

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA
DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ARENA**

MIGUEL ANGEL FUENTES BONILLA

VICTOR HUGO RONDON CORDERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

BUCARAMANGA

2012

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA
DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ARENA**

MIGUEL ANGEL FUENTES BONILLA

VICTOR HUGO RONDON CORDERO

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros de Petróleos

Director

MSC. HEBELY CELIS LEGUIZAMO

Director de Escuela de Ingeniería Civil, UIS.

Codirector

Yair Andrés Quintero

Ingeniero de Proyectos ICP

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por la oportunidad de haber estudiado esta carrera tan hermosa y darme fuerza en todos los momentos difíciles.

A mi Papá ANGEL MARIA FUENTES que con su ejemplo y apoyo me ha hecho el hombre que soy, A mi Mama FANNY PATRICIA BONILLA que con su amor me ha ayudado a todos mis proyectos, A mi Abuelito Helio Fabio Bonilla y a mi abuelita Melada Cabezas por su crianza y amor que me han dado en toda mi existencia, gracias LOS AMO.

A la Universidad Industrial de Santander por compartirme su conocimiento y experiencia en mi carrera.

Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozos y todos sus integrantes, a los ingenieros Hebeli Celis Leguizamo, Yair Quintero, Mabel Carvajal, Zuly Calderón, Reynel Corzo quienes con su formación y exigencia hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

A mi amigo Fredy López Medina por su constante apoyo en este duro camino de la Universidad, por ser un ejemplo a seguir y ser mi amigo incondicional.

A mi amigo Víctor Hugo Rondón, A doña Mina y a Don Víctor por ayudarme en todo este tiempo en Bucaramanga, al igual que a don Ceferino y doña Rosita por su constante apoyo en el socorro.

GRACIAS A DIOS POR TODAS ESAS PERSONAS QUE HICIERON POSIBLE ESTE SUEÑO.

MIGUEL ANGEL FUENTES BONILLA

DEDICATORIA

A mi Papa Angel y a mi Mama paty por ser los mejores papas del mundo, que sin ellos no sería la persona que soy. A mis abuelitos Fabio y Melida por su crianza y su amor.

A mi tía Cely y mi tío David, que me han ayudado acá en Bucaramanga.

A mis amigos en especial a Fredy López que con su apoyo incondicional ha sido como el hermano que nunca tuve.

A todas las personas que me encontré en el camino que me ayudaron a cumplir un sueño de mi vida, el de ser Ingeniero de Petróleos de la UIS.

MIGUEL ANGEL FUENTES BONILLA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme brindado la oportunidad de estudiar esta carrera tan bonita, y ofrecerme las capacidades económicas e intelectuales para poder llevarla a su culminación.

A mi papá y a mi mamá por apoyarme siempre y apoyarme en mis sueños y metas.

A mis amigos que están conmigo desde la sede Socorro, con los que aprendí a estudiar y a trabajar en equipo.

A todos los docentes que con su diferente forma de ver la vida y enseñar las asignaturas, me abrieron la mente y pude aprender de una mejor forma.

A la universidad industrial de Santander por darme la oportunidad de estudiar allí.

A el grupo de investigación estabilidad de pozos que me ofreció el tema de investigación, a todos los ingenieros, especialmente al ingeniero Yair Andrés Quintero y a los demás compañeros de grupo

A mi compañero de tesis Miguel Ángel Fuentes por trabajar con un excelente desempeño en el tema.

A mi tía María que en el Socorro me colaboro muchísimo para el sostenimiento en el pueblo.

Víctor Hugo Rondón Cordero

DEDICATORIA

A mi mama que estuvo en los momentos más difíciles que tuve en la carrera y me apoyo cuando estaba a punto de retirarme por problemas de salud, e impidió algo de lo cual me hubiera arrepentido toda la vida.

A mi novia, Darlyn Caicedo que me enseñó que con el amor, las cosas se hacen más fáciles, y estuvo conmigo en el momento que más necesitaba apoyo.

Víctor Hugo Rondón Cordero

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	20
2	EL CONCEPTO DEL FENOMENO DE DILATANCIA Y SUS APLICACIONES	21
2.1	DILATANCIA	21
2.2	Aplicaciones (Permeabilidad)	26
2.3	Aplicaciones (Criterio de Falla – Dilatancia)	29
3	ASPECTOS GENERALES Y GEO-MECANICOS DE LOS SUELOS GRANULARES	31
3.1	COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS GRANULARES	31
3.1.1	Tensión efectiva	31
3.1.2	Comportamiento Drenado	32
3.1.3	Densidad	33
3.1.4	Comportamiento volumétrico, Elástico - Plástico.	34
3.2	LÍNEA DE ESTADO Y ESTADO CRÍTICO	35
3.3	RELACIÓN DE VACÍOS Y PARÁMETRO DE ESTADO.	37
4	EQUIPOS DE LABORATORIO PARA MEDIR EL CAMBIO DE VOLUMEN EN LA ROCA (DILATANCIA).	41
4.1	MEDIDA DEL FLUIDO.	41
4.2	SISTEMA GRAVIMÉTRICO.	43
5	ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS MATEMATICOS QUE DESCRIBEN EL FENOMENO DE DILATANCIA	46
5.1	MODELO DE TAYLOR	47
5.1.1	Ventajas	48
5.1.2	Limitaciones	48
5.2	MODELO CAM CLAY (SCHOFIELD & WROTH (1963))	49

5.2.1	Tensión desviadora “q”:	_____	49
5.2.2	Tensión volumétrica efectiva p’:	_____	49
	Se calcula con la ecuación 1.	_____	49
5.2.3	Pendiente de línea del estado crítico M.	_____	50
5.3	MODELO CAM CLAY MODIFICADO ROSCOE & BURLAND (1968)	_____	52
5.3.1	Ventajas	_____	53
5.3.2	Limitaciones	_____	53
5.4	MODELO DE ROWE’S	_____	53
5.4.1	Ventajas	_____	55
5.4.2	Limitaciones	_____	55
5.5	NOVA	_____	56
5.5.1	Ventajas	_____	57
5.5.2	Limitaciones	_____	57
5.6	GAJO Y WOOD	_____	57
5.6.1	Ventajas.	_____	59
5.6.2	Limitaciones.	_____	59
5.7	LI AND DAFALIAS	_____	59
5.7.1	Ventajas.	_____	61
5.7.2	Limitaciones.	_____	61
5.8	PASTOR ET AL	_____	61
6	ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DILATANCIA	_____	66
6.1	PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS DE SENSIBILIDAD	_____	66
6.2	DIAGRAMAS DE ARAÑA	_____	67

6.2.1	MODELO CAM CLAY	67
6.2.2	ROWES.	69
6.2.3	CAM CLAY MODIFICADO	70
6.2.4	NOVA.	72
6.2.5	LI AND DAFALIAS.	74
6.2.6	PASTOR ET AL.	75
6.2.7	GAJO & WOOD	77
7	EVALUACIÓN DE LOS MODELOS QUE DESCRIBEN EL FENÓMENO DE DILATANCIA	80
7.1	ARENA MIGA	81
7.1.1	DATOS DE LA ARENA MIGA	81
7.1.2	DATOS DE LA ARENA MIGA 4479-E TCD50 PARA LOS MODELOS TEÓRICOS	83
7.2	ARENA MIGA 4479-A TCD 300	93
7.2.1	PENDIENTE LINEA DEL ESTADO CRITICO.	94
7.3	ARENA BANDING B13 (CASTRO1969).	98
7.3.1	DATOS ARENA BANDING B13, (CASTRO 1969).	99
7.3.2	DATOS TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING B13.	101
7.3.3	EVALUACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA VS. LA DILATANCIA MEDIDA EN LABORATORIO. ARTÍCULO (BEEN & JEFFERIES).	103
7.4	ARENA BANDING B14 (CASTRO1969)	107
7.4.1	DATOS ARENA BANDING B14, (CASTRO 1969).	107
7.4.2	DATOS TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING B14	108

7.4.3	EVALUACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA VS. LA DILATANCIA MEDIDA EN LABORATORIO. ARTÍCULO (BEEN & JEFFERIES).	110
7.5	ARENA BANDING B43 (CASTRO1969).	111
7.5.1	DATOS ARENA BANDING B43, (CASTRO 1969).	112
7.5.2	DATOS TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING B13.	114
7.5.3	EVALUACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA VS. LA DILATANCIA MEDIDA EN LABORATORIO. ARTÍCULO (BEEN & JEFFERIES).	116
8	CONCLUSIONES	118
9	BIBLIOGRAFÍA.	121

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Re acomodación de las partículas (dilatancia).....	21
FIGURA 2 Contracción o compactación (dilatancia negativa).....	22
FIGURA 3 Dilatancia a nivel granular.	23
FIGURA 4 Contracción a nivel granular.	23
FIGURA 5 Reorientación de las partículas internas de la roca.....	24
FIGURA 6 Ordenamiento de las partículas gracias a los esfuerzos de cizalle.	24
FIGURA 7 Ejemplo de huella en la playa.	25
FIGURA 8 Esquema del ángulo dilatancia.....	26
FIGURA 9 Cambio de permeabilidad.....	27
FIGURA 10 Proceso SAGD.....	28
FIGURA 11 Dilatancia térmica, re acomodación de las rocas.....	29
FIGURA 12 Círculo de Mohr.....	30
FIGURA 13 Estado totales de tensiones.....	32
FIGURA 14: Comportamiento típico de arenas densas y sueltas sometidas a corte triaxial de compresión.	33
FIGURA 15 Comportamiento elástico (a) comportamiento plástico (b).....	34
FIGURA 16 Pendiente línea de estado crítico 3D.....	35
FIGURA 17 q vs p'	36
FIGURA 18 Relaciones de vacíos vs $\log p$	37
FIGURA 19 Arreglo cubico, Arreglo rómbico.....	39
FIGURA 20 Comportamiento general relación de vacíos.....	40
FIGURA 21 Principio de Arquímedes.....	41
FIGURA 22 Triaxial, sistema de buretras.....	42
FIGURA 23 Buretra.....	43
FIGURA 24 Sistema gravimétrico.....	44
FIGURA 25 Esquemas de una prueba drenada.....	45
FIGURA 26 Experimento de Reynolds.....	47
FIGURA 27 Esquema del sistema de fuerzas estudiado por Taylor.....	48
FIGURA 28 Pendiente de línea de estado crítico.....	50
FIGURA 29 Tensión desviadora vs deformación axial.	51
FIGURA 30 Sensibilidad Cam Clay.....	68
FIGURA 31 Sensibilidad Rowe´s.....	70
FIGURA 32 Sensibilidad Cam Clay modificado.	71
FIGURA 33 Sensibilidad NOVA.....	72
FIGURA 34 Sensibilidad Li and Dafalias.....	75
FIGURA 35 Análisis de Sensibilidad pastor et al.....	77
FIGURA 36 Sensibilidad Gajo & Wood.....	78
FIGURA 37 Dilatancia – Relación de Tensiones.....	82
FIGURA 38 Relación tensión-deformación.	85
FIGURA 39 P' critica.....	88
FIGURA 40 Dilatancia arena miga.....	93
FIGURA 41 Deformación axial para 150 Kpa.....	94

<i>FIGURA 42 P´ Miga 4479-A a 300 Kpa</i>	<i>95</i>
<i>FIGURA 43 Dilatancia arena 4479-a.....</i>	<i>98</i>
<i>FIGURA 44 Discretizacion de la arena banding, b13.</i>	<i>99</i>
<i>FIGURA 45 Relación tensión desviadora q vs deformación axial.....</i>	<i>102</i>
<i>FIGURA 46 Comparación dilatancia arena B13 Vs. Modelos teóricos de dilatancia.</i>	<i>105</i>
<i>FIGURA 47 Discretizacion de la arena banding b14.</i>	<i>107</i>
<i>FIGURA 48 Relación tensión desviadora q vs deformación axial.....</i>	<i>109</i>
<i>FIGURA 49 Comparación dilatancia arena B14 Vs. Modelos teóricos de dilatancia.</i>	<i>111</i>
<i>FIGURA 50 Discretizacion de la arena banding, b43.</i>	<i>112</i>
<i>FIGURA 50 Relación tensión desviadora q vs deformación axial.....</i>	<i>114</i>
<i>FIGURA 52 Comparación dilatancia arena B43 Vs. Modelos teóricos de dilatancia.</i>	<i>117</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Parámetro arena Miga.</i>	62
<i>Tabla 2: Parámetro arena de Toyoura.</i>	62
<i>Tabla 3: Parámetro arena B.</i>	63
<i>Tabla 4: Constantes arena Kurnell.</i>	63
<i>Tabla 5: Constantes arena Speswhite.</i>	64
<i>Tabla 6: Modelos de dilatación.</i>	65
<i>Tabla 7: Humedad y presiones de confinamiento.</i>	81
<i>Tabla 8: Puntos de Discretización para la dilatación medida de la arena miga.</i>	83
<i>Tabla 9: Prueba triaxial para la arena Miga con $\sigma_3 = 50$ Kpa y $M = 1.595$</i>	91
<i>Tabla 10 Modelos de dilatación.</i>	92
<i>Tabla 11: Prueba triaxial para la arena Miga con $\sigma_3 = 50$ Kpa.</i>	97
<i>Tabla 12 Parámetros de calibración de la arena Banding. B13.</i>	99
<i>Tabla 13: Puntos discretizados arena Banding b13.</i>	100
<i>Tabla 14: Datos suministrados y encontrados para la arena b13.</i>	103
<i>Tabla 15: Prueba triaxial a $\sigma_3 = 98$ Kpa, $M = 1,304$. Modelos teóricos del fenómeno de dilatación en la arena B13:</i>	105
<i>Tabla 16: Parámetros de calibración de la arena Banding. B14.</i>	107
<i>Tabla 17: Puntos Discretizado. Arena Banding b14.</i>	108
<i>Tabla 18: Datos suministrados y encontrados para la arena B14.</i>	110
<i>Tabla 19: Parámetros de calibración de la arena Banding. B43.</i>	112
<i>Tabla 20: Puntos discretizados arena Banding b13.</i>	113
<i>Tabla 21: Datos suministrados y encontrados para la arena B13.</i>	116

RESUMEN.

TITULO: **ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA DURANTE LA PRODUCCIÓN DE ARENA***

AUTORES: FUENTES BONILLA, Miguel Angel, RONDON CORDERO, Victor Hugo.*

PALABRAS CLAVES: Dilatancia, Modelos, Arenamiento, Tensión, Esfuerzos, Arena.**

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto dará a conocer el estado del arte del fenómeno de dilatación en las rocas cuando son sometidas a esfuerzos. Se planteará la descripción del fenómeno físico, y bajo en qué condiciones sucede; además del estudio de los principales modelos matemáticos que existen para el cálculo de la dilatación, haciendo un filtro de los más importantes, para finalmente probarlos con datos de la bibliografía y así concluir cual es el modelo o los modelos que mejor representan este fenómeno.

La arena al ser sometidas a diferentes magnitudes de esfuerzos, presenta una serie de fenómenos en los cuales la producción de la misma conlleva a la extracción de crudo extra pesado de yacimientos con arenas poco consolidadas. Por tal motivo, el fenómeno de dilatación es analizado matemáticamente para comparar los modelos existentes en la literatura. El análisis de sensibilidad establecido para los diferentes modelos matemáticos muestra que se debe tener cierto cuidado al momento de la medición de variables como la pendiente de la línea del estado crítico que es de vital importancia para el modelamiento de dicho fenómeno.

La evaluación de los modelos permitirá la comparación en cuanto a pruebas experimentales encontradas en el estado del arte, en donde el mejor modelo predecirá el comportamiento de la arena sometida a esfuerzos y por ende una mejor predicción del fenómeno de dilatación.

*Trabajo de Grado de Ingeniería de Petróleos

**Facultad de Ingenierías Físicoquímica. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Grupo de investigación de Estabilidad De Pozos. Director Ms.c. Hebely Celis Leguizamo, Codirector: Ing. Yair Andres Quintero.

ABSTRACT

TITLE: STUDY AND EVALUATION OF MODELS DILATANCY PHENOMENON DURING PRODUCTION OF SAND *

AUTHORS: FUENTES BONILLA, Miguel Angel, RONDON CORDERO, Víctor Hugo.**

KEYWORDS: Dilatancy, models, sanding, tension, stress, sand.

DESCRIPTION

This project will present the state of art of the phenomenon of dilatancy in rocks when they are under stress. We will examine the description of physical phenomena, and under what conditions happens, besides the study of the main mathematical models exist for the calculation of dilatancy, making a filter of the most important, to finally try them with literature data and well conclude which model or models that best represent this phenomenon.

The sand when subjected to different magnitudes of effort, presents a series of events in which the production of it involves the extraction of extra heavy crude deposits with unconsolidated sands. Therefore, the phenomenon of dilatancy is mathematically analyzed to compare the existing models in the literature. The sensitivity analysis for established mathematical models show that some care must be taken when measuring variables such as the slope of the critical state line is critical to the modeling of this phenomenon.

The evaluation of the comparison models allow experimental evidence regarding encountered in the prior art, where the best model predicts the behavior of the stress-bearing sand and thus a better prediction of the phenomenon of dilatancy. The dilatancy is the great importance for to the industry and special for to heavy oil production in Colombia.

* Project of degree.

**Faculty of Physical Chemistry. Petroleum Engineering. Wellbore stability Research Group.
Director: Ms.c. Hebely Celis Leguizamo. Codirector: Ing. Yair Andres Quintero,

1 INTRODUCCIÓN

El arenamiento es uno de los principales problemas que existen en un pozo, ésta arena puede ocasionar problemas de estabilidad del mismo y generar el colapso de la tubería de revestimiento, reducción de la producción y en casos extremos la pérdida del pozo. Por esto es de suma importancia tratar de comprender este fenómeno, y a su vez el cómo se genera y cómo se podría controlar.

Cuando se produce arena es porque se ha fallado la roca, y esto depende principalmente de la combinación de esfuerzos a la que ésta es sometida, los cuales son: esfuerzos de la superficie, por la perforación, completamiento y producción; además de la relación con la presión de poro y la resistencia de la roca. En este momento es donde entra el concepto de dilatancia, debido a que está ligado directamente con la falla en la roca, así: a mayor dilatancia (positiva), menor compactamiento en la roca, y por ende menor resistencia. Así la arena tenderá a fallarse más rápido en donde presente una dilatancia más elevada.

Por lo anteriormente dicho, comprender el concepto de dilatancia va a ser de gran ayuda para predecir el arenamiento en el pozo.

2 EL CONCEPTO DEL FENOMENO DE DILATANCIA Y SUS APLICACIONES

2.1 DILATANCIA

Cuando una roca es sometida a esfuerzos de cizalla (fuerza paralela a la superficie de aplicación de dicha fuerza) sus partículas internas empiezan a tener un cambio de posición, pasan de ser partículas muy unidas o compactadas, a partículas separadas; ésta separación hace que la roca en general tenga un aumento de volumen **Figura 1**.

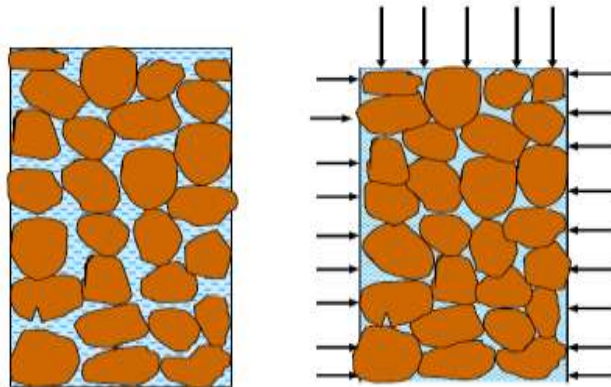
FIGURA 1 Re acomodación de las partículas (dilatancia)



Fuente: (Augusto, 2000)

A lo explicado previamente, se le llama dilatancia. Pero no en toda arena se genera un comportamiento dilatante, esto depende de cada tipo, si es una arena suelta; al estar sometida a esfuerzos hay un comportamiento contractivo con endurecimiento; esto ocurre porque los granos de la arena están más separados y tienden a acomodarse entre los espacios vacíos como se muestra en la **figura 2**:

FIGURA 2 : contracción o compactación (dilatancia negativa)



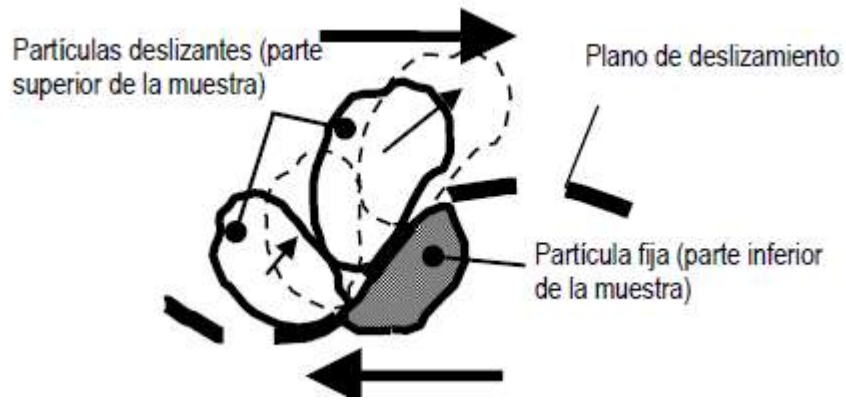
Fuente: (Agosto, 2000)

La dilatancia ocurre porque los granos deben deslizarse sobre los que tienen delante ascendiendo en una dirección inclinada con respecto a la del deslizamiento macroscópico. El resultado de esto es doble: por un lado, la resistencia aparente es mayor, y por otro, el deslizamiento tiene una componente ascendente, lo que provoca un aumento de volumen y un esponjamiento de la estructura del suelo.

En la arena suelta, en cambio, los granos forman una estructura muy abierta. Al deslizarse, van cayendo a posiciones más empaquetadas, con una disminución aparente de volumen. La resistencia va aumentando paulatinamente.

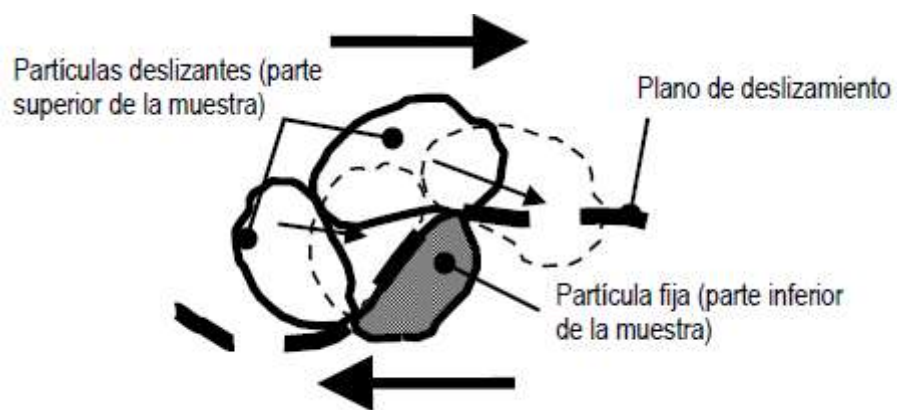
En la **figura 3 y 4** se puede observar este comportamiento a nivel de grano:

FIGURA 3 Dilatancia a nivel granular.



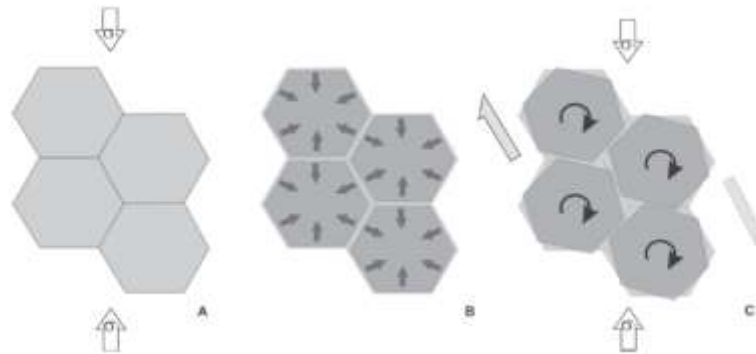
Fuente: (Grupo geotécnia)

FIGURA 4 Contracción a nivel granular.



Fuente: (Grupo geotécnia)

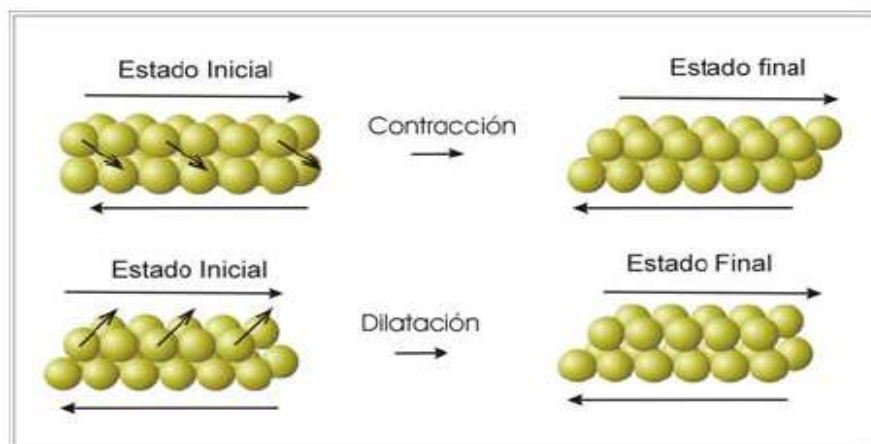
FIGURA 5 Reorientación de las partículas internas de la roca.



