

**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DEL TENSOR DE
ESFUERZOS Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE
LA FORMACIÓN TAMBOR A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES
ACÚSTICAS**

Luz Carime Valera Lara

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2005

**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DEL TENSOR DE
ESFUERZOS Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MECÁNICOS DE
LA FORMACIÓN TAMBOR A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES
ACÚSTICAS**

Luz Carime Valera Lara

Trabajo de grado para optar por el título de Ing. de Petróleos

DIRECTOR

Zuly Calderón Carrillo, Ph. D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2005**

A mis padres, por su amor y valiosos consejos, quienes hicieron posible que yo viviera esta inolvidable experiencia y ser la profesional que siempre soñaron que fuera.

A mi tío por su apoyo y colaboración, quien hizo posible la consecución de esta meta.

A mi novio, quien con su amor y apoyo, dio alegría y aliento en los momentos difíciles.

Luz Carime

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Jenny Mabel Carvajal Jiménez. Ingeniera de Petróleos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Por su colaboración y asesoría durante el desarrollo de este proyecto.

Néstor Fernando Saavedra Trujillo. Ingeniero de Petróleos y jefe de la unidad de investigación del Instituto Colombiano del Petróleo. Por su apoyo y asesoría, quien hizo posible este proyecto.

Zuly Himelda Calderón Carrillo. Directora de la escuela de Ingeniería de Petróleos. Por su dirección y colaboración en este proyecto.

Jorge Leonardo Galvis Castrellón. Estudiante de Ingeniería Electrónica. Por su valiosa colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION | 1 |
| 1. FUNDAMENTOS TEORICOS..... | 5 |
| 1.1. FUNDAMENTOS SOBRE ONDAS EN CUERPOS ELÁSTICOS | 5 |
| 1.1.1. Concepto de Onda Mecánica..... | 5 |
| 1.1.2. Mecanismos de propagación de una onda | 7 |
| 1.2. FUNDAMENTOS SOBRE TENSORES | 10 |
| 1.2.1. Tensor isotrópico | 10 |
| 1.3. CONCEPTOS BÁSICOS DE ELASTICIDAD | 12 |
| 1.4. RELACIÓN ENTRE LAS ONDAS MECÁNICAS Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ROCAS | 23 |
| 1.4.1. Factores que afectan la propagación de las ondas en el medio poroso | 24 |
| 1.5. CONCEPTO DE ANISOTROPÍA ⁷ | 27 |
| 1.5.1. Relación entre los esfuerzos y las deformaciones para cuerpos anisotrópicos..... | 28 |
| 1.6. PRINCIPIO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES ACÚSTICAS EN ROCAS | 33 |
| 1.7. METODOS ACUSTICOS PARA CARACTERIZAR ANISOTROPIA EN LAS ROCAS Y DETERMINAR LOS MODULOS ELASTICOS | 37 |
| 1.7.1. Método del tri-plug orientado | 38 |
| 1.7.2. Método del single – plug | 44 |
| 2. METODOLOGIA PRIMERA FASE EXPERIMENTAL | 52 |
| 2.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA FORMACIÓN TAMBOR..... | 52 |
| 2.2. MUESTRAS ANALIZADAS..... | 53 |
| 2.2.1. Descripción microscópica de una muestra de afloramiento | 54 |
| 2.2.2. Descripción microscópica de la muestra cilíndrica de la Mesa de los Santos | 56 |
| 2.2.3. Descripción microscópica de la muestra cúbica de la Mesa de los Santos | 59 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.3 | DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA EMPLEADA | 61 |
| 2.3.3. | Procedimiento de medición a condiciones atmosféricas..... | 65 |
| 3. | RESULTADOS Y OBSERVACIONES PRIMERA FASE EXPERIMENTAL..... | 69 |
| 4. | METODOLOGIA SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL..... | 82 |
| 4.2. | MUESTRAS ANALIZADAS..... | 83 |
| 4.1. | DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA EMPLEADA..... | 83 |
| 4.1.1. | Preparación de las muestras | 83 |
| 4.2.2. | Metodología prueba acústica uniaxial..... | 85 |
| 5. | RESULTADOS Y OBSERVACIONES DE LA SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL | 92 |
| 5.1. | COMPARACIÓN ENTRE COMPORTAMIENTO ISOTRÓPICO Y COMPORTAMIENTO ANISOTRÓPICO..... | 109 |
| 5.2. | TENSOR DE ESFUERZOS | 112 |
| 6. | CONCLUSIONES | 116 |
| 7. | RECOMENDACIONES | 119 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 121 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 124 |
| | ANEXOS..... | 129 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Representación de una onda..... | 6 |
| Figura 2. Mecanismos de reflexión y refracción de ondas elásticas | 8 |
| Figura 3. Ilustración del mecanismo de interferencia ³ | 8 |
| Figura 4. Mecanismo de difracción ³ | 9 |
| Figura 5. Mecanismo de polarización ⁵ | 10 |
| Figura 6. Cuerpo sometido a un sistema de fuerzas | 13 |
| Figura 7. Representación de un cuerpo sometido a un campo de esfuerzos | 14 |
| Figura 8. Deformación longitudinal y de cizalladura ⁷ | 16 |
| Figura 9. Deformación longitudinal en la dirección X^7 | 17 |
| Figura 10. Deformación de Cizalladura en la dirección X^7 | 18 |
| Figura 11. Deformación de un cuerpo en la dirección axial ⁷ | 20 |
| Figura 12. Esquema general del equipo utilizado para las mediciones acústicas . | 34 |
| Figura 13. (A) Debe estar dentro de 0.1mm de (B) por cada 20 mm de ancho (C) ¹² | 35 |
| Figura 14. Vista en el osciloscopio para lectura del tiempo de viaje | 36 |
| Figura 15. Método del tri-plug orientado ¹⁵ | 39 |
| Figura 16. Velocidades medidas en el método del tri-plug orientado ¹⁵ | 39 |
| Figura 17. Arreglo de transductores laterales para el método single-plug ¹⁶ | 45 |
| Figura 18. Trayectorias de las velocidades P y S ¹⁷ | 49 |
| Figura 19. Diagrama de flujo de la metodología de la primera fase experimental ⁷ | 52 |
| Figura 20. Distribución del tamaño de grano de las partículas | 55 |
| Figura 21. Composición mineralógica de la muestra analizada ²⁰ | 55 |
| Figura 22. Distribución de tamaños de grano en la muestra analizada ²⁰ | 57 |
| Figura 23. Distribución de las formas de partículas presentes en la muestra ²⁰ | 57 |
| Figura 24. Tipos de contacto entre partículas presentes en la muestra ²⁰ | 58 |
| Figura 25. Composición mineralógica de la muestra ²⁰ | 58 |
| Figura 26. Distribución de los tamaños de grano de las partículas ²⁰ | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 27. Distribución de formas de las partículas ²⁰ | 60 |
| Figura 28. Principales tipos de contacto entre partículas ²⁰ | 60 |
| Figura 29. Composición mineralógica de la muestra analizada ²⁰ | 61 |
| Figura 30. Cristales P y S | 62 |
| Figura 31. Configuración para el montaje de los cristales | 64 |
| Figura 32. Montaje de los cristales en la muestra..... | 65 |
| Figura 33. Montaje experimental a condiciones atmosféricas ²³ | 66 |
| Figura 34. Esquema general de las mediciones realizadas ²² | 67 |
| Figura 35. La onda superior corresponde a las trayectorias 1 y 2 y la inferior corresponde a la tercera trayectoria ²² | 79 |
| Figura 36. Diagrama de flujo de la metodología de la segunda fase experimental ⁷ | 82 |
| Figura 37. Configuración de cristales segunda fase experimental ⁷ | 84 |
| Figura 38. <i>Endcaps</i> para pruebas acústicas ²¹ | 84 |
| Figura 39. Montaje de la roca mas los endcaps de acústica ⁷ | 85 |
| Figura 40. <i>Rock mechanics test system model 815</i> | 86 |
| Figura 41. Marco de carga ²⁴ | 87 |
| Figura 42. Montaje de la muestra con los extensómetros ⁷ | 89 |
| Figura 43. Comportamiento de la velocidad P con respecto a la fuerza axial primer ciclo de carga y descarga ⁷ | 93 |
| Figura 44. Comportamiento de la velocidad P con respecto a la fuerza axial segundo ciclo de carga y descarga ⁷ | 93 |
| Figura 45. Comportamiento de la velocidad S con respecto a la fuerza axial primer ciclo de carga y descarga ⁷ | 95 |
| Figura 46. Comportamiento de la velocidad S con respecto a la fuerza axial segundo ciclo de carga y descarga ⁷ | 96 |
| Figura 47. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Primer ciclo de carga ⁷ | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 48. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Primer ciclo de descarga ⁷ | 98 |
| Figura 49. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Segundo ciclo de carga ⁷ | 98 |
| Figura 50. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Segundo ciclo de descarga ⁷ | 99 |
| Figura 51. Módulo de Young vertical ⁷ | 101 |
| Figura 52. Módulo de Young horizontal ⁷ | 102 |
| Figura 53. Relación módulo de Young horizontal a módulos de Young vertical ⁷ | 103 |
| Figura 54. Relación de Poisson 1 ⁷ | 104 |
| Figura 55. Relación de Poisson 2 ⁷ | 104 |
| Figura 56. Relación de Poisson 3 ⁷ | 105 |
| Figura 57. Comportamiento entre la relación de Poisson 1 y la relación de Poisson 2 ⁷ | 106 |
| Figura 58. Comportamiento entre la relación de Poisson 1 y la relación de Poisson 3 ⁷ | 107 |
| Figura 59. Comportamiento entre la relación de Poisson 2 y la relación de Poisson 3 ⁷ | 107 |
| Figura 60. Comportamiento del módulo volumétrico con respecto a la fuerza axial ⁷ | 108 |
| Figura 61. Modulo de Young anisotrópico vertical como función del modulo de Young isotrópico vertical ⁷ | 110 |
| Figura 62. Modulo de Young anisotrópico horizontal como función del modulo de Young isotrópico horizontal ⁷ | 110 |
| Figura 63. Relación de Poisson anisotrópica como función de la relación de Poisson isotrópica ⁷ | 111 |
| Figura 64. Módulo volumétrico anisotrópico como función del módulo volumétrico isotrópico ⁷ | 111 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Propiedades de las muestras seleccionadas | 54 |
| Tabla 2. Velocidades de onda obtenidas para Tambor 39..... | 69 |
| Tabla 3. Velocidades de onda obtenidas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos | 69 |
| Tabla 4. Velocidades de onda obtenidas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos | 70 |
| Tabla 5. Valores de velocidades y porcentajes de error para las tres muestras ... | 71 |
| Tabla 6. Constantes elásticas para Tambor 39 con los valores de velocidades en la dirección 1..... | 72 |
| Tabla 7. Constantes elásticas para Tambor 39 con los valores de velocidades en la dirección 2..... | 72 |
| Tabla 8. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45a | 73 |
| Tabla 9. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45a | 73 |
| Tabla 10. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45b | 73 |
| Tabla 11. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45b | 73 |
| Tabla 12. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45a | 74 |
| Tabla 13. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45a | 74 |
| Tabla 14. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45b | 74 |
| Tabla 15. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45b | 74 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 16. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 6..... | 75 |
| Tabla 17. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 7..... | 75 |
| Tabla 18. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 8..... | 75 |
| Tabla 19. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 9..... | 75 |
| Tabla 20. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 10..... | 76 |
| Tabla 21. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 11..... | 76 |
| Tabla 22. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 12..... | 76 |
| Tabla 23. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 13..... | 76 |
| Tabla 24. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 14..... | 77 |
| Tabla 25. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 15..... | 77 |
| Tabla 26. Longitud y diámetro de las muestras usadas en las pruebas | 83 |
| Tabla 27. Características marco de carga | 87 |
| Tabla 28. Valores promedios del grado de anisotropía de la onda P y S | 100 |

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera en la mayoría de los casos los diseños de los programas de perforación o de fracturamiento hidráulico requieren del estudio del comportamiento mecánico de las rocas. Para los ingenieros que trabajan en geomecánica es fundamental realizar modelos realizados a partir del estudio del comportamiento mecánico de las formaciones, para ello es indispensable conocer la distribución de esfuerzos en profundidad y por supuesto conocer las propiedades mecanizas de las rocas.

Así para estudiar el comportamiento mecánico de las rocas es indispensable el conocimiento de los parámetros mecánicos elásticos, tales como: el módulo de Young, la relación de Poisson, el módulo de rigidez, el módulo volumétrico y el parámetro de Lamé. Conocer estas propiedades es fundamental en campos de aplicación como son: estudios de arenamiento, tratamientos de fracturamiento hidráulico, diseños de perforación, estudios de subsidencia, predicción del comportamiento del yacimiento, y por supuesto en análisis de estabilidad de pozo.

Hasta ahora, y por cuestiones de simplicidad la determinación de dichas propiedades, como son los parámetros elásticos de la roca tenían en cuenta la elasticidad pero desde un punto de vista estático; sin embargo, se ha observado que las rocas responden a una dinámica y por tanto para el estudio de estas es un factor muy importante.

Existen dos maneras para obtener estas propiedades: una es a partir de mediciones estáticas y la segunda a partir de mediciones dinámicas.

- Las mediciones estáticas consisten básicamente en simular a condiciones de laboratorio las condiciones de esfuerzo in situ a las cuales está sometida una roca en profundidad, para ello existen pruebas diseñadas para este fin y de las cuales se obtienen datos de deformación y esfuerzo. A partir de estos datos son determinadas las propiedades mecánicas. Sin embargo estas pruebas presentan la gran desventaja que las muestras de estudio son destruidas.
- Las mediciones dinámicas se basan en conocer las propiedades mecánicas elásticas a partir de la medición de velocidades acústicas en muestras de roca.

Las mediciones dinámicas resultan de estudios recientes que demuestran que cuando a una roca se le aplica una perturbación, esta se propaga a través del medio de forma similar una onda acústica, dicho comportamiento es el que ha motivado a muchos investigadores a estudiar la acústica de las rocas, como el medio que les permite establecer una relación entre las velocidades acústicas y la determinación de las propiedades mecánicas de la roca desde un punto de vista dinámico. Basados en este comportamiento acústico, se han podido realizar investigaciones en la rama de la geomecánica, que han permitido establecer relaciones entre el comportamiento elástico de las rocas y las velocidades sónicas.

La principal ventaja de estudiar el comportamiento dinámico del medio poroso es describir las propiedades mecánicas del mismo sin la necesidad de destruir la muestra de estudio, como si es el caso de las mediciones estáticas; esto hace de las mediciones dinámicas un tema bastante atractivo para ser aplicado en los estudios geomecánicos.

Debido a esto el estudio del comportamiento de la propagación de las velocidades acústicas en medios porosos, es un tema de gran interés, además de ser un tema relativamente nuevo, con muchos tópicos aun por explorar.

Sin embargo, este tema es bastante amplio y quizás un tanto complejo, debido a la cantidad de factores que deben ser tenidos en cuenta y juegan un papel primordial en la propagación de las velocidades. Entre los factores más importantes se tienen, la presión, temperatura, grado de saturación, tipo de litología, porosidad, anisotropía de la muestra, siendo este último el tema que presenta mayor grado de complejidad.

La importancia de tener en cuenta estos factores en el estudio de las velocidades acústicas, radica en que siempre se busca obtener resultados que representen las condiciones originales a las que se encuentra la muestra, es decir tratar de reproducir en laboratorio las condiciones *in situ* a las que se encontraba sometida la roca, y de esta manera obtener resultados los más acordes a la realidad.

Como ha sido mencionado un factor fundamental en el estudio del comportamiento mecánico de las rocas es el efecto de la anisotropía por tanto una ventaja importante de las mediciones dinámicas es que permite analizar este factor mediante la medición de velocidades para diferentes direcciones de propagación, de esta manera se pueden observar los cambios en velocidad y por tanto en las propiedades que sufre una muestra de roca acorde a la dirección en la que se realiza la propagación de la onda.

En los cálculos sobre elasticidad de las rocas, la anisotropía a menudo no es tenida en cuenta. La razón de realizar tal simplificación es por cuestiones de necesidad y comodidad, ya que una descripción anisotrópica requiere demasiada información que en la mayoría de los casos no es disponible. Sin embargo, hacer caso omiso del comportamiento anisotrópico en muchos casos lleva a errores que arruinarían los resultados.

Debido a esta situación, actualmente los investigadores han buscado la manera de describir con mayor precisión el comportamiento de las rocas, de ahí que el

concepto de anisotropía se ha venido introduciendo en los últimos estudios sobre mecánica de rocas.

Basados en la importancia de las mediciones acústicas como aplicación en el área de la mecánica de rocas se han iniciado los estudios para realizar la implementación de esta metodología de estudio en formaciones colombianas. En este orden de ideas este trabajo de grado muestra la aplicación preliminar de métodos acústicos para estudiar anisotropía aplicado a la formación Tambor.

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1. FUNDAMENTOS SOBRE ONDAS EN CUERPOS ELÁSTICOS

1.1.1. Concepto de Onda Mecánica

Una onda es definida como una perturbación en el medio y la cual se propaga de un punto hacia otro, transportando energía y cantidad de movimiento pero no materia.¹

De manera formal las ondas mecánicas son aquellas que viajan de un lugar a otro a través de un medio material, generando una perturbación temporal en el medio, sin que el medio a su vez se transporte de un lugar a otro; como ejemplo se tienen el sonido, las ondas del agua.²

Teniendo en cuenta que una onda mecánica se define como la propagación de una perturbación o disturbio en un medio elástico se ha observado que cuando una roca es sometida a un esfuerzo ésta sufre una deformación a causa del mismo. Considerando que las rocas se comportan como un medio elástico, varios estudios sobre este comportamiento, han demostrado que el esfuerzo aplicado sobre ella causa una perturbación (deformación), la cual se propaga a lo largo de toda la muestra como si fuera una onda acústica, esto es conocido como el comportamiento acústico de las rocas.

¹ Referenciado en <http://www.monografias.com/trabajos16/onda/onda.shtml>.

² Referenciado en www.uia.mx/ibero/noticias/publica/fisica/pdf/14ONDASmecanicas.pdf

Las ondas mecánicas pueden ser ondas de cuerpo u ondas de frontera. Las ondas de cuerpo son aquellas que se propagan en medios sin límites; y las ondas de frontera son las que se propagan en medios con límites.

De las ondas de cuerpo se conocen dos clases de onda, estas son, las ondas compresionales u ondas P (primarias) y las ondas de corte u ondas S (secundarias). En el caso de las ondas P, las partículas se mueven en la dirección de propagación de la onda y para las ondas S, las partículas se mueven en dirección perpendicular a la propagación de la onda.

La propagación de una onda es expresada matemáticamente de la siguiente manera:

$$\sigma = A \cos 2\pi[(ft - x/\lambda)] \quad (1)$$

Donde A es la amplitud de onda, λ es la longitud de onda, f es la frecuencia, t es el tiempo y x es la distancia recorrida por la onda y σ es el esfuerzo aplicado. Ver figura 1,

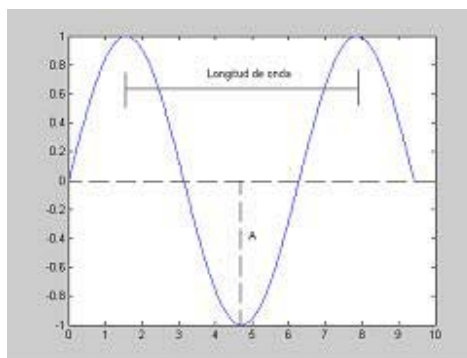


Figura 1. Representación de una onda³

³ Referenciado en Valera Lara, Luz Carime: “Fundamentos sobre las propiedades acústicas de las rocas”, Informe de avance No 2. Grupo Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP

Cuando una onda se propaga en un medio, con cierta velocidad, la cual depende de la longitud de onda y la frecuencia, esta puede ser expresada matemáticamente de la siguiente manera:

$$v = \lambda f \quad (2)$$

1.1.2. Mecanismos de propagación de una onda

En la práctica, durante la propagación de las ondas se deben considerar los límites entre los medios en los que se propaga una onda, ya que son los efectos límite los que generan los cambios en la amplitud, fase y dirección de propagación. Los principales mecanismos son la reflexión, la refracción, interferencia, difracción y la polarización.

- *Reflexión y refracción*

Cuando una onda que se propaga en un medio 1 a una velocidad v_1 , incide sobre un plano que separa el medio 1 del medio 2 con un ángulo θ_i . Al incidir la onda sobre el plano el resultado es que se generan dos nuevas ondas, cada una con la misma frecuencia de la onda incidente.

Para el caso de la primera onda que se genera, la onda incidente genera una nueva onda que regresa al mismo medio de la onda incidente, formando un ángulo θ_r con la superficie normal, y esta es llamada la onda reflejada (ver Fig. 2).

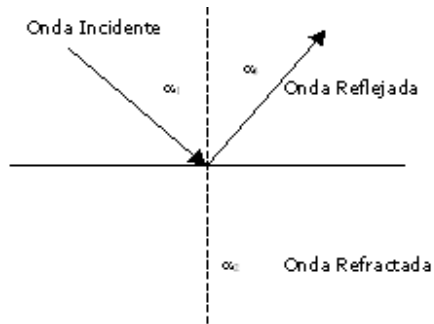


Figura 2. Mecanismos de reflexión y refracción de ondas elásticas⁴

En el segundo caso, la onda incidente produce una nueva onda que se propaga en otro medio (medio 2), formando un ángulo de refracción θ_t a la superficie normal (ver Fig. 2).

- *Interferencia*

Otro mecanismo de propagación es la interferencia, la cual se presenta cuando en un mismo punto del espacio ocurren simultáneamente dos o más perturbaciones, ejemplo, el ruido. Ver figura 3:

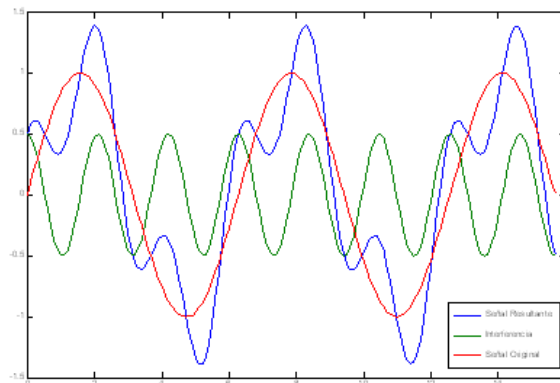


Figura 3. Ilustración del mecanismo de interferencia³

⁴ Referenciado en “Theory, measurement and interpretation of well logs: Acoustic properties of rocks”

- *Difracción*

La difracción se presenta cuando un movimiento ondulatorio encuentra un obstáculo cuyas dimensiones son del mismo orden que su longitud de onda. Ejemplo, cuando la onda generada es transmitida a través de la roca, el medio poroso puede generar difracción. Ver ilustración en la figura 4:

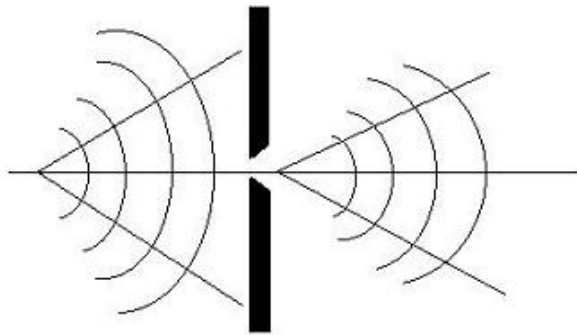


Figura 4. Mecanismo de difracción³

- *Polarización*

Por último la polarización se presenta cuando en las ondas transversales es posible que todas las partículas alcanzadas por la onda vibren en la misma dirección, entonces se dice que la onda está polarizada y se llama plano de polarización al plano formado por la dirección de la vibración y la dirección de propagación. Ver Figura 5.⁵

⁵ Referenciado en <http://www.educastur.princast.es/proyectojimena/franciscga/propiond.htm#Polarizaci%F3n>

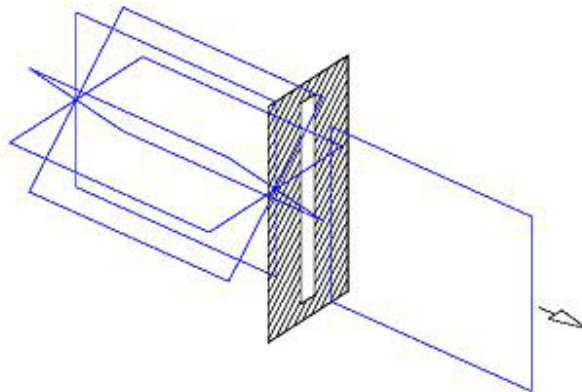


Figura 5. Mecanismo de polarización⁵

1.2. FUNDAMENTOS SOBRE TENSORES⁶

Para entender el concepto de tensores en primera instancia se definirá un vector como un segmento de línea o cantidad que presenta magnitud, dirección y sentido, lo cual lo hace diferente de un escalar el cual solo representa a una magnitud.

De esta manera un tensor es definido como una función escalar compuesta por n vectores variables.

1.2.1. Tensor isotrópico

Se dice que un tensor es isotrópico cuando sus componentes dadas con respecto a un sistema de ejes coordenados no varía cuando el sistema es rotado.

- *Tensor isotrópico de primer orden*

⁶ Referenciado en el Curso de la Universidad de Texas Austin, Lectura 1.

Sea \vec{A} un vector con componentes a_1, a_2, a_3 con respecto a un sistema de ejes cartesiano x_1, x_2, x_3 con bases* $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$; si el sistema coordenado es rotado al sistema x'_1, x'_2, x'_3 con bases $\hat{x}'_1, \hat{x}'_2, \hat{x}'_3$ entonces las nuevas componentes del vector \vec{A} serán a'_1, a'_2, a'_3 . De esta manera el vector \vec{A} puede ser expresado como:

$$\vec{A} = a_i \hat{x}_i = a'_i \hat{x}'_i \quad (3)$$

Para que se cumpla la condición de isotropía se debe cumplir que $a_i = a'_i$, para que ello se satisfaga no debe existir rotación o que $a_i = a'_i$ sea igual a cero. Entonces de esta manera se concluye que el tensor de primer orden es el vector nulo, para el caso que exista isotropía.

- *Tensor isotrópico de segundo orden*

Tal como en el caso anterior, si se tiene un vector \vec{A} , este se puede escribir como:

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \vec{A} : \hat{x}^i \hat{x}^j \\ A'_{ij} &= \vec{A} : \hat{x}'^i \hat{x}'^j \end{aligned} \quad (4)$$

De manera similar como en el caso anterior para que el vector \vec{A} sea isotrópico, $A_{ij} = A'_{ij}$, por tanto \vec{A} debe ser igual a $\hat{x}_i \hat{x}_j = \hat{x}'_i \hat{x}'_j$; puesto que el producto de $x_i \cdot x^j = \delta_{ij}$ y esto es igual a uno si y solo si i es igual a j , de manera que el tensor de segundo orden corresponde al tensor identidad con componentes δ_{ij} .

- *Tensor isotrópico de tercer orden*

* Una base se puede definir como los elementos primarios a partir de los cuales se puede generar cualquier vector en el espacio dado.

Un tensor de tercer orden puede ser obtenido a partir de la combinación de tensores de primer y segundo orden, el cual es un tensor con componentes iguales a cero.

- *Tensor isotrópico de cuarto orden*

El tensor de cuarto orden puede ser generado a partir de la combinación de tensores de segundo orden. Puesto que el tensor de segundo orden es simétrico, entonces las combinaciones posibles para dos tensores identidad son: $\delta_{ij}, \delta_{kl}, \delta_{ik}, \delta_{jl}, \delta_{il}, \delta_{jk}$, a partir de estas combinaciones es posible generar tres tensores de cuarto orden:

$$\begin{aligned} m_{ijkl} &= \delta_{ij} \delta_{kl} \\ n_{ijkl} &= \delta_{ik} \delta_{jl} \\ p_{ijkl} &= \delta_{il} \delta_{jk} \end{aligned} \quad (5)$$

Así un tensor de cuarto orden resulta de la combinación de estos tres tensores de la siguiente manera:

$$C_{ijkl} = a\delta_{ij}\delta_{kl} + b\delta_{ik}\delta_{jl} + c\delta_{il}\delta_{jk} \quad (6)$$

1.3. CONCEPTOS BÁSICOS DE ELASTICIDAD

La elasticidad hace referencia a la relación entre las fuerzas aplicadas a un cuerpo y a los cambios que este sufre en su tamaño y forma.

