se presentan los cálculos y criterios para seleccionar los principales generadores de energía hidráulica y actuadores del sistema hidráulico. Estos elementos serán los que generen el movimiento necesario para lograr la perforación del terreno y obtener un funcionamiento eficiente del equipo.

3.6.1 Selección del cilindro hidráulico de elevación

Para la selección del cilindro hidráulico o pistón hidráulico de elevación y nivelación del bastidor, se parte de la fuerza de compresión que se calculó en el punto 3.2.4; donde, la fuerza de compresión es $C = 37.85 \text{ kN}$.

Para la selección del cilindro se ha hecho uso del *Catálogo de los cilindros hidráulicos Marca Rexroth* con serie constructiva CDMI/CGMI/CSMI (Anexo C).

Este tipo de cilindro trabaja con una presión nominal de 16 MPa (160 bar).

- **Cálculo del diámetro mínimo del émbolo**

$$P_{\text{máx}} = \frac{F_c}{A_e}$$

$$A_e = \frac{F_c}{P_{\text{máx}}} = \frac{38750}{16} = 2421.88 \text{ mm}^2$$

$$A_e = \frac{\pi \times d_e^2}{4}$$

$$d_e = \sqrt{\frac{2421.88 \times 4}{\pi}} = 55.5 \text{ mm}$$

Según el catálogo de los cilindros *Rexroth*, se escoge un cilindro comercial con los siguientes diámetros de émbolo y vástago.

- Diámetro de émbolo: $d_e = 63 \text{ mm}$
- Diámetro de vástago: $d_v = 36 \text{ mm}$

Los datos técnicos del vástago se pueden apreciar en el (Anexo D).

- **Verificación de pandeo**

Partiendo de la fuerza de compresión aplicada sobre el cilindro para verificar que no exista pandeo, debe cumplir lo siguiente:

$$F_{\text{pandeo}} \geq F_{\text{compresión}}$$

$$F_{\text{pandeo}} = \frac{\pi^2 EI}{L_p^2 * FS}$$

Donde:

$$E = 2.1 * 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$I = \frac{\pi d_v^4}{64} = 82447.96 \text{ mm}^4$$

$$FS = 3$$

$$L_p = 2L_v = 1200 \text{ mm}$$

$$F_{\text{pandeo}} = \frac{\pi^2 * 2.1 * 10^5 * 82447.96}{1200^2 * 3}$$

$$F_{\text{pandeo}} = 39.56 \text{ kN}$$

La presión de pandeo será:

$$P_{\text{pandeo}} = \frac{F_{\text{pandeo}}}{A_e} = \frac{39556.3}{(\pi * 63^2) / 4} = 12.3 \text{ N/mm}^2$$

Según se puede observar, la presión de pandeo es menor que la presión máxima en el pandeo (16 N/mm²)

Por lo tanto se debe colocar una válvula limitadora de presión regulada a 12.3 N/mm² (123 bar).

3.6.2 Selección de la unidad de presión hidráulica

3.6.2.1 Parámetros de funcionamiento

Previo a la selección de los componentes hidráulicos, se debe conocer los parámetros de funcionamiento para poder generar la presión hidráulica necesaria para poder activar los actuadores hidráulicos y generar el movimiento necesario para el trabajo de perforación.

- **Cálculo de la velocidad de rotación**

La velocidad de rotación que se asumió tenía un valor de 100 RPM la cual está detallada en el punto 3.1.2 donde se menciona el cuadro de valores aptos para diferentes tipos de terrenos en la cual se ha de trabajar.

Considerando que el suelo del departamento de Piura principalmente está compuesto de roca muy blanda y también se llegó a demostrar mediante el cálculo, que este valor asumido de 100 RPM cubre las expectativas, por lo que será el necesario para llevar a cabo la perforación del suelo.

- **Cálculo de la presión hidráulica**

Debido a los cálculos de presión máxima hallados en el punto 3.5.1, debe ser 123 bar, ésta será la presión requerida por el sistema pero hay que tomar en cuenta las pérdidas a largo del recorrido del aceite hasta el cilindro hidráulico. Por lo que se considera una pérdida del 5%, con lo cual se tiene que la unidad de presión hidráulica debe generar una presión de 129.2 bar.

3.6.3 Selección de motor hidráulico

La perforadora de pozos para agua requiere del equipamiento de dos motores hidráulicos, cada uno de acuerdo con sus funciones principales, estos motores serán:

- **Motor de avance**

Para hacer la respectiva selección de este motor previamente se han realizado los cálculos necesarios a fin de tener algunos parámetros para proceder a su selección.

El parámetro más importante ha sido detallar la potencia que debe ejercer el motor y como anteriormente se ha calculado en el punto 3.3.3.4 la potencia $HPr = 8 \text{ HP}$, y comprobando este resultado en los cálculos de funcionamiento resultó satisfactorio.

Tomando en cuenta este valor, se seleccionará un motor del catálogo general de productos y servicios de *Macnoa Limitada*, en la cual se detallan los motores oleohidráulicos de marca *Eaton U.S.A.*, con esto se tiene el siguiente motor hidráulico *Eaton Serie S 103-1540-S* (Anexo E).

- **Motor de rotación**

Para el caso del motor de rotación se ha tenido que hacer previos cálculos, para lo cual se obtuvo una potencia $HPr = 4 \text{ HP}$. De igual manera que el caso anterior se utiliza el catálogo general de productos y servicios de *Macnoa Limitada*, donde se selecciona el motor hidráulico *Eaton Serie 2000 104-1002* (Anexo F).

3.6.4 Accionador del motor hidráulico

El accionador del motor hidráulico estará dado por medio de una bomba hidráulica, con la cual se distribuirá el fluido hidráulico dando variaciones de presión para el posterior desempeño de los motores hidráulicos.

La bomba que accione los motores hidráulicos tiene que tener una potencia mayor a la potencia de los motores hidráulicos, para ello la potencia será de 12 HP, y será una bomba de pistones de 60 cc.

Se ha optado por trabajar con una bomba hidráulica de pistón axial de la marca *Sauer Danfoss*. Serie 45, modelo J60B. (Apéndice G)

3.6.5 Selección de Fluido hidráulico

El fluido hidráulico a seleccionarse será el que más comúnmente se emplea en la industria hidráulica, para maquinaria pesada, este es el de grado de viscosidad SAE 10W y se tomará el fluido de la marca Mobil para a continuación mencionar sus beneficios.

Mobil Delvac Hydraulic 10W, es un aceite básico con aditivos necesarios para cumplir su función como aceite hidráulico y dar alto rendimiento. Estos aditivos son: dispersantes, inhibidores de oxidación, de desgaste, de herrumbre y corrosión, con estos se puede lograr la extensión de la vida útil del equipo. Su alto grado de viscosidad le da la capacidad para tener un manejo tanto en bajas como en altas temperaturas.

A continuación se presenta la Tabla 3.8 donde se detallan las características, las ventajas y beneficios potenciales.

Tabla 3.8. Características, ventajas y beneficios del aceite Mobil SAE 10W.

Características	Ventajas y beneficios potenciales
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena protección contra la oxidación, formación de depósitos, barniz y degradación del aceite debido a las altas temperaturas de operación. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistemas hidráulicos más limpios. ▪ Menos desgaste especialmente en paletas y válvulas de control. ▪ Mejor protección contra pegado de paletas. ▪ Mayor vida útil del lubricante en servicio.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena protección anti-desgaste. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduce el desgaste prematuro y extiende la vida útil del equipo.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desempeño en un amplio rango de temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción del desgaste durante el arranque a bajas temperaturas. ▪ Buena viscosidad bajo condiciones de operación a altas temperaturas.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protección contra la herrumbre y la corrosión. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor vida útil del equipo. ▪ Reducción en los costos de mantenimiento.

3.7 Panel de Control

El panel de control permite obtener el control sobre los movimientos de la unidad de perforación para este propósito, posee un banco de seis válvulas en línea, para un sistema de centro cerrado, con sistema de control de carga (L.S. “*Load Sensing*”).

- **Válvula de Mando Rotación**
Carrete tipo motor, 3 posiciones con regulador manual de la rotación.
- **Válvula de Mando Avance Rápido**
Carrete tipo cilindro, 3 posiciones.
- **Válvula de Mando Avance Lento**
Carrete tipo cilindro, 3 posiciones con regulador manual del empuje.
- **Válvula de Mando Prensa de Barras**
Carrete tipo cilindro, 3 posiciones.
- **Válvula de Mando bomba de Lodos**
Carrete tipo motor, 3 posiciones con regulador manual del caudal de la bomba.

- **Manómetros:**
Indicadores de presiones de trabajos:

Avance	: 0 – 200 bar (0 – 2.900 psi)
Rotación	: 0 – 200 bar (0 – 2.900 psi)
Avance Agua o lodo	: 0 – 100 bar (0 – 1.450 psi)

- **Botón de Parada de Emergencia**

Uso solamente para Unidad de Fuerza.
Electro – hidráulica.

3.8 Motor de combustión interna y sistema de potencia

El motor de combustión interna, tendrá la capacidad necesaria para lograr abastecer de potencia a toda la perforadora, para ello tendrá que alimentar, de potencia tanto a la bomba de lodos como a la bomba hidráulica, por lo que la potencia requerida será igual o superior a 30 HP. Se elige trabajar con un motor de la marca *Kubota*, Serie 05, modelo V1505-E3B. (Anexo H)

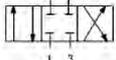
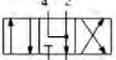
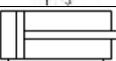
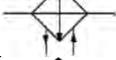
3.9 Elementos adicionales del equipo

Dentro de los elementos adicionales del equipo se detallan las siguientes partes:

- Bomba de lodos, será una bomba hidráulica triplex de la marca *General Pumps* modelo AT0055. (Anexo I).
- Estanque hidráulico, será utilizado como almacenamiento del aceite hidráulico, tendrá una capacidad de 60 litros.
- Estanque diésel, que se empleara para suministrar el combustible al motor de combustión interna, tendrá una capacidad de 35 litros.
- Intercambiador de calor, necesario para poder mantener una temperatura adecuada próxima a la unidad de potencia.
- Batería de 75 amperios, la cual suministrara de energía eléctrica necesaria.
- Estructura de la unidad de fuerza, donde se ubicara el motor de combustión interna, el estanque diésel y el estanque hidráulico, junto con todos sus accesorios.
- Pileta de lodos, destinada a almacenar el lodo usado o de desecho.

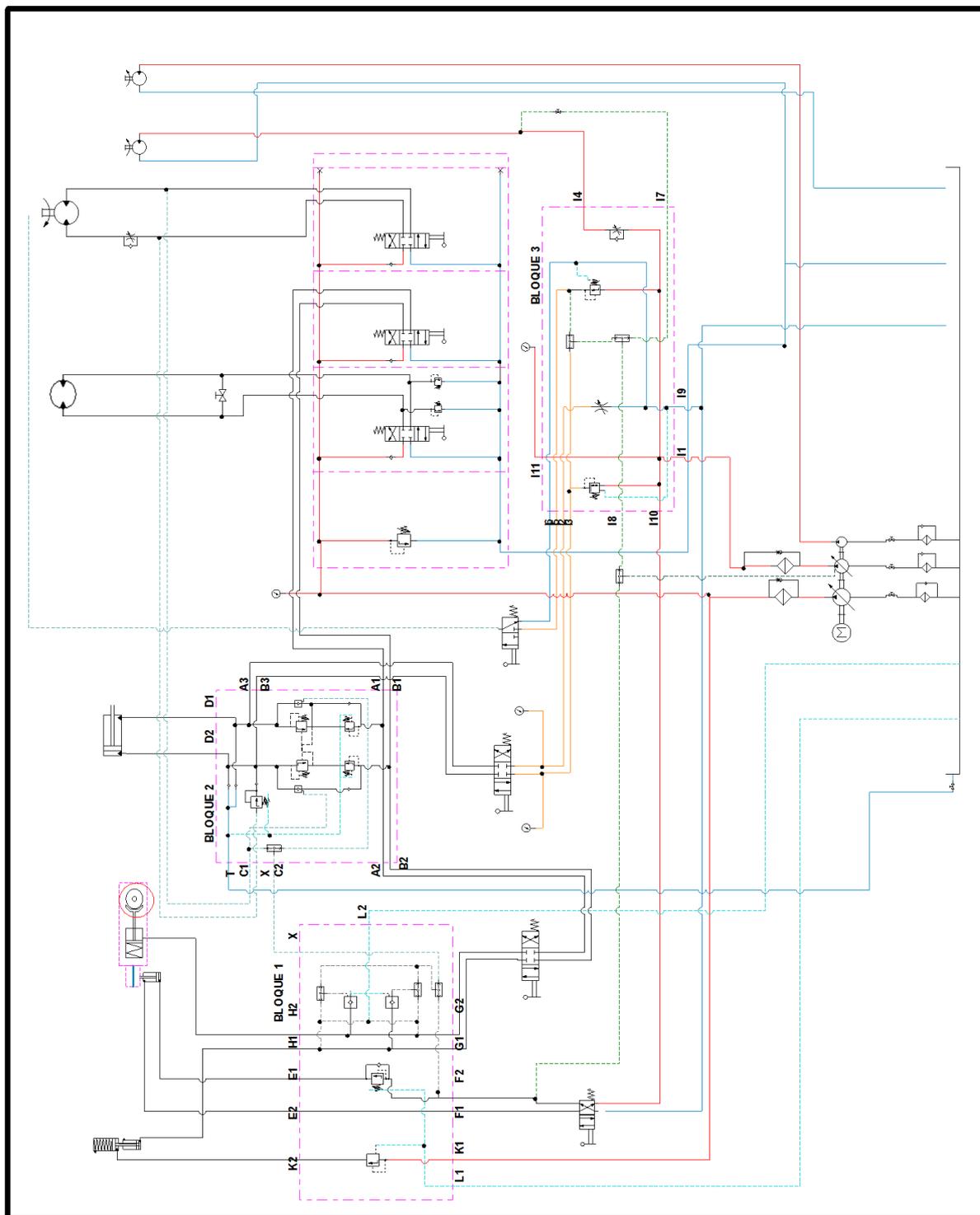
3.10 Diseño del sistema hidráulico

Tabla 3.9. Simbología hidráulica.

	Motor de combustión interna.
	Bomba hidráulica de caudal variable.
	Motor hidráulico con doble sentido de giro.
	Válvula 4/3 en posición neutra normalmente cerrada.
	Válvula 4/3 en posición neutra escape.
	Cilindro de doble efecto, vástago simple.
	Válvula de retención pilotada. $P_e > P_a \rightarrow$ Cierre.
	Válvula de bloqueo (antirretorno).
	Manómetro.
	Refrigerador.
	Filtro.
	Retorno a tanque.