Fuente: (Rosello, 2003).

En conclusión se pueden presentar estos dos estados de la roca bajo los esfuerzos aplicados, y su comportamiento depende de si es una arena densa o suelta como se muestra en la **figura 6**.

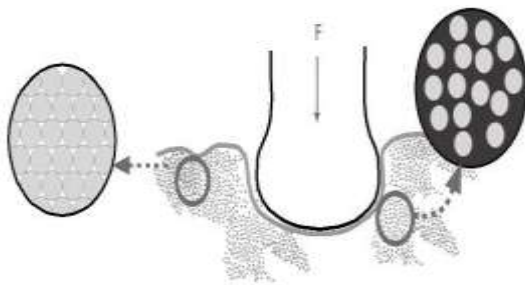
FIGURA 6 Ordenamiento de las partículas gracias a los esfuerzos de cizalle.



Fuente: (Manzanal, 2008)

Al aumentarse el volumen y reordenarse las partículas se crean espacios entre cada grano, el cual se puede llenar de agua, aceite o cualquier tipo de fluido, este se filtra hacia el espacio que se ha generado. Este fenómeno se puede observar en la cotidianidad de la vida, un ejemplo de ello es en la arena de la playa, cuando una persona pisa la arena lo que está haciendo es generando un esfuerzo sobre ella, lo que hace que las partículas se reordenen y se filtre el agua hacia la pisada, por esta razón es que siempre se verá seco a los alrededores de la huella, en la **Figura 7** se puede ver el esquema de la dilatación en el ejemplo en mención.

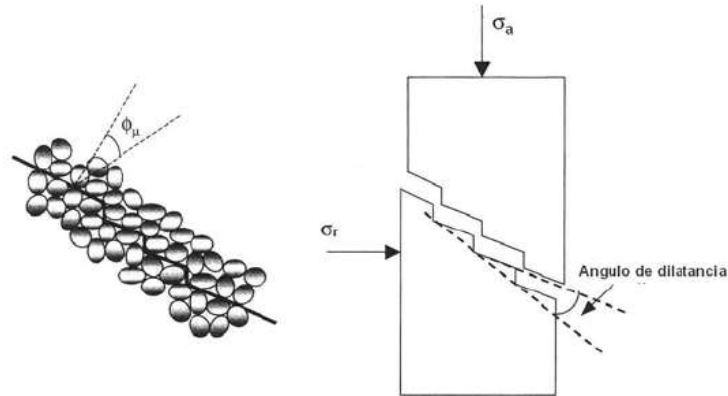
FIGURA 7 Ejemplo de huella en la playa.



Fuente: (Francisco Melo)

Cuando ocurre la dilatación en la roca, se incrementa el volumen total, e internamente hay una separación entre cada grano, esta separación interna de cada grano se puede medir con el ángulo de dilatación, que es el ángulo de separación que se forma entre cada partícula. En la **figura 8** se puede observar cómo se forma.

FIGURA 8: Esquema del ángulo dilatancia



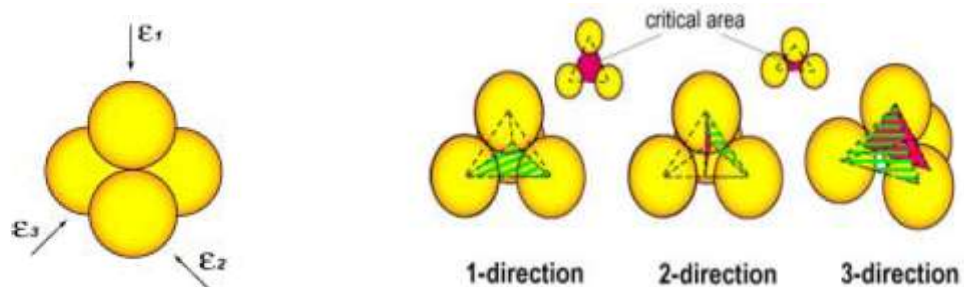
Fuente: (Francisco Melo)

Existen diferentes modelos matemáticos para el cálculo de este ángulo, pero en esta investigación se hace énfasis en las ecuaciones del aumento de volumen de la roca.

2.2 Aplicaciones (Permeabilidad)

Cuando se dilata la roca, las partículas internas se reordenan, esto hace que queden más separadas y haya un cambio (aumento) en la permeabilidad y la porosidad, sucediendo lo contrario en la zona de contracción donde estas dos propiedades disminuyen (arena suelta). En la **figura 9** podemos observar una configuración inicial de los granos sometidos a esfuerzos, donde existe un área crítica entre cada grano, esta va cambiando su dirección a medida que los esfuerzos cambian, esto hace que se modifique la permeabilidad.

FIGURA 9: Cambio de permeabilidad



Fuentes: (y.li).

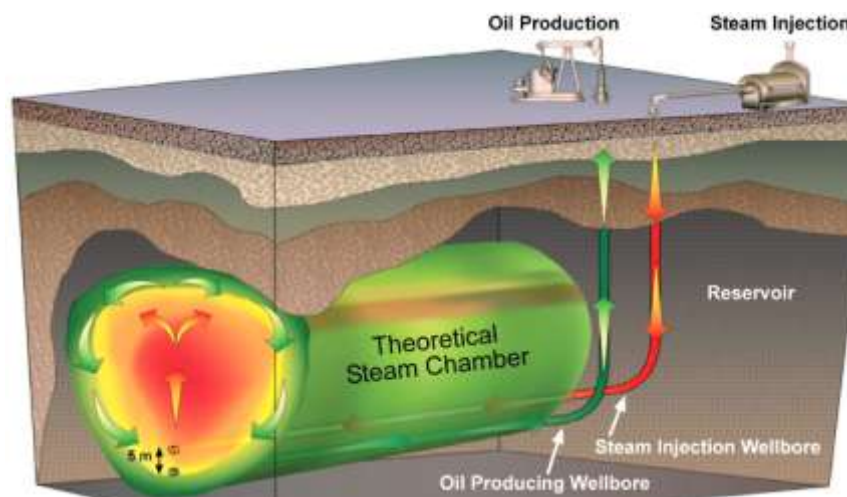
Existen modelos matemáticos para el cálculo de cada área crítica, seguida del cálculo de la permeabilidad, esta depende de los esfuerzos, el radio de grano, y el módulo de Young. Estos modelos no se analizan en este informe técnico ya que no es el objetivo de esta investigación.

Un correcto estudio del incremento de la permeabilidad y la porosidad gracias al fenómeno de dilatación se puede enfocar en la producción de crudo pesado, pues esto generaría un mejoramiento del medio poroso, facilitando el movimiento del hidrocarburo por la arena.

Esto se está estudiando en el método de recobro **SAGD**; en dicho proceso, dos pozos horizontales paralelos son perforados en la formación, donde uno de ellos se encuentra 5 metros por encima del otro. En el pozo superior se inyecta vapor y en el pozo de abajo se acumula el petróleo caliente que drenó desde la formación productiva, junto con el agua de la condensación del vapor inyectado.

La base del proceso es que al inyectar el vapor se forma una cámara de vapor que crece a lo alto de la vertical y horizontalmente en la formación. El calor del vapor reduce la viscosidad del crudo pesado, lo cual permite que fluya hacia la parte inferior del pozo, en la **figura 10** se puede observar el proceso.

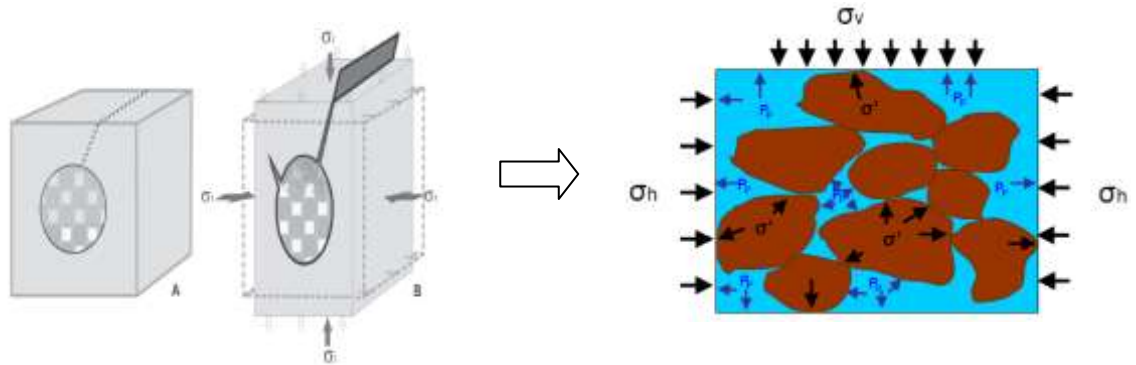
FIGURA 10 Proceso SAGD



Fuente: (Epmag)

Geo-mecánicamente, cuando este proceso ocurre, el aumento de la temperatura hace que las rocas se dilaten, y estas a su vez van a generar esfuerzos sobre las otras rocas que están alrededor, con esto ocurre el proceso de dilatación mecánica, se reordenan las rocas y la formación aumentará su volumen, este reordenamiento hará que la permeabilidad aumente, por ende hay mayor facilidad para que el crudo pesado fluyan, en la **figura 11** se muestra el comportamiento de las rocas gracias a los esfuerzos producidos por la dilatación térmica, además del incremento de la presión de poro por la nueva reacomodación de las rocas.

FIGURA 11 Dilatación térmica, reacomodación de las rocas



Fuente: (Rosello, 2003)

En la figura anterior el primer dibujo representa la arena aumentando su volumen gracias a la temperatura, después muestra como las rocas se expanden y la presión de poro aumenta; se crean esfuerzos hacia otras rocas y estas hacen que se expanda la formación y aumente su permeabilidad.

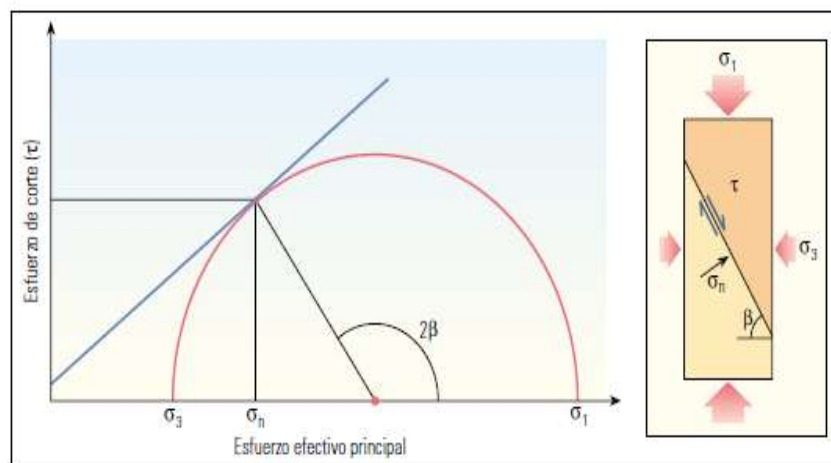
2.3 Aplicaciones (Criterio de Falla – Dilatación)

Existe una relación entre el criterio de falla de la arena y la dilatación de esta misma. La tendencia a que la roca falle es mucho más alta cuando la dilatación es elevada, ya que las partículas internas están más separadas y esto hace que surja un comportamiento más blando en la arena.

Para establecer las condiciones en que se establece la falla, se utiliza el modelo de falla de Mohr Coulomb a fin de relacionar los esfuerzos principales y la presión de poro con la cohesión y el ángulo de fricción interna.

En la **figura 12** se puede observar el círculo de Mohr que representa el estado de los esfuerzos, que oscila entre el esfuerzo 3 y el esfuerzo 1, cuando el círculo intercepta la línea de falla azul, la roca fallará por cizalladura.

FIGURA 12 Círculo de Mohr.



Fuente: (Acock, 2002)

En una muestra de roca a la cual se le hace esta prueba, va a mostrar un comportamiento específico dependiendo de los esfuerzos aplicados, este comportamiento es modificado cuando la dilatancia está presente, ya que la muestra se tornará más blanda, (separación interna de partículas) y esto hará que la roca se falle mucho más rápido, lo cual provocará que haya un cambio entre la línea de falla y el círculo de Mohr.

3 ASPECTOS GENERALES Y GEO-MECANICOS DE LOS SUELOS GRANULARES

Para un mejor entendimiento de los modelos que describen el fenómeno de dilatancia, hay que tener idea del comportamiento de los suelos granulares, a continuación se dará algunos aspectos generales que son necesarios para el entendimiento de los modelos matemáticos que se presentaran al final.

3.1 COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS GRANULARES

Los suelos granulares se definen como aquellos en los cuales las fuerzas intergranulares tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico observado. Esta categoría engloba a rocas, gravas y arenas además de clasificarse en materiales densos o sueltos, a esto se le llama también suelos no cohesivos.

Para poder estudiar el comportamiento del suelo granular es necesario tener en cuenta estos dos conceptos, tensión efectiva y condición de drenaje.

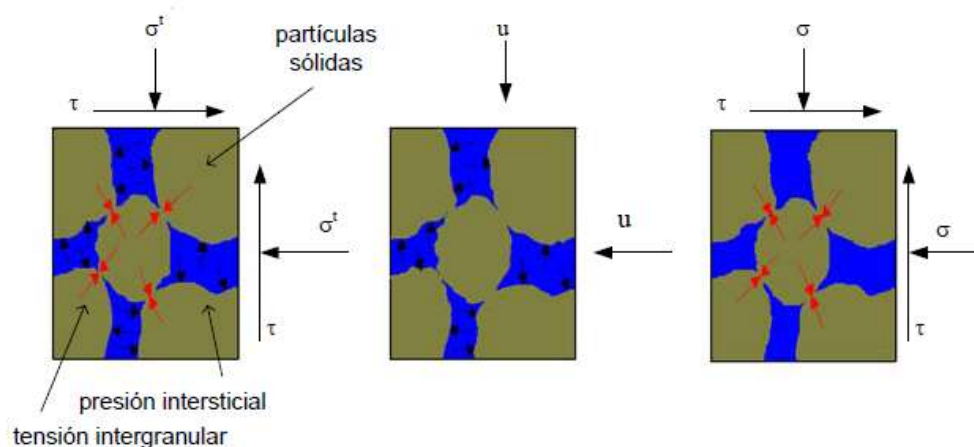
3.1.1 Tensión efectiva

Los suelos son materiales trifásicos constituidos por el esqueleto de partículas sólidas, rodeado de huecos interconectados que pueden estar ocupados por aire y agua. Un suelo con los huecos completamente ocupados por agua se denomina suelo saturado, sin embargo, es posible que los huecos estén llenos de aire, sin nada de agua, entonces se define como suelo seco.

El estado total de tensiones en una roca está dado por dos componentes, la presión intersticial, y la tensión intergranular, a esta tensión total se le llama *tensión efectiva*.

En la **figura 13** se puede observar un esquema de estas tensiones.

FIGURA 13 Estado totales de tensiones



Fuente: (Grupo geotécnia)

3.1.2 Comportamiento Drenado

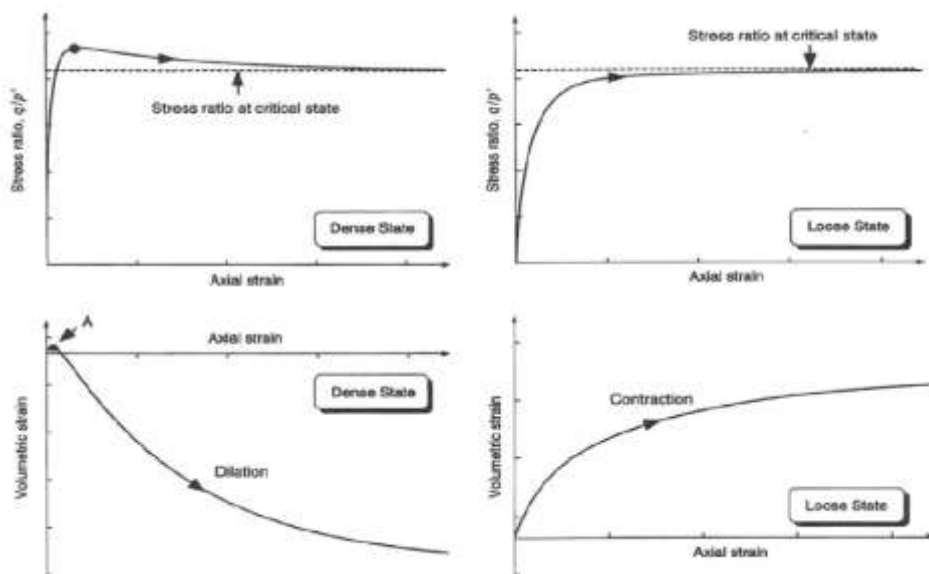
El agua y las partículas sólidas se consideran incompresibles en suelos totalmente saturados. Por lo tanto, sólo si se escapase agua de los huecos se permitiría un cambio de volumen, donde, el volumen de agua que se escapa es igual al volumen de la roca que aumenta (Principio de Arquímedes). Si las tensiones se aplican tan lentamente que se disipa fácilmente el exceso de presión intersticial, el suelo tiene la condición de drenaje, por otro lado, bajo una condición sin drenaje, las cargas se aplican tan rápidamente que la presión intersticial no tiene tiempo a disiparse. Por consiguiente, si no se permite el drenaje, no puede haber ningún cambio de volumen y

el suelo únicamente experimenta deformación tangencial, denominándose condición de volumen constante.

3.1.3 Densidad

Esta propiedad es indispensable para la medida de la dilatancia, ya que dependiendo de esta se podrá saber cómo se comportará la arena, por ejemplo, si es una arena muy densa la arena tenderá a dilatarse, mientras que si es una arena suelta esta tenderá a contraerse.

FIGURA 14: Comportamiento típico de arenas densas y sueltas sometidas a corte triaxial de compresión.



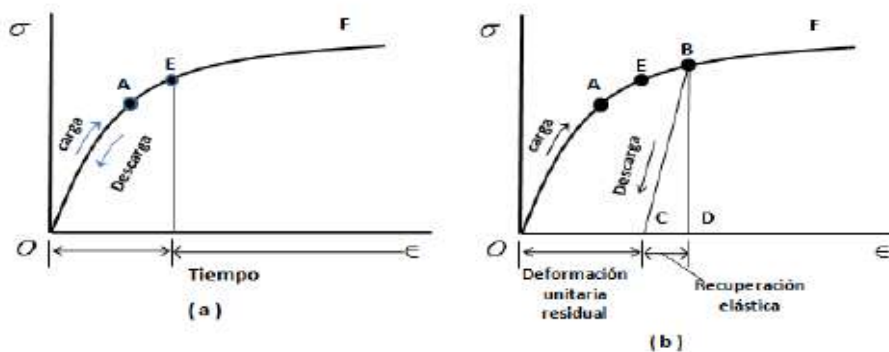
Fuente: (Manzanal, 2008)

3.1.4 Comportamiento volumétrico, Elástico - Plástico.

Cuando una muestra es sometida a esfuerzos, el material presenta dos casos, un comportamiento elástico y uno plástico. La parte de la roca que se recupera después de una descarga del esfuerzo es la componente elástica. Mientras, la fracción que no se recupera se define como la componente plástica. Las deformaciones plásticas volumétricas son causadas por el reagrupamiento, deslizamiento y rotura de las partículas sólidas del suelo. Por otro lado, las deformaciones elásticas volumétricas se deben principalmente a la deformación elástica de esas partículas sólidas. Las deformaciones plásticas provocan un cambio interno en la estructura del suelo. Por lo tanto, la respuesta volumétrica es una característica importante de suelos, presentando deformación plástica volumétrica bajo carga hidrostática.

La **figura 15** muestra una gráfica de los dos comportamientos explicados anteriormente, se puede observar como partiendo desde un punto "O" a medida que pasa el tiempo y aplicando carga y descarga puede que el material regrese a su estado original cuando se descarga (elástico) o se quede donde se aplicó la última carga (plástico).

FIGURA 15 Comportamiento elástico (a) comportamiento plástico (b)



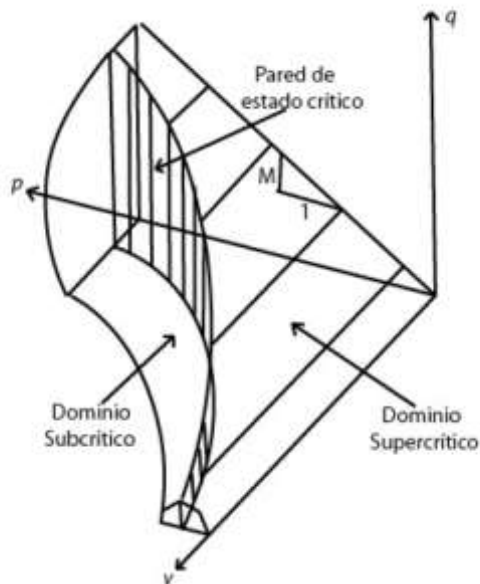
Fuente: (bibing)

3.2 LÍNEA DE ESTADO Y ESTADO CRÍTICO

Si se somete un suelo granular a una deformación de corte, es decremento de volumen producido, si la arena es suelta o de poca densidad, mientras que ocurre un comportamiento dilatante cuando este material es denso, en los dos casos tienden a generar un suelo con la misma densidad original. Por ende cuando se ha alcanzado la densidad final, el suelo se deforma sin haber un cambio notorio de volumen ni variaciones tensionales. Es posible definir en un estado de densidad crítica, a condiciones determinadas esto corresponde a La Línea de Estado Crítico (LEC).

En una gráfica de 3 dimensiones se ve que existe una relación entre q , p' y v , donde v es el volumen específico.

FIGURA 16 Pendiente línea de estado crítico 3D



Fuente. (Telmoc.palancar);

En la mayoría de los modelos matemáticos para el cálculo de dilatancia necesitamos la pendiente de línea del estado crítico, que para su cálculo dependen de q y p , donde

q es la tensión desviadora y p es la tensión volumétrica efectiva y están definidas por la **ecuación 1 y 2**

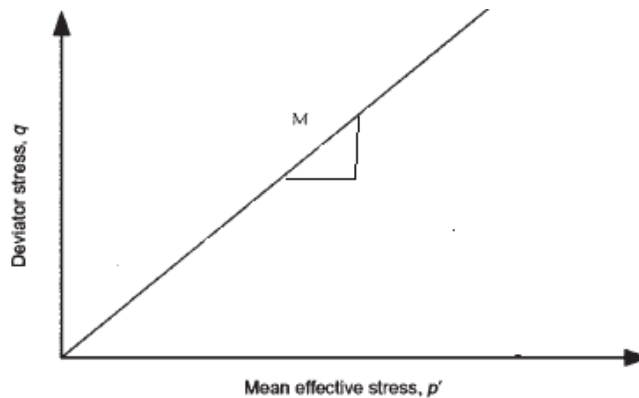
$$p' = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (1)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

Estas dos ecuaciones son relaciones de esfuerzos, graficando estos dos parámetros se puede obtener la pendiente de línea del estado crítico "M".

En la **figura 17** se ve una gráfica de p vs q en 2D, donde se puede observar mejor la pendiente de línea de estado crítico.

FIGURA 17 q vs p'



Fuente. (Telmoc.palancar)

El procedimiento para el cálculo de la pendiente de línea de estado crítico se mostrará en la explicación de los modelos de dilatancia.

3.3 RELACIÓN DE VACÍOS Y PARÁMETRO DE ESTADO.

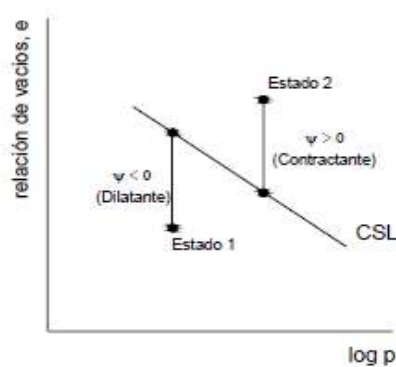
Es importante conocer sobre este tema ya que varios modelos del cálculo de dilatancia utilizan el parámetro de estado para dar el resultado.

El parámetro de estado está en función de la porosidad, lo que quiere decir que los modelos matemáticos que plantean el cálculo de la dilatancia con este parámetro, utilizan la porosidad intrínsecamente, este concepto fue descrito por Wroth y Bassett en 1945:

$$\Psi = e - e_c \quad (3)$$

Donde e es la relación de vacíos a condiciones iniciales y e_c es la relación de vacíos a condiciones críticas, justamente cuando ha tocado la línea del estado crítico.

FIGURA 18 Relaciones de vacíos vs log p



Fuente: (Manzanal, 2008).

En la **figura 18** muestra la línea del estado crítico, el parámetro de estado y las relaciones de vacíos; se puede observar que la relación de vacíos crítica es la que

toca la línea del estado crítico, con esto, se puede concluir que cuando hay un comportamiento dilatante el parámetro de estado es negativo, ya que la relación de vacíos inicial es más pequeña que la crítica, e inversamente el parámetro de estado es positivo cuando hay contracción, ya que la relación de vacíos inicial es mayor que la relación de vacíos crítica.