Así, cuando un cuerpo es sometido a un sistema de fuerzas tal como se muestra en la figura:

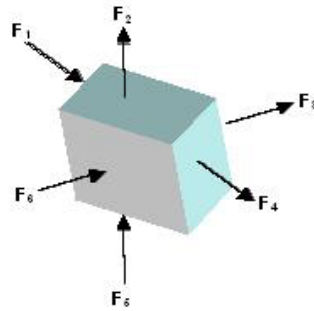


Figura 6. Cuerpo sometido a un sistema de fuerzas⁷

El esfuerzo en un punto es definido como la fuerza que actúa sobre un área determinada de un cuerpo. La expresión que define al esfuerzo es:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

donde σ es el esfuerzo en Pa para el sistema internacional (SI) o Psi en el sistema inglés, F es la fuerza aplicada en kN y A es el área en m².

Si se retoma nuevamente el elemento de volumen el cual es sometido a un campo de esfuerzos en un punto, este campo de esfuerzos puede ser expresado como un tensor.

⁷ Referenciado en Valera Lara, Luz Carime: “Desarrollo metodológico para la obtención del tensor de esfuerzos y determinación de los parámetros mecánicos de la formación Tambor a partir de la medición de velocidades acústicas”. Bucaramanga, 2005.

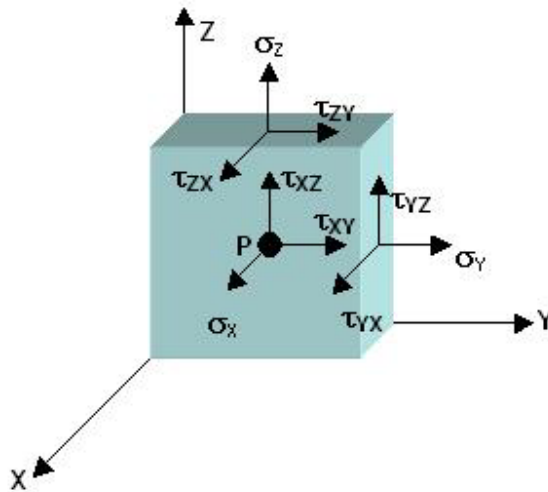


Figura 7. Representación de un cuerpo sometido a un campo de esfuerzos⁸

Tal como se observa en la figura 7 un punto dentro de un volumen sobre el que se aplica una fuerza o un esfuerzo puede ser descompuesto en varias componentes de esfuerzos. Por ejemplo, para el caso del plano XZ, habrá un esfuerzo normal a la superficie el cual se ha denotado como σ_y y sobre el plano se generan dos esfuerzos de cizalladura, τ_{yx} y τ_{yz} , los cuales corresponden a los esfuerzos de cizalladura sobre la superficie normal al eje Y ocasionados por las fuerzas en la dirección X y en la dirección Z, respectivamente. De manera análoga se tienen las otras componentes.

Definiendo como esfuerzo normal aquel que es perpendicular al plano y como esfuerzo de cizalladura aquel que es paralelo a él.⁸

De esta manera se tendrían tres vectores de componentes para cada plano, así:

$$\sigma_{yz} = (\sigma_x \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz}) \quad (8)$$

$$\sigma_{xz} = (\tau_{yx} \quad \sigma_y \quad \tau_{yz}) \quad (9)$$

$$\sigma_{xy} = (\tau_{zx} \quad \tau_{zy} \quad \sigma_z) \quad (10)$$

⁸ Referenciado en Osorio Gallego, José Gildardo, Ph. D. : Aspectos Geomecánicos de la Estabilidad de Pozos.

Agrupando los tres vectores asociados a cada plano se obtiene el tensor de esfuerzos asociado al punto P:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \sigma_Z \end{bmatrix} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta el concepto de simetría y para garantizar que no existe movimiento rotacional se tiene que:

$$\begin{aligned} \tau_{XY} &= \tau_{YX} \\ \tau_{XZ} &= \tau_{ZX} \\ \tau_{YZ} &= \tau_{ZY} \end{aligned} \quad (12)$$

Acorde a lo anterior, el tensor de esfuerzos queda expresado como:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ 0 & \sigma_Y & \tau_{YZ} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Como ya ha sido mencionado el esfuerzo aplicado sobre un cuerpo causa un cambio en la forma y el tamaño, este cambio es lo que se conoce como deformación. La deformación es debida al desplazamiento o al cambio angular entre dos puntos del cuerpo.

La deformación de un cuerpo puede ser longitudinal, si ocurre una elongación o deformación de cizalladura si existe un cambio angular. Ver figura 8.

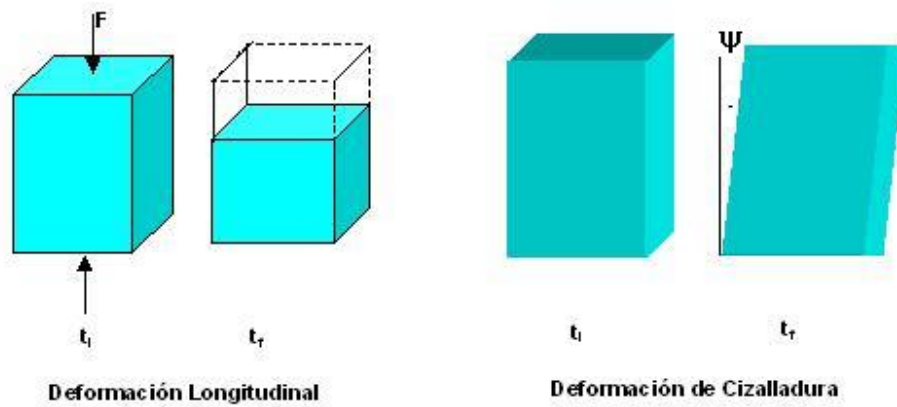


Figura 8. Deformación longitudinal y de cizalladura⁷

La deformación longitudinal está definida como:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (14)$$

Donde ε es la deformación y l es la longitud, los subíndices i y f hacen referencia a inicial y final respectivamente.

La deformación de cizalladura es definida matemáticamente como:

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan \psi \quad (15)$$

Donde ψ representa la deformación de cizalladura y γ representa el ángulo de rotación del cuerpo.

De la misma manera que en el caso de los esfuerzos también existe un tensor de deformaciones, para su formulación primero que todo se asumirá un elemento de volumen sobre el cual se aplica una fuerza en el plano perpendicular al eje X:

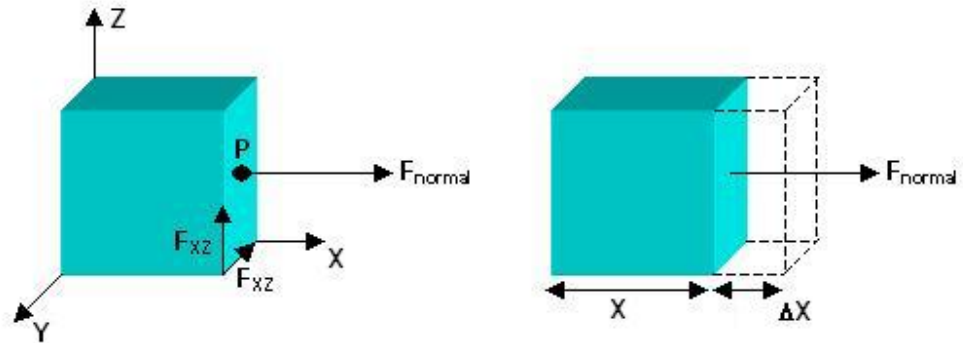


Figura 9. Deformación longitudinal en la dirección X⁷

Teniendo en cuenta la figura 9 se tiene que la deformación longitudinal en la dirección X es:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i}$$

$$\varepsilon_x = \frac{X + \Delta X - X}{X} \quad (16)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X}$$

A si mismo como se expresó la deformación longitudinal se debe proceder de la misma manera con la deformación de cizalladura:

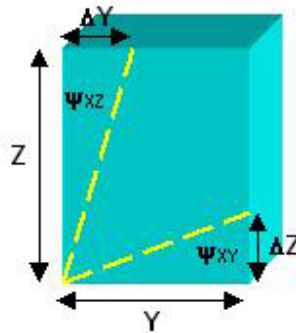


Figura 10. Deformación de Cizalladura en la dirección X⁷

Según la figura 10, la deformación de cizalladura es expresada como:

$$\tan \psi_{XZ} = \frac{\Delta Y}{Z} \quad \tan \psi_{XY} = \frac{\Delta Z}{Y} \quad (17)$$

Así la deformación en el plano X está dada de la siguiente manera:

$$\gamma_{YZ} = \gamma_{ZY} = \frac{1}{2} (\tan \psi_{XZ} + \tan \psi_{XY}) \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta Y}{Z} + \frac{\Delta Z}{Y} \right) \quad (18)$$

De esta manera quedan especificadas ambas deformaciones en la dirección del eje X. De forma análoga quedan especificadas el resto de deformaciones en las otras dos direcciones.

Para el caso del eje Y, las deformaciones longitudinales y de cizalladura están dadas por:

$$\varepsilon_Y = \frac{\Delta Y}{Y} \quad (19)$$

$$\gamma_{XZ} = \gamma_{ZX} = \frac{1}{2} (\tan \psi_{YX} + \tan \psi_{YZ}) \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X}{Z} + \frac{\Delta Z}{X} \right) \quad (20)$$

Para el plano perpendicular al eje Z, se tiene que:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z} \quad (21)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2}(\tan \psi_{zx} + \tan \psi_{zy}) \cong \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta X}{Y} + \frac{\Delta Y}{X}\right) \quad (22)$$

Estas deformaciones longitudinales y de cizalladura para cada plano perpendicular a cada eje representan las componentes del tensor de deformaciones ⁴:

$$\bar{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ 0 & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (23)$$

Hasta el momento se han explicado los conceptos de esfuerzo y deformación con las ecuaciones matemáticas que describen estos conceptos; sin embargo, las relaciones entre ellos aun no han sido definidas, para ello se hace necesario establecer las propiedades específicas de los materiales, las cuales se conocen como propiedades mecánicas.

Para definir las propiedades mecánicas que determinan las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones, se deben establecer ciertas suposiciones, como son que el cuerpo es homogéneo, isotrópico y elástico; donde la palabra homogéneo hace referencia a que el cuerpo posee en cada porción las mismas propiedades físicas; se dice que es isotrópico si posee las mismas propiedades

físicas en todas las direcciones y por elástico se entiende que el cuerpo recobra sus dimensiones iniciales cuando este es sometido a una fuerza externa.⁹

Para empezar se considera un elemento de longitud L y área seccional A , tal como se muestra en la figura 11:

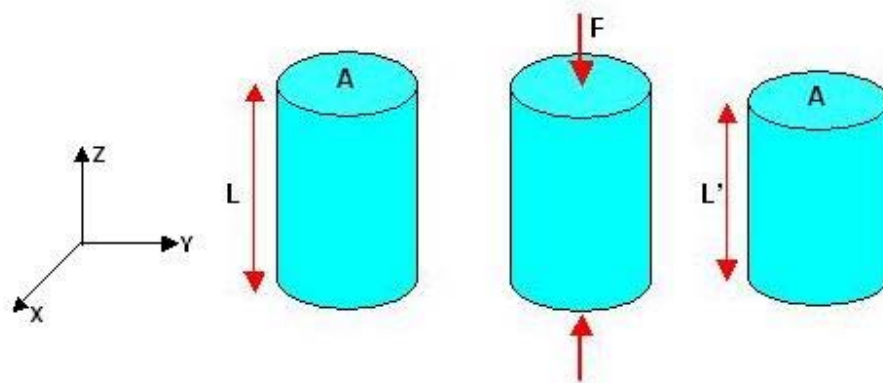


Figura 11. Deformación de un cuerpo en la dirección axial⁷

Al cuerpo mostrado en la figura 11 se le aplica una fuerza sobre el área seccional, la fuerza aplicada implica que la longitud de la muestra se ve reducida a L' . El esfuerzo aplicado está definido por:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \quad (24)$$

La deformación que sufre el material se expresa como:

$$\varepsilon_z = \frac{L - L'}{L} \quad (25)$$

⁹ Referenciado en el Curso de Ingeniería Estructural I, Universidad Nacional de Colombia programa universidad virtual: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/index.html>

Suponiendo que el cuerpo se comporta linealmente, entonces la ley de Hooke dice que la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado, estableciendo una relación entre el esfuerzo y la deformación:

$$\sigma_z = E\varepsilon_z \quad (26)$$

Donde la variable E se conoce como el módulo de Young, este parámetro representa cuanto es la deformación de un cuerpo en la dirección de aplicación del esfuerzo, para la mayoría de las rocas el valor del modulo de Young se encuentra en el orden de 10^{10} hasta 10^{11} Pa.

Tal como se observa en la figura 11, cuando se aplica el esfuerzo sobre el cuerpo no solo existe una reducción de la longitud de este sino que además sufre un alargamiento en la dirección diametral, esta elongación lateral puede ser expresada como:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x = \frac{D_i - D_f}{D_i} \quad (27)$$

Donde D_i y D_f corresponden al diámetro inicial y diámetro final de la muestra respectivamente. La relación entre la deformación lateral y la deformación longitudinal se conoce como la relación de Poisson:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (28)$$

El signo negativo se debe a que la deformación lateral se hace negativa debido a que el diámetro inicial es menor que el diámetro final y por tanto la relación de Poisson debe ser multiplicada por un menos uno, para evitar obtener un valor

negativo. Para las rocas la relación de Poisson puede tomar valores desde 0.05 hasta 0.40, promediando aproximadamente a 0.25 para rocas sedimentarias.

Además del módulo de Young y la relación de Poisson existen otros módulos elásticos son el parámetro de Lamé, el módulo de corte y el módulo volumétrico. El módulo de corte G describe la relación entre el esfuerzo de corte y la deformación de corte y por lo general su valor es desde un tercio hasta un medio del valor de E .

El módulo volumétrico K es definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación volumétrica cuando un cuerpo es sometido a un esfuerzo compresivo uniforme, de la siguiente manera:

$$K = \frac{\sigma}{\varepsilon_v} \quad (29)$$

Para materiales isotrópicos las relaciones generales entre esfuerzos y deformaciones se describen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\lambda + 2G)\varepsilon_x + \lambda\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_z \\ \sigma_y &= \lambda\varepsilon_x + (\lambda + 2G)\varepsilon_y + \lambda\varepsilon_z \\ \sigma_z &= \lambda\varepsilon_x + \lambda\varepsilon_y + (\lambda + 2G)\varepsilon_z \\ \tau_{xy} &= 2G\Gamma_{xy} \\ \tau_{xz} &= 2G\Gamma_{xz} \\ \tau_{yz} &= 2G\Gamma_{yz} \end{aligned} \quad (30)$$

Donde λ representa al parámetro de Lamé, G al módulo de corte o de rigidez, σ el esfuerzo normal o principal, ε la deformación, τ el esfuerzo de corte y Γ la deformación de corte¹⁰.

1.4. RELACIÓN ENTRE LAS ONDAS MECÁNICAS Y EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ROCAS⁴

Como ya se ha mencionado anteriormente las ondas mecánicas se definen como la propagación de una perturbación a través de un medio elástico. Ahora bien, cuando se habla del comportamiento mecánico de las rocas se hace referencia a la respuesta de ésta cuando es sometida a un campo de esfuerzos.

En este orden de ideas, las rocas pueden ser consideradas como un medio elástico siempre y cuando se presenten cambios pequeños de esfuerzos, donde el esfuerzo al que es sometida la roca se propaga a través de todo el medio como una perturbación; es decir, en forma de onda mecánica.

Acorde a esta respuestas presentada en las rocas cuando son sometidas a un campo de esfuerzos, se considera que los medios porosos presentan un comportamiento acústico y por tanto el comportamiento mecánico de ellas puede estar relacionado a velocidad de las ondas propagadas en el medio.

Para un medio isotrópico, completamente homogéneo y elástico lineal, los módulos elásticos pueden ser expresados en términos de las velocidades de onda P y S sin importar cual sea su dirección de propagación de la siguiente manera:

¹⁰ Referenciado en Erling Fjaer, Rune M. Holt and Rasmus Risnes: "Petroleum related rock mechanics". Elsevier, Amsterdam – London – New York – Tokyo. 1992. p 18 – 21.

$$\begin{aligned}
E &= \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2} \\
\nu &= \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \\
K &= \rho V_P^2 - \frac{4}{3} \rho V_S^2 \quad (31) \\
G &= \rho V_S^2 \\
\lambda &= \rho V_P^2 - 2\rho V_S^2
\end{aligned}$$

ρ es la densidad en kg/m^3 , V_P y V_S son las velocidades de onda P y S en m/s respectivamente, E , K , G y λ son los módulos elásticos en Pa (o en Psi) exceptuando a la relación de Poisson ν la cual es adimensional.

1.4.1. Factores que afectan la propagación de las ondas en el medio poroso

- *Efecto de la porosidad y el contenido de arcilla*

Existe una gran dependencia entre las velocidades de onda y la porosidad, ya que a mayor porosidad, entonces mayor cantidad de espacio vacío o espacio para albergar fluidos que disminuyen la velocidad de las ondas debido a que esto se comporta como focos de atenuación, además que el camino que recorrerán las ondas se volverá más tortuoso.

Una de las principales relaciones de las velocidades acústicas con los parámetros de la formación, es la de la porosidad con el tiempo de tránsito promedio. Esta ecuación fue obtenida por Wyllie *et al* (1958)¹¹ y el modelo consiste de un sistema estratificado de rebanadas paralelas alternadas sólido – líquido y las cuales son cruzadas por una onda perpendicular a las interfases. Sin embargo, el modelo de Wyllie *et al* (1958) tienen sus limitaciones, ya que está basado en un esquema

¹¹ Referenciado en Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, G.H.F., 1958: "An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media". *Geophysics*, 23. p. 459–493.

físico muy ideal, para ellos las velocidades de onda se ven influenciadas solamente por las propiedades de la matriz y el fluido, esto sólo se ajusta a arenas limpias, y bien consolidadas.

Por otro lado, el contenido de arcilla también afecta las velocidades, a mayor cantidad de arcilla las velocidades acústicas se ven disminuidas, es así como existen expresiones que relacionan las velocidades con el contenido de arcilla.

- *Anisotropía de esfuerzos y velocidades inducidas por fracturas*

Las rocas fracturadas son bastante sensibles a los esfuerzos y presión de sobrecarga, y sufren altos incrementos en las velocidades causadas por el cierre de fracturas y el poco espacio entre granos. Cuando las fracturas están distribuidas aleatoriamente y se aplican esfuerzos iguales en todas las direcciones, los incrementos en velocidades son isotrópicos, en caso contrario son rocas que presentan anisotropía de onda elástica. Las velocidades de onda compresionales y de corte cambian con la dirección acorde al nivel de esfuerzos.

- *Efecto de la presión y el grado de saturación*

Para comprender el comportamiento de las velocidades con la presión se debe revisar la influencia de los diferentes tipos de presión a los que puede estar sometida una roca. Estas presiones son: la presión efectiva, la presión de confinamiento y la presión de poro.

Presión Efectiva: se considera la presión efectiva como la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro. Para estudiar el efecto de esta presión sobre las velocidades se debe tener presente ciertos aspectos como son el grado de saturación de la muestra y el tipo de roca que se está estudiando. Sin embargo, de manera general cuando se presenta un incremento en la presión

efectiva, ocurre un incremento en las velocidades y esto se debe al cierre de microfracturas, lo cual es reflejado en un mayor módulo de rigidez en la roca.

Como ha sido observado en múltiples estudios, la respuesta en el incremento de la velocidad con el aumento de la presión efectiva, es más leve en una roca saturada que en una seca, debido a que una roca seca es menos rígida que una saturada.

Presión de poro y presión de confinamiento: se sabe que el principal parámetro que rige el aumento en la velocidad es la presión efectiva; sin embargo, esta es función de la presión de confinamiento y de la presión de poro, por tanto estas también ejercen influencia en las velocidades acústicas.

De acuerdo a la definición de presión efectiva y su influencia sobre las velocidades, entonces a mayor diferencia, mayor aumento en las velocidades; quiere decir esto que a una presión de confinamiento dada, la velocidad es mayor para una presión de poro baja en comparación a un valor alto.

En general en la literatura se pueden encontrar pruebas y análisis de resultados que muestran como se incrementan las velocidades con el aumento en la presión aplicada sobre la roca, y estos a su vez muestran un mayor incremento para bajas presiones que para presiones altas, esto debido al cierre de microfracturas y al aumento del área de contacto grano a grano, lo cual es un comportamiento normal en rocas consideradas como cuerpos elásticos.

Las velocidades a su vez también dependen de la saturación de las muestras, de la presión de confinamiento y de la presión de poro. Para rocas secas las velocidades de onda se incrementan si se tienen altas presiones de sobrecarga. Cuando la muestra se encuentra saturada a la presión del sitio, se nota un incremento en la velocidad de onda compresional, sin ningún cambio o muy

pequeño en la velocidad de onda de corte, ya que las velocidades de corte tienden a no propagarse en fluidos.

- *Efecto del fluido poroso*

Las investigaciones han mostrado que las velocidades acústicas están relacionadas con el tipo de fluido poroso. Además, otros factores como el módulo volumétrico, la viscosidad, y el efecto químico del fluido sobre la superficie de los granos, pueden ejercer influencia sobre las velocidades en la roca. La saturación de líquidos incrementa las velocidades de onda compresionales, el incremento es principalmente dependiente del módulo volumétrico del fluido poroso.

- *Efecto de la temperatura*

Las altas temperaturas afectan el comportamiento y principalmente las propiedades de las rocas; Muchos estudios han mostrado que las velocidades acústicas disminuyen con el incremento en la temperatura, siendo más pronunciado este efecto a bajas presiones.

Estos estudios consistieron en estudiar la variación de las velocidades de onda en arenas secas y saturadas con la presión y la temperatura; los resultados mostraron que las ondas compresionales decrecen con el incremento en la temperatura, siendo mayor la disminución para arenas saturadas que para arenas secas. Un punto importante es que la temperatura genera un incremento suave en la porosidad de la roca y por tanto las velocidades acústicas decrecen. Otra posible razón es que las altas temperaturas pueden causar cambios en la estructura de la roca lo cual causa el decrecimiento en la velocidad.

1.5. CONCEPTO DE ANISOTROPÍA¹⁰

Se dice que un material es anisotrópico cuando su respuesta elástica no es independiente de la orientación del material para un estado de esfuerzos dado; es decir, la respuesta depende de la trayectoria en la que se propaga el esfuerzo.

En general el origen de la anisotropía son las heterogeneidades presentes en el volumen de investigación, las cuales en su mayoría son más pequeña que la muestra bajo estudio. Entre las heterogeneidades más comunes se tienen secuencias estratificadas de diferentes tipos de roca, las variaciones temporales en el flujo de fluidos causarían microestratificaciones alternadas en la distribución del tamaño de grano (fino-grueso).

Así los módulos elásticos de las rocas obtenidos bajo estas condiciones son anisotrópicos, puesto que las propiedades elásticas son diferentes según la dirección. Sin embargo, existe una excepción con el módulo volumétrico K cuando el esfuerzo hidrostático y la deformación volumétrica no cambian con la orientación, en este caso K es un parámetro invariante.

De acuerdo a su origen la anisotropía puede ser clasificada como:

- Anisotropía intrínseca, cuyo origen es de tipo litológico.
- Anisotropía inducida, la cual es debido a los esfuerzos externos.

1.5.1. Relación entre los esfuerzos y las deformaciones para cuerpos anisotrópicos

Para un material anisotrópico, cada componente de esfuerzo está linealmente relacionada a una componente de deformación por medio de diferentes coeficientes independientes. Matemáticamente esto es expresado de la siguiente manera:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (32)$$

Donde C_{ijkl} son constantes elásticas. Los índices i,j,k,l sólo pueden tomar los valores 1,2 o 3 y de acuerdo a esto se tendrían en total 81 constantes elásticas.

Algunas de estas constantes son diferentes y otras por cuestiones de simetría son iguales. Uno de estos casos de simetría es:

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk} \quad (33)$$

Este intercambio de índice no cambia el valor de la constante. Ahora bien, teniendo en cuenta consideraciones de energía, se cumple que:

$$C_{ijkl} = C_{klij} \quad (34)$$

Teniendo en cuenta los dos puntos anteriores, el número de constantes se reduce a 21.

Otro punto para tener en cuenta es que las rocas normalmente poseen simetría ortorrómbica, lo cual implica que ésta posee tres planos mutuamente perpendiculares. Asumiendo que los planos de simetría son perpendiculares a los ejes coordenados x , y , y z , de las ecuaciones 32 y 33 se deduce que:

$$\sigma_{11} = C_{1111}\varepsilon_{11} + C_{1122}\varepsilon_{22} + C_{1133}\varepsilon_{33} + 2C_{1112}\varepsilon_{12} + 2C_{1113}\varepsilon_{13} + 2C_{1123}\varepsilon_{23} \quad (35)$$

Ahora si se definiera un nuevo sistema coordenado como $x'=x$, $y'=y$, $z'=-z$. En este nuevo sistema de las componentes de deformación cambian de signo, es decir, $\varepsilon'_{13} = -\varepsilon_{13}$ y $\varepsilon'_{23} = -\varepsilon_{23}$. Esto implica que:

$$C_{1113} = C_{1123} = 0 \quad (36)$$

Aplicando este mismo punto al resto de componentes de esfuerzo y sobre otras orientaciones del sistema coordinado, el número de constante se reduce a nueve; las cuales son: $C_{1111}, C_{2222}, C_{3333}, C_{1122}, C_{1133}, C_{2233}, C_{2323}, C_{1313}$ y C_{1212} .

Por cuestiones de simplicidad, las constantes C_{ijkl} se manejan solo con dos índices, I y J , esto es llamado notación Voight, de ésta manera los índices están relacionados así:

$$11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \rightarrow 4, 13 \rightarrow 5 \text{ y } 12 \rightarrow 6$$

Las constantes se pueden representar de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Los ceros representan las constantes que varían por simetría. Si la matriz de 6x6 se denota como $\overset{\leftrightarrow}{C}$, y si se definen las matrices de 6x1, $\overset{\leftrightarrow}{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]$ y $\overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, 2\Gamma_{yz}, 2\Gamma_{xz}, 2\Gamma_{xy}]$, la ecuación 1 puede ser escrita como:

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma} = \overset{\leftrightarrow}{C} \cdot \overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} \quad (38)$$

Esto es en realidad seis ecuaciones escrita de forma explicita como:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{13}\varepsilon_z \\
\sigma_y &= C_{12}\varepsilon_x + C_{22}\varepsilon_y + C_{23}\varepsilon_z \\
\sigma_z &= C_{13}\varepsilon_x + C_{23}\varepsilon_y + C_{33}\varepsilon_z \quad (39) \\
\tau_{yz} &= 2C_{44}\Gamma_{yz} \\
\tau_{xz} &= 2C_{55}\Gamma_{xz} \\
\tau_{xy} &= 2C_{66}\Gamma_{xy}
\end{aligned}$$

La matriz $\overset{\leftrightarrow}{C}$ es conocida como la matriz de constantes de rigidez o constantes elásticas.

- *Isotropía transversal*⁶

Otro tipo especial de simetría importante para muchos tipos de roca es una rotación simétrica total alrededor de un eje, este tipo de simetría se conoce como simetría hexagonal. Cuando la roca presenta este tipo de simetría se dice que es transversalmente isotrópica. Esto implica que las propiedades elásticas son iguales para todas las direcciones en un plano, pero diferentes en otras, esto reduce el número de constantes a cinco.

Para obtener la matriz de constantes de rigidez o constantes elásticas \vec{C} para una simetría hexagonal se debe tener en cuenta que esta matriz no varía con la rotación alrededor de uno de los tres ejes coordenados. Dada la matriz \vec{C} con respecto a un sistema de ejes coordenados x, y, z :

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Si este sistema es rotado un ángulo ϕ alrededor del eje vertical z se obtiene un nuevo sistema coordenado dado por x', y', z' ; de esta manera la matriz de constantes elásticas en el nuevo sistema coordenado estará dada por:

$$\bar{C}' = MCM^T \quad (41)$$

Donde M es la siguiente matriz:

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \sin^2 \phi & 0 & 0 & 0 & -\sin 2\phi \\ \sin^2 \phi & \cos^2 \phi & 0 & 0 & 0 & \sin 2\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ \sin 2\phi/2 & \sin 2\phi/2 & 0 & 0 & 0 & \cos 2\phi \end{bmatrix} \quad (42)$$

Y M^T representa la traspuesta de la matriz M. Resolviendo la ecuación 41, lleva a un sistema de 21 ecuaciones lineales, de la cual los resultados son los siguientes:

$$\begin{aligned} C_{34} &= C_{35} = 0 \\ C_{44} &= C_{55} \\ C_{45} &= 0 \\ C_{13} &= C_{23} \\ C_{36} &= 0 \\ C_{14} &= C_{24} = C_{46} = C_{15} = C_{25} = C_{56} = 0 \\ C_{11} &= C_{23} \\ C_{12} &= C_{11} - 2C_{66} \\ C_{16} &= C_{26} = 0 \end{aligned} \quad (43)$$

Así la matriz para un material transversalmente isotrópico es:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} - 2C_{66} & C_{11} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (44)$$

Por lo general este tipo de simetría es representativo en rocas sedimentarias estratificadas horizontalmente.