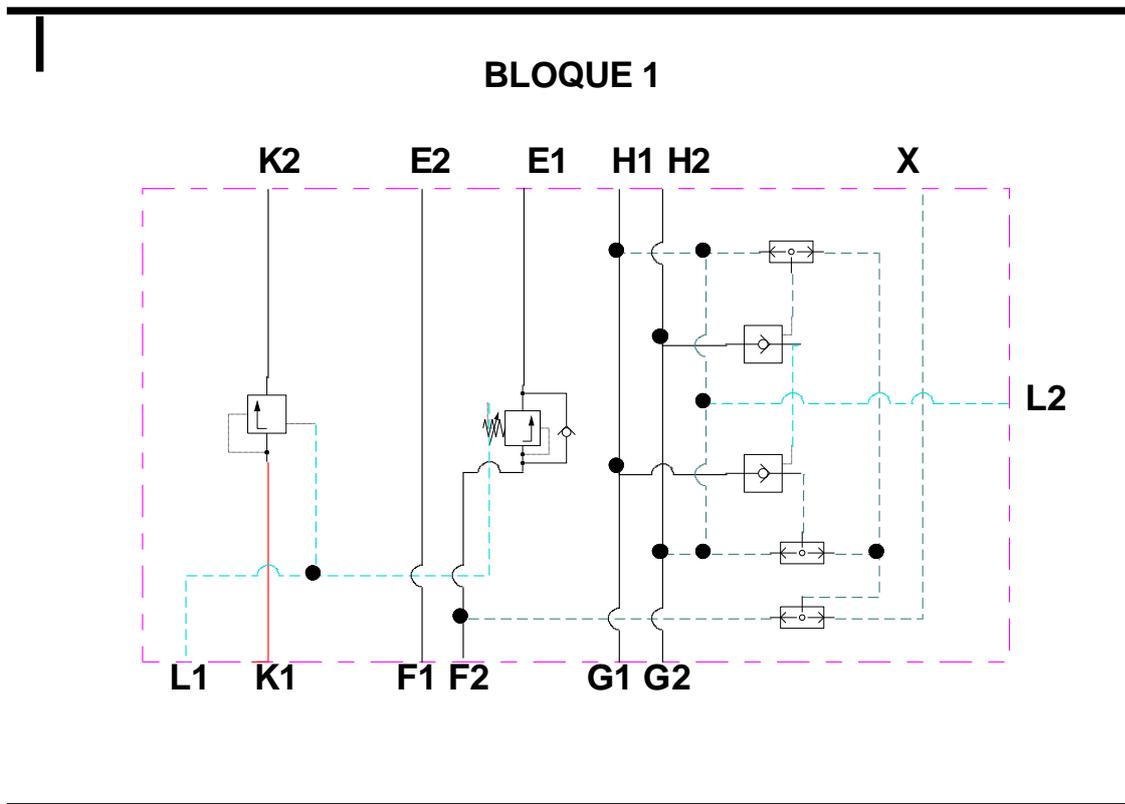
A continuación se presenta un esquema del sistema hidráulico:

Fig. 3.19. Sistema hidráulico.



El sistema hidráulico está constituido de tres bloques de válvulas modulares, para lo cual se usarán las normas empleadas para la fabricación de cada una de estas.

Fig. 3.20. Configuración del bloque hidráulico N° 1.



Del gráfico mostrado se puede trabajar para la fabricación del bloque hidráulico N° 1, para ello se identifican las válvulas a usar, según *Sun Hydraulics* se tienen los siguientes modelos:

Fig. 3.21. PPDB-LAN T-11A (1 unidad).

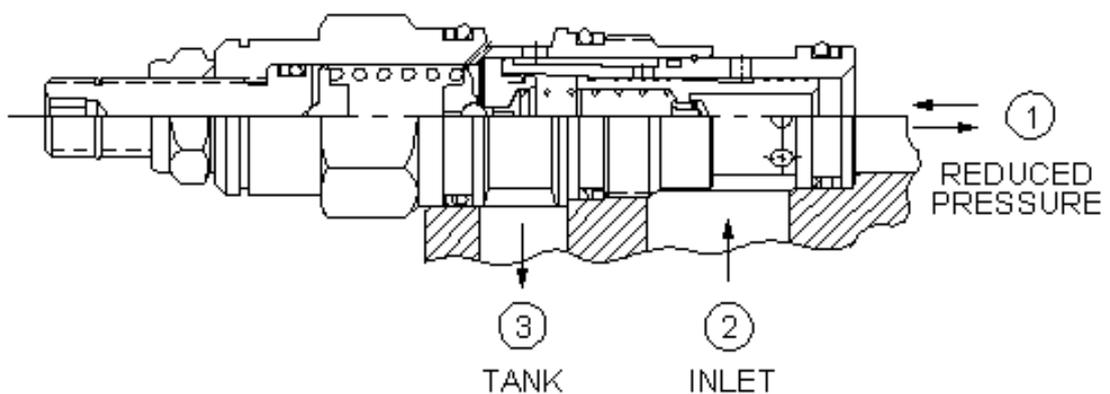


Fig. 3.22. SCCA-LAN T-11A (1 unidad).

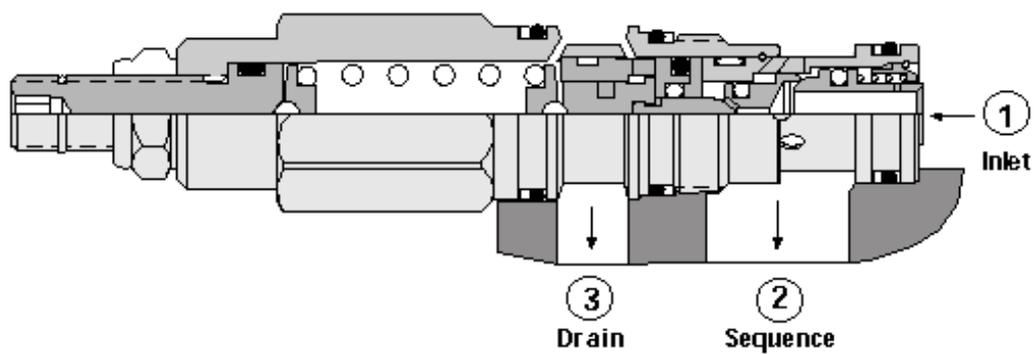


Fig. 3.23. CSAD-XXN T-11A (3 unidades).

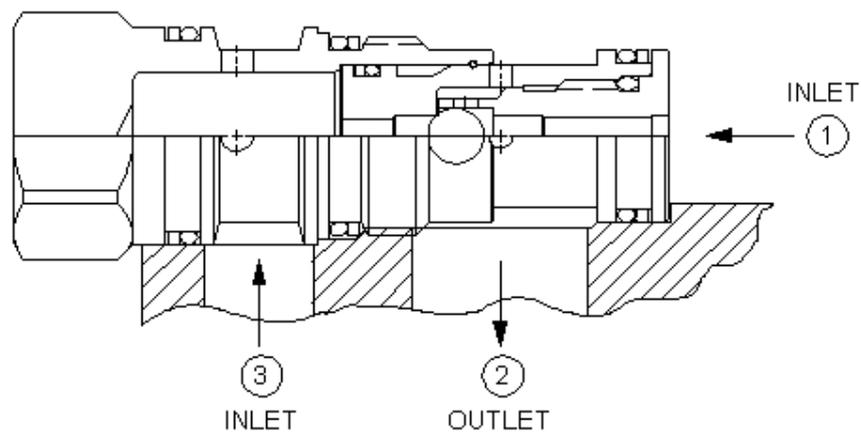
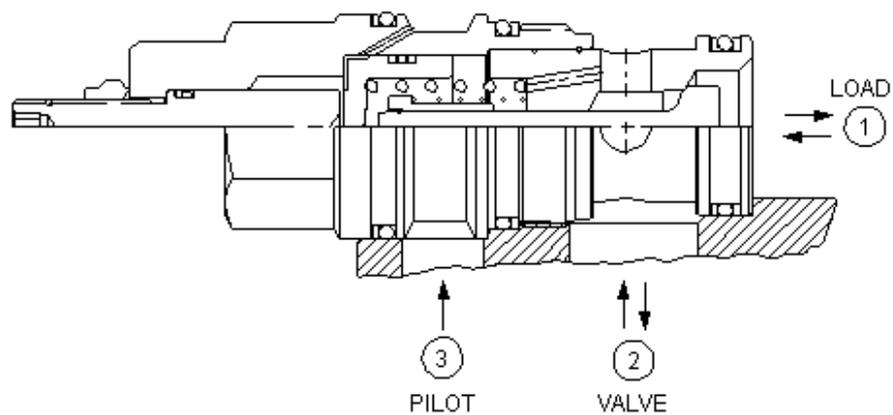


Fig. 3.24. CKGB-XCN T-17A (2 unidades).



- Válvula de alivio reductora de presión/pilotada:

Código Sun Hydraulics:	PPDB-LAN
Cartucho de la serie 1:	Hexágono 7/8" (22,2 mm), Rosca M20. Torque de instalación: 30 -35 lbf-pie (40- 50 N-m)
Tipo de cavidad:	T-11A
Capacidad:	10 gpm (40 L/min.)
Unidades a utilizar:	1 unidad

- Válvula de secuencia de acción directa con control de flujo inverso:

Código Sun Hydraulics:	SCCA-LAN
Cartucho de la serie 1:	Hexágono 7/8" (22,2 mm), Rosca M20. Torque de instalación: 30 -35 lbf-pie (40- 50 N-m)
Tipo de cavidad:	T-11A
Capacidad:	15 gpm (60 L/min.)
Unidades a utilizar:	1 unidad

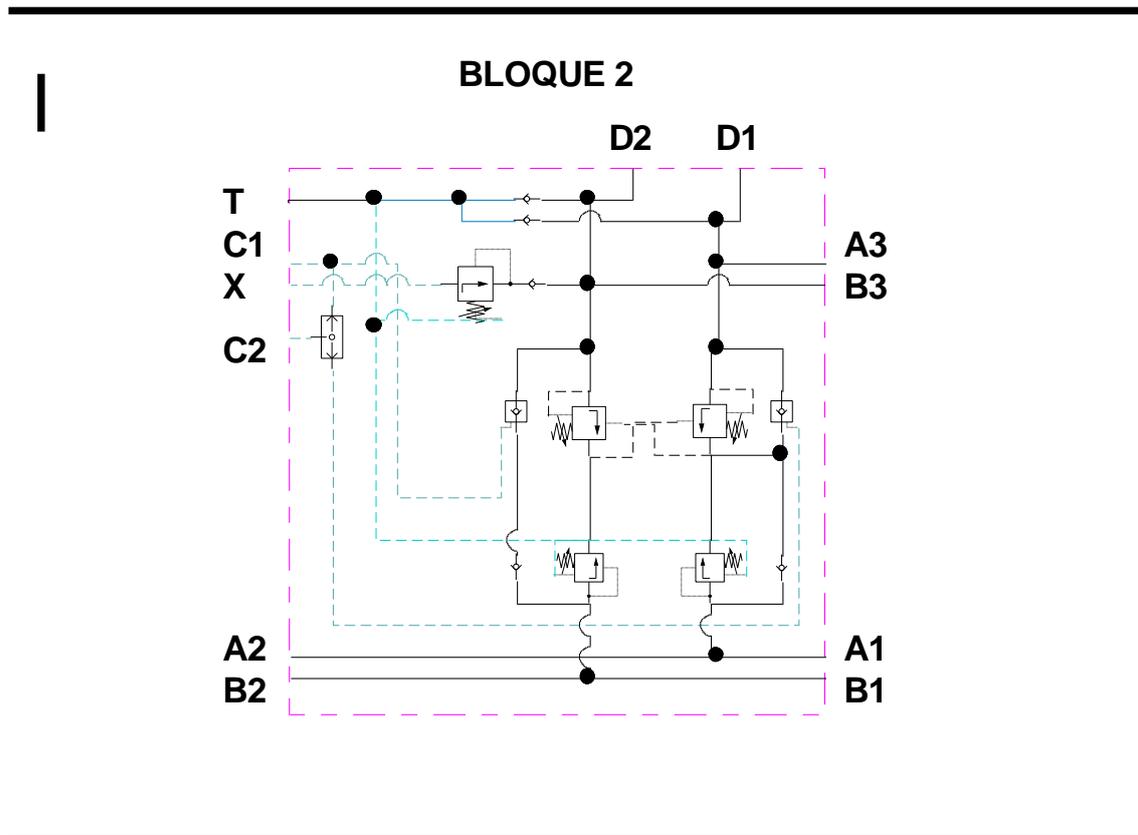
- Válvula de doble efecto con señal en el puerto 2:

Código Sun Hydraulics:	CSAD-XXN
Cartucho de la serie 1:	Hexágono 7/8" (22,2 mm), Rosca M20. Torque de instalación: 30 -35 lbf-pie (40- 50 N-m)
Tipo de cavidad:	T-11A
Capacidad:	2.5 gpm (10 L/min.)
Unidades a utilizar:	3 unidades

- Válvula de retención pilotada:

Código Sun Hydraulics:	CKGB-XCN
Cartucho de la serie 3:	Hexágono 1-1/4" (31.8 mm), Rosca M36. Torque de instalación: 150-160 lbf-pie (200-215 N-m)
Tipo de cavidad:	T-17A
Capacidad:	60 gpm (240 L/min.)
Unidades a utilizar:	2 unidades

Fig. 3.25. Configuración del bloque hidráulico N° 2.



De la misma forma del gráfico mostrado se puede trabajar para la fabricación del bloque hidráulico N° 2, para ello se identifican las válvulas a usar, según *Sun Hydraulics* se tienen los siguientes modelos:

Fig. 3.26. PBDB-LAN T-11A (1 unidad).

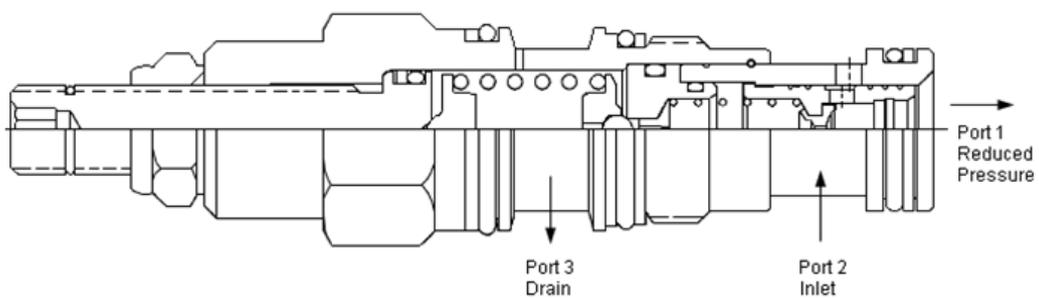


Fig. 3.27. CSAD-XXN T-11A (1 unidad).

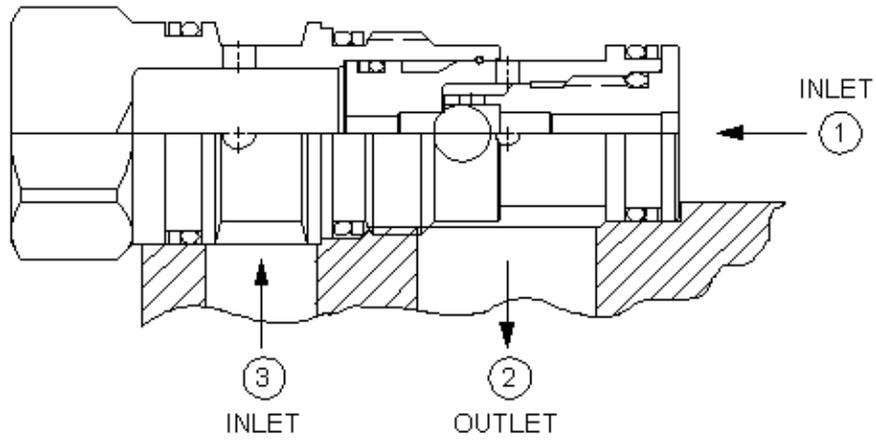


Fig. 3.28. CXFA-XAN T-5A (3 unidades).

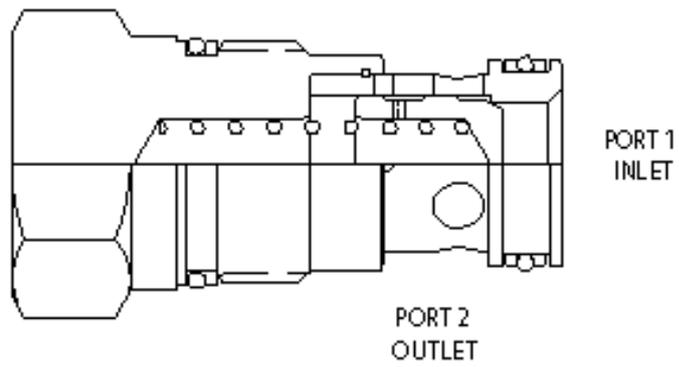


Fig. 3.29. CKGB-XCN T-17A (2 unidades).