Ahora bien, como se dijo antes, el parámetro de estado está relacionado intrínsecamente con la porosidad, esto se observa en las siguientes ecuaciones

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (4) \qquad n = \frac{V_s}{V_t} \quad (5)$$

Relacionando la ecuación 4 y 5 se obtiene:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_t - V_v}$$

$$e = \frac{\frac{V_v}{V_t}}{1 - \frac{V_v}{V_t}}$$

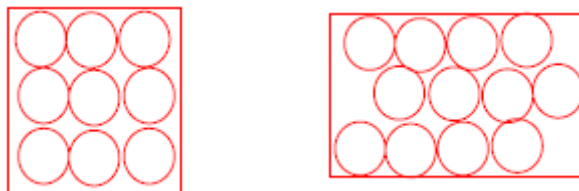
$$e = \frac{n}{1-n} \quad (6)$$

La ecuación 7 muestra la relación que existe entre el índice de vacíos “e” y la porosidad en este caso denotada por “n”

Se pueden representar los valores máximos de relación de vacíos y porosidad de acuerdo a la organización de las partículas en el esqueleto del suelo, generalmente existen dos:

Suelo granular ideal de partículas esféricas, ordenadas en arreglo cubico con 6 puntos de contacto por esfera u ordenadas en arreglo rómbico con doce puntos de contacto

FIGURA 19 Arreglo cubico, Arreglo rómbico



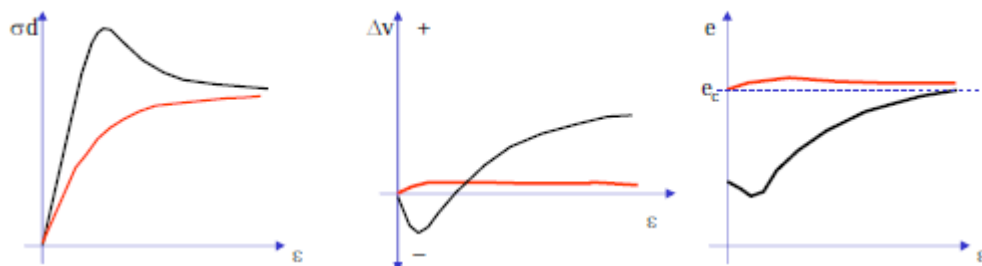
Fuente: (Leoni, 2009);

Para las de arreglo cubico que representa el estado más suelto, los parámetros máximos corresponden a una relación de vacíos máximo $e=0.91$, y una porosidad $n=47,6\%$, y para el estado más denso (arreglo rómbico) los valores mínimos de relación de vacíos $e=0.35$, y porosidad $n=26,0\%$.

También se ha llegado a unos rangos de relación de vacíos y porosidad, para arenas bien graduadas y de orden uniforme con $e=0,43-0,67$ $n=30\%-40\%$ y $e=0.51 -0.85$ $n=34\%-46\%$ respectivamente

También se ha observado que las arenas sueltas bajo una sollicitación de corte, disminuyen su volumen (contractiva) hasta obtener una relación de vacíos constante, mientras que la misma arena en estado denso, (dilatante) aumenta su volumen hasta llegar a la misma relación de vacíos y mantenerla constante.

FIGURA 20 Comportamiento general relación de vacíos



Fuente: (Grupo geotécnia)

Para la relación de vacíos existen varios modelos matemáticos que sirven para su cálculo, más adelante en la sección donde se explican los modelos de dilatancia que son dependientes de la relación de vacíos, se mostraran varios de estos.

4 EQUIPOS DE LABORATORIO PARA MEDIR EL CAMBIO DE VOLUMEN EN LA ROCA (DILATANCIA).

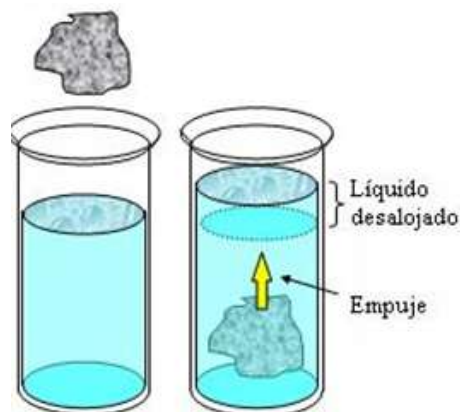
La medida de dilatación o cambio de volumen de la roca se puede medir en laboratorio. En este capítulo se presentará algunos equipos para pruebas triaxiales, y las características de cada uno.

La medida del cambio de volumen de la roca gracias a la aplicación de esfuerzos, está basada en la medida de la dilatación por el flujo de agua (principio de Arquímedes) o la medición directa de la longitud y diámetro de la muestra.

4.1 Medida del fluido.

Se basa en el principio de Arquímedes, el cual dice que un cuerpo sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja.

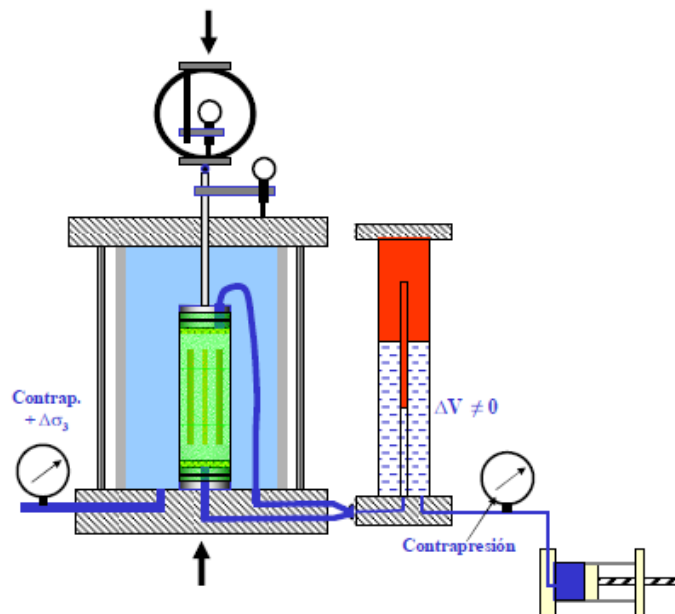
FIGURA 21 Principio de Arquímedes.



Fuente: (Educarchile)

El método de laboratorio más utilizado para medir el cambio de volumen teniendo en cuenta el principio de Arquímedes es el **sistema de buretras**, dicho sistema está conectada a la triaxial **figura 22**, y se puede medir el volumen directamente el nuevo volumen que tiene la roca por el cambio del fluido en esta.

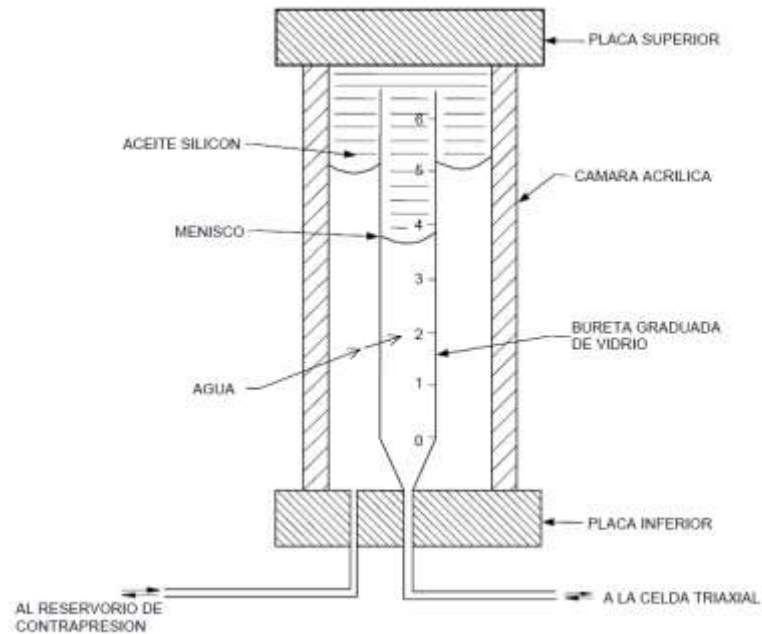
FIGURA 22 Triaxial, sistema de buretras



Fuente: (Augusto, 2000)

El sistema de buretras es un tubo calibrado que contiene dos fluidos inmiscibles, un fluido es el agua y el otro es un aceite ligero, el cambio de volumen que ocurre en la roca se mide con la localización del menisco, este se mueve a respuesta al flujo a través del tubo, la **figura 23** muestra la bureta de una forma más detallada.

FIGURA 23 Buretra.



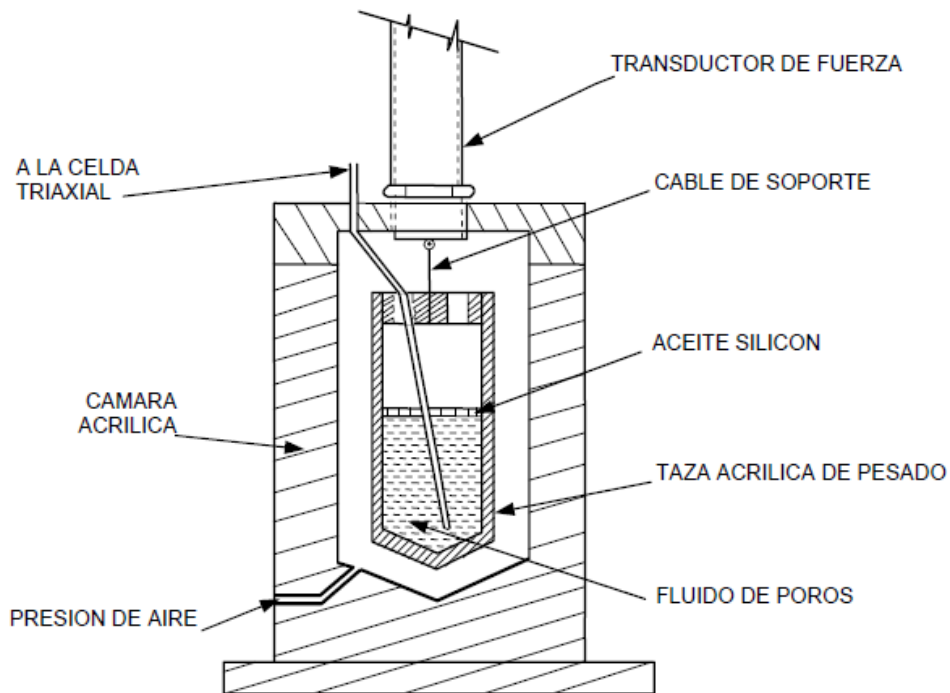
Fuente:(Hurtado, 2007)

4.2 SISTEMA GRAVIMÉTRICO.

Este sistema se basa en pesar el fluido que se va medir, por ello, una mayor exactitud en el cambio de volumen que ocurrió en la roca. Utiliza un transductor de fuerza para hacer mediciones directas gracias al cambio de la resistencia eléctrica que hay en las láminas del transductor.

El más utilizado de estos sistemas gravimétricos es el aparato de peso directo, este es una taza acrílica suspendida de un transductor de fuerza donde va el fluido que va a ser medido, al rededor hay aceite de silicón que reduce el efecto de vaporación, en la **Figura 24** se puede observar.

FIGURA 24 Sistema gravimétrico.



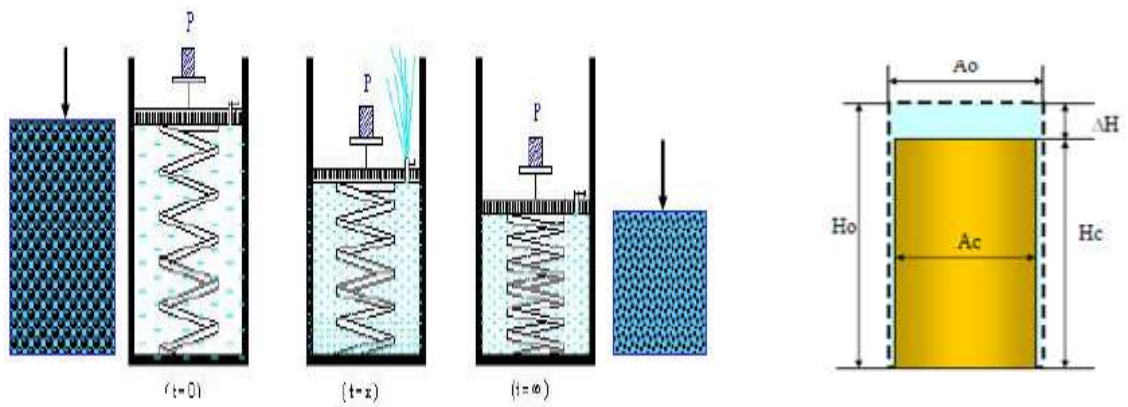
Fuente: (Hurtado, 2007)

Los dos sistemas anteriores están conectados directamente a la prueba triaxial, por esta razón la prueba debe ser drenada, para que el agua contenida en la roca pueda fluir y así se pueda medir el nivel de líquido que salió, que a su vez es correspondiente al aumento de volumen de roca.

También se puede medir el volumen de compresión o dilatación directamente con el diámetro y la altura del plug examinado, se hacen mediciones iniciales en un $t=0$, y después se mide la nueva altura cuando se ha aplicado el esfuerzo y la muestra ha

cambiado de volumen, en la **figura 25** se presenta el esquema seguido de las ecuaciones para hacer el cálculo con respecto a las medidas.

FIGURA 25 Esquemas de una prueba drenada



Fuente: (Augusto, 2000)

Ecuaciones para el cambio de volumen

$$\Delta V_0 = A_0 H_0 - A_c (H_0 - \Delta H)$$

$$A_c = \frac{A_0 H_0 - \Delta V_0}{H_0 - \Delta H}$$

$$A_c = \frac{V_0 - \Delta V_0}{(H_0 - \Delta H)} \quad (7)$$

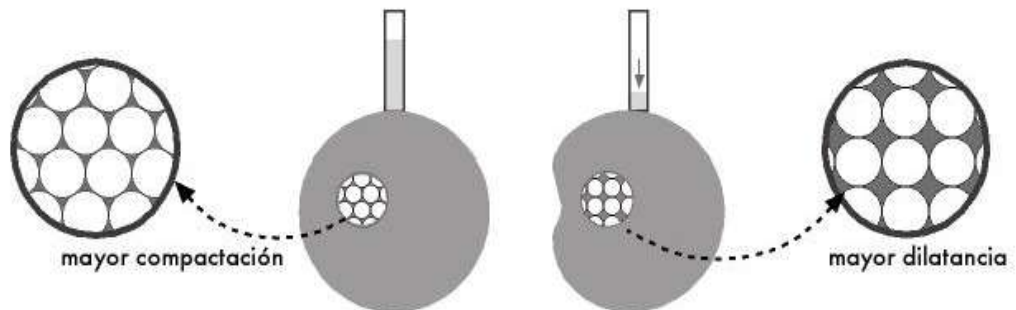
5 ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS MATEMATICOS QUE DESCRIBEN EL FENOMENO DE DILATANCIA

En la literatura se han encontrado numerosos artículos los cuales hablan sobre el fenómeno de dilatancia, modelos matemáticos que han ido evolucionando en el momento en que se asumen diferentes posturas, teniendo en cuenta diferentes propiedades de la arena (densidad, angulosidad, etc.).

El concepto de dilatancia fue documentado por Osborne Reynolds en 1888, posteriormente vinieron estudios de Taylor en 1948 analizando la fricción de las arenas, pero Rowe en 1962 da inicio a la famosa “teoría de dilatancia” el cual relaciona la velocidad de deformación plástica volumétrica con el cociente de tensiones mayores y menores para un ensayo triaxial de compresión, donde muchos modelos posteriormente amplían, modifican y mejoran esta teoría de Rowe.

Osborne Reynolds empezó a hablar de dilatancia en el siglo IXX con un experimento el cual introducía arena en una goma de plástico y un nivel de líquido marcado en un tubo de vidrio. Al generar una fuerza a esta goma llena de arena las partículas se acomodaron, en donde el sentido común mostraría que el nivel de agua aumentaría, pero debido a este acomodamiento de las partículas el agua encontró nuevos espacios para introducirse y por ende el nivel de agua disminuyo como vemos en la **figura 26**.

FIGURA 26 Experimento de Reynolds



Fuente: (Francisco Melo)

Existen varios modelos que están en la literatura para el cálculo del aumento de volumen en la roca debido a esfuerzos (dilatancia), se han seleccionado los principales y más precisos.

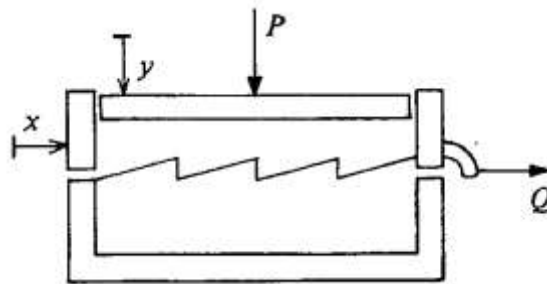
5.1 MODELO DE TAYLOR

La primera persona que empezó con los estudios de dilatancia fue Taylor en 1948, donde definió y explicó el concepto de dilatancia, mediante el tradicional ensayo de corte, él sugirió que la dilatancia dependía de los esfuerzos y de una constante fraccional típica de cada material. Su cálculo la pudo representar en la **ecuación 9**:

$$\frac{P}{Q} \chi \frac{dY}{dx} = \mu \quad (8)$$

En esta ecuación la dilatancia está dada como dy/dx , μ es la constante fraccional, Q es la tensión desviadora, P es la tensión volumétrica efectiva **figura 27**.

FIGURA 27 Esquema del sistema de fuerzas estudiado por Taylor



Fuente: (García).

Este modelo simple fue la primera expresión de dilatación que se trabajó, para Taylor el único efecto directo sobre el aumento de volumen son los esfuerzos.

5.1.1 Ventajas

Deduce que el material el cual está siendo sometido a esfuerzos depende únicamente una constante de fricción (todo el trabajo realizado se disipa en forma de fricción, esta constante es particular en cada material) del material. Además es solo dependiente del estado de tensión al cual está siendo sometida la muestra. (q/p')

5.1.2 Limitaciones

La falta de incluir el ángulo de fricción que toman las partículas al rozarse, además de otros fenómenos que ocurren en la roca puede que haga el modelo mucho más incierto en el cálculo de la dilatación.

5.2 MODELO CAM CLAY (SCHOFIELD & WROTH (1963))

Wroth y Schofield en 1963 emplean una expresión para el cálculo de dilatación semejante pero más sencilla que la anteriormente planteada, Donde δ es la dilatación, M es la pendiente de línea del estado crítico, n es la relación de tensiones (q, p') tensión desviadora, y tensión volumétrica efectiva respectivamente:

$$\delta = M - \eta \quad (9)$$

Cada parámetro se obtiene de la siguiente manera:

5.2.1 Tensión desviadora “q”:

Es una relación de esfuerzos y se puede calcular con la **ecuación 2**

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

Acá se puede observar que la tensión desviadora solo depende los esfuerzos σ_1 y σ_3 .

5.2.2 Tensión volumétrica efectiva p' :

Se calcula con la **ecuación 1**.

$$p' = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (1)$$

P' tiene en cuenta los 3 esfuerzos a los que es sometida la roca y se divide en 3 (promedio). De aquí es donde se puede calcular la relación de tensiones “ n ” para después utilizarla en la ecuación general del modelo de Cam Clay.

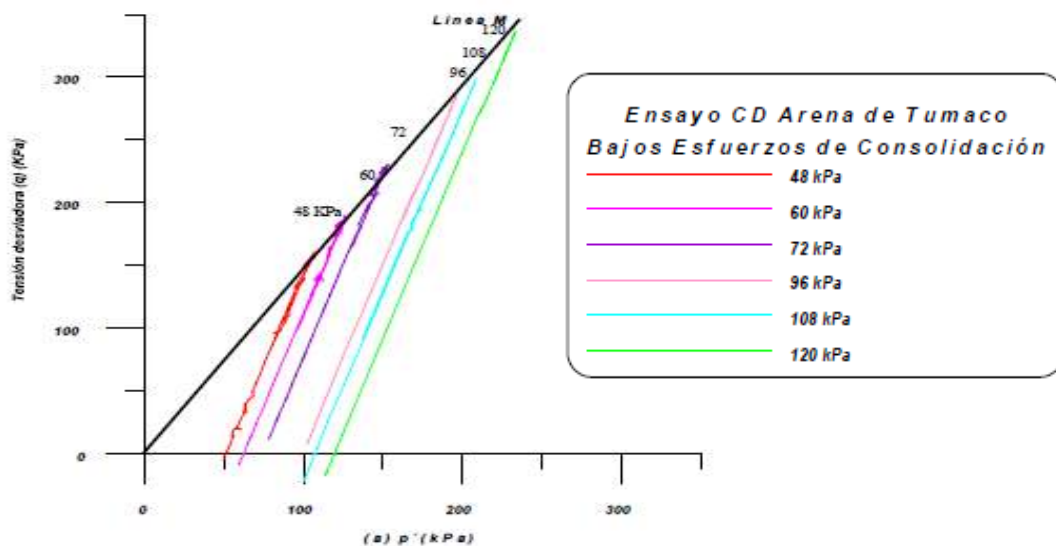
$$\eta = \frac{q}{p'} \quad (10)$$

5.2.3 Pendiente de línea del estado crítico M.

Cundo se grafica la tensión desviadora contra la tensión volumétrica efectiva, a medida que se va variando un esfuerzo se va creando una línea recta, a esta se le llama línea del estado crítico. Para calcular está pendiente, lo primero, para diferentes presiones de confinamiento, o ensayos triaxiales que es sometida la roca se obtiene la presión a la cual la roca pasa de presentar un comportamiento elástico a plástico, se hace esto para las diferentes pruebas triaxiales que se le hacen a la roca, se calcula y grafica p vs q , la línea que pasa desde 0 intersecando esos puntos es la línea del estado crítico.

En la **figura 28** podemos observar el ejemplo de una roca para diferentes pruebas triaxiales, y la ubicación del punto de transformación de comportamiento elástico a plástico.

FIGURA 28 Pendiente de línea de estado crítico.

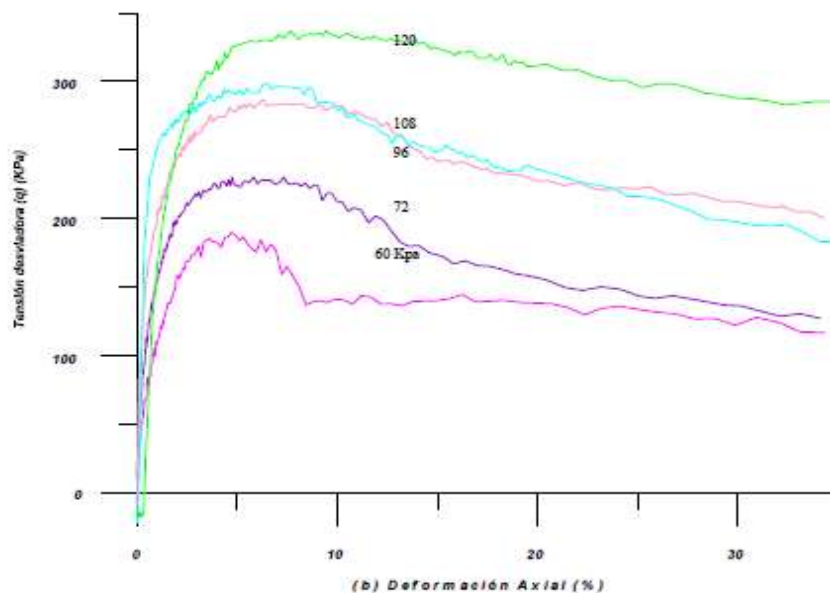


Fuente: (Alarcón-Guzmán, 2008)

Para el cálculo de esta presión máxima de comportamiento elástico se puede hacer mediante pruebas de laboratorio, se aplica cargas a la roca y después de la descarga se observa cuando el material deja de volver a su posición original antes de la deformación.

También matemática o analíticamente se puede calcular este punto gracias a una gráfica de tensión desviadora “q” vs deformación axial, donde el pico donde empieza descender la gráfica es la presión máxima de comportamiento elástico, (**figura 29**). El proceso más detallado se mostrara más adelante cuando se haga la aplicación de los datos estudiados

FIGURA 29Tensión desviadora vs deformación axial.



Fuente: (Alarcón-Guzmán, 2008)

Otra forma de obtener la pendiente de línea de estado crítico es cuando se conoce el ángulo de fricción interna, Wood en 1994 pudo llegar a una expresión que los relaciona.

$$\text{Sen } \phi' = \frac{3M}{6+M} \quad (11)$$

Donde M es la pendiente de línea del estado crítico, y ϕ' es el ángulo de fricción interna.

Definidos estos parámetros, se puede calcular la dilatancia en la roca según la **ecuación 9** (Cam Clay), y de esta manera concluir que este modelo solo tiene en cuenta los esfuerzos a los que son sometidos la roca, independientemente de su orientación.

5.3 MODELO CAM CLAY MODIFICADO ROSCOE & BURLAND (1968)

Después de varios años de estudio del modelo Cam Clay, fue modificado debido a que predice deformaciones plásticas desviadoras importantes para pequeños valores de h (magnitud escalar denominada modulo plástico) por lo que se sustituyó por la **ecuación 12**.

$$\delta = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \quad (12)$$

Por varios ensayos triaxiales Roscoe y Burland en 1968 pudieron llegar a esta ecuación que era mucho más exacta que la planteada en la **ecuación 9**; esta nueva ecuación no varía con respecto a los parámetros utilizados para el cálculo de

dilatancia, solo se tiene una nueva reestructuración de la formula donde según Roscoe y Burland predicen mejor el comportamiento dilatante que el modelo Cam Clay original.