1.6. PRINCIPIO DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDADES ACÚSTICAS EN ROCAS¹²

En general el método de medición acústica tiene como objetivo las mediciones en laboratorio de las velocidades de onda compresionales (P) y de corte (S) para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas, este procedimiento es valido para tanto para rocas isotrópicas como anisotrópicas.

Sin embargo, las propiedades mecánicas elásticas pueden ser determinadas directamente de las velocidades de onda solo para las rocas isotópicas. Para el caso de rocas anisotrópicas, las propiedades mecánicas son funciones directas de las componentes de la matriz de rigidez y a su vez estas componente son funciones directas de las velocidades de onda; en este caso las velocidades de onda requieren de una configuración especial con respecto a la dirección de propagación la cual será explicada mas adelante. El procedimiento que se describe a continuación es considerado el fundamento para llevar a cabo este tipo de pruebas.

¹² Referenciado en la norma ASTM D 2845 – 90: Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constant of rock.

Básicamente el equipo de prueba consta de un generador de pulsos, cristales piezoeléctricos o transductores y un osciloscopio, tal como se muestra en la figura 12:

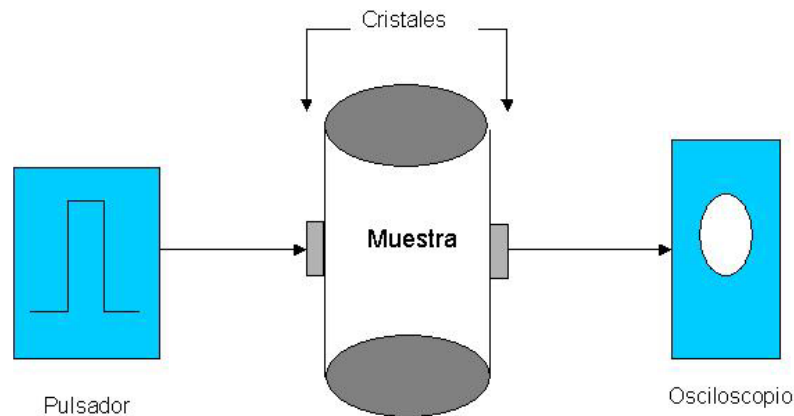


Figura 12. Esquema general del equipo utilizado para las mediciones acústicas¹³

El pulsador consiste de un generador de pulsos electrónico y voltaje externo o amplificadores si es necesario. El voltaje de salida debe ser ya sea una señal rectangular o una onda senoidal.

Los cristales piezoeléctricos son transductores los cuales consisten de un transmisor que convierte los pulsos eléctricos en pulsos mecánicos y un receptor que convierte la señal mecánica en señal eléctrica. Para disminuir las pérdidas y dispersión en las llegadas al receptor, los transmisores deben ser capaces de generar longitudes de onda al menos tres veces más que el tamaño promedio de los granos de la roca.

¹³ Referenciado en Valera Lara, Luz Carime y Galvis, Jorge Leonardo: “Medición de velocidades acústicas y determinación de parámetros elásticos sobre una muestra de Berea”. Presentación No 3. Grupo de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

El osciloscopio es el equipo que permite la observación visual de las formas de ondas de las señales recibidas por el cristal receptor.

Como se observa en la figura 12 los cristales van adheridos a las superficies de la muestra, por ello hay que ser bastante cuidadoso en el corte y manejo del plug para prueba. El área sobre la cual se coloca el cristal debe ser lo suficientemente plana con una desviación no mayor a 0.025 mm y sus caras opuestas deben ser paralelas con una desviación menor de 0.1 mm/20mm de dimensión lateral (ver figura 13). Se debe tener en cuenta que si el pulso se propaga en dirección diametral la tolerancia con respecto al paralelismo hace referencia a las líneas de contacto entre los cristales y la superficie curva.

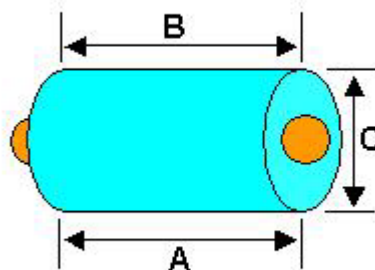


Figura 13. (A) Debe estar dentro de 0.1mm de (B) por cada 20 mm de ancho (C)¹²

Con respecto al tamaño de la muestra para prueba se recomienda que la distancia recorrida por el pulso a través de la roca sea por lo menos diez veces el tamaño promedio de los granos de la roca, para que de esta manera la velocidad de onda sea determinada con mayor precisión.

Para determinar la distancia de viaje del pulso se deben marcar las posiciones de los cristales sobre la muestra de manera que la línea de conexión entre los centros de los dos cristales no esté más de 2° inclinada con una línea perpendicular a

cada superficie. Se debe tener en cuenta que para determinar los parámetros mecánicos en el caso de muestras isotrópicas o las constantes elásticas para la matriz de rigidez en el caso de muestras anisotrópicas, la densidad de grano es un parámetro fundamental para realizar los cálculos, esta puede ser obtenida a partir de análisis petrofísicos en laboratorio o en su defecto puede ser calculada manualmente con la masa de la muestra y el volumen calculado a partir de las dimensiones de la misma.

Después de tener la distancia de viaje y la densidad, el siguiente paso es determinar el tiempo de viaje del pulso, este parámetro es quizás uno de los más sensibles a la incertidumbre debido a que depende del criterio del ojo humano, por tanto se puede decir que su medición hasta el momento es bastante subjetiva. La señal recibida es mostrada en el osciloscopio en forma de onda, con la ayuda de los cursores del equipo se ubica la posición del pulso como el punto cero y con el segundo cursor se ubica la llegada de la onda, de manera que el diferencial de tiempo entre los dos cursores se considera el tiempo de viaje de la onda (ver figura 14).

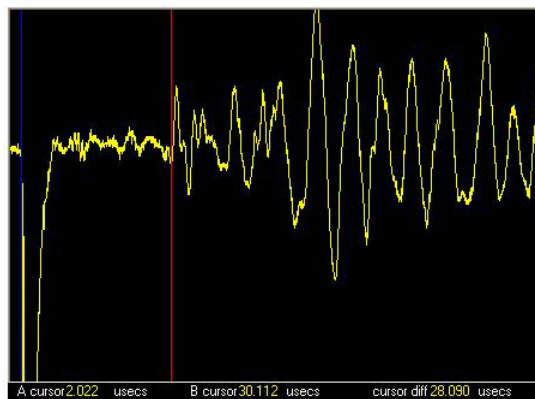


Figura 14. Vista en el osciloscopio para lectura del tiempo de viaje¹⁴

¹⁴ Figura referenciada en Valera Lara, Luz Carime: “Prueba del estudio del efecto de la presión en el comportamiento de las velocidades acústicas. Aplicación a un pozo”. Informe de avance No 9. Grupo Estabilidad de pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

Después de realizar la medición de los tiempos para las ondas compresionales (P) y de corte (S), se procede a determinar la velocidad de onda para cada una tal como se muestra a continuación:

$$V_P = \frac{L}{t_P} \quad V_S = \frac{L}{t_S} \quad (45)$$

En la ecuación (45), L representa la distancia recorrida por el pulso en metros y t_P y t_S representan los tiempos de onda compresionales y de corte en segundos, respectivamente. Después de determinar los parámetros anteriores se procede a calcular directamente los valores de los módulos elásticos de la roca a partir de las relaciones mostradas en la ecuación 31 siempre y cuando la roca sea considerada homogénea e isotrópica; de lo contrario, se debe realizar un procedimiento cuyo principio es el mismo pero con ciertas variaciones en la configuración de las direcciones de propagación de las ondas y el cual será explicado más adelante.

1.7. METODOS ACUSTICOS PARA CARACTERIZAR ANISOTROPIA EN LAS ROCAS Y DETERMINAR LOS MODULOS ELASTICOS

La mayoría de las rocas presentan características, tales como, planos de asentamiento, alineaciones de granos, microfracturas, entre otros, lo cual hace de estas rocas materiales anisotrópicos.

Los métodos de transmisión de pulsos ultrasónicos a través de rocas presentan características que sugieren que la anisotropía es debido a factores como:

- La combinación de los efectos del espacio poroso y fracturas, u orientación de minerales.

- La anisotropía decrece cuando se incrementa el esfuerzo aplicado, probablemente debido a la disminución del espacio poroso y el cierre de las microfracturas.
- Posiblemente exista una anisotropía residual a altas presiones, esto debido a la presencia de minerales alineados.

El método acústico además de permitir caracterizar la anisotropía presente en las rocas, también permite determinar las constantes elásticas que constituyen la matriz de rigidez y a su vez calcular los módulos elásticos anisotrópicos de las rocas. Cuando el caso anisotrópico es tenido en cuenta cinco, nueve o más constantes son requeridas para determinar las propiedades elásticas de las rocas.

Para determinar estas constantes elásticas es necesario medir las velocidades de onda en diferentes direcciones de propagación y por tanto se requieren de configuraciones especiales de cristales piezoeléctricos alrededor de la muestra para obtener los datos necesarios. A continuación se detallaran los dos métodos empleados para determinar las constantes elásticas requeridas cuando la roca presenta isotropía transversal.

1.7.1. Método del tri-plug orientado¹⁵

Este método está basado en la transmisión de pulsos para medir velocidades de onda compresional y de corte horizontal y vertical (P, SH y SV), sobre tres muestras cilíndricas con sus ejes paralelo, perpendicular e inclinado 45° del plano de asentamiento, tal como se muestra en la figura 15:

¹⁵ Referenciado en Lo, Tien-when, Coyner, Karl B. and Toksöz, M. Nafi : “Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite. Geophysics, 51, 164-171.

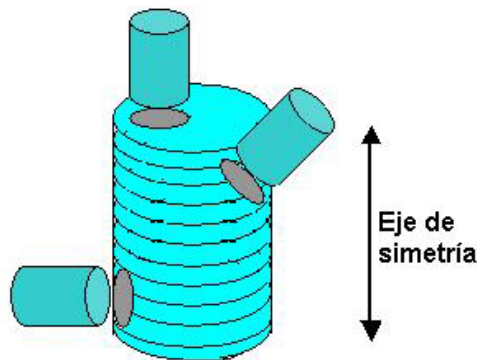


Figura 15. Método del tri-plug orientado¹⁵

Al utilizar este método se presume que la muestra es transversalmente isotrópica, esto quiere decir que la roca presenta una simetría hexagonal con cinco constantes elásticas independientes. El eje de simetría es por lo general perpendicular al plano de asentamiento.

Los tres plugs orientados son requeridos porque las mediciones de velocidad sólo en las direcciones axial y lateral no son suficientes para calcular módulos elásticos anisotrópicos. Las velocidades de onda medidas en este método son mostradas en la figura 16.

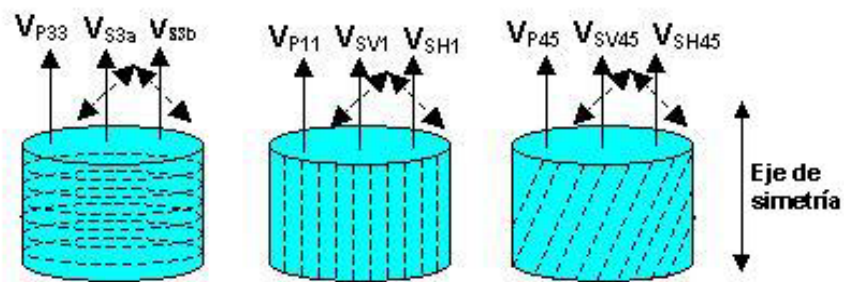


Figura 16. Velocidades medidas en el método del tri-plug orientado¹⁵

Observando la figura 16, V_{P33} , V_{P11} y V_{P45} indican las velocidades de onda compresionales que se propagan paralelas, perpendiculares y a 45° del eje de simetría. Y a su vez son las ondas perpendiculares, paralelas y a 45° del plano de asentamiento.

Las velocidades de corte V_{S3a} y V_{S3b} son aquellas que se propagan en la dirección del eje de simetría, ambas ondas son horizontales pero ortogonalmente polarizadas. Los términos V_{SV1} y V_{SH1} son las velocidades de corte que se propagan en la dirección perpendicular al eje de simetría, pero una se propaga horizontal y la otra vertical, ambas son polarizadas.

Para el caso de V_{SV45} y V_{SH45} , también son ondas de corte, que se propagan a 45° del eje de simetría, pero se desplazan vertical y horizontal respectivamente.

Teniendo en cuenta la figura 16, para una roca que presenta isotropía transversal se espera obtener lo siguiente:

$$V_{S3a} = V_{S3b} = V_{SV1} < V_{SH1} \quad (46)$$

Para rocas transversalmente isotrópicas las relaciones entre las velocidades y las cinco constantes elásticas o de rigidez son expresadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho V_{P11}^2 \\ C_{12} &= C_{11} - 2\rho V_{SH1}^2 \\ C_{33} &= \rho V_{P33}^2 \\ C_{44} &= \rho V_{S3}^2 \\ C_{13} &= -C_{44} + \sqrt{4\rho^2 V_{P45}^4 - 2\rho V_{P45}^2 (C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})} \end{aligned} \quad (47)$$

Donde C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} y C_{44} son constantes de rigidez y ρ es la densidad de la roca.

A partir de los valores de estas constantes de rigidez, los parámetros elásticos anisotrópicos de las rocas pueden ser calculados. Para rocas transversalmente isotrópicas se tienen un módulo volumétrico dinámico, dos módulos de Young y tres relaciones de Poisson, estos módulos hacen referencia a las tres direcciones de orientación de los plug. El término dinámico se refiere a que los valores son obtenidos a partir de la medición de velocidades acústicas.

Los parámetros pueden ser determinados a partir de las fórmulas dadas por *King* (1968,1969). Dado el determinante D de las constantes de rigidez:

$$D = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (48)$$

Entonces, los parámetros elásticos pueden ser calculados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_V &= \frac{D}{C_{11}^2 - C_{12}^2} \\ E_H &= \frac{D}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ \nu_1 &= \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}^2}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ \nu_1 &= \frac{C_{13}(C_{11} - C_{12})}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ \nu_1 &= \frac{C_{13}}{C_{11} + C_{33}} \\ K &= \frac{C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2}{C_{11} + 2C_{33} + C_{12} - 4C_{13}} \quad (49) \end{aligned}$$

Donde K es el módulo volumétrico, E_V es el módulo de Young dinámico perpendicular al plano de simetría, E_H es el módulo de Young dinámico paralelo al plano de simetría, ν es la relación de Poisson y depende de la dirección.

Cuando la dirección de aplicación del esfuerzo es perpendicular al eje de simetría, ν_1 indica la relación entre la deformación perpendicular a la dirección de la compresión y la deformación paralela a la dirección de compresión. ν_2 es la relación entre la deformación paralela al eje de simetría y la deformación paralela a la dirección de compresión, esto cuando la muestra es sometida a una compresión perpendicular al eje de simetría. Y ν_3 es la relación obtenida dividiendo la deformación perpendicular al eje de simetría por la deformación paralela al eje de simetría cuando se compara en una dirección paralela al eje de simetría.

A partir de diversas pruebas realizadas con este método se ha observado que la anisotropía de las rocas es debido principalmente a los minerales constituyentes, las características estructurales y de textura de las rocas tales como asentamiento y foliación, y las fracturas y poros. Sin embargo, el efecto de las fracturas y los poros decrece con la presión aplicada.

A partir de este método también se han determinado unas condiciones de anisotropía, la cuales han sido observadas en muestras de arena y shales estas son:

- La primera condición predice que $V_{P11} > V_{P45} > V_{P33}$, esto se debe a que en la dirección de propagación, la onda $P33$ encuentra mayor cantidad de materiales de baja rigidez como aire en poros y fracturas que la onda $P45$ y a su vez esta onda encuentra menos materiales de este tipo que la onda $P11$. A menor cantidad de materiales de baja rigidez mayor velocidad de propagación.

- La segunda condición predice que $V_{SH1} > V_{SH45} > V_{S3b}$ y la razón es similar al primer caso.
- El tercer caso predice que $V_{SH1} > V_{SV1}, V_{SH45} > V_{SV45}$, debido a que en la dirección de polarización de ondas S, la onda S vertical encuentra mas materiales rígidos que la onda S horizontal, por lo tanto la onda S horizontal es más rápida que la onda S vertical.
- Por último la cuarta condición de anisotropía se refiere a la anisotropía de isotropía transversal donde $V_{S3a} = V_{S3b}$.

La principal ventaja de este método es la cantidad de datos obtenidos para cálculos de las cinco constantes de rigidez puesto que para cada plug se miden tres velocidades, obteniendo en total nueve velocidades.

A pesar de esta ventaja, este método presenta serios inconvenientes, uno de ellos y quizás el más obvio es la cantidad de tiempo que se requeriría para cada prueba y para el caso de las shales se requiere una semana por plug para completar la prueba.

Otra desventaja del método es la preparación de los tres plugs. Esta desventaja afecta significativamente a las shales, ya que este tipo de roca son materiales muy frágiles y fisurados, en la mayoría de los casos es difícil preparar el plug de 45° puesto que sus lados se quiebran con facilidad.

Otro punto a tener en cuenta cuando se trabaja con shales es la disponibilidad de las muestras y por tanto cortar los tres plugs adyacentes puede ser imposible. Otra importante desventaja es la incertidumbre en las mediciones de los ángulos y ejes de simetría debido a que no siempre los plugs son totalmente horizontales, verticales o presentan un ángulo de 45° perfecto.

Por otro lado este método no es satisfactorio para estudiar los efectos de esfuerzos no hidrostáticos sobre rocas con anisotropía inducida. Por estas razones este método no es muy práctico para caracterizar anisotropía y determinar parámetros elásticos.

1.7.2. Método del single – plug¹⁶

Este método consiste en medir velocidades sísmicas e isotropía transversal a partir de un solo plug cortado horizontal, es decir, perpendicular al eje de simetría o cortado paralelo a los planos de depositación de la roca. Este ha sido validado y probado en laboratorio. La clave de este método se encuentra en la orientación de los cristales con respecto al plano de simetría o con el plano de asentamiento.

Aquí se utilizan cristales de onda P y S en el tope y fondo de la muestras, además cuatro cristales de onda P (dos transmisores y dos receptores) son fijados en los lados.

El arreglo de cristales del tope y fondo contienen tres transmisores y tres receptores, uno es para onda P y los otros dos son para onda S ortogonalmente polarizados. Las velocidades medidas a lo largo de la roca permiten determinar las constantes elásticas C_{11} , C_{44} y C_{66} . Donde C_{66} está definida como:

$$C_{66} = \rho V_{SH1}^2 \quad (50)$$

De esta manera C_{22} puede ser definida de la siguiente manera:

$$C_{22} = C_{11} - 2C_{66} \quad (51)$$

¹⁶ Referenciado en Wang, Zhijing: Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: A single plug laboratory method. Geophysics, Vol. 67, No 5 (September – October 2002). P 1415- 1422.

El arreglo de cristales que se ubican a los lados de la muestras consisten de cuatro cristales de onda P, dos transmisores y dos receptores. Un esquema de este arreglo visto desde una vista superior es mostrado en la figura 17.

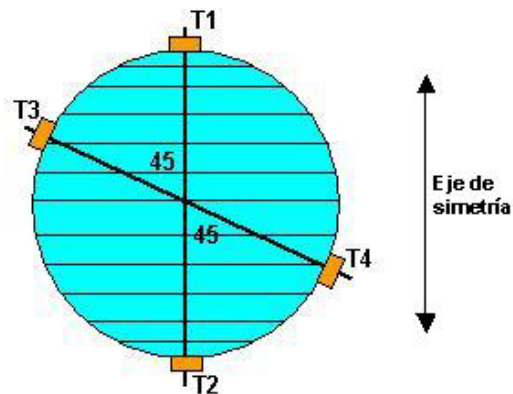


Figura 17. Arreglo de transductores laterales para el método single-plug¹⁶

De acuerdo a la figura 17 los cristales T1 y T2, los cuales se encuentran alineados a lo largo del eje de simetría permiten la medición de las velocidades requeridas para determinar la constante C_{33} . Los transductores T3 y T4 se encuentran ubicados a 45° del eje de simetría, este arreglo permite la medición de las velocidades de onda P a 45° y determinar el valor de la constante C_{13} .

Para determinar las cinco constantes independientes se utilizan las mismas relaciones mostradas en la ecuación (47); sin embargo, acorde a la configuración empleada en este método las constantes son determinadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
C_{33} &= \rho V_{P0}^2 \\
C_{11} &= \rho V_{P90}^2 \\
C_{44} &= \rho V_{S1,90}^2 \\
C_{66} &= \rho V_{S2,90}^2 \\
C_{13} &= \left[\frac{(4\rho V_{P45}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{44})^2 - (C_{11} - C_{33})^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}} - C_{44} \quad (52)
\end{aligned}$$

Las velocidades V_{P0} , V_{P90} y V_{P45} son las velocidades de onda P que se propagan paralelas, perpendiculares y a 45 grados del eje de simetría. $V_{S1,90}$ y $V_{S2,90}$ son las velocidades de corte polarizadas ortogonalmente que se propagan perpendiculares al eje de simetría.

El método fue diseñado de manera ideal para un plug que sea cortado horizontal, sin embargo, eso no es estrictamente necesario. Si se tiene un plug cortado a cualquier ángulo θ entre la dirección de propagación de la onda y el eje de simetría, las ecuaciones pueden ser resueltas para este ángulo y determinar las cinco constantes independientes.

En este caso los cristales del tope y el fondo miden las velocidades $V_{P\theta}$, $V_{S1\theta}$, y $V_{S2\theta}$; los cristales T1 y T2 miden las velocidades $V_{P(90-\theta)}$ y el T3 y T4 miden $V_{P\phi}$ donde ϕ es igual a $\cos^{-1}(\sin \theta \sin 45^\circ)$. θ es el ángulo formado entre la dirección de propagación y el eje de simetría.

Con este método también es posible obtener una buena cantidad de datos de velocidades, esto se puede lograr transmitiendo ondas P en dos receptores. Si se observa la figura 17, ambos transductores T2 y T4 pueden recibir la onda P transmitida por el transductor T1. De manera similar, los transductores T4 y T2 pueden recibir la onda transmitida por T3. Así se medirían en total siete velocidades para determinar las cinco constantes elásticas independientes.

Para validar este método se llevaron a cabo dos tipos de prueba, una a partir del método tradicional del tri – plug orientado y el segundo mediante el método del single-plug.

El proceso llevado a cabo fue el siguiente:

1. Se seleccionaron materiales homogéneos con velocidades y anisotropía conocidas.
2. Se midieron las cinco velocidades en un plug horizontal usando el método single-plug.
3. Se determinaron las cinco constantes independientes usando las velocidades medidas y la densidad.
4. Se utilizaron las cinco constantes como datos de entrada para calcular las tres velocidades para cualquier ángulo, teniendo en cuenta las ecuaciones derivadas para un ángulos diferentes.
5. Se midieron las velocidades en varios plugs cortados a diferentes ángulos.
6. Se compararon las velocidades medidas con las velocidades calculadas en el paso 4 para el ángulo respectivo. Si estos datos presentan un buen ajuste, entonces este método es probado.

Este método presenta muchas ventajas con respecto al método del tri – plug orientado, la principal ventaja es la disminución en el tiempo de prueba, ya que con solo una muestra es suficiente para obtener los datos de velocidad necesarias para obtener las constantes de rigidez de una muestra transversalmente isotrópica.

Otra ventaja es la disminución en el número de muestras de prueba, esto también implica la disminución en el uso de cristales piezoeléctricos para obtener las velocidades, sólo se necesitan 10 cristales.

La desventaja que presenta éste método con respecto al primero es la cantidad de datos obtenidos. Con el primer método es posible obtener nueve velocidades, sin embargo la desventaja no es tan marcada ya que con el segundo método se pueden determinar siete velocidades. La cantidad de datos aún sigue siendo más que suficiente.

Teniendo en cuenta estas razones, el método es bastante práctico para ser aplicado, especialmente cuando no se cuenta con una amplia disponibilidad de muestras para ser probadas. Sin embargo, en general los dos métodos presentan la desventaja que se debe asumir previamente que la muestra presenta isotropía transversal.

La configuración explicada en la parte de arriba es una aplicación del método single-plug, sin embargo, a partir de una sola muestra se pueden implementar otras configuraciones de cristales y obtener la cantidad de datos de velocidades necesarios para determinar las constantes elásticas.

La configuración implementada por T.E. Scott Jr. y Y. Abousleiman¹⁷ en su trabajo "Determination of the stress-induced dynamic moduli of a porous medium subjected to various deformational pathways", esta basada en el método del single plug con algunas modificaciones con respecto al número de cristales utilizados. La configuración empleada en este trabajo es la siguiente:

¹⁷ Referenciado en Scott T.E. And Abousleiman Y.: Determination of the stress-induced dynamic moduli of a porous medium subjected to various deformational pathways.

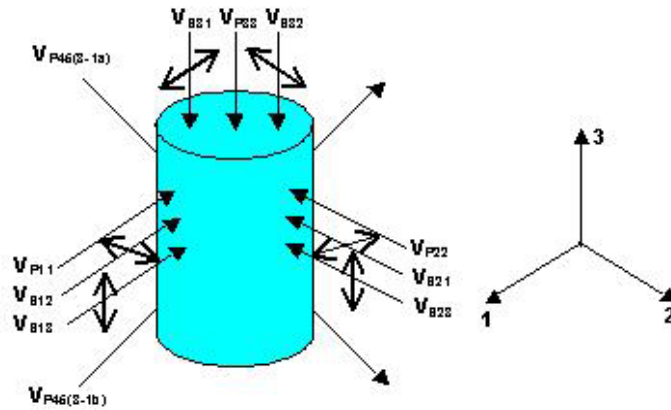


Figura 18. Trayectorias de las velocidades P y S¹⁷

En esta aplicación del método single-plug se tiene un total de once rayos acústicos, tal como se muestra en la figura 18. Los rayos incluyeron $V_{P33}, V_{P22}, V_{P11}, V_{S31}, V_{S12}, V_{S13}, V_{S23}, V_{S21}, V_{P45-3a}$ y V_{P45-3b} . Las dirección 3 es paralela al eje del plug, las direcciones 2 y 1 son direcciones laterales. Si se asume que se tiene un caso de isotropía transversal, entonces solo cinco de estas velocidades son necesarias.

En este trabajo solo se utilizaron $V_{P33}, V_{P22}, V_{P45-3a}, V_{S31}$ y V_{S21} . Tal como se observa en la figura 18, V_{P33} representa la velocidad de onda P en la dirección del eje de la muestra, V_{P22} es la velocidad compresional en la dirección lateral, V_{P45-3a} es la velocidad P en el plano 1-3 a 45° del eje del plug, V_{S31} es la velocidad de onda de corte que se propaga vertical polarizada en el plano 1-3 y la V_{S21} representa la velocidad S que se propaga horizontal polarizada en el plano 1-2.

Utilizando esta configuración las constantes elásticas pueden ser determinadas mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
C_{11} &= \rho V_{P11}^2 \\
C_{12} &= C_{11} - 2\rho V_{S23}^2 \\
C_{33} &= \rho V_{33}^2 \\
C_{44} &= \rho V_{S13}^2 \\
C_{55} &= \frac{(-C_{44} - C_{12})}{2} \\
C_{13} &= -C_{44} + \left(4\rho V_{P45}^4 - 2\rho V_{P45}^2(C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})\right)^{0.5} \quad (53)
\end{aligned}$$

Con los valores de las constantes elásticas se calculan los valores de los módulos mecánicos anisotrópicos tal como se muestra en la ecuación (49) y además de estos en este trabajo se muestran las ecuaciones para calcular el módulo de rigidez anisotrópico, así:

$$\begin{aligned}
G_{13} &= C_{44} \\
G_{12} = C_{55} &= \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \quad (54)
\end{aligned}$$

En la ecuación anterior G_{13} corresponde al modulo de rigidez vertical y G_{12} al horizontal.