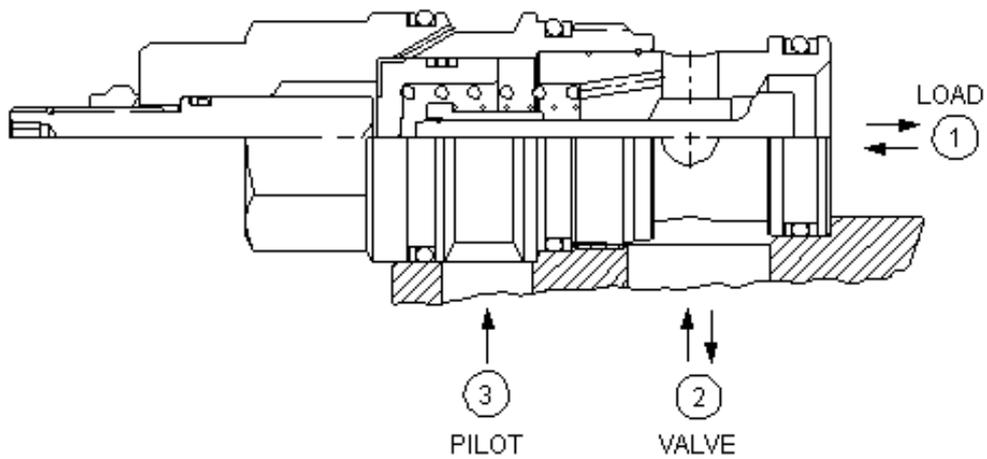


Fig. 3.30. SCGA-LAN T-17A (2 unidades).

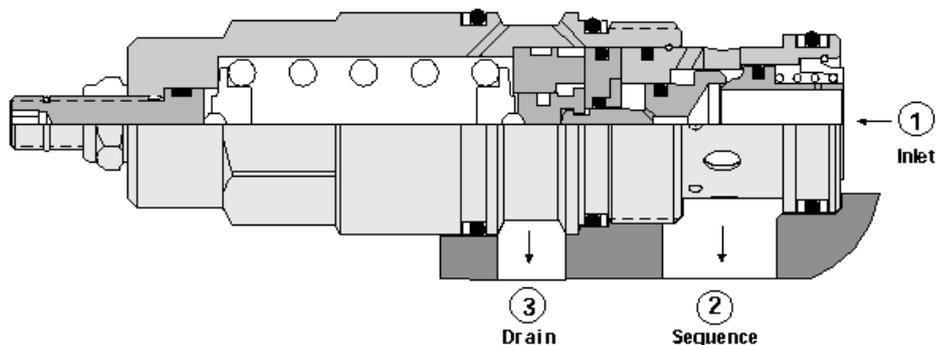
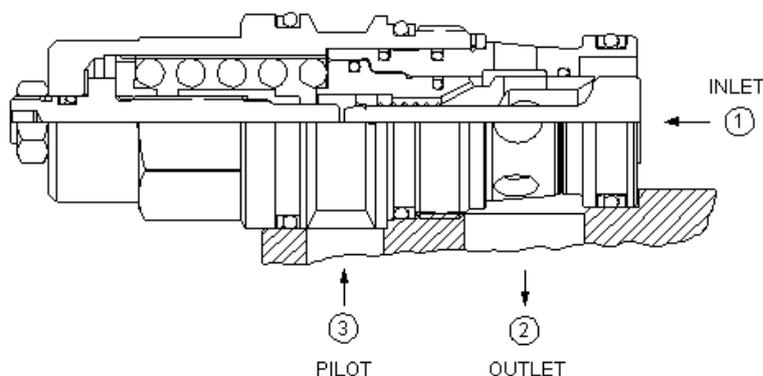


Fig. 3.31. CBGH-LJN T-17A (2 unidades).



- Válvula reductora de presión de mando indirecto:

Código Sun Hydraulics:

Cartucho de la serie 1:

Tipo de cavidad:

Capacidad:

Unidades a utilizar:

PBDB-LAN

Hexágono 7/8" (22,2 mm),
Rosca M20. Torque de
instalación: 30 -35 lbf-pie (40-
50 N-m)

T-11A

10 gpm (40 L/min.)

1 unidad

- Válvula de doble efecto con señal en el puerto 2:

Código Sun Hydraulics:

Cartucho de la serie 1:

Tipo de cavidad:

Capacidad:

Unidades a utilizar:

CSAD-XXN

Hexágono 7/8" (22,2 mm),
Rosca M20. Torque de
instalación: 30 -35 lbf-pie (40-
50 N-m)

T-11A

2.5 gpm (10 L/min.)

1 unidad

- Válvula anti-retorno con flujo libre de nariz (1) a lado (2):

Código Sun Hydraulics :	CXFA-XAN
Cartucho de la serie 2:	Hexágono 1-1/8" (28,6 mm), Rosca 1" – 14 UNS. Torque de instalación: 45-50 lbf-pie (60- 70 N-m)
Tipo de cavidad:	T-5A
Capacidad:	40 gpm (160 L/min.)
Unidades a utilizar:	3 unidades

- Válvula de retención pilotada:

Código Sun Hydraulics:	CKGB-XCN
Cartucho de la serie 3:	Hexágono 1-1/4" (31.8 mm), Rosca M36. Torque de instalación: 150-160 lbf-pie (200-215 N-m)
Tipo de cavidad:	T-17A
Capacidad:	60 gpm (240 L/min.)
Unidades a utilizar:	2 unidades

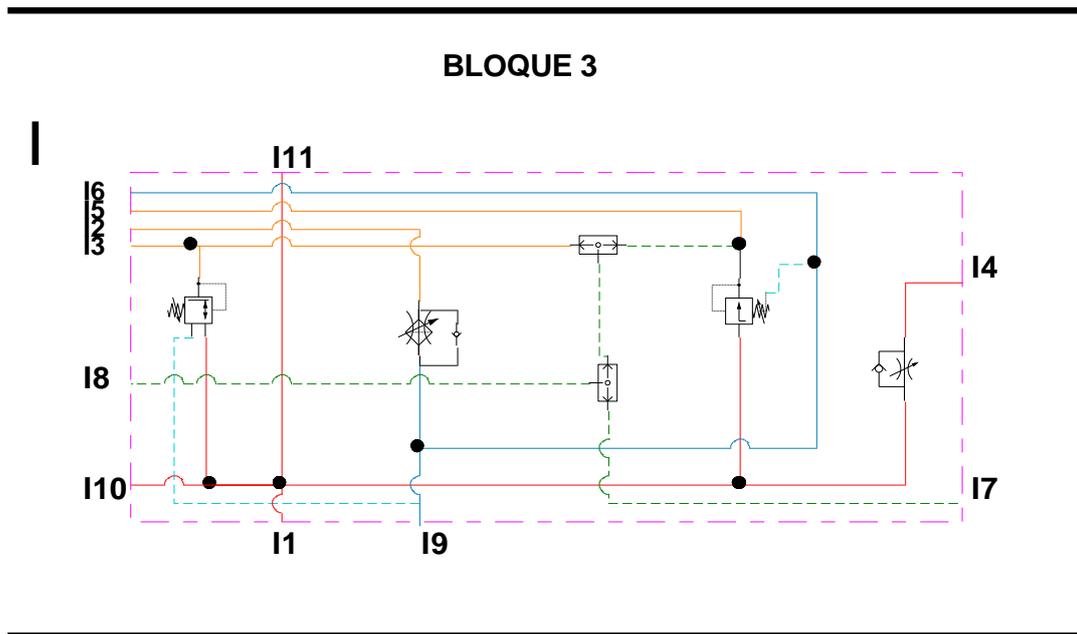
- Válvula de secuencia de acción directa con control de flujo inverso:

Código Sun Hydraulics:	SCGA-LAN
Cartucho de la serie 3:	Hexágono 1-1/4" (31.8 mm), Rosca M36. Torque de instalación: 150-160 lbf-pie (200-215 N-m)
Tipo de cavidad:	T-17A
Capacidad:	60 gpm (240 L/min.)
Unidades a utilizar:	2 unidades

- Válvula de contrapeso de capacidad estándar:

Código Sun Hydraulics:	CBGH-LJN
Cartucho de la serie 3:	Hexágono 1-1/4" (31.8 mm), Rosca M36. Torque de instalación: 150-160 lbf-pie (200-215 N-m)
Tipo de cavidad:	T-17A
Capacidad:	60 gpm (240 L/min.)
Unidades a utilizar:	2 unidades

Fig. 3.32. Configuración del bloque hidráulico N° 3.



Análogamente de la misma manera se puede trabajar para la fabricación del bloque hidráulico N° 3, para ello se identifican las válvulas a usar, según *Sun Hydraulics* se tiene los siguientes modelos:

Fig. 3.33. PBDB-LAN T-11A (1 unidad).

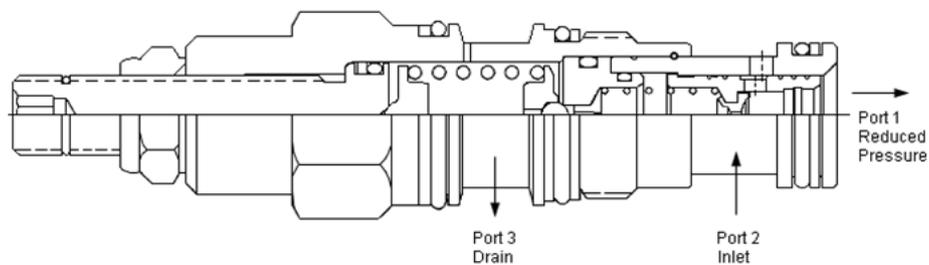


Fig. 3.34. CSAD-XXN T-11A (2 unidades).

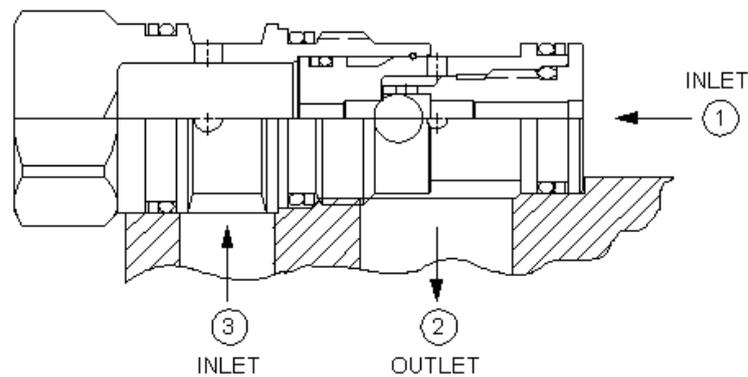


Fig. 3.35. PPFB-LAN T-2A (1 unidad).

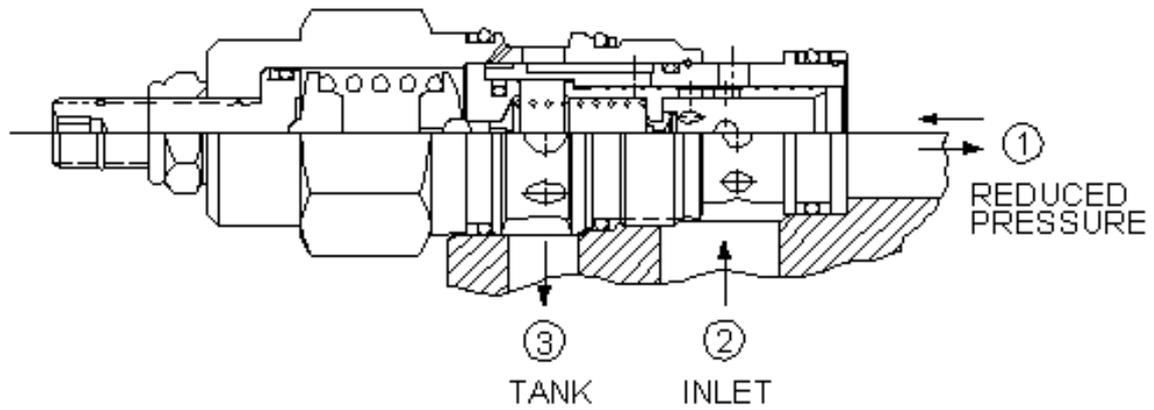


Fig. 3.36. FDCB-LAN T-5A (1 unidad).

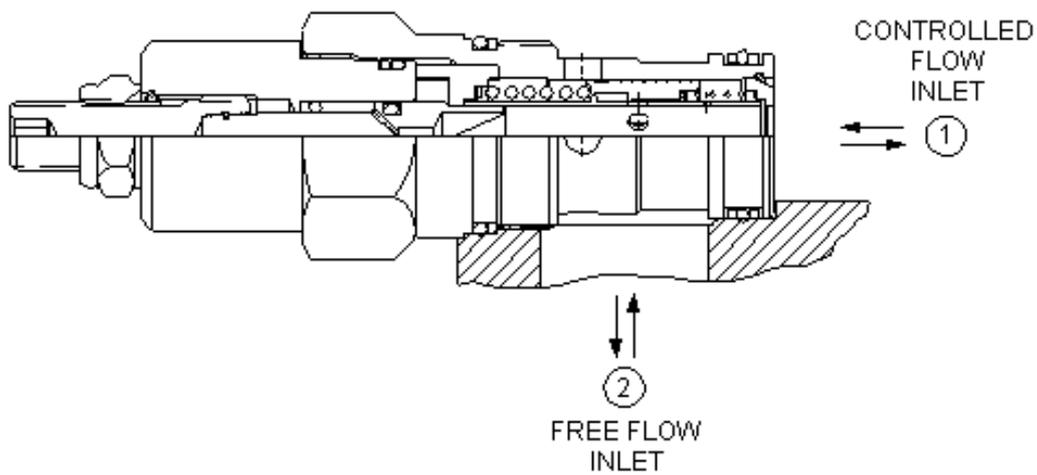
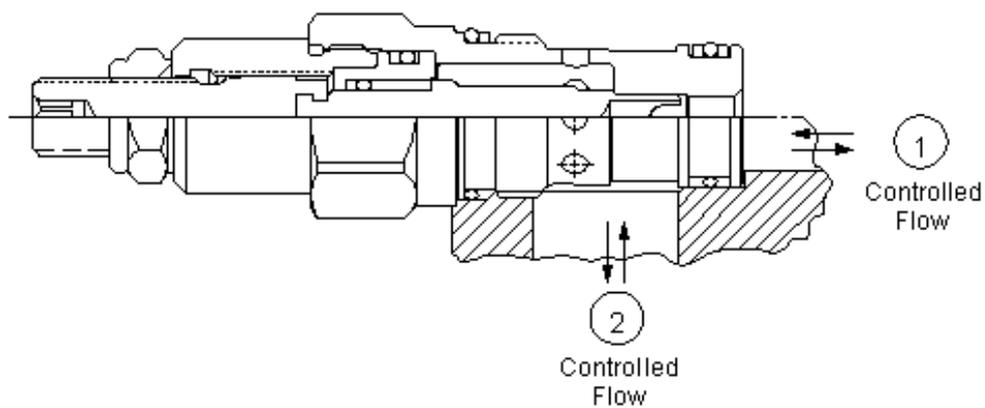


Fig. 3.37. NFCC-HCN T-13A (1 unidad).



- Válvula reductora de presión de mando indirecto:

Código Sun Hydraulics:	PBDB-LAN
Cartucho de la serie 1:	Hexágono 7/8" (22,2 mm), Rosca M20. Torque de instalación: 30 -35 lbf-pie (40- 50 N-m)
Tipo de cavidad:	T-11A
Capacidad:	10 gpm (40 L/min.)
Unidades a utilizar:	1 unidad

- Válvula de doble efecto con señal en el puerto 2:

Código Sun Hydraulics:	CSAD-XXN
Cartucho de la serie 1:	Hexágono 7/8" (22,2 mm), Rosca M20. Torque de instalación: 30 -35 lbf-pie (40- 50 N-m)
Tipo de cavidad:	T-11A
Capacidad:	2.5 gpm (10 L/min.)
Unidades a utilizar:	2 unidades

- Válvula de alivio reductora de presión/pilotada:

Código Sun Hydraulics:	PPFB-LAN
Cartucho de la serie 2:	Hexágono 1-1/8" (28,6 mm), Rosca 1" – 14 UNS. Torque de instalación: 45-50 lbf-pie (60- 70 N-m)
Tipo de cavidad:	T-2A
Capacidad:	20 gpm (80 L/min.)
Unidades a utilizar:	1 unidad

- Válvula reguladora de caudal con control de flujo inverso totalmente ajustable:

Código Sun Hydraulics:	FDCB-LAN
Cartucho de la serie 2:	Hexágono 1-1/8" (28,6 mm), Rosca 1" – 14 UNS. Torque de instalación: 45-50 lbf-pie (60- 70 N-m)
Tipo de cavidad:	T-5A
Capacidad:	12 gpm (45 L/min.)
Unidades a utilizar:	1 unidad

- Válvula aguja totalmente ajustable:

Código Sun Hydraulics:	NFCC-HCN
Cartucho de la serie 1:	Hexágono 7/8" (22,2 mm), Rosca M20. Torque de instalación: 30 -35 lbf-pie (40- 50 N-m)

Tipo de cavidad:	T-13A
Capacidad:	12 gpm (45 L/min.)
Unidades a utilizar:	1 unidad

3.11 Análisis de costos de fabricación

Luego de haber desarrollado el diseño de la perforadora hidráulica y habiendo identificado todas las piezas necesarias para la construcción de la misma, se realizará un costeo global para su fabricación, obteniendo un costo total aproximado de US\$ 40000.

