

Estudio de la influencia de la anisotropía de esfuerzos, propiedades elásticas y densidad de lodo en las deformaciones de un pozo vertical

María Katherine Martínez Gutiérrez

María Alejandra Ramírez Avendaño

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

PhD en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento en este trabajo investigativo principalmente a Dios, a sus familiares por el apoyo la guía y el respaldo presentado durante toda la carrera, a la Universidad Industrial de Santander por acogernos durante estos años y a los profesores Jorge Alejandro Mendoza Rizo y Vladimir Merchán cuyos aportes brindaron las bases para que este proyecto se llevase a cabo y por guiarnos durante la realización del mismo.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Marco Teórico.....	13
1.1 Pozo.....	13
1.1.1 Pozos verticales.....	14
1.2 Anisotropía.....	15
1.3 Deformación	15
1.4 Esfuerzo	16
1.4.1 Esfuerzos en la tierra antes y después de perforar un pozo	17
1.4.1.1 Esfuerzos in-situ.....	17
1.4.1.2 Esfuerzos después de la perforación.	18
1.5 Propiedades elásticas	18
1.5.1 Relación de Poisson.	19
1.5.2 Módulo de Young.	19
1.6 Permeabilidad	19
1.7 Presión de poros.....	20
1.8 Fluidos de perforación	20
1.9 Geomecánica.....	21
1.10 Teoría de la elasticidad lineal	22

1.11 Plaxis 2D.....	22
1.12 Yacimiento petrolífero Vaca Muerta	23
2. Metodología	24
2.1 Planteamiento del modelo de análisis	24
2.2 Desarrollar el montaje de los modelos.....	25
2.2.1 Diseño del “Modelo Base”	25
2.2.2 Fases del modelo.....	25
2.2.3 Diseño de los modelos de análisis.	25
2.2.3.1 Modelo 1: variación de esfuerzo horizontal SH.	26
2.2.3.2 Modelo 2: Variación de Poisson.	26
2.2.3.3 Modelo 3: variación de Módulo de Young.	27
2.2.3.4 Modelo 4: Variación presión del lodo.	27
3. Análisis e interpretación de resultados	28
3.1 Deformaciones $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto A.....	30
3.2 Deformaciones $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto B.....	30
3.3 Deformaciones $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto C.....	31
3.4 Deformaciones $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto D.....	31
3.5 Deformación debido a P_w , E, Poisson y Anisotropía de esfuerzos	32
4. Conclusiones.....	35
Referencias Bibliográficas	37
Apéndices.....	39

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso de deformación de un elemento.	16
Figura 2. Esfuerzos in-situ	17
Figura 3. Puntos de estudio.....	29
Figura 4. Deformaciones del Modelo Base.....	29
Figura 5. Gráfica $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto A	30
Figura 6. Gráfica $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto B	30
Figura 7. Gráfica $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto C.....	31
Figura 8. Gráfica $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto D	31
Figura 9. Gráfica deformación debido a P_w	32
Figura 10. Gráfica deformación debido a la relación de Poisson	33
Figura 11. Gráfica deformación debido al módulo de Young $[E]$	33
Figura 12. Gráfica deformación debido a la anisotropía de esfuerzos.....	33

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ventajas y desventajas de la perforación de un pozo vertical</i>	14
Tabla 2. <i>Datos del modelo base</i>	24
Tabla 3. <i>Variación de esfuerzos SH</i>	26
Tabla 4. <i>Variación de la relación de Poisson</i>	27
Tabla 5. <i>Variación del Módulo de Young</i>	27
Tabla 6. <i>Variación de la presión de lodo P_w</i>	28

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Configuración inicial	39
Apéndice B Fases del modelo	41
Apéndice C. Tablas de deformación en cada punto.....	43

Resumen

TÍTULO: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA ANISITROPÍA DE ESFUERZOS, PROPIEDADES ELÁSTICAS Y DENSIDAD DE LODO EN LAS DEFORMACIONES DE UN POZO VERTICAL *

AUTORES: María Katherine Martínez Gutiérrez
María Alejandra Ramírez Avendaño**

PALABRAS CLAVE: Software PLAXIS 2D, pozo vertical, anisotropía de esfuerzos, propiedades elásticas, relación de Poisson, módulo de Young, densidad de lodo, modelo elástico lineal, deformación.

DESCRIPCIÓN:

Al momento del diseño de un pozo es necesario identificar si hay factores que en algún momento podrían afectar la estabilidad de este, es así que en este estudio, se realizó una serie de simulaciones numéricas de un pozo vertical mediante el software PLAXIS 2D observando la influencia de la anisotropía de esfuerzos, propiedades elásticas [relación de Poisson y módulo de Young] y la densidad del lodo en la deformación que este presenta en sus paredes, teniendo en cuenta cuatro puntos de estudio situados alrededor del hueco, considerando el modelo constitutivo de la roca como elástico lineal debido a que no se tuvo en cuenta la posible rotura que podría presentar, con el fin de estudiar las deformaciones que cada una de estos factores ocasionaba en las paredes del pozo e identificar la que más contribuía a la deformación de este. Para tal estudio se tomó un modelo base, los datos de dicho modelo pertenecen a un pozo ubicado en el yacimiento petrolífero de Vaca Muerta Argentina debido a que su formación permite la perforación de pozos verticales que son el objeto de estudio de este proyecto, los resultados obtenidos de dicho modelo fueron el referente para observar en cuando difiere la deformación de este con los resultados de los otros modelos.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Abstract

TITLE:STUDY OF THE INFLUENCE OF THEANISTROPY OF STRENGTH, ELASTICPRISITIES AND DEN
SITY OF LODO IN THEDEFORMATIONS OF A VERTICAL WELL*

AUTHORS : María Katerine Martínez Gutiérrez
María Alejandra Ramírez Avendaño**

KEYWORDS: PLAXIS 2D software, vertical well, stress anisotropy, elastic properties, Poisson relationship, Young module, mud density, linear elastic model, deformation.