Para los tres casos explicados con respecto a la aplicación de los métodos acústicos, además de las ventajas mencionadas anteriormente, estos métodos también permiten calcular los grados de anisotropía de onda P y onda S (ε y γ), según *Thomsen L (1986¹⁸)* las expresiones que permiten realizar esto son las siguientes:

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (55)$$

¹⁸ Referenciado en Thomsen, L., 1986: "Weak elastic anisotropy". *Gephysics*, 51, 1954-1966.

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (56)$$

2. METODOLOGIA PRIMERA FASE EXPERIMENTAL

Este capítulo tiene como objetivo describir la metodología experimental preliminar llevada a cabo para iniciar la caracterización de la anisotropía presente en muestras de la formación Tambor. Para llevar a cabo este estudio se parte de la suposición que se tiene una muestra de una formación de la cual se desconoce el tipo de anisotropía y por ello se aplica un método acústico que permita determinarla para posteriormente determinar los módulos elásticos anisotrópicos y obtener el tensor de esfuerzos para esta formación.

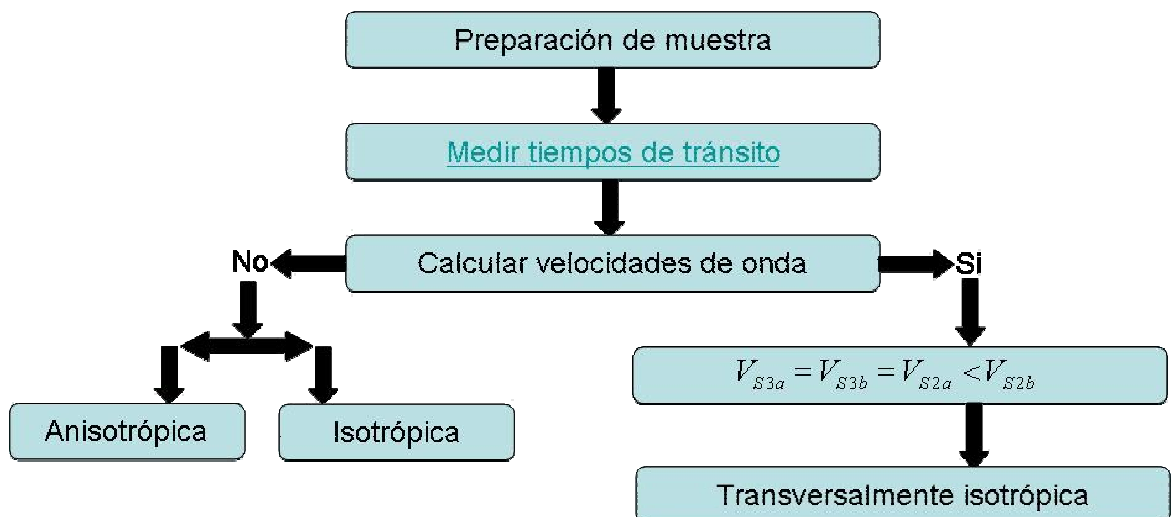


Figura 19. Diagrama de flujo de la metodología de la primera fase experimental⁷

2.1. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA FORMACIÓN TAMBOR

La formación Tambor es una arenisca cretácica discordante con la formación Girón en un ángulo muy suave. Debido a esta situación ha sido difícil identificar los límites exactos entre estas dos formaciones; sin embargo, el límite se puede

observar con facilidad cuando la formación Tambor reposa sobre los sedimentos lutíticos finos de la formación Girón.

En el caso cuando la Formación Tambor se apoya sobre las areniscas de Girón, diferenciar los límite entre estas es bastante complicado debido a la similitud presentada entre los sedimentos de la formación Girón con los sedimentos de Tambor Inferior.

En la formación Tambor perteneciente a la región de la Mesa de los Santos y Zapatoca se distinguen tres niveles, dos niveles uno inferior y otro superior de arenisca y un nivel medio el cual es más lutítico.

En la región de la Mesa de los Santos se puede observar que los niveles inferior y medio de la formación Tambor adelgazan hacia el este, hacia el Macizo, viéndose también una leve discordancia en el borde este de la Mesa entre el nivel superior e inferior. En la carretera que conduce a la Mesa se puede observar que la formación Tambor presenta un espesor aproximado de 120 m frente a más de 200 m que presenta el otro borde de la Mesa en la región de San Javier.

La formación Tambor está ausente en algunos puntos en la región de Guaca – San Andrés, al este del Macizo. Esto se debe al hecho que existen áreas donde Tambor no se depositó, o se depositó con poco espesor y de manera incompleta por lo cual fue erosionada inmediatamente.¹⁹

2.2. MUESTRAS ANALIZADAS

Para llevar a cabo esta primera etapa experimental se seleccionaron tres muestras pertenecientes a la formación Tambor, las cuales provienen de fuentes

¹⁹ Referenciado en el Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. Número 12. Bucaramanga. 1963.

diferentes, una de ella fue extraída de un bloque de afloramiento de la Mesa de Ruitoque y las dos restantes provienen de corazones de la Mesa de los Santos sacados de profundidad.

Como ya ha sido mencionado esta primera etapa tiene como finalidad observar los cambios en las velocidades medidas en las tres muestras y de esta manera caracterizar la anisotropía presente en esta formación, por ello se escogieron muestras provenientes de fuentes diferentes y también las muestras fueron cortadas a partir de dos geometrías, dos de las muestras son cilíndricas y una de ellas es cúbica; de esta manera se tienen dos parámetros, la profundidad debido a su origen y la geometría de la muestra, las tres pruebas fueron realizadas a condiciones atmosféricas. En la tabla 1 se resumen las principales propiedades de las muestras seleccionadas.

Tabla 1. Propiedades de las muestras seleccionadas⁷

| Propiedades | Afloramiento Ruitoque | Mesa de los Santos | |
|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | Mesa de los Santos cilíndrica | Mesa de los Santos cúbica |
| Nombre | Tambor 39 | Mesa de los Santos cilíndrica | Mesa de los Santos cúbica |
| Longitud m | 0.0762 | 0.0762 | 0.0753 |
| Diámetro m | 0.0383 | 0.0383 | 0.0452 |
| Densidad kg/m ³ | 2635 | 3294 | 2757 |
| Porosidad % | 10.4 | 4.6 | 6.5 |

2.2.1. Descripción microscópica de una muestra de afloramiento

La muestra analizada es una cuarzoarenita bien seleccionada con una media de tamaño de grano de arena media con predominio de granos subredondeados en contacto lineal a puntual. Ver figura 19.



Figura 20. Distribución del tamaño de grano de las partículas²⁰

El cuarzo es el principal componente en un porcentaje del 80.45%, también se encontraron fragmentos líticos en un 2.31, como chert volcánicos y líticos arcillosos, los cuales se observan en la mayoría con efectos de disolución. Otros componentes en cantidades menores al 1% son moscovita, leucoxeno, rutilo, turmalina y zircón. En la figura 20 se muestra la composición mineralógica de la muestra analizada.

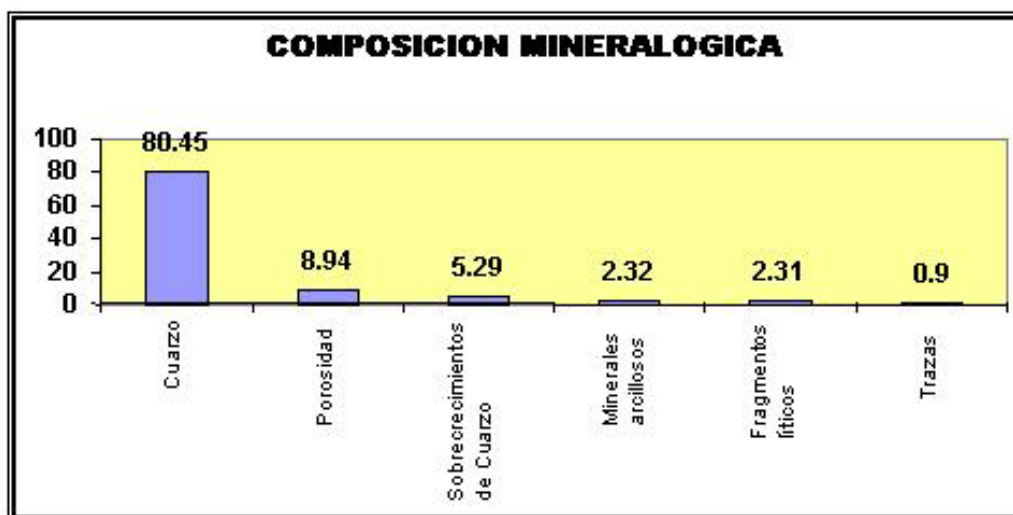


Figura 21. Composición mineralógica de la muestra analizada²⁰

²⁰ Rueda, Jenny Paola: Descripción de secciones delgadas de muestras de la formación Tambor. Grupo Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

La roca esta medianamente cementada por sobrecrecimientos de cuarzo en un 5.29% y minerales arcillosos en un 2.32%.

La porosidad total de la muestra es del 8.94%, de la cual el 3.97% es de tipo primaria y de tipo secundaria por efectos de disolución de líticos se tiene un 1.32% por minerales arcillosos un 0.33%; además, se observan poros no naturales como canales alrededor de los granos en un 0.66% y poros por granos sueltos en un 2.65%. A nivel de trazas se encuentran fracturas rellenas de óxidos.

2.2.2. Descripción microscópica de la muestra cilíndrica de la Mesa de los Santos

La muestra analizada es una arenisca subarcosa, compuesta por Cuarzo en un 83.04% y feldespato en un 16.39%; moderadamente seleccionada con una media de tamaño de grano de arena media con predominio de granos angulares esféricos en contacto longitud y en menor proporción cóncavo-convexo. En las figuras 21, 22 y 23 se muestran los resultados de los análisis realizados con respecto al tamaño y forma de los granos y tipo de contacto, respectivamente.

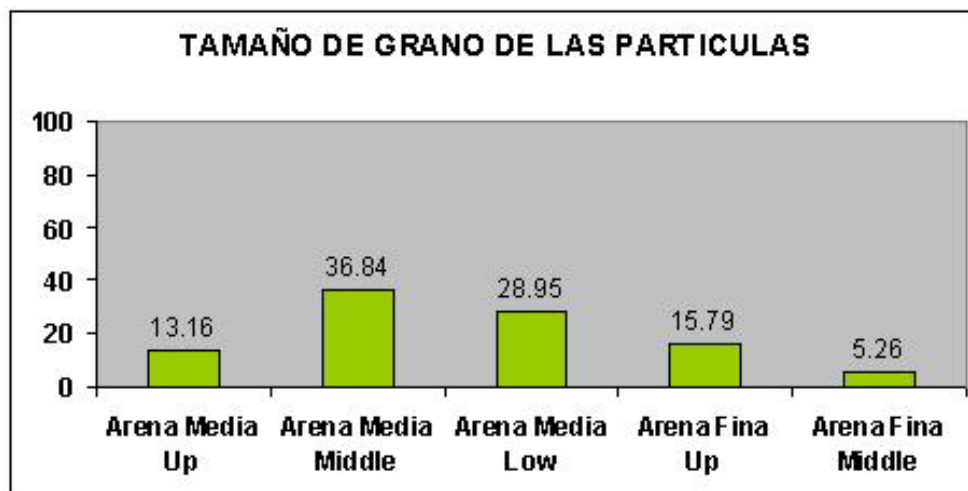


Figura 22. Distribución de tamaños de grano en la muestra analizada²⁰

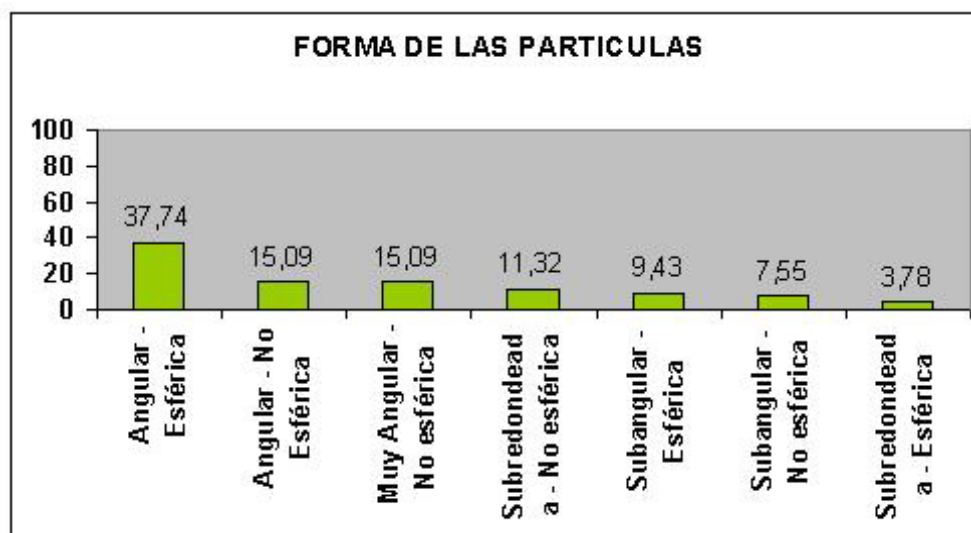


Figura 23. Distribución de las formas de partículas presentes en la muestra²⁰

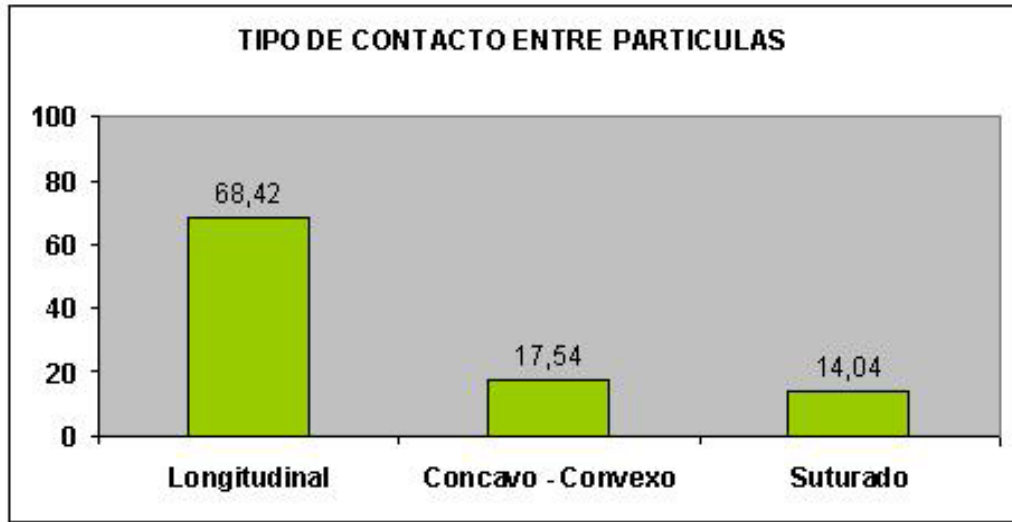


Figura 24. Tipos de contacto entre partículas presentes en la muestra²⁰

El cuarzo es el principal componente en un 71.9%, además también se encuentran presentes minerales de feldespato en un 14.68% que en algunas ocasiones se encuentra alterado a caolín en un porcentaje de 0.94%. En la figura 24 se muestra la composición mineralógica.

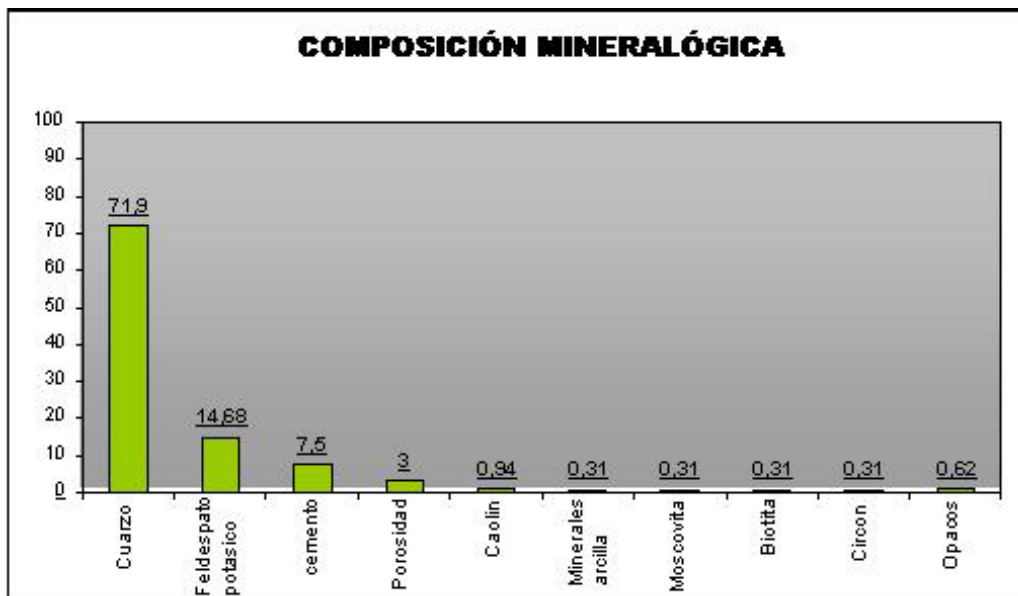


Figura 25. Composición mineralógica de la muestra²⁰

La roca está bien cementada en un porcentaje del 7.5%; la porosidad total de la muestra es del 3% de la cual el 1.9% es de tipo primaria y el 1.1% de tipo secundaria por efectos de disolución. A nivel de trazas se encuentran minerales tales como moscovita, biotita, opacos, circón y minerales arcilla.

2.2.3. Descripción microscópica de la muestra cúbica de la Mesa de los Santos

La muestra cúbica también es una arenisca subarcosa, con un porcentaje de cuarzo igual al 86.04% y de feldespato igual al 13.95%; moderadamente seleccionada con una media de tamaño de grano de arena fina middle con predominio de granos angulares esféricos en contacto longitud (ver figuras 25, 26, 27).

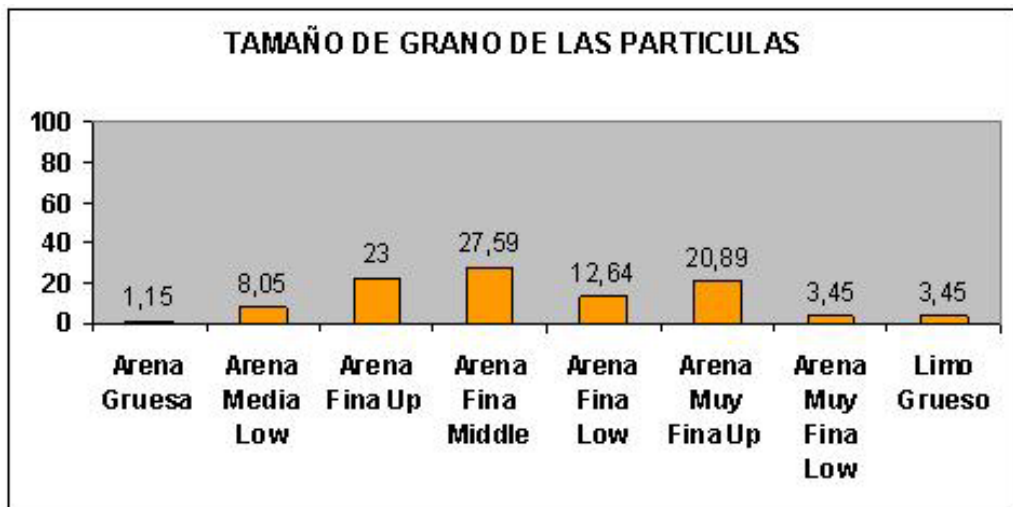


Figura 26. Distribución de los tamaños de grano de las partículas²⁰

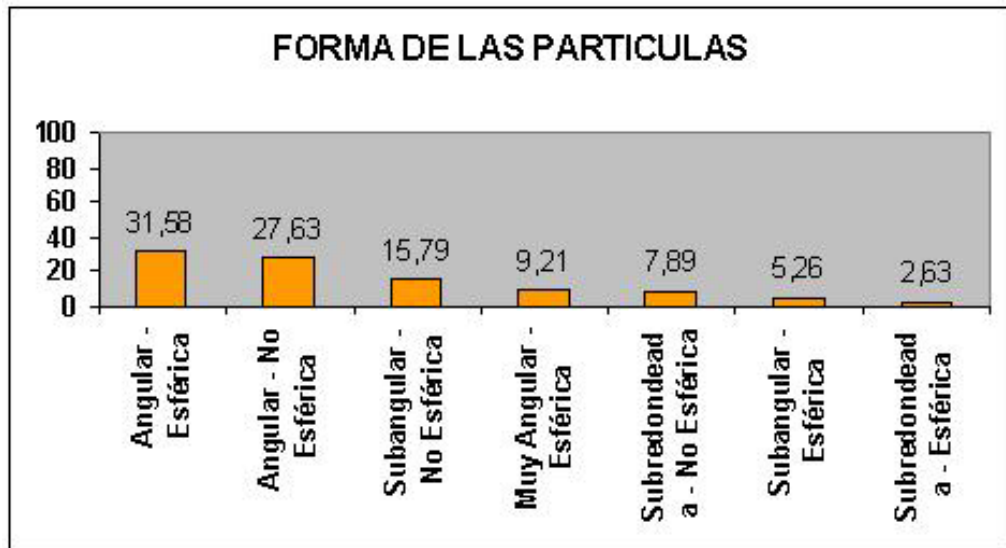


Figura 27. Distribución de formas de las partículas²⁰

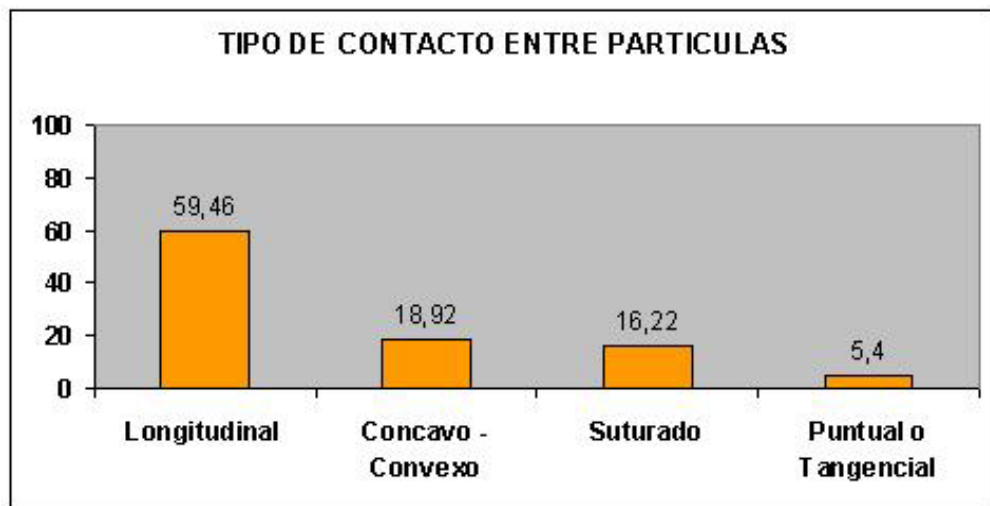


Figura 28. Principales tipos de contacto entre partículas²⁰

El cuarzo es el principal componente en un 68.05% del cual el 3.5% se encuentra microfracturado, además también se encuentra presente un porcentaje de feldespato del 11.04% que en algunas ocasiones se encuentra alterado a caolín y sericita, también se presentan pequeñas cantidades de plagioclasa en un 1.64%.

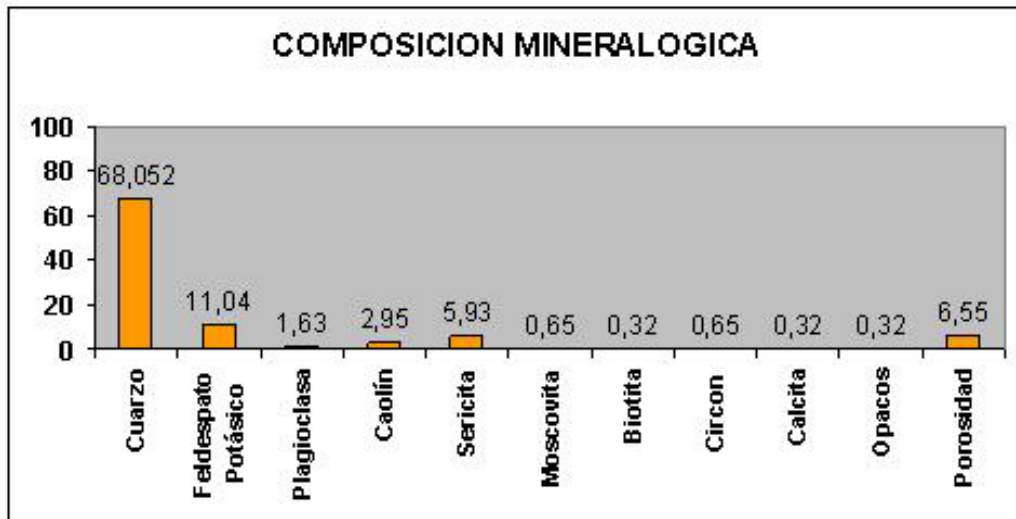


Figura 29. Composición mineralógica de la muestra analizada²⁰

La roca está muy poco cementada aproximadamente en un 1%. La porosidad total de la muestra es un 6.5%, donde el 5.21% es del tipo primaria y 1.3% es del tipo secundaria por efectos de disolución. A nivel de trazas se encuentran minerales tales como moscovita, biotita, opacos, circón y en mayor proporción calcita.

2.3 DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA EMPLEADA

Cuando se estudiaron los métodos acústicos para caracterizar anisotropía se observó que se tenía que buscar la manera de aplicar uno de estos métodos de manera que permitiera partir de cero y observar y verificar que tipo de anisotropía se presentaba en las muestras que se requerían estudiar, para el caso en particular para la formación Tambor. Teniendo en cuenta este punto a continuación se describe la metodología experimental implementada para realizar este estudio.

- *Preparación de los cristales acústicos*

Cortar los cristales P y S mostrados en la figura 29 en partes pequeñas, por cada cristal salen aproximadamente 12 partes, esto dependiendo del tamaño en que sean cortadas las partes.

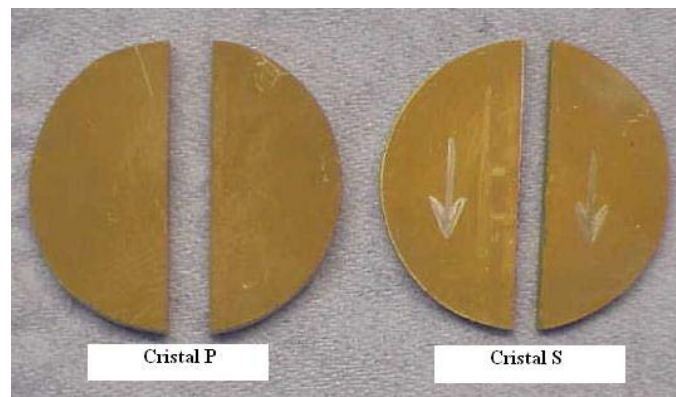


Figura 30. Cristales P y S²¹

Como se observa en la figura 29, el cristal S antes de ser cortado debe ser marcado con flechas guías que permitan luego pegar los cristales de manera que queden ortogonalmente polarizados.

Sobre una superficie de vidrio completamente limpia y lisa, colocar cinta transparente, la cual debe ser adhesiva por ambas superficies, asegurándose que no queden burbujas de aire. Sobre la cinta colocar los cristales formando triadas, un cristal P y dos cristales S colocados ortogonalmente y dejar algunos cristales P libres para medir las ondas P de 45°.

En la superficie de los cristales colocar alambre conductor y soldarlo con epóxico de plata y dejar secando por 24 horas a temperatura ambiente o en un horno a 60 °C durante 4 horas aproximadamente.

²¹ Tomada de fotografías del laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP.

Después que la soldadura ha secado completamente los cristales deben ser recubiertos con una sustancia epóxica para proteger el cristal y evitar que la soldadura se filtre a través de las paredes del cristal. Dejar secando por 24 horas a temperatura ambiente o en un horno a 60 °C durante 4 a 5 horas.

Después que el epóxico ha secado, los cristales deben ser despegados de la cinta y dejarlos listos para pegarlos en la muestra.