5.3.1 Ventajas

Estos dos modelos hacen una generalización sobre los esfuerzos simplificando el concepto de dilatancia de forma tal que este en función de la pendiente del estado crítico y el parámetro η (relación de tensiones). Poseen una relación estrecha con el modelo de Rowe para esfuerzos isotrópicos (que no varían en la dirección dada).

5.3.2 Limitaciones

Estos modelos solo tienen en cuenta los esfuerzos, por lo cual se hace menos preciso referente a los otros modelos que tienen en cuenta otras propiedades intrínsecas (densidad, granulometría, etc.) de la roca.

5.4 MODELO DE ROWE'S

En 1962 Rowe determino otra ecuación para el cálculo de dilatancia basada en la idea de que la relación del trabajo realizado por una fuerza que produce un incremento de deformación en el suelo y el trabajo disipado al producirse este debe tomar un valor de constante K , relacionado directamente con el ángulo de fricción interna Φ .

El valor de este ángulo varía entre un mínimo correspondiente al ángulo de rozamiento movilizado cuando solo algunas partículas se están deslizando sobre otras, y un máximo relacionado con el ángulo de resistencia al corte en el estado crítico, cuando se están produciendo grandes deformaciones en el suelo y su estructura se está reordenando constantemente.

La relación que Rowe plantea, "K" en base al ángulo de fricción interna es la siguiente:

$$K = \text{Tan}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_f}{2} \right) = \frac{1 + \text{sen } \phi_f}{1 - \text{sen } \phi_f} \quad (13)$$

En la **ecuación 13** se puede observar que este parámetro K está relacionado con el ángulo de fricción interna denotado ϕ_f , esta es la primera consideración que hace el autor del modelo para llegar finalmente a la ecuación que describe la dilatancia.

El concepto de dilatancia analíticamente está dado por la siguiente forma:

Donde $d\varepsilon_v$ = razón de cambio de la deformación volumétrica

$d\varepsilon_s$ = razón de cambio de la deformación desviadora

En lo cual no se limita a las arenas densas donde dichos parámetros se pueden definir como:

$$d\varepsilon_1 = d\varepsilon_1 + 2 * d\varepsilon_3 \quad (15)$$

$$d\varepsilon_s = \frac{2}{3}(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) \quad (16)$$

Los incrementos tensionales se pueden definir como:

$$dp = \frac{d\sigma_1 + 2*d\sigma_3}{3} \quad (17)$$

$$dq = d\sigma_1 - d\sigma_3 \quad (17.1)$$

Teniendo en cuenta estas relaciones, el autor del modelo puede relacionar los esfuerzos con la constante K llegando mediante un largo proceso matemático a esta ecuación de dilatancia:

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_s} = \frac{3\eta(2+K) - 9(K-1)}{2\eta(K-1) - 3(2K+1)} \quad (18)$$

Finalmente el autor del modelo llega a la expresión de dilatancia que además de depender de esfuerzos, tiene en cuenta el ángulo de fricción interna del material

$$d = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{9(M-\eta)}{9+3M-2\eta M} \quad (19) \text{ Modelo de Rowe's.}$$

5.4.1 Ventajas

El ángulo de fricción está estrechamente relacionado con la constante K, el cual es el valor del trabajo disipado en planteamiento de Taylor, $K = (1 + \text{sen}\Phi_\mu) / (1 - \text{sen}\Phi_\mu)$. El valor de dicho ángulo de fricción está dado por las características minerales entre las partículas y el rozamiento entre ellas mismas más no está dado por el tipo de empaquetamiento entre ellas. El método de Rowe crea una relación directa entre el parámetro η (relación de tensiones) y la dilatancia.

5.4.2 Limitaciones

En un caso hipotético para el cual el ángulo de fricción no estuviera entre el rango que Rowe propone para la variación de su constante K ($\Phi_\mu < \Phi_f < \Phi_c$), no se puede aplicar el modelo.

5.5 NOVA

Este modelo matemático sale alrededor del año 1979 (nova y Wood), acá se propone una ley de dilatancia dividida por dos funciones, una línea recta y una hipérbola. Donde se puede calcular de la siguiente forma, teniendo en cuenta la relación de tensiones “n”:

$$d = \frac{M - \eta}{1 - N} \quad (20)$$

Se puede observar que solo depende de los esfuerzos y un parámetro N integrado en esta ecuación que lo llamo coeficiente de acoplamiento volumétrico.

En el caso particular de que $N=0$, el modelo quedaría exactamente igual al de Cam Clay que se explicó anteriormente, este valor está en un rango entre 0 y 1; ya existe en la literatura un valor de N para cada tipo de arena obtenidos de los valores de calibración por pruebas de laboratorio, sin embargo se puede calcular teniendo la pendiente de línea de estado crítico y la constante D_o que se obtiene por calibración cuando se supone que las deformaciones elásticas son pequeñas y despreciables

$$D_o = \frac{M}{(1 - N)} \quad (21)$$

Y podemos definir a D_o como:

$$D_o = \frac{d_o}{M} \quad (22)$$

Este d_0 proviene del modelo constitutivo Li and Dafalias, y se obtiene por calibración de la prueba de laboratorio, en general tiene un valor de $d_0=0.88$, aunque cambia para el tipo de arena, más adelante se mostrará cómo se obtiene este valor.

5.5.1 Ventajas

Nova introduce un nuevo parámetro N , el cual relaciona la propiedad del material, llamado coeficiente de unión volumétrica (N). No solo tiene en cuenta las tensiones.

5.5.2 Limitaciones

A veces el parámetro N es un poco difícil de obtener, puesto que la calibración de laboratorio es necesaria, con otros modelos no se necesita esto para calcular dilatación.

5.6 GAJO Y WOOD

En 1999 se llega a otra ecuación del fenómeno de dilatación, donde la línea de transformación de fase va variando con el parámetro de estado de forma lineal, la **ecuación 13** muestra el modelo matemático a que se llegó:

$$d = A[M_{cv}(1 + K_d\Psi) - \eta] \quad (23)$$

En este modelo constitutivo, los esfuerzos, el ángulo de fricción interna y la porosidad están incluidos también con la relación de tensiones desviadoras y volumétricas, también la pendiente de línea de estado crítico " M_{cv} " y el parámetro de estado ψ que es la relación de porosidades inicial y la porosidad en el punto de estado crítico.

Además hay dos parámetros más que se incluyen en este modelo matemático, " A " que es un multiplicador de la regla de flujo, y " kd " que es otro parámetro de ajuste en el estado de la regla de flujo.

Donde $A=1$, y $K_d=1.1$ aproximadamente para la mayoría de las arenas.

Para K_d se puede utilizar la siguiente ecuación

$$K_d = \frac{1}{\psi_{PTP}} \left(\frac{\eta_{ptp}}{M_g} - 1 \right) \quad (24)$$

Donde ψ_{ptp} es el parámetro de estado y η_{ptp} la relación de tensiones en la línea de transformación de fase.

El parámetro de estado ψ , está comprendido por la resta de la relación de vacíos, como se explicó anteriormente.

$$\psi = e - e_c$$

Donde e es la relación de vacíos inicial y crítica respectivamente, estas son mediciones que se hacen en laboratorio, la primera se toma al inicio de la prueba, y la segunda justamente cuando se toca la línea de estado crítico. Estas medidas tienen que ver con la porosidad de la roca.

También se puede calcular este parámetro con la siguiente expresión matemática

$$e_c = e_o - \lambda_s \left(\frac{P_c}{P_a} \right)^\xi \quad (25)$$

Donde e_o es la relación de vacíos inicial al momento de $p'=0$, P_a es la presión atmosférica, P_c la presión de estado crítico y λ y ξ son constantes para cada tipo de roca. Estas constantes se mostraran más adelante cuando se termine de explicar los modelos.

Cuando tenemos un parámetro de estado inicial, de allí se puede partir para calcular el parámetro de estado original que es el que se necesita para modelar la dilatancia, a continuación se muestra la ecuación que describe esto:

$$\Psi_i = \Psi - \lambda \left(1 - \frac{\eta}{M}\right) \quad (26)$$

Nuevamente aparece el término λ al cual se le dará su valor dependiendo del tipo de arena más adelante.

5.6.1 Ventajas.

Modelo muy exacto, el cual tiene en cuenta la mayoría de propiedades de las que dependen la dilatancia en la roca, como la porosidad, el ángulo de fricción interna y el comportamiento ante los esfuerzos.

5.6.2 Limitaciones.

No es un modelo para calcular la dilatancia rápidamente, por la cantidad de parámetros que hay que obtener antes de calcular la dilatancia.

5.7 LI AND DAFALIAS

En este modelo se analiza que la dilatancia no puede depender únicamente de la relación de tensiones como se observó anteriormente en los modelos explicados, acá se emplea el concepto de arena densa y arena suelta, no siempre la roca se va dilatar también se puede compactar como se explicaba en el capítulo 1, la relación de tensiones “n” puede emplear valores negativos para arena densa (dilatancia) y valores positivos para arena suelta (compactación).

Este modelo se basa en las características internas del material, como lo es la porosidad, acá se define un parámetro de estado que se explicara más adelante. La expresión que calcula la dilatancia, está dada por la **ecuación 27**.

$$d_g = \frac{d_o}{M_g} [M_g \exp(m_d \Psi) - \eta] \quad (27)$$

A medida que se va avanzando, se puede ver que los modelos matemáticos van mostrando nuevos parámetros en este caso m_d y d_o que son los únicos diferentes. Estos parámetros son constantes de calibración de laboratorio, son diferentes para cada roca, y pueden hallarse así:

$$m_d = \frac{1}{\Psi_{PTP}} \text{Ln} \left(\frac{\eta_{PTP}}{M_g} \right) \quad (28)$$

Los parámetros terminados en “ptp” hacen referencia al punto en la línea de transformación de fase.

En la calibración, esta constante se puede obtener donde la dilatancia es nula:

$$d = 0 = \frac{d_o}{M_g} [M_g \exp(m \Psi_{Tf}) - \eta_{TF}] \quad (29)$$

De nuevo están los demás miembros de la ecuación que ya conocemos pero justo en el punto de transformación de fase que se ve en los datos de laboratorio, sabiendo ya el valor de d_o (0.88 para una arena en general) podemos despejar m .

5.7.1 Ventajas.

La dilatancia no depende únicamente de la relación de tenciones n como indica NOVA, si no que hace el análisis para dos tipos de arenas, sueltas y densas. Esto hace que el cálculo sea más acertado que el de NOVA.

5.7.2 Limitaciones.

Hay que analizar qué tipo de arena es antes del cálculo de dilatancia, y para esto hay que observar las presiones originadas en el interior de la formación como consecuencia de la aplicación de cargas de distintos tipos, para la correcta clasificación del tipo de arena.

5.8 PASTOR ET AL

Planteado por pastor en 1985 de la siguiente formula

$$d_g = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = (1 + \alpha_g)(M_g - \eta) \quad (30)$$

Donde existe una constante α_g , que está dada para las diferentes tipos de arena, pero que en su mayoría es 0.45.

A continuación se mostrar esta y las demás constantes anteriores para los diferentes tipos de arena.

ARENA DE MIGA

Tabla 1 parámetro arena Miga.

ARENA DE MIGA		
λ	0,0308	Pendiente de LEC en el plano e-p'
ϵ	0,6	parámetro de ajuste de LEC
h_1 h_2	1,02/0,15	Constante de variación M_f con el parámetro de estado
d_o	0,65	Multiplicador de dilatación
m	2,52	Parámetro asociado a la línea de transformación
H'_o	80	Parámetro de endurecimiento plástico isotrópico
β'_o	1,1	Parámetro al m. plástico isotrópico y variación con parámetro de estado
H_{vo}	25	Constante del módulo plástico volumétrico
β_v	3,98	Parámetro asociado a la resistencia de pico

Editado de: (Manzanal, 2008)

ARENA TOYOURA

Tabla 2 parámetro arena de Toyoura.

ARENA DE TOYOURA		
λ	0,019	Pendiente de LEC en el plano e-p'
ϵ		parámetro de ajuste de LEC
h_1, h_2	1,31/0,85	Constante de variación M_f con el parámetro de estado
d_o	0,88	Multiplicador de dilatación
m	3,5	Parámetro asociado a la línea de transformación
H'_o	125	Parámetro de endurecimiento plástico isotrópico
β'_o	1,9	Parámetro al m. plástico isotrópico y variación con parámetro de estado
H_{vo}	175	Constante del módulo plástico volumétrico
β_v	1,5	Parámetro asociado a la resistencia de pico

Editado de: (Manzanal, 2008)

ARENA BANDING O “B”

Tabla 3 parámetro arena B.

BANDING O “B”		
λ	0,0136	Pendiente de LEC en el plano e-p´
ϵ	0,6	parámetro de ajuste de LEC
$h_1 h_2$	1,17/0,81	Constante de variación M_f con el parámetro de estado
do	0,73	Multiplicador de dilatancia
m	2,02	Parámetro asociado a la línea de transformación
H'_{σ}	125	Parámetro de endurecimiento plástico isotropo
β'_{σ}	1,1	Parámetro al m. plástico isotropo y variación con parámetro de estado
$H_{\nu o}$	165	Constante del módulo plástico volumétrico
β_{ν}	1,82	Parámetro asociado a la resistencia de pico

Editado de: (Manzanal, 2008)

ARENA KURNELL

Tabla 4 constantes arena Kurnell.

ARENA KURNELL		
λ	0,0328	Pendiente de LEC en el plano e-p´
ϵ	0,6	parámetro de ajuste de LEC
$h_1 h_2$	1/0,55	Constante de variación M_f con el parámetro de estado
do	0,8	Multiplicador de dilatancia
m	3,32	Parámetro asociado a la línea de transformación
H'_{σ}	135	Parámetro de endurecimiento plástico isotropo
β'_{σ}	1,1	Parámetro al m. plástico isotropo y variación con parámetro de estado
$H_{\nu o}$	20	Constante del módulo plástico volumétrico
β_{ν}	0,95	Parámetro asociado a la resistencia de pico

Editado de: (Manzanal, 2008)

ARENA SPESWHITE

Tabla 5 constantes arena Speswhite.

Arena Speswhite		
λ	0,11	Pendiente de LEC en el plano e-p´
ξ		parámetro de ajuste de LEC
$h_1 h_2$	1/0,4	Constante de variación M_f con el parámetro de estado
do	0,98	Multiplicador de dilatación
m	5,6	Parámetro asociado a la línea de transformación
H'_{σ}	25	Parámetro de endurecimiento plástico isótropo
β'_{σ}	0,5	Parámetro al m. plástico isótropo y variación con parámetro de estado
H_{vo}	6	Constante del módulo plástico volumétrico
β_v	0,5	Parámetro asociado a la resistencia de pico

Editado de: (Manzanal, 2008)

Estos parámetros son los que están establecidos para los diferentes tipos de arena, pero se ha visto, que las rocas que no se ajustan a algún tipo de roca pueden trabajar con las constantes de la roca Toyoura.

En la siguiente tabla se resume los modelos matemáticos del fenómeno de dilatación en orden cronológico.

Tabla 6 Modelos de dilatancia

Autores	Expresion propuesta
Rowe(1962)	$d = \frac{9(M - \eta)}{9 + 3M - 2\eta M}$
Schofield and Wrote(1968)	$d = M - \eta$
Roscoe and Burland(1968)	$d = \frac{(M^2 - \eta^2)}{2\eta}$
Nova and Wood (1979)	$d = \frac{1}{\mu}(\eta - M)$
Pastor et al.(1985)	$d = (1 + \alpha_s) \cdot (M_s - \eta)$
Gajo and Wood (1990)	$d = A \cdot [Mc_v \cdot (1 + k_d \cdot \psi) - \eta]$
Li and Dafalias (2000)	$d = A \cdot [Mc_v \cdot (1 + k_d \cdot \psi) - \eta]$

Editado de: (Manzanal, 2008)

En la literatura existen más modelos matemáticos para el cálculo de dilatancia; los que se explicaron fueron los principales, los que se utilizan frecuentemente para hacer el cálculo del fenómeno; estos modelos tienen mucho menos margen de error en pruebas de laboratorio, por esto se seleccionaron, estos modelos se han aplicado para diferentes tipos de arena.

6 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DILATANCIA

Este análisis es ampliamente utilizado para examinar como el cambio en una variable afecta el resultado en un modelo matemático, por esto se crearon unos métodos para saber cuál de estas variables es la más “sensible” frente al resultado de una ecuación.

En la literatura existen diversos tipos de análisis de sensibilidad, sin embargo dentro del proyecto se decidió trabajar con el método gráfico conocido como “diagrama de arañas”. Tal método ha sido usado para facilitar la identificación de los parámetros más influyentes dentro de los modelos comparando las pendientes generadas al producirse variaciones en una variable específica.

Como en la mayoría de los análisis, este método consiste en modificar una variable mientras las otras permanecen constantes y la forma de comparar los diversos resultados es llevando a cabo la misma variación para cada variable, es decir comparar los comportamientos obtenidos cuando las variables son multiplicadas por 0.5, 1 y 1.5 en una gráfica de valores obtenidos versus variaciones. Entre más grande sea la pendiente (en valor absoluto) mayor será el grado de influencia de tal parámetro dentro del modelo.

6.1 PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS DE SENSIBILIDAD

1. Identificar las variables dentro de los modelos que se desean comparar.
2. Para cada modelo, efectuar las multiplicaciones por 0.5, 1 y 1.5 de la variable de control dejando las demás como valores constantes.

3. Después de llevar a cabo el paso 2 con cada una de las variables, realizar un gráfico de los valores obtenidos versus la variación. En la gráfica todas las líneas se deben interceptar en el valor 1.

4. Hallar las pendientes de cada una de las líneas y realizar la comparación para identificar cual es el orden de influencia dentro de los parámetros para cada modelo.

6.2 DIAGRAMAS DE ARAÑA

6.2.1 MODELO CAM CLAY

$$\delta = M - \eta$$

Un modelo matemático corto, donde la dilatancia depende solo de dos variables M, y n, definidas anteriormente en la explicación del modelo matemático Cam Clay.

Acá se deja fijo el valor de M y se varía el valor n, multiplicándolo por 0.5, 1, 1.

n						
		dilatancia				
		1,5	1,4	1,3		
	valor norm	0,5	1	1,5	→	variable
M	1,6	1,6	1,6	1,6	→	valor fijo
n	0,2	0,1	0,2	0,3	→	valor a estudiar

Fuente: Autor

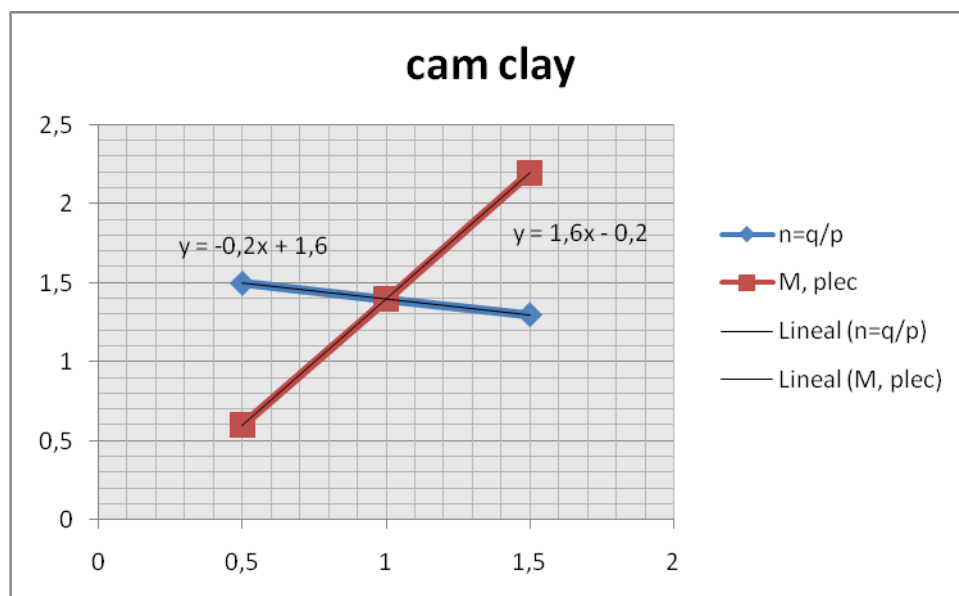
Después se hace el proceso contrario:

pendiente linea etado critico						
		dilatancia				
		0,6	1,4	2,2		
		0,5	1	1,5	→	variables
	valor norm					
M	1,6	0,8	1,6	2,4	→	valor estudiar
n	0,2	0,2	0,2	0,2	→	valor fijo

Fuente: Autor

Ahora, se grafica la variación de la dilatancia vs los factores multiplicadores de variable 0.5, 1, 1.5.

FIGURA 30 Sensibilidad Cam Clay



Fuente: Autor

e puede observar en la gráfica que las dos ecuaciones, la de mayor pendiente en valor absoluto es la de M (en color rojo), con un valor de **1.6** por lo tanto es la variable más sensible para este modelo.

6.2.2 ROWES.

Se hace el mismo procedimiento que el anterior, con el número de variables existentes en la ecuación y luego se gráfica:

$$D = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{9(M - \eta)}{9 + 3M - 2\eta M}$$

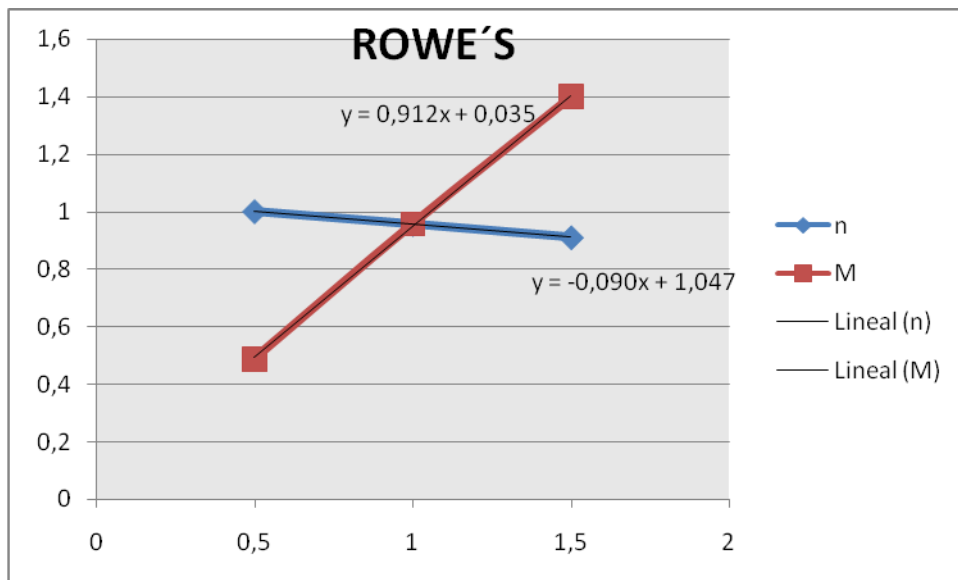
n						
			valores normales		multi	dilatancia 1
			M	n		
fija	←	1,6	0,2		0,5	1,00148368
					1	0,95744681
				↓	1,5	0,91121495
			varia			

M						
			valores normales		multi	dilatancia 1
			M	n		
varia	←	1,6	0,2		0,5	0,48736462
					1	0,95744681
				↓	1,5	1,2992126
			fija			

Fuente: Autor

Variando los diferentes valores se obtiene la gráfica:

FIGURA 31 Sensibilidad Rowe´s.



Fuente: Autor

La pendiente mayor es **0.903** en la sensibilidad de la pendiente de línea de estado crítico M, (color rojo) por lo tanto esta es la variable más sensible.

6.2.3 CAM CLAY MODIFICADO

En este modelo matemático, el cálculo de la dilatancia también depende de M Y n como los anteriores modelos, así que se hace el procedimiento anterior nuevamente pero con la nueva ecuación de Cam Clay modificada:

$$\delta = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta}$$

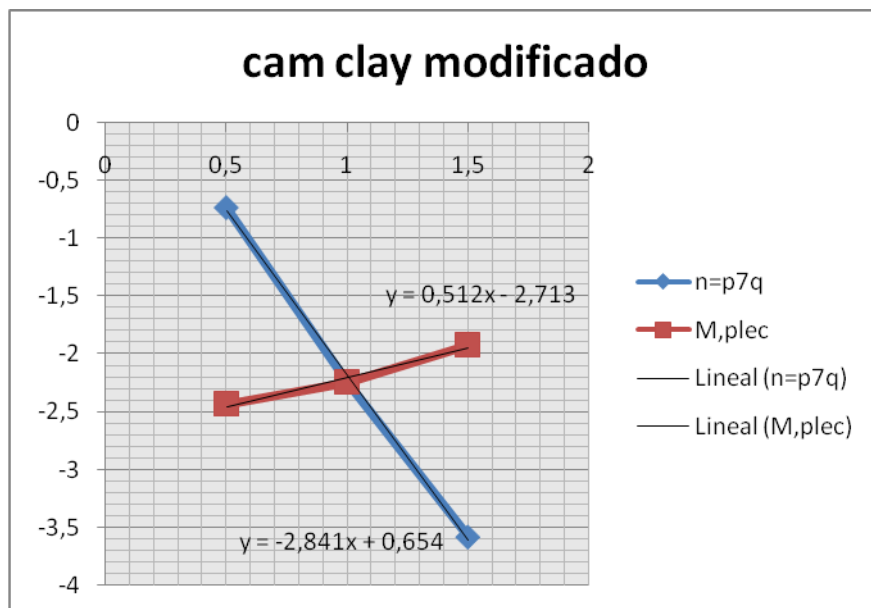
n		valores normales		multi	dilatancia 1
		M	n		
fija	←	1,6	5	0,5	-0,738
			↓	1	-2,244
				1,5	-3,57933333
			varia		

M		valores normales		multi	dilatancia 1
		M	n		
varia	←	1,6	5	0,5	-2,436
			↓	1	-2,244
				1,5	-1,924
			fija		

Fuente: Autor

En este modelo, la dilatancia da negativa, sin embargo no me impide que la gráfica de la sensibilidad sea alterada:

FIGURA 32 Sensibilidad Cam Clay modificado.



Fuente: Autor

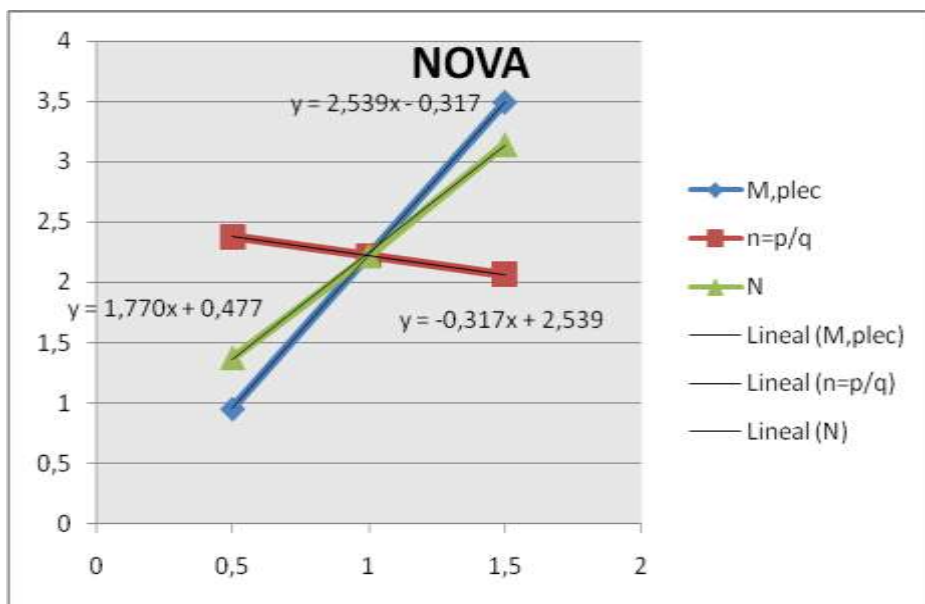
A diferencia de los modelos anteriores, la pendiente mayor está en la gráfica de n , con un valor de **2.841**, por esto, n es la variable más sensible en el modelo de Cam Clay modificado.

6.2.4 NOVA.

En este modelo existe ya un parámetro nuevo “N” el cual también es analizado en la sensibilidad de la ecuación:

$$d = \frac{M - \eta}{1 - N}$$

FIGURA 33 Sensibilidad NOVA



Fuente: Autor

En la gráfica se puede observar que la línea M (azul) presenta una pendiente de **2.539** la mayor con respecto a la pendiente de las otras líneas, por lo tanto es la variable más sensible.

Este fue el procedimiento hecho:

n					
valores normales				multi	dilatancia 1
M	n	N			
1,6	0,2	0,37	0,5	0,95238095	
↓	↓	↓	1	2,22222222	
			1,5	3,49206349	
VARIABLE	FIJA	FIJA			

M					
valores normales				multi	dilatancia 1
M	n	N			
1,6	0,2	0,37	0,5	2,38095238	
↓	↓	↓	1	2,22222222	
			1,5	2,06349206	
fija	variable	FIJA			

N					
valores normales				multi	dilatancia 1
M	n	N			
1,6	0,2	0,37	0,5	1,37586542	
↓	↓	↓	1	2,22222222	
			1,5	3,14606742	
fija	fija	variable			

Fuente: Autor

6.2.5 LI AND DAFALIAS.

$$d_g = \frac{d_o}{M_g} [M_g \exp(m_d \Psi) - \eta]$$

Se encuentra dos nuevos parámetros M_f y d_o , donde el segundo es una constante de 0.88, el cual no se le hace análisis de sensibilidad:

n	valores normales			multi	dilatancia 1
do	M	n	Mf		
0,88	1,6	0,2	1,3	0,5	0,66
	↓	↓	↓	1	0,605
				1,5	0,55
fija	fija	variable	fija		

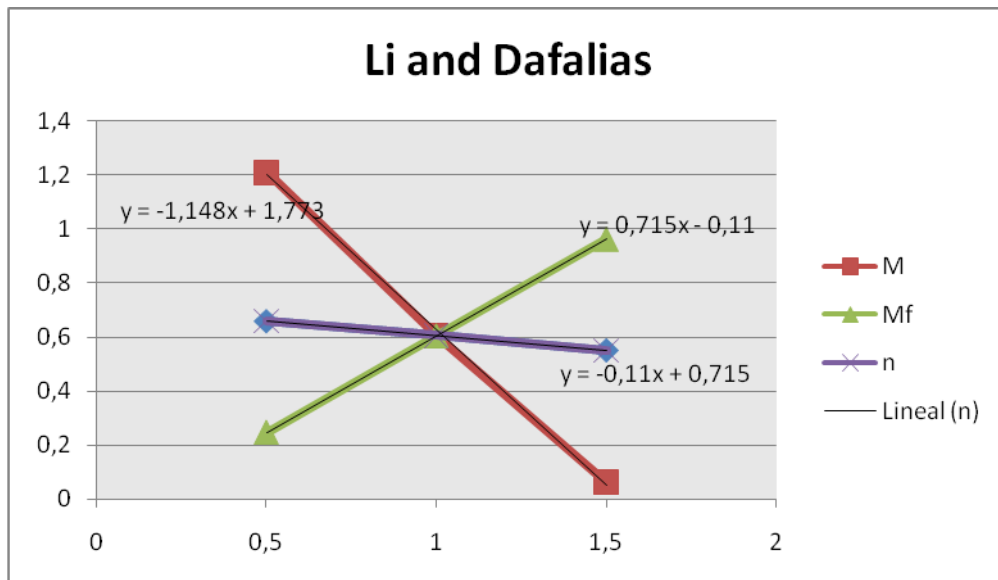
M	valores normales			multi	dilatancia 1
do	M	n	Mf		
0,88	1,6	0,2	1,3	0,5	1,21
	↓	↓	↓	1	0,605
				1,5	0,062
fija	variable	fija	fija		

Mf	valores normales			multi	dilatancia 1
do	M	n	Mf		
0,88	1,6	0,2	1,3	0,5	0,2475
	↓	↓	↓	1	0,605
				1,5	0,9625
fija	fija	fija	variable		

Fuente: Autor

Después de esto se hace la gráfica de los parámetros que se modificaron:

FIGURA 34 Sensibilidad Li and Dafalias.



Fuente: Autor

Vemos acá que la pendiente mayor, es en al grafica de M (línea roja), con un valor de 1.148, por esta razón M será la variable más sensible.

6.2.6 PASTOR ET AL.

$$d_g = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = (1 + \alpha_g)(M_g - \eta)$$

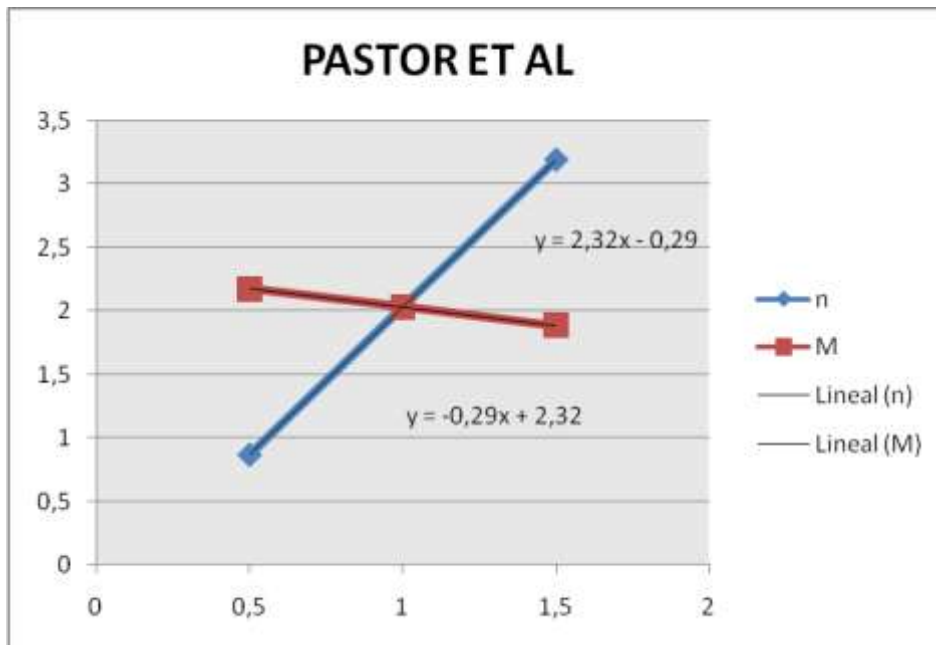
En este modelo matemático se introduce una constante α_g el cual para la mayoría de las arenas tiene un valor de $\alpha_g = 0.45$, Por eso, a esta constante no se la hace análisis de sensibilidad.

M				
valores normales			multi	dilatancia 1
M	n			
1,6	0,2		0,5	0,87
↓	↓		1	2,03
			1,5	3,19
VARIABLE	FIJA			

n				
valores normales			multi	dilatancia 1
M	n			
1,6	0,2		0,5	2,175
↓	↓		1	2,03
			1,5	1,885
fija	variable			

Fuente: Autor

FIGURA 35 Análisis de Sensibilidad pastor et al.



Fuente: Autor

Acá el análisis de sensibilidad muestra que la variable más sensible es n, con una pendiente de 2.32.

6.2.7 GAJO & WOOD

$$d = A[M_{cv}(1 + K_d\Psi) - \eta]$$

Dos constantes nuevas en este modelo K_d y K_v , tienen un valor para la mayoría de las arenas de 1 y 1.1 respectivamente. Estos fueron los resultados del análisis de sensibilidad:

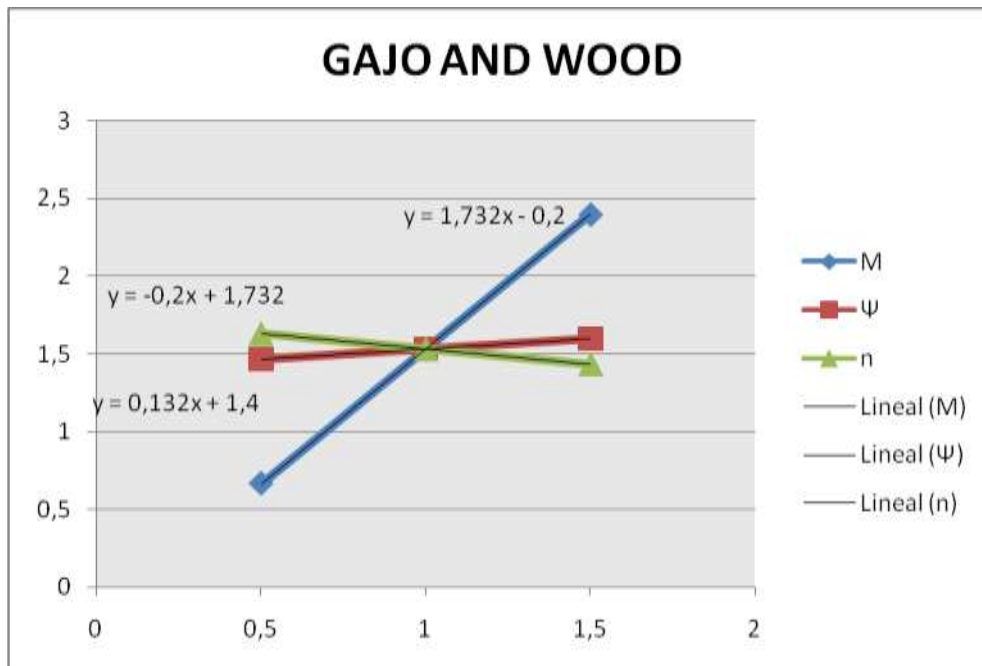
M				
valores normales			multi	dilatancia 1
M	n	ψ		
1,6	0,2	0,075	0,5	0,666
↓	↓	↓	1	1,532
			1,5	2,398
VARIABLE	FIJA	fija		

n				
valores normales			multi	dilatancia 1
M	n	ψ		
1,6	0,2	0,075	0,5	1,632
↓	↓	↓	1	1,532
			1,5	1,432
fija	variable	fija		

ψ				
valores normales			multi	dilatancia 1
M	n	ψ		
1,6	0,2	0,075	0,5	1,466
↓	↓	↓	1	1,532
			1,5	1,598
fija	fija	variable		

Fuente: Autor

FIGURA 36 Sensibilidad Gajo & Wood



Fuente: Autor

Según el análisis podemos concluir que de nuevo el valor más sensible es M, la línea de pendiente de estado crítico (línea azul) (1,7). En general para la mayoría de los modelos se concluye que la variable más sensible es M.

7 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS QUE DESCRIBEN EL FENÓMENO DE DILATANCIA

Los modelos del fenómeno de dilatación encontrados en la literatura, tienen dos variables principales en las cuales está sujeto su comportamiento, como lo es la línea de la pendiente del estado crítico (M), y la relación de tensiones (η). En el transcurso de la historia, diferentes autores han aportado y mejorado los modelos haciéndolos más precisos al incluir diferentes propiedades de la arena como lo es la densidad, tamaño de partícula, angulosidad de la partícula, relación de vacíos, y de más propiedades que ayudan a ser más precisos la descripción del fenómeno de dilatación.

La evaluación de los modelos que describen el fenómeno de dilatación se hace con la comparación del resultado de dichos modelos con datos reales encontrados en la literatura, (modelamiento matemático) y así poder generar un mejor conocimiento al momento de usar un tipo de modelo que represente una forma más completa el fenómeno de dilatación.

Los datos utilizados para la comparación de los modelos del fenómeno de dilatación se basan en pruebas triaxiales a las arenas aportadas por los artículos en la bibliografía que basan sus investigaciones en el fenómeno de dilatación, esto con el fin de poder partir de una prueba en laboratorio y medir la dilatación por medio de los modelos y de las propiedades de la misma muestra (arena).

Es de gran importancia la facilidad y obtención de los datos para hacer factible una prueba experimental por medio de una prueba triaxial, en donde podamos medir la dilatación. Estos datos mostrados a continuación serán de carácter teórico (tomados de la literatura), ya que no se cuenta con una prueba real para tal fin. Los modelos

fueron probados y comparados entre sí mediante datos de laboratorio encontrados en la bibliografía.

7.1 ARENA MIGA

Es una arena la cual conforma una sección de geotecnia en la cual la ciudad de Madrid, España. Dicha arena está constituida por arcillas miocenas y cuarzo, feldespáticas pliocuaternario. En la tesis doctoral (Manzanal, 2008), fueron tomadas dos secciones de arena miga de la ciudad de Madrid denominadas 4478 y 4479 (Manzanal, 2008).

Para probar los modelos de dilatación con esta arena, de la tesis doctoral (Manzanal, 2008), se tomó la muestra 4479-E TCD50. Es una arena sometida a un ensayo triaxial drenado.

7.1.1 DATOS DE LA ARENA MIGA

La arena miga presenta estas propiedades las cuales son medidas y tomadas en la prueba triaxial. La arena miga es sometida a una presión de confinamiento de $P_o=50$ Kpa.

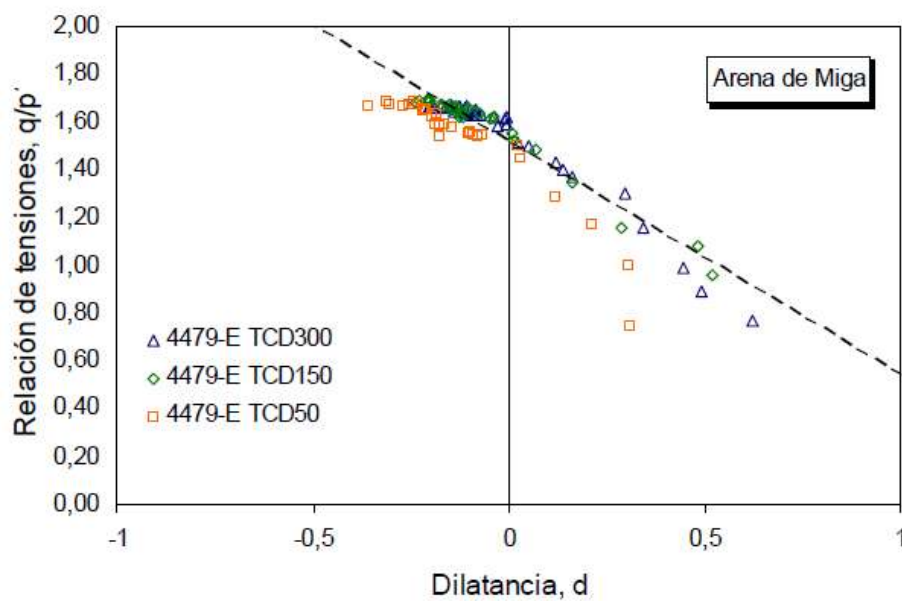
Tabla 7: Humedad y presiones de confinamiento.

MUESTRA	HUMEDAD	PRESION DE CONFIMANIENTO SATURACION (Kpa)	PRESION DE CONFINAMIENTO (kpa)
4479-E TCD 50	14,5	20	50

Editada de: (Manzanal, 2008)

La dilatación medida en laboratorio en la tesis doctoral (Manzanal, 2008) está descrita para diferentes muestras y a las presiones de confinamiento $P=50$ Kpa, $P=150$ Kpa, $P=300$ Kpa.

FIGURA 37: Dilatación – Relación de Tensiones



Fuente: (Manzanal, 2008)

Se escogió la arena 4479-E TCD50 y con el programa Getdata Graph Digitizer, se realizó la discretización para encontrar los puntos de tendencia y poder graficarla en Excel junto con los modelos teóricos del fenómeno de dilatación. Los siguientes puntos son la tendencia de la dilatación medida para la arena miga a una presión de confinamiento inicial de 50 Kpa.

Tabla 8: Puntos de Discretización para la dilatación medida de la arena miga.

DILATANCIA	η
-0,353535	1,66585
-0,299663	1,6855
-0,279461	1,66585
-0,252525	1,68059
-0,232323	1,66585
-0,212121	1,65602
-0,195286	1,62654
-0,175084	1,58722
-0,0976431	1,55283
-0,0707071	1,55283
0,03367	1,46437
0,111111	1,2973
0,215488	1,18428
0,306397	1,00737
0,313131	0,76167

Fuente: Autor

7.1.2 DATOS DE LA ARENA MIGA 4479-E TCD50 PARA LOS MODELOS TEÓRICOS

Existen diferentes parámetros en los modelos del cálculo de dilatación, para obtenerlos algunos son con correlaciones, otros son constantes y finalmente otros se obtienen con pruebas de laboratorio, a continuación se presentarán los parámetros que se calculan con correlaciones y pruebas de laboratorio, que en este caso especial se tomaron las pruebas de los artículos encontrados en la bibliografía, los datos y constantes están desde la **tabla 1** hasta la **6** para los distintos tipos de arena.

7.1.2.1.1 ESFUERZO CONSTANTE σ_3 PARA LA PRUEBA TRIAXIAL DE LA MUESTRA 4479-E TCD50 DE LA ARENA MIGA.

Para hallar el esfuerzo constante en toda la prueba Triaxial, se utilizará la presión de confinamiento inicial $P=50$ Kpa. Como el punto inicial de la prueba en la gráfica q (tensión desviadora normal) y P' (tensión volumétrica efectiva) es $P(50,0)$, se procede a la obtención del valor de σ_3 :

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$0 = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\sigma_1 = \sigma_3$$

Concluimos que en el momento de iniciar la prueba triaxial, el valor de $\sigma_3=\sigma_1$, ahora para la obtención del valor de σ_3 se utiliza la siguiente ecuación.

$$P' = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{3}$$

$$P' = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_3}{3}$$

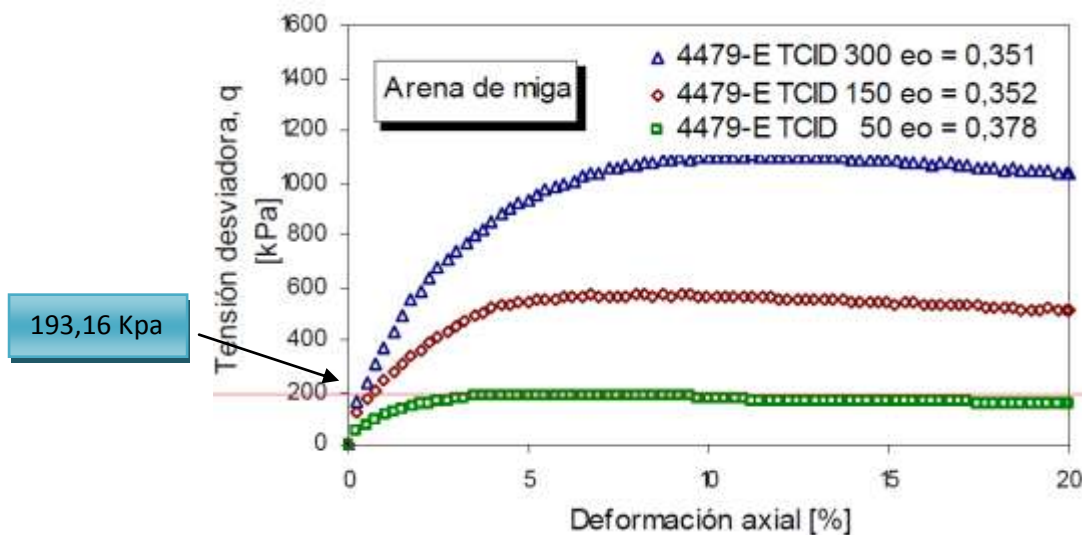
$$50 \text{ Kpa} = \sigma_3$$

El esfuerzo inicial $\sigma_3 = 50$ Kpa, donde se inicia la prueba triaxial.

7.1.2.1.2 PENDIENTE DE LA LÍNEA DEL ESTADO CRÍTICO (M) DE LA MUESTRA 4479-E TCD50 DE LA ARENA MIGA.

Para obtener la pendiente de la línea de estado crítico, se procede a la evaluación de la gráfica dada por en la tesis doctoral (Manzanal, 2008) que relaciona la tensión desviadora normal (q) y la deformación axial ($\epsilon\%$). La línea de la pendiente del estado crítico tiene un punto en común para todas las líneas, en la gráfica de tensión volumétrica efectiva (p) con la tensión desviadora normal (q), este punto es $P(0,0)$ donde es el origen del plano coordenado. Se observa en la siguiente figura la deformación axial y tensión desviadora normal se tomara el valor más alto de (q) para poder obtener el valor de p (tensión volumétrica efectiva). Posteriormente con los puntos $(0,0)$ y (P_{cr}, q_{cr}) se halla la pendiente de la línea del estado crítico.

FIGURA 38: Relación tensión-deformación.



Fuente: (Manzanal, 2008)

Con la gráfica anterior se calcula la p' (presión de confinamiento) a la cual la muestra llega al estado crítico o línea del estado crítico (LEC). Con la tensión desviadora normal crítica encontrada y el esfuerzo σ_3 es constante durante toda la prueba, se procede a la búsqueda de la tensión desviadora efectiva crítica (P_{cr}):

$$193,16 = \sigma_1 - 50$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\sigma_1 = 243,16$$

$$P' = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_3}{3}$$

$$P' = \frac{243,16 + 2(60)}{3}$$

$$P' = 121,05 \text{ Kpa}$$

Cuando se logra ubicar los puntos de P_1 (P_{cr} , q_{cr}) y P_2 (0,0), se procede hallar la pendiente de la línea del estado crítico (M).

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$M = \frac{193,16 - 0}{121,05 - 0}$$

$$M = 1.595$$

7.1.2.1.3 *Parámetro de estado*

El parámetro de estado es muy importante porque se utiliza en varios modelos del cálculo de dilatancia, para obtenerlo se tienen que tener la relación de vacíos y aplicar la siguiente ecuación:

$$\Psi = e - e_c$$

Donde e es la relación de vacíos a cualquier presión, y e_c es la relación de vacíos crítica, exactamente en el punto donde la roca cambia su comportamiento elástico a plástico.

Se tienen que tomar estas dos medidas necesariamente en laboratorio, pero en la prueba que se está analizando para la arena miga, solo da los valores de la relación de vacíos inicial $e=0.405$.

Se necesita hallar el parámetro de estado para cada presión, para esto se utiliza esta ecuación:

$$\Psi_i = \Psi - \lambda \left(1 - \frac{\eta}{M}\right)$$

Donde Ψ_0 es el parámetro de estado inicial, λ es una constante para la arena miga.

Se tienen todos los valores de la ecuación excepto el parámetro de estado inicial Ψ_0 , pero se puede obtener:

$$\Psi = e - e_c$$

En esta ecuación podemos utilizar la relación de vacíos inicial, $e=0.405$ que dio la prueba de laboratorio.

$$e_c = e_T - \lambda_c \left(\frac{P'}{P_a} \right)^\xi$$

Con esta ecuación podemos despejar “ e_T ” y utilizarla después para hallar la relación de vacíos crítica:

$$e_T = e_c + \lambda_c \left(\frac{P'}{P_a} \right)^\xi$$

$$e_T = 0,378 + 0,0308 \left(\frac{50}{101,32} \right)^{0,6}$$

$$e_T = 0,398$$

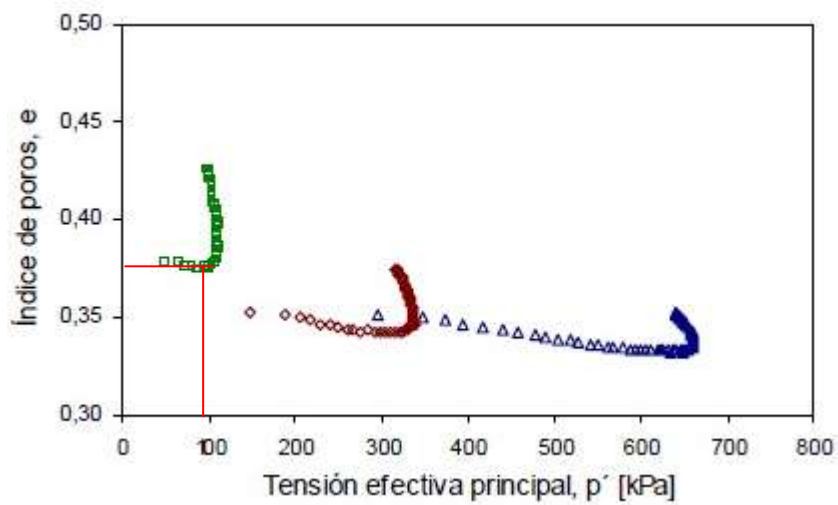
La p' fue de 50 Kpa que fue con la que se inició la Triaxial, P_a es la presión atmosférica y los demás valores se tomaron de la **tabla 1** para una arena miga.

Ahora teniendo este valor cálculo la relación de vacíos crítica con P' crítica:

$$e_c = e_T - \lambda_s \left(\frac{P_c}{P_a} \right)^\xi$$

El problema es que no se tiene la P' crítica (presión donde la roca cambia su comportamiento elástico a plástico) necesariamente se tiene que hacer una prueba de laboratorio para ver donde está ese cambio, particularmente para este caso podemos utilizar las gráficas que determina el experimento:

FIGURA 39 P' crítica



Fuente: (Manzanal, 2008)

$$P' = 99.7101$$

Ya con este calor se puede proceder hacer los cálculos:

$$e_c = e_T - \lambda_s \left(\frac{P_c}{P_a} \right)^\xi$$

$$e_c = 0,398 - 0,0308 \left(\frac{99,7}{101,32} \right)^{0,6}$$

$$e_c = 0,367$$

Con esto:

$$\Psi' = 0.378 - 0.367 = 0.011$$

Ya teniendo esto podemos calcular el parámetro (Ψ) para cada presión:

$$\Psi_i = \Psi - \lambda \left(1 - \frac{\eta}{M} \right)$$

Este y los otros valores anteriores calculados se utilizan en una tabla de Excel para calcular la dilatación para cada cambio de tensión, a continuación de nuevo se cita la **tabla 6**.

Tabla 6 Modelos de dilatación

Autores	Expresión propuesta
Rowe(1962)	$d = \frac{9(M - \eta)}{9 + 3M - 2\eta M}$
Schofield and Wrote(1968)	$d = M - \eta$
Roscoe and Burland(1968)	$d = \frac{(M^2 - \eta^2)}{2\eta}$
Nova and Wood (1979)	$d = \frac{1}{\mu}(\eta - M)$
Pastor et al.(1985)	$d = (1 + \alpha_s) \cdot (M_s - \eta)$
Gajo and Wood (1990)	$d = A \cdot [Mc_v \cdot (1 + k_d \cdot \psi) - \eta]$
Li and Dafalias (2000)	$d = \frac{d_0}{M} (Me^{m\psi} - \eta)$

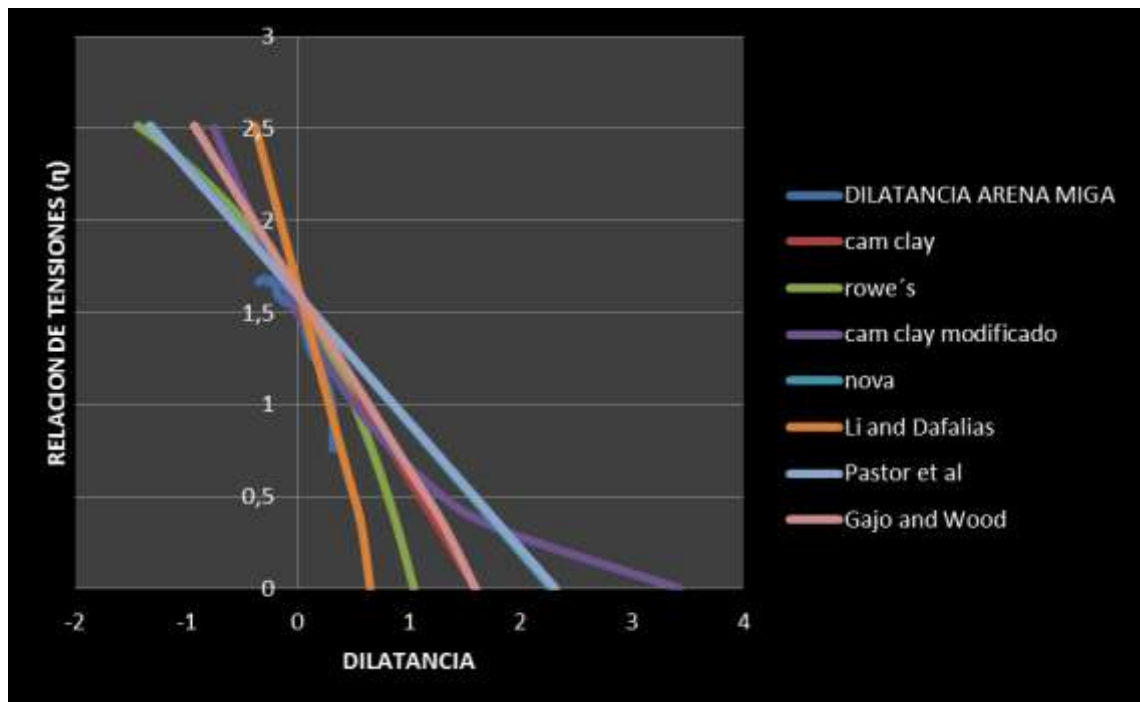
Modificado de: (Manzanal, 2008)

Tabla 9: Prueba triaxial para la arena Miga con $\sigma_3 = 50$ Kpa y $M = 1.595$

Numero de prueba	P/A	σ_1	σ_3	q	p	η	M	DILATANCIA DE ROWE	CAM CLAY	CAM CLAY MODIFICADO	NOVA	parámetro de estado (Ψ)	LI & DAFALIAS	PASTOR ET AL.	GAJO & WOOD
1	0	50	50	0	50	0	1,595	1,0413	1,595	#iDIV/0!	2,278571429		0,65	2,31275	1,595
2	20	70	50	20	56,66666667	0,352941176	1,595	0,8830	1,242058824	3,427564828	1,774369748	0,034984584	0,566074846	1,800985294	1,3034393
3	20	90	50	40	63,33333333	0,631578947	1,595	0,7367	0,963421053	1,698230318	1,376315789	0,029603993	0,442962678	1,396960526	1,0153613
4	20	110	50	60	70	0,857142857	1,595	0,6009	0,737857143	1,055443155	1,054081633	0,025248276	0,343394835	1,069892857	0,7821552
5	20	130	50	80	76,66666667	1,043478261	1,595	0,4747	0,551521739	0,697272849	0,787888199	0,021650075	0,261206128	0,799706522	0,5895068
6	20	150	50	100	83,33333333	1,2	1,595	0,3570	0,395	0,460010417	0,564285714	0,018627586	0,192211251	0,57275	0,4276821
7	20	170	50	120	90	1,333333333	1,595	0,2471	0,261666667	0,287342708	0,373809524	0,016052874	0,133469021	0,379416667	0,2898314
8	20	190	50	140	96,66666667	1,448275862	1,595	0,1441	0,146724138	0,154156414	0,209605911	0,013833294	0,082852045	0,21275	0,1709947
9	20	210	50	160	103,3333333	1,548387097	1,595	0,0474	0,046612903	0,047314525	0,066589862	0,011900111	0,038783451	0,06758871	0,0674916
10	20	230	50	180	110	1,636363636	1,595	-0,0435	-0,041363636	-0,040840846	-0,059090909	0,010201254	6,96308E-05	-0,05997727	-0,0234655
11	20	250	50	200	116,6666667	1,714285714	1,595	-0,1291	-0,119285714	-0,115135565	-0,170408163	0,008696552	-0,034209544	-0,17296429	-0,1040276
12	20	270	50	220	123,3333333	1,783783784	1,595	-0,2099	-0,188783784	-0,178793975	-0,26969112	0,00735452	-0,064774801	-0,27373649	-0,1758803
13	20	290	50	240	130	1,846153846	1,595	-0,2863	-0,251153846	-0,234070152	-0,358791209	0,006150133	-0,092198711	-0,36417308	-0,2403634
14	20	310	50	260	136,6666667	1,902439024	1,595	-0,3586	-0,307439024	-0,282597557	-0,439198606	0,005063246	-0,116941897	-0,44578659	-0,2985556
15	20	330	50	280	143,3333333	1,953488372	1,595	-0,4271	-0,358488372	-0,32559493	-0,512126246	0,004077466	-0,13937912	-0,51980814	-0,3513345
16	20	350	50	300	150	2	1,595	-0,4922	-0,405	-0,36399375	-0,578571429	0,00317931	-0,159818394	-0,58725	-0,3994219
17	20	370	50	320	156,6666667	2,042553191	1,595	-0,5541	-0,447553191	-0,398520476	-0,639361702	0,002357594	-0,178515215	-0,64895213	-0,4434168
18	20	390	50	340	163,3333333	2,081632653	1,595	-0,6130	-0,486632653	-0,429751498	-0,695189504	0,001602956	-0,195683296	-0,70561735	-0,4838203
19	20	410	50	360	170	2,117647059	1,595	-0,6691	-0,522647059	-0,45815096	-0,746638655	0,000907505	-0,21150277	-0,75783824	-0,5210548
20	20	430	50	380	176,6666667	2,150943396	1,595	-0,7227	-0,555943396	-0,484097466	-0,794204852	0,000264541	-0,226126542	-0,80611792	-0,5554793
21	20	450	50	400	183,3333333	2,181818182	1,595	-0,7738	-0,586818182	-0,507903362	-0,838311688	-0,000331661	-0,23968524	-0,85088636	-0,5874001
22	20	470	50	420	190	2,210526316	1,595	-0,8227	-0,615526316	-0,529828932	-0,879323308	-0,000886025	-0,252291136	-0,89251316	-0,6170808
23	20	490	50	440	196,6666667	2,237288136	1,595	-0,8695	-0,642288136	-0,550093026	-0,917554479	-0,001402805	-0,264041255	-0,9313178	-0,6447494
24	20	510	50	460	203,3333333	2,262295082	1,595	-0,9143	-0,667295082	-0,568881146	-0,953278689	-0,001885698	-0,275019881	-0,96757787	-0,6706035
25	20	530	50	480	210	2,285714286	1,595	-0,9573	-0,690714286	-0,586351674	-0,986734694	-0,002337931	-0,285300583	-1,00153571	-0,6948162
26	20	550	50	500	216,6666667	2,307692308	1,595	-0,9986	-0,712692308	-0,602640737	-1,018131868	-0,002762334	-0,294947863	-1,03340385	-0,7175388
27	20	570	50	520	223,3333333	2,328358209	1,595	-1,0382	-0,733358209	-0,617866044	-1,047654584	-0,0031614	-0,304018512	-1,0633694	-0,7389049

Después se gráfica la dilatación de cada modelo contra la relación de tensiones para compararlo con la dilatación real:

Tabla 10 Modelos de dilatación.



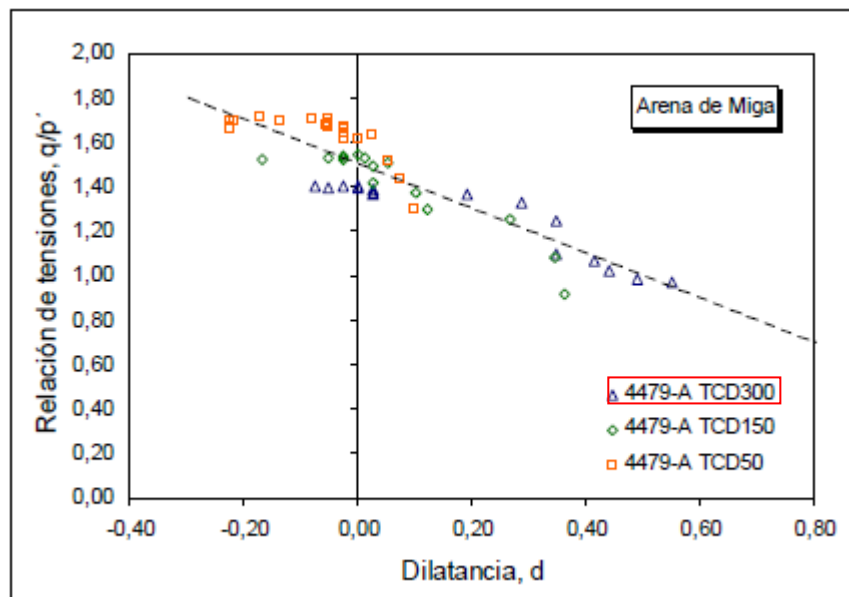
Fuente: Autor

Se puede observar que varios modelos tienden a modelar la dilatación real “azul oscuro” pero el modelo que más se ajusta a los valores experimentales para esta arena es el modelo de Li and Dafalias.

7.2 ARENA MIGA 4479-A TCD 300

Para esta segunda medida de dilatación se trabaja una muestra diferente pero del mismo tipo de arena "miga".

FIGURA 40 Dilatación arena miga



Fuente: (Manzanal, 2008)

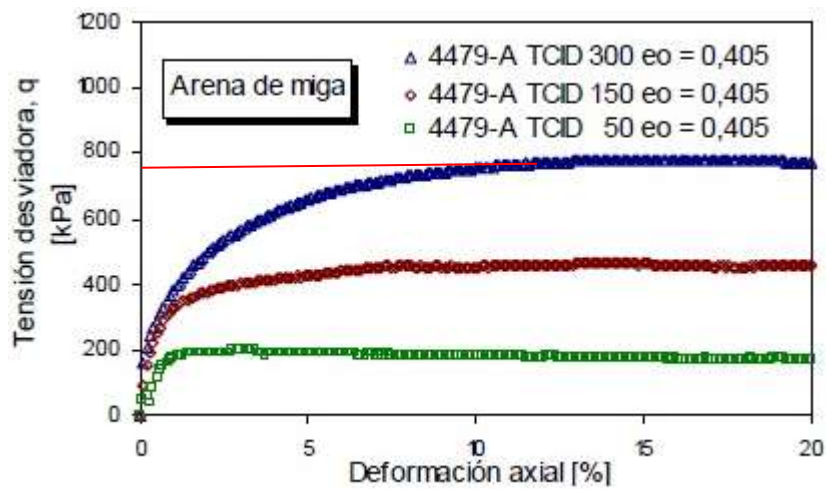
Estas son las diferentes dilataciones medidas en laboratorio según (Manzanal, 2008), ahora , nosotros hemos decidido trabajar con la muestra 4479-A con una presión de confinamiento inicial de 300 Kpa.

Ahora si se empieza a probar los modelos y tratar de predecir el fenómeno de dilatación tenemos que hallar los parámetros que hacen falta como la pendiente línea de estado crítico M , y el parámetro de estado ψ , los demás parámetros están en la **tabla 1** para la arena miga. Como en la prueba anterior se hacen exactamente el mismo procedimiento.

7.2.1 Pendiente línea del estado crítico.

Primero con la gráfica de deformación axial calculo el q al cual la roca pasa de comportamiento elastico a palstico.

FIGURA 41 Deformación axial para 150 Kpa



Fuente: (Manzanal, 2008)

Este punto tien un valor de $q = 734.6$.

Como se explico en la prueba anterior, se hacen todos los calculos necesarios

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$734.6 = \sigma_1 - 300$$

$$\sigma_1 = 1034.6 \text{ Kpa}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

$$p = \frac{1034.6 + 2 \times (300)}{3}$$

$p' = 544.86 \text{ Kpa}$

Y con este valor se halla la pendiente de línea del estado crítico

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$M = \frac{734,16 - 0}{544,86 - 0}$$

$$M = 1.474$$

Ahora calculamos el parámetro de estado de igual manera que se hizo con la prueba anterior con la nueva relación de vacíos inicial $e = 0.405$:

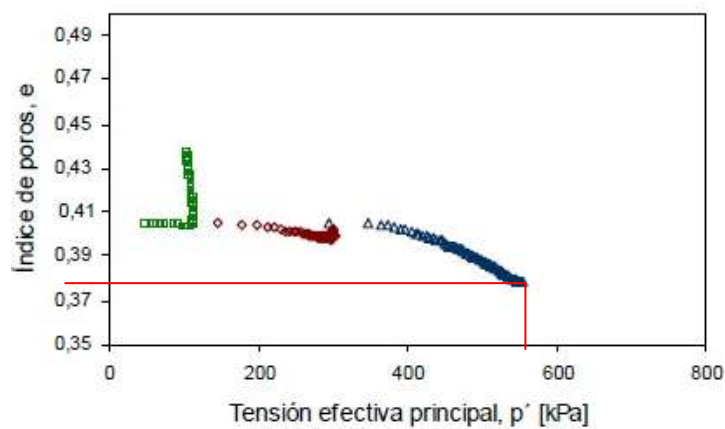
$$e_T = e_c + \lambda_c \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi$$

$$e_T = 0,405 + 0,0308 \left(\frac{50}{101,325} \right)^{0,6}$$

$$= 0.4251$$

Se busca ahora la tensión efectiva p' a la cual la roca cambia de comportamiento elástico a plástico

FIGURA 42 P' Miga 4479-A a 300 Kpa



Fuente: Autor

Gracias a la gráfica podemos ver que p' tiene un valor de 545.029

Ahora hallamos la relación de vacíos crítica:

$$e_c = e_T - \lambda_c \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi$$
$$e_c = 0,4251 - 0,0308 \left(\frac{545,029}{101,325} \right)^{0,6}$$
$$= 0.34$$

Con esto:

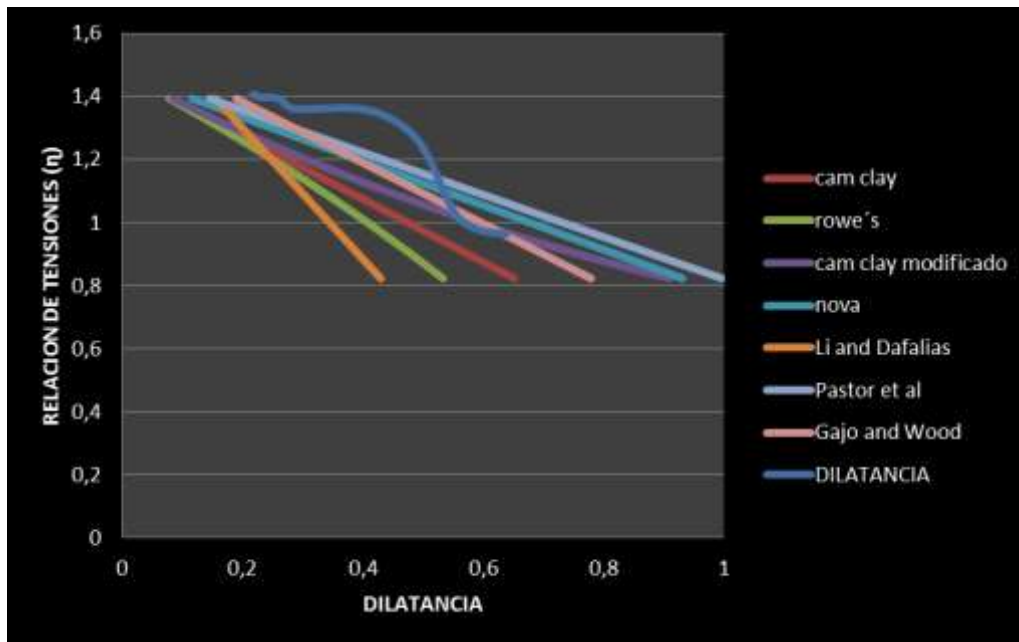
$$\Psi' = 0.405 - 0.34 = 0.065$$

Este parámetro con la pendiente de línea del estado crítico y las constantes de **la tabla 1** se introducen en las ecuaciones y se obtiene la tabla en Excel.

Tabla 11: Prueba triaxial para la arena Miga con $\sigma_3 = 50$ Kpa.

Numero de prueba	P/A	σ_1	σ_3	q	p	η	M	DILATANCIA DE ROWE	CAM CLAY	CAM CLAY MODIFICADO	NOVA	PARÁMETRO DE ESTADO (ψ)	LI & DAFALIAS	PASTOR ET AL.	GAJO & WOOD
1	0	300	300	0	300	0	1,474	0,9884	1,474	#iDIV/0!	2,105714286	0,0958	0,827482834	2,1373	1,6293301
2	20	320	300	20	306,6666667	0,065217391	1,474	0,9584	1,408782609	16,62457397	2,012546584	0,094437249	0,795886656	2,042734783	1,5619032
3	20	340	300	40	313,3333333	0,127659574	1,474	0,9288	1,346340426	8,445817879	1,923343465	0,093132487	0,76564411	1,952193617	1,4973454
4	20	360	300	60	320	0,1875	1,474	0,8997	1,2865	5,700052667	1,837857143	0,09188209	0,736670009	1,865425	1,4354776
5	20	380	300	80	326,6666667	0,244897959	1,474	0,8710	1,229102041	4,313431187	1,755860058	0,090682729	0,708886168	1,782197959	1,376135
6	20	400	300	100	333,3333333	0,3	1,474	0,8427	1,174	3,471126667	1,677142857	0,089531343	0,682220701	1,7023	1,3191661
7	20	420	300	120	340	0,352941176	1,474	0,8149	1,121058824	2,901487078	1,601512605	0,08842511	0,656607399	1,625535294	1,2644313
8	20	440	300	140	346,6666667	0,403846154	1,474	0,7874	1,070153846	2,488056733	1,528791209	0,087361424	0,631985176	1,551723077	1,2118017
9	20	460	300	160	353,3333333	0,452830189	1,474	0,7604	1,021169811	2,172581322	1,458814016	0,086337877	0,608297589	1,480696226	1,161158
10	20	480	300	180	360	0,5	1,474	0,7337	0,974	1,922676	1,391428571	0,085352239	0,585492401	1,4123	1,1123901
11	20	500	300	200	366,6666667	0,545454545	1,474	0,7074	0,928545455	1,718892394	1,326493506	0,084402442	0,563521197	1,346390909	1,0653956
12	20	520	300	220	373,3333333	0,589285714	1,474	0,6814	0,884714286	1,54883981	1,263877551	0,083486567	0,542339041	1,282835714	1,0200794
13	20	540	300	240	380	0,631578947	1,474	0,6559	0,842421053	1,404245693	1,203458647	0,082602828	0,52190417	1,221510526	0,9763533
14	20	560	300	260	386,6666667	0,672413793	1,474	0,6306	0,801586207	1,279372693	1,145123153	0,081749563	0,502177716	1,1623	0,9341349
15	20	580	300	280	393,3333333	0,711864407	1,474	0,6058	0,762135593	1,170114035	1,088765133	0,080925221	0,483123464	1,10509661	0,8933477
16	20	600	300	300	400	0,75	1,474	0,5812	0,724	1,073450667	1,034285714	0,080128358	0,464707622	1,0498	0,8539201
17	20	620	300	320	406,6666667	0,786885246	1,474	0,5570	0,687114754	0,987111919	0,981592506	0,079357622	0,44689863	0,996316393	0,8157852
18	20	640	300	340	413,3333333	0,822580645	1,474	0,5331	0,651419355	0,909355873	0,930599078	0,078611748	0,429666973	0,944558065	0,7788804
19	20	660	300	360	420	0,857142857	1,474	0,5096	0,616857143	0,838822905	0,88122449	0,077889552	0,412985021	0,894442857	0,7431473
20	20	680	300	380	426,6666667	0,890625	1,474	0,4863	0,583375	0,77443543	0,833392857	0,077189925	0,396826878	0,84589375	0,7085307
21	20	700	300	400	433,3333333	0,923076923	1,474	0,4634	0,550923077	0,715327705	0,787032967	0,076511825	0,381168251	0,798838462	0,6749794
22	20	720	300	420	440	0,954545455	1,474	0,4407	0,519454545	0,660795654	0,742077922	0,075854274	0,365986325	0,753209091	0,6424447
23	20	740	300	440	446,6666667	0,985074627	1,474	0,4184	0,488925373	0,610260353	0,698464819	0,075216351	0,351259657	0,708941791	0,6108812
24	20	760	300	460	453,3333333	1,014705882	1,474	0,3963	0,459294118	0,56324103	0,656134454	0,074597191	0,336968067	0,665976471	0,580246
25	20	780	300	480	460	1,043478261	1,474	0,3745	0,430521739	0,519334786	0,615031056	0,073995977	0,323092554	0,624256522	0,5504988
26	20	800	300	500	466,6666667	1,071428571	1,474	0,3530	0,402571429	0,478201181	0,575102041	0,07341194	0,309615206	0,583728571	0,5216015
27	20	820	300	520	473,3333333	1,098591549	1,474	0,3318	0,375408451	0,439550354	0,536297787	0,072844356	0,296519125	0,544342254	0,4935183
28	20	840	300	540	480	1,125	1,474	0,3108	0,349	0,403133778	0,498571429	0,072292537	0,283788355	0,50605	0,4662151
29	20	860	300	560	486,6666667	1,150684932	1,474	0,2901	0,323315068	0,368736987	0,461878669	0,071755837	0,27140782	0,468806849	0,43966
30	20	880	300	580	493,3333333	1,175675676	1,474	0,2697	0,298324324	0,336173794	0,426177606	0,071233643	0,259363262	0,43257027	0,4138226
31	20	900	300	600	500	1,2	1,474	0,2495	0,274	0,305281667	0,391428571	0,070725373	0,247641186	0,3973	0,3886741
32	20	920	300	620	506,6666667	1,223684211	1,474	0,2295	0,250315789	0,275917981	0,357593985	0,070230479	0,236228809	0,362957895	0,3641875

FIGURA 43 Dilatancia arena 4479-a



Fuente: autor

En esta imagen se puede ver que ninguno de los modelos sigue la tendencia perfectamente del comportamiento dilatante, pero se acercan mucho modelos como el de nova y el de pastor et al. Dos modelos que tienen en cuenta la relación de vacíos.

Con esto podemos darnos cuenta que cuando el esfuerzo es “mayor” los modelos tienden a no describir el comportamiento perfectamente, en la primera data a una presión de confinamiento de 50 la predicción fue mucho más exacta

7.3 ARENA BANDING B13 (CASTRO1969).

En el artículo de Been & Jefferies se analizaron dos tipos de arena: Erksak y la “sand Banding”. La arena Banding de castro (1969) fue estudiada como tesis doctoral en Harvard. Castro fue el primero en evaluar la licuefacción en arenas. La arena B13 de castro es una arena suelta el cual muestra un comportamiento dilatante diferente, pero que trata de ajustarse a un particular modelo.

7.3.1 DATOS ARENA BANDING B13, (CASTRO 1969).

Se muestra el comportamiento de la arena B13, tomado de los ensayos de Castro (1969). Dicho comportamiento es de una arena suelta, no muestra un pico pronunciado en la relación de la tensión desviadora normal (q) con la formación axial ($\epsilon\%$) típico de una arena suelta.

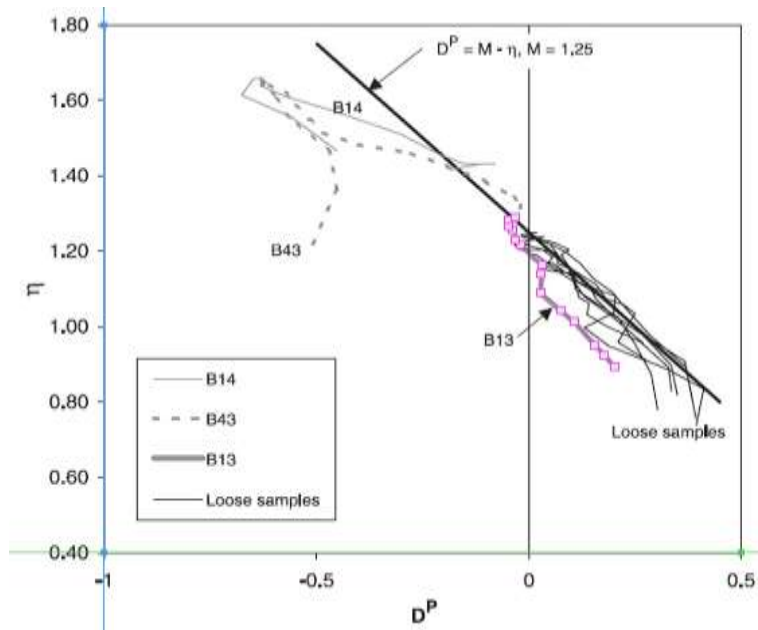
Tabla 12 Parámetros de calibración de la arena Banding. B13.

ARENA	RELACIÓN DE VACIOS (e)	PRESIÓN DE CONFINAMIENTO INICIAL P'_o (Kpa)	INDICE DE POROS (Ψ)
B13	0,705	60	-0,005

Fuentes: (Castro 1969,)

Para generar la gráfica y la correlación de puntos de la prueba realizada para medir el comportamiento dilatante de la arena D13 (*castro 1969*), *Stress–dilatancy in very loose sand*, *Been & Jefferies*. Se hace la discretización de puntos para obtener la gráfica de dicho comportamiento y su posterior comparación con los demás modelos del fenómeno de dilatancia.

FIGURA 44: Discretización de la arena Banding, b13.



Fuente: Castro (1969).

Tabla 13: Puntos sincretizados arena Banding b13.

DILATANCIA	η
0,2034	0,8946
0,1778	0,9246
0,1549	0,9516
0,1065	1,0146
0,0751	1,0445
0,0295	1,0895
0,0295	1,1405
0,0323	1,1645
-0,0190	1,2184
-0,0304	1,2304
-0,0390	1,2574
-0,0475	1,2664
-0,0475	1,2844
-0,0304	1,2904

Fuentes: (Castro 1969)

7.3.2 DATOS TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING B13.

Se realiza el mismo procedimiento para hallar el valor de σ_3 , el cual es de vital importancia para el modelamiento del fenómeno de dilatancia y la comparación con la medida experimental de la misma.

7.3.2.1.1 ESFUERZO CONSTANTE σ_3 PARA LA PRUEBA TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING.

El esfuerzo σ_3 se obtiene por medio de la presión de confinamiento inicial (procedimiento realizado en las anteriores pruebas) en los datos suministrados por (Castro 1969), *Stress–dilatancy in very loose sand*, Been & Jefferies. El punto inicial de la prueba triaxial es de P ($P'o$, 0) donde $P'o = 98$ Kpa a la presión inicial de confinamiento y $q=0$ a la tensión desviadora normal inicial.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$0 = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\sigma_1 = \sigma_3$$

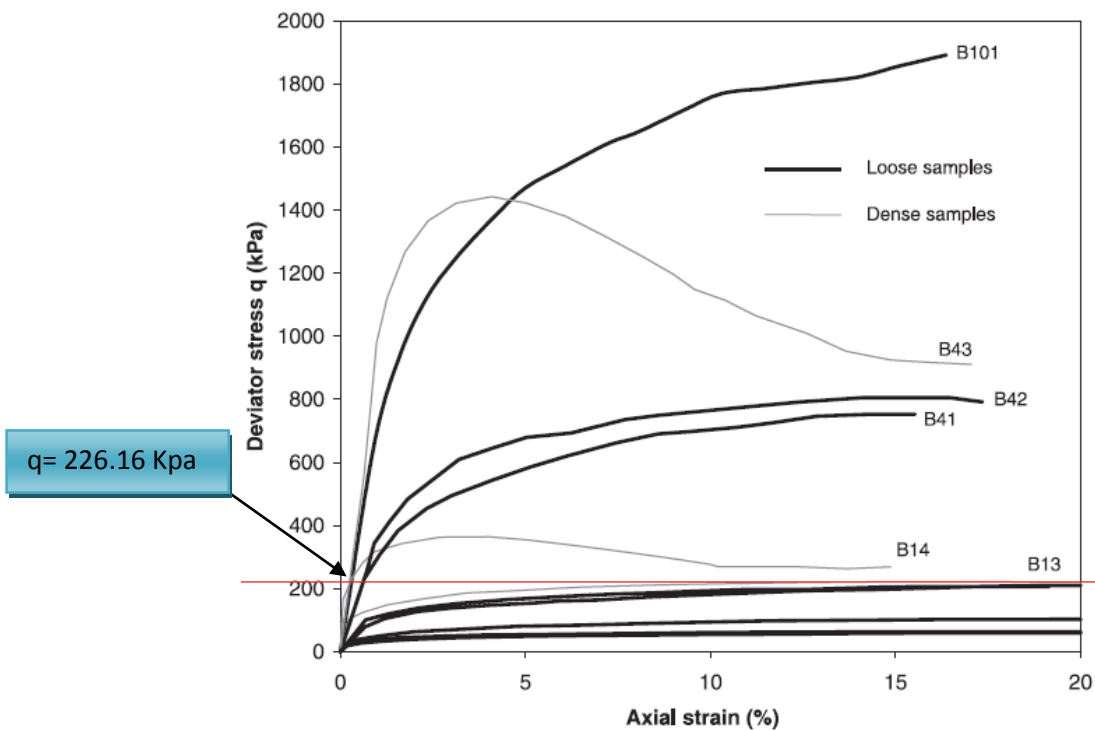
$$P' = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_3}{3}$$

$$98 \text{ Kpa} = \sigma_3$$

7.3.2.1.2 PENDIENTE DE LA LÍNEA DEL ESTADO CRÍTICO (M) ARENA BANDING B13.

Se muestra el comportamiento de la arena B, a diferentes pruebas triaxiales, por ende la muestra B13.

Figura 45: relación tensión desviadora q vs deformación axial.



Fuente: (Castro 1969).

Con el valor de la tensión desviadora normal crítica (q_{cr}) se procede a buscar la presión de confinamiento crítica (P'_{cr}).

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$226,16 = \sigma_1 - 98$$

$$\sigma_1 = 324,16 \text{ Kpa}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

$$P = \frac{324,16 + 2 * (98)}{3}$$

$$P_{cr} = 173,38 \text{ Kpa}$$

Al obtener los puntos donde pasa la línea del estado crítico se procede a hallar la pendiente M, de vital importancia para modelar los modelos de dilatación y así poder compararlos y corroborarlos con dichas características de la prueba.

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$M = \frac{226,16 - 0}{173,38 - 0}$$

$$M = 1,304$$

La pendiente de la línea del estado crítico para la arena B, B13 es M=1,304.

7.3.2.1.3 PARÁMETRO DE ESTADO (Ψ) ARENA BANDING. B13.

Para la obtención del parámetro (Ψ), se puede utilizar una relación directa con el parámetro Ψ_0 dado en el artículo (Been & Jeffries).

$$\Psi_i = \Psi - \lambda \left(1 - \frac{\eta}{M} \right)$$

$$\Psi_i = -0,005 + 0,0136 \left(1 - \frac{\eta}{M} \right)$$

7.3.3 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA VS. LA DILATANCIA MEDIDA EN LABORATORIO. ARTÍCULO (BEEN & JEFFERIES).

Tabla 14: Datos suministrados y encontrados para la arena b13.

σ_3 Kpa	M	N	e	ψ_o
98	1,304	0,3	0,705	-0,005

Fuente: (Jefferies, 2004)

Ag	Kd	α_g
1	1,1	0,45

Fuente: (Hoe I. ling, 2006)

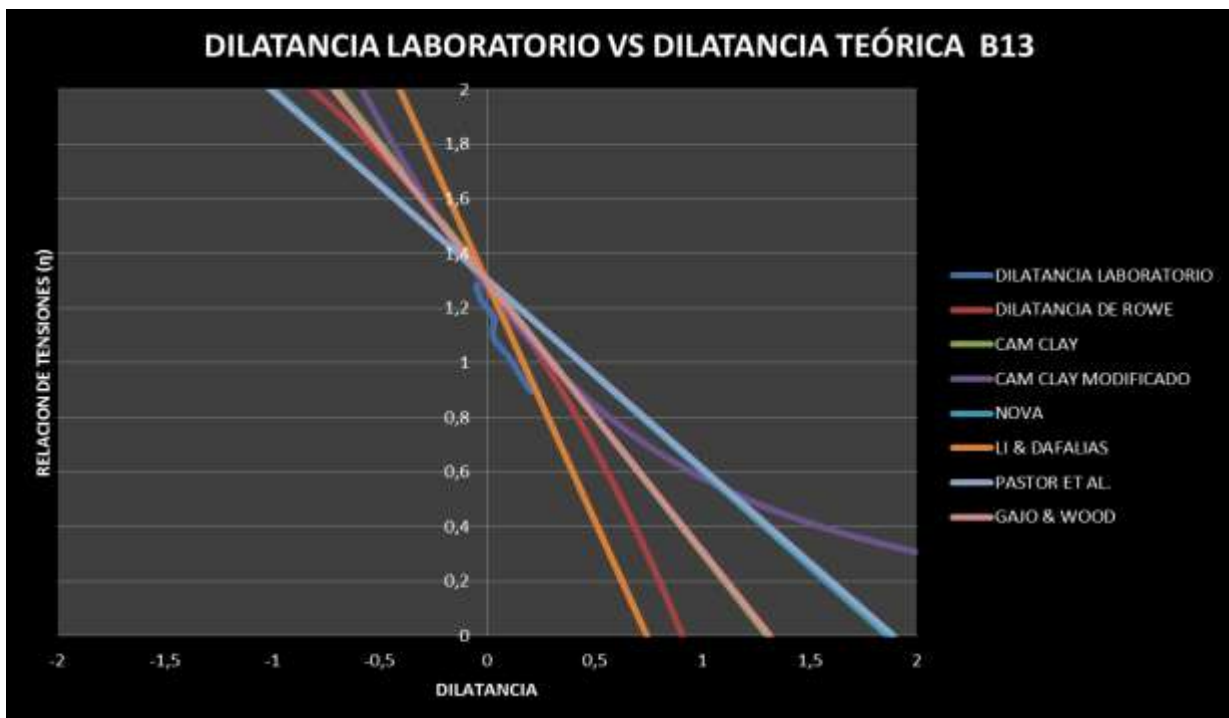
do	m
0,73	2,02

Fuente: (Manzanal, 2008)

Numero de prueba	P/A	σ_1	σ_3	q	p	η	M	DILATANCIA DE ROWE	CAM CLAY	CAM CLAY MODIFICADO	NOVA	Parámetro de estado (Ψ)	LI & DAFALIAS	PASTOR ET AL.	GAJO & WOOD
1	0	98	98	0	98	0	1,304	0,9089	1,304	#¡DIV/0!	1,862857143	0,0086	0,7427924	1,8908	1,3163358
2	10	108	98	10	101,33333	0,09868421	1,304	0,8572	1,2053158	8,566098961	1,721879699	0,007570778	0,6860047	1,74770789	1,2161753
3	10	118	98	20	104,66667	0,1910828	1,304	0,8069	1,1129172	4,353880465	1,589881711	0,006607112	0,632837	1,61372994	1,1223944
4	10	128	98	30	108	0,27777778	1,304	0,7578	1,0262222	2,921859911	1,466031746	0,005702931	0,5829537	1,48802222	1,0344025
5	10	138	98	40	111,33333	0,35928144	1,304	0,7100	0,9447186	2,186771548	1,349597947	0,004852893	0,5360598	1,36984192	0,9516796
6	10	148	98	50	114,66667	0,43604651	1,304	0,6634	0,8679535	1,731787091	1,239933555	0,004052276	0,4918942	1,25853256	0,8737661
7	10	158	98	60	118	0,50847458	1,304	0,6180	0,7955254	1,417838445	1,136464891	0,003296891	0,4502256	1,15351186	0,8002545
8	10	168	98	70	121,33333	0,57692308	1,304	0,5736	0,7270769	1,185232328	1,038681319	0,002583011	0,4108481	1,05426154	0,730782
9	10	178	98	80	124,66667	0,64171123	1,304	0,5304	0,6622888	1,004051852	0,946126814	0,001907306	0,3735778	0,96031872	0,6650246
10	10	188	98	90	128	0,703125	1,304	0,4882	0,600875	0,857622211	0,858392857	0,001266794	0,3382498	0,87126875	0,6026921
11	10	198	98	100	131,33333	0,76142132	1,304	0,4469	0,5425787	0,735895847	0,7751124	0,000658796	0,3047163	0,78673909	0,5435237
12	10	208	98	110	134,66667	0,81683168	1,304	0,4067	0,4871683	0,632444861	0,695954738	8,08966E-05	0,2728439	0,70639406	0,4872844
13	10	218	98	120	138	0,86956522	1,304	0,3673	0,4344348	0,542956591	0,620621118	-0,000469085	0,2425121	0,62993043	0,4337619
14	10	228	98	130	141,33333	0,91981132	1,304	0,3289	0,3841887	0,464423037	0,54884097	-0,000993124	0,213612	0,55707358	0,3827641
15	10	238	98	140	144,66667	0,96774194	1,304	0,2913	0,3362581	0,394677299	0,480368664	-0,001493014	0,1860443	0,48757419	0,3341165
16	10	248	98	150	148	1,01351351	1,304	0,2546	0,2904865	0,332115137	0,414980695	-0,001970386	0,1597192	0,42120541	0,2876602
17	10	258	98	160	151,33333	1,05726872	1,304	0,2187	0,2467313	0,275520705	0,352473254	-0,002426729	0,1345544	0,35776035	0,2432504
18	10	268	98	170	154,66667	1,09913793	1,304	0,1835	0,2048621	0,223953607	0,292660099	-0,002863402	0,1104749	0,29705	0,2007548
19	10	278	98	180	158	1,13924051	1,304	0,1492	0,1647595	0,176673436	0,235370705	-0,003281649	0,0874119	0,23890127	0,1600523
20	10	288	98	190	161,33333	1,17768595	1,304	0,1155	0,126314	0,133088028	0,180448642	-0,003682614	0,0653024	0,18315537	0,1210317
21	10	298	98	200	164,66667	1,2145749	1,304	0,0826	0,0894251	0,092717137	0,127750145	-0,004067346	0,0440885	0,1296664	0,0835909
22	10	308	98	210	168	1,25	1,304	0,0504	0,054	0,0551664	0,077142857	-0,00443681	0,0237168	0,0783	0,0476358
23	10	318	98	220	171,33333	1,28404669	1,304	0,0188	0,0199533	0,020108339	0,028504725	-0,004791898	0,0041381	0,0289323	0,0130798
24	10	328	98	230	174,66667	1,31679389	1,304	-0,0121	-0,012794	-0,012731741	-0,01827699	-0,005133433	-0,0146929	-0,0185511	-0,020157
25	10	338	98	240	178	1,34831461	1,304	-0,0424	-0,044315	-0,04358637	-0,063306581	-0,005462177	-0,0328183	-0,0642562	-0,05215
26	10	348	98	250	181,33333	1,37867647	1,304	-0,0721	-0,074676	-0,072654033	-0,106680672	-0,005778834	-0,050277	-0,1082809	-0,082966
27	10	358	98	260	184,66667	1,40794224	1,304	-0,1012	-0,103942	-0,100105437	-0,148488912	-0,00608406	-0,0671052	-0,1507162	-0,112669
28	10	368	98	270	188	1,43617021	1,304	-0,1298	-0,13217	-0,126088425	-0,18881459	-0,006378462	-0,0833363	-0,1916468	-0,141319

Tabla 15: Prueba triaxial a $\sigma_3=98$ Kpa, $M=1,304$. Modelos teóricos del fenómeno de dilatación en la arena B13:

FIGURA 46 Comparación dilatancia arena B13 Vs. Modelos teóricos de dilatancia.



Fuente: Autor

Al comparar la medición de dilatancia de la arena B13 de Castro (1969) con los modelos teóricos de dilatancia, se observa que el modelo que se sigue ajustando a la tendencia de la línea es el modelo LI & DAFALIAS, a pesar de ser una arena suelta, y por tal motivo los modelos pueden no seguir la tendencia como tal de la medición. El modelo LI & DAFALIAS trata de ajustarse lejos de otros modelos como Gajo & Wood y Pastor ET AL, que utilizan otro número de parámetros para lograr más exactitud a la hora de hacer la medición.

7.4 ARENA BANDING B14 (CASTRO1969)

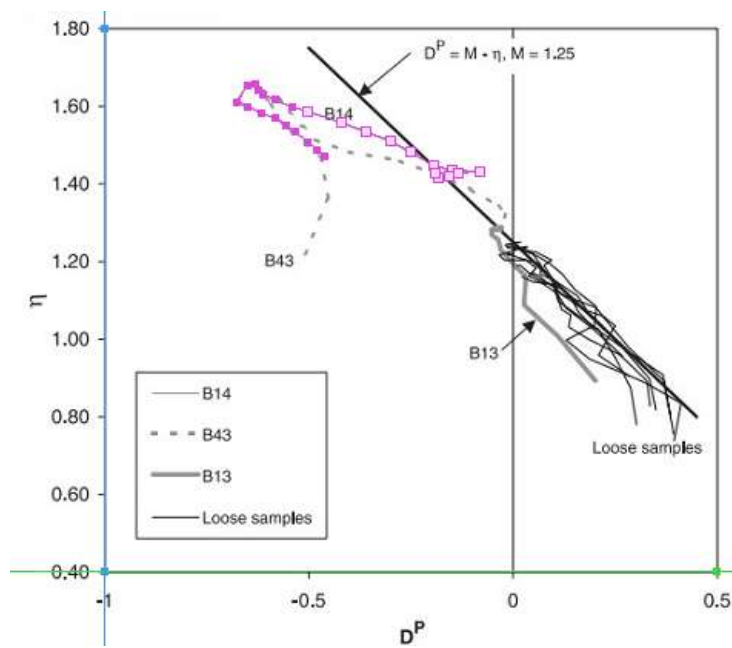
7.4.1 DATOS ARENA BANDING B14, (CASTRO 1969).

Tabla 16: Parámetros de calibración de la arena Banding. B14.

ARENA	RELACION DE VACIOS (e)	PRESION DE CONFINAMIENTO INICIAL P'o (Kpa)	INDICE DE POROS (Ψ)
B14	0,518	98	-0,195

Fuente: (castro 1969,)

FIGURA 47: Discretizacion de la arena Banding b14.



Fuente: Castro (1969).

Tabla 17: Puntos Discretizado. Arena Banding b14.

DILATANCIA	η
-0,501131	1,58929
-0,419683	1,56071
-0,358597	1,53571
-0,297511	1,51071
-0,25	1,48571
-0,192308	1,45
-0,14819	1,43571
-0,0803167	1,43214
-0,131222	1,42857
-0,154977	1,42143
-0,182127	1,41786
-0,188914	1,42857

Fuente: (Castro 1969)

7.4.2 DATOS TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING B14

7.4.2.1.1 ESFUERZO CONSTANTE σ_3 PARA LA PRUEBA TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\sigma_1 = \sigma_3$$

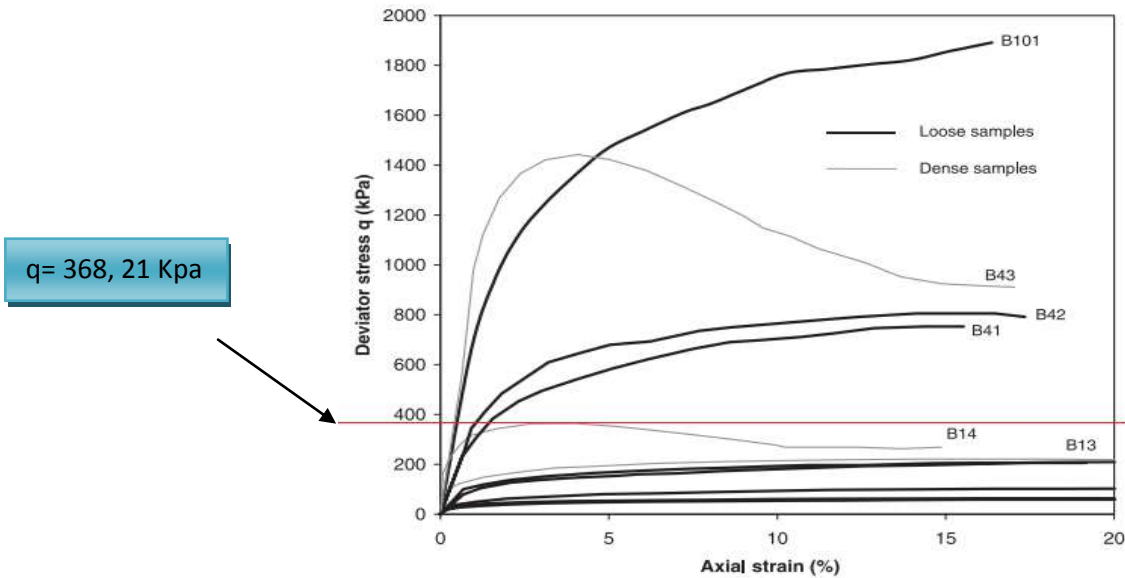
$$p' = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_3}{3}$$

$$98 \text{ Kpa} = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_3}{3}$$

$$98 \text{ Kpa} = \sigma_3$$

7.4.2.1.2 PENDIENTE DE LA LÍNEA DEL ESTADO CRÍTICO (M) ARENA BANDING B13.

FIGURA 48: Relación tensión desviadora q vs deformación axial.



Fuente: (Castro 1969)

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$328,21 = \sigma_1 - 98$$

$$\sigma_1 = 466,21 \text{ Kpa}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

$$P = \frac{466,21 + 2 * (98)}{3}$$

$$P_{cr} = 220,73 \text{ Kpa}$$

Se procede a hallar la pendiente M:

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$M = \frac{466,21 - 0}{220,73 - 0}$$

$$M = 2,11$$

La pendiente de la línea del estado crítico para la arena B, B14 es $M = 2,11$

7.4.2.1.3 PARÁMETRO DE ESTADO (Ψ) ARENA BANDING. B14.

$$\Psi_i = \Psi - \lambda \left(1 - \frac{\eta}{M}\right)$$

$$\Psi_i = -0,195 + 0,082 \left(1 - \frac{\eta}{M}\right)$$

7.4.3 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA VS. LA DILATANCIA MEDIDA EN LABORATORIO. ARTÍCULO (BEEN & JEFFERIES).

Tabla 18: Datos suministrados y encontrados para la arena B14.

σ_3 Kpa	M	N	e	Ψ_o
98	1,304	0,3	0,705	-0,005

Fuente: (Jefferies, 2004)

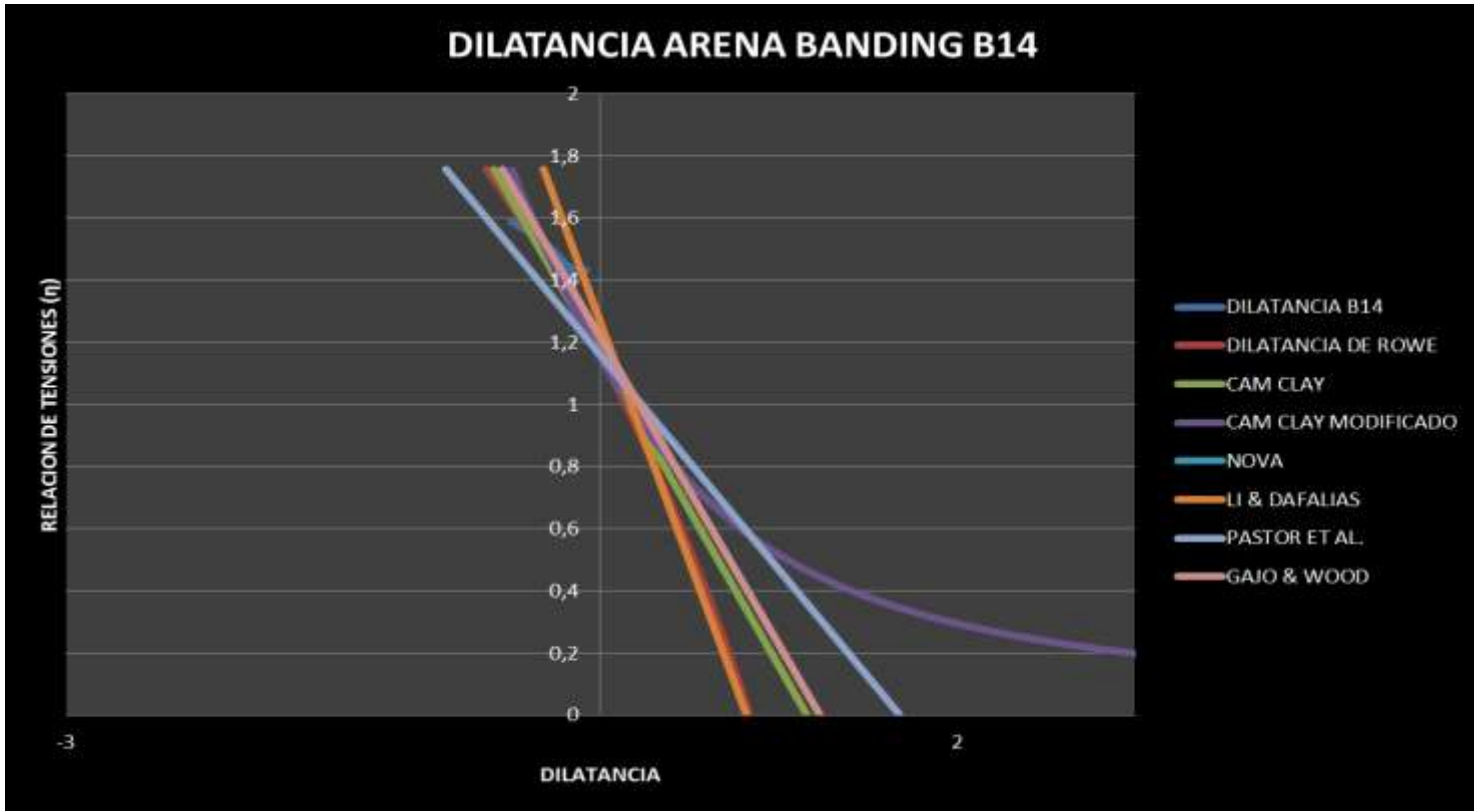
Ag	Kd	α_g
1	1,1	0,45

Fuente: (Hoe I. ling, 2006)

do	m
0,73	2,02

(Manzanal, 2008)

FIGURA 49: Comparación dilatación arena B14 Vs. Modelos teóricos de dilatación.



Fuente: autor

A pesar de que la dilatación medida de la arena Bandind B14 (JEFFERIES, 2004) es negativa, los modelos logran predecir el comportamiento contractivo al momento de que se ejercen los esfuerzos en la arena. En este caso la arena B14 muestra un comportamiento contractivo (disminución de volumen). Los modelos alcanzan a su predicción debido a que la presión de confinamiento inicial no es considerada grande.

7.5 ARENA BANDING B43 (CASTRO1969).

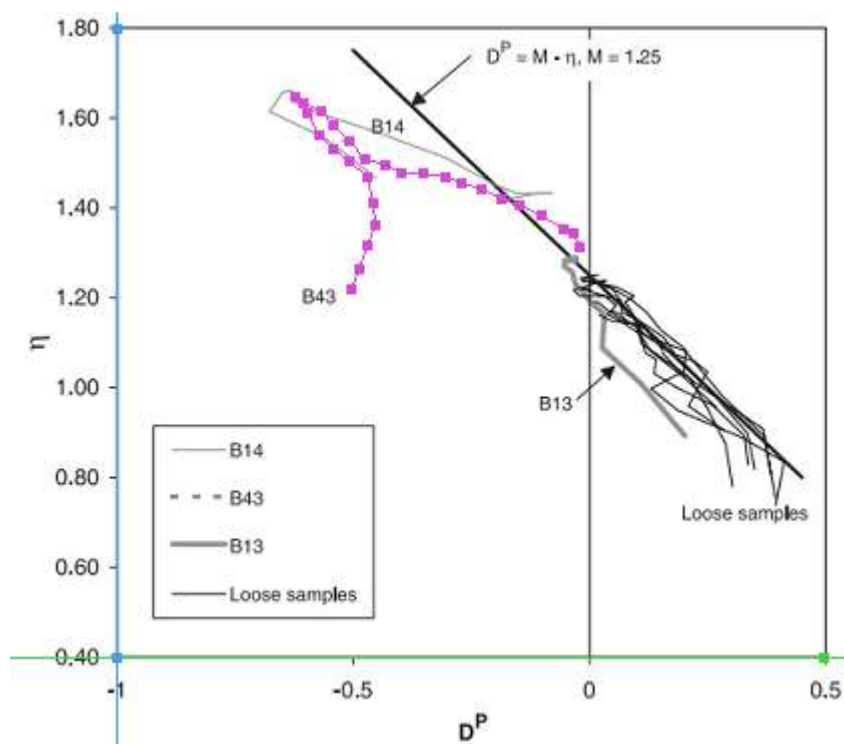
7.5.1 DATOS ARENA BANDING B43, (CASTRO 1969).

Tabla 19: Parámetros de calibración de la arena Banding. B43.

ARENA	RELACION DE VACIOS (e)	PRESION DE CONFINAMIENTO INICIAL P'o (Kpa)	INDICE DE POROS (Ψ)
B43	0,506	392	-0,179

Fuente: (Castro 1969,)

FIGURA 50: Discretizacion de la arena Banding, b43.



Fuente: Castro (1969).

Tabla 20: Puntos discretizados arena Banding b13.

DILATANCIA	η
-0,504525	1,21786
-0,487557	1,26429
-0,470588	1,31786
-0,450226	1,36429
-0,457014	1,41071
-0,470588	1,47143
-0,507919	1,50357
-0,541855	1,53214
-0,572398	1,56429
-0,596154	1,61071
-0,61991	1,64643
-0,602941	1,63571
-0,565611	1,61786
-0,541855	1,58571
-0,507919	1,55
-0,473982	1,51071
-0,429864	1,49643
-0,395928	1,47857
-0,35181	1,47857
-0,304299	1,46786
-0,270362	1,45714
-0,226244	1,44286
-0,18552	1,42143
-0,14819	1,40714
-0,100679	1,38571
-0,0531674	1,35357
-0,0328054	1,34286
-0,0192308	1,31429

Fuente: (Castro 1969)

7.5.2 DATOS TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING B13.

7.5.2.1.1 ESFUERZO CONSTANTE σ_3 PARA LA PRUEBA TRIAXIAL DE LA ARENA BANDING.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$0 = \sigma_1 - \sigma_3$$

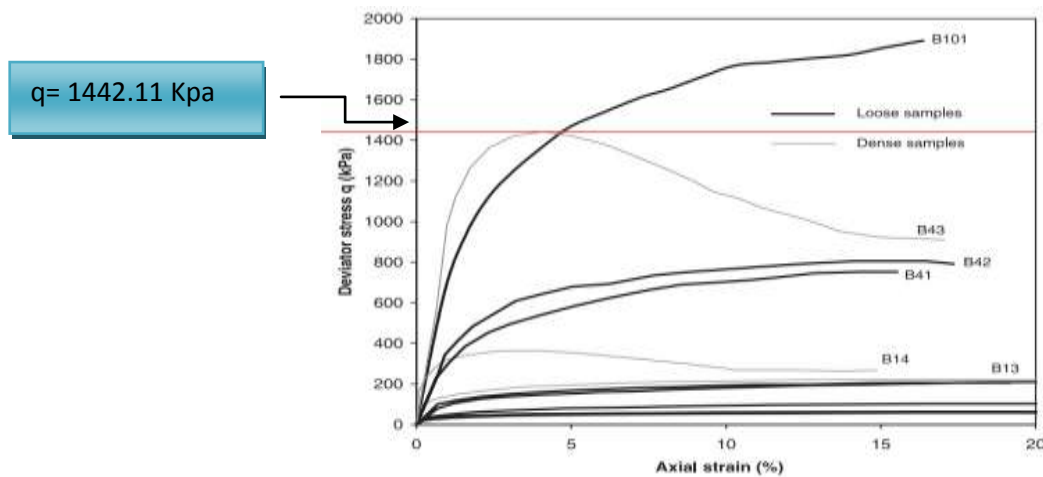
$$\sigma_1 = \sigma_3$$

$$392 \text{ Kpa} = \frac{\sigma_3 + 2\sigma_3}{3}$$

$$392 \text{ Kpa} = \sigma_3$$

7.5.2.1.2 PENDIENTE DE LA LÍNEA DEL ESTADO CRÍTICO (M) ARENA BANDING B13.

FIGURA 51: Relación tensión desviadora q vs deformación axial.



Fuente: (Castro 1969),

7.5.2.1.3 PENDIENTE DE LA LÍNEA DEL ESTADO CRÍTICO:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$1442,11 = \sigma_1 - 392$$

$$\sigma_1 = 1834,11 \text{ Kpa}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$$

$$P = \frac{1834,11 + 2 * (392)}{3}$$

$$P_{cr} = 872,70 \text{ Kpa}$$

$$M = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$M = \frac{1442,11 - 0}{872,70 - 0}$$

$$M = 1,65$$

La pendiente de la línea del estado crítico para la arena Banding, B43 es $M = 1,65$

7.5.2.1.4 PARÁMETRO DE ESTADO (Ψ) ARENA BANDING. B43.

$$\Psi_i = \Psi - \lambda \left(1 - \frac{\eta}{M}\right)$$

$$\Psi_i = 0,506 - 0,0136 \left(1 - \frac{\eta}{M}\right)$$

7.5.3 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS TEÓRICOS DEL FENÓMENO DE DILATANCIA VS. LA DILATANCIA MEDIDA EN LABORATORIO. ARTÍCULO (BEEN & JEFFERIES).

Tabla 21: Datos suministrados y encontrados para la arena B13.

σ_3 Kpa	M	N	e	ψ_o
392	1,65	0,3	0,506	-0,179

Fuente: (jefferies, 2004)

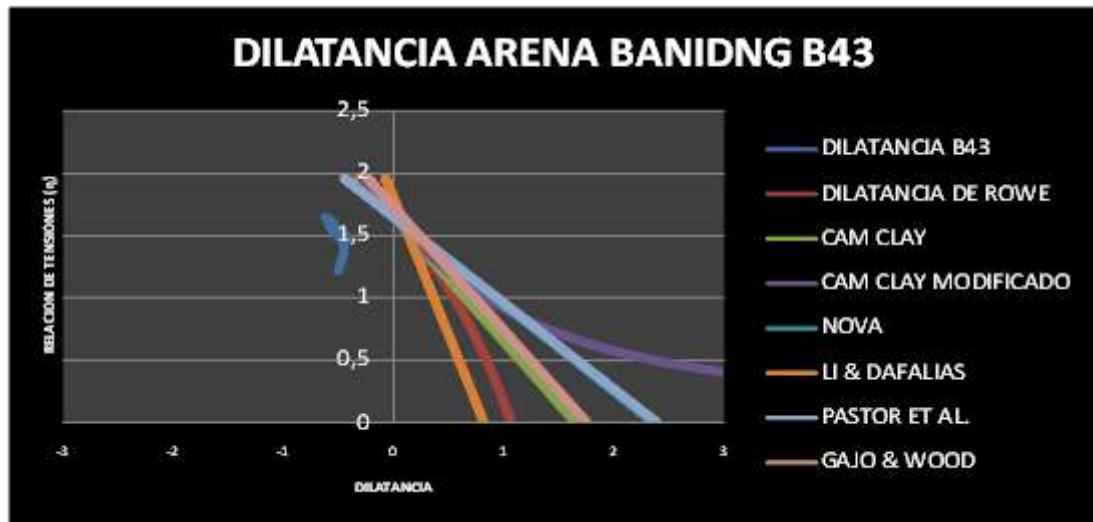
Ag	Kd	α_g
1	1,1	0,45

Fuente: (Jefferies, 2004)

do	m
0,73	2,02

Fuente: (Manzanal, 2008)

FIGURA 52: Comparación dilatancia arena B43 Vs. Modelos teóricos de dilatancia.



Fuente: autor

Para arenas sueltas como es el caso de la arena Banding B43, al estar sometida a una presión de confinamiento inicial considerablemente grande, la arena tiende a sufrir un proceso de contracción, contrario a la dilatancia, las partículas de nuestra arena pueden llegar a romperse, y por ende ningún modelo puede llegar a predecir un comportamiento parecido a valores medidos de la dilatancia negativa. Los valores negativos de la dilatancia muestran que la arena en lugar de aumentar su volumen, está disminuyendo a medida que los valores de esfuerzo aumentan.

De esta manera se pudo analizar los modelos de dilatancia, saber cuál es el que mejor predice el comportamiento real de la roca, se sabe de qué propiedades depende este fenómeno, y como el cambio de estas puede modificar las predicciones de los modelos, así podemos llegar a las siguientes conclusiones.

8 CONCLUSIONES

- El fenómeno de dilatación, va relacionado con el criterio de falla de la arena, y por ende con el problema del fenómeno de arenamiento en sí.
- Una formación con alto grado de dilatación, es más susceptible a que se falle y produzca arena, a una con poca dilatación.
- La mayoría de los modelos matemáticos planteados para el cálculo de la dilatación tienen en cuenta los esfuerzos sometidos en la roca.
- Se observa que cuando la muestra alcanza el estado crítico, las expresiones de Li and Dafalias, Gajo and Wood, toman la forma propuesta por Nova.
- Para las arenas Banding los modelos tratan de ajustarse pobremente, ya que estas arenas están caracterizadas como sueltas o poca densidad. Por dicho motivo los modelos teóricos están lejos de ajustarse a una dilatación positiva prediciendo el aumento de volumen. Los modelos teóricos del fenómeno de dilatación tienden a seguir las pruebas experimentales de dilatación pero para arenas sueltas muy pocos se ajustan.
- Otro factor decisivo en el que los modelos pueden ajustarse al comportamiento dilatante de una arena es que la presión inicial de confinamiento sea baja, para que las partículas de la arena logren acomodarse y puedan generar vacíos más grandes (mayor porosidad), al contrario de esto, entre mayor sea la presión de confinamiento, los modelos teóricos que describen el fenómeno de dilatación tienden a ser más indiferente en tanto a la medición de dicho

fenómeno, ya que esa presión de confinamiento elevada genera un rompimiento de partículas que genera una contracción de la arena, disminuyendo su volumen y por ende diferentes propiedades como la permeabilidad y porosidad también disminuirían.

- El modelo que trata de predecir el comportamiento de estas arenas es el propuesto por Li & Dafalias. Este modelo es el más preciso ya que posee diferentes parámetros en los cuales no solo interviene propiedades intrínsecas de la arena, si no propiedades como la relación de vacíos, crucial para determinar una propiedad fundamental como la porosidad.
- Los modelos teóricos del fenómeno de dilatancia se pueden modelar por medio de una prueba triaxial necesariamente, estos modelos tiene diferentes parámetros que se necesitan para poder predecir el comportamiento dilatante de la arena.
- El comportamiento de una arena suelta en una prueba triaxial genera más iteraciones para llegar a la igualación de dos variables fundamentales en el modelamiento de la dilatancia como los son la pendiente de la línea del estado crítico (M) y la relación de tensiones (η). Al tener $M=\eta$, la dilatancia comienza a tomar un valor negativo. Para arenas consolidadas y densas logran llegar con menos iteraciones y el cambio de dilatancia logra ser más rápido, lo contrario a las arenas sueltas.
- Las variables que son de gran importancia para el fenómeno de dilatancia son parámetros de calibración de la prueba que son alguna veces difíciles de encontrar como las variables del modelo de LI & DAFALIAS. Este modelo usa

la relación de vacíos directamente, la cual está relacionada con la porosidad. El problema de este modelo es que los parámetros para una arena específica deben tenerse para que los cálculos sean más exactos.

- La arena miga puede ser modelada en cuanto a la presión de confinamiento sea menor de 100 Kpa, y esto es general para todas las arenas en cuanto se quiera modelar el fenómeno de dilatación. Cuando se tiene presiones de confinamiento mayores a estos valores, la dilatación no puede llegar a modelarse.
- La prueba triaxial posee un $\sigma_3 =$ constante para toda la prueba mientras que para $\sigma_1 = (P/A) + \sigma_3$, este esfuerzo varía según el (P/A) que se le dé a la prueba. Cuando este valor de (P/A) aumenta, el modelo de Cam Clay modificado tiende a seguir mejor el comportamiento de la arena suelta que ningún otro. Cuando esta variable posee un valor mayor a 50 Kpa, el modelo de Cam Clay modificado puede llegar a tener un valor importante en lo que concierne al modelamiento del fenómeno de dilatación en arenas sueltas.
- La variable más sensible en el momento de modelar el fenómeno de dilatación es la pendiente de la línea del estado crítico (M). Esta variable es fundamental para el conocimiento de los modelos y un punto de partida para conocer el estado de nuestra arena en relación a los esfuerzos aplicados, si se está presentando un comportamiento elástico, elasto-plástico o plástico.

9 BIBLIOGRAFÍA.

- Acock, A. (2002). métodos prácticos de producción de arena, Aberdeen Escocia.
- Alarcón-Guzmán, A. (2008). Comportamiento dinámico de depósitos aluviales en Colombia .
- Augusto, L. j. (2000). resistencia al corte. En L. j. Augusto, *geotecnia 1*.
- *bibing*. (s.f.). Recuperado el 12 de mayo de 2012, de <http://bibing.us.es/proyectos>
- Chen., Z. (s.f.). ANALYSIS OF A MICROCRACK MODEL AND CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR TIME-DEPENDENT DILATANCY OF ROCKS. .
- Eduardo E. Alonso, E. F. (s.f.). Dilatancy of Coarse Granular Aggregates. *Department of Geotechnical Engineering and Geosciences*.
- *Educarchile*. (s.f.). Recuperado el 9 de junio de 2012, de <http://www.educarchile.cl>
- *Epmag*. (s.f.). Recuperado el 23 de marzo de 2012, de <http://www.epmag.com/Production-Drilling/SAGD>
- Francisco Melo, D. c. (s.f.). Material granular a la avalancha, contenidos y prototipos. Universidad de Chile.
- G. R. McDowell, K. W. (s.f.). A GENERALISED MODIFIED CAM CLAY MODEL FOR CLAY AND SAND INCORPORATING KINEMATIC HARDENING AND BOUNDING SURFACE PLASTICITY.
- García, M. (s.f.). determinación experimental de la función de dilatancia de un suelo granular denso. *centro de estudios y administracion de obras publicas*.
- Grupo geotécnia. (s.f.). Deformabilidad y resistencia de los suelos. *Universidad de cantabria* .
- Gunther E. Bauer, a. Y. (s.f.). EVALUATION OF SHEAR STRENGTH AND DILATANCY BEHAVIOR OF REINFORCED SOIL. .
- GUO, R. W. (s.f.). EFFECT OF MICROSTRUCTURE ON UNDRAINED BEHAVIOUR OF SAND.. .
- Hashash, Q. F. (s.f.). INVERSE ANALYSIS–BASED INTERPRETATION OF SAND. Youssef M.A..

- Hurtado, J. E. (2007). Equipos de laboratorio para predecir el cambio de volumen del suelo.
- Jon E. Olson, E. Y. (s.f.). PERMEABILITY CHANGES DUE TO SHEAR DILATANCY IN UNCEMENTED SANDS, JON E. OLSON, ELYES YAICH, AND JON HOLDER. .
- K. Suzuki, T. Y. (s.f.). STRAIN LOCALIZATION EXTENT IN SAND UNDER DRAINED TRIAXIAL TESTS. .
- Leoni, A. J. (2009). Relaciones volumétricas y gravimétricas.
- M. A. Islam, P. S. (s.f.). THE ROLES OF MATERIAL DILATANCY IN POST FAILURE BOREHOLE STABILITY ANALYSIS FOR UNDERBALANCED DRILLING WELLS IN SHALE - A SENSITIVITY ANALYSIS.
- M. Pötsch & M. Blümel, T. S. (s.f.). THE DILATION POTENTIAL OF ROUGH ROCK JOINTS UNDER CNL AND CNS CONDITIONS.
- Manzanal, D. G. (2008). *Modelo constitutivo basado en la teoría de plasticidad generalizada con la incorporación de parámetros de estado para arenas saturadas y no saturadas*. Madrid, España.
- Matsuoka, S. L. (s.f.). STRESS–DILATANCY RELATIONSHIP OF VARIOUS GRANULAR MATERIALS OBTAINED BY THE NEWLY DEVELOPED IN-SITU DIRECT SHEAR TESTS.
- Misra., A. (s.f.). MICROMECHANICAL MODEL FOR SOFTENING AND DILATATION OF ROCK JOINTS.
- P. W. Rowe, D. B. (s.f.). THE STRESS-DILATANCY PERFORMANCE OF TWO CLAYS. .
- Q. Li, Z. Y. (s.f.). EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON ABRUPT FAILURE OF SANDSTONE ASSOCIATED WITH VOLUME DILATION. .
- R.C.K. WONG, Y. L. (s.f.). A DEFORMATION-DEPENDENT MODEL FOR PERMEABILITY CHANGES IN OIL SAND DUE TO SHEAR DILATION.
- Rosello, E. A. (2003). Controles termo técnicos del emplazamiento de mineralizaciones. *Departamento de ciencias geológicas, Universidad de Buenos Aires*.
- Telmocar. (s.f.). compresibilidad y resistencia al corte de suelos salinizados y sodificados por irrigación. *Universidad nacional de la plata*.

- Wood, D. M. (s.f.). MODELLING GRANULAR MATERIALS DISCONTINUUM – CONTINUUM.
- Xia Li, X.-S. L. (s.f.). SAND DILATANCY AND INTERNAL STRUCTURE. .
- y.li, R. (s.f.). a deformation-dependent model for permeability changes in oil sand due to shear dilation. *University of Calgary*.
- YAICH, E. (s.f.). THE EFFECT OF STRESS PATHS AND SHEAR FAILURE ON THE PERMEABILITY OF UNCONSOLIDATED SANDS.
- Zhang, H. S. (s.f.). EXPERIMENTAL EVALUATION AND EXTENSION OF A SIMPLE CRITICAL STATE MODEL FOR SAND. .
- Zhao, A. C. (s.f.). DILATANCY AND SHEAR STRENGTH OF AN AGED COMPACTED FILL. .