

**INTERPRETACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE
EN UN SUELO PARCIALMENTE SATURADO**

JUAN LUDWING HERNÁNDEZ DÍAZ

CÓDIGO: 2070143

DIEGO OSORIO GAMBOA

CÓDIGO: 2080250

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

**INTERPRETACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE
EN SUELO PARCIALMENTE SATURADO**

**JUAN LUDWING HERNÁNDEZ DIAZ
DIEGO OSORIO GAMBOA**

**Trabajo de grado modalidad Investigación para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
VLADIMIR ERNESTO MERCHÁN JAIMES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

DEDICATORIA

Principalmente dedicado a Dios por brindarme la fuerza necesaria para superar todos los obstáculos, por darme la oportunidad de adquirir conocimientos, por hacerme crecer como persona, y por guiar mi vida.

A mis padres Juan Lusbin Hernández y Gilma Díaz Cuervo que me ofrecen su apoyo incondicional, además de ser mi gran motivación, por facilitarme los medios para estudiar y en especial por todo su amor, consejos y valores.

A mi hermana Jeredzabeth y a mis sobrinos Ana Alejandra y Daniel Eduardo por cada instante en su compañía, por llenarme de felicidad, por su colaboración, por todo su cariño incondicional y por la comprensión que siempre me brindan.

A Brenda Reina por estar siempre a mi lado ofreciéndome su cariño, paciencia, apoyo, motivación y por todos los momentos felices.

A mi amigo y compañero de proyecto Diego Osorio por la colaboración, motivación, comprensión, solidaridad, compañerismo y por la alegría que siempre lleva con él.

A todos mis amigos y compañeros que me brindaron todos los momentos inolvidables en esta etapa tan importante, por el sincero apoyo, por la felicidad y solidaridad que cada uno brinda.

JUAN LUDWING HERNÁNDEZ DÍAZ

DEDICATORIA

Dedicado a Dios que ha sido mi guía y soporte permanente en todos los momentos de mi vida.

A mi mamá, Mariela Gamboa Roa, quien ha sido mi apoyo incondicional, por quien he hecho los mayores esfuerzos para conseguir las metas propuestas y a quien debo lo que soy. Es mi motor.

A mi tía Margarita Gamboa Roa quien me acompañó durante muchos momentos de mi vida y desempeñó un papel muy importante en mi formación personal; y que hoy desde el cielo se sigue alegrando de mis triunfos.

A mis primas Juliana Andrea, Catalina y Marcela Díaz Gamboa quienes me han brindado su cariño y compañía y con quienes he compartido muchos de los momentos más felices de mi vida. Las quiero mucho.

A Tatiana Corredor García, mi novia, quien me acompañó en el desarrollo de este proyecto brindándome su apoyo, comprensión y cariño.

A Juan Ludwing Hernández, mi compañero de proyecto, con quien compartimos esfuerzos y días de trabajo para lograr sacar adelante esta tesis.

A Melissa Lombana Díaz, Camilo Cárdenas Medina y Fabián Tapias Hernández, quienes han sido un apoyo incondicional y con los cuales sé que puedo contar en el momento que lo necesite.

A mis demás familiares, amigos y compañeros que estuvieron junto a mí a lo largo de mi carrera.

DIEGO OSORIO GAMBOA

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta tesis de grado expresamos muy cordialmente nuestro agradecimiento a:

La Universidad Industrial de Santander por permitirnos crecer como personas, como sociedad y por formarnos intelectualmente.

La escuela de Ingeniería Civil y a todo el personal docente por brindar el ejemplo, la guía, la comprensión y, en general, por contribuir a una formación profesional integral y exitosa.

Ing. MSc. PhD. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, director de proyecto de grado, a quien agradecemos por el tiempo brindado por la colaboración, motivación, disposición y asesoría brindada en todo momento.

A todas las personas que participaron directa o indirectamente en el desarrollo del proyecto, leyendo, opinando, corrigiendo, dando ánimo y acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

A todos los compañeros y familiares que con su presencia brindaron alegría, cariño y comprensión.

Gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	19
• OBJETIVOS GENERALES.....	19
• OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
MARCO TEÓRICO.....	20
• MÓDULO DE RIGIDEZ.....	20
• FUNCIÓN DE DENSIDAD.....	22
• ESFUERZO EFECTIVO.....	23
• Esfuerzos efectivos para suelos en estado de saturación parcial.....	25
1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ POR MÉTODOS DE REGRESIÓN.....	29
1.1 PARÁMETRO DE FORMA “A” DETERMINADO POR REGRESIÓN POLINÓMICA.....	32
1.2 MODIFICACIÓN DE LAS CONSTANTES DE LA ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL FACTOR “A”	38
1.3 PARÁMETRO DE FORMA “A” DETERMINADO POR REGRESIÓN POLINÓMICA MULTIVARIABLE	42
2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ INCLUYENDO EL ESFUERZO EFECTIVO	45
2.1 GRADO DE SATURACIÓN EFECTIVO EN FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN MACRO Y MICROESTRUCTURAL	46

2.2 GRADO DE SATURACIÓN EFECTIVO EN FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN ELEVADO A UNA POTENCIA	53
3. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ A TRAVÉS DE UN ENFOQUE MICROESTRUCTURAL	56
3.1 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ CON UN VALOR DEL PARÁMETRO DE FORMA "A" DADO	56
3.2 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ CONSIDERANDO EL PARÁMETRO "A" EN FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN	63
4. CONCLUSIONES	68
5. BIBLIOGRAFÍA	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Datos de laboratorio para 5 ensayos con diferente relación de vacíos	32
Tabla 2 Constantes usadas para la determinación del parámetro de forma.....	33
Tabla 3 Constantes usadas para la determinación del parámetro de forma (Santamarina)	19
Tabla 4 Constantes usadas para la determinación del parámetro de forma (Merchán)	40
Tabla 5 Parámetros usados para determinar A con las consideraciones generales.....	60
Tabla 6 Parámetros usados para determinar A con las consideraciones de Merchán	61
Tabla 7 Parámetros usados para determinar A con las consideraciones de Santamarina	62
Tabla 8 Parámetros usados para determinar C con las consideraciones generales	64
Tabla 9 Parámetros usados para determinar C con las consideraciones de Merchán	65
Tabla 10 Parámetros usados para determinar C con las consideraciones de Santamarina	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Módulo de corte	20
Figura 2. Estado parcialmente saturado, la tensión del agua en los poros del suelo intenta unir las partículas	24
Figura 3. Estado saturado, la presión de agua produce que las partículas se separen.....	25
Figura 4 Valores requeridos para el parámetro de forma A (Santamarina) según la relación de vacíos de cada muestra	33
Figura 5 Curva de ajuste del parámetro de forma A por medio de un polinomio de tercer grado desde el enfoque de Santamarina	34
Figura 6 Valores requeridos para el parámetro de forma A (Merchán) según la relación de vacíos de cada muestra	35
Figura 7 Curva de ajuste del parámetro de forma A por medio de un polinomio de tercer grado desde el enfoque de Merchán	35
Figura 8 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina)	36
Figura 9 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán)	37
Figura 10 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 2.....	38
Figura 11 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 2	39
Figura 12 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 3	40

Figura 13 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 4	41
Figura 14 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina) considerando la ecuación 1.7 para el parámetro de forma	43
Figura 15 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán) considerando la ecuación 1.8 para el parámetro de forma	44
Figura 16 Contenido de agua de la macro y micro estructura caso I	47
Figura 17 Contenido de agua de la macro y micro estructura caso II	47
Figura 18 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.3 para el módulo de rigidez y $C=95462,72393$	49
Figura 19 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.3 para el módulo de rigidez, cambiando los factores B y k en la función de relación de vacíos y tomando $C=94573,11615$	50
Figura 20 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.8 (con relación de vacíos por Santamarina) para el módulo de rigidez, tomando los factores $B = 1,225$ y $k = 2$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=1193142,404$	51
Figura 21 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.8 (con relación de vacíos por Santamarina) para el módulo de rigidez, tomando los factores $B = 2,15$ y $k = 1,95$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=127937,1463$	52
Figura 22 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando las ecuaciones 2.3 - 2.4 - 2.6 - 2.9 para el módulo de rigidez, tomando los factores $B = 2$ y $k = 2$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=101576,023$	54

Figura 23 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando las ecuaciones 2.3 - 2.4 - 2.6 - 2.9 para el módulo de rigidez, tomando los factores $B = 1,7$ y $k = 2$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=173428,603$ 55

Figura 24 Apreciación visual de la microestructura y la macroestructura57

Figura 25 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando la microestructura a través de la ecuación 3.1 con el planteamiento de relación de vacíos general60

Figura 26 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando la microestructura a través de la ecuación 3.1 con el planteamiento de relación de vacíos para Merchán61

Figura 27 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando la microestructura a través de la ecuación 3.1 con el planteamiento de relación de vacíos para Santamarina62

Figura 28 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando la microestructura y el factor C a través de la ecuación 3.9 con el planteamiento de relación de vacíos general64

Figura 29 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando la microestructura y el factor C a través de la ecuación 3.9 con el planteamiento de relación de vacíos para Merchán65

Figura 30 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando la microestructura y el factor C a través de la ecuación 3.9 con el planteamiento de relación de vacíos Santamarina66

RESUMEN

TÍTULO: INTERPRETACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE EN UN SUELO PARCIALMENTE SATURADO

AUTORES:

JUAN LUDWING HERNANDEZ DIAZ.

DIEGO OSORIO GAMBOA.

PALABRAS CLAVE:

Módulo de rigidez, saturación, succión, capilaridad, relación de vacíos, esfuerzo, sobreconsolidación, deformación, microestructura y macroestructura.

DESCRIPCIÓN:

Este documento se desarrolló con el propósito de realizar una interpretación de resultados experimentales del módulo de rigidez (G) en muestras compactadas a la luz de las propuestas clásicas (saturadas) y las propuestas en condiciones parcialmente saturadas.

El análisis en el caso parcialmente saturado presenta ciertos problemas de aceptación debido a la dificultad de obtener una ecuación de esfuerzo efectivo incluyendo la succión, aspecto que se trató durante este proyecto de grado dentro de la interpretación de los resultados experimentales.

Sumado a eso, se estudiaron y plantearon ecuaciones para la determinación del módulo de rigidez para el mismo tipo de suelo, incluyendo diversos tipos de modelos para la función general y sus respectivas variables. Ellas trabajan de una forma más general pero obteniendo buenos resultados y funcionan en campo sin considerar variables de difícil determinación, encontradas a través de ensayos detallados de laboratorio.

De igual manera en algunas de las ecuaciones de módulo de rigidez se planteó una parte asociada a la microestructura interna, no muy tenida en cuenta generalmente, que a su vez incluye las variables microestructurales, relación de vacíos, módulo de rigidez de los minerales, grado de saturación y succión, en pro de un excelente ajuste con respecto a la realidad.

(*) Proyecto de grado. Modalidad Investigación

(**) Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. Vladimir Ernesto Merchán Jaimes.

SUMMARY

TITLE: CUTTING MODULE INTERPRETATION IN A PARTIALLY SATURATED SOIL

AUTHORS:

JUAN LUDWING HERNANDEZ DIAZ.
DIEGO OSORIO GAMBOA

KEY WORDS:

Shear modulus, saturation, suction, capillarity, void ratio, stress, over consolidation, deformation or strain, microstructure y macrostructure.

DESCRIPTION:

This document was developed with the main objective of doing an experimental results interpretation from the shear modulus (G) in compacted samples in light of saturated classical proposals in partially saturated conditions.

The analysis from the partially saturated case shows some acceptance problems due to a difficulty to obtain an effective stress equation including suction. In this project, this aspect was treated in the experimental results interpretation. Besides, equations were studied and considered to determine the shear modulus for the same type of soil including different types of modulus to the general function and its respective variables. In the field, this function without putting a consideration on variables which are difficult to determine; they are found through detailed laboratory testing working in a general way, but obtaining excellent results.

In the same way, some equations from the shear modulus were presented: one part related to the internal microstructure, which is not generally taken into account, at the same time microstructural variables, void ratio and suction for an excellent adjust regarding reality.

(*) Degree work. Modality: Investigation

(**) Phisycs-Mechanics Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes.

INTRODUCCIÓN

En la labor que desempeña un ingeniero civil es fundamental garantizar la seguridad y estabilidad de las obras que se realizan en los diferentes campos de la profesión. Es de vital importancia conocer características de los suelos, como la resistencia y la rigidez, con el fin de determinar si son aptos para las diferentes construcciones o, si por el contrario, deben ser sometidos a procedimientos de mejora con el fin de optimizar su resistencia.

La relación entre la tensión de corte y la distorsión angular se define como el módulo de corte (**G**); las constantes elásticas de este tipo *“implican fuerzas que tienden a deslizar porciones adyacentes de material una sobre otra”*¹. Es por eso que el presente trabajo se enfoca en llevar a fines prácticos la interpretación de éste.

Sin ser nuevo el estudio del módulo de corte, a lo largo de la historia se han generado diferentes propuestas de definición del mismo para los estados de suelo existentes (no saturados, parcialmente saturados y saturados). Ellas son base de este trabajo en la medida en que, partiendo de lo propuesto, se realiza la búsqueda de nuevas alternativas de definición del módulo mencionado.

Dentro de este estudio es importante resaltar que para que tal módulo de rigidez sea práctico debe ser visto de una manera general que, a su vez, tenga en cuenta el comportamiento microestructural y particular del suelo debido a que en estos niveles se encuentran características fundamentales que proporcionan una mayor similitud entre los módulos de corte generados mediante pruebas experimentales y los que se obtendrían mediante procedimientos matemáticos simples.

A modo de precisión, en el desarrollo de la labor mencionada en párrafos anteriores se tuvieron en cuenta estudios realizados por el ingeniero civil Vladimir Merchán² que dan muestra de un análisis experimental de suelos. Ellos le permitieron extraer datos característicos (contenido de agua, módulo de rigidez, succión y grado de saturación) en cinco pruebas, cada una con relación de vacíos diferente; los cuales, nos fueron de gran utilidad.

¹ GROSSMANN, Federico. Universidad del Bío Bío. Propiedades mecánicas de los materiales. [en línea] <http://zeus.dci.ubiobio.cl/~ca aici/Apuntes/Materiales/Capitulos%20Libros/Groover/propiedades_mecanicas_de_los_materiales.pdf> [citado en 30 de junio de 2012]

² Ingeniero Civil PHD. Profesor de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Para mayor comprensión, a lo largo del proyecto se exponen las bases del mismo, las pruebas y modificaciones que se generaron sobre la marcha y, finalmente, las conclusiones generadas teniendo en cuenta la practicidad y precisión de lo planteado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar, analizar e interpretar el comportamiento del módulo de rigidez para suelos parcialmente saturados con el fin de plantear alternativas de mejora a las expresiones matemáticas existentes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar entre sí las expresiones de la función de densidad propuestas por diferentes autores como Merchán y Santamarina.
- Estudiar el comportamiento del módulo de rigidez para suelos parcialmente saturados introduciendo un enfoque microestructural en base a postulaciones anteriores.
- Analizar el factor de saturación a nivel micro estructural s_{rm} teniendo en cuenta su vínculo con la relación de vacíos y estableciendo de una manera acertada su comportamiento.
- Implementar en una expresión general los conceptos de la microestructura y de la estructura particular.
- Considerar las diferentes tendencias de los datos que ya han sido obtenidos en laboratorio.
- Examinar los resultados de cada uno de los procesos de mejoramiento de la expresión del módulo de rigidez con el fin de determinar la más adecuada.