A continuación se presenta un cuadro detallando los costos de los componentes necesarios para el ensamblaje del equipo.

Tabla 3.10. Costo del equipo.

Descripción	Precio (US\$)	Proveedor
Motor diésel Kubota V1505-E3B	7500	Dieselkubota.com.co
Bomba de lodos	1500	www.shopetsonline.com
Bomba de pistones Sauer Danfoss Serie 45 Modelo J60B	1500	POWERMATIC S.A.
Motor hidráulico Eaton 103-1540-S	295.82	POWERMATIC S.A.
Motor hidráulico Eaton 104-1002	419.38	POWERMATIC S.A.
Válvulas hidráulicas (x5)	2000	POWERMATIC S.A.
Manómetros (x2)	500	POWERMATIC S.A.
Fluido hidráulico (x60 gln.)	2000	Mobil Oil del Perú S.R.L
Estanque hidráulico	250	Taller Local Certificado
Estanque diésel	150	Taller Local Certificado
Intercambiador de calor	800	Radiadores Arnao Industrial S.A.C.
Batería de 75 amperes	100	TODO BATERIAS PERU SAC
Estructura de la viga bastidor - carro deslizante- sistema de empuje y arrastre	18000	Taller Local Certificado
Estructura de soporte y transporte de la máquina	2500	XTREME MOTORS AUTO SALES S.A.C
Otros (pernería, bujes, mangueras, sellos, etc)	2000	Proveedores locales
Costo Total de fabricación	39515.2	

Capítulo 4

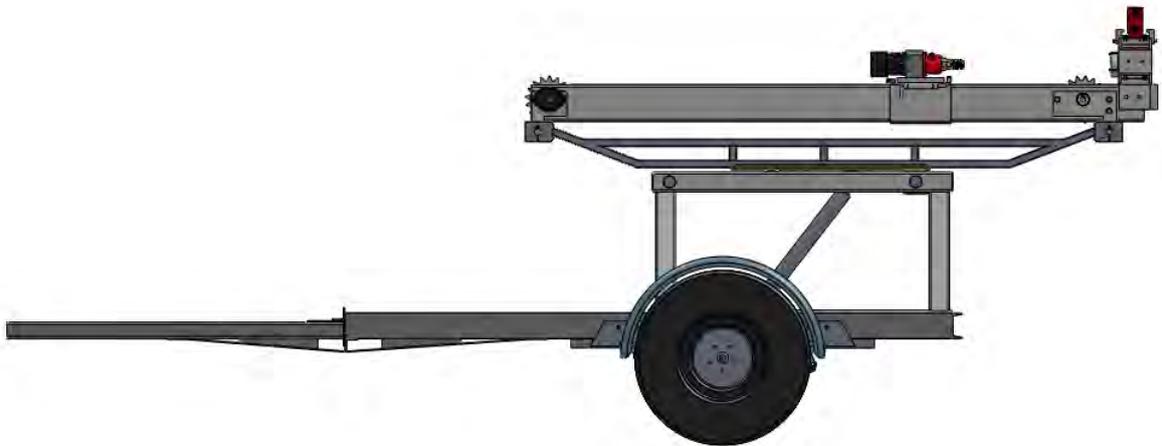
Verificación de diseño de la perforadora hidráulica

Este capítulo contiene los resultados obtenidos al usar el método de elementos finitos al análisis estructural de algunos componentes de la perforadora hidráulica (Fig. 4.1). Las condiciones de carga y restricciones al movimiento son las mismas que se consideraron al realizar el cálculo analítico de los esfuerzos en el capítulo precedente.

Fig. 4.1. Perforadora hidráulica.



Fig. 4.2. Vista lateral de la perforadora hidráulica.



4.1 Análisis del pin pivote

Según la condición crítica, el pin soporta una carga de 44.51 kN con una inclinación de 41° repartidos equitativamente en 2 zonas de apoyos. El material considerado en el análisis es el acero AISI 4340 normalizado.

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340 normalizado.

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad	205 GPa
Coefficiente de Poisson	0.32
Límite elástico	710 MPa
Resistencia última	1110 MPa

Fig. 4.3. Condiciones de frontera del pin.

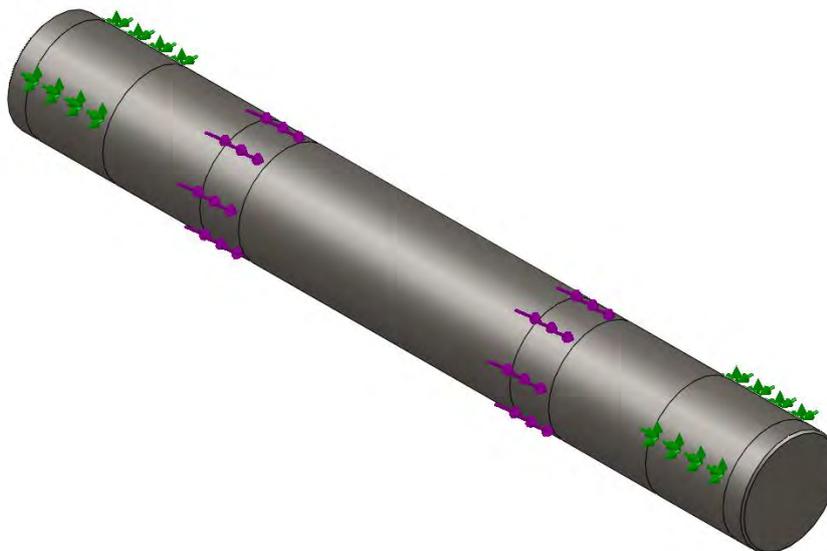


Fig. 4.4. Distribución de esfuerzos en el pin.

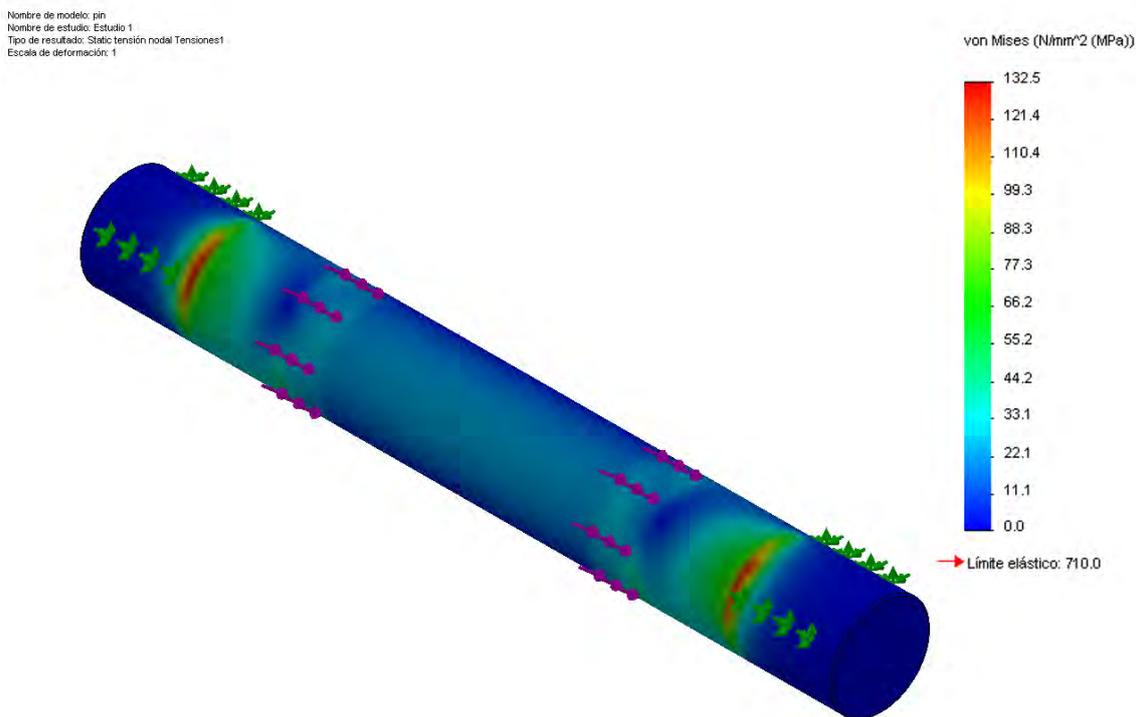


Fig. 4.5. Desplazamientos en el pin.

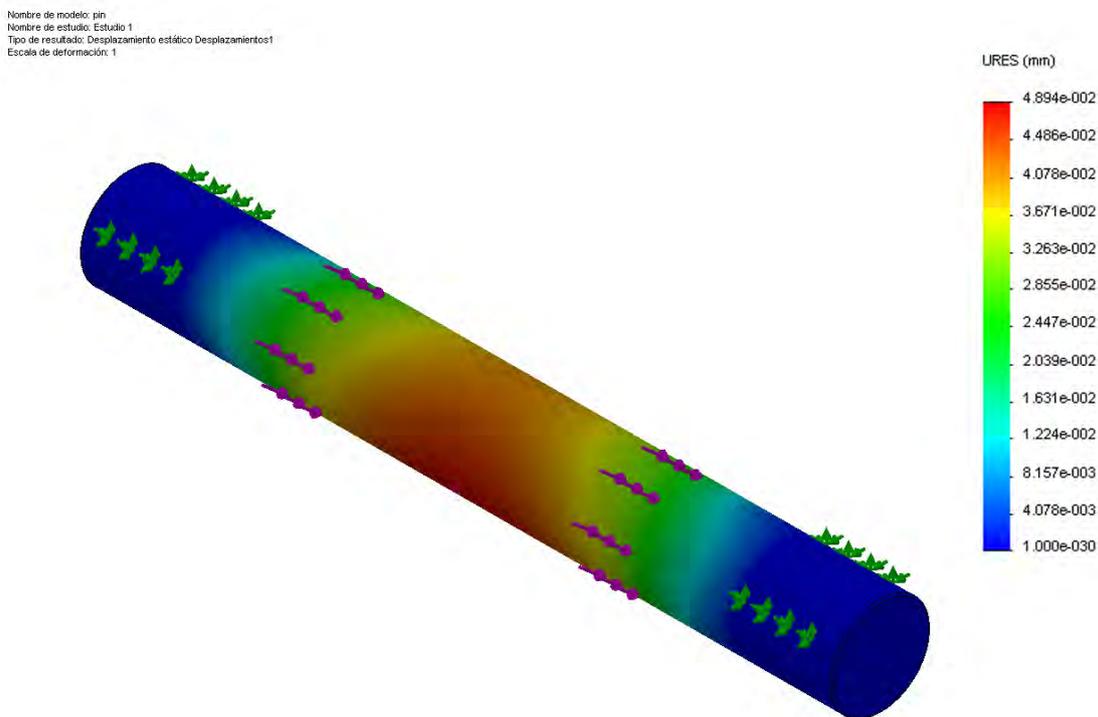
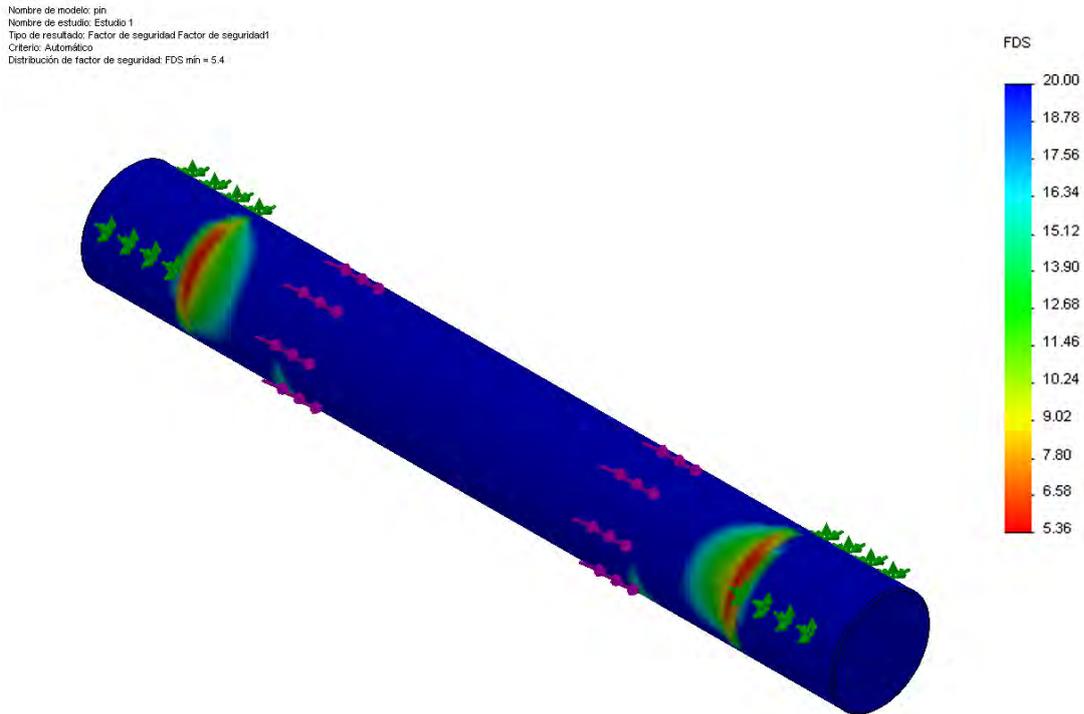


Fig. 4.6. Distribuciones de factores de seguridad en el pin.



En este caso los resultados del análisis arrojaron un mínimo factor de seguridad de 5.36, una máxima deformación de 0.0489 mm y el esfuerzo máximo según el criterio de *Von Mises* de 132.5 MPa .

4.2 Análisis de la viga

Para la viga (ASTM A36) se han analizado 4 casos, los cuales fueron descritos en la sección 3.2.3.1, obteniendo la siguiente tabla de resultados:

Tabla 4.2. Resumen de resultados para la viga.

Escenario para el carro deslizante	Máximo esfuerzo	Máxima deformación	Mínimo Factor de seguridad
Cuando está en la parte superior de la viga (descendiendo)	-41.1 MPa	0 m	5.48
Cuando está en la parte central de la viga (descendiendo)	-22.8 MPa	0 m	10.95
Cuando está en la parte inferior de la viga (descendiendo)	-45.4 MPa	0 m	9.39
Cuando está en la parte superior de la viga (ascendiendo)	29.5 MPa	0 m	8.5

4.2.1 El carro deslizante se encuentra en la parte superior de la viga

Fig. 4.7. Distribución de esfuerzos sobre la viga.

Nombre de modelo: Caso1
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Tensión axial y de flexión Tensiones1
 Escala de deformación: 1

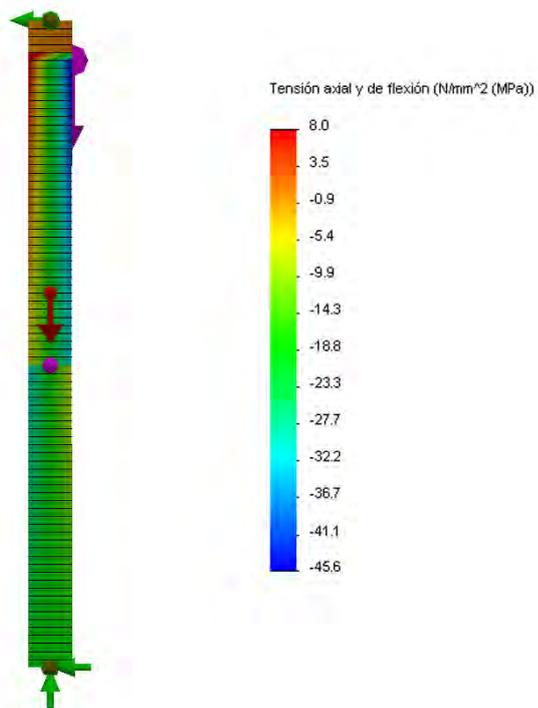


Fig. 4.8. Desplazamientos sobre la viga.

Nombre de modelo: Caso1
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
 Escala de deformación: 368.323

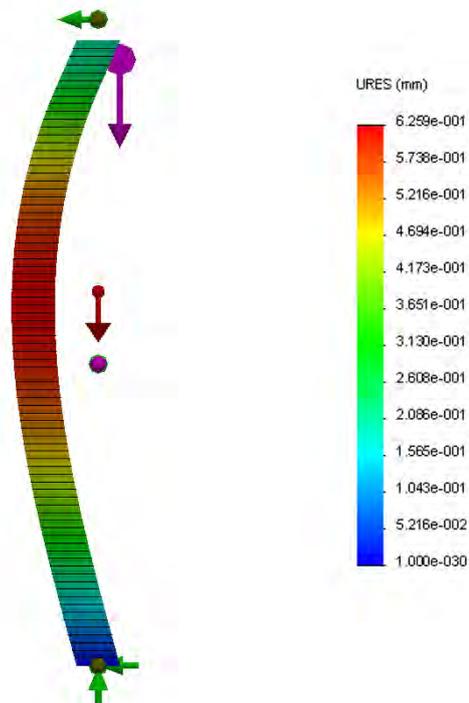


Fig. 4.9. Factor de seguridad sobre la viga.

Nombre de modelo: Caso1
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 5.5

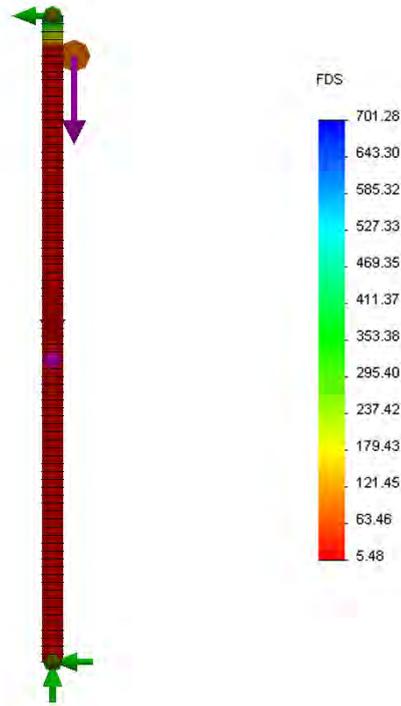


Fig. 4.10. Diagrama de fuerza axial.

Nombre de modelo: Caso1
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos2

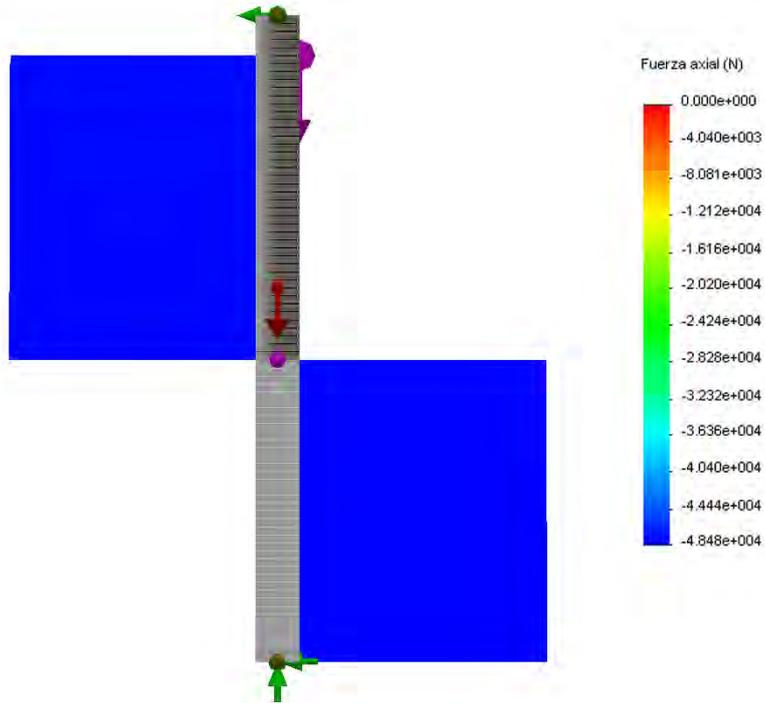


Fig. 4.11. Diagrama de fuerzas cortantes.

Nombre de modelo: Caso1
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos5

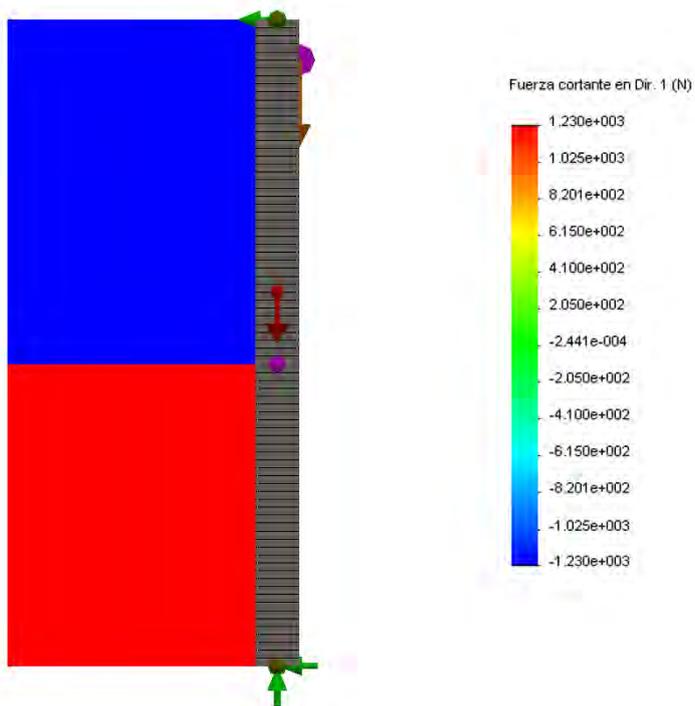
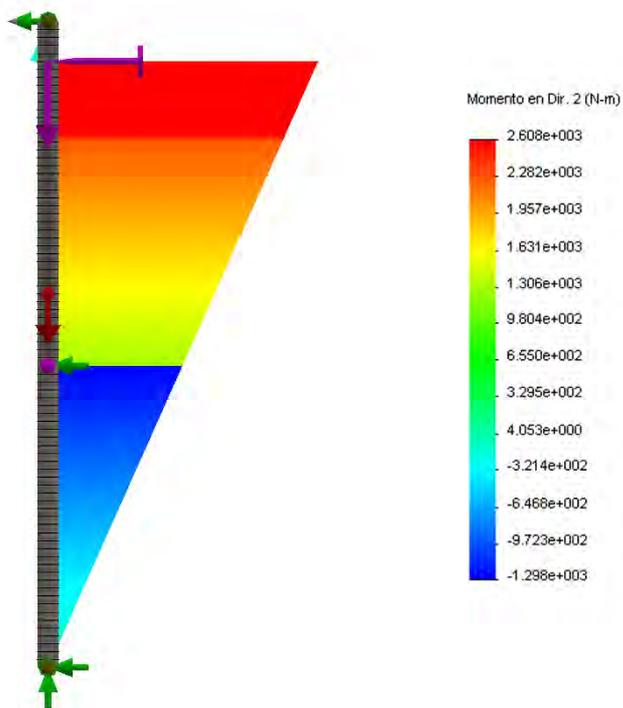


Fig. 4.12. Diagrama de momentos flectores.

Nombre de modelo: Caso1
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos3



4.2.2 El carro deslizante se encuentra en el centro de gravedad de la viga

Fig. 4.13. Distribución de esfuerzos sobre la viga.

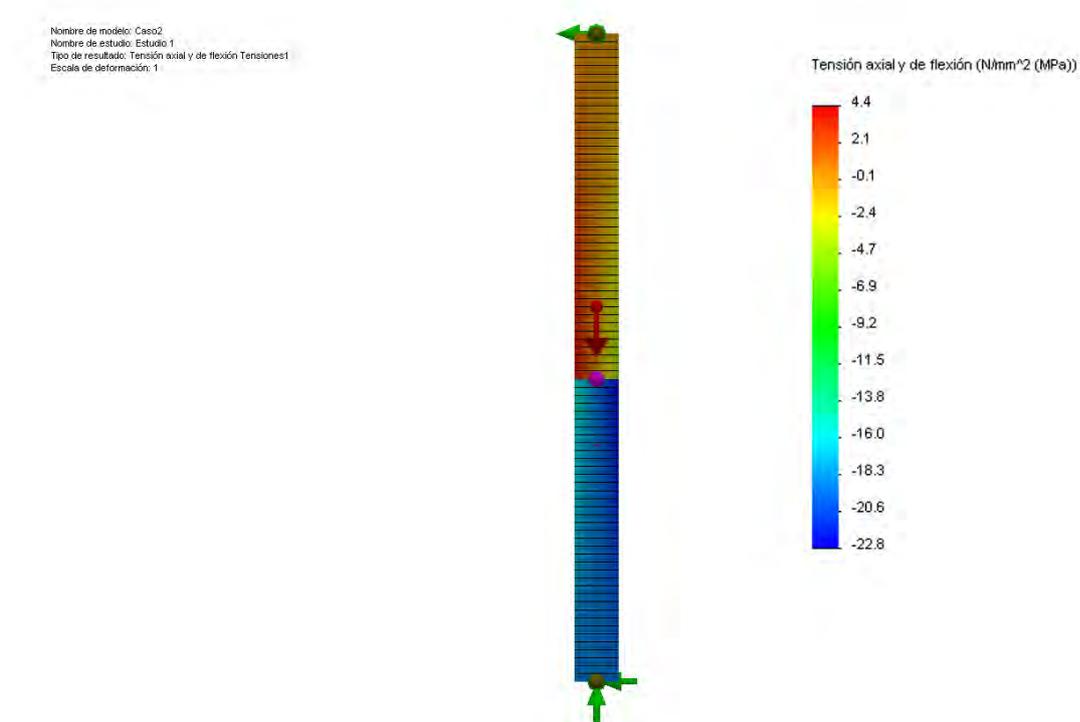


Fig. 4.14. Desplazamientos sobre la viga.



Fig. 4.15. Factor de seguridad sobre la viga.

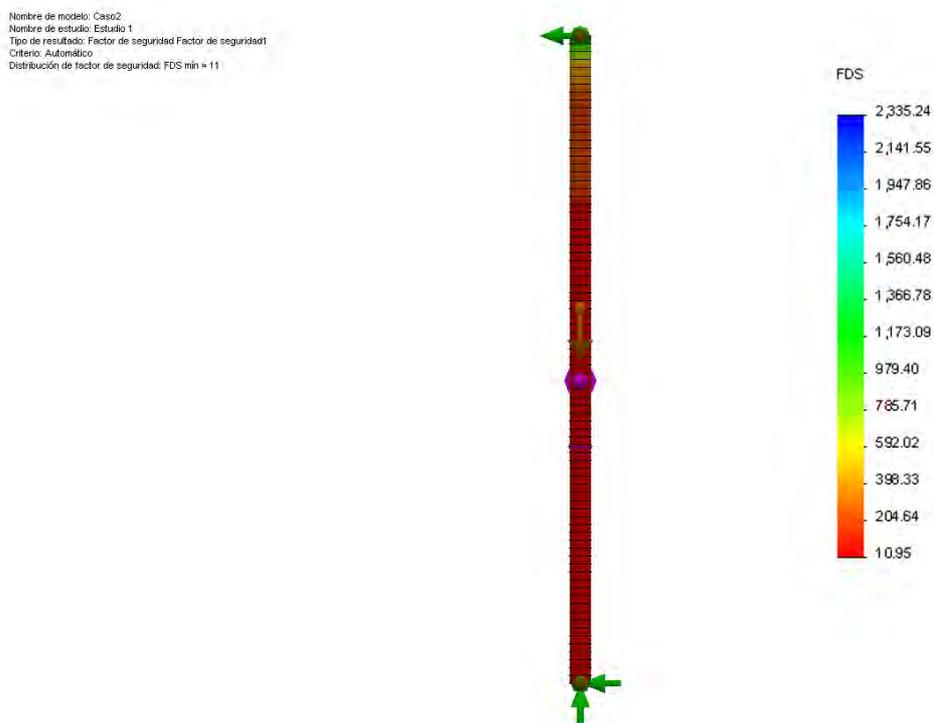


Fig. 4.16. Diagrama de fuerza axial.

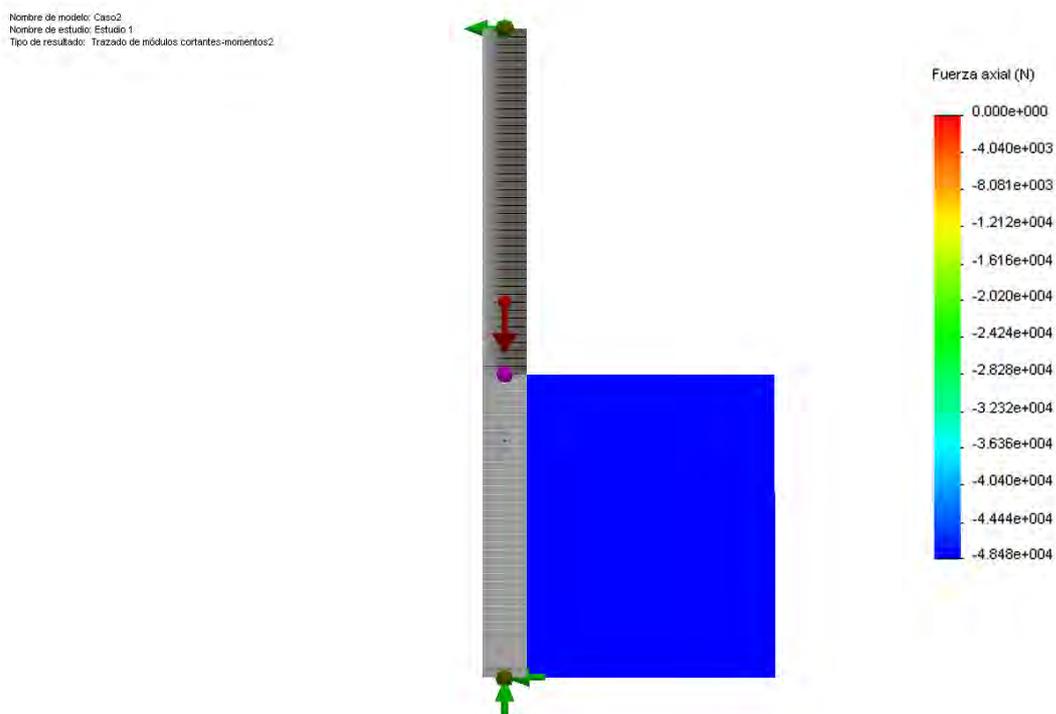


Fig. 4.17. Diagrama de fuerzas cortantes.

Nombre de modelo: Caso2
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos5

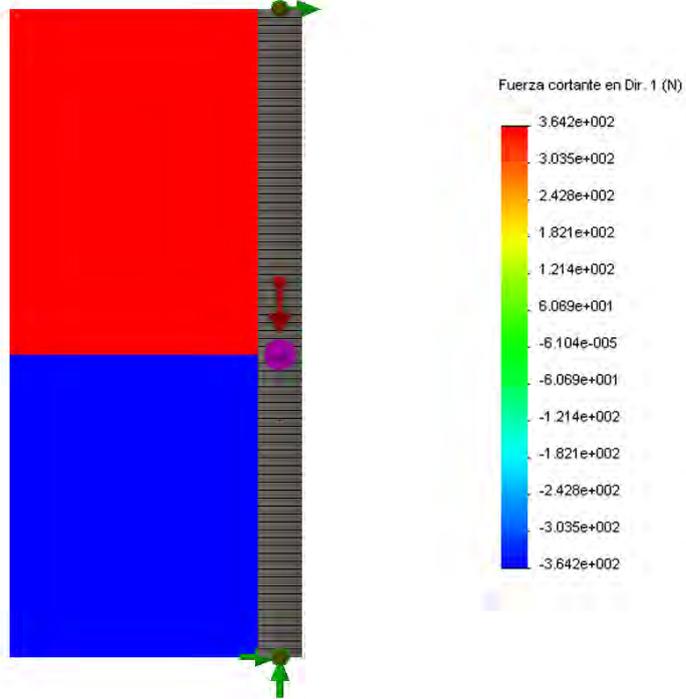
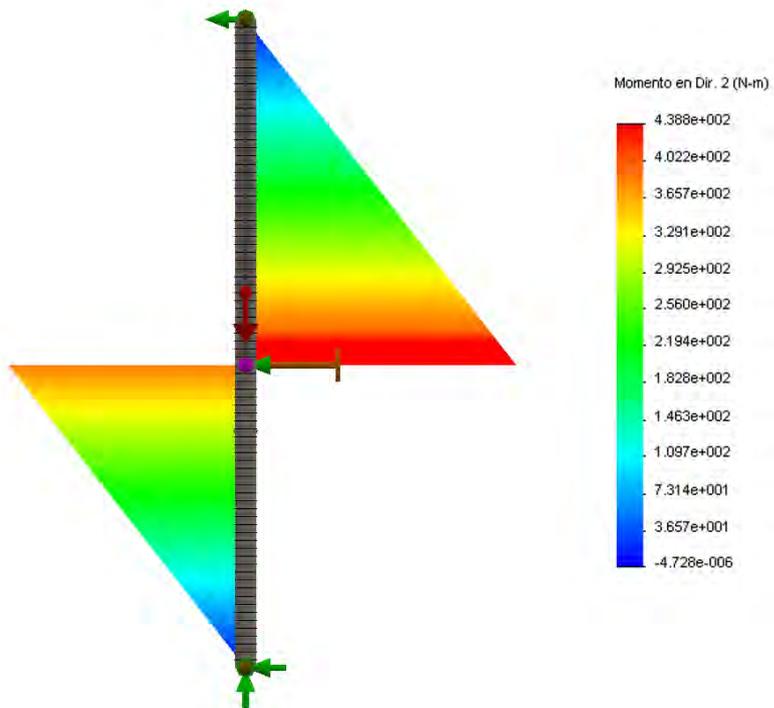


Fig. 4.18. Diagrama de momentos flectores.

Nombre de modelo: Caso2
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos3



4.2.3 El carro deslizante se encuentra en la parte inferior de la viga

Fig. 4.19. Distribución de esfuerzos sobre la viga.

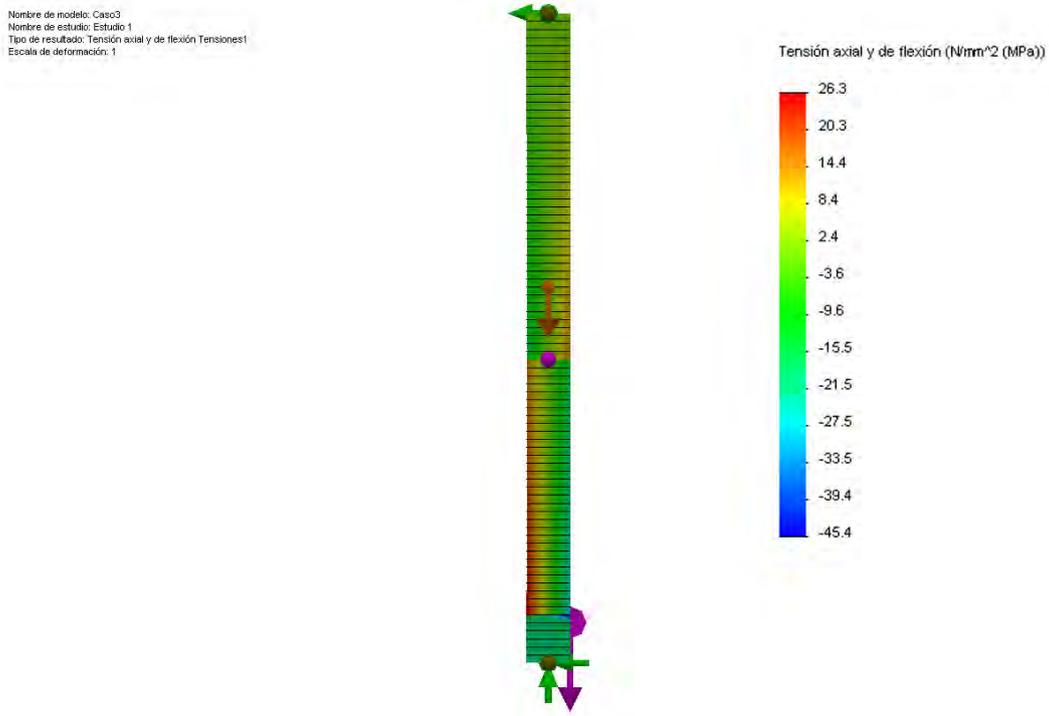


Fig. 4.20. Desplazamientos sobre la viga.

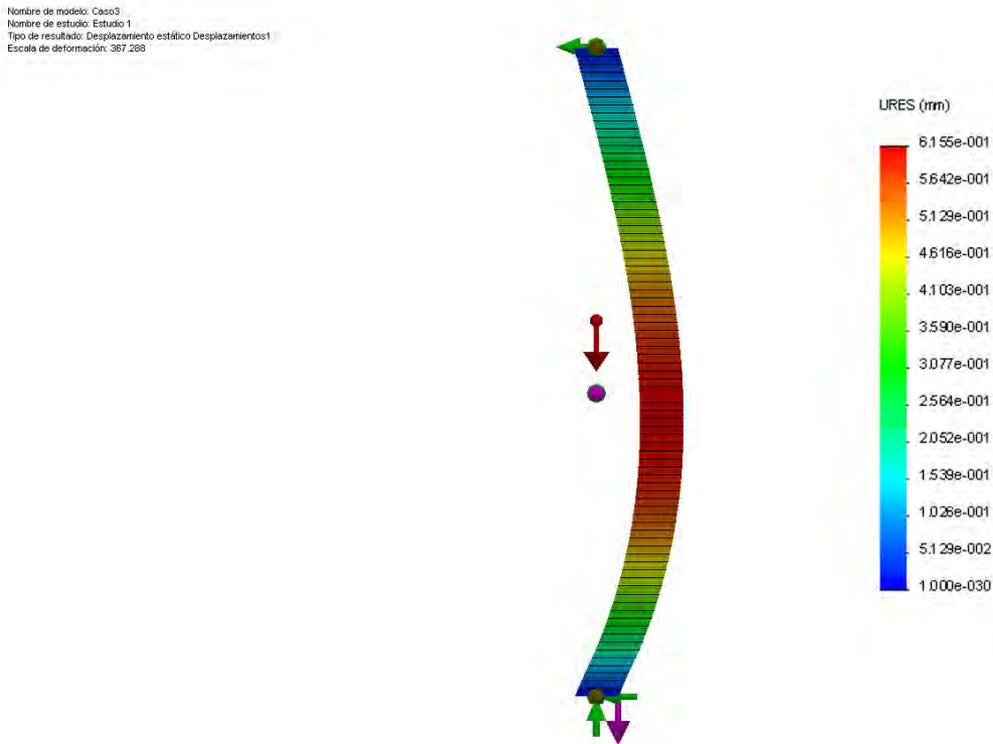


Fig. 4.21. Factor de seguridad sobre la viga.

Nombre de modelo: Caso3
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS min = 9.4

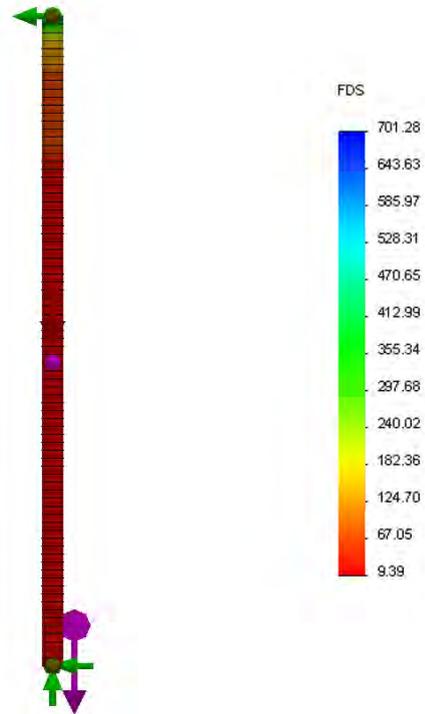


Fig. 4.22. Diagrama de fuerza axial.

Nombre de modelo: Caso3
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos2

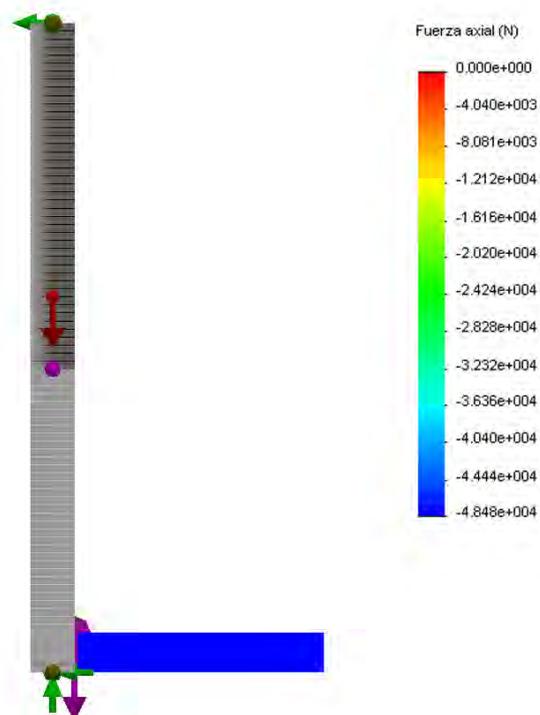


Fig. 4.23. Diagrama de fuerzas cortantes.

Nombre de modelo: Caso3
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos5

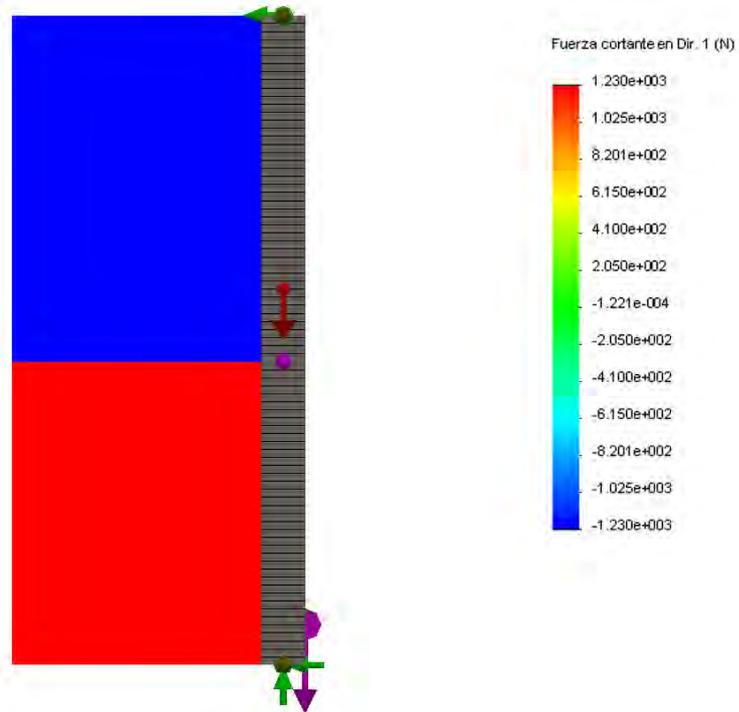
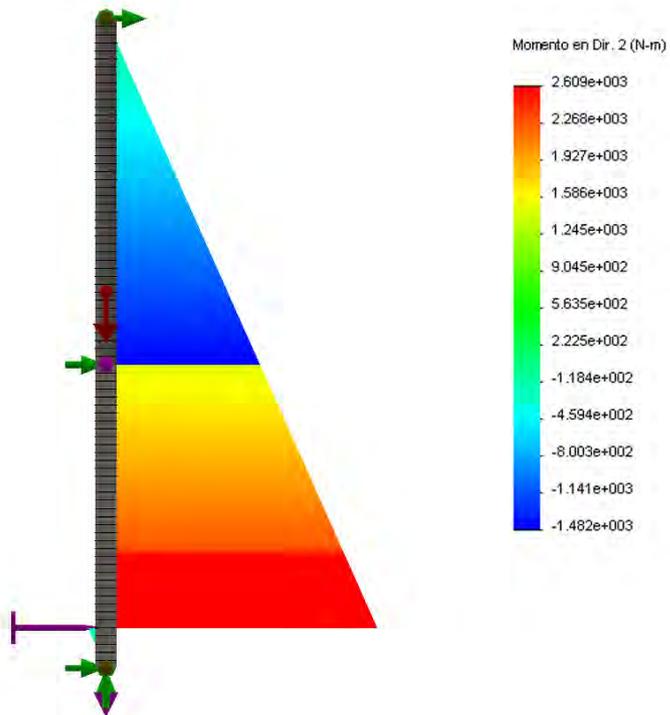


Fig. 4.24. Diagrama de momentos flectores.

Nombre de modelo: Caso3
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos3



4.3 El carro deslizante se encuentra en la parte superior de la viga cuando éste asciende

Fig. 4.25. Distribución de esfuerzos sobre la viga.

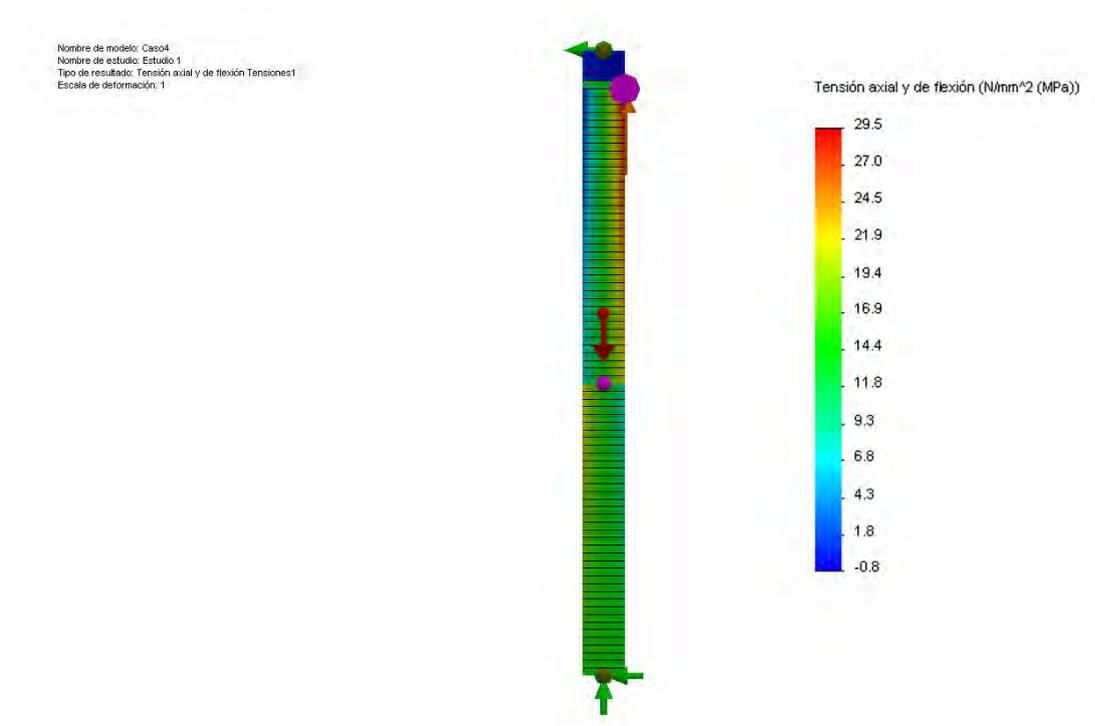


Fig. 4.26. Desplazamientos sobre la viga.

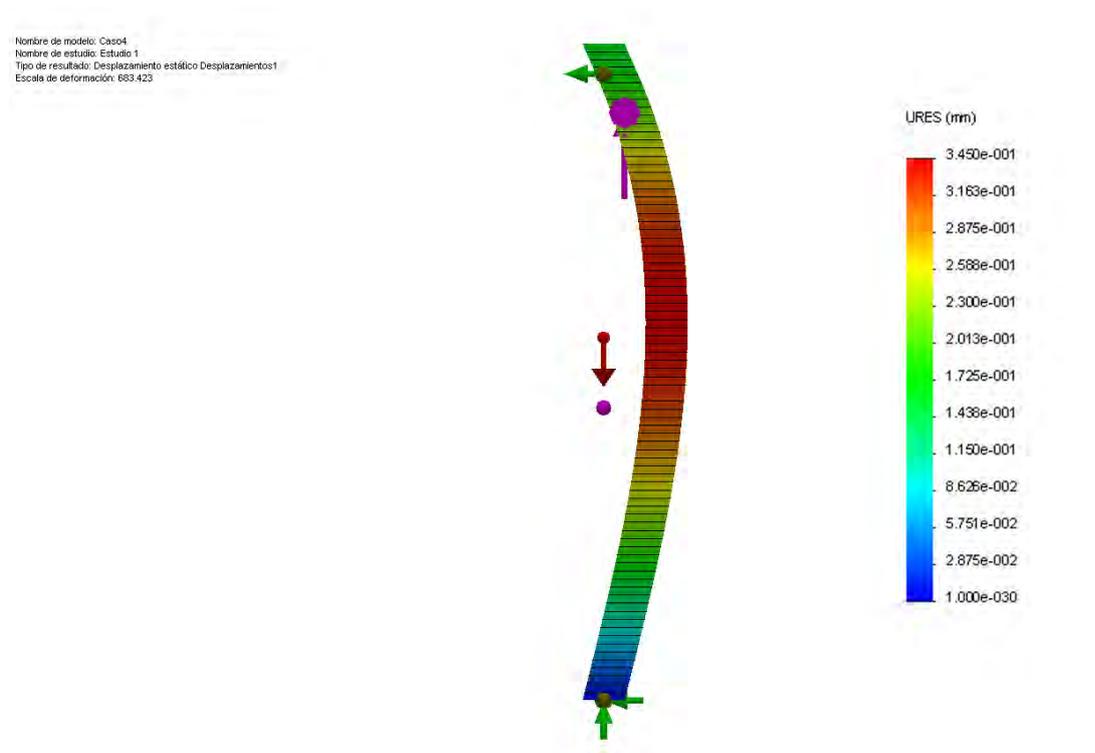


Fig. 4.27. Factor de seguridad sobre la viga.

Nombre de modelo: Caso4
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 8.5

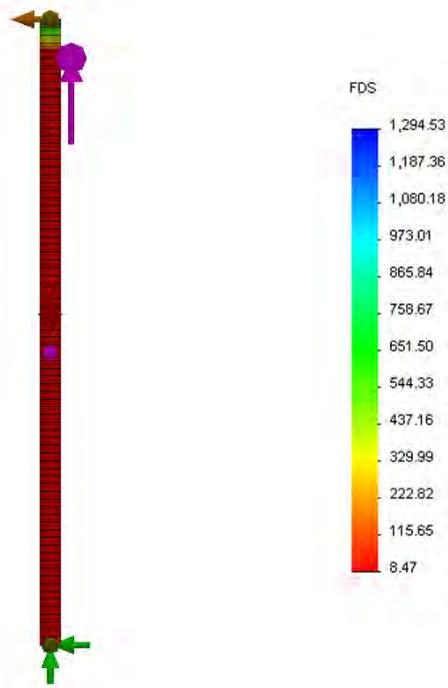


Fig. 4.28. Diagrama de fuerza axial.

Nombre de modelo: Caso4
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos2

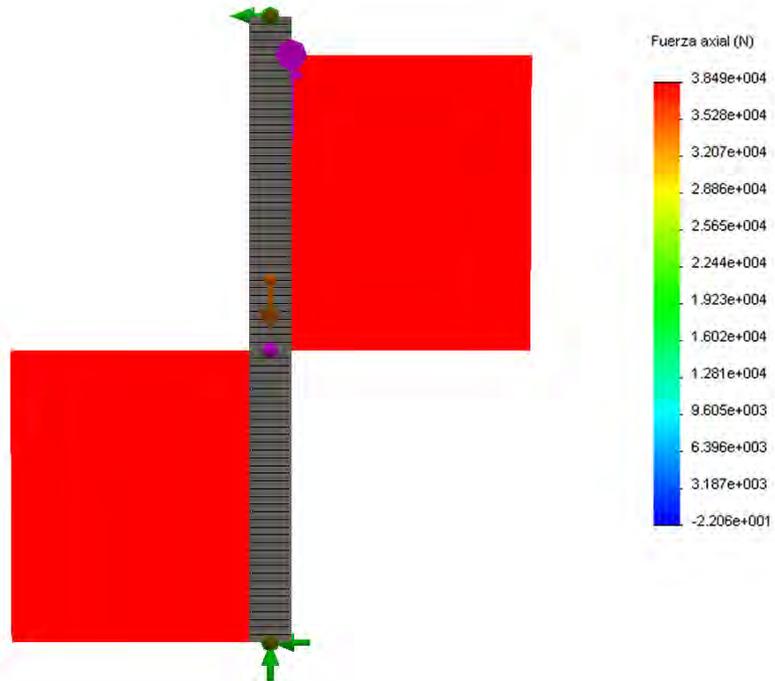


Fig. 4.29. Diagrama de fuerzas cortantes.

Nombre de modelo: Caso4
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos5

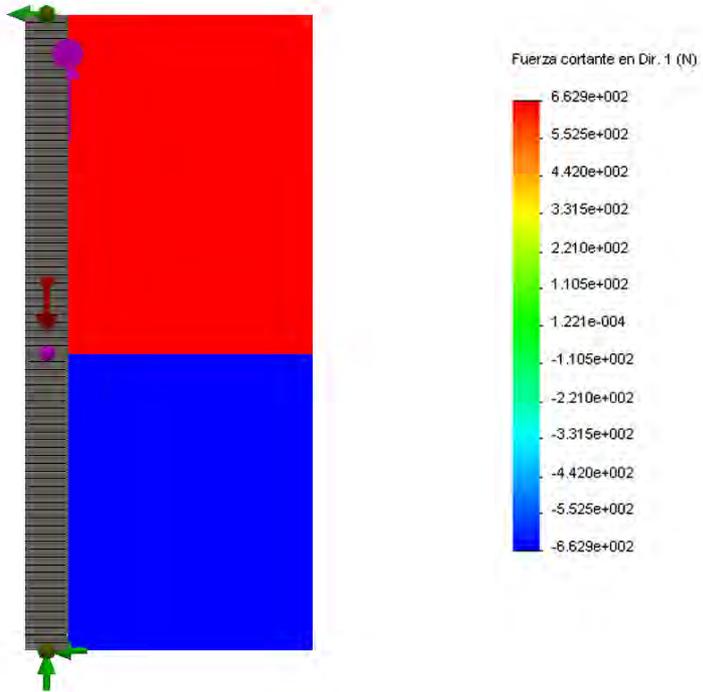
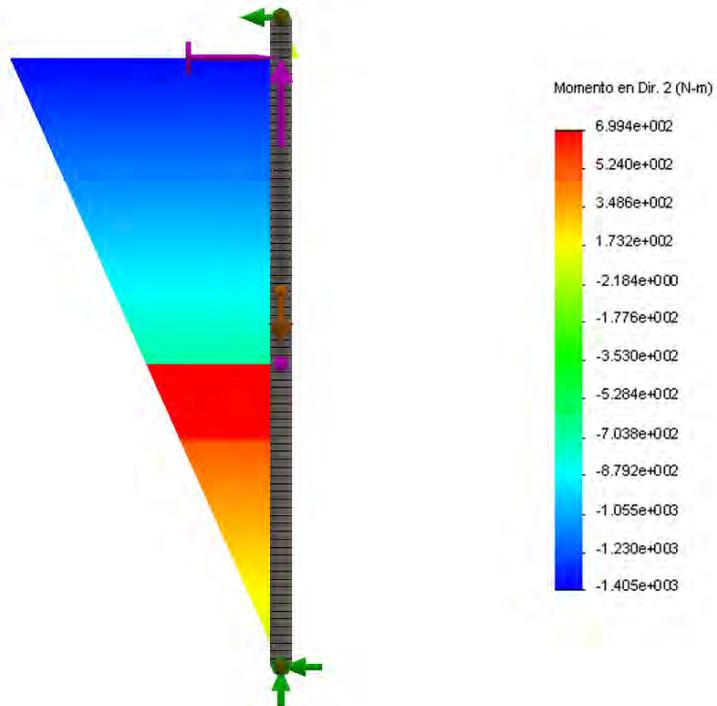


Fig. 4.30. Diagrama de momentos flectores.

Nombre de modelo: Caso4
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Trazado de módulos cortantes-momentos3



4.4 Sarta de perforación

La sarta de perforación tiene una longitud de 150 m, sin embargo en esta sección solo se ha considerado analizar el tramo final, el cual presenta el caso de carga más crítico.

Fig. 4.31. Condiciones de frontera sobre la sarta de perforación.

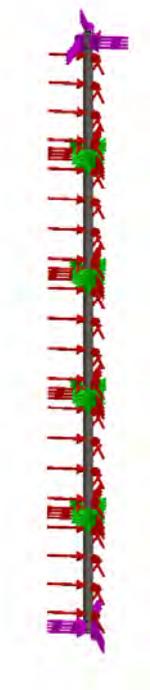


Fig. 4.32. Distribución de esfuerzos en la sarta de perforación.

Nombre de modelo: tubo
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 1

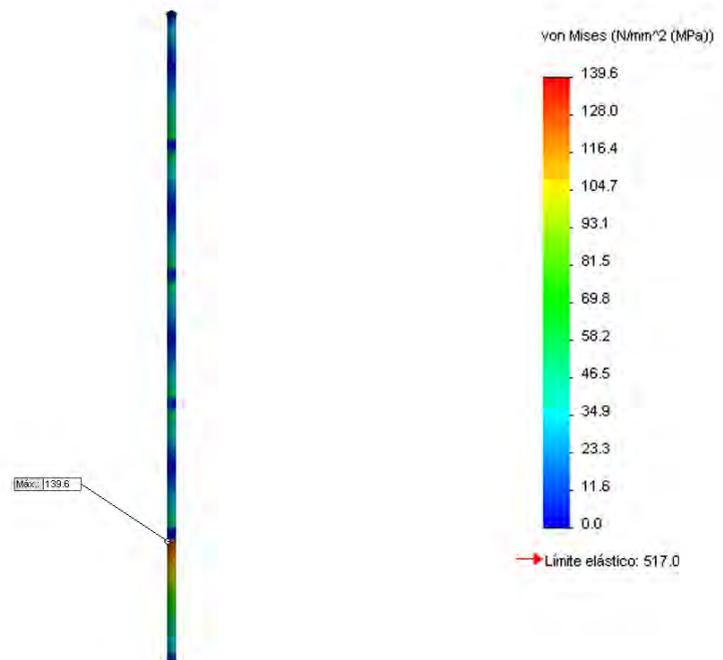


Fig. 4.33. Desplazamientos en la sarta de perforación.

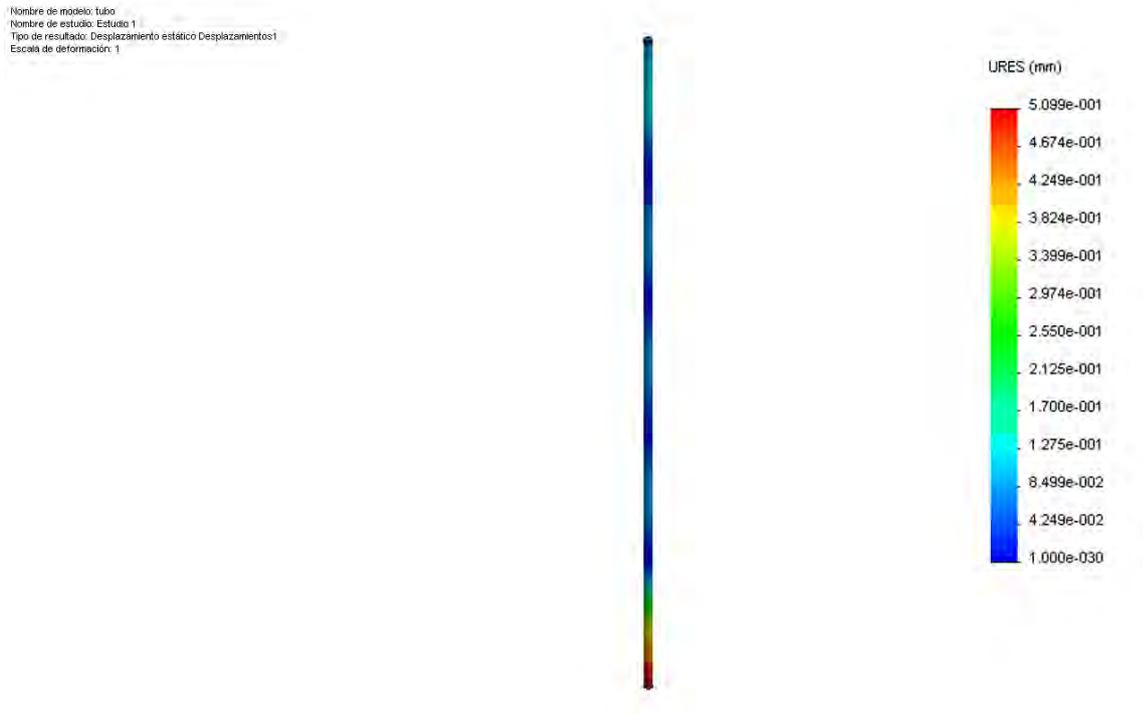
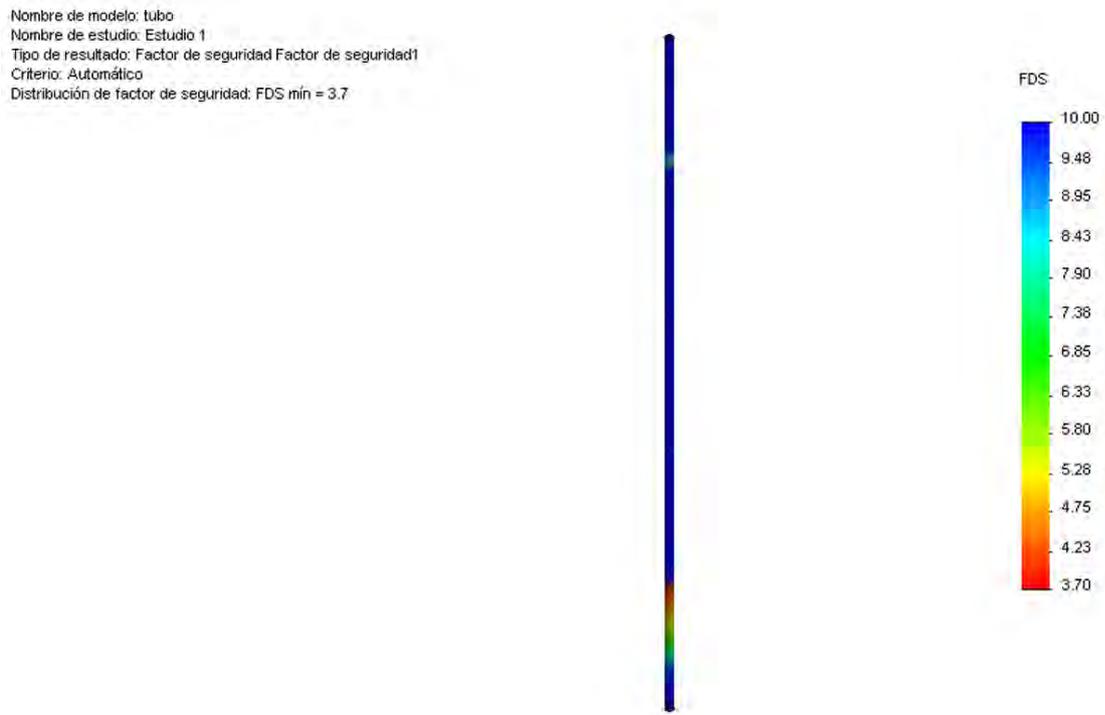


Fig. 4.34. Factor de seguridad sobre la sarta de perforación.



4.5 Estructura soporte

La estructura de soporte está conformada por el remolque y la estructura patín, se analizará el comportamiento estructural estático en la condición más desfavorable, es decir, cuando la base deslizante o collarín se encuentra en la parte superior de la viga bastidor en condición de operación.

Fig. 4.35. Remolque y estructura patín.

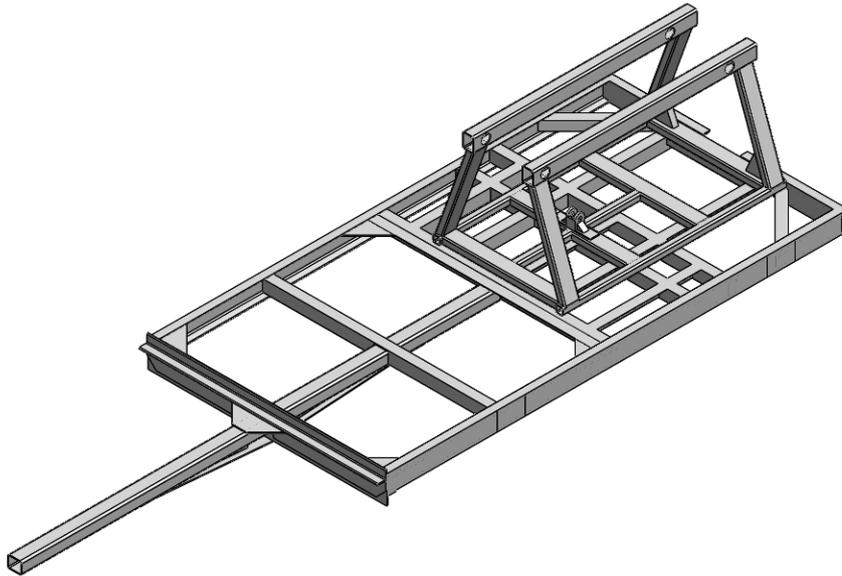


Fig. 4.36. Condiciones de frontera sobre el remolque y la estructura patín.

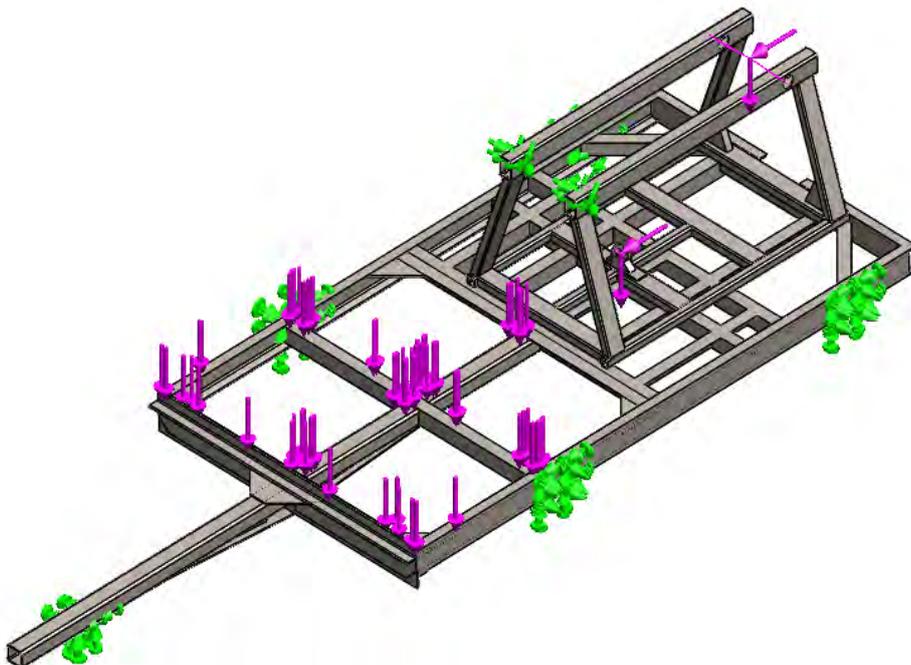


Fig. 4.37. Distribución de esfuerzos en la estructura de soporte.

Nombre de modelo: Pieza3
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 1

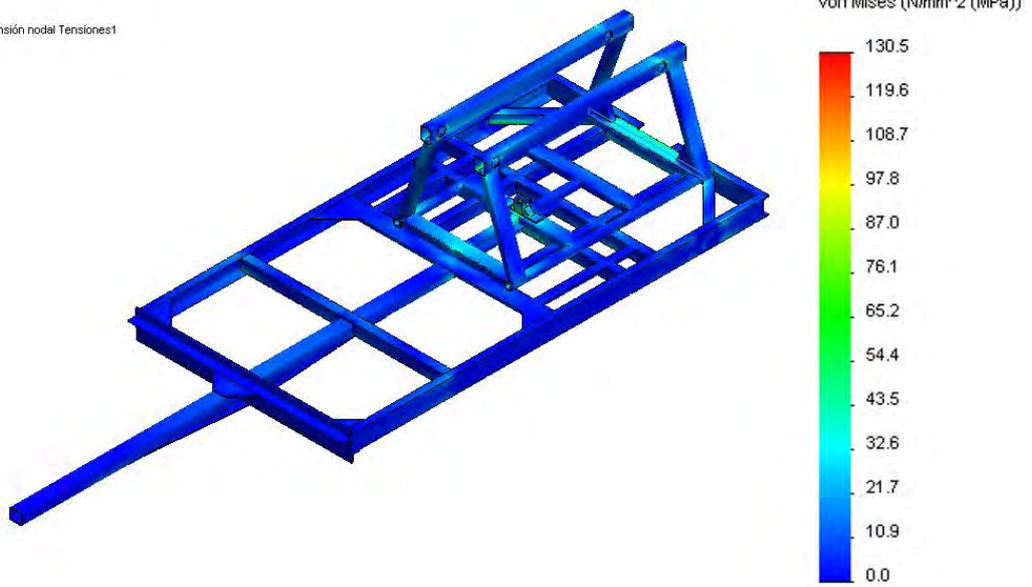


Fig. 4.38. Desplazamientos en la estructura de soporte.

Nombre de modelo: Pieza3
 Nombre de estudio: Estudio 1
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
 Escala de deformación: 1

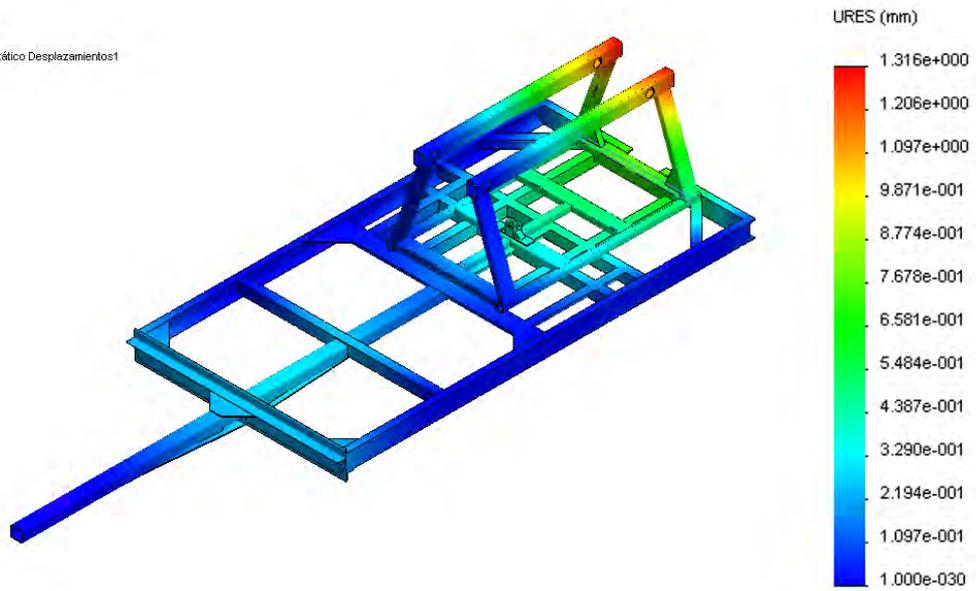
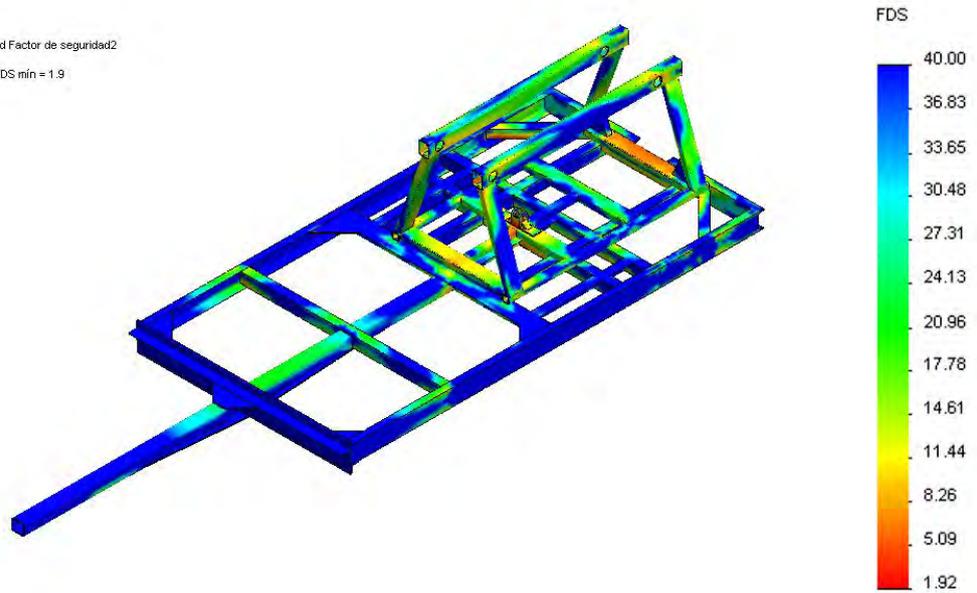


Fig. 4.39. Factor de seguridad en la estructura de soporte.

Nombre de modelo: Pieza3
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad2
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.9



Conclusiones

1. El diseño la perforadora hidráulica para pozos de agua cumple con las condiciones necesarias para realizar satisfactoriamente la perforación sobre terrenos de suelo blando hasta una profundidad máxima de 150 m y un diámetro máximo de 60.33 mm.
2. El diseño contempla factores de seguridad mayores o iguales a 2, lo que permitirá desarrollar un trabajo confiable, además se podrá realizar operaciones durante largos periodos de tiempo sin necesidad de realizar la parada del equipo.
3. Por su diseño y tamaño la perforadora hidráulica será de fácil desplazamiento hacia el lugar de trabajo por su bajo peso y tamaño. Además que ha sido de manera sencilla sobre una estructura que cumpla con las condiciones necesarias para soportar el trabajo a realizar.
4. El diseño del Sistema Hidráulico incluye la selección de los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la perforadora.
5. Para la determinación del costo estimado de la inversión se ha llegado a un monto total de US\$ 40000. Se hace mención que dicho costo es para la fabricación de una máquina, en el cual no se considera el costo de diseño y operación, adicionalmente a esto, el costo total disminuiría considerablemente al determinarse el lote óptimo de producción con lo que se reduciría los costos de materiales y de mano de obra.
6. Es necesario generar un plan de mantenimiento preventivo para asegurar el buen estado de todos los componentes mecánicos e hidráulicos. De esa manera, ampliar la vida útil del equipo.

Bibliografía

1. Karina Esther García M. *Memoria Hidrogeologica de Piura* . Gobierno Regional de Piura.
2. Pimienta, Jean (1980). *La Captación de Aguas Subterráneas*. Editores Técnicos Asociados S.A.
3. Ministerio de Agricultura (2002). *Inventario de fuentes de aguas subterráneas en el Valle Piura*. Accesible en:
http://www.ana.gob.pe/media/295549/fuente_agua_subterranea_alto_piura.pdf
4. Rangel, Yajaira (2010). *Barrena e hidráulica de perforación*.
5. López Jimeno, Emilio García Bermudez, Pilar López Jimeno, Carlos (2003). *Manual de Perforación y voladura de rocas*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
6. America Institute of Steel Construction (1994). *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design*, Third Edition (LRFD 3rd Edition)
7. R.G. Hibbeler (2005). *Mecánica de Materiales (Sexta Edición)*. Pearson Prentice Hall.
8. Shigley, Joseph Edward (1998). *Diseño en ingeniería mecánica*. México. McGraw-Hill D.L. 150-200.
9. John T. DeWolf (2004). *Mecánica de Materiales*. -
10. Luis Villaseca Carrasco, “*Diseño y construcción de perforadora manual para pozos*”. Tesis de grado. Universidad de Piura.
11. C C “ é y qu p p f ó ” í A b :
https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_extraccion Equipos_Asociados.asp
12. Importancia de los lodos de perforación. En línea Internet. Accesible en:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/128/A5.pdf?sequence=5>

13. Antonio Viedma Robles, Blas Zamora Parra (1997). *Teoría de máquinas hidráulicas*. Universidad de Murcia.
14. Felipe Roca Ravell [1999], *Oleohidráulica básica y diseño de circuitos*, ALFAOMEGA grupo editorial S.A. de C.V., Edición UPC, México.
15. Antonio Serrano Nicolás, [2002], *Oleohidráulica*, McGraw - Hill / Interamericana de España, S.A. U., Segunda edición.
16. Catálogo productos Eaton, En línea internet Junio 2013. Accesible en: <http://hydrliterature.eaton.com/literature/>
17. Catálogo productos Bosch-Rexroth. En línea internet Junio 2013. Accesible en: http://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product_groups/index
18. Catálogo productos Sauer Danfoss. En línea internet Junio 2013. Accesible en: <http://powersolutions.danfoss.com/Literature/index.htm>
19. Catálogo productos General Pump. En línea internet Junio 2013. Accesible en: <http://www.generalpump.com/ProductLiterature.asp>
20. Catálogo motores Kubota. En líneas internet Agosto 2013. Accesible en: <http://www.kubotaengine.com/products/engines/vertical-diesel/kubota-super-mini-series>
21. Catálogo productos Parker. En línea internet Agosto 2013. Accesible en: <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.005db0d83405a82228323e10237ad1ca/?vgnextoid=991880961f66e010VgnVCM1000000308a8c0RCRD&vgnnextfmt=ES>
22. Guía de uso de SolidWorks. En línea internet. Enero 2013. Accesible en: <http://www.solidworkstutorials.com>
23. Catálogo de aceites Mobil. En línea internet. Agosto 2013. Accesible en: http://www.mobil.com/Peru-Spanish/Lubes/PDS/GLXXS2CVLMOMobil_Delvac_Hydraulic_10W.aspx