DESCRIPTION

When designing a well, it is necessary to identify if there are factors that may affect the stability of this study at some point, so in this study, a series of numerical simulations of a vertical well is carried out using the 2D PLAXIS software observing the influence of stress anisotropy, elastic properties [Poisson's ratio and Young's modulus] and the density of the sludge in the deformation it presents on its walls, taking into account four study points located around the hole, the constitutive model of the Rock as linear elastic because it was not successful in considering the possible breakage that could occur, in order to study the deformations that each of these factors caused in the walls of the well and identify the one that most contributes to the deformation of this. For such a study a base model is required, the data of said affected model to a well located in the Vaca Muerta Argentina oilfield because its formation allows the drilling of vertical wells that are the object of study of this project, the results obtained from this model were the benchmark to observe when the deformation of this differs with the results of the other models.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Introducción

En el diseño de un pozo vertical se debe tener en cuenta algunos factores que podrían o no influir en la deformación de las paredes de este, ya sea que estos se den al interior de la roca, como las propiedades elásticas [Coeficiente de Poisson y el Módulo de Young] y la anisotropía que se presenta en los esfuerzos horizontales cuando se hace la excavación, o sea un factor externo como la densidad de lodo que es quien permite contener la pared del pozo.

De esta manera se hace fundamental saber cuál es el factor que de alguna u otra manera afectan más a la deformación de las paredes de dichos pozos, Por tanto, en este proyecto, se propone realizar una serie de simulaciones numéricas en el software PLAXIS 2D con el objetivo de estudiar la influencia que tiene la anisotropía de esfuerzos horizontales, las propiedades elásticas de la roca y la densidad de lodo en las deformaciones que se presentan en las paredes de un pozo vertical.

1. Marco Teórico

1.1 Pozo

En los inicios de la perforación los pozos se construían con trayectorias verticales o al menos eso se pensaba, puesto que no se tomaba en cuenta la tendencia natural del hoyo a desviarse, sin

embargo, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de la perforación direccional controlada, la cual permite la construcción de pozos de alivio, atravesar varias arenas, llegar a zonas inaccesibles, evitar complicaciones geológicas, etc. (La comunidad petrolera, 2009)

Los pozos se pueden clasificar dentro de dos grandes grupos (Martínez & Montero, 2010)

No convencionales: Pozos horizontales, pozos multilaterales (Martínez & Montero, 2010)

Convencionales: Pozos verticales, pozos direccionales (Martínez & Montero, 2010)

1.1.1 Pozos verticales. Se conoce como pozos verticales a aquellos pozos que no tienen como objetivo tener una desviación de dirección, es decir, que, de su ubicación en un plano de superficie, observamos que las coordenadas de superficie y las coordenadas del objetivo son las mismas, lo que significa que el pozo no presenta ninguna inclinación y que por lo tanto las mediciones de True Vertical Depth (TVD) y Measured Depth (MD) son las mismas y por obvias razones el azimut es = 0 (Martínez & Montero, 2010)

Tabla 1.

Ventajas y desventajas de la perforación de un pozo vertical

Ventajas de la perforación	Desventajas de la perforación
Presenta diseño sencillo a comparación de los otros.	El equipo debe estar posicionado sobre el objetivo.
Menor costo.	
Requieren menos herramientas y equipo para su perforación.	
Menor tiempo de perforación.	

1.2 Anisotropía

Desde el punto de vista del arreglo de las partículas y sus vacíos asociados, la anisotropía se debe:

- La distribución de las direcciones tangentes a los contactos entre partículas
- La orientación preferencial de los espacios vacíos
- La orientación preferencial de las partículas

Dispuesto por Casagrande y Carrillo, se pueden distinguir dos tipos de anisotropía: inherente e inducida. La anisotropía inherente es producida por la sedimentación natural de las partículas durante el proceso de formación del material. La anisotropía inducida obedece a la reacomodación de las partículas como producto de la aplicación de todo tipo de esfuerzos que excedan el límite elástico del material, es decir, es causada por los cambios de esfuerzos que siguieron al proceso de formación y depósitos de los suelos, o a diferentes esfuerzos aplicados en la dirección horizontal y vertical, por tanto, es evidente que el suelo se encuentra sometido a un estado inicial anisotrópico, inducido por los esfuerzos y que puede expresarse por medio de la relación de estos (Tauta, Ortiz, & Leal, 2006) .

1.3 Deformación

Consideremos un cuerpo cualquiera sometido a la acción de fuerzas aplicadas, y con vínculos suficientes como para impedir movimientos de sólido rígido, dado que no existe material que sea infinitamente rígido, la acción de las fuerzas hace que el cuerpo que se esté analizando se deforme. Aunque, podría aplicarse el principio de rigidez, el cual dice que el cuerpo se comporta de forma suficientemente rígida como para que los movimientos que se producen en el proceso de

deformación sean pequeños comparados con las dimensiones del de este (Cervera Ruiz & Blanco Diaz, 2001).

La deformación de un elemento diferencial de dimensiones (dx, dy, dz) pueden descomponerse en movimientos de solido rígido y cambio de forma. [Figura 1]. Así mismo, Se consideran positivas las deformaciones lineales de alargamiento y negativas las de acortamientos (Cervera Ruiz & Blanco Diaz, 2001).



Figura 1. Proceso de deformación de un elemento.

1.4 Esfuerzo

Una definición general del esfuerzo, es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa, la fuerza aplicada se reparte uniformemente en la totalidad de la sección transversal del miembro; en estos casos el esfuerzo puede calcularse con la simple división de la fuerza total por el área de la parte que resiste la fuerza, y el nivel del esfuerzo será el mismo en un punto cualquiera de una sección transversal cualquiera, se reconocen tres tipos de esfuerzos principales: los esfuerzos de tensión son aquellos que tienden a estirar o alargar el material, esfuerzos de compresión que tienden a reducir las dimensiones del material, y los esfuerzos de cizalla, que actúan en dirección oblicua a la dirección del esfuerzo principal (Ortíz, 2009).

1.4.1 Esfuerzos en la tierra antes y después de perforar un pozo

1.4.1.1 Esfuerzos in-situ. En un cuerpo dado sometido a un sistema de fuerzas es posible definir tres planos en los que solo actúan esfuerzos de manera perpendicular a ellos. De esta forma el tensor de esfuerzos se simplifica a solo tres esfuerzos principales normales a los planos, y así se elimina la necesidad de trabajar con esfuerzos de cizalla. Se identifican los esfuerzos orientados en tres direcciones ortogonales para una descripción completa del estado de los esfuerzos en un punto dado, es así, que a una profundidad dada en la tierra, las formaciones están expuestas a esfuerzos in-situ (σ_v , σ_h , σ_H) [figura 2] y a la presión de poro. Los esfuerzos se pueden determinar como un esfuerzo vertical o de sobrecarga, σ_v , y dos esfuerzos horizontales, σ_H (esfuerzo horizontal máximo in-situ), y σ_h (esfuerzo horizontal mínimo in-situ). (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018)

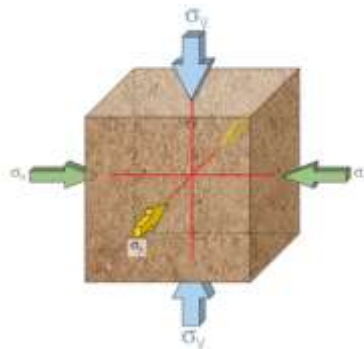


Figura 2. Esfuerzos in-situ

Esfuerzo Vertical: El esfuerzo vertical corresponde al peso de sobrecarga, actúa en dirección vertical (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018).

Esfuerzo horizontal máximo: actúa sobre el plano horizontal (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018).

Esfuerzo horizontal mínimo: actúa sobre el plano horizontal a 90° del esfuerzo horizontal máximo (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018).

1.4.1.2 Esfuerzos después de la perforación. Así como se presentan ciertas condiciones cuando el suelo no presenta variaciones, Cuando un pozo es perforado, los esfuerzos de la roca al rededor del pozo son redistribuidos debido a que el soporte originalmente ofrecido por la roca perforada es reemplazado por la presión hidráulica del lodo, dando origen a nuevos esfuerzos. (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018)

Esfuerzo radial: actúan en todas las direcciones perpendiculares a la pared del pozo, es debido a la presión ejercida por el fluido de perforación. (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018)

Esfuerzo axial: Actúa en paralelo al eje del pozo. (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018)

Esfuerzo tangencial: Actúa alrededor de todo el pozo. (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018)

La distribución de esfuerzos locales alrededor de un pozo está controlada por efectos mecánicos (esfuerzos in-situ), hidráulicos y químicos. (Jejen Salinas & Gean Lucich Rojas, 2018)

1.5 Propiedades elásticas

Las rocas presentan unas propiedades mecánicas, que al momento de perforaciones y fracturas, son necesarias para predecir el comportamiento que estas podrían presentar, entre esas propiedades

se encuentran las constantes elásticas: la relación de Poisson y el módulo de Young. (Roca Ramisa, 2017)

1.5.1 Relación de Poisson. Mide la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, que es lo mismo que la relación de deformación latitudinal con respecto a la longitudinal. En otras palabras, cuando se estira longitudinalmente se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la del estiramiento. El coeficiente de Poisson corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y la de la deformación transversal. (Roca Ramisa, 2017)

1.5.2 Módulo de Young. Conocido como el módulo de tensión o módulo elástico, mide la rigidez de un material elástico y es una propiedad utilizada para caracterizar materiales, es decir, es el producto entre el esfuerzo y la deformación. (Roca Ramisa, 2017)

1.6 Permeabilidad

Cuando un material contiene vacíos continuos se dice que es permeable y existen en todos los suelos, incluyendo las arcillas más compactadas, y en todos los materiales de construcción no metálicos, incluido el granito sano y la pasta de cemento, por lo tanto, dichos materiales son permeables. La permeabilidad de los suelos, es decir la facultad con la que el agua pasa a través de los poros, tiene un efecto decisivo sobre el costo y las dificultades a encontrar en muchas operaciones constructivas, como los son, la velocidad de consolidación de un estrato de arcilla bajo el peso de un terraplén. (Angelone, Garibay, & Cauhapé C., 2006)

1.7 Presión de poros

La presión de poros está definida como la presión que ejerce un fluido en los espacios porosos de la roca. También es llamada presión de formación o presión poral, está en función de los fluidos de formación y de las cargas que están soportando. La presión de poros está clasificada por dos categorías: Presión normal: es la presión hidrostática de una columna de fluido de la formación que se extiende desde la superficie hasta una profundidad dada. Presión anormal: es definida como la presión mayor o menor a la presión de poros hidrostática, las causas de estas presiones anormales están relacionadas a diferentes eventos geológicos, geoquímicos, geotérmicos y mecánicos. (Panez, 2015)

1.8 Fluidos de perforación

Controlan las presiones de formación, remueven los recortes del pozo, sellan las formaciones permeables, enfrían y lubrican la barrena y mantienen la estabilidad y el control del pozo. Aludido a menudo como “lodo”. (Cook, Growcock, Hodder, Quan, & Oort, 2012)

La densidad del lodo es la fuente principal de presión hidrostática en un pozo. Durante su circulación a través del pozo, el lodo contribuye a la generación de una presión en el pozo que puede expresarse en términos de la densidad de circulación equivalente (ECD), en esta circulación equivalente se dan dos límites, el límite superior, está representado por el gradiente de fractura [presión con la que inicia la fractura] y límite inferior, está determinado por la presión de poro, por debajo de la cual el flujo de fluidos de formación en el pozo produce problemas tan severos de

inestabilidad mecánica que las operaciones deben ser modificadas. (Cook, Growcock, Hodder, Quan, & Oort, 2012)

El rango entre el límite superior e inferior es la ventana de densidad de lodo, en estos límites inciden las orientaciones y magnitudes de los esfuerzos locales presentes en la roca, la presión de poro, la resistencia de la roca. (Cook, Growcock, Hodder, Quan, & Oort, 2012)

Consecuencias: pérdida de circulación durante la perforación, impactos sobre los costos de construcción del pozo [tiempo, materiales] (Cook, Growcock, Hodder, Quan, & Oort, 2012)

1.9 Geomecánica

La Geotecnia es la rama de la Ingeniería Civil y de la Ingeniería Geológica que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales pétreos o geológicos (suelos, rocas y regolitos). Hace parte de la geotecnia y se basa en la Mecánica de Rocas, aplicándose fundamentalmente a los problemas de pozos petroleros, túneles y otras excavaciones subterráneas. Así mismo, es la disciplina que integra la Mecánica de Rocas, la Geofísica y la Geología, para cuantificar la respuesta de la tierra a cambios en los esfuerzos, en la presión del yacimiento, o en la temperatura de la formación, permite elaborar modelos predictivos de esfuerzos in situ y de propiedades de roca, predecir la deformación de un pozo y del yacimiento, optimizar los planes de desarrollo del campo y encontrar soluciones de ingeniería para diagnosticar problemas. (Bravo, 2012)

1.10 Teoría de la elasticidad lineal

Todo cuerpo se deforma bajo la acción de las fuerzas aplicadas, y al cesar estas, el cuerpo tiende a recuperar su forma original. Esta tendencia que la tienen todos los cuerpos se denomina elasticidad. Los cuerpos no son ni perfectamente elásticos ni perfectamente inelásticos, las deformaciones que en ellos se producen constan de una deformación elástica, que desaparece al cesar las fuerzas aplicadas, y una parte de deformación permanente, que se mantiene posteriormente, siendo estas, en algunos casos, muy pequeñas debido a que las fuerzas no sobrepasan determinados valores. (Cervera Ruiz & Blanco Diaz, 2001)

Es la respuesta más simple de un material, donde existe una relación lineal entre las fuerzas externas y las deformaciones correspondientes. Esta Teoría fue introducida en 1676 por Robert Hooke, la cual nos dice que la fuerza aplicada a cualquier cuerpo elástico es proporcional a la deformación, es decir: (Echeverría & Meraz, 2015)

$$\sigma = E \xi$$

σ =Esfuerzo aplicado

E =Módulo de Young.

ξ =Deformación Producida.

1.11 Plaxis 2D

PLAXIS es un programa de elementos finitos para aplicaciones geotécnicas en el que se utilizan modelos de suelo para simular el comportamiento de este. PLAXIS 2D es un paquete de elementos

finitos potente y fácil de usar destinado al análisis bidimensional de Deformación y estabilidad en ingeniería geotécnica y mecánica de rocas (Brinkgreve, y otros, 2010).

1.12 Yacimiento petrolífero Vaca Muerta

Es la principal formación de shale (roca sedimentaria que contiene gas y petróleo) en la Argentina. Su gran potencial se debe a sus características geológicas y su ubicación geográfica. (Energia YPF, 2013)

La formación Vaca Muerta se encuentra en la Cuenca Neuquina, al sudoeste del país, y tiene una superficie de 30 mil km², de los cuales YPF (**Yacimientos Petrolíferos Fiscales**, sociedad pública argentina constituida en 1922 para la explotación y comercialización de productos petrolíferos.) posee la concesión de más de 12.000 km², sobre los que ha realizado estudios para evaluar con más precisión el potencial de los recursos. Los resultados obtenidos han permitido confirmar que Vaca Muerta tiene un enorme potencial para la obtención de gas (308 TCF) y que cuenta con importantísimos recursos de petróleo que alcanzan los 16,2 miles de millones de barriles, según el último informe del EIA 2013, lo que significa multiplicar por diez las actuales reservas de la Argentina. (Energia YPF, 2013)

La formación tiene entre 60 y 520 metros de espesor, lo que permite en algunos casos el uso de perforación vertical, con lo que se reduce significativamente los costos de extracción y mejora la viabilidad económica para la extracción de estos recursos. (Energia YPF, 2013)

2. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se siguió con la siguiente metodología:

2.1 Planteamiento del modelo de análisis

Como medida inicial se tuvo en cuenta que se analizó una parte del pozo el cual se sitúa a 2300 [m] y cuenta con un diámetro de 0.3048 [m], así mismo, se realizó un modelo base del pozo en el programa PLAXIS 2D con sus respectivos datos (*tabla 2*) los cuales pertenecen a una pozo vertical situado en el yacimiento petrolífero de Vaca muerta en Argentina, con el objetivo de comparar las deformaciones con los demás modelos previstos.

Tabla 2.

Datos del modelo base

Módulo de Young	1033.4819	MPa
Coeficiente de Poisson	0.3	
Presión de lodo	41.6	MPa
Esfuerzo vertical Sv	55.1	MPa
Esfuerzo horizontal Sh	46.8	MPa
Esfuerzo horizontal SH	46.8	MPa

2.2 Desarrollar el montaje de los modelos

2.2.1 Diseño del “Modelo Base”. Debido a que el objetivo de este proyecto es estudiar la influencia que tienen las propiedades elásticas, la anisotropía de esfuerzos horizontales y la presión de lodo en las deformaciones que se presentan en las paredes de un pozo vertical, Se creó inicialmente un modelo, denominado “**Modelo Base**”, al cual se le asignaron los datos de la (*tabla 2*) con el fin de ver cuáles eran las deformaciones que se presentan en las paredes del pozo con respecto a estos valores y los resultados obtenidos tomarlos como referente para una comparación con los resultados de los demás modelos que se realizaron. La configuración y propiedades del “**Modelo Base**” se encuentran en el Anexo 1

2.2.2 Fases del modelo. Para el **Modelo Base**, se crearon 3 fases:

- Fase inicial
- Fase 1
- Fase 2

En las que se asignaron los esfuerzos, la creación del pozo y la presión de lodo respectivamente. Para los demás modelos se tomaron estas como referencia.

La descripción de cada fase se encuentra en el Anexo 2

2.2.3 Diseño de los modelos de análisis. En el diseño de los siguientes modelos, se tomó el **Modelo Base**, y con respecto a ese se cambió una de las variables a analizar (Esfuerzos

horizontales, presión de lodo, Módulo de Young o relación de Poisson) y se dejaron los demás datos fijos, observando cómo era la deformación con cada uno de esos cambios.

2.2.3.1 Modelo 1: variación de esfuerzo horizontal SH. Se aumentó hasta un 50% el esfuerzo SH con respecto al **Modelo Base.** (Tabla 3),

Tabla 3.

Variación de esfuerzos SH

Sh =	46,8	0
SH =	51,5	10%
Sh =	46,8	0
SH =	56,2	20%
Sh =	46,8	0
SH =	60,9	30%
Sh =	46,8	0
SH =	65,6	40%
Sh =	46,8	0
SH =	70,2	50%

2.2.3.2 Modelo 2: Variación de Poisson. Se aumentó hasta un 50% Poisson con respecto al **Modelo Base.** (Tabla 4).

Tabla 4.

Variación de la relación de Poisson

v	0,24	-20%
v	0,27	-10%
v	0,33	10%
v	0,36	20%
v	0,39	30%
v	0,42	40%
V	0,45	50%

2.2.3.3 Modelo 3: variación de Módulo de Young. Se aumentó hasta un 50% el Módulo de Young (MPa) con respecto al **Modelo Base**. (Tabla 5).

Tabla 5.

Variación del Módulo de Young

E	8270.8	-20%
E	9304.6	-10%
E	11372.3	10%
E	12406.2	20%
E	13440.0	30%
E	14473.9	40%
E	15507.7	50%

2.2.3.4 Modelo 4: Variación presión del lodo. Se aumentó hasta un 50% la presión de lodo P_w con respecto al **Modelo Base**. (Tabla 6).

Tabla 6.

Variación de la presión de lodo P_w

P_w	33.3	-20%
P_w	37.5	-10%
P_w	45.8	10%
P_w	49.9	20%
P_w	54.1	30%
P_w	58.3	40%
P_w	62.4	50%

3. Análisis e interpretación de resultados

Para el análisis de la deformación que presenta las paredes del pozo debido a la anisotropía de esfuerzos horizontales, presión de lodo, módulo de Young o relación de Poisson, se escogieron 4 puntos catalogados como [A, B, C, y D] (*Figura 3*) en los cuales se hicieron las observaciones

Como primera parte del análisis se observaron las deformaciones que ocurrieron en el modelo base (*figura 4*), las cuáles son los referentes para el cambio de la deformación en cada uno de los puntos de los demás modelos.

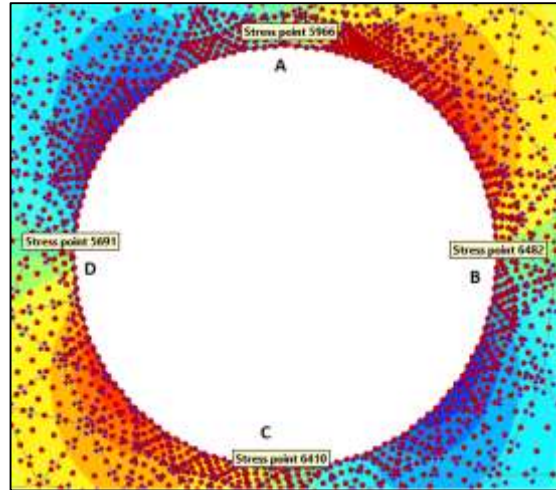


Figura 3. Puntos de estudio

Deformación							
A		B		C		D	
ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}
-5,9E-07	5,7E-07	5,88E-07	-5,9E-07	-6E-07	5,9E-07	5,7E-07	-5,8E-07

Figura 4. Deformaciones del Modelo Base

Con el fin de ver el cómo era el cambio que tenían las deformaciones en cada uno de los puntos [A, B, C, y D] dispuestos en los diferentes modelos, respecto a las observadas en el **Modelo Base** y determinar cuál de estas era la más influyente, los resultados se expresaron como el porcentaje entre los resultados de los modelos de estudio y los resultados del **Modelo Base**.

3.1 Deformaciones $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto A

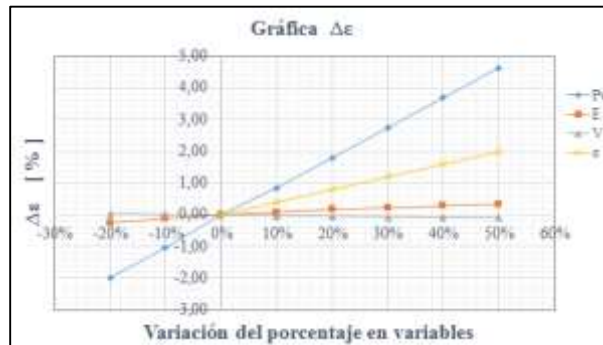


Figura 5. Gráfica $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto A

3.2 Deformaciones $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto B

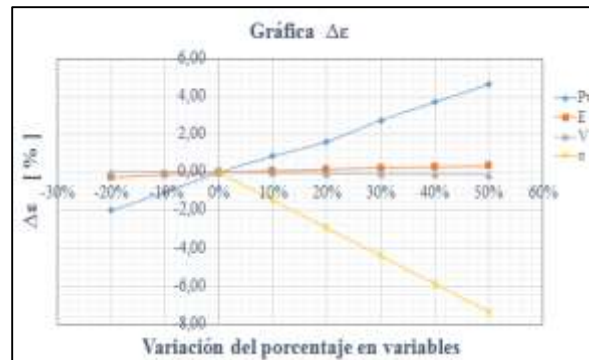


Figura 6. Gráfica $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto B

3.3 Deformaciones $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto C

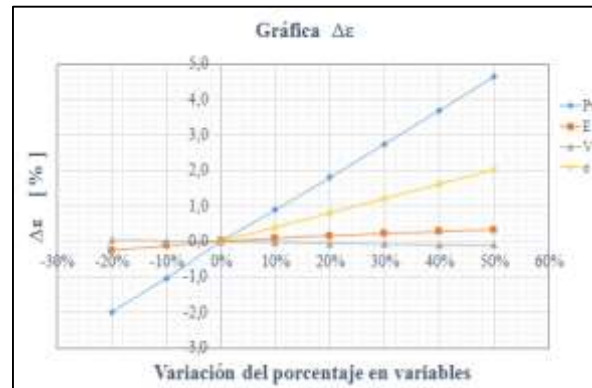


Figura 7. Gráfica $\Delta\epsilon_{xx}$ en el punto C

3.4 Deformaciones $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto D

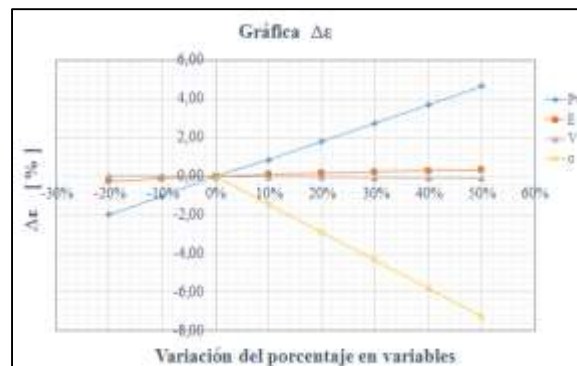


Figura 8. Gráfica $\Delta\epsilon_{yy}$ en el punto D

Para el análisis de la deformación que ocurrió en cada punto, se tuvo en cuenta la dirección paralela a la tangente del punto que se analiza en el círculo, es decir, para los puntos A y C se analizó el cambio de deformación con respecto a ϵ_{xx} , y para los puntos B y D con respecto ϵ_{yy} .

Por tanto, como se observa en las anteriores gráficas [Figura 5 – 8], al aumentar en cierto porcentaje cada variable, se percibe un incremento de las deformaciones en cada punto, respecto a las presentadas en el **Modelo Base**. Considerando que la parte positiva es a tensión y la parte negativa a compresión, la anisotropía de esfuerzos $[\sigma]$ y la presión de lodo $[Pw]$, fueron las dos variables que presentaron un mayor cambio, siendo así, las de mayor influencia en las deformaciones en cada punto, a diferencia del módulo de Young $[E]$ y la relación de Poisson $[\nu]$, que aunque presentaron un cambio en las deformaciones respecto a las principales, estos no fueron tan significativos, tendiendo a un porcentaje de baja variación.

3.5 Deformación debido a Pw , E , Poisson y Anisotropía de esfuerzos

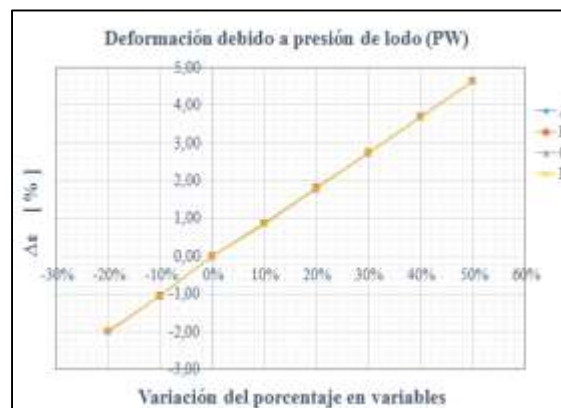


Figura 9. Gráfica deformación debido a Pw



Figura 10. Gráfica deformación debido a la relación de Poisson



Figura 11. Gráfica deformación debido al módulo de Young [E]



Figura 12. Gráfica deformación debido a la anisotropía de esfuerzos

En las gráficas anteriores [Figura 9-12] se analizó por separado el efecto que tiene cada una de las variables [Pw, E, la relación de Poisson y anisotropía de esfuerzos] en la deformación que ocurre en cada uno de los puntos de estudio [A, B, C o D] y como fue el comportamiento de la variación a medida que se va aumentó su valor.

El cambio de deformación respecto a la relación de Poisson [Figura 10] y El módulo de Young [Figura 11] presentó un porcentaje muy pequeño en cada punto, los valores de estos están muy cercanos a los obtenidos en el **Modelo Base**, indicando que son factores que, así sean propios de la roca, no influyen en gran medida en las deformaciones que se ocasionan en las paredes del pozo, así mismo, que presentan un comportamiento que no es lineal, lo que podría suponer que al aumentarse el valor de estos, las deformaciones que se puedan presentar, tendrían un valor constante en algún punto.

Con la presión de lodo Pw [Figura 9] y la anisotropía de esfuerzos [Figura 12], el porcentaje en el cambio de las deformaciones que se presentaron en cada punto fue más considerable, al aumentar SH el punto B y D tienden a comprimirse, mientras que en A y C se observó una expansión, debido a que la fuerza que se aplicó supera a la fuerza que está resistiendo, así mismo las deformaciones en los puntos que se encuentran a los lados son mayores, dando una forma ovalada al pozo, que en todo caso podría controlarse con la presión de lodo adecuada.

En cuanto a la presión de lodo [Pw], esta es una fuerza inducida con la cual se quiere equilibrar la forma que tiene el pozo después que se realice la excavación, lo que se detalló en la gráfica [Figura 9], al incrementar o disminuir el valor de este, dejando fijos unos valores ya estipulados, la tendencia en el porcentaje del cambio de deformación es ser lineal e igual en todos los puntos de estudio, las paredes del pozo tienden a expandirse o comprimirse, originando que

deformaciones que sufre este sean más considerables y sea el factor que mayor influya en dicho proceso.

4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos y plasmados en las gráficas anteriores, las deformaciones que se presentan en las paredes de un pozo vertical se ven inducidas por varios factores entre los cuales están la densidad de lodo, las propiedades elásticas, y la anisotropía de los esfuerzos horizontales, detallándose que al aumentarse en cierto porcentaje el valor de cada uno de estos, las deformaciones en cada punto tienden a un incremento, ya sea por expansión o compresión, sin embargo, este incremento se ve reflejado mas en unas variables que en otras.

Los esfuerzos anisótropos horizontales y la presión de lodo son los factores que más influencia tienen en la deformación que se presenta en las paredes del pozo, ya sea que este se comprima o expanda, y, debido a que presentan una tendencia lineal, cualquier aumento o disminución que haya en estos, dará origen de igual manera a un aumento o disminución en las deformaciones que se presentan en cada punto, provocando posiblemente, en algún momento la rotura del pozo.

De las cuatro variables analizadas para determinar cuál es la que tiene mayor influencia en las deformaciones que tiene las paredes de un pozo vertical, se evidencia que la presión de lodo, es una fuerza que ante cualquier aumento que tenga, influirá de igual forma en que se produzca mayor deformación, siendo lógico ya que su función es mantener en equilibrio la estructura del pozo, si esta tiene una variación, inducirá que este se expanda o comprima generando las deformaciones,

considerando que tiende a ser lineal, cada vez que se aumente P_w las deformaciones aumentaran igual. Por ende se podría considerar como el factor que mayor influencia tiene en las deformaciones que se presentan en las paredes de un pozo vertical.

Referencias Bibliográficas

- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé C., M. (2006). *Geología y Geotecnia. Universidad Nacional de Rosario*, 39. Obtenido de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geolog?a+y+Geotecnia#4>
- Bravo, O. (2012). *Mecánica de rocas aplicada a la industria del petróleo. Geología Colombiana Vol. 37 No. , p.31*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/33973/1/33955-128880-2-PB.pdf>
- Brinkgreve, R. B., Swolfs, W. M., Engin, E., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & Galavi, V. (2010). *PLAXIS 2D 2010. User manual, Plaxis bv*.
- Cervera Ruiz, M., & Blanco Diaz, E. (2001). *Mecánica de estructuras- Resistencia de materiales. 1st ed*. Barcelona: Edicions UPC.
- Cook, J., Growcock, F., Hodder, M., Quan, G., & Oort, E. v. (2012). Estabilización del pozo para prevenir pérdidas de circulación es wide. *Oilfield Review*, 23(4), 26–35.
- Echeverría, F. C., & Meraz, J. A. (2015). *Operaciones Críticas de Perforación de Pozos Petroleros*. . México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Energia YPF. (2013). *Vaca Muerta*. Obtenido de <https://www.ypf.com/energiaypf/paginas/vaca-muerta.html>
- Jejen Salinas, P., & Gean Lucich Rojas, G. (2018). Diseño de una metodología para el seguimiento de la estabilidad mecánica durante la perforación de un pozo en el campo castilla. *Pregrado -ingeniería de petróleos. Fundación Universidad de América*, 36-37.

- La comunidad petrolera. (2009). *Clasificación de los Pozos de acuerdo a FH Lahee*. Obtenido de <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2009/05/clasificacion-de-los-pozos-de-acuerdo.html>
- Martínez, A. V., & Montero, V. R. (2010). *Análisis Técnico Económico de Pozos Multilaterales vr Pozos convencionales*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ortíz, M. d. (2009). *Aplicación de la Geomecánica en la Estabilidad del Agujero de un Pozo de la Región Sur*. Universidad Nacional Autónoma de México, 142. Obtenido de <http://ingenieria.posgrado.unam.mx/sitv3>
- Panez, C. C. (2015). *Análisis de Métodos Para la Predicción de Presión de Poros Aplicado a la Estabilidad de Pozos de Perforación Petrolera*. Universidad Ricardo Palma, 105. Obtenido de http://cybertesis.urp.edu.pe/bitstream/urp/196/3/alvia_mg.pdf
- Roca Ramisa, D. (2017). Importancia de la geomecánica petrolera profunda. Dr. en filosofía (Ph.D), Ingeniero geológico. *Universidad de Missouri*, 37-38 .
- Tauta, J. F., Ortiz, O. J., & Leal, A. N. (2006). Anisotropía de esfuerzos y resistencia al corte de arenas stress anisotropy and shear strength of sands. *Universidad Militar Nueva Granada*, 16(1), 54–62.

Apéndices

Apéndice A. Configuración inicial

Configuración inicial del programa

Como primer paso se configuro el programa PLAXIS 2D con los parámetros iniciales con los que se desea trabajar durante el proyecto, dichos parámetros corresponden a unidades y el contorno de la superficie (*Figura 13*).

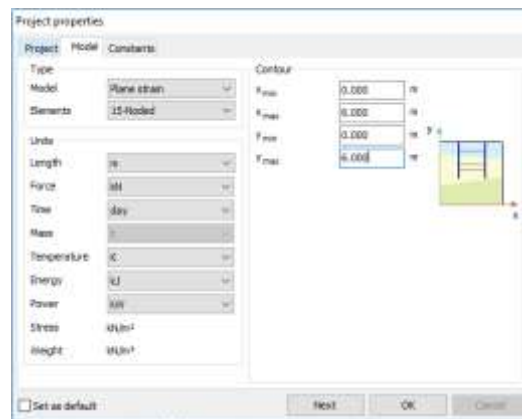
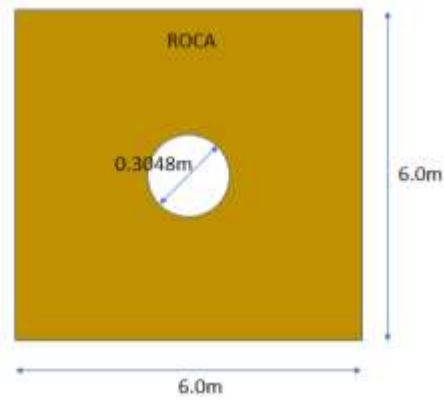
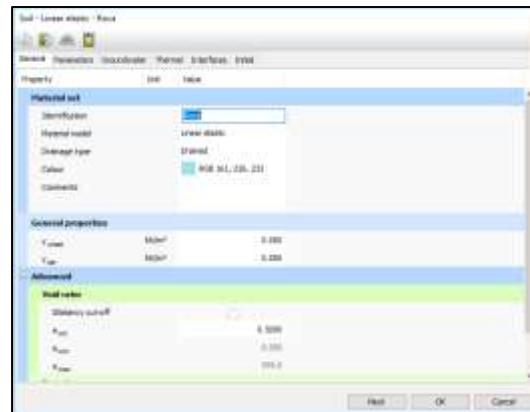


FIGURA 13: Propiedades iniciales

2. Geometría y propiedades del pozo

Con las propiedades iniciales, se prosigue a realizar la geometría de la superficie la cual cuenta con unas medidas ya definidas (*Figura 14*) que ingresamos en el programa, seguido, se hace la asignación de las propiedades del suelo, en este caso roca, con el modelo constitutivo elástico lineal (*Figura 15*).

**FIGURA 14:** Geometría del pozo**FIGURA 15:** Propiedades del suelo

Apéndice B Fases del modelo

1. Fases del modelo

- **Fase inicial**

En esta fase, ya con las propiedades de la roca y los parámetros iniciales, se le asigna los esfuerzos σ_h , σ_H y σ_v definidos anteriormente. (Figura 16)

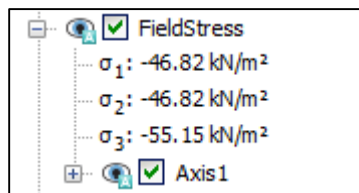


FIGURA 16: Asignación de esfuerzos

- **Fase 1**

En la fase 1, se dispone a crear el hueco con el diámetro ya definido. (Figura 17)

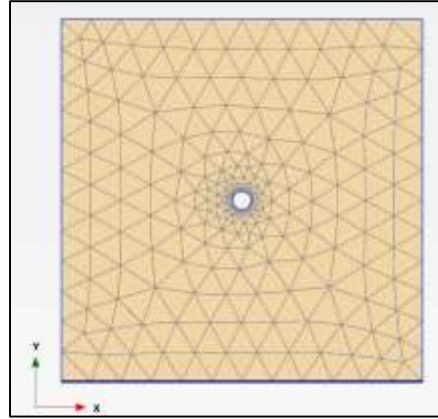


FIGURA 17: Creación del hueco del pozo

- **Fase 2**

En la fase 2, al interior del hueco se aplica la presión de lodo P_w , esta se descompone con el objetivo que a cada segmento en los cuales se divide el círculo le corresponda una parte de esta fuerza. (Figura 18).

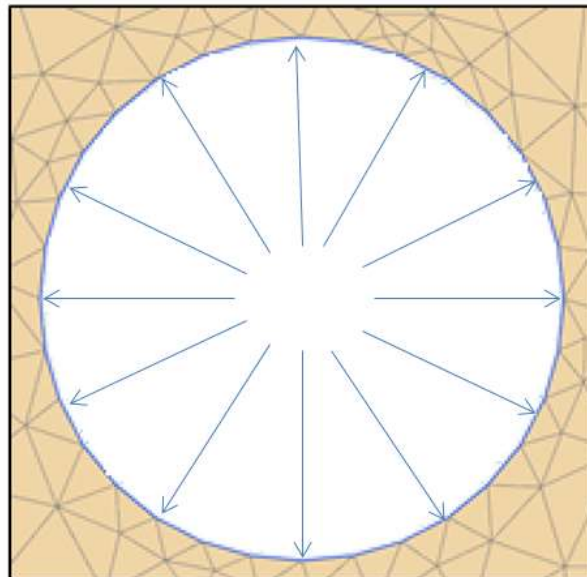


FIGURA 18: Fuerzas al interior del pozo

Apéndice C. Tablas de deformación en cada punto

TABLA 7: $\Delta\epsilon_{xx}$ respecto a las variables en el punto A

Tabla para gráfica de deformación $\Delta\epsilon_{xx}$							
σ		V		E		P_w	
$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xx_i}}$	%	$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xx_i}}$	%	$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xx_i}}$	%	$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xx_i}}$	%
-20%	0,04	-20%	-0,25	-20%	-1,98	-20%	
-10%	0,02	-10%	-0,11	-10%	-1,03	-10%	
0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
0,4	10%	-0,02	10%	0,09	10%	0,86	10%
0,8	20%	-0,04	20%	0,17	20%	1,80	20%
1,2	30%	-0,05	30%	0,23	30%	2,75	30%
1,6	40%	-0,07	40%	0,29	40%	3,70	40%
2,0	50%	-0,08	50%	0,33	50%	4,64	50%

TABLA 8: $\Delta\epsilon_{yy}$ respecto a las variables en el punto B

Tabla para gráfica de deformación $\Delta\epsilon_{yy}$							
σ		V		E		Pw	
$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yyi}}$	%	$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yyi}}$	%	$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yyi}}$	%	$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yyi}}$	%
	-20%	0,04	-20%	-0,25	-20%	-2,01	-20%
	-10%	0,02	-10%	-0,11	-10%	-1,03	-10%
0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
-1,47	10%	-0,02	10%	0,09	10%	0,86	10%
-2,93	20%	-0,04	20%	0,17	20%	1,63	20%
-4,39	30%	-0,06	30%	0,23	30%	2,75	30%
-5,86	40%	-0,08	40%	0,29	40%	3,69	40%
-7,32	50%	-0,09	50%	0,33	50%	4,64	50%

TABLA 9: $\Delta\epsilon_{xx}$ respecto a las variables en el punto C

Tabla para gráfica de deformación $\Delta\epsilon_{xx}$							
σ		V		E		Pw	
$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xxi}}$	%	$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xxi}}$	%	$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xxi}}$	%	$\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xxi}}$	%
	-20%	0,05	-20%	-0,25	-20%	-2,0	-20%
	-10%	0,02	-10%	-0,11	-10%	-1,0	-10%
0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
0,41	10%	-0,02	10%	0,09	10%	0,9	10%
0,81	20%	-0,04	20%	0,17	20%	1,8	20%
1,22	30%	-0,07	30%	0,23	30%	2,8	30%
1,62	40%	-0,09	40%	0,29	40%	3,7	40%
2,03	50%	-0,10	50%	0,33	50%	4,6	50%

TABLA 10: $\Delta\epsilon_{yy}$ respecto a las variables en el punto D

Tabla para gráfica de deformación $\Delta\epsilon_{yy}$							
σ		V		E		P _w	
$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yy_i}}$	%	$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yy_i}}$	%	$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yy_i}}$	%	$\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{yy_i}}$	%
	-20%	0,04	-20%	-0,25	-20%	-1,98	-20%
	-10%	0,02	-10%	-0,11	-10%	-1,03	-10%
0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
-1,45	10%	-0,02	10%	0,09	10%	0,86	10%
-2,89	20%	-0,04	20%	0,17	20%	1,80	20%
-4,34	30%	-0,06	30%	0,23	30%	2,75	30%
-5,78	40%	-0,07	40%	0,29	40%	3,69	40%
-7,23	50%	-0,09	50%	0,33	50%	4,64	50%