MARCO TEÓRICO

MÓDULO DE RIGIDEZ

Como lo indica Augusto J. Leoni³, a través del tiempo, en el campo geotécnico de la ingeniería civil, se han aceptado diversas funciones empíricas asociadas al módulo de rigidez; razón por la cual es necesario tener en cuenta estas definiciones. A continuación se presentaran las más conocidas.

El módulo de corte (G) se define como la razón entre la tensión de corte (τ) y la deformación unitaria de corte también conocida como distorsión angular (γ). (Eq. 1)

Módulo de corte

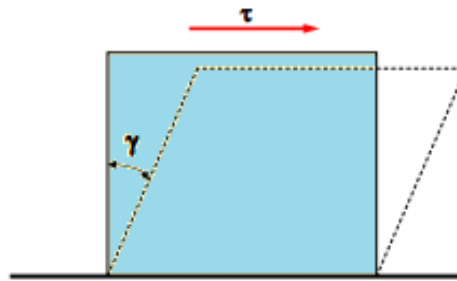


Figura 1. Modulo de corte

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{Eq. 1})$$

Para materiales isotrópicos, como afirman Tarsicio y Augusto Meléndez Vázquez⁴, el módulo de elasticidad transversal está relacionado con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson mediante la ecuación:

³ LEONI, Augusto. Geotecnia III Esfuerzos vibratorios en suelos. [en línea] <<http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g3/Vibraciones.pdf>>

⁴ BELÉNDEZ, Tarsicio y BELÉNDEZ Augusto. Física General. Ingeniería Técnica de Obras Públicas. [en línea] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13739/1/06_ELASTICIDAD_BIB.pdf>

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde:

E = módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young.

ν = el coeficiente de Poisson.

Cuando se tiene comportamiento elástico puro, es decir cuando la deformación producida en el suelo es recuperable, se utilizan modelos donde se tiene en cuenta la densidad del suelo (incluyendo partículas sólidas y agua) (ρ) y la velocidad de la onda de corte (v_s), planteados de la siguiente manera:

$$G = \rho \cdot v_s^2 \quad (\text{Eq. 3})^5$$

También se dan algunas ecuaciones obtenidas por medio de ensayos de laboratorio para determinadas muestras como:

$$G = 625 \cdot F(e) \cdot (OCR)^k \cdot P_a^{(1-n)} \cdot (\sigma'_m)^n \quad (\text{Eq. 4})^6$$

Donde $F(e)$ es una función que depende del índice de poros del suelo, OCR es la razón de sobreconsolidación del suelo, P_a es la presión atmosférica, σ'_m es la presión efectiva media, n es igual a 0.5 y el parámetro k depende del índice de plasticidad del suelo.

Planteamientos más generalizados llevan a la siguiente ecuación, una de las más utilizadas actualmente en la práctica geotécnica, la cual se atribuye a Santamarina inicialmente:

$$G_0 = A * f(e) * \left(\frac{p'}{p_r}\right)^\beta * p_r \quad (\text{Eq. 5})^7$$

⁵ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Los Suelos. [en línea] <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3363/6/36067-6.pdf>> [9 de julio de 2012] p 14

⁶ Ibíd. p 16

Donde se relacionan parámetro de forma (A), función de densidad ($f(e)$), tensión de confinamiento (p'), parámetro de la tensión de confinamiento (β) y una tensión de referencia (p_r).

Teniendo conocimiento de algunas definiciones para el módulo de rigidez, a continuación se tratarán las características que más influyen en su comportamiento. Éstas son la función de densidad o de relación de vacíos $f(e)$, el esfuerzo efectivo p' y el parámetro de rigidez del material A .

FUNCIÓN DE DENSIDAD

En principio se identificará la función de densidad que tiene como variable la relación de vacíos e , que a su vez se define como la relación entre el volumen de huecos, poros o vacíos y el volumen de sólido de la siguiente manera:

$$e = \frac{V_V}{V_s} \quad (\text{Eq. 6})^8$$

Donde V_V es el volumen de vacíos y V_s es el volumen de sólidos. Así mismo, el índice de poros es un parámetro adimensional que varía entre 0 e infinito.

La función de densidad no tiene una ecuación única específica aceptada totalmente en la geotecnia, se tienen varios modelos presentados por diferentes autores generalmente basados en el estado de saturación s_r . Algunos de los modelos se muestran a continuación:

Propuestas de $f(e)^9$ para ensayos específicos:

$$f(e) = \frac{1}{(0.3+0.7e^2)} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$f(e) = \frac{1}{e^{1.3}} \quad (\text{Eq. 8})$$

⁷ MERCHÁN, Vladimir E. Small strain stiffness of compacted boom clay from a microstructural viewpoint. En: Small strain stiffness and residual strength behavior of Boom Clay: A microstructural insight. Cataluña, 2011. Tesis de Doctorado (Ingeniería de Terreno). Universidad Politécnica de Cataluña. p 82

⁸ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Los Suelos. [en línea] <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3363/6/36067-6.pdf>> [citado en 9 de julio de 2012] p 9

⁹ Ibíd. p 16

Y otras propuestas más generales¹⁰:

$$f(e) = \left[\frac{B-e}{1+e} \right]^K \quad (\text{Eq. 9})$$

$$f(e) = \frac{(B-e)^k}{(1+e)} \quad (\text{Eq.10})$$

Teniendo en cuenta que **B** y **k** son constantes y pueden tener diversos valores dependiendo del autor.

ESFUERZO EFECTIVO

Continuando con las características del módulo de rigidez y, sabiendo que el comportamiento del suelo depende de la interacción entre la estructura del suelo y el fluido, se asocia la compresibilidad y la resistencia al corte haciendo referencia al esfuerzo efectivo p' , también denominado σ' . Este último es muy importante ya que los esfuerzos cortantes sólo pueden ser resistidos por la estructura de las partículas sólidas, pues el agua no tiene resistencia cortante.

El esfuerzo efectivo es tan sólo una diferencia de esfuerzos definida exactamente como la diferencia entre el esfuerzo total y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo, de la siguiente forma:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (\text{Eq. 11})$$

Donde:

$\sigma =$ presión normal total

$\mu =$ presión de poros

¹⁰ MERCHÁN, Vladimir E. Small strain stiffness of compacted boom clay from a microstructural viewpoint. En: Small strain stiffness and residual strength behavior of Boom Clay: A microstructural insight. Cataluña, 2011. Tesis de Doctorado (Ingeniería de Terreno). Universidad Politécnica de Cataluña. p 84

El esfuerzo total es la sumatoria de todas las fuerzas actuantes en una determinada porción de suelo donde se incluyen aquellas fuerzas transmitidas a través de contacto entre partículas, además de las transmitidas a través de la presión de poros (divididas por el área total) e incluyendo el área total (área de sólidos y el área de vacíos).

Por su parte la presión de poros se define como la presión en el agua dentro de los poros del suelo. Ésta causa disminución de los esfuerzos normales efectivos entre las partículas, además trata de distanciarlas y reduce la resistencia a la fricción.

Si el agua en el suelo se encuentra sin moverse, la altura de la columna de agua genera una presión hidrostática.

Basados en el texto *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*¹¹ de Jaime Suarez, se presenta gráficamente lo expuesto en párrafos anteriores.

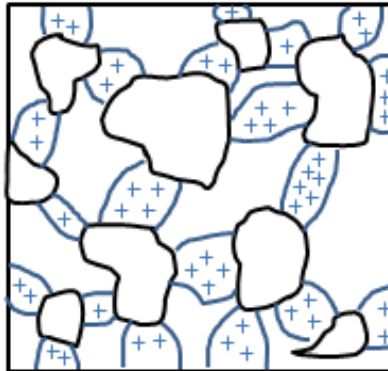


Figura 2. Estado parcialmente saturado, la tensión del agua en los poros del suelo intenta unir las partículas.

¹¹ SUAREZ, Jaime. *Resistencia al Cortante*. En: *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*.

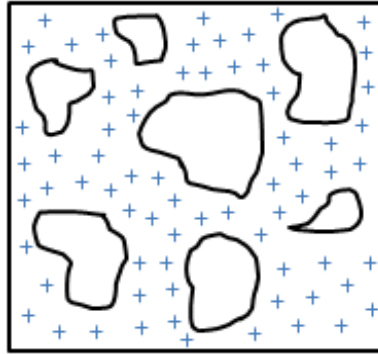


Figura 3. Estado saturado, la presión de agua produce que las partículas se separen.

Esfuerzos efectivos para suelos en estado de saturación parcial:

En el artículo *Una microestructura basada en el esfuerzo efectivo para suelos no saturados*¹², se empieza a pensar en la importancia de la introducción de un esfuerzo efectivo al modelo de Bishop que traería ventajas en términos de compatibilidad termodinámica. La propuesta es la siguiente:

$$\sigma' = \sigma - p_g \mathbf{1} + S_r s \mathbf{1} \quad (\text{Eq. 12})$$

Donde σ' y σ son el esfuerzo efectivo y total respectivamente; p_g es la presión de gas; S_r es el grado de saturación; s es la succión actual y finalmente $\mathbf{1}$ es el tensor unitario. El grado de saturación S_r aparece debido a las tensiones generadas entre el esqueleto sólido y el fluido del suelo que actúa en esa área. Entonces, como consecuencia, S_r debe ser igual al grado de saturación del área.

Esta alternativa es la mejor opción para la interpretación y el análisis para los ensayos de laboratorio de succión controlada ya que simplifica los modelos constitutivos. De cualquier manera, este método no facilita la transición desde estados no saturados a estados saturados y para la interpretación de algunos aspectos de suelos no saturados se requiere de dos esfuerzos variables.

¹² Alonso, E. E. *et al. Géotechnique*. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. Manuscript received 3 January 2008; revised manuscript accepted 7 October 2009.

Una segunda alternativa se presenta años más tarde. Teniendo en cuenta la presión de poros equivalente y la curva de retención de agua se llega, mediante estudios y análisis experimentales, a la forma general (publicada por Pereira et al., 2003 y recientemente por Nuth y Laloui, 2007):

$$\sigma' = \sigma + \pi(p_g, p_1, S_r)\mathbf{1} \quad (\text{Eq. 13})$$

Donde la función $\pi(p_g, p_1, S_r)$ puede ser vista como equivalente a la presión de poros correspondiente a la presión de un fluido que satura el espacio de los poros con un comportamiento idéntico al de un suelo no saturado.

Para la función $\pi(p_g, p_1, S_r)$ cuando el suelo es no saturado se tiene:

$$\pi = (-p_g + X(p_g - p_1)) \quad (\text{Eq. 14})$$

Y cuando se interpreta de la forma clásica (Terzaghi) se da como:

$$\pi = -(1 - X)p_g - Xp_1 \quad (\text{Eq. 15})$$

Donde X es el factor de Bishop que varía entre 1 (en condiciones saturadas) y 0 (cuando el material es seco).

Desde que la presión capilar $(p_g - p_1)$ sea igual a la succión matricial " s " se puede rescribir la ecuación (2) de la siguiente manera:

$$\sigma' = \sigma'' + Xs\mathbf{1} \quad (\text{Eq. 16})$$

Donde $\sigma'' = \sigma - p_g\mathbf{1}$ es el tensor neto.

Ahora se da un vistazo a la interpretación microestructural de la curva de retención de agua y al esfuerzo efectivo.

El principal problema de la expresión de Bishop surge en los suelos finos que mantienen un significativo contenido de agua o grado de saturación. En estos casos el esfuerzo efectivo se relaciona con la succión (Sr^*s) y crece de una manera poco convencional a la par que crece s .

Actualmente en los suelos arcillosos se pueden dividir los poros en dos grupos: grandes poros abiertos, donde los efectos capilares son los principales y los poros pequeños, que están asociados con la distancia entre partículas, incluso, entre los espacios de los cristales en el caso de las arcillas altamente expansivas (*montmorillonita*) (Romero et al., 1999).

A partir de estos dos puntos de vista podemos separar el grado de saturación " Sr " en dos contribuciones:

- a. Grado de saturación Macroscópico Sr^M , el cual describe la ocupación de los macro poros por agua y sus principales efectos son los de capilaridad.
- b. Grado de saturación microscópico Sr^m , donde el agua llena los micro poros.

A partir de esta hipótesis tenemos una primera expresión para el grado de saturación:

$$Sr = Sr^M + Sr^m \quad (\text{Eq. 17})$$

Ahora se define el grado de saturación efectivo como:

$$Sr^e = \frac{Sr + Sr^m}{1 - Sr^m} \quad (\text{Eq.18})$$

Con esta nueva propuesta se cambia la función $\pi(p_g, p_1, Sr) = (-p_g + Sr^e(p_g - p_1))$, entre tanto la nueva ecuación del esfuerzo efectivo será:

$$\sigma' = \sigma - p_g \mathbf{1} + Sr^e(p_g - p_1) \quad (\text{Eq.19})$$

Donde ahora el factor de succión de Bishop " X " es Sr^e .

Es de esperarse que en suelos granulares Sr^m tienda a 0; y la ecuación 18 quede $X = Sr^e = Sr$.

A medida que el contenido de arcilla aumente en el suelo, Sr^m tendera a Sr ; lo que significaría que el esfuerzo efectivo sería igual al tensor neto $\sigma'' = \sigma - p_g \mathbf{1}$.

La siguiente transformación para el grado de saturación efectivo fue establecerse consiste en ponerse en función de un parámetro " α " (que para el procedimiento de nuestro proyecto será " n "); el cual es característico del suelo, donde éste es mayor que 1. Finalmente el grado de saturación efectivo queda de la siguiente manera:

$$\boxed{Sr^e = Sr^\alpha} \quad (\text{Eq. 20})$$

Lo que se busca con esta nueva expresión, es que para cada valor de α la función Sr^e empiece siempre en 0 y termine en 1 debido a que $Sr^e \leq Sr$ para $Sr \in [0,1]$.

En ese orden de ideas se puede concluir que esta alternativa ofrece la posibilidad de describir propiamente algunos aspectos del comportamiento de los suelos no saturados, fuerza y rigidez elástica, términos de un único factor de esfuerzo efectivo. Desafortunadamente la expresión de Bishop tiene inconvenientes para usarse en la práctica, especialmente en las pruebas de laboratorio.

El principal propósito de este artículo es que el concepto del esfuerzo efectivo en suelos no saturados no puede ser desasociado de la microestructura del suelo. Para tener en cuenta esta relación, se divide el volumen de agua existente dado por la succión del suelo en dos partes: el agua libre parcial de los macro poros y el agua inmóvil encerrada en los minerales arcillosos. Un grado efectivo de saturación que varía de 0 a 1 es entonces definido para caracterizar la cantidad de agua libre. Con esto se quiere que el grado de saturación efectiva pese dentro de la definición de la tensión efectiva.

El análisis del grado de saturación caracteriza los niveles del agua inmóvil mediante diferentes ensayos propuestos en este artículo (porometría, datos WRC, y determinación de la permeabilidad relativa) teniendo en cuenta parámetros como Sr^m y α .

1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ POR MÉTODOS DE REGRESIÓN

Para comenzar con el desarrollo de una ecuación empírica para el módulo de rigidez (G_0) se parte de que los planteamientos aquí expuestos se basan en estudios previos, propuestos por diferentes autores que desarrollaron relaciones empíricas asociadas a la rigidez del suelo, y que hoy en día son ampliamente aceptados en la ingeniería civil (Eq. 1.1-1.3).

La ecuación 1.1, planteada para determinar el módulo de rigidez, es la ecuación principal pues en ella se consideran parámetros indispensables en la caracterización de materiales y además, en base a otros autores, se pudo observar que brinda buenos resultados.

En la ecuación 1.1, el módulo de rigidez es función dependiente de las siguientes variables:

Parámetro de forma (A), función de densidad ($f(e)$), tensión de confinamiento (p'), parámetro de la tensión de confinamiento (β) y una tensión de referencia (p_r). (Hardin 1978, Viggiani y Atkinson 1995, etc.).

$$G_0 = A * f(e) * \left(\frac{p'}{p_r}\right)^\beta * p_r \quad (\text{Eq. 1.1})$$

Al tener la necesidad de considerar una ecuación asociada a la densidad en función de la relación de vacíos, se consideran las ecuaciones 1.2 y 1.3 que muestran dos enfoques diferentes para la función de densidad ($f(e)$). En ellas se tiene como variable la relación de vacíos (e) y se trabajan dos constantes B y K con diferentes valores dependiendo del autor (Santamarina, Merchán 2011) y de los valores determinados que aportan el mínimo error para cada planteamiento.

Para Santamarina se tiene que:

$$f(e) = \left[\frac{B-e}{1+e}\right]^K \quad (\text{Eq. 1.2})$$

Tomando los siguientes valores para las constantes B y K .

Ecuación Santamarina	
B	k
1.225	2

Para Merchán se tiene:

$$f(e) = \frac{(B-e)^k}{(1+e)} \quad (\text{Eq. 1.3})$$

Tomando los siguientes valores para proporcionar el mínimo error.

Ecuación Merchán	
B	k
1.4	3.26

Dado que se utilizarán las ecuaciones anteriores para la función de densidad y los valores de tensión de confinamiento (p'), parámetro de la tensión efectiva (β) y tensión de referencia (p_r) son conocidos, para hallar el módulo de rigidez sólo resta determinar el factor A propuesto en la ecuación empírica 1.4 para suelos parcialmente saturados. El factor A se plantea en función del grado de saturación (s_r) que hasta el momento no ha sido tenido en cuenta, de la siguiente manera:

$$A = \frac{c}{D + b * s_r^{\frac{3}{4}}} \quad (\text{Eq. 1.4})$$

Donde c , D y b son constantes.

Como se han determinado todos los parámetros requeridos para el cálculo del módulo de rigidez, nace la necesidad de comprobar la efectividad de la ecuación que se ha planteado; por consiguiente es totalmente indispensable la caracterización de los materiales y el uso de sus datos de laboratorio (tabla 1.1).

Los datos fueron determinados para muestras de suelos parcialmente saturados variando la relación de vacíos e y se obtienen del trabajo de tesis doctoral del profesor Vladimir Merchán.

Donde:

$e = \text{relación de vacíos}$

$\omega = \text{contenido de agua}$

$G = \text{módulo de rigidez(experimental)}$

$s = \text{succión}$

$S_r = \text{grado de saturación}$

$G_s = \text{Densidad de sólidos}$

$G_s=2.7$	E	ω	G (MPa)	s (MPa)	S_r
PRUEBA 1	0.93	33.80	39.12	1.00	0.98
	0.93	32.5	40.5	1.815	0.94
	0.93	24.2	86.5	2.1	0.70
	0.93	21.9	93.9	2.66	0.64
	0.93	19.4	109.1	3.57	0.56
	0.93	18.6	110.3	3.61	0.54
	0.93	12.7	133.7	8.3	0.37
	0.93	10.2	146.5	13.755	0.30
	0.93	5.5	115.6	52.5	0.16
	0.93	3.5	96.4	109.77	0.10

PRUEBA 2	0.81	29.50	82.2016979	1.25	0.98
	0.81	28.7	99	1.5	0.96
	0.81	21.2	147.4	3.4	0.71
	0.81	16.1	196.7	5.56	0.54
	0.81	10	224	16.785	0.33
	0.81	6.5	196	37.37	0.22
	0.81	3.5	166.8	105.22	0.12
PRUEBA 3	0.7	25.37	148	1.50	0.98
	0.7	21.46	195.9	2.8	0.83
	0.7	18.1	216.5	4.255	0.70
	0.7	12.7	255.4	9.725	0.49
	0.7	10.3	285	14.16	0.40
	0.7	9.7	295.3	16.12	0.37
PRUEBA 3	0.7	7.7	313	30	0.30
	0.7	6.3	294	43.515	0.24
	0.7	3.8	277	98.21	0.15
PRUEBA 4	0.55	19.80	313	3.00	0.97
	0.55	18.9	320	3.55	0.93
	0.55	13.7	347	9.515	0.67
	0.55	12.95	364	11	0.64
	0.55	9.3	392	21.75	0.46
	0.55	6.4	412	42.5	0.31
	0.55	3.5	398	106.095	0.17
PRUEBA 5	0.47	16.90	409	4.50	0.97
	0.47	16.4	411	6.14	0.94
	0.47	13.6	428.4	7.545	0.78
	0.47	12.2	428	9.595	0.70
	0.47	7.4	495	29.41	0.43
	0.47	5.8	532.2	46.03	0.33

Tabla 1 Datos de laboratorio para 5 ensayos con diferente relación de vacíos

1.1 PARÁMETRO DE FORMA “A” DETERMINADO POR REGRESIÓN POLINÓMICA

Teniendo como base las ecuaciones 1.1 a 1.4 y los datos de laboratorio, se lleva a cabo una primera prueba de aproximación donde, conociendo el módulo de rigidez experimental, se hallan dos valores del factor A requerido gracias a los dos planteamientos de la función de la relación de vacíos (Santamarina, Merchán) para cada uno de los datos experimentales. Seguido a ello se da el

ajuste de los valores de A hallados por medio de una ecuación polinómica de tercer grado (Eq. 1.5-1.6) tomando los siguientes valores para las constantes incluidas en la fórmula para determinar A inicialmente.

Factor A		
$A=c/(D+B*Sr^{3/4})$	c	2
	D	0,01
	B	1,224

Tabla 2 constantes usadas para la determinación del parámetro de forma

Para Santamarina se tienen las siguientes curvas para los valores de A en función del grado de saturación s_r :

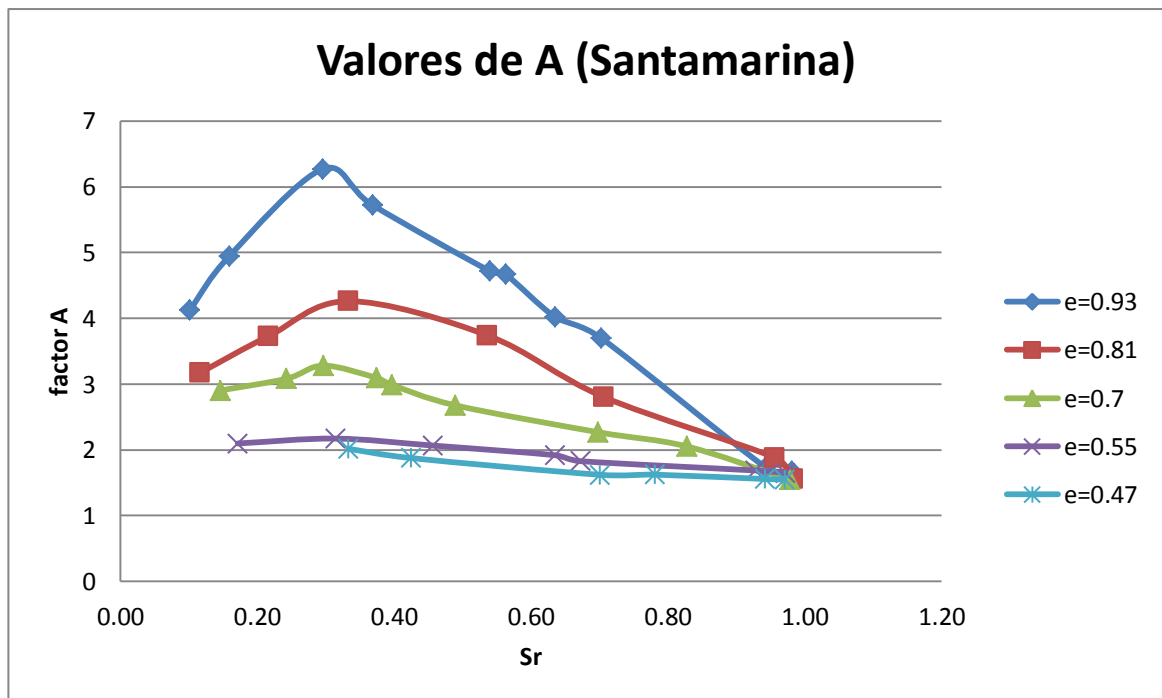


Figura 4 Valores requeridos para el parámetro de forma A (Santamarina) según la relación de vacíos de cada muestra

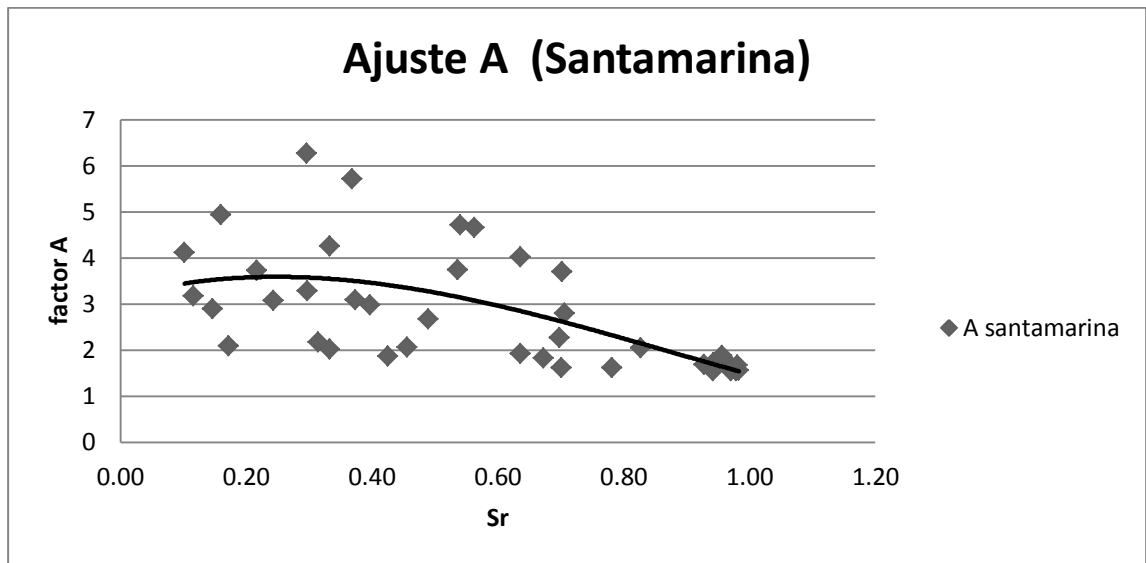


Figura 5 Curva de ajuste del parámetro de forma A por medio de un polinomio de tercer grado desde el enfoque de Santamarina

A partir de las curvas de la *Figura 4* se obtuvo la siguiente ecuación de tercer grado por medio de una regresión polinómica (*Figura 5*) para la determinación de A por el enfoque de Santamarina:

$$A = 3,2881Sr^3 - 8,6575Sr^2 + 3,6864Sr + 3,1581 \quad (\text{Eq. 1.5})$$

Para Merchán se tienen las siguientes curvas para los valores de A en función del grado de saturación s_r :

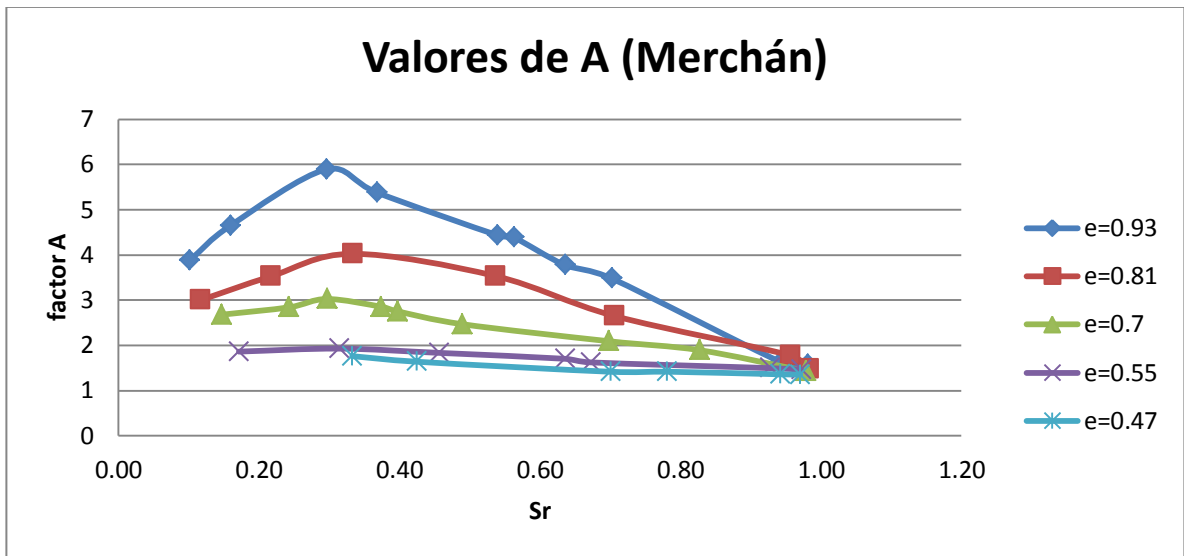


Figura 6 Valores requeridos para el parámetro de forma A (Merchán) según la relación de vacíos de cada muestra

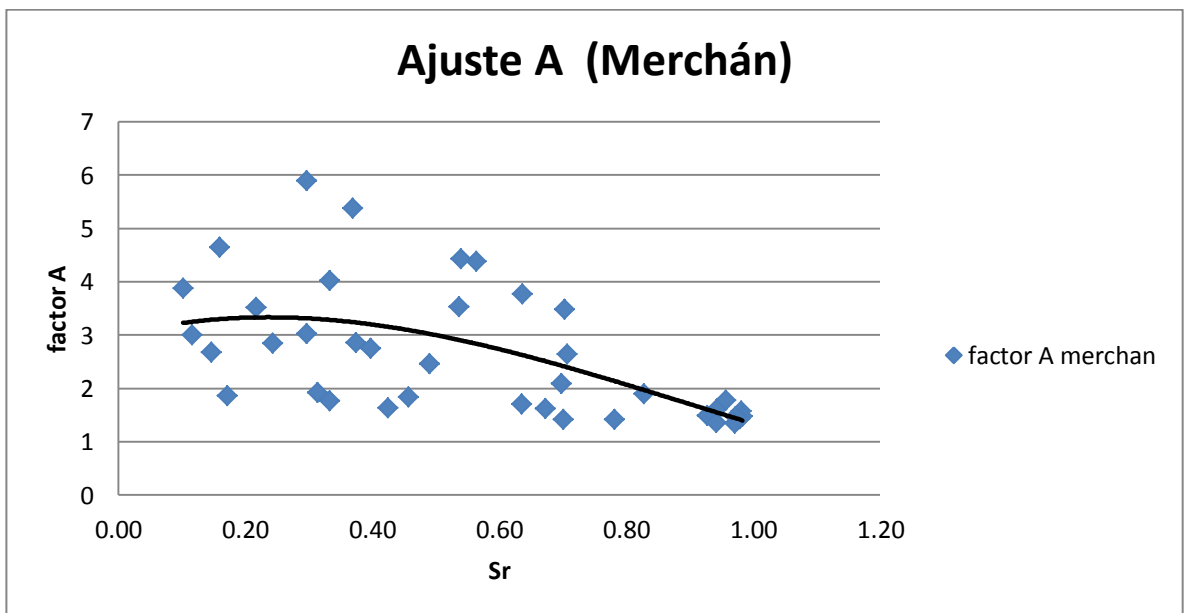


Figura 7 Curva de ajuste del parámetro de forma A por medio de un polinomio de tercer grado desde el enfoque de Merchán

A partir de las curvas de la *Figura 6* se obtuvo la siguiente ecuación de tercer grado por medio de una regresión polinómica (*Figura 7*) para la determinación de A desde el enfoque de Merchán:

$$A = 2,7765Sr^3 - 7,5102Sr^2 + 3,0885Sr + 2,9866 \quad (\text{Eq. 1.6})$$

Considerando las ecuaciones 1.5 y 1.6, polinomios de tercer grado, se procede a calcular A y, seguido a ello (con la ecuación 1.1), el módulo de rigidez G con respecto a cada consideración de la función de densidad. Teniendo eso se procede a compararlo con el módulo de rigidez real (experimental) y así poder identificar si las hipótesis planteadas se asemejan a la realidad y cumplen con las expectativas del desarrollo.

Ahora se presenta la comparación entre módulos de rigidez:

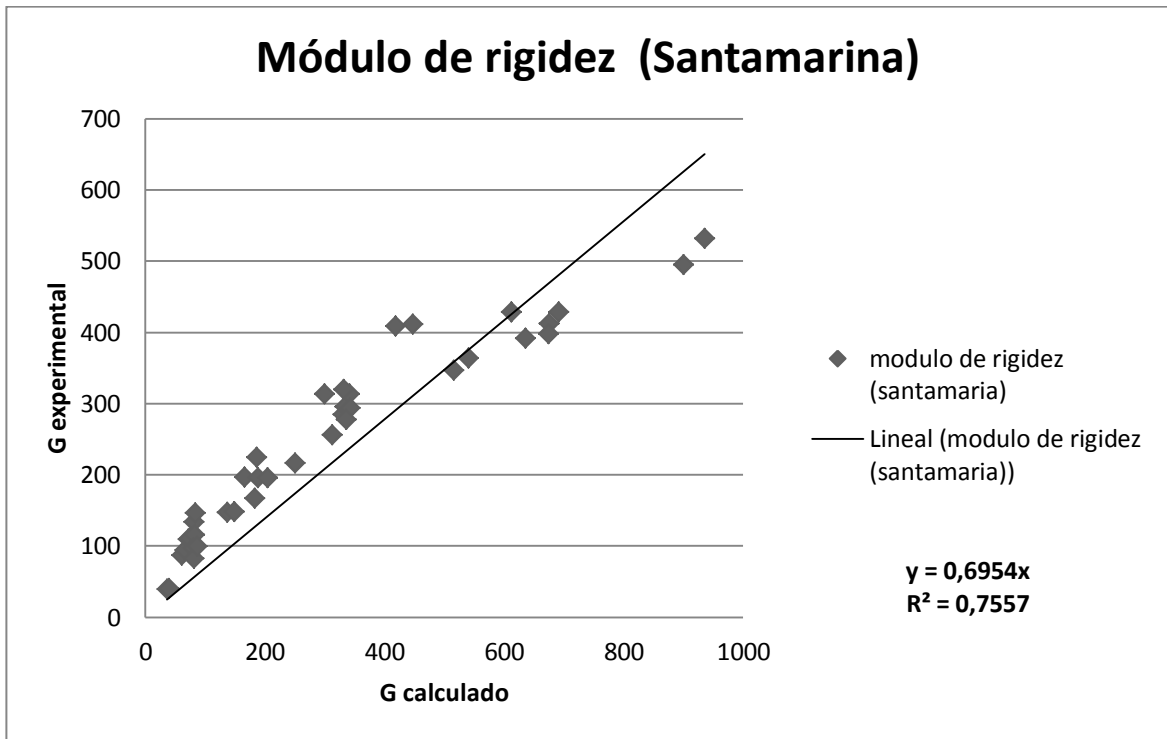


Figura 8 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina)

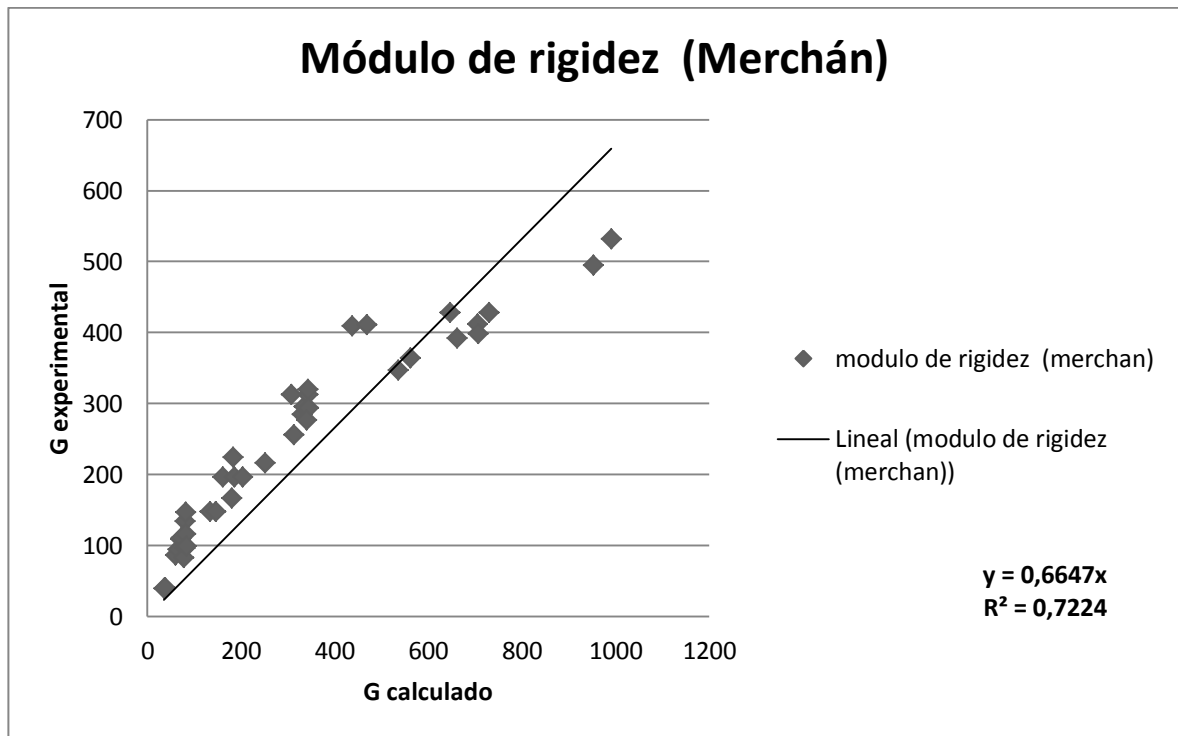


Figura 9 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán)

Al analizar las figuras 8 y 9 se puede apreciar que el ajuste carece de precisión ya que el factor de correlación de ajuste está por debajo de 0.8 y la pendiente de la recta no está muy cerca de 1; que es el valor esperado de la pendiente para un ajuste óptimo. Posiblemente a causa de que hasta este momento se están despreciando varias características de las muestras.

Por este mismo método de regresión se trabajaron ecuaciones polinómicas hasta el grado nueve, obteniendo una leve mejoría en el factor de correlación y la pendiente y se llevaron a cabo regresiones logarítmicas y exponenciales sin obtener mejoría alguna.

Con respecto a las ecuaciones polinómicas se puede decir que en este caso ofrecen un ajuste aceptable para datos con relaciones de vacíos en los rangos trabajados; sin embargo, si la relación de vacíos no está dentro del rango referenciado en los datos experimentales, el ajuste que se obtiene no se garantiza debido a que no se tiene total certeza del comportamiento de A.

1.2 MODIFICACIÓN DE LAS CONSTANTES DE LA ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL FACTOR “A”

Al descartar los métodos de regresión numérica por no ofrecer buenos resultados, se procede a tratar de mejorar el factor de regresión y la pendiente para G calculado vs. experimental usando la ecuación 1.4 donde se cambia únicamente el valor de las constantes implicadas c , D y b de la siguiente manera:

Inicialmente se tienen los valores de las constantes en la tabla 2 que permiten conocer los resultados de comparación entre los módulos de rigidez calculado y experimental, estableciendo con estos resultados un punto inicial de comparación para las pruebas realizadas y las hipótesis planteadas.

Según la relación de vacíos planteada por Santamarina, teniendo en cuenta la tabla 2 para los valores de las constantes de A , se obtuvo:

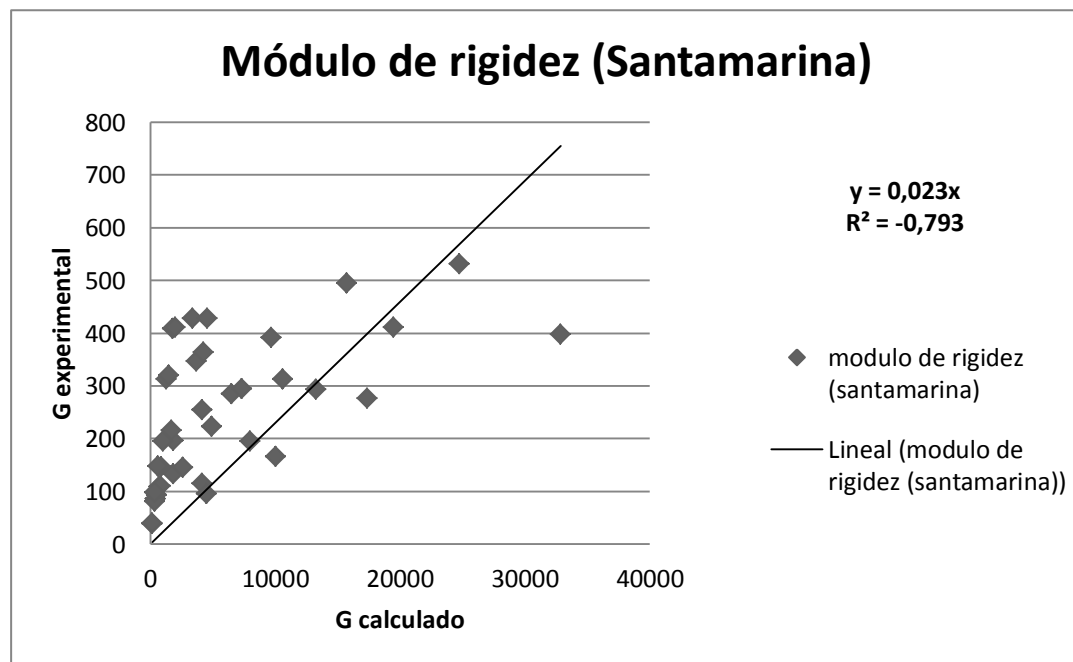


Figura 10 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 2

Según la relación de vacíos planteada por Merchán, teniendo en cuenta la tabla 1.2 para los valores de las constantes de A, se obtuvo:

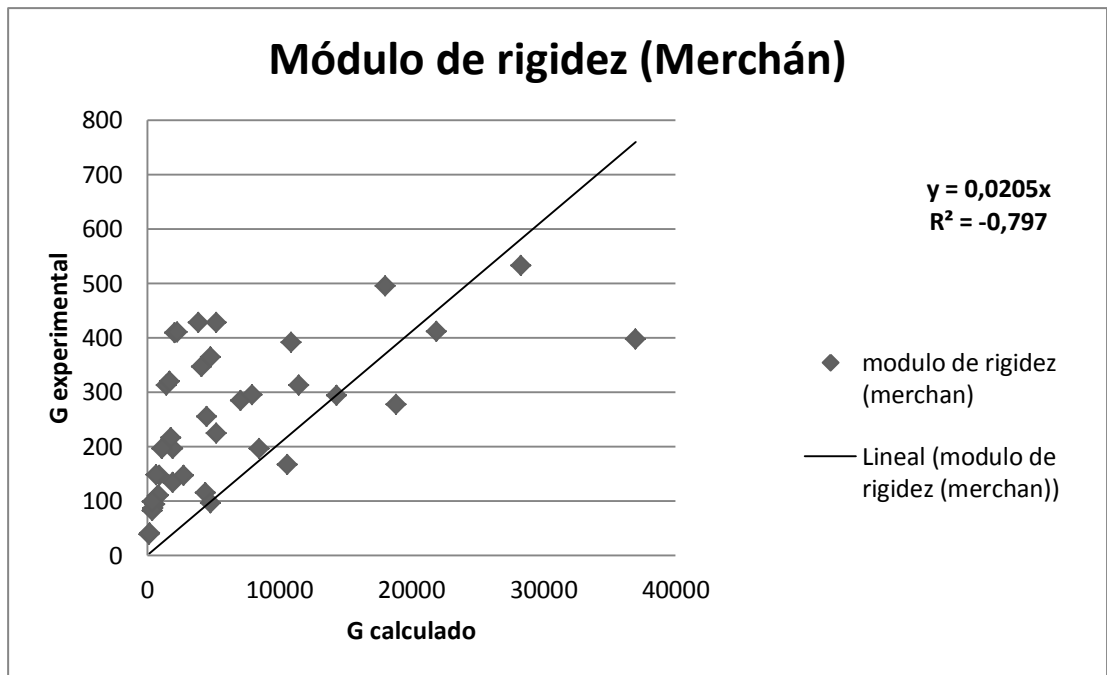


Figura 11 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 2

Ahora procediendo con la modificación de las constantes se tiene:

Para Santamarina:

Factor A		
$A=c/(D+B*Sr^{3/4})$	c	1,2
	D	0,48
	B	3,2

Tabla 3 Constantes usadas para la determinación del parámetro de forma (Santamarina)

Y se obtienen los siguientes resultados para módulo de rigidez:

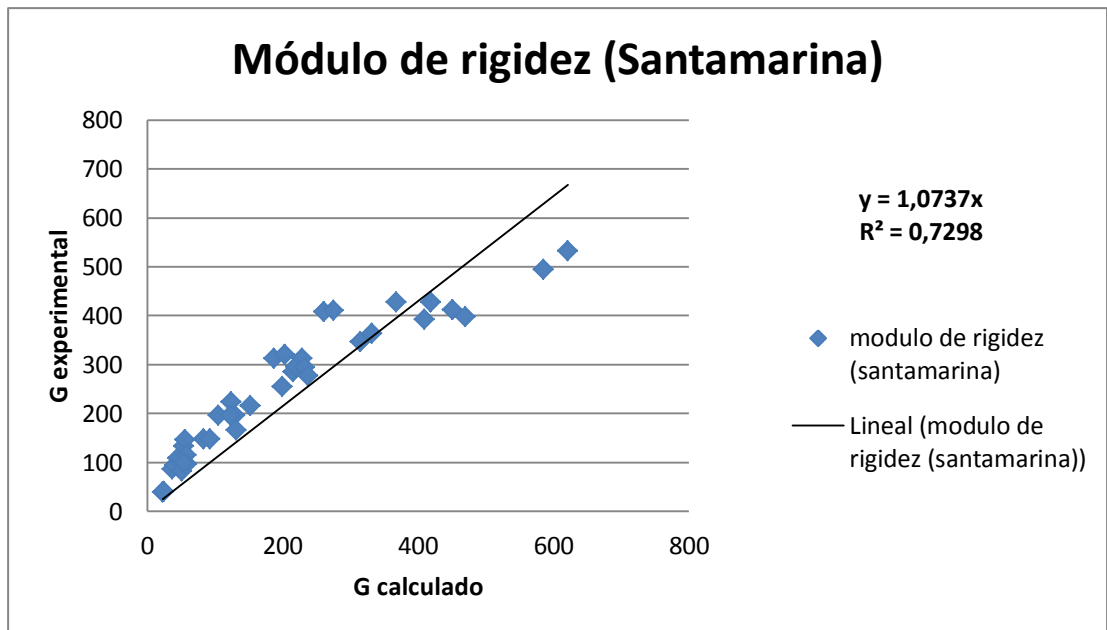


Figura 12 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 3

Para Merchán:

Factor A		
$A=c/(D+B*Sr^{3/4})$	c	2,2
	D	1,51
	B	2

Tabla 4 Constantes usadas para la determinación del parámetro de forma (Merchán)

Obteniendo los siguientes resultados para módulo de rigidez:

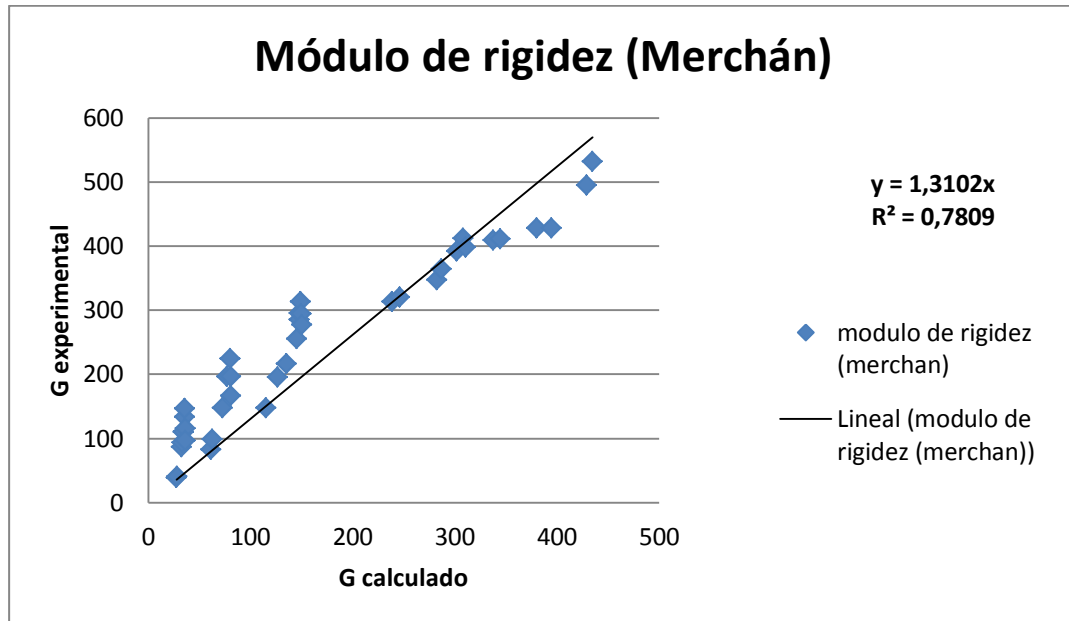


Figura 13 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán) considerando la ecuación 1.4 para el parámetro de forma y las constantes en la tabla 4

En base a lo resultante inicialmente para el parámetro de forma A y lo obtenido después del cambio de las constantes, se puede observar un gran cambio y mejoría en las pendientes y los factores de correlación para los dos casos de la función de relación de vacíos (Santamarina, Merchán).

Además se puede apreciar y afirmar que los resultados generados con la ecuación inicial del parámetro de forma A variando sus constantes, son mucho mejores que los obtenidos por el método de regresión, eso lleva a concluir que el método de regresión, teniendo como variable sólo el grado de saturación S_r , no es muy efectivo para este caso y no está cumpliendo con las expectativas.

1.3 PARÁMETRO DE FORMA “A” DETERMINADO POR REGRESIÓN POLINÓMICA MULTIVARIABLE

Con el fin de seguir mejorando los ajustes de la ecuación del módulo de rigidez (G_0) y, por ende, lograr mayor acercamiento a la realidad, se plantea una ecuación por medio de una regresión polinómica multivariable para el parámetro de forma A introduciendo, como variables de dicha ecuación, el grado de saturación S_r y la relación de vacíos e . El resultado es:

Para Santamarina el factor de forma A esta dado por:

$$\begin{aligned} A = & 1.571272447 e^3 - 17.67496624 e^2 S_r \\ & - 19.96422061 e S_r^2 + 13.33781705 S_r^3 \\ & + 14.62342362 e^2 + 38.45450862 - 12.599101 S_r^2 \\ & - 17.6497673 e - 4.38428445 S_r + 5.6796808 \end{aligned}$$

(Eq. 1.7)

Para Merchán el factor de forma A esta dado por:

$$\begin{aligned} A = & -3.7406767 e^3 - 16.69459182 e^2 S_r - 18.84428564 e S_r^2 \\ & + 12.41387176 S_r^3 + 24.38340372 e^2 + 36.25687503 e S_r \\ & - 11.566451 S_r^2 - 23.2552775 e - 4.25274187 S_r + 6.546988 \end{aligned}$$

(Eq. 1.8)

Introduciendo los parámetros de forma A dados por las ecuaciones 1.7 y 1.8 para Santamarina y Merchán respectivamente y sin dejar de lado las funciones de densidad, en la ecuación 1.1, que define el módulo de rigidez, se obtuvieron los siguientes resultados.

Para Santamarina:

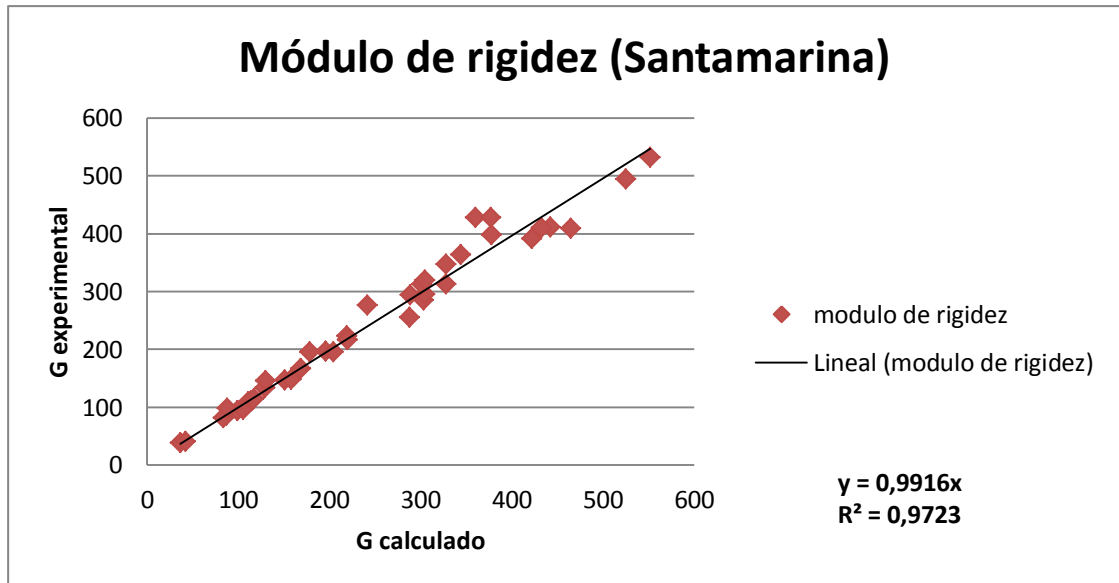


Figura 14 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Santamarina) considerando la ecuación 1.7 para el parámetro de forma

Para Merchán:

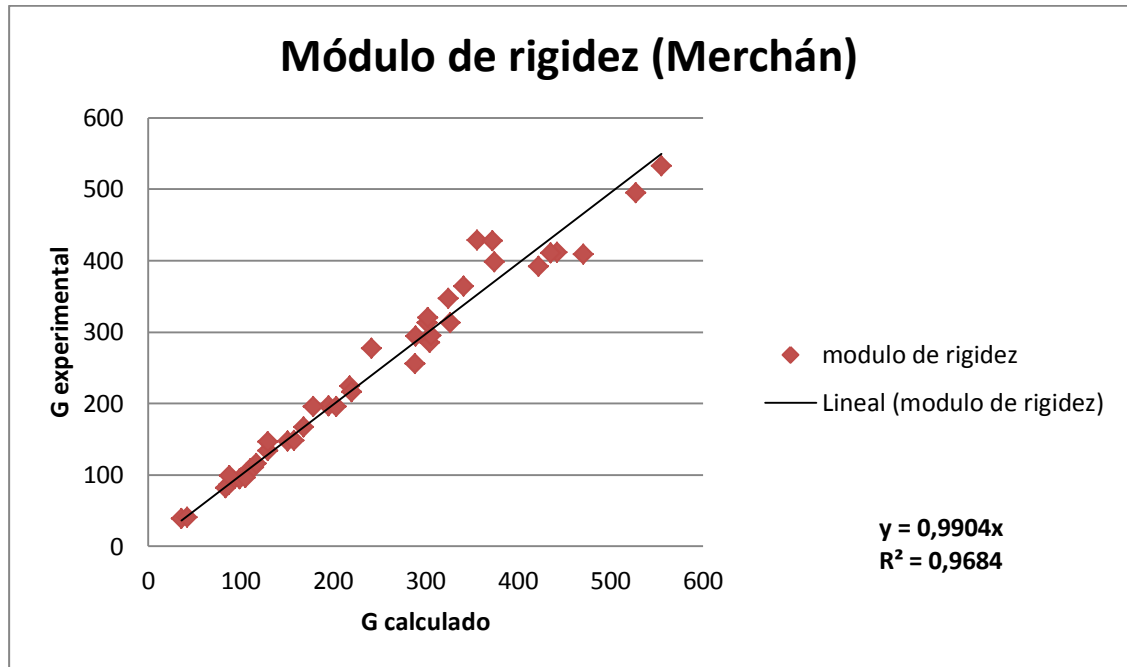


Figura 15 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado (Merchán) considerando la ecuación 1.8 para el parámetro de forma.

Los resultados obtenidos con el ajuste del factor A por medio de las ecuaciones polinómicas multivariadas (Eq 1.7-1.8) son excelentes ya que el factor de correlación de ajuste en ambos casos (Santamarina, Merchán) se encuentra por encima de 0.95 y la pendiente esta muy cercana a 1.

Sin embargo, aunque los resultados de esta prueba sean muy satisfactorios, no se garantiza la efectividad de la determinación del factor A en muestras que no estén en el rango de relación de vacíos trabajado (0.47-0.93) por tanto, se continuará con el proceso de ajuste para intentar incluir parámetros como la succión, el grado de saturación y el esfuerzo efectivo.

Sumado a eso, se quiere considerar en el ajuste una parte asociada a la microestructura ya que con la ecuación obtenida inicialmente se da un planteamiento de una forma muy general y sólo considerando la macroestructura.

2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ INCLUYENDO EL ESFUERZO EFECTIVO

Dejando de lado los ajustes ya determinados, se procede a continuar basando el del módulo de rigidez en una ecuación empírica (Eq. 2.1) derivada de la ecuación 1.1 y también propuesta por Hardin (1978) donde se incluye un parámetro S determinado, como parámetro de estructura.

Sumado a eso, se considera el esfuerzo efectivo p' en función de la succión s , y se suprime el parámetro de forma A dejando como resultado lo siguiente:

$$G_0 = S * f(e) * (p')^\beta * p_r^{(1-\beta)} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Donde:

$S =$ parámetro de estructura

$$S = \frac{c \cdot s_r}{1 + \left(\frac{s_r}{s_{ropt}}\right)^2} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$s_{ropt} =$ grado de saturación óptimo = 0.33

$c =$ constante (por determinar)

$$f(e) = \frac{(B-e)^k}{(1+e)} \quad \text{Propuesto en la Eq 1.3}$$

Entonces reemplazando las ecuaciones 1.3 y 2.2 en la ecuación 2.1 obtenemos:

$$G_0 = \frac{c \cdot s_r}{1 + \left(\frac{s_r}{s_{ropt}}\right)^2} * \frac{(B-e)^k}{(1+e)} * \left(\frac{p'}{p_r}\right)^\beta * p_r \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Donde:

$p' =$ esfuerzo efectivo $\beta = 0.1$

$\beta =$ parámetro de la tensión efectiva $B = 2$

$$k = 2$$

$$p_r = 0.01[\text{mpa}]$$

$p_r = \text{presión de referencia}$

Para la determinación del esfuerzo efectivo se usó la ecuación 2.4 que fue planteada por Alonso *et al* (2001):

$$p' = p'' + S_e * s \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Y considera los factores:

$p'' = \text{esfuerzo neto}$

$$p'' = 0.1[\text{mpa}]$$

$s = \text{succión}$

$S_e = \text{grado de saturación efectivo}$

2.1 GRADO DE SATURACIÓN EFECTIVO EN FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN MACRO Y MICROESTRUCTURAL

El grado de saturación efectivo se da como:

$$S_e = \left[\frac{S_r - S_{rm}}{1 - S_{rm}} \right] \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Teniendo en cuenta que:

$S_{rm} = \text{grado de saturación microestructural}$

$$S_{rm} = \frac{G_s * \omega_{micro}}{e} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Las ecuaciones 2.5 y 2.6 fueron igualmente planteadas por Alonso (1999) y en ellas se tiene en cuenta:

Densidad de sólidos: $G_s = 2.7$ (dato experimental)

Como se está trabajando con muestras parcialmente saturadas se considera lo siguiente:

Para muestras donde:

$$\omega_{muestra} > \bar{\omega}_{micro}$$

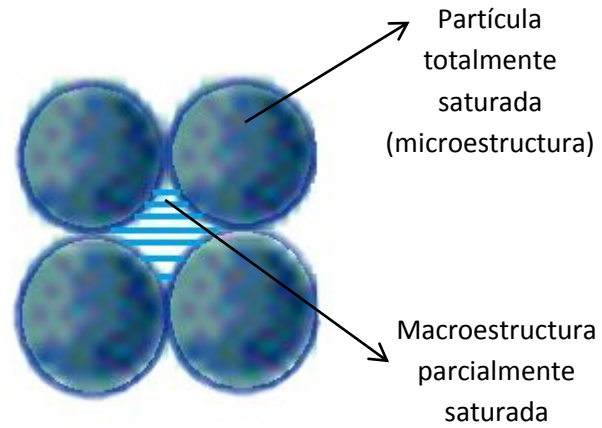


Figura 16 Contenido de agua de la macro y micro estructura caso I

$$\omega_{muestra} < \bar{\omega}_{micro}$$

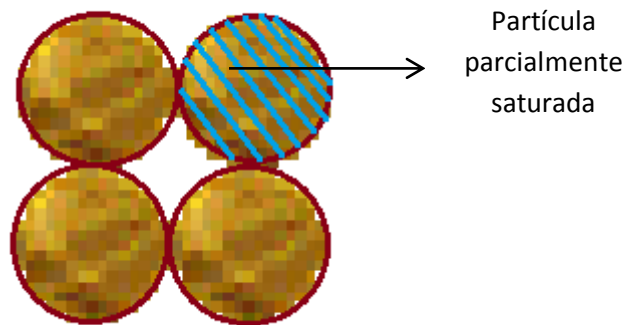


Figura 17 Contenido de agua de la macro y micro estructura caso II

Para las condiciones que ofrecen las muestras que se trabajaron en la experimentación se tendrá en cuenta el primer caso, donde:

$$\omega_{muestra} > \bar{\omega}_{micro}$$

Y Considerando la ecuación 2.7 para la determinación de $\bar{\omega}_{micro}$ y sabiendo que S_{rm}^L es grado de saturación microestructural local:

$$S_{rm}^L = \frac{G_s * \bar{\omega}_{micro}}{e_{micro}} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Gracias a que la partícula de la microestructura está totalmente saturada el grado de saturación micro local (es decir en la partícula) será 1:

$$S_{rm}^L = 1$$

Además:

$$e_{micro} = 0.33$$

Conociendo esto se despeja la ecuación 2.7 y se obtiene lo siguiente:

$$\bar{\omega}_{micro} = 0.12$$

De esta manera se conocen todos los parámetros necesarios para dar solución a la ecuación 2.3 a excepción del factor C que se determinará inicialmente introduciendo el valor experimental del módulo de rigidez como G_0 en la ecuación 2.3 y, con la ayuda de los otros factores ya definidos, se obtendrá un valor de C para cada dato experimental. Luego, para la determinación del parámetro $C_{general}$, se realiza un promedio de todos los valores de C y se llega a lo siguiente:

$$C_{general} = 95462,72393$$

Teniendo este factor $C_{general}$ se procede a determinar el módulo de rigidez teórico propuesto en la ecuación 2.3 y a comparar los resultados obtenidos con los resultados de laboratorio, en pro de la determinación del factor de correlación y la pendiente para este planteamiento con el fin de, finalmente, comprobar la efectividad del mismo.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

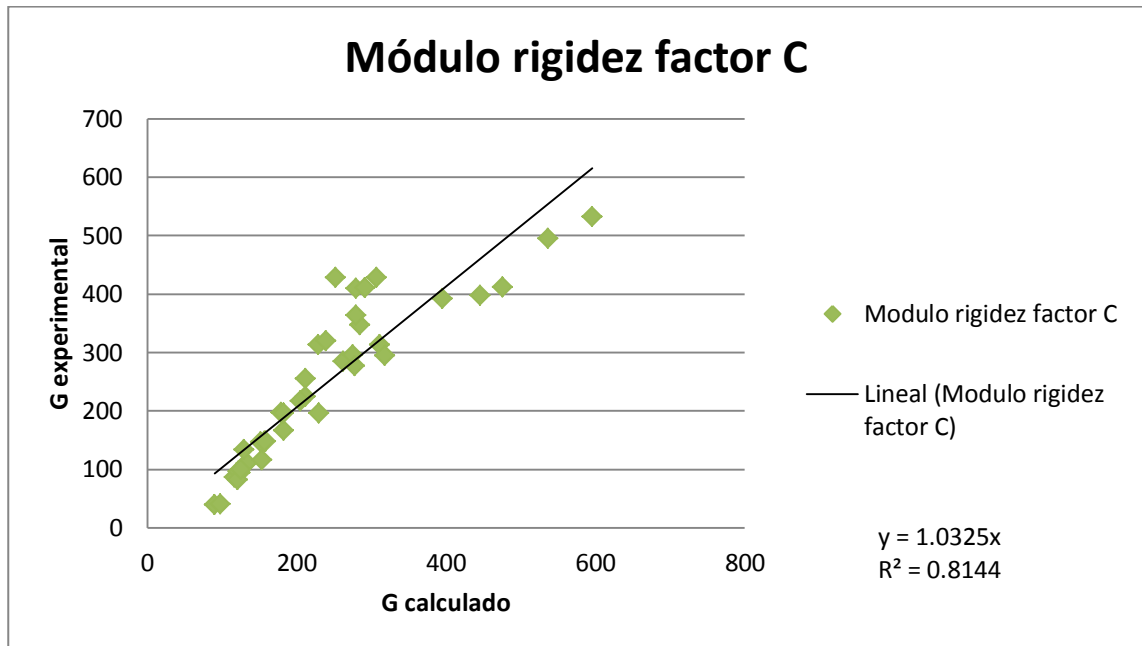


Figura 18 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.3 para el módulo de rigidez y $C=95462,72393$

Por consiguiente se puede observar que el factor de correlación al igual que la pendiente, están en un buen rango. Eso lleva a concluir que el planteamiento se encuentra dado de forma correcta y que funciona efectivamente al tener en cuenta la microestructura así el valor de C sea un valor estimado por promedio.

También se infiere que en la ecuación 2.3 al cambiar el parámetro de forma A por el parámetro de estructura S (Eq. 2.2), se obtiene una fórmula más sencilla al no incluir varios números constantes en comparación a las ecuaciones determinadas por regresión.

Ahora se procede a analizar la ecuación 2.3 en busca de mejores resultados; partiendo de que esta ecuación hasta el momento se planteó con la fórmula de relación de vacíos $f(e)$ general propuesta por Merchán con unos factores determinados $B = 2$ y $k = 2$, al remplazar en ella únicamente estos factores por $B = 1,95$ y $k = 2,4$ se obtiene un nuevo valor de C y una leve mejoría en el factor de correlación.

El nuevo valor de C es:

$$C_{general} = 94573,11615$$

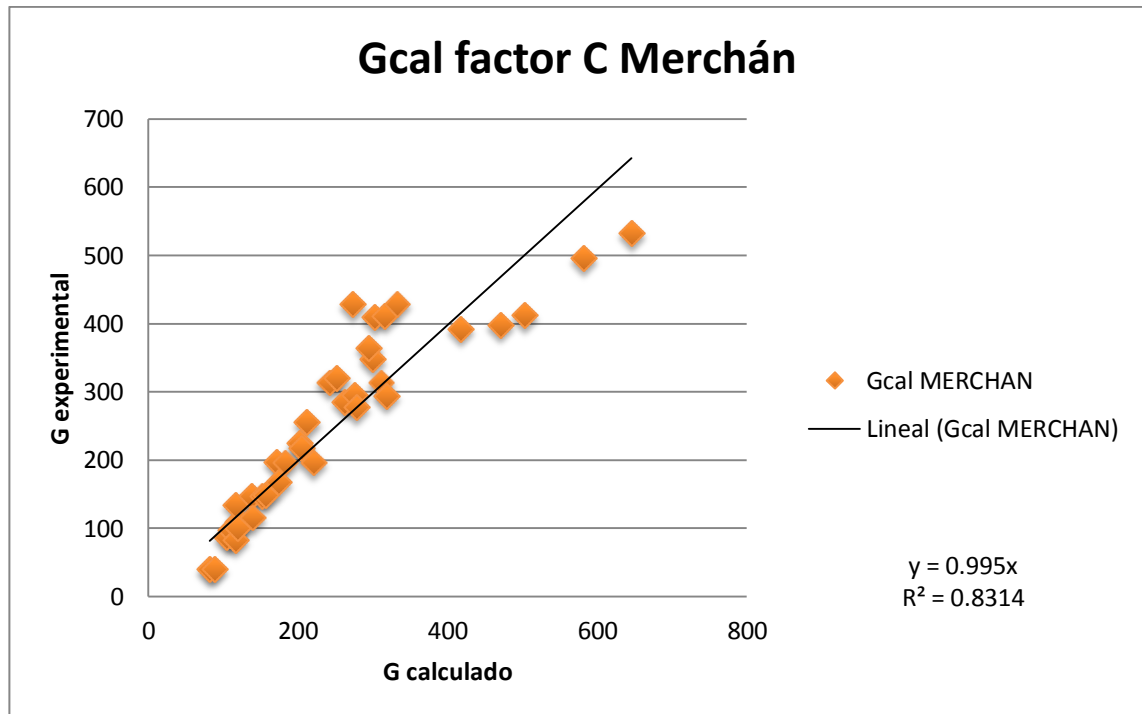


Figura 19 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.3 para el módulo de rigidez cambiando los factores B y k en la función de relación de vacíos y tomando $C=94573,11615$

Ahora se continúa con el análisis de la ecuación 2.3 pero incluyendo la función de relación de vacíos planteada en la ecuación 1.2 por Santamarina con los factores proporcionados para la función por el mismo autor en pro de la obtención del mejor ajuste.

La ecuación 2.3 se modificó de la siguiente manera:

$$G_0 = \frac{C \cdot S_r}{1 + \left(\frac{S_r}{S_{ropt}}\right)^2} * \left[\frac{B-e}{1+e}\right]^K * \left(\frac{p'}{p_r}\right)^\beta * p_r \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Donde:

$$B = 1,225 \text{ y } k = 2$$

Con esto teniendo en cuenta todos los demás parámetros necesarios para despejar **C** con respecto a cada muestra con la ecuación 2.8 determinamos:

Un nuevo valor de **C**:

$$C_{general} = 1193142,404$$

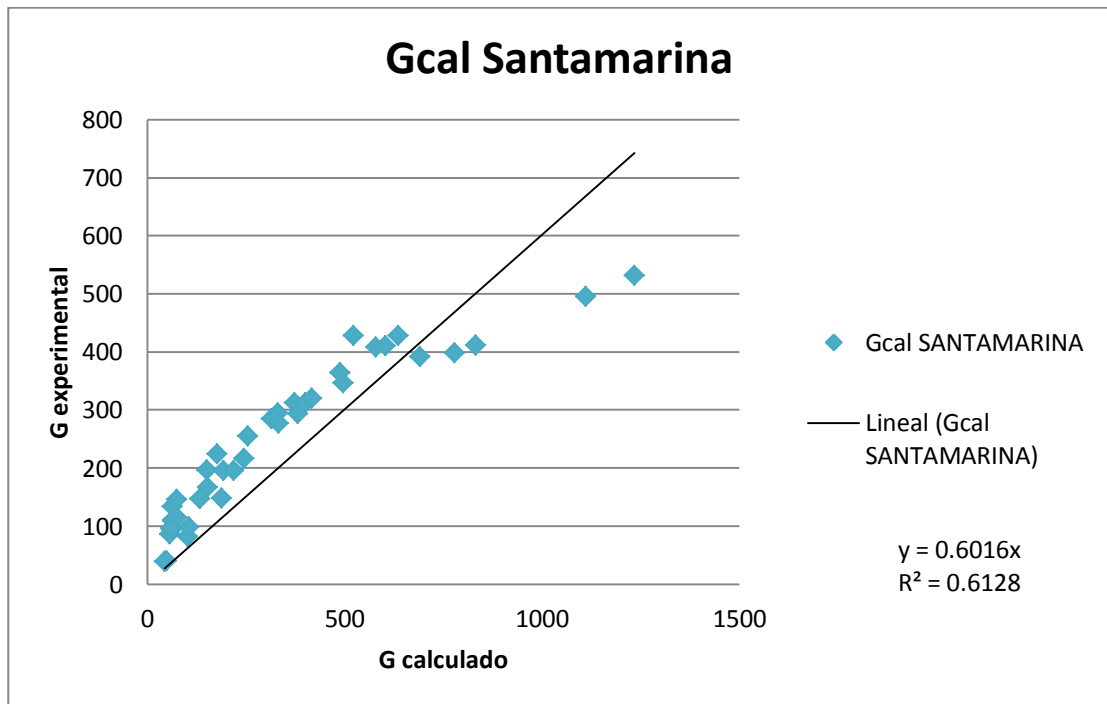


Figura 20 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.8 (con relación de vacíos por Santamarina) para el módulo de rigidez tomando los factores $B = 1,225$ y $k = 2$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=1193142,404$

A través del análisis de la figura 20 se pudo determinar que con estos valores para los factores B y k , el ajuste no es óptimo ya que no se obtiene una pendiente cercana a 1 y un factor de correlación por debajo de 0.65; por esta razón se procede a cambiar los valores de las constantes B y k de la siguiente manera:

$$B = 2,15 \text{ y } k = 1,95$$

Lo anterior lleva a obtener:

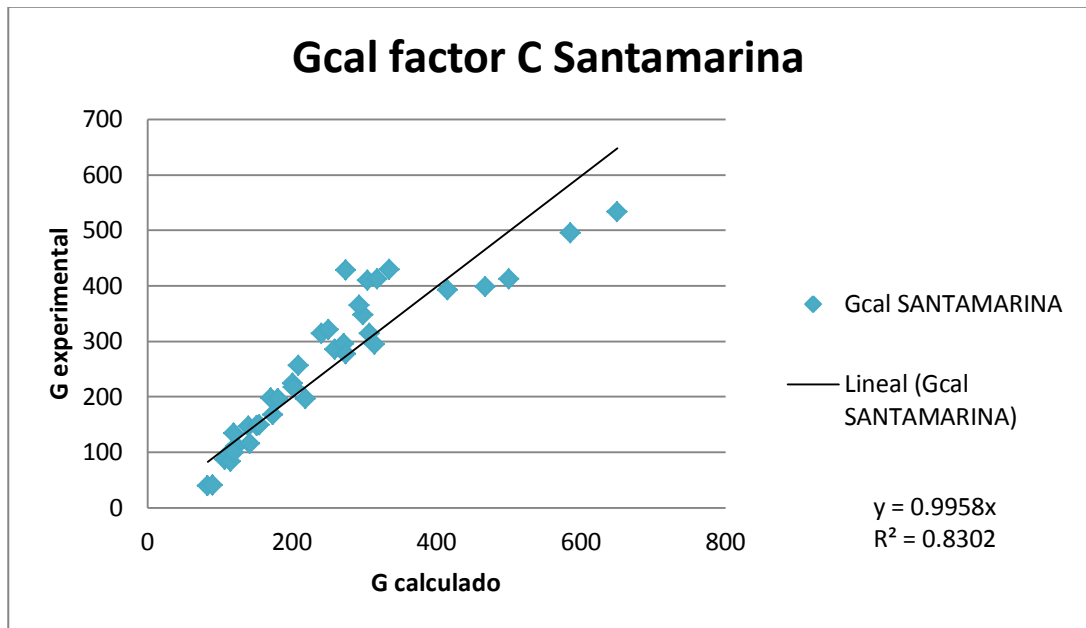


Figura 21 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la ecuación 2.8 (con relación de vacíos por Santamarina) para el módulo de rigidez tomando los factores $B = 2,15$ y $k = 1,95$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=127937,1463$

Después de todo se puede ver que los resultados arrojados por la ecuación 2.3 son bastante buenos con respecto al factor de correlación de ajuste y muy similares para cualquiera de los dos planteamientos de la función de relación de vacíos $f(e)$, lo que da un buen indicio para continuar con la mejora de la ecuación intentando superar los factores de correlación ya obtenidos.

2.2 GRADO DE SATURACIÓN EFECTIVO EN FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN ELEVADO A UNA POTENCIA

Continuando con un nuevo planteamiento para la determinación del módulo de rigidez, sin dejar de lado las ecuaciones 2.3 - 2.4 - 2.6, se procede solamente a modificar el factor S_e propuesto en la ecuación 2.5 por el planteado en la ecuación 2.9:

$$S_e = S_r^{n_{general}} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Donde S_r se conoce de los datos experimentales brindados y n se determina de la siguiente manera:

Conociendo el valor de S_e obtenido inicialmente por la ecuación 2.5 y los valores de S_r para cada dato se despeja n con:

$$\frac{\ln S_e}{\ln S_r} = n \quad (\text{Eq. 2.10})$$

De esta manera, al obtenerse diversos valores de n , uno para cada dato experimental, se procede a realizar un promedio con cada uno de los datos obteniendo:

$$n_{general} = 2.29$$

Lo que da pasó a calcular unos nuevos valores de S_e y una nueva constante C para tener un nuevo ajuste del módulo de rigidez, donde:

$$C = 101576,023$$

Con esta pequeña modificación se obtienen los siguientes resultados en cuanto al módulo de rigidez:

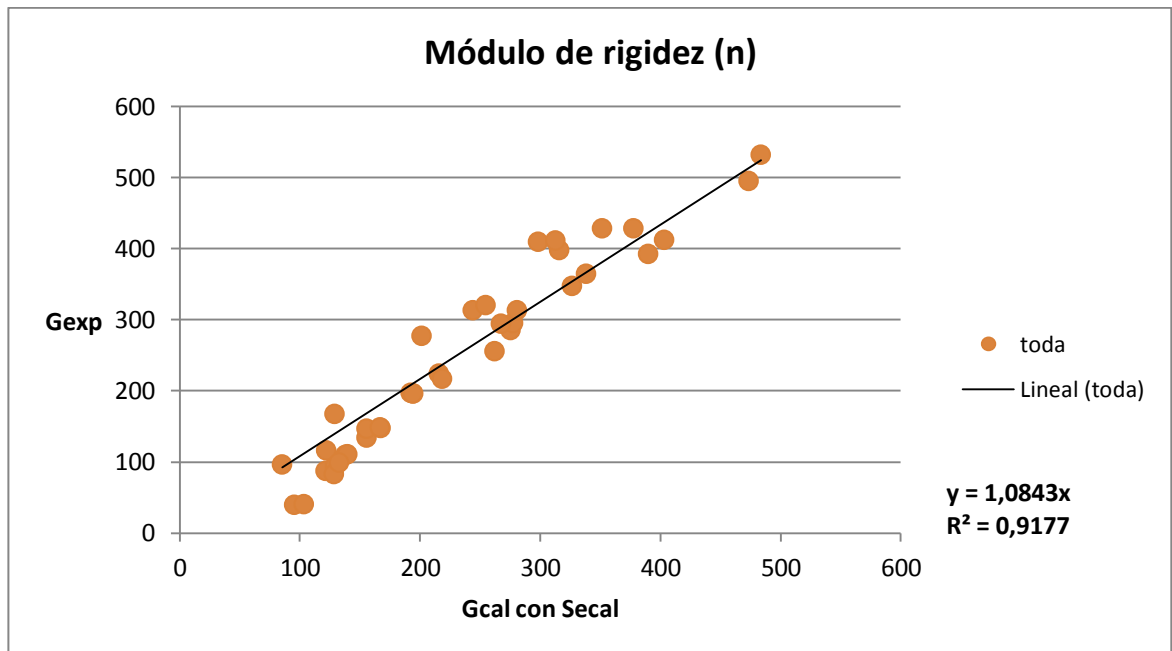


Figura 22 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando las ecuaciones 2.3-2.4-2.6-2.9 para el módulo de rigidez tomando los factores $B = 2$ y $k = 2$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=101576,023$

Conservando el mismo planteamiento y reemplazando únicamente las constantes **B** y **k** con los valores:

$$B = 1,7 \text{ y } k = 2$$

Modificando adicionalmente el factor **C** con:

$$C = 173428,603$$

Se obtiene una mejoría con respecto a los resultados anteriores (Figura 2.2), así:

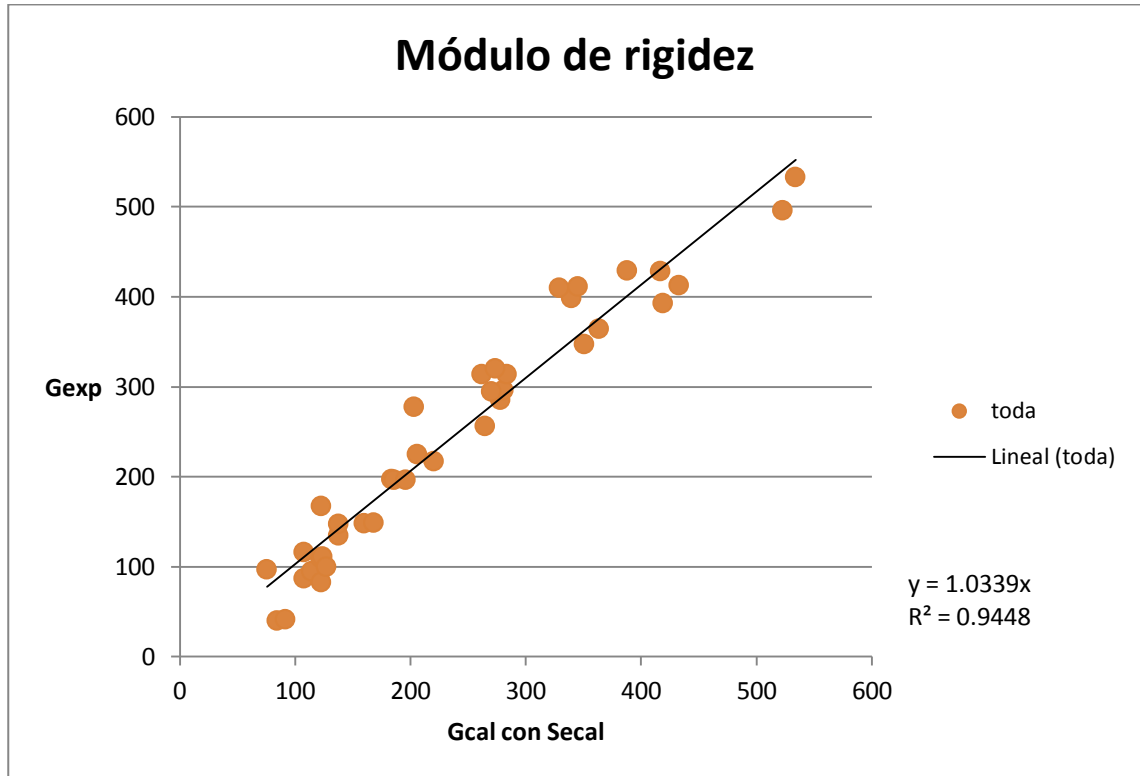


Figura 23 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado, considerando las ecuaciones 2.3-2.4-2.6-2.9 para el módulo de rigidez tomando los factores $B = 1,7$ y $k = 2$ en la función de relación de vacíos y tomando $C=173428,603$

Al poner el factor S_e en función de S_r , elevado a una potencia, teniendo como base la ecuación 2.3 y 2.9, se logró mejorar el ajuste que se había obtenido en el planteamiento inmediatamente anterior. Todo de una forma más sencilla, como se puede ver en las figuras 22 y 23

3. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ A TRAVÉS DE UN ENFOQUE MICROESTRUCTURAL

3.1 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ CON UN VALOR DEL PARÁMETRO DE FORMA “A” DADO

El siguiente paso a desarrollar es la inclusión y el análisis de la parte micro estructural del suelo de una manera mas detallada para así obtener una ecuación del módulo de rigidez de una forma general o macro-micro estructural; a continuación se presenta la ecuación 3.1 propuesta por Merchán (2011) que tiene en cuenta la parte micro estructural del suelo.

$$G_M = S_M * f(e_M) * \left[\frac{G_m}{Pref} \right]^{1-\beta} * \left(\frac{P'_M}{Pref} \right)^\beta * Pref \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Donde:

G_M = módulo de rigidez general

S_M = parametro de estructura a nivel macro.

$f(e_M)$ = relación de vacios analizando el suelo macroestructuralmente.

G_m = módulo de rigidez de la micro estructura.

$Pref$: Presión de referencia = 0.01 Mpa

P'_M = Esfuerzo efectivo macro

β = Parámetro de tensión efectiva

Ahora se dará un vistazo a la función del módulo de rigidez desde un punto de vista micro estructural, función implícita en la ecuación 3.1.

$$G_m = S_m * f(e_m) * \left[\frac{G_s}{Pref} \right]^{1-\xi} * \left(\frac{P'_m}{Pref} \right)^\xi * Pref \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Teniendo en cuenta que:

S_m = parámetro de estructura a nivel micro.

$f(e_m)$ = relación de vacíos analizando el suelo micro estructuralmente.

G_s = módulo de rigidez de los minerales que componen la partícula.

P_{ref} : Presión de referencia = 0.01 Mpa

P'_m = Esfuerzo efectivo micro

ξ = parámetro de influencia del esfuerzo efectivo

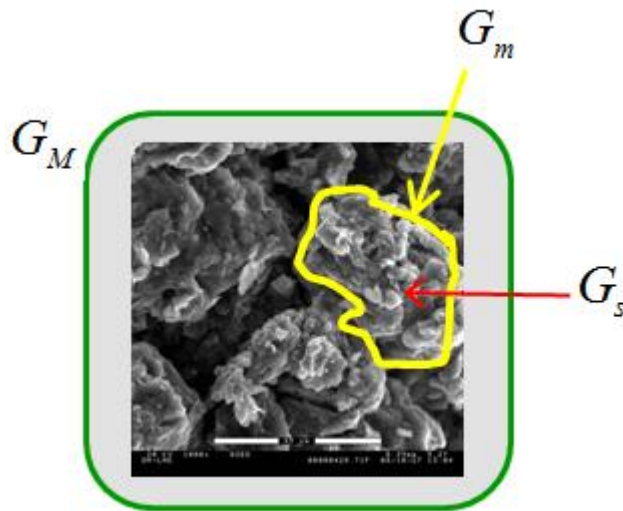


Figura 24 apreciación visual de la microestructura y la macroestructura.

A continuación se presentan las funciones P'_M y P'_m :

Para la parte Macro estructural se tiene que:

$$P'_M = p'' + S_{eM} * \Psi \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Dónde:

$$p'' = 0.01 \text{ Mpa}$$

S_{eM} : grado de saturación efectivo macro estructural = Sr^n

Teniendo en cuenta que ahora el valor de “n” será función de la relación de vacíos, se calcula de la siguiente manera:

$$n = 262 * \exp^{-6e}$$

Ψ : succión

Para la parte micro estructural se tiene que:

$$P'_m = p'' + S_{em} * \Psi \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Donde:

S_{em} : grado de saturación efectivo micro estructural.

Y está dado por el mínimo entre $\frac{S_r}{S_{rm}}$ y 1 elevado a una potencia “m”; donde:

$$m = 0.51 * \exp^{1.14e}$$

S_r = grado de saturación.

$$S_{rm} = \frac{G_s * w}{e}$$

A su vez siendo:

$$G_s = 2.7 ; w := 0.12 ; e = \text{relación de vacíos microestructural}$$

Finalmente la función dada en la ecuación 3.4 queda de la siguiente manera:

$$P'_m = p'' + \left(\min \left(\frac{S_r}{S_{rm}}, 1 \right) \right)^m * \Psi \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Definidos los parámetros anteriores se incluirá la ecuación 3.2 en 3.1, por consiguiente se obtiene la ecuación del módulo de rigidez:

$$G_M = A * f(e_m, e_M) * \left[\frac{P'_m}{P_{ref}} \right]^{\xi(1-\beta)} * \left(\frac{P'_M}{P_{ref}} \right)^\beta * P_{ref} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Donde “**A**” es un factor promedio despejado del módulo de rigidez experimental “ G_{exp} ” de la siguiente manera:

$$A = \frac{G_{exp}}{f(e_m, e_M) * \left[\frac{P'_m}{P_{ref}} \right]^{\xi_0(1-\beta_0)} * \left(\frac{P'_M}{P_{ref}} \right)^{\beta_0} * P_{ref}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Donde $\beta_0 = 0.1$ y $\xi_0 = 0.2$

Lo que se hará ahora será comparar los módulos de rigidez que se generan con las diferentes funciones de vacíos (general, Merchán y Santamarina) teniendo en cuenta que la función de vacíos conjunta es:

$$f(e_m, e_M) = [f(e_m) * f(e_M)]^{1-\beta} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Es importante mencionar que la relación de vacíos macro estructural varía respecto a la muestra; mientras que en la micro estructura es constante $e_m = 0.32$.

A continuación se presentan los datos y las gráficas para cada uno de los casos:

GENERAL

$$A = 2259.24$$

$f(e_M)$	$f(e_m)$	β	ξ
$\frac{(2 - e)^2}{1 + e}$	$\frac{(2 - e_m)^2}{1 + e_m} = 2.138$	0.02	0.23

Tabla 5 Parámetros usados para determinar A con las consideraciones generales.

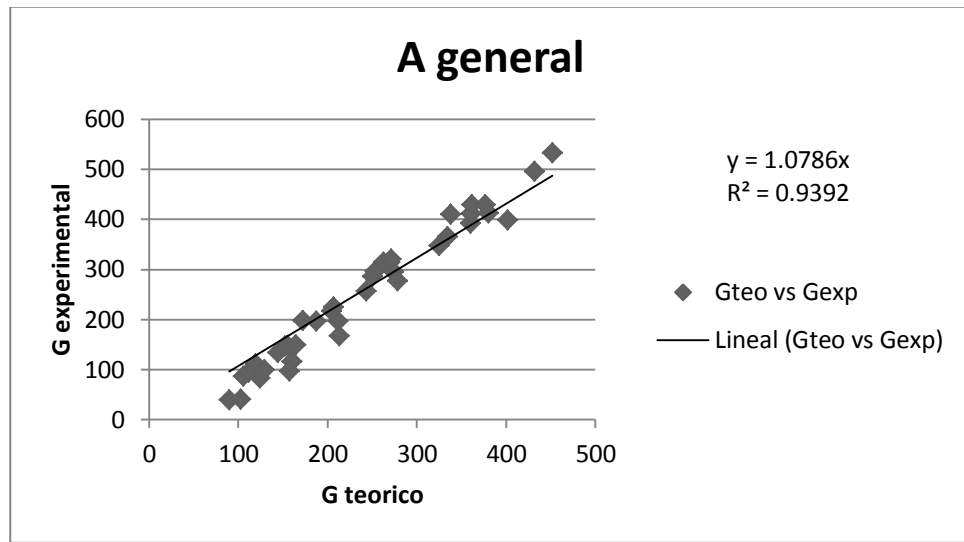


Figura 25 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la microestructura a través de la ecuación 3.1 con el planteamiento de relación de vacíos general.

MERCHÁN

$$A = 28880.68$$

$f(e_m)$	$f(e_M)$	β	ξ
$\frac{(B - e)^K}{1 + e}$; $B = 1.4; K = 3.26$	$\frac{(B - e_m)^K}{1 + e_m} = 0.9736$	0.05	0.15

Tabla 6 Parámetros usados para determinar A con las consideraciones de Merchán.

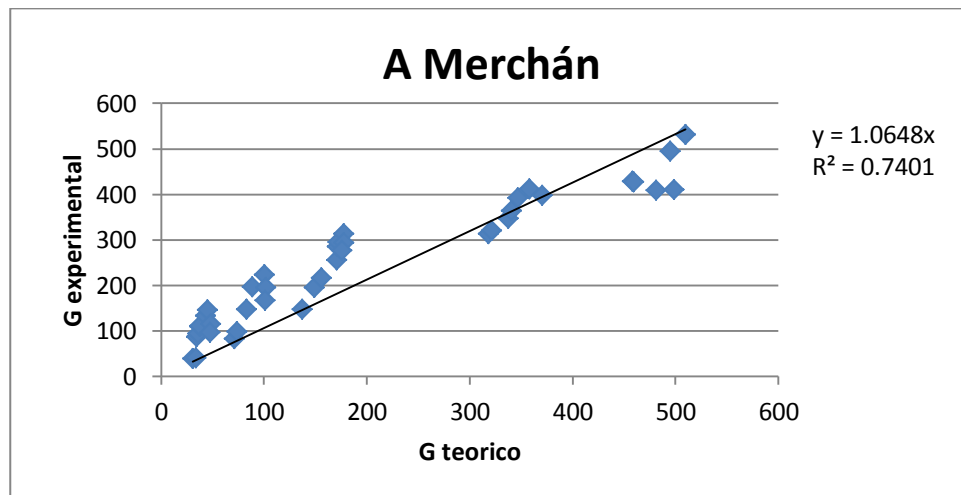


Figura 26 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la microestructura a través de la ecuación 3.1 con el planteamiento de relación de vacíos para Merchán

SANTAMARINA

$$A = 107073.32$$

$f(e_m)$	$f(e_M)$	β	ξ
$\left(\frac{B - e}{1 + e}\right)^K$; $B = 1.225; K = 2$	$\left(\frac{B - e_m}{1 + e_m}\right)^K = 0.47$	0.04	0.17

Tabla 7 Parámetros usados para determinar A con las consideraciones de Santamarina.

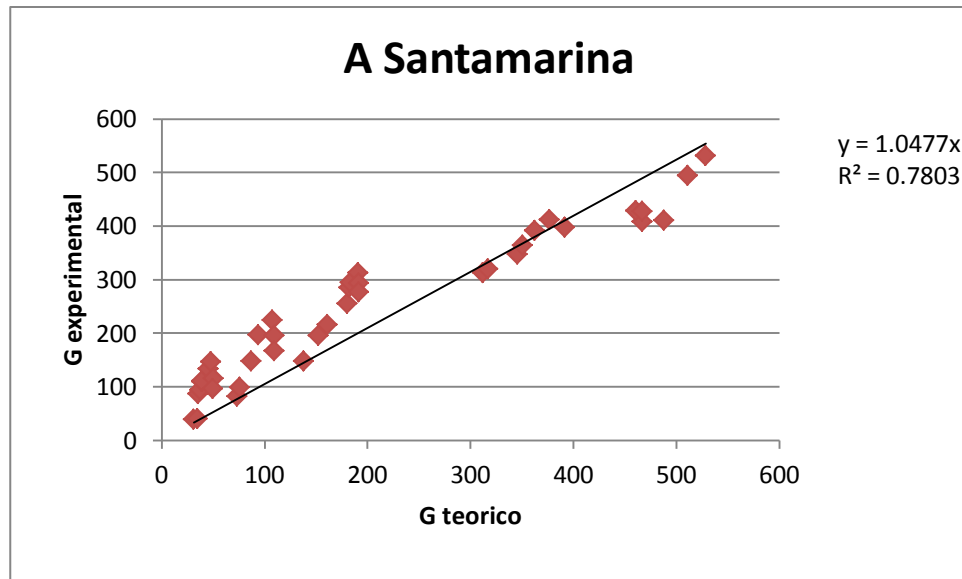


Figura 27 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la microestructura a través de la ecuación 3.1 con el planteamiento de relación de vacíos para Santamarina.

3.2 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ CONSIDERANDO UN EL PARÁMETRO “A” FUNCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN

El siguiente análisis se hará incluyendo una función del grado de saturación “ Sr ” dentro del factor **A** y generando una nueva constante “**C**”; finalmente la ecuación del módulo de rigidez será la siguiente:

$$G_M = C * \frac{Sr}{1 + \left(\frac{Sr}{Sr_{opt}}\right)^2} * f(e_m, e_M) * \left[\frac{P'_m}{Pref}\right]^{\xi(1-\beta)} * \left(\frac{P'_M}{Pref}\right)^\beta * Pref \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Donde “**C**” es el promedio despejado del módulo de rigidez experimental “ G_{exp} ” de la siguiente manera:

$$C = \frac{G_{exp}}{\frac{Sr}{1 + \left(\frac{Sr}{Sr_{opt}}\right)^2} * f(e_m, e_M) * \left[\frac{P'_m}{Pref}\right]^{\xi_0(1-\beta_0)} * \left(\frac{P'_M}{Pref}\right)^{\beta_0} * Pref} \quad (\text{Eq.3.10})$$

Donde $\beta_0 = 0.1$ y $\xi_0 = 0.2$

A continuación se presentan los datos y las gráficas para cada uno de los casos:

GENERAL

$$C = 19491.57$$

$f(e_M)$	$f(e_m)$	β	ξ
$\frac{(2 - e)^2}{1 + e}$	$\frac{(2 - e_m)^2}{1 + e_m} = 2.138$	0.1	0.2

Tabla 8 Parámetros usados para determinar C con las consideraciones generales.

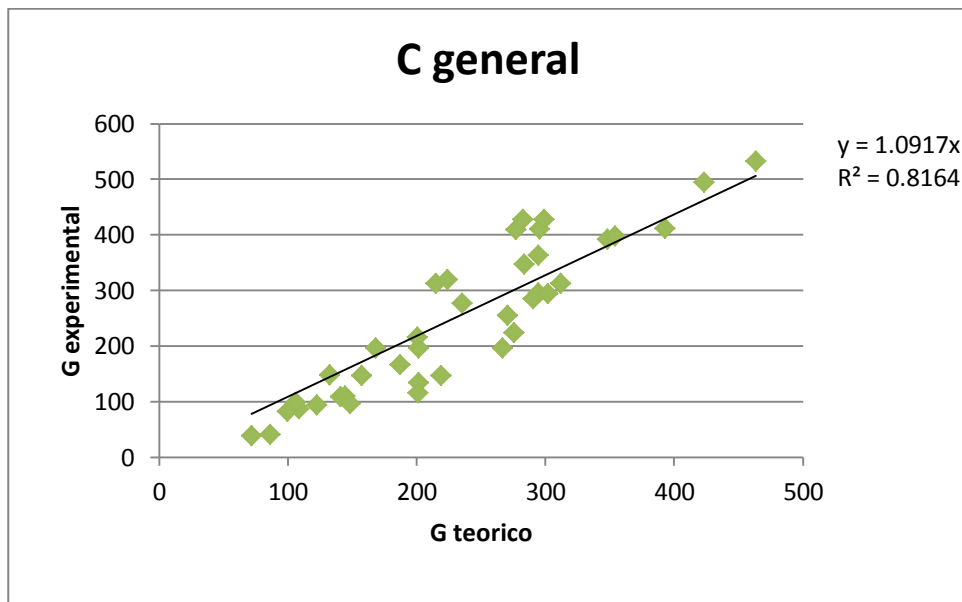


Figura 28 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la microestructura y el factor C a través de la ecuación 3.9 con el planteamiento de relación de vacíos general.

MERCHÁN

$$C = 247443.79$$

$f(e_m)$	$f(e_M)$	β	ξ
$\frac{(B - e)^K}{1 + e}$; $B = 1.4; K = 3.26$	$\frac{(B - e_m)^K}{1 + e_m} = 0.9736$	0.13	0.13

Tabla 9 Parámetros usados para determinar C con las consideraciones de Merchán.

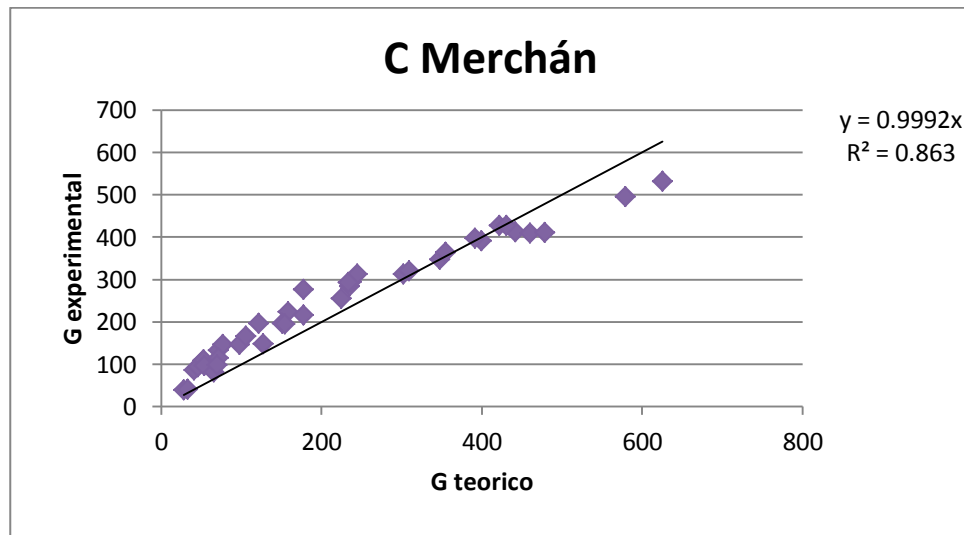


Figura 29 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la microestructura y el factor C a través de la ecuación 3.9 con el planteamiento de relación de vacíos para Merchán.

SANTAMARINA

$$C = 917704.91$$

$f(e_m)$	$f(e_M)$	β	ξ
$\left(\frac{B - e}{1 + e}\right)^K$; $B = 1.225; K = 2$	$\left(\frac{B - e_m}{1 + e_m}\right)^K = 0.47$	0.13	0.12

Tabla 10 Parámetros usados para determinar C con las consideraciones de Santamarina.

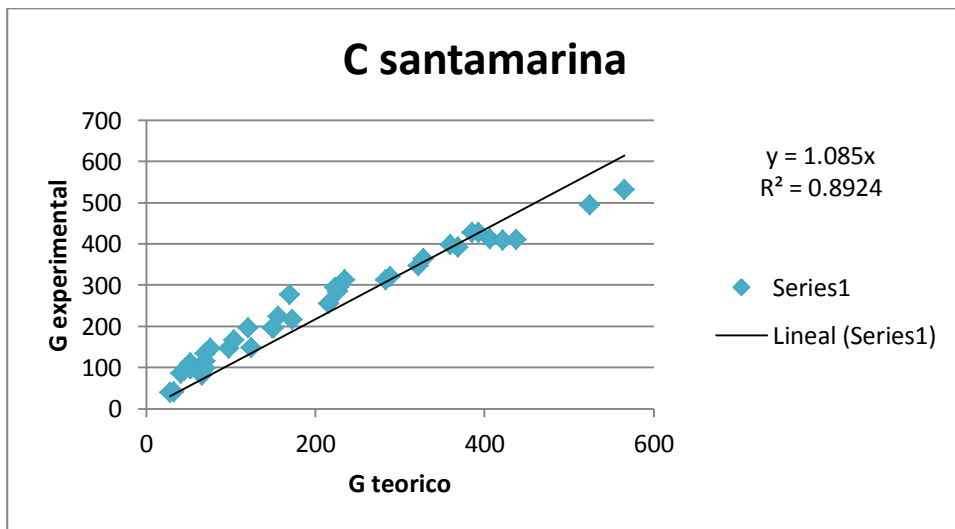


Figura 30 Comparación entre el módulo de rigidez experimental y el módulo de rigidez calculado considerando la microestructura y el factor C a través de la ecuación 3.9 con el planteamiento de relación de vacíos para Santamarina.

Teniendo en cuenta que se consideró la parte microestructural y macroestructural para obtener un planteamiento general del módulo de rigidez, incluyendo en cada parte el esfuerzo efectivo, el grado de saturación efectivo elevado a una potencia dependiente de la relación de vacíos, el módulo de rigidez de la partícula en la microestructura y los parámetros de estructura micro S_m y macro S_M que están asociados al factor **A**, se puede observar que los ajustes han mejorado con respecto a los planteamientos iniciales ya que los factores de

correlación se encuentran entre 0.74 y 0.93 al igual que la pendiente que están en el rango de 1 a 1.1. Eso permite deducir que la inclusión de la microestructura que principalmente lleva implícito el esfuerzo efectivo microestructural si funciona, mejorando la efectividad de la ecuación en gran medida al tomar la ecuación general para la función de densidad.

Por otra parte al incluir el grado de saturación en el parámetro de forma y al considerar una nueva constante llamada **C** también se mejora el ajuste del módulo de rigidez con respecto a la realidad con buenos resultados cercanos pero sin superar la efectividad del análisis inmediatamente anterior.

CONCLUSIONES

Las variables que influyen en la determinación del módulo de corte en suelos saturados son: el esfuerzo efectivo de confinamiento, la densidad del medio y un parámetro de estructura que se asume normalmente constante.

Con el fin de complementar lo anterior, se estudió el efecto del grado de saturación en el esfuerzo efectivo de confinamiento principalmente. Siendo el parámetro de estructura y el esfuerzo efectivo en condición de saturación parcial los motivos de estudio de este trabajo, se ofrecen las siguientes conclusiones:

- Al determinar el parámetro de forma "A" mediante regresiones polinomiales con un grado mayor a 3 en función del grado de saturación, se obtienen resultados aceptables ya que se están despreciando varias características importantes de las muestras.
- Al definir el parámetro de forma "A" mediante una regresión polinómica multivariable, en función del grado de saturación y la relación de vacíos, se obtiene un ajuste muy bueno del módulo de rigidez, relacionado a la complejidad y al grado del polinomio que se usa para hallar dicho parámetro.
- Al usar métodos por regresión para el ajuste de "A" sólo se pueden garantizar los resultados a muestras que tengan una relación de vacíos en el rango de 0.47 a 0.93 ya que fuera de este intervalo no se tiene total certeza del comportamiento del parámetro de forma "A".
- Al modificar el esfuerzo de confinamiento (constante) por una función de esfuerzo efectivo se da paso a considerar un grado de saturación microestructural presente en la determinación del grado de saturación efectivo, y también la succión; con respecto a los resultados, al tener en cuenta estos parámetros tenemos un ajuste bueno y mejor respecto al planteado por regresión lineal, ya que se tienen en cuenta más parámetros característicos de la muestra. Así mismo se puede resaltar que al obtenerse mejoría en los planteamientos se está haciendo un enfoque correcto.

- Basados en la propuesta de Alonso et al (2010) se trabaja el factor del grado de saturación efectivo como una potencia del grado de saturación. De esta forma se obtiene una evolución suave y bien ponderada del grado de esta variable para ser incluida dentro del cálculo de los esfuerzos efectivos. La modificación del parámetro "A" por el parámetro "S" trae consigo la simplificación de la ecuación del parámetro A considerando una nueva constante "C" relacionada al grado de saturación, que al igual que las otras consideraciones mejora el ajuste.
- La inclusión de los parámetros del suelo desde los diferentes puntos de vista (macro, micro y particular) hacen más completa y exacta la interpretación del módulo de rigidez práctico, pues para llegar a éste se genera una dependencia desde el punto de vista particular hasta el punto de vista macro estructural.
- Trabajar con la potencia del grado de saturación efectivo "n" en función de la relación de vacíos de cada prueba genera buenos resultados y además garantiza uno que esté acorde a la prueba a analizar.
- Al trabajar con el factor de rigidez "A" se obtuvieron muy buenos resultados para las tres propuestas de función de densidad en lo que respecta a la similitud de los módulos de rigidez experimental y calculada, la cual es medida por la pendiente de las gráficas. Pero las correlaciones de las tres propuestas son distantes, siendo la propuesta general la que tiene una mejor correlación.
- La introducción del grado de saturación en el factor de rigidez brinda una muy buena similitud general de los resultados del módulo de rigidez. En cuanto a la correlación de estos mismos se tienen datos más semejantes para las tres propuestas, siendo la de Santamarina la que nos arroja los mejores resultados con casi un 90% de correlación.
- Como elección final debido a su excelente correlación entre los datos experimentales y datos calculados tenemos la ecuación 3.8 con función de densidad general, donde se trabaja el parámetro de forma "A" como una constante independiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, E. E. *et al. Géotechnique*. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. Manuscript received 3 January 2008; revised manuscript accepted 7 octover 2009.
- BELÉNDEZ, Tarsicio y BELÉNDEZ Augusto. Física General. Ingeniería Técnica de Obras Públicas. [en línea] <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13739/1/06_ELASTICIDAD_BIB.pdf>
- GROSSMANN, Federico. Universidad del Bío Bío. Propiedades mecánicas de los materiales. [en línea] <http://zeus.dci.ubiobio.cl/~caaici/Apuntes/Materiales/Capitulos%20Libros/Groover/propiedades_mecanicas_de_los_materiales.pdf> [citado en 30 de junio de 2012]
- LEONI, Augusto. Geotecnia III Esfuerzos vibratorios en suelos. [en línea] <<http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g3/Vibraciones.pdf>>
- MERCHÁN, Vladimir E. Small strain stiffness of compacted boom clay from a microstructural viewpoint. En: Small strain stiffness and residual strength behavior of Boom Clay: A microstructural insight. Cataluña, 2011. Tesis de Doctorado (Ingeniería de Terreno). Universidad Politécnica de Cataluña. p 82 y 84.
- SUAREZ, Jaime. *Resistencia al Cortante*. En: Deslizamientos: Análisis Geotécnico.
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. Los Suelos. [en línea] <<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3363/6/36067-6.pdf>> [9 de julio de 2012] p 14