- *Preparación de las muestras*

El primer paso consiste en realizar la selección de las muestras que serán probadas, para ello se escogen los corazones o bloques de formación de donde se extraerán los plugs para la prueba. La extracción es realizada de manera que se obtengan plugs verticales; es decir, que el eje de la muestra fuera perpendicular al plano de estratificación de la formación.

Después de realizado el corte de las muestras, éstas son llevadas a un laboratorio de análisis petrofísicos para determinar las propiedades básicas, tales como, volumen total, volumen poroso, densidad de grano, porosidad y permeabilidad; siendo la densidad de grano una propiedad fundamental para realizar los cálculos de los módulos mecánicos de la roca y las constantes elásticas de la matriz de rigidez.

Cuando las propiedades básicas de las muestras son determinadas, las muestras son medidas y llevadas a un planímetro para verificar la planitud y paralelismo de sus superficies. Si ellas no cumplen con las especificaciones mínimas de paralelismo y planitud entonces las muestras deben ser llevadas a una pulidora de caras y sus superficies son limadas hasta cumplir con las especificaciones. Tal como se describió en la sección 1.6, el área de la muestra debe ser lo suficientemente plana con una desviación no mayor a 0.025 mm y sus caras

opuestas deben ser paralelas con una desviación menor de 0.1 mm/20mm de dimensión lateral y si el pulso se propaga en dirección diametral la tolerancia con respecto al paralelismo hace referencia a las líneas de contacto entre los cristales y la superficie curva. Después que las muestras tienen sus caras paralelas y sus superficies planas se realizan y se registran nuevamente las medidas de longitud y diámetro, como los datos finales.

Después que la muestra ha sido medida el siguiente paso es colocar los cristales sobre las superficies de la roca. Para este caso en particular la configuración montada es mostrada en la figura 30:

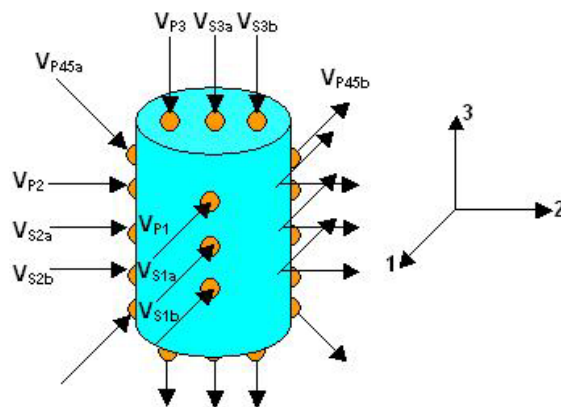


Figura 31. Configuración para el montaje de los cristales²²

Tal como se observa en la figura anterior los cristales deben ser montados sobre la muestra de manera que se midan las velocidades de onda en diferentes trayectorias. Para pegar los cristales a la muestra se utiliza epóxico de plata, la cual se unta sobre los cristales o directamente sobre la muestra y se colocan sobre la superficie de esta, luego se deja secar el epóxico durante 24 horas a

²² Referenciado en Valera Lara, Luz Carime: “Prueba experimental para el estudio de anisotropía de la formación Tambor”. Informe de avance 14. Grupo de investigación de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

temperatura ambiente preferiblemente o durante cuatro a cinco horas en un horno a 60 grados centígrados (ver figura 31).

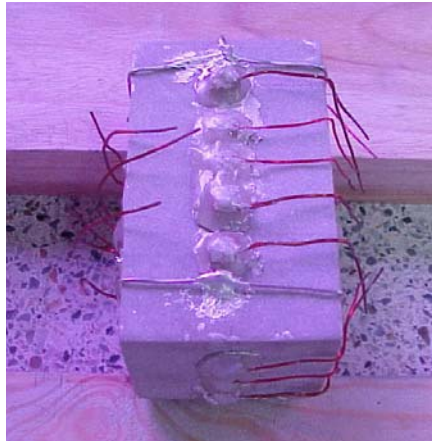


Figura 32. Montaje de los cristales en la muestra²³

2.3.3. Procedimiento de medición a condiciones atmosféricas

Para realizar las mediciones uno de los cristales debe ser conectado al generador de pulsos (pulsador), y este será emisor, el cristal que se encuentra en su lado opuesto debe ir conectado al osciloscopio y será el receptor, el montaje es mostrado en la figura 32:

²³ Figura referenciada en Valera Lara, Luz Carime: “Pruebas acústicas para estudios de anisotropía. Presentación No 6. Grupo de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

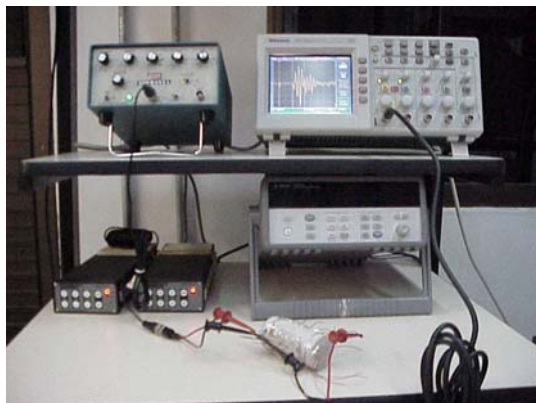


Figura 33. Montaje experimental a condiciones atmosféricas²³

Luego que las conexiones son realizadas se procede a iniciar las mediciones, el pulsador es encendido y este emite un voltaje al cristal el cual transforma la señal eléctrica en onda mecánica que pasa a través de la roca y la cual es recibida por el cristal que se encuentra conectado al osciloscopio donde la señal es mostrada finalmente (ver figura 32).

Cuando la onda es mostrada en el osciloscopio se procede realizar la lectura y registro de los tiempos de llegada de las ondas. Este procedimiento es llevado a cabo con cada uno de los pares de cristales.

Para el caso de la configuración mostrada en la figura 30 realizaron mediciones para once pares de cristales, cinco pares de cristales P y seis pares de cristales S. Por cada par de cristal se realizaron tres mediciones, dos en la cual la onda se propaga en la misma dirección y una tercera donde la onda se propaga en sentido opuesto, ver figura 33:

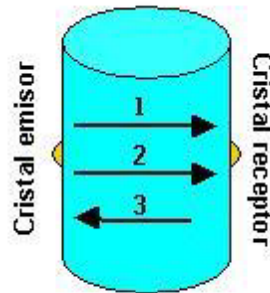


Figura 34. Esquema general de las mediciones realizadas²²

El numero 1 y 2 indican las dos primeras mediciones realizadas, en las cuales la onda viaja del emisor al receptor; en el caso de la tercera medición, numero 3, la dirección de la trayectoria se cambia y la señal va del receptor que pasa a ser emisor y es recibida por el emisor que se convierte en el receptor.

- *Procedimiento para cálculos*

Con los valores de los tiempos de llegada de las ondas P y S, se calculan los valores de las velocidades tal como se indica en la ecuación 45.

Después de obtener los valores de las velocidades de onda se deben calcular los valores de las constantes de la matriz de rigidez siempre y cuando la formación sea transversalmente isotrópica. Basándose en las relaciones mostradas en la ecuación 47 y acorde a la configuración mostrada en la figura 30, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \rho V_{P1}^2 \\
 C_{12} &= C_{11} - 2\rho V_{S1b}^2 \\
 C_{33} &= \rho V_{P3}^2 \\
 C_{44} &= \rho V_{S3}^2 \\
 C_{13} &= -C_{44} + \sqrt{4\rho^2 V_{P45}^4 - 2\rho V_{P45}^2 (C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})} \quad (57)
 \end{aligned}$$

Para el caso de las constantes C_{11} , C_{12} y C_{13} las velocidades de onda son calculadas tanto en la dirección a como en la b , teniendo en cuenta la configuración de la figura 30. La velocidad V_{S3} es el promedio de las dos velocidades de corte medidas en la dirección vertical.

Por último cuando ya se han calculado las constantes elásticas de la matriz de rigidez, se calcula el valor del determinante tal como se indica en la ecuación 48 y a partir de este valor se determinan los valores de los módulos mecánicos elásticos anisotrópicos acorde a la ecuación 49.

3. RESULTADOS Y OBSERVACIONES PRIMERA FASE EXPERIMENTAL

Los datos de las velocidades medidas son mostrados en las tablas 2, 3 y 4 para cada una de las muestras.

Tabla 2. Velocidades de onda obtenidas para Tambor 39²²

| Velocidad m/s | 1 | 2 | 3 |
|---------------|----------|----------|----------|
| Vp1 | 2127.778 | 2104.396 | 2127.778 |
| Vs1a | 1259.868 | 1259.868 | 1259.868 |
| Vs1b | | | 1276.667 |
| Vp2 | 1806.604 | 1806.604 | 1806.604 |
| Vs2a | 1167.683 | 1167.683 | 1196.875 |
| Vs2b | 1259.868 | 1243.506 | 1227.564 |
| Vp3 | 1600.84 | 1685.841 | 1685.841 |
| Vs3a | 1104.348 | 1058.333 | 1104.348 |
| Vs3b | 989.6104 | 1002.632 | 1002.632 |
| Vp45 | 1758.442 | | 1805.333 |

Tabla 3. Velocidades de onda obtenidas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos²²

| Velocidad m/s | 1 | 2 | 3 |
|---------------|----------|----------|----------|
| Vp1 | 4163.043 | 3989.583 | 3989.583 |
| Vs1a | 2252.941 | 2201.149 | 2226.744 |
| Vs1b | 1954.082 | 1934.343 | 1934.343 |
| Vp2 | 3546.296 | 3546.296 | 3546.296 |
| Vs2a | 2335.366 | 2364.198 | 2335.366 |
| Vs2b | 2553.333 | 2587.838 | 2553.333 |
| Vp3 | 2953.488 | 2930.769 | 2953.488 |
| Vs3a | 1780.374 | 1780.374 | 1797.17 |
| Vs3b | 1831.731 | 1831.731 | 1700.893 |
| Vp45a | 3042.697 | 3042.697 | 3042.697 |
| Vp45b | 3008.889 | 3042.697 | 3042.697 |

Tabla 4. Velocidades de onda obtenidas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos²²

| Velocidad m/s | 1 | 2 | 3 |
|---------------|----------|----------|----------|
| Vp1 | 3424.242 | 3424.242 | 3373.134 |
| Vs1a | 2306.122 | 2260 | 2282.828 |
| Vs1b | 2282.828 | 2282.828 | 2282.828 |
| Vp2 | 2860.759 | 2860.759 | 2860.759 |
| Vs2a | 2092.593 | 2092.593 | 2092.593 |
| Vs2b | 2260 | 2282.828 | 2282.828 |
| Vp3 | 2810.448 | 2810.448 | 2810.448 |
| Vs3a | 2013.904 | 2013.904 | 2013.904 |
| Vs3b | 2176.879 | 2176.879 | 2176.879 |
| Vp45a | 3043.81 | 3073.077 | 3073.077 |
| Vp45b | 3294.845 | 3261.224 | 3261.224 |

En las tablas anteriores las casillas en blanco indican que las mediciones no pudieron ser realizadas, esto se presentó debido a que en estos casos la energía de las ondas era muy débil y no fue posible realizar las lecturas de los tiempos de onda.

Como se puede observar a simple vista en las tablas anteriores para las tres muestras existe variación en los valores de las velocidades medidas en las tres direcciones, para que la muestra fuera isotrópica se esperaría que los datos de velocidades fueran muy parecidos; sin embargo, los resultados evidencian cierta heterogeneidad en los resultados obtenidos, lo cual no dice que las muestras son anisotrópicas.

Estas desigualdades son bastante evidentes en las ondas compresionales medidas (onda P), para todas las direcciones los valores presentan un porcentaje de error mayor del 8%; sin embargo, para el caso de la onda S a pesar que existen diferencias para los valores medidos no son tan significativos como en el caso de la onda P (ver tabla 5), en la mayoría de los casos los porcentajes de error son menores del 7%.

Tabla 5. Valores de velocidades y porcentajes de error para las tres muestras²²

| | | Muestra Tambor 39 | | | | Muestra Tambor Cilíndrica Profundidad | | | | Muestra Tambor Cúbica Profundidad | | | |
|-----------------|-----------|-------------------|-------------|------------|---------|---------------------------------------|-------------|------------|---------|-----------------------------------|-------------|------------|---------|
| | | Vel. m/s | Desviación | Promedio | %Error | Vel. m/s | Desviación | Promedio | %Error | Vel. m/s | Desviación | Promedio | %Error |
| Medida 1 | Onda P1 | 2127.78 | 227.1043163 | 1967.19078 | 11.5446 | 4163.04 | 436.1061146 | 3854.66989 | 11.3137 | 3424.24 | 398.4426013 | 3142.50096 | 12.6792 |
| | Onda P2 | 1806.6 | | | | 3546.3 | | | | 2860.76 | | | |
| | Onda P3 | 1600.84 | 265.5668154 | 1845.07396 | 14.3933 | 2953.49 | 604.8170352 | 3554.27605 | 17.0166 | 2810.45 | 340.7805188 | 3031.81656 | 11.2401 |
| | Onda P45a | 1758.44 | no | no | no | 3042.7 | 23.90568244 | 3025.79276 | 0.79006 | 3043.81 | 177.5091427 | 3169.32744 | 5.60085 |
| | Onda P45b | | | | | 3008.89 | | | | 3294.85 | | | |
| | Onda S1a | 1259.87 | no | no | no | 2252.94 | 211.3256101 | 2103.5114 | 10.0463 | 2306.12 | 16.47146285 | 2294.47537 | 0.71787 |
| | Onda S1b | | | | | 1954.08 | | | | 2282.83 | | | |
| | Onda S2a | 1167.68 | 65.18498809 | 1213.77567 | 5.37043 | 2335.37 | 154.126283 | 2444.34959 | 6.30541 | 2092.59 | 118.374913 | 2176.2963 | 5.43928 |
| | Onda S2b | 1259.87 | | | | 2553.33 | | | | 2260 | | | |
| | Onda S3a | 1104.35 | 81.13161939 | 1046.97911 | 7.74912 | 1780.37 | 36.31483874 | 1806.0523 | 2.01073 | 2013.9 | 115.2406353 | 2095.39118 | 5.49972 |
| Onda S3b | 989.61 | 1831.73 | | | | 2176.88 | | | | | | | |
| Medida 2 | Onda P1 | 2104.4 | 210.5706229 | 1955.49969 | 10.7681 | 3989.58 | 313.4512699 | 3767.93981 | 8.3189 | 3424.24 | 398.4426013 | 3142.50096 | 12.6792 |
| | Onda P2 | 1806.6 | | | | 3546.3 | | | | 2860.76 | | | |
| | Onda P3 | 1685.84 | 215.4266673 | 1865.61336 | 11.5472 | 2930.77 | 531.7368192 | 3488.88295 | 15.2409 | 2810.45 | 340.7805188 | 3031.81656 | 11.2401 |
| | Onda P45a | | no | no | no | 3042.7 | 0 | 3042.69663 | 0 | 3073.08 | 156.8139662 | 3183.96114 | 4.92512 |
| | Onda P45b | | | | | 3042.7 | | | | 3294.85 | | | |
| | Onda S1a | 1259.87 | no | no | no | 2201.15 | 188.6603255 | 2067.74643 | 9.12396 | 2260 | 16.14203359 | 2271.41414 | 0.71066 |
| | Onda S1b | | | | | 1934.34 | | | | 2282.83 | | | |
| | Onda S2a | 1167.68 | 53.61535817 | 1205.59471 | 4.44721 | 2364.2 | 158.1375776 | 2476.01768 | 6.38677 | 2092.59 | 134.5169466 | 2187.71044 | 6.14875 |
| | Onda S2b | 1243.51 | | | | 2587.84 | | | | 2282.83 | | | |
| | Onda S3a | 1058.33 | 39.38708825 | 1030.48246 | 3.8222 | 1780.37 | 36.31483874 | 1806.0523 | 2.01073 | 2013.9 | 115.2406353 | 2095.39118 | 5.49972 |
| Onda S3b | 1002.63 | 1831.73 | | | | 2176.88 | | | | | | | |
| Medida 3 | Onda P1 | 2127.78 | 227.1043163 | 1967.19078 | 11.5446 | 3989.58 | 313.4512699 | 3767.93981 | 8.3189 | 3373.13 | 362.3037201 | 3116.94691 | 11.6237 |
| | Onda P2 | 1806.6 | | | | 3546.3 | | | | 2860.76 | | | |
| | Onda P3 | 1685.84 | 228.4165904 | 1873.40742 | 12.1926 | 2953.49 | 519.8425083 | 3496.456 | 14.8677 | 2810.45 | 311.3613695 | 3014.78053 | 10.3278 |
| | Onda P45a | 1805.33 | no | no | no | 3042.7 | 0 | 3042.69663 | 0 | 3073.08 | 133.0404203 | 3167.15071 | 4.20063 |
| | Onda P45b | | | | | 3042.7 | | | | 3261.22 | | | |
| | Onda S1a | 1259.87 | 11.87815339 | 1268.26754 | 0.93657 | 2226.74 | 206.7585544 | 2080.54381 | 9.93772 | 2282.83 | 0 | 2282.82828 | 0 |
| | Onda S1b | 1276.67 | | | | 1934.34 | | | | 2282.83 | | | |
| | Onda S2a | 1196.88 | 21.70047253 | 1212.21955 | 1.79014 | 2335.37 | 154.126283 | 2444.34959 | 6.30541 | 2092.59 | 134.5169466 | 2187.71044 | 6.14875 |
| | Onda S2b | 1227.56 | | | | 2553.33 | | | | 2282.83 | | | |
| | Onda S3a | 1104.35 | 71.92424811 | 1053.4897 | 6.82724 | 1797.17 | 68.07808717 | 1749.03133 | 3.89233 | 2013.9 | 115.2406353 | 2095.39118 | 5.49972 |
| Onda S3b | 1002.63 | 1700.89 | | | | 2176.88 | | | | | | | |

Las variaciones en las velocidades S son de gran importancia para definir el tipo de anisotropía observada en las muestras estudiadas, la baja variación en los valores obtenidos para cada una de las direcciones indican que las muestras de la formación Tambor pueden ser consideradas transversalmente isotrópicas con respecto a cualquiera de las tres direcciones medidas.

Para este caso en particular como las muestras fueron cortadas verticales, es decir, perpendiculares a los planos de depositación, se considerará el eje de la muestra como el eje de simetría y por tanto las muestras de Tambor se consideran transversalmente isotrópicas con respecto al plano vertical.

Teniendo en cuenta que las muestras de Tambor se consideran transversalmente isotrópicas, entonces las constantes elásticas para cada una de las muestras, los resultados son mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 6. Constantes elásticas para Tambor 39 con los valores de velocidades en la dirección 1⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 11929799846 | | 6752687575 | 2888395440 | 246925334 | |
| Medida 2 | 11669047066 | | 7488825182 | 2798090934 | | |
| Medida 3 | 11929799846 | 3340343957 | 7488825182 | 2924429858 | 1038240558 | 4294727944 |

Tabla 7. Constantes elásticas para Tambor 39 con los valores de velocidades en la dirección 2⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 8600158308 | 235253637.9 | 6752687575 | 2888395440 | 2767301688 | 4182452335 |
| Medida 2 | 8600158308 | 451113043.3 | 7488825182 | 2798090934 | | 4074522632 |
| Medida 3 | 8600158308 | 658723499.6 | 7488825182 | 2924429858 | 3257860915 | 3970717404 |

La diferencia entre las tablas anteriores consiste en que la tabla 6 es calculada a partir de los valores de velocidades en la dirección 1 y la tabla 7 con los valores de

velocidades en la dirección 2. En ambos casos la constante C_{13} fue calculada a partir de la velocidad de 45 grados en la dirección a .

Tabla 8. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45a⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 57088086720 | 31932236762 | 28733870200 | 10744451261 | | 12577924979 |
| Medida 2 | 52429857422 | 27779639791 | 28293510888 | 10744451261 | | 12325108815 |
| Medida 3 | 52429857422 | 27779639791 | 28733870200 | 10076710343 | | 12325108815 |

Tabla 9. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45a⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 41426060185 | -1524479015 | 28733870200 | 10744451261 | 3031406060 | 21475269600 |
| Medida 2 | 41426060185 | -2693147813 | 28293510888 | 10744451261 | 3171681366 | 22059603999 |
| Medida 3 | 41426060185 | -1524479015 | 28733870200 | 10076710343 | 4431073233 | 21475269600 |

Tabla 10. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45b⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 57088086720 | 31932236762 | 28733870200 | 10744451261 | | 12577924979 |
| Medida 2 | 52429857422 | 27779639791 | 28293510888 | 10744451261 | | 12325108815 |
| Medida 3 | 52429857422 | 27779639791 | 28733870200 | 10076710343 | | 12325108815 |

Tabla 11. Constantes elásticas para Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45b⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 41426060185 | -1524479015 | 28733870200 | 10744451261 | 1531731607 | 21475269600 |
| Medida 2 | 41426060185 | -2693147813 | 28293510888 | 10744451261 | 3171681366 | 22059603999 |
| Medida 3 | 41426060185 | -1524479015 | 28733870200 | 10076710343 | 4431073233 | 21475269600 |

Las constantes de las tablas 8 y 9 fueron calculadas a partir de los valores de velocidades en la dirección 1, y las constantes C_{13} de la tabla 8 y la tabla 9 son calculadas con los valores de la onda P de 45 de la dirección a y la b

respectivamente. Para el caso de las tablas 10 y 11 los valores son calculados mediante las velocidades de la dirección 2 y tal como en el primer caso, la constante C_{13} es calculada con el valor en la dirección a para la 10 y en la dirección b para la 11.

Tabla 12. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45a ⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 32327027548 | 3591891950 | 21776486017 | 12105061169 | -1405698670 | 1.4368E+10 |
| Medida 2 | 32327027548 | 3591891950 | 21776486017 | 12105061169 | -315130967.5 | 1.4368E+10 |
| Medida 3 | 31369243039 | 2634107440 | 21776486017 | 12105061169 | 401979394.9 | 1.4368E+10 |

Tabla 13. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45a ⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 22563136036 | -5600170364 | 21776486017 | 12105061169 | 4701441910 | 1.4082E+10 |
| Medida 2 | 22563136036 | -6171999563 | 21776486017 | 12105061169 | 5688843032 | 1.4368E+10 |
| Medida 3 | 22563136036 | -6171999563 | 21776486017 | 12105061169 | 5688843032 | 1.4368E+10 |

Tabla 14. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 1 y VP45b ⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 32327027548 | 3591891950 | 21776486017 | 12105061169 | -12307188347 | 1.4368E+10 |
| Medida 2 | 32327027548 | 3591891950 | 21776486017 | 12105061169 | -12307188347 | 1.4368E+10 |
| Medida 3 | 31369243039 | 2634107440 | 21776486017 | 12105061169 | -11987202369 | 1.4368E+10 |

Tabla 15. Constantes elásticas para Tambor cúbica de la Mesa de los Santos con los valores de velocidades en la dirección 2 y VP45b ⁷

| Constantes Elásticas Pa | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | C11 | C12 | C33 | C44 | C13 | C66 |
| Medida 1 | 22563136036 | -5600170364 | 21776486017 | 12105061169 | 13477059947 | 1.4082E+10 |
| Medida 2 | 22563136036 | -6171999563 | 21776486017 | 12105061169 | 13477059947 | 1.4368E+10 |
| Medida 3 | 22563136036 | -6171999563 | 21776486017 | 12105061169 | 12261508961 | 1.4368E+10 |

Para el caso de las constantes de las tablas 12 y 13 fueron calculadas a partir de los valores de velocidades en la dirección 1, y las constantes C_{13} de la tabla 12 y la

tabla 13 son calculados con los valores de la onda P de 45 de la dirección a y la b respectivamente. En las tablas 14 y 15 los valores son calculados mediante las velocidades de la dirección 2 y tal como en el primer caso, la constante C_{13} es calculada con el valor en la dirección a para la 14 y en la dirección b para la 15.

Los valores de los módulos mecánicos anisotrópicos y el grado de anisotropía para las tres muestras fueron calculados y son mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 16. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 6⁷

| Muestra Tambor 39 | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-----------|------------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ϵ | γ |
| 9.637E+29 | 7.348E+09 | 1.092E+10 | 0.271 | 0.101 | 0.068 | 4.300E+09 | 0.30 | 0.23 |

Tabla 17. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 7⁷

| Muestra Tambor 39 | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------|--------|-------|-------|-----------|------------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ϵ | γ |
| 3.710E+29 | 5.019E+09 | 7.358E+09 | -0.120 | 0.459 | 0.313 | 3.934E+09 | 0.14 | 0.22 |
| 3.821E+29 | 5.196E+09 | 7.103E+09 | -0.106 | 0.481 | 0.352 | 4.294E+09 | 0.07 | 0.18 |
| Promedio | 5.108E+09 | 7.230E+09 | -0.113 | 0.470 | 0.333 | 4.114E+09 | 0.11 | 0.20 |

Tabla 18. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 8⁷

| Muestra Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-------|-------|-------|-----------|------------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ϵ | γ |
| 6.435E+31 | 2.873E+10 | 3.923E+10 | 0.559 | 0.000 | 0.000 | 1.746E+10 | 0.49 | 0.09 |
| 5.594E+31 | 2.829E+10 | 3.771E+10 | 0.530 | 0.000 | 0.000 | 1.659E+10 | 0.43 | 0.07 |
| 5.681E+31 | 2.873E+10 | 3.771E+10 | 0.530 | 0.000 | 0.000 | 1.674E+10 | 0.41 | 0.11 |
| Promedio | 2.859E+10 | 3.822E+10 | 0.540 | 0.000 | 0.000 | 1.693E+10 | 0.44 | 0.09 |

Tabla 19. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 9⁷

| Muestra Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|--------|-------|-------|-----------|------------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ϵ | γ |
| 4.845E+31 | 2.827E+10 | 4.102E+10 | -0.045 | 0.110 | 0.076 | 1.323E+10 | 0.22 | 0.50 |
| 4.746E+31 | 2.777E+10 | 4.084E+10 | -0.074 | 0.120 | 0.082 | 1.302E+10 | 0.23 | 0.53 |
| 4.756E+31 | 2.775E+10 | 4.062E+10 | -0.054 | 0.163 | 0.111 | 1.390E+10 | 0.22 | 0.57 |
| Promedio | 2.793E+10 | 4.083E+10 | -0.058 | 0.131 | 0.090 | 1.339E+10 | 0.22 | 0.53 |

Tabla 20. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 10⁷

| Muestra Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ε | γ |
| 6.435E+31 | 2.873E+10 | 3.923E+10 | 0.559 | 0.000 | 0.000 | 1.746E+10 | 0.49 | 0.09 |
| 5.594E+31 | 2.829E+10 | 3.771E+10 | 0.530 | 0.000 | 0.000 | 1.659E+10 | 0.43 | 0.07 |
| 5.681E+31 | 2.873E+10 | 3.771E+10 | 0.530 | 0.000 | 0.000 | 1.674E+10 | 0.41 | 0.11 |
| Promedio | 2.859E+10 | 3.822E+10 | 0.540 | 0.000 | 0.000 | 1.693E+10 | 0.44 | 0.09 |

Tabla 21. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 11⁷

| Muestra Tambor cilíndrica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ε | γ |
| 4.904E+31 | 2.862E+10 | 4.128E+10 | -0.039 | 0.055 | 0.038 | 1.251E+10 | 0.22 | 0.50 |
| 4.746E+31 | 2.777E+10 | 4.084E+10 | -0.074 | 0.120 | 0.082 | 1.302E+10 | 0.23 | 0.53 |
| 4.756E+31 | 2.775E+10 | 4.062E+10 | -0.054 | 0.163 | 0.111 | 1.390E+10 | 0.23 | 0.51 |
| Promedio | 2.805E+10 | 4.092E+10 | -0.056 | 0.113 | 0.077 | 1.315E+10 | 0.23 | 0.51 |

Tabla 22. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 12⁷

| Muestra Tambor cúbica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ε | γ |
| 2.236E+31 | 2.167E+10 | 3.186E+10 | 0.109 | -0.058 | -0.039 | 9.146E+09 | 0.24 | 0.09 |
| 2.247E+31 | 2.177E+10 | 3.192E+10 | 0.111 | -0.013 | -0.009 | 9.686E+09 | 0.24 | 0.09 |
| 2.127E+31 | 2.177E+10 | 3.114E+10 | 0.084 | 0.017 | 0.012 | 9.745E+09 | 0.22 | 0.09 |
| Promedio | 2.173E+10 | 3.164E+10 | 0.101 | -0.018 | -0.012 | 9.526E+09 | 0.23 | 0.09 |

Tabla 23. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 13⁷

| Muestra Tambor cúbica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ε | γ |
| 9.158E+30 | 1.917E+10 | 1.952E+10 | -0.307 | 0.282 | 0.277 | 7.796E+09 | 0.02 | 0.08 |
| 8.397E+30 | 1.783E+10 | 1.829E+10 | -0.363 | 0.356 | 0.347 | 7.858E+09 | 0.02 | 0.09 |
| 8.397E+30 | 1.783E+10 | 1.829E+10 | -0.363 | 0.356 | 0.347 | 7.858E+09 | 0.02 | 0.09 |
| Promedio | 1.828E+10 | 1.870E+10 | -0.345 | 0.331 | 0.324 | 7.837E+09 | 0.02 | 0.09 |

Tabla 24. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 14⁷

| Muestra Tambor cúbica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ε | γ |
| 1.377E+31 | 1.334E+10 | 2.493E+10 | -0.133 | -0.640 | -0.343 | 3.724E+09 | 0.24 | 0.09 |
| 1.377E+31 | 1.334E+10 | 2.493E+10 | -0.133 | -0.640 | -0.343 | 3.724E+09 | 0.24 | 0.09 |
| 1.302E+31 | 1.332E+10 | 2.414E+10 | -0.160 | -0.639 | -0.353 | 3.610E+09 | 0.22 | 0.09 |
| Promedio | 1.334E+10 | 2.466E+10 | -0.142 | -0.640 | -0.346 | 3.686E+09 | 0.23 | 0.09 |

Tabla 25. Determinante y módulos elásticos calculados a partir de la tabla 15⁷

| Muestra Tambor cúbica de la Mesa de los Santos | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------|----------|
| Determinante | Ev (Pa) | Eh (Pa) | v1 | v2 | v3 | K (Pa) | ε | γ |
| 1.727E+29 | 3.615E+08 | 5.576E+08 | -0.980 | 1.226 | 0.794 | 9.279E+08 | 0.02 | 0.08 |
| -1.816E+29 | -3.856E+08 | -5.865E+08 | -1.020 | 1.250 | 0.822 | -1.047E+09 | 0.02 | 0.09 |
| 1.616E+30 | 3.432E+09 | 4.740E+09 | -0.835 | 1.033 | 0.748 | 5.162E+09 | 0.02 | 0.09 |
| Promedio | 1.136E+09 | 1.570E+09 | -0.945 | 1.170 | 0.788 | 1.681E+09 | 0.02 | 0.09 |

Como se observa en las tablas 16 y 17 hay algunas casillas en blanco que corresponden a datos que no pudieron ser calculados porque corresponden a valores de velocidades que fue posible medirlos. Como se observa en las tablas las muestras cilíndricas presentan mayor grado de anisotropía que la muestra cúbica; sin embargo, en general las muestra de afloramiento presenta mayor anisotropía que las dos muestras de la Mesa de los Santos.

La razón por la cual esta muestra es menos homogénea que las de la Mesa de los Santos se debe a que estas dos muestras son mas compactas que la de afloramiento, quiere decir esto que las muestras de profundidad presentan menos espacio poroso lo cual implica que las velocidades de onda encuentran menos focos de dispersión y por tanto se propagan con mayor facilidad. De esta manera las ondas se propagan y se comportan de manera similar disminuyendo el grado de anisotropía.

Por otro lado como ya se ha mencionado la muestra cúbica es la que menos anisotropía presenta, esto obedece a la misma geometría de la muestra, ya que

como la muestra presenta todas sus superficies completamente planas esto permite una mejor propagación de la onda en el espacio poroso, además que es una muestra bastante compacta, lo cual da un indicio que en los métodos acústicos los efectos de borde juegan un papel primordial en los resultados obtenidos.

También se noto que con la muestra cúbica la lectura de los tiempos de llegada de la onda es mucho más clara, de igual manera era más fácil diferenciar entre la onda P y la onda S, lo cual es más práctico y le da precisión a las mediciones.

Otro punto para tener en cuenta es que en la mayoría de los resultados, teniendo en cuenta las tres muestras, la anisotropía de onda S presenta valores bastante bajos, lo cual sustenta aun mas que la formación Tambor puede ser considerada transversalmente isotrópica.

La importancia de la tercera medición que consistía en invertir la trayectoria de medición, es decir, el cristal que actuaba como emisor en las dos primeras mediciones sería receptor y el receptor sería emisor, radica en verificar si la propagación de la onda se comportaba de igual manera independiente de la dirección de la trayectoria del rayo, sin embargo, con los resultados se observó que la dirección de la trayectoria si tiene algún efecto, esto no se ve claramente en los resultados numéricos, pero si en la forma de la onda. Ver figura 34.

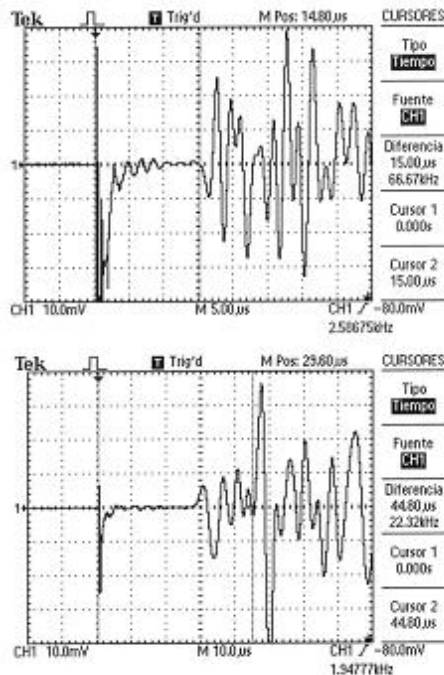


Figura 35. La onda superior corresponde a las trayectorias 1 y 2 y la inferior corresponde a la tercera trayectoria²²

Como se observa en la figura 34 el cambio en la trayectoria se ve reflejado en la forma de la onda, para la tercera medición la onda es mas clara y presenta menos ruido al comienzo de la señal lo cual facilita la lectura de los tiempos de onda. Aunque se puede decir que el cambio en trayectoria no afecta significativamente el valor numérico de la velocidad, si presenta efecto en la energía de la onda lo cual es muy importante ya que facilita la lectura de los tiempos de viaje y por tanto da mayor credibilidad a los resultados obtenidos.

Por otro lado como se puede observar en la tabla 1 de propiedades, la muestra de tambor afloramiento Ruitoque es mucho más porosa que las muestras de la Mesa de los Santos, prácticamente la primera muestra es el doble de porosa que las muestras de la Mesa de los Santos y como ya ha sido mencionado debido a que la muestra del afloramiento Ruitoque es mucho más porosa, está presenta más espacio vacío lo cual se va a convertir en focos de dispersión de la onda, por ello

se esperaría que las velocidades de las muestras del afloramiento sean menores que las velocidades de las muestras de la Mesa de los Santos. Este comportamiento se ve claramente evidenciado en las tablas 2, 3 y 4.

Otro punto que se debe tener en cuenta y respalda los resultados numéricos es el análisis geológico realizado a las muestras, estos análisis mostraron que todas presentan un alto porcentaje de cuarzo, estos minerales presentan simetría hexagonal lo cual es una de las principales características que presentan las rocas con isotropía transversal. Por otro lado por lo general las areniscas que son cortadas perpendiculares a los planos de asentamiento presentan este tipo de anisotropía. Con estos análisis y los resultados numéricos se muestra claramente que la formación Tambor puede ser tratada como transversalmente isotrópica.

Para estas pruebas realizadas el tensor de esfuerzos y el tensor de deformación son ceros ya que no se esta aplicando ningún tipo de carga y por tanto no se obtiene ninguna deformación, esto debido a que las pruebas fueron realizadas a condiciones atmosféricas. Sin embargo, los módulos mecánicos por ser propiedades inherentes de la roca pudieron ser calculados, pero esto solo se puede realizar con pruebas dinámicas (acústicas) ya que con pruebas estáticas si no existe una curva de esfuerzo contra deformación los módulos no pueden ser calculados.

La principal ventaja del procedimiento aplicado es que permite observar la variación de las velocidades en tres direcciones diferentes de la roca, además que permite verificar el comportamiento de la onda en la misma dirección y cambiando la trayectoria del rayo.

Otro punto importante es que realizando esta prueba se inician los análisis sin conocer el tipo de anisotropía presentada por la roca y de esta manera con base a

los resultados y a las variaciones es posible establecer que tipo de anisotropía presenta la roca estudiada, y así se caracteriza la roca con mayor propiedad.

La desventaja que presenta esta técnica está en la cantidad de cristales piezoeléctricos que deben ser empleados, para este caso son 22 cristales entre cristales P y S (10 y 12 respectivamente) en total para cada muestra probada, esta cantidad de cristales genera mayor cantidad en gastos de materiales para el montaje de la prueba, lo cual se ve reflejado en costos y en disponibilidad, ya que no siempre los materiales están a la mano.

4. METODOLOGIA SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

Con la primera fase experimental realizada y con los resultados que muestran que la formación Tambor es transversalmente isotrópica se procede a realizar la segunda fase experimental, la cual tiene como objetivo realizar una prueba acústica con una muestra sometida a un campo de esfuerzos, de esta manera es posible obtener el tensor de esfuerzos y observar los comportamientos de las velocidades de onda, las constantes elásticas, los módulos elásticos y los grados de anisotropía con el esfuerzo aplicado.

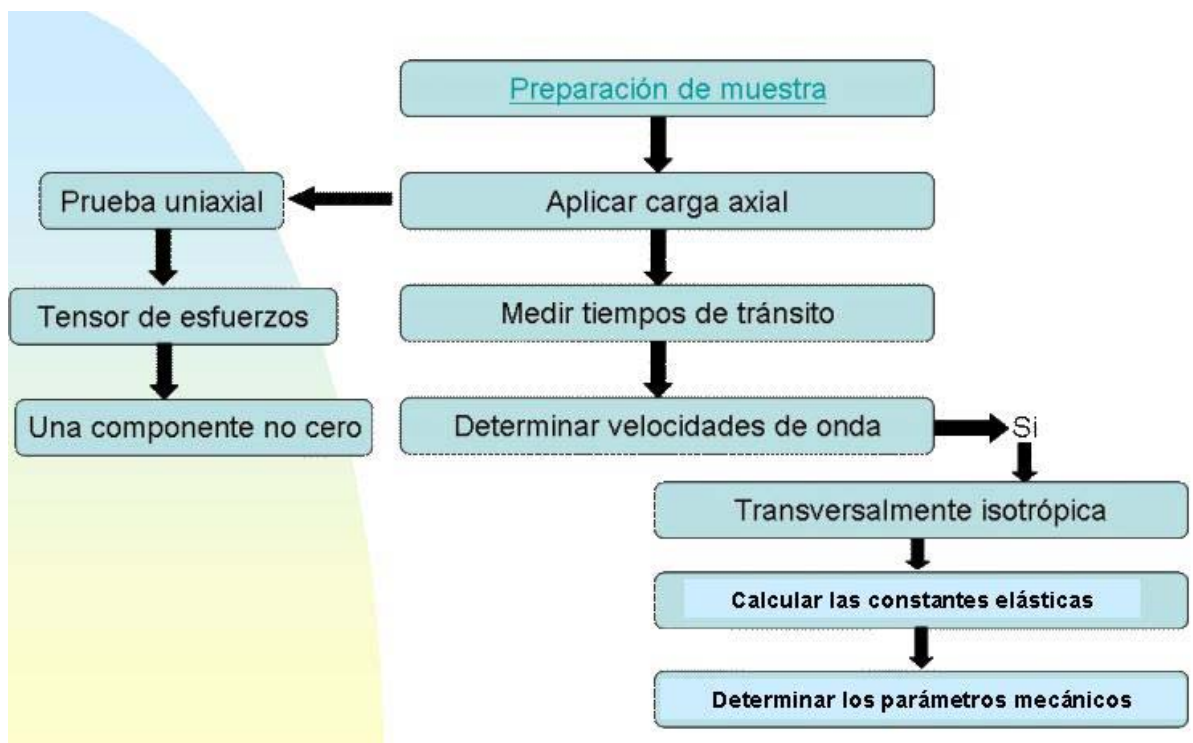


Figura 36. Diagrama de flujo de la metodología de la segunda fase experimental⁷

4.2. MUESTRAS ANALIZADAS

En primera instancia para realizar este estudio se seleccionaron tres muestras de la formación Tambor, provenientes del Afloramiento Ruitoque, ubicado en el departamento de Santander.

Los tres plugs son de 1 ½ in de diámetro, con los cuales se realizaron pruebas acústicas uniaxiales para las muestras Tambor 33, Tambor 43 y Tambor 42. Para la primera se incrementó carga hasta 90 kN, para la segunda muestra la carga se aumentó hasta 94 kN y por último para Tambor 42 se tuvo un límite de carga de 50 kN. Para los dos primeros casos las muestras alcanzaron el valor límite de resistencia a la compresión (UCS) y por tanto fallaron antes de culminar la prueba, debido a esto se rediseñó el procedimiento aplicado y se fijó la carga al valor límite aplicado para la última muestra. En la Tabla 26 se muestran la longitud y diámetro promedio de cada una de las muestras trabajadas.

Tabla 26. Longitud y diámetro de las muestras usadas en las pruebas⁷

| Propiedad | Muestras afloramiento | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| | Tambor 33 | Tambor 42 | Tambor 43 |
| Longitud m | 0.07824 | 0.0746 | 0.07429 |
| Diámetro m | 0.03817 | 0.03838 | 0.03823 |
| Densidad de grano kg/m ³ | 2634 | 2622 | 2619 |
| Porosidad % | 10.4 | 11.7 | 10.5 |

4.1. DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA EMPLEADA

Tal como en el primer caso, el primer paso consiste en la preparación de los cristales acústicos, este procedimiento es completamente igual al descrito en la sección 2.3.1.

4.1.1. Preparación de las muestras

Las muestras son preparadas tal como se describió en la sección 2.3.2., sin embargo, a diferencia de la primera fase experimental, a estas muestras solo se le colocan cristales en la superficie lateral, la configuración utilizada es la siguiente:

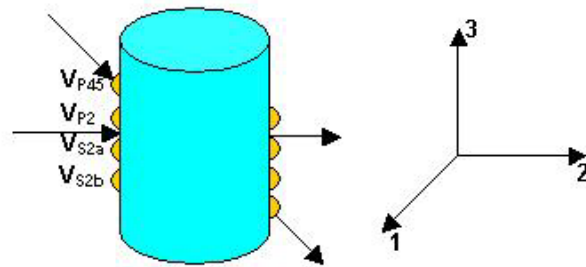


Figura 37. Configuración de cristales segunda fase experimental⁷

En las caras superior e inferior de la muestras no se colocan cristales directamente sobre la muestra, en estos casos donde se realizan pruebas acústicas donde la muestra es sometida a un campo de esfuerzos se utilizan endcaps para este tipo de pruebas, estos contienen en su interior dos cristales, uno P y uno S (ver figura 36) y permiten la propagación de la onda en dirección vertical.



Figura 38. Endcaps para pruebas acústicas²¹

Como se observa en la figura los *endcaps* (encapsulados que contienen los cristales piezoeléctricos) solo contienen dos cristales, por tanto en este caso solo

se tiene una velocidad S que se propaga en dirección vertical. En esta fase experimental debido a esta limitación con respecto al número de cristales S , se supone que esta onda corresponde al promedio del valor de velocidad si existieran las dos ondas ortogonalmente polarizadas, el promedio de velocidad es el valor requerido para calcular una de las constantes de la matriz de rigidez.

Esta suposición está sustentada en que cuando las muestras presentan isotropía transversal, las velocidades S ortogonalmente polarizadas en el plano vertical deben ser aproximadamente iguales, y basados en el estudio experimental preliminar donde se definió que Tambor puede ser considerada transversalmente isotrópica, entonces la suposición realizada es válida. El montaje final de la muestra con los endcaps es mostrado en la figura 37.

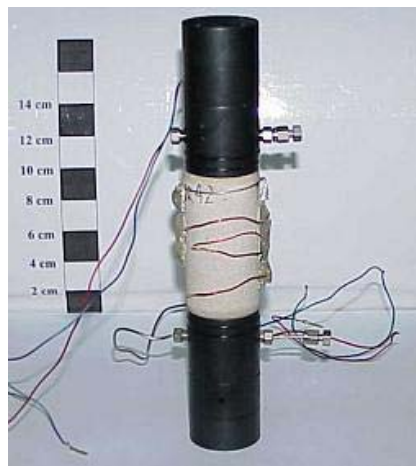


Figura 39. Montaje de la roca mas los endcaps de acústica⁷

4.2.2. Metodología prueba acústica uniaxial

Para realizar esta prueba acústica donde la muestra es sometida a un campo de esfuerzos, se lleva a cabo una prueba uniaxial, es decir, sobre la muestra se aplica solo un esfuerzo, en este caso se aplica un esfuerzo axial simulando el esfuerzo vertical al cual es sometida una roca en profundidad.

- *Descripción del equipo*

Para la ejecución de las pruebas se utiliza el equipo “Rock Mechanics Test System Model 815, el cual a consta de las siguientes partes (ver figura 38):

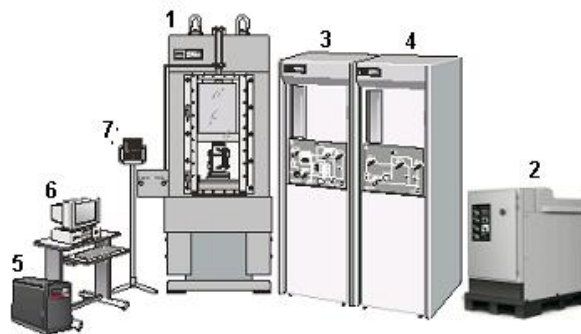


Figura 40. Rock mechanics test system model 815²⁴

El marco de carga (1) es la estructura madre del sistema, sobre ella se arman las diferentes configuraciones que permiten realizar pruebas uniaxiales, triaxiales, brazilian y dureza de fractura, esta estructura soporta toda la carga axial a la que es sometida una muestra (aprox. 345.000 Psi, para muestras de 1 ½”). La figura 39, muestra una descripción detallada del marco de carga y en la Tabla 27 se presentan sus características generales.

²⁴ Referenciado en MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems. Technical description.

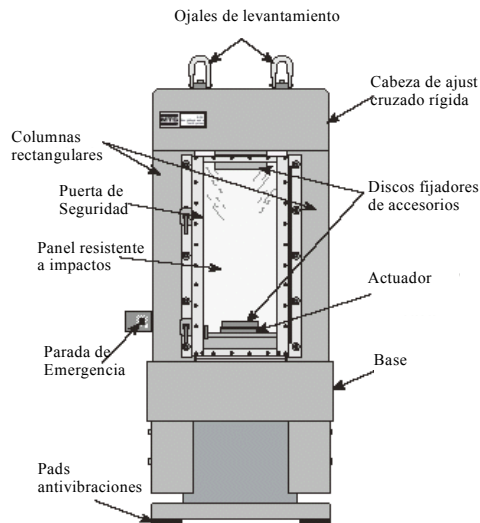


Figura 41. Marco de carga²⁴

Tabla 27. Características marco de carga²⁴

| Marco de Carga | | |
|------------------|---------|----------------------|
| Resistencia (kN) | | Carrera del actuador |
| Compresión | Tensión | mm |
| 2700 | 1350 | 100 |

La unidad de potencia hidráulica (2) es la encargada de suministrar la potencia hidráulica a los componentes del sistema que lo requieren (marco de carga, intensificador de presión de poro, intensificador de presión de confinamiento). Su presión máxima de salida es 3000 psi a un caudal máximo de entrega de 26.5 litros por minuto.

Las funciones principales del intensificador de presión de confinamiento (3) son, almacenar el fluido hidráulico usado como agente confinante en la celda triaxial e incrementar la presión suministrada por la Unidad de potencia de 3,000 psi hasta valores de 20,000 psi.

Las funciones del intensificador de presión de poro (4) son, almacenar el fluido usado para llenar y presurizar el volumen poroso de la muestra e incrementar la

presión suministrada por la unidad de potencia de 3,000 psi hasta valores de 12,000 psi.

La caja de controladores digitales (5) es donde se ubican las tarjetas controladoras de todas las unidades del “Rock Mechanics Test System Model 815”, sirve como puente de comunicación entre tarjetas y como interfase con la estación de control remoto y el computador administrador del sistema.

El computador (6) permite el control automático del equipo y desde él se controlan todas las funciones del “Rock Mechanics Test System Model 815” a través de un software especial.

La estación de control remota (7) es una caja de controles utilizada para la manipulación manual del equipo y generalmente se ubica cerca del marco de carga y controla las funciones básicas del “Rock Mechanics Test System Model 815”.

Los anteriores son los principales componentes del sistema de pruebas para mecánica de rocas, para el caso de las pruebas uniaxiales los intensificadores de presión de confinamiento y de presión de poro no son utilizados ya que no se requieren aplicar ninguno de estos esfuerzos.

- *Procedimiento prueba uniaxial*

A la probeta de ensayos acústicos se le colocan los extensómetros axial y circunferencial para medir las deformaciones de la muestra durante la carga y todo el montaje se coloca sobre la mesa de la celda triaxial (ver figura 40).

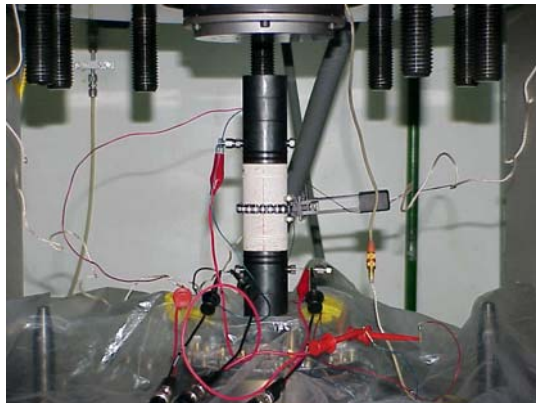


Figura 42. Montaje de la muestra con los extensómetros⁷

La base donde reposa la muestra se sube hasta que el endcap superior haga contacto con el plato de la celda de carga ajustando una carga base de 0.5 kN.

Los cables de los cristales de las ondas que serán medidas, emisor y receptor, deben ser conectados al pulsador y al osciloscopio, respectivamente; con el fin de medir las ondas.

Posteriormente, se aumenta la carga sobre la muestra, a una velocidad constante del pistón de desplazamiento axial, en 0.00017 mm/seg, hasta alcanzar la carga objetivo, que para este caso era 50 kN.

A medida que se va aumentando la carga se registran los valores de deformación axial y circunferencial (diametral) y a su vez se deben ir recolectando los tiempos de onda leídos. Para esta prueba acústica las deformaciones registradas corresponden a los ciclos de velocidades verticales.

Se debe tener en cuenta que cuando se utilizan los endcaps de acústica, la onda se propaga a través de una porción de metal, luego pasa a través de la roca y luego atraviesa otra porción de metal; en este caso para obtener el tiempo real de tránsito a través de la roca se deben realizar las mediciones de los tiempos de

onda a través de los endcaps solos y esto valor restarlo al valor leído del montaje completo.

El procedimiento a partir de las conexiones de los cables debe ser repetido para cada par de cristales involucrados en la prueba, para este caso se tenían seis pares de cristales, tres pares para onda P y tres pares para onda S. Para cada par de cristal se realizaron dos ciclos de carga hasta 50 kN y de descarga hasta 1 kN.

- *Procedimiento para cálculos*

El procedimiento para cálculos de las velocidades de onda y de las constantes elásticas para la determinación de los parámetros mecánicos anisotrópicos fue descrito en la sección 2.3.4. y como ya ha sido mencionado además de los tiempos de onda registrados, también se tienen datos de deformación axial y circunferencial.

Con los datos de deformación se obtiene el tensor de deformación para la muestra estudiada para cada uno de los esfuerzos aplicados. Así, además de obtener el tensor de deformación, estos datos son indispensables para el cálculo de los módulos elásticos estáticos de la formación en estudio. Hallar estos datos estáticos es importante ya que permite correlacionar los datos obtenidos por medio de deformaciones (estáticos) y los resultados obtenidos mediante la aplicación de métodos acústicos (dinámicos).

Para hallar los módulos elásticos estáticos es necesario graficar una curva de esfuerzo vs. deformación, la pendiente de la curva de esfuerzo axial vs. deformación axial corresponde al modulo de Young, y el cociente entre la pendiente de la curva de esfuerzo vs. deformación circunferencial y el módulo de Young corresponde a la relación de Poisson.

El tensor de esfuerzos es obtenido a partir del campo de esfuerzos aplicado, los datos necesarios para este caso son la fuerza aplicada y el área de la muestra. Con estos datos el tensor de esfuerzos puede ser determinado.

5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES DE LA SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

En esta fase experimental se llevo a cabo una prueba uniaxial acústica, donde la muestra fue sometida a dos ciclos de carga desde 1 kN hasta 50 kN y de descarga desde 50 kN hasta 1 kN, por cada par de cristales utilizados. Para el caso de la lectura en sentido vertical, las dos ondas P y S fueron leídas simultáneamente y a su vez se realizaron las lecturas de las deformaciones, y de esta manera realizar mediciones estáticas y dinámicas al mismo tiempo.

Para cada ciclo de carga y descarga se midieron las velocidades de onda en dirección vertical, horizontal y a 45° de los planos de depositación. Con base en estas lecturas se observo el comportamiento de las velocidades con respecto a la fuerza aplicada. Para mostrar estos resultados las velocidades de onda fueron agrupadas por carga y descarga y se muestran a continuación

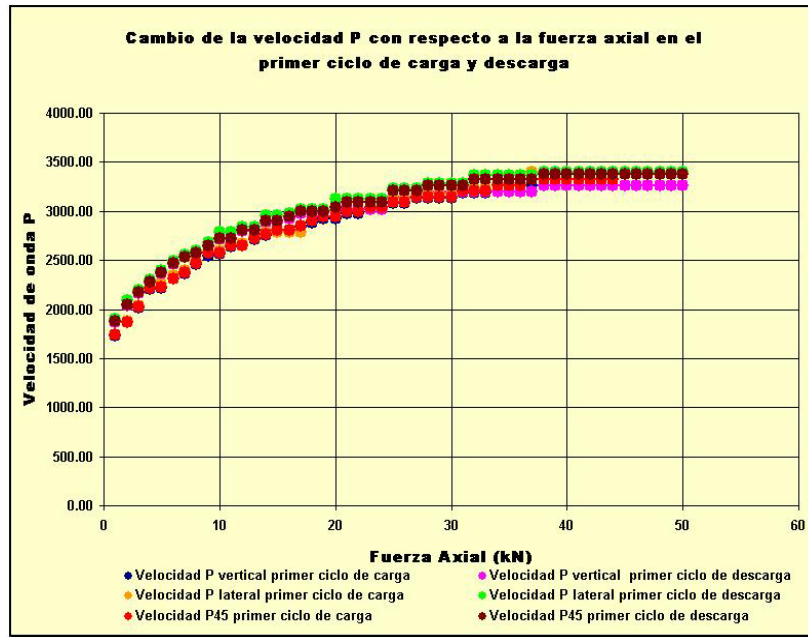


Figura 43. Comportamiento de la velocidad P con respecto a la fuerza axial primer ciclo de carga y descarga⁷

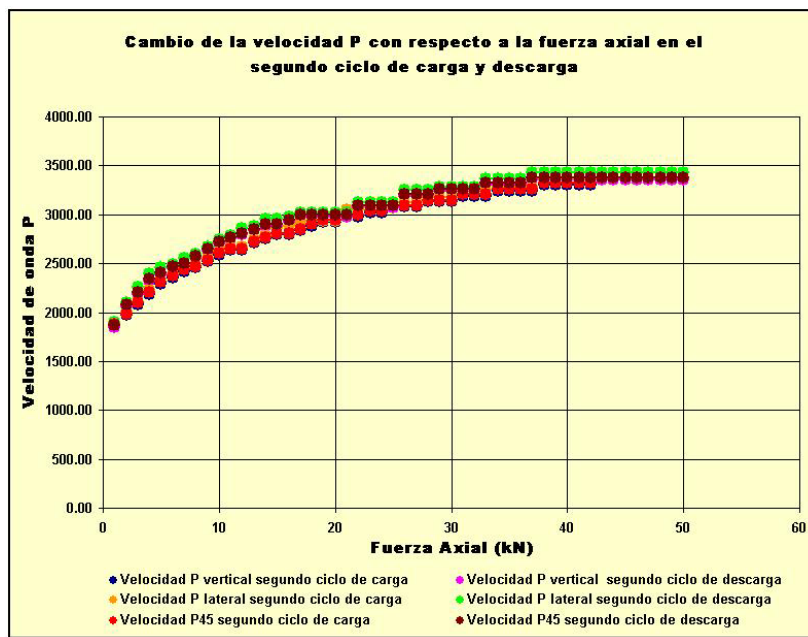


Figura 44. Comportamiento de la velocidad P con respecto a la fuerza axial segundo ciclo de carga y descarga⁷

Las figuras 41 y 42 muestran el comportamiento de la velocidad P en las tres direcciones medidas como función de la fuerza axial aplicada sobre la muestra. Como se puede observar a simple vista la velocidad tiende a aumentar a medida que la fuerza aumenta esto obedece a que con el aumento en la fuerza el espacio poroso tiende a reducirse y por tanto la muestra se hace mas compacta, facilitando de esta manera la transmisión de la onda a través de la roca.

En las figuras también es evidente que la velocidad tiene un rápido ascenso para los valores bajos de carga, aproximadamente alrededor de los primeros 25 kN, después de este valor el aumento es mucho mas lento y tiende a estabilizarse alrededor de un valor ya que los cambios en los tiempos de tránsito de las ondas son poco significativos. Este resultado muestra que los cambios mas bruscos que sufre la estructura de la roca ocurren durante los primeros valores de ascenso en la carga, después de esto llega un punto en que la carga no genera ningún cambio significativo.

El cambio más evidente se nota en que con la fuerza axial el espacio poroso se reduce con facilidad y por tanto la velocidad tiende a aumentar con tanta rapidez, sin embargo, llega un punto en que el espacio no puede reducirse más y por tanto la velocidad se estabiliza alrededor de un valor, mostrando que la fuerza ya no ejerce ningún efecto significativo en el espacio poroso. Este comportamiento es bastante evidente en ambos ciclos de carga y descarga.

Como se puede observar en ambas figuras los valores de velocidades son bastante aproximados en las tres direcciones en que fueron medidas y muestran para todos los ciclos comportamientos similares, lo cual muestra que aparentemente el grado de anisotropía con respecto a la propagación de la onda P tiende a ser bastante bajo.

Sin embargo, a pesar que la anisotropía aparentemente es bastante baja, se presenta algo de histéresis para cada ciclo de carga y descarga observado de manera individual para cada una de las velocidades medidas, por ejemplo, si se observa solo la velocidad P vertical para un ciclo de carga y descarga se evidencia este comportamiento.

La histéresis en los datos lo que muestra es que efectivamente la naturaleza de la roca se ve afectada con mucha rapidez durante el ciclo de carga y para la descarga la roca no alcanza a recuperarse con la misma rapidez, por ello se presenta la variación para los dos comportamientos.

Después de analizar el comportamiento de la onda P, a continuación en las siguientes figuras se muestra el comportamiento de la onda S.

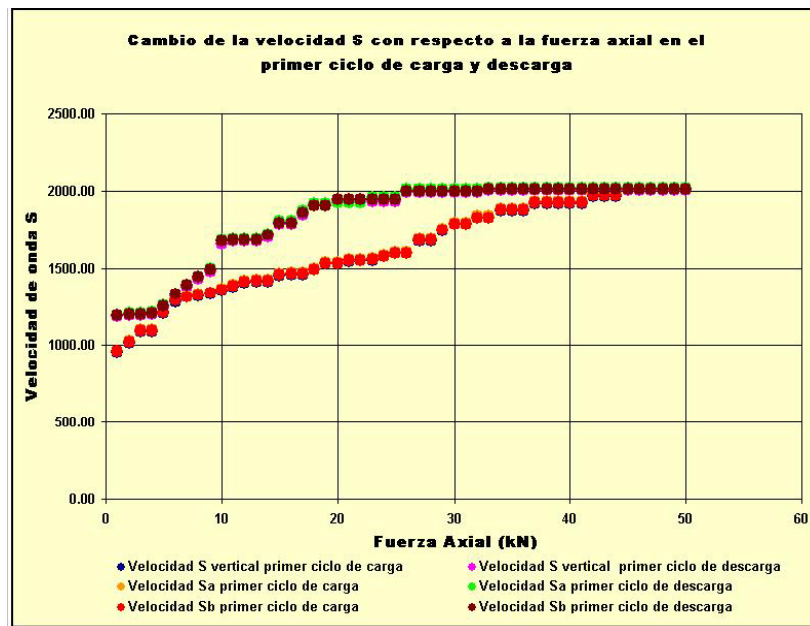


Figura 45. Comportamiento de la velocidad S con respecto a la fuerza axial primer ciclo de carga y descarga⁷

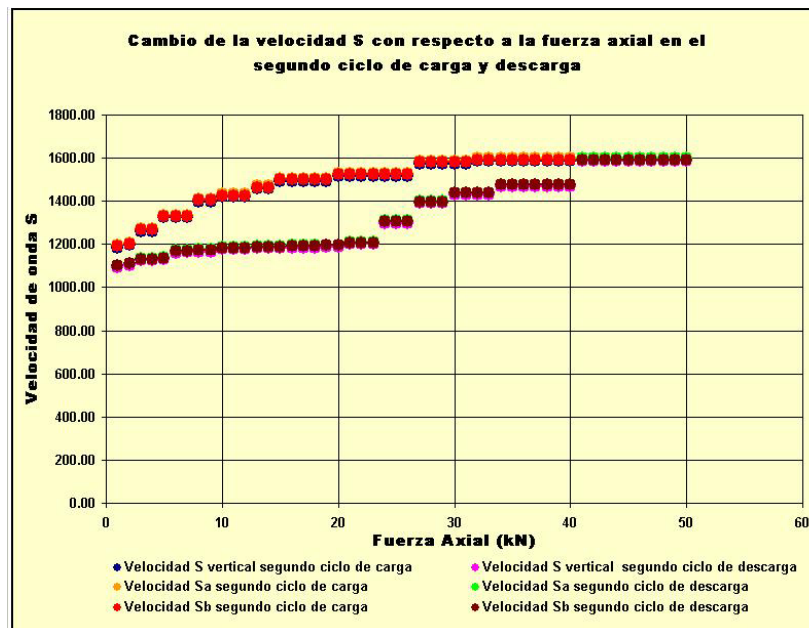


Figura 46. Comportamiento de la velocidad S con respecto a la fuerza axial segundo ciclo de carga y descarga⁷

De manera similar como en el caso de la velocidad compresional, los resultados de las velocidades de corte muestran valores similares para las direcciones medidas. Este comportamiento es bastante importante ya que permite sustentar que Tambor puede ser considerada transversalmente isotrópica, ya que las diferencias entre las ondas leídas son poco evidentes.

Sin embargo al observar el comportamiento de la onda S en conjunto para todos los ciclos de carga y descarga, es evidente que la histéresis en los resultados es bastante marcada. Como puede ser notado en las figuras existe una fuerte variación entre el comportamiento de las velocidades con respecto a la presión observado en los primeros ciclos de carga y descarga al observado en los segundos ciclos. Es posible que la histéresis tan marcada en las velocidades de corte obedezca a la forma como éstas se propagan en el medio poroso, ellas se propagan en sentido perpendicular al sentido del movimiento y por tanto esto influye en el comportamiento de la onda en cada uno de los ciclos.

En el anexo 1 se muestran las tablas con los resultados de las velocidades medidas para cada ciclo de carga y descarga en todas las direcciones.

Después que las velocidades de onda fueron calculadas se procedió a calcular los valores de las constantes elásticas que componen la matriz de rigidez, de igual manera que en el caso de las velocidades, las constantes fueron graficadas en función de la fuerza axial aplicada y se observó el comportamiento presentado en las siguientes figuras:

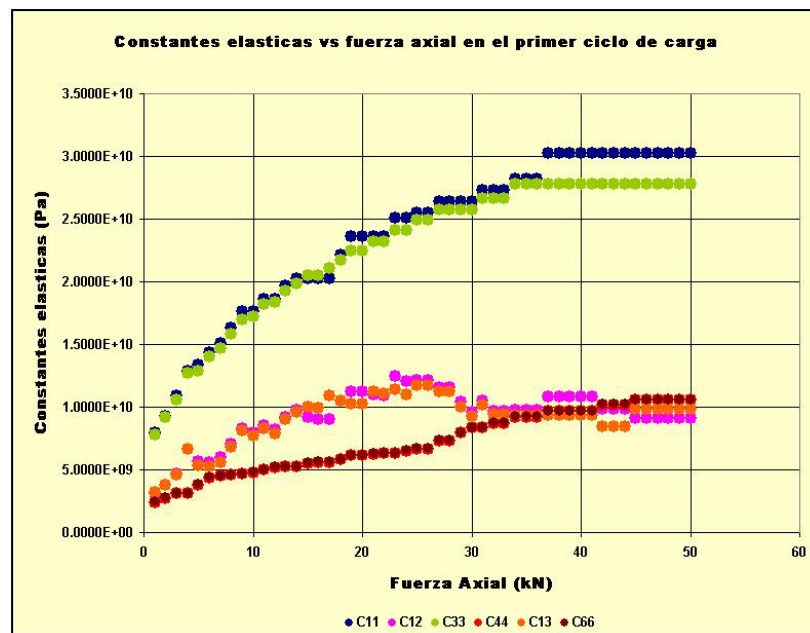


Figura 47. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Primer ciclo de carga⁷

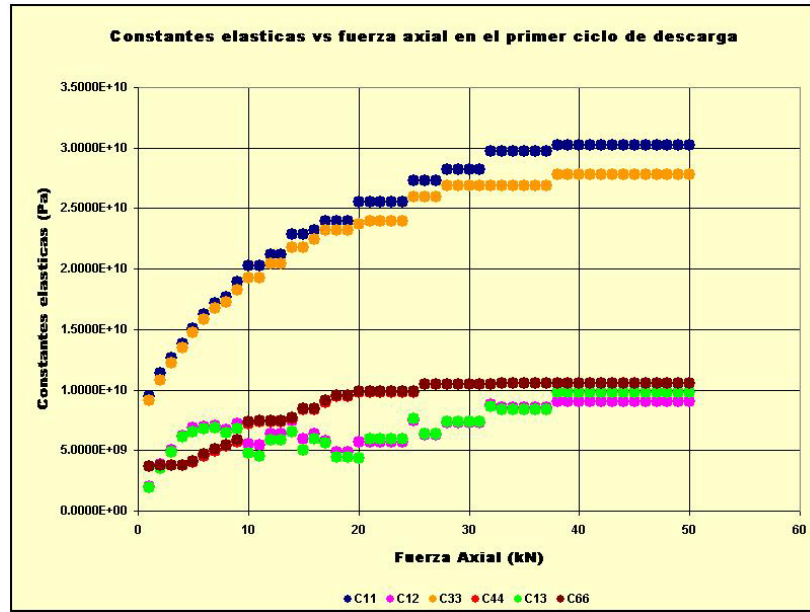


Figura 48. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Primer ciclo de descarga⁷

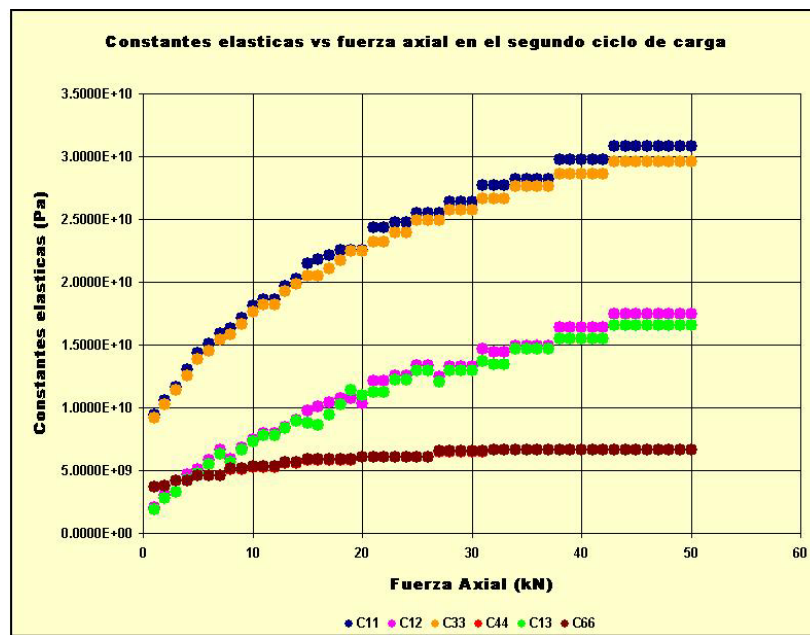


Figura 49. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Segundo ciclo de carga⁷

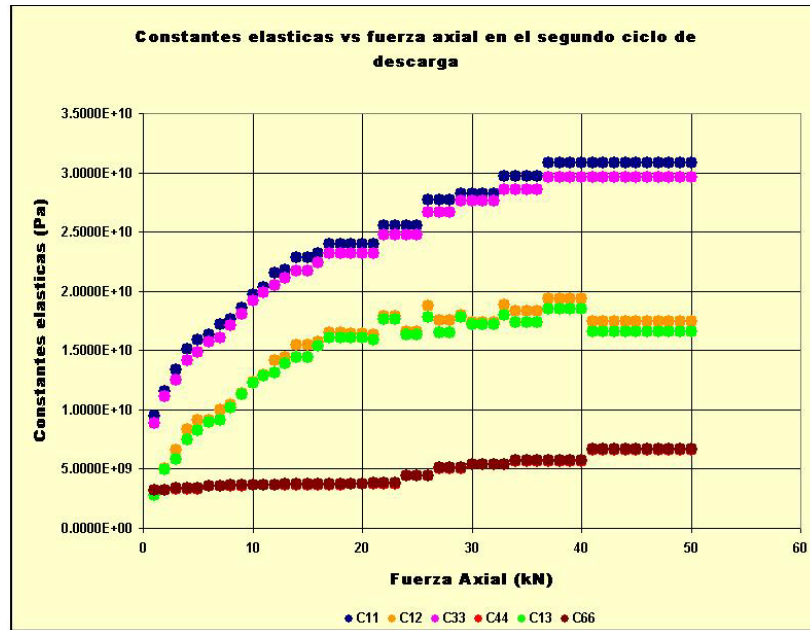


Figura 50. Comportamiento de las constantes elásticas en función de la fuerza axial – Segundo ciclo de descarga⁷

Como se describió en los fundamentos teóricos las constantes elásticas que conforman la matriz de rigidez son funciones directas de las velocidades de onda medidas, por tanto se espera que su comportamiento en función de la fuerza axial sea similar al de las velocidades.

Este comportamiento es claro en las figuras mostradas donde se nota que las constantes elásticas aumentan con la fuerza axial y llegan a un punto donde tienden a estabilizarse tal como sucede con las velocidades de onda.

Es evidente que los resultados muestran histéresis como consecuencia también de su dependencia directa con las velocidades de onda. Las tablas de resultados son mostrados en el anexo 2.

A pesar que las constantes elásticas no representan el comportamiento mecánico de las rocas, estas son fundamentales para la determinación de las propiedades

mecánicas las cuales si describen dicho comportamiento; además de esto, estas constantes permiten determinar el grado de anisotropía para las ondas P y S en las muestras estudiadas. En la tabla 28 se muestran los grados de anisotropía promedios para la muestras probada para cada ciclo de carga y descarga:

Tabla 28. Valores promedios del grado de anisotropía de la onda P y S⁷

| Ciclo | Anisotropía de onda P | Anisotropía de onda S |
|------------------|-----------------------|-----------------------|
| Primera carga | 0.0200 | 0.0030 |
| Primera descarga | 0.0315 | 0.0045 |
| Segunda carga | 0.0168 | 0.0043 |
| Segunda descarga | 0.0198 | 0.0056 |

La tabla muestra que el grado de anisotropía para la onda S es aproximadamente menor al 4% y para el caso de la onda P menor del 6%, esto demuestra que con la aplicación de la fuerza axial la muestra es mucho mas compacta y por tanto la transmisión de las ondas en todas las direcciones medidas tienden a ser muy similares mostrando estos porcentajes en grado de anisotropía bajos con respecto a las medidas realizadas en la primera fase experimental donde las pruebas se hicieron bajo condiciones atmosféricas.

Con este comportamiento se tiene una mayor certeza que las muestras probadas no presentan un alto grado de anisotropía y por tanto pueden ser tratadas como transversalmente isotrópicas, el cual es el caso de anisotropía mas sencillo. En el anexo 3 se muestran todos los resultados en forma de tablas.

Después de obtener las constantes elásticas, determinar el grado de anisotropía para cada una de las ondas y verificar que efectivamente la muestra presenta grados de anisotropía bajos que permitan determinar los parámetros mecánicos a partir de las relaciones para isotropía transversal, se realizó la aplicación de estas relaciones y los resultados son mostrados a continuación.

Para la prueba realizada se determinaron los módulos elásticos dinámicos. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de los parámetros mecánicos para cada uno de los ciclos.

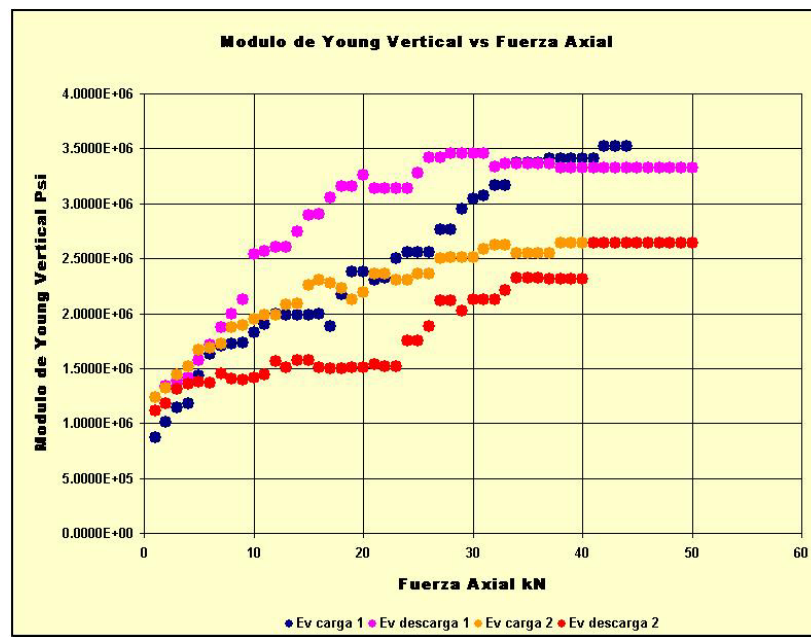


Figura 51. Módulo de Young vertical⁷

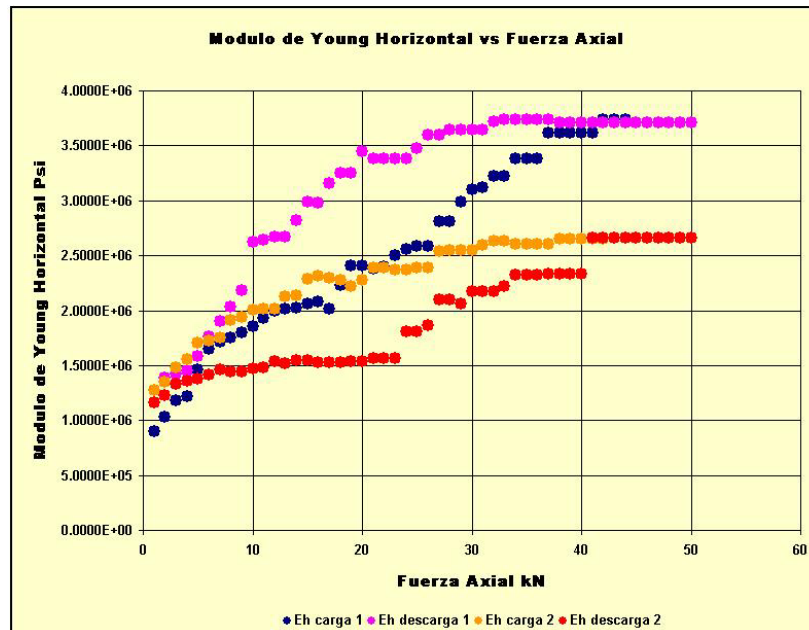


Figura 52. Módulo de Young horizontal⁷

En las figuras 49 y 50 se muestra el comportamiento de los módulos de Young vertical y horizontal con respecto a la fuerza axial, estas gráficas muestran que los módulos tienden a aumentar con la fuerza y lo cual es completamente normal y la literatura muestra comportamientos similares para arenas bastante porosas.

Como se explicó en la definición el modulo de Young es una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, estas gráficas indican que para los primeros rangos de esfuerzo axial la naturaleza de la roca es fuertemente afectada y por tanto el modulo de Young tiende a ser un valor creciente y variable; sin embargo para los altos rangos de fuerza este valor tiende a estabilizarse representando que a partir de ese punto la relación esfuerzo-deformación se mantiene. Tal como se observa en las figuras 49 y 50 las mayores variaciones se presentan en los dos primeros ciclos de carga, en los dos últimos existe variación en los primeros rangos de fuerza pero estos ya no son tan pronunciados como en los primeros casos.

Si se observan las dos figuras anteriores se puede notar que el comportamiento de las dos gráficas es muy similar, debido a esto se graficaron estos módulos uno en función del otro, el resultado es mostrado en la siguiente figura:

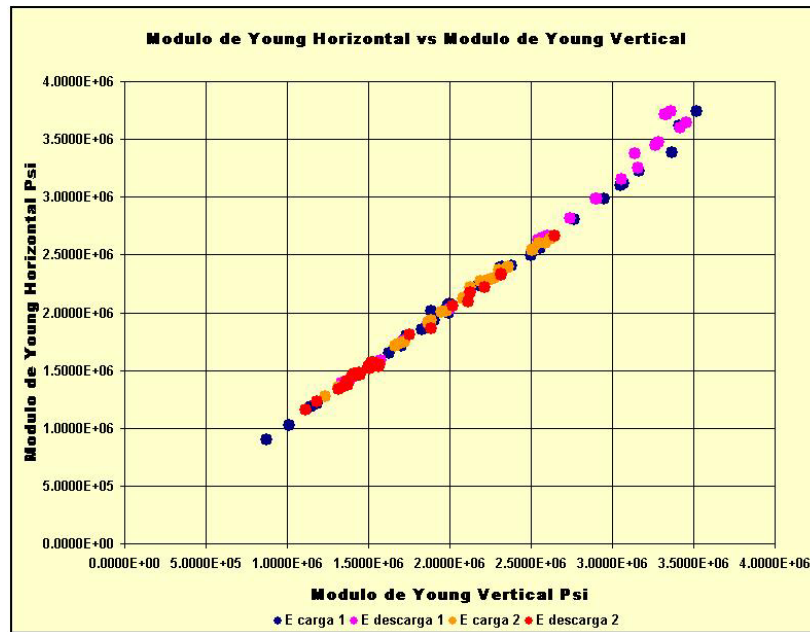


Figura 53. Relación módulo de Young horizontal a módulos de Young vertical⁷

La figura 51 muestra una tendencia completamente lineal entre el modulo de Young horizontal y el modulo de Young vertical, y se espera que cuando se tenga una muestra isotrópica debe existir variación en los resultados, sin embargo, debido a que esta muestra presento valores bajos de anisotropía el modulo de Young tiende a ser el mismo en cualquiera de las dos direcciones.

Las relaciones de Poisson anisotrópicas también fueron calculadas y son mostradas en las siguientes figuras:

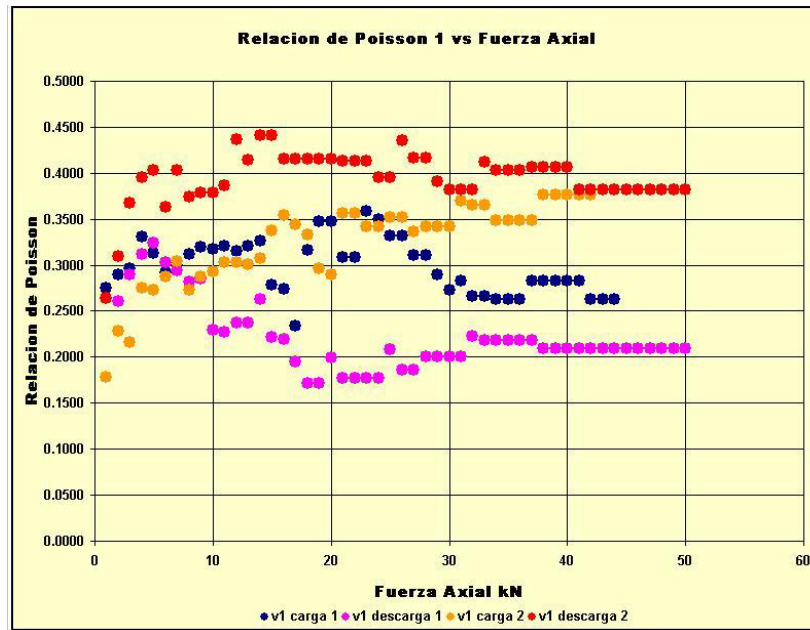


Figura 54. Relación de Poisson 1⁷

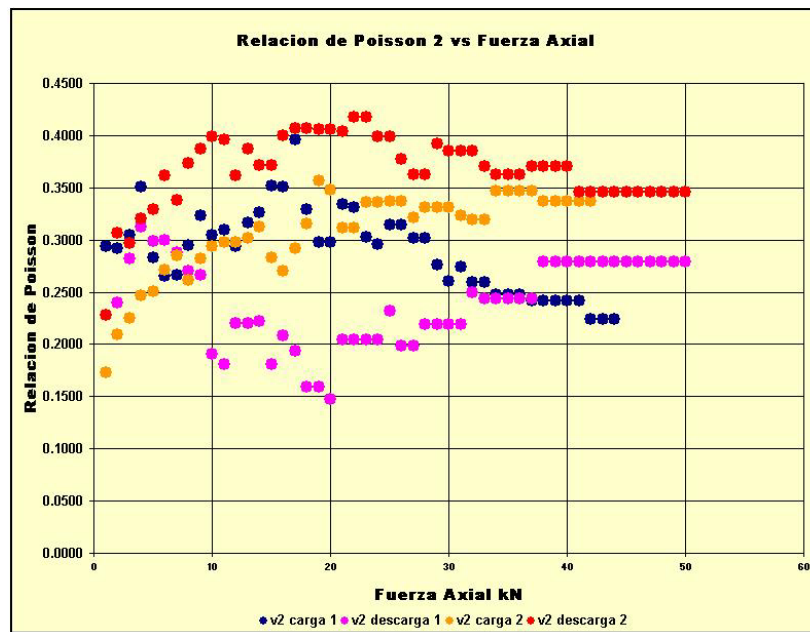


Figura 55. Relación de Poisson 2⁷

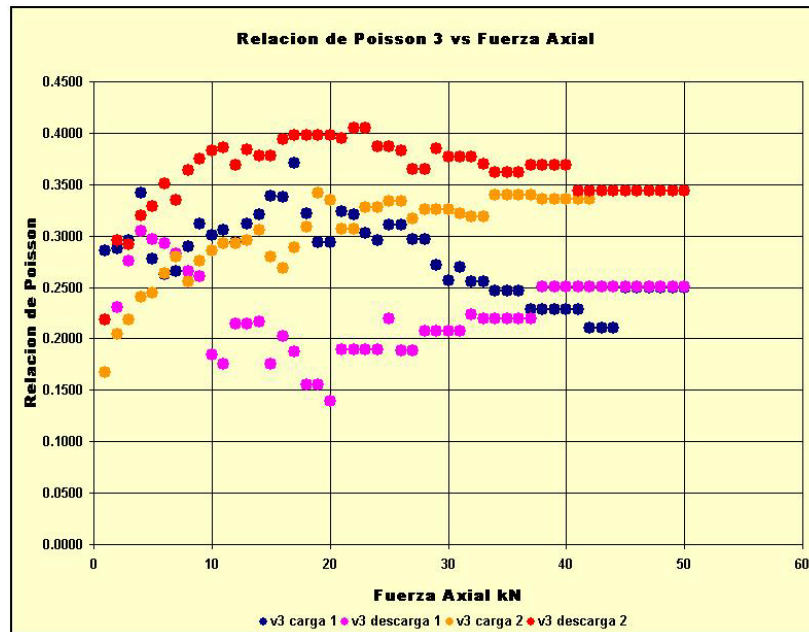


Figura 56. Relación de Poisson 3⁷

Físicamente la relación de Poisson es un cociente entre las deformaciones que sufre una muestra cuando esta es sometida a un esfuerzo. En los casos mostrados en las tres figuras anteriores muestran que la relación de Poisson tiende a aumentar en los primeros rangos de fuerza y luego empieza a disminuir hasta estabilizarse.

Este comportamiento evidencia aun más la explicación dada con respecto a que la naturaleza de la roca se ve más afectada en los primeros rangos de carga y después de un tiempo el efecto ya empieza a ser menor tendiendo a no ejercer ningún tipo de cambio en la roca. Con la relación de Poisson a medida que la roca sufre mayor deformación este valor aumentará, sin embargo, se llega al punto en que la deformación es menor y el valor empieza a disminuir tendiendo a estabilizarse a medida que la fuerza sigue aumentando.

Los tres casos presentados, los cuales representan que la relación de Poisson cambia dependiendo de la dirección de aplicación de la carga, muestran

comportamientos muy similares. Este comportamiento tan similar también obedece al hecho que la muestra presenta baja anisotropía, por tanto en muestras de este tipo no importa la dirección de aplicación de la carga ya que la relación de Poisson tiende a mantenerse y esto es mostrado en las siguientes figuras las cuales también mantienen una relación bastante lineal.

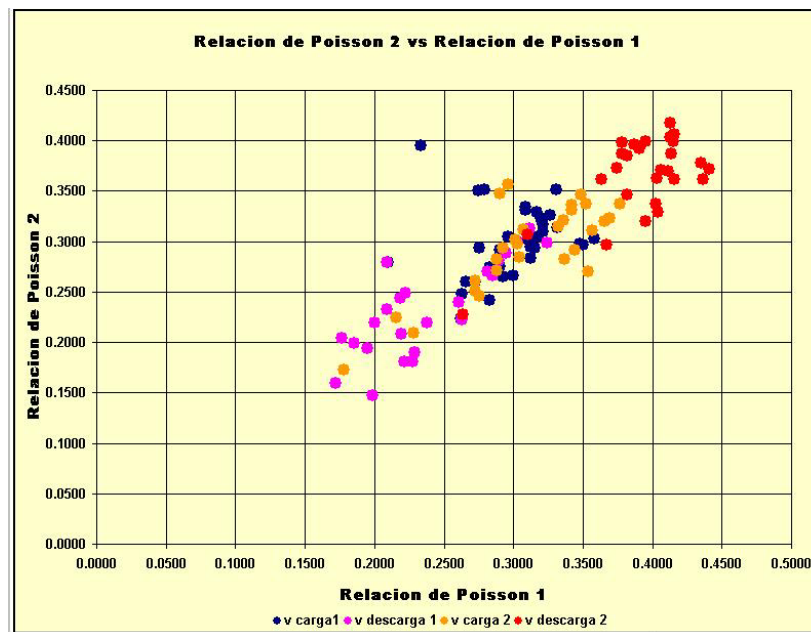


Figura 57. Comportamiento entre la relación de Poisson 1 y la relación de Poisson 2⁷

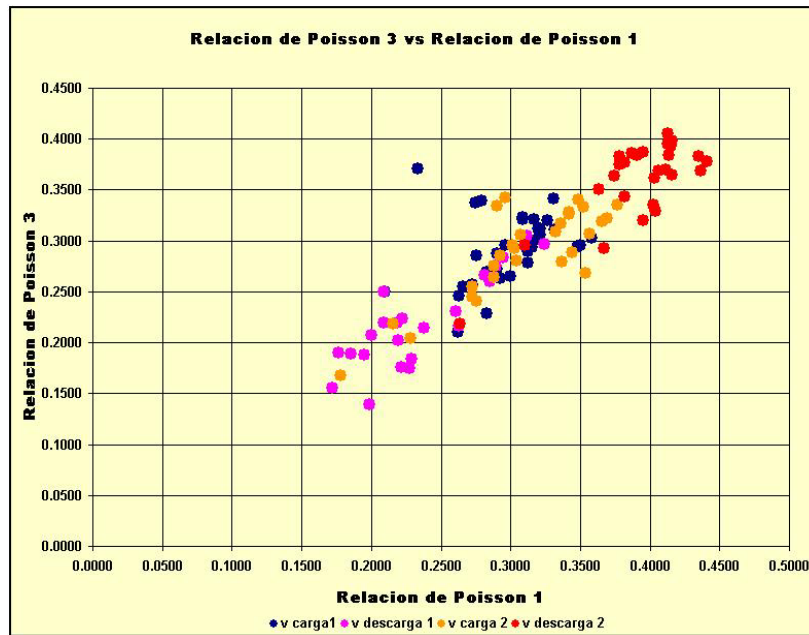


Figura 58. Comportamiento entre la relación de Poisson 1 y la relación de Poisson 3⁷

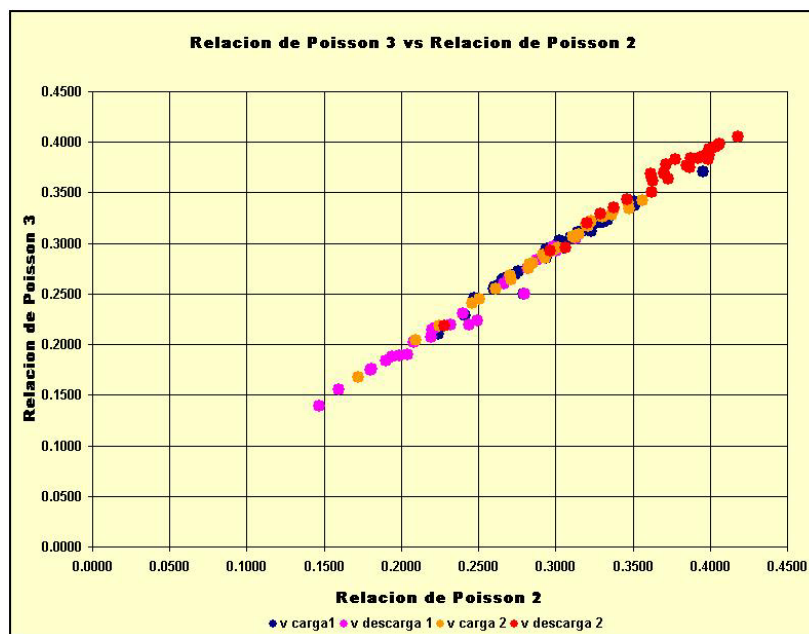


Figura 59. Comportamiento entre la relación de Poisson 2 y la relación de Poisson 3⁷

A diferencia de los parámetros anteriores el módulo volumétrico ya que este cambia con la dirección debido a que este hace referencia a todo el volumen de roca y por tanto este es el mismo desde cualquier dirección. Este parámetro también fue graficado en función de la carga axial y la figura se muestra a continuación:

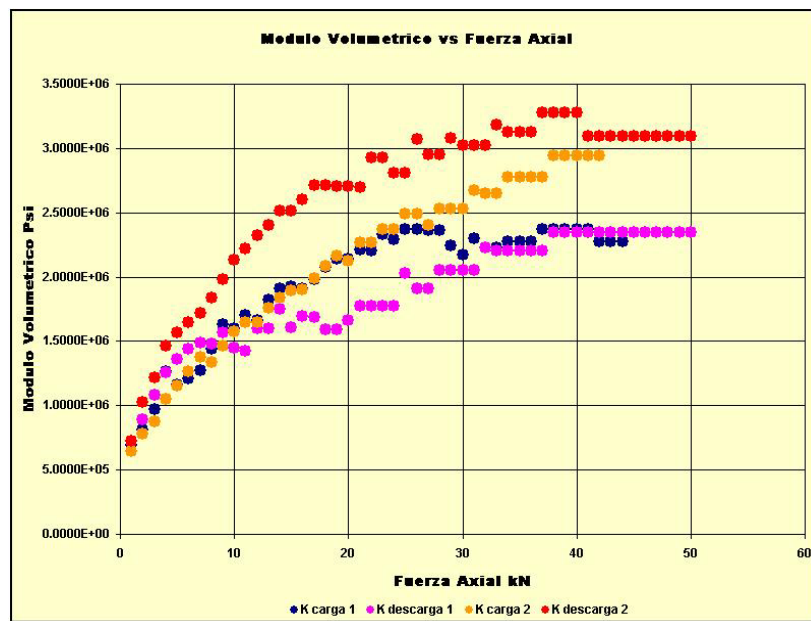


Figura 60. Comportamiento del módulo volumétrico con respecto a la fuerza axial⁷

Como se puede notar el módulo volumétrico presenta el mismo comportamiento del módulo de Young, con la diferencia que este módulo representa la deformación como volumen total que sufre la roca con respecto al esfuerzo total aplicado; por tanto se sigue cumpliendo que en los rangos bajos de esfuerzo la deformación siempre será mayor.

Todos los resultados referentes a los parámetros mecánicos serán mostrados en forma de tablas en el anexo 4.

5.1. COMPARACIÓN ENTRE COMPORTAMIENTO ISOTRÓPICO Y COMPORTAMIENTO ANISOTRÓPICO

Debido a los resultados obtenidos con respecto a la poca variación de los parámetros mecánicos con la dirección se decidió realizar determinar estos parámetros suponiendo que la roca fuera totalmente isotrópica y comparándolos con los resultados anisotrópicos. En el anexo 5 se muestran las tablas de resultados.

Para determinar los módulos elásticos isotrópicos se emplearon las relaciones para isotropía mostradas en la ecuación 31. Para el caso del modulo de Young la relación se aplico de manera independiente para la dirección vertical y la horizontal utilizando los datos de velocidades respectivos. Con la relación de Poisson se halló el valor de acuerdo a la ecuación para isotropía y fue comparada con respecto a la relación de Poisson 3, la cual seria su equivalente por definición. Con el modulo volumétrico isotrópico se utilizaron los datos de velocidades verticales y se compararon con los anisotrópicos. Los resultados se muestran en las siguientes figuras:

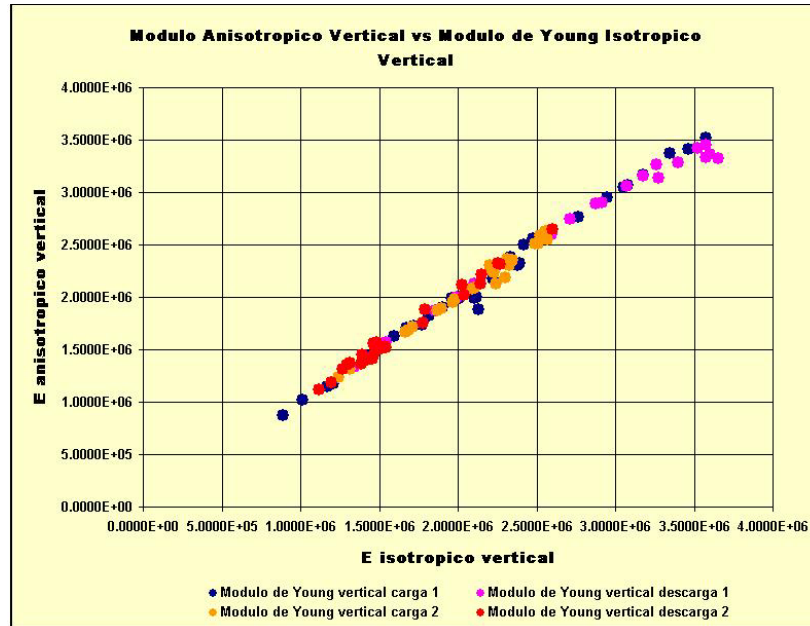


Figura 61. Modulo de Young anisotrópico vertical como función del modulo de Young isotrópico vertical⁷

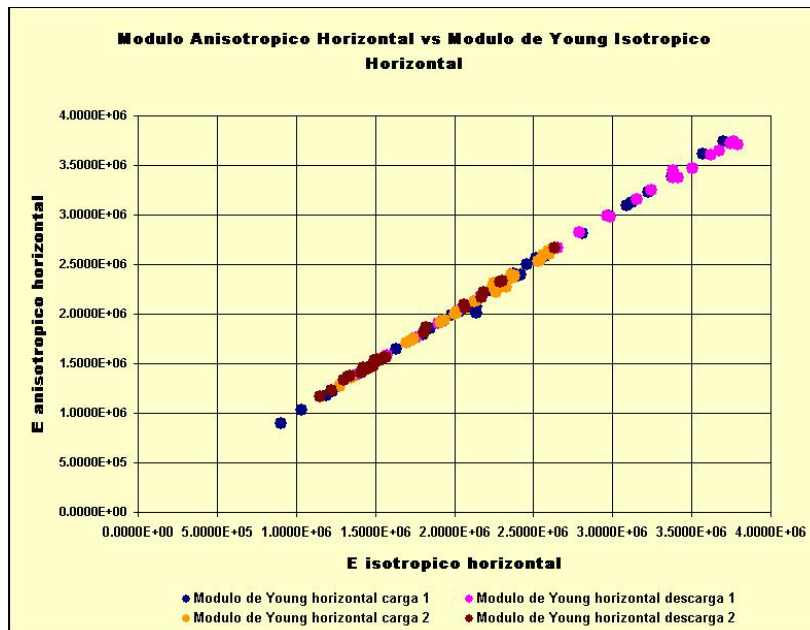


Figura 62. Modulo de Young anisotrópico horizontal como función del modulo de Young isotrópico horizontal⁷

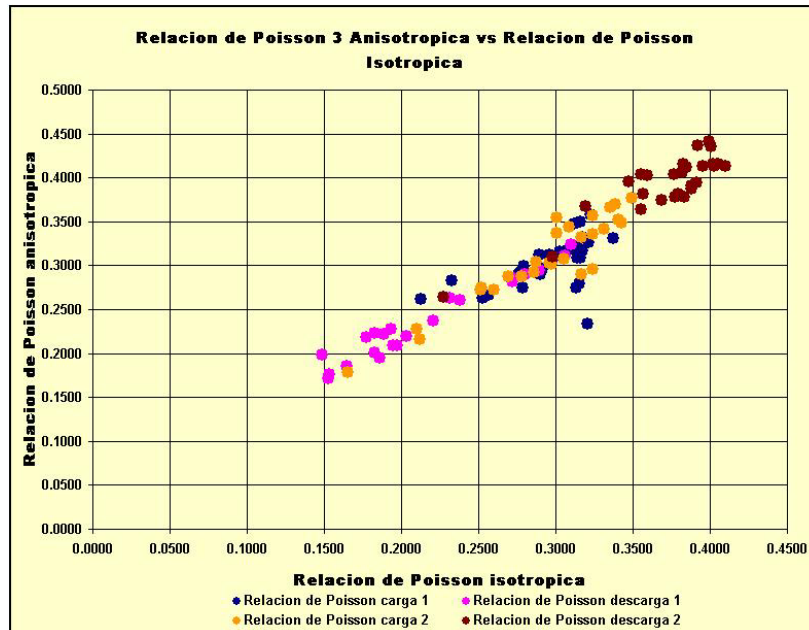


Figura 63. Relación de Poisson anisotrópica como función de la relación de Poisson isotrópica⁷

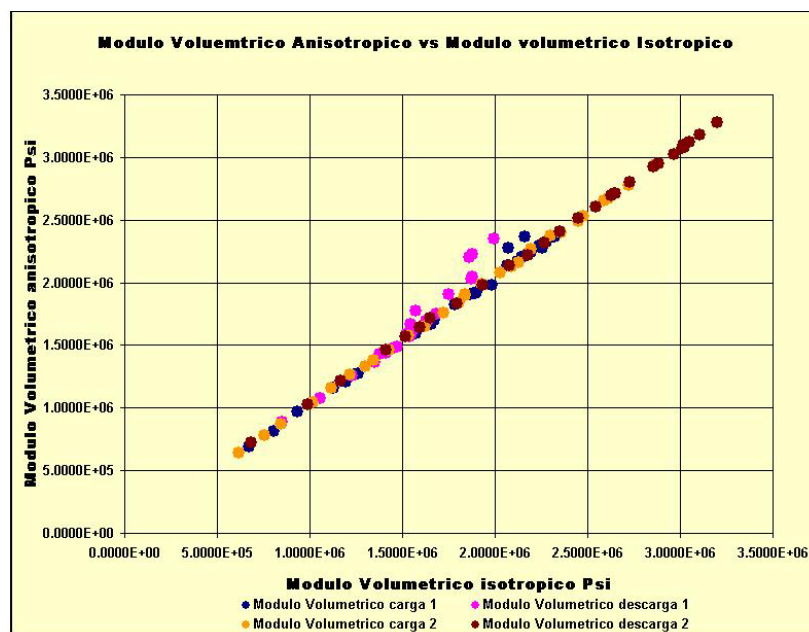


Figura 64. Módulo volumétrico anisotrópico como función del módulo volumétrico isotrópico⁷

Como se puede observar en las figuras 59 hasta la figura 62 las gráficas muestran un comportamiento lineal entre los módulos mecánicos determinados a partir de las relaciones de isotropía y los determinados mediante las constantes elásticas. De acuerdo a los resultados que se habían venido obteniendo donde se evidencio que los diferentes módulos anisotrópicos para diferentes direcciones eran muy similares, lo cual hacia suponer que la formación presentaba una anisotropía muy baja.

Con este análisis se puede constatar que efectivamente el grado de anisotropía presente en esta muestra de Tambor es tan bajo que esta puede ser tratada como una muestra totalmente homogénea e isotrópica y el error seria prácticamente cero según lo observado en las gráficas anteriores.

Este comportamiento tan isotrópico en la muestra de Tambor puede obedecer al hecho que con la fuerza axial la presencia de microfracturas las cuales generan heterogeneidades en la muestra se cierran y por tanto esta tiende a ser mas compacta y mas homogénea. La aplicación de una fuerza va a disminuir estas heterogeneidades y mas en muestras con características como la de Tambor que son arenas tan compactas, y que se compactan aun mas con la reducción del espacio poroso cuando se aplica la carga.

5.2. TENSOR DE ESFUERZOS

El tensor de esfuerzos es la representación matemática de un esfuerzo aplicado sobre un punto en el espacio. El tensor esta conformado por las componentes del esfuerzo, tal como se describió en la sección 1.3 ecuación 13.

En la ecuación 13, el sistema es descrito en coordenadas cartesianas; de manera análoga, para esta aplicación el sistema coordenado x, y, z corresponde a 1,2,3

respectivamente, en este caso el tensor de esfuerzos en forma general es representado como:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ 0 & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (58)$$

En otras palabras el tensor representa el campo de esfuerzos al cual es sometida una muestra. En esta fase experimental sobre la muestra se aplica un campo de esfuerzos uniaxial, es decir, solo se aplica una fuerza en la dirección axial de la muestra.

Cuando se aplica un campo de esfuerzos uniaxial no se genera ningún otro tipo de esfuerzos, por lo tanto los esfuerzos de corte son cero, al igual que los otros dos esfuerzos principales.

En este caso para la formación Tambor, específicamente para la muestra probada, el tensor de esfuerzos estará dado por:

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (59)$$

Donde σ_{33} representa el esfuerzo axial aplicado sobre la muestra. Así el tensor de esfuerzos para la formación Tambor sometida a diferentes puntos de carga de 1 kN será el siguiente:

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 125.33 \end{bmatrix} \quad (60)$$

El valor 125.33 esta dado en Psi y representa el esfuerzo obtenido a partir de la fuerza aplicada entre el área transversal de la muestra. Todos los resultados son mostrados en forma de tabla en el anexo 6.

En los fundamentos teóricos se mencionó que para el caso de muestras anisotrópicas y en este caso transversalmente isotrópicas, los esfuerzos están relacionados con las deformaciones a partir de la relación mostrada en la ecuación 32.

A diferencia del tensor de esfuerzos en el tensor de deformación se presentan las tres deformaciones principales, es decir, las deformaciones en las direcciones 1, 2 y 3. La deformación 3 son los cambios en la dirección axial, y las deformaciones 1 y 2 representan los cambios en la dirección lateral.

Otra diferencia es el tensor de esfuerzos en el mismo para los dos ciclos de carga y descarga, pero el tensor de deformaciones cambia con el ciclo debido a los efectos de histéresis.

En este caso el tensor de deformaciones esta dado por:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (61)$$

Las deformaciones principales son medidas directamente durante la prueba por medio de los extensómetros, las deformaciones de corte son cero debido a que los esfuerzos de corte no existen y también son ceros. De esta manera el tensor de deformaciones bajo una carga de 1 kN será el siguiente:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.45e-6 & 0 & 0 \\ 0 & 3.37e-7 & 0 \\ 0 & 0 & 3.37e-7 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Todos los resultados del tensor de deformación para cada uno de los puntos de carga es mostrado en forma de tablas en el anexo 7.

6. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento acústico de las rocas para una formación, constituye una valiosa herramienta para determinar propiedades mecánicas de las rocas de manera dinámica. Sin embargo, para la caracterización geomecánica las propiedades mecánicas utilizadas son aquellas determinadas a partir de métodos estáticos. Con base en esto es importante continuar con el estudio de las propiedades dinámicas con miras a establecer una correlación entre las propiedades mecánicas medidas mediante los dos métodos.

Para la caracterización geomecánica de las formaciones es fundamental el conocimiento de las propiedades mecánicas y para llegar a estas las pruebas estáticas no son la única alternativa, las pruebas dinámicas también son una valiosa herramienta siempre y cuando se establezca una buena correlación entre estos dos tipos de datos.

La elasticidad de la roca es el factor que determina el comportamiento acústico de esta, ya que la elasticidad es la que permite la mecánica de propagación de la deformación en forma de onda cuando se aplica un esfuerzo. Es decir para entender el comportamiento acústico de una roca primero hay que entender la mecánica de la deformación.

Los mecanismos de propagación de ondas son fundamentales en las mediciones acústicas de las rocas, ya que dentro de la formación se pueden cambiar de medio en cualquier momento y por tanto estos mecanismos serán de gran ayuda en la interpretación de las mediciones realizadas.

La anisotropía es un concepto de gran importancia en mecánica de rocas, debido a que es bien sabido que todas las rocas presentan un grado de anisotropía, y la isotropía es sólo un concepto ideal con el fin de simplificar cálculos, sin embargo hay que tener muy presente que por simplificar no se cometan errores que lleven a realizar análisis alejados de la realidad al intentar describir el comportamiento de la muestra en estudio.

La isotropía en las rocas es una condición ideal, en la naturaleza la mayoría de los materiales son anisotrópicos y por lo general esta anisotropía tiene su origen en las características geológicas de las rocas, como son, la presencia de fracturas, alineación de minerales, espacio poroso, planos de depositación, etc. Debido a esta situación se ha visto la necesidad de estudiar la anisotropía y encontrar métodos para medirla y determinar los parámetros elásticos anisotrópicos.

Es importante observar las tendencias presentadas en los resultados con respecto a la presión ya que este es de los principales factores que influyen en la propagación de las ondas. Se debe tener en cuenta que el esfuerzo aplicado es fundamental en la propagación de las ondas y en la naturaleza de la roca y lo cual se ve claramente reflejado en los resultados mostrados.

De acuerdo a los resultados es evidente que las muestras de la Formación Tambor, tanto del afloramiento Ruitoque como de la Mesa de los Santos, son muestras anisotrópicas ya que los datos de velocidades presentan ciertas diferencias en las direcciones medidas.

Factores como el cambio en la trayectoria de la medición y la geometría de la muestra probada son de gran importancia en el comportamiento de la propagación de las ondas acústicas, ya que efectivamente cuando la trayectoria cambia y cuando la geometría es más plana, la onda tiende a tener mayor energía y por tanto la forma de la onda es más clara. La influencia a nivel cuantitativo no es tan

notable pero con solo obtener una onda más clara los resultados tendrán mayor confiabilidad.

La porosidad es un factor importante a nivel cuantitativo, ya que el espacio poroso representa focos de dispersión que se ven reflejados en el valor de la velocidad, a mayor porosidad la velocidad será menor. Lo cual se ve claramente reflejado en los resultados obtenidos donde las muestras difieren en porosidad prácticamente el doble.

El método aplicado en la primera fase experimental es viable para observar las variaciones de las velocidades en las diferentes direcciones pero es importante tener en cuenta la disponibilidad de los materiales e identificar el tipo de anisotropía de la formación estudiada, ya que al aplicar esta técnica se requieren de un gran número de cristales y por tanto de mayor cantidad de materiales para realizar todo el montaje.

Las muestras analizadas de la formación Tambor muestran que son transversalmente isotrópicas, los principales factores que determinan este comportamiento son el tipo de roca (areniscas), el contenido de cuarzo, el cual en Tambor predomina y el grado de anisotropía de las ondas leídas.

Para una roca la cual es sometida a un campo de esfuerzos uniaxial tiene un tensor de esfuerzos donde dos de sus esfuerzos principales y los esfuerzos de corte son cero y su única componente no cero es el esfuerzo aplicado.

Los módulos mecánicos obtenidos para la formación Tambor muestran variaciones para cada ciclo de carga y descarga, sin embargo, los módulos entre sí, es decir, analizándolos de manera individual para cada dirección los resultados no muestran diferencias significativas. Los resultados muestran claramente que la formación Tambor puede ser tratada como isotrópica.

RECOMENDACIONES

Debido a la valiosa utilidad de las mediciones dinámicas como método para caracterizar el comportamiento mecánico de las rocas se recomienda estudiar la relación entre los resultados dinámicos y las mediciones estáticas, es decir, obtener los parámetros a partir de datos de velocidades acústicas y de deformaciones. Es muy importante tener en cuenta que si se desea empezar a correlacionar los datos estáticos y dinámico, el origen de los datos debe ser el mismo; es decir, los resultados deben estar basados en pruebas que se lleven a cabo bajo las mismas condiciones.

Como para esta prueba se realizaron las lecturas de la onda P y la onda S se recomienda realizar pruebas acústicas donde se realicen las mediciones de los tiempos de onda P y S simultáneamente y sean calibrados con valores obtenidos por separado, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados y disminuir el grado de incertidumbre.

Se recomienda realizar pruebas acústicas sometiendo la muestra a campos de esfuerzos diferentes a los uniaxiales y obtener las componentes principales del tensor de esfuerzos. Además que sería una buena oportunidad para seguir observando las variaciones de la propagación de las velocidades y por tanto de la naturaleza de la roca con los esfuerzos aplicados. También sería importante verificar si existe cambio en la anisotropía de la roca cuando existen cambios en el sistema de esfuerzos aplicado.

Debido a que las muestras estudiadas presentan un valor tan bajo en anisotropía y los resultados fueron tan homogéneos, se recomienda analizar muestras que presenten características geológicas con mayor cantidad de heterogeneidades y observar el comportamiento que se obtenga.

Un factor importante para estudiar son los aspectos geológicos que influyen en la anisotropía de las muestras y verificar su efecto a partir de la aplicación de los métodos acústicos. También es importante caracterizar el efecto de la geometría de las roca de estudio.

Por ultimo también es importante estudiar factores externos como los equipos utilizados y los cristales empleados para la propagación, teniendo en cuenta la eficiencia de estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. <http://www.monografias.com/trabajos16/onda/onda.shtml>.
2. www.uia.mx/ibero/noticias/publica/fisica/pdf/14ONDASmecanicas.pdf
3. Valera Lara, Luz Carime: “Fundamentos sobre las propiedades acústicas de las rocas”, Informe de avance No 2. Grupo Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP
4. Referenciado en “Theory, measurement and interpretation of well logs: Acoustic properties of rocks”
5. www.educastur.princast.es/proyectojimena/franciscga/propiond.htm#Polarizaci%F3n
6. Curso de la Universidad de Texas Austin, Lectura 1.
7. Valera Lara, Luz Carime: “Desarrollo metodológico para la obtención del tensor de esfuerzos y determinación de los parámetros mecánicos de la formación Tambor a partir de la medición de velocidades acústicas”. Bucaramanga, 2005.
8. Osorio Gallego, José Gildardo, Ph. D. : Aspectos Geomecánicos de la Estabilidad de Pozos.

9. Curso de Ingeniería Estructural I, Universidad Nacional de Colombia programa universidad virtual:
<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/index.html>
10. Erling Fjaer, Rune M. Holt and Rasmus Risnes: “Petroleum related rock mechanics”. Elsevier, Amsterdam – London – New York – Tokyo. 1992. p 18 – 21.
11. Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, G.H.F., 1958: “An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media”. Geophysics, 23. p. 459 –493.
12. ASTM D 2845 – 90: Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constant of rock.
13. Valera Lara, Luz Carime y Galvis, Jorge Leonardo: “Medición de velocidades acústicas y determinación de parámetros elásticos sobre una muestra de Berea”. Presentación No 3. Grupo de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.
14. Valera Lara, Luz Carime: “Prueba del estudio del efecto de la presión en el comportamiento de las velocidades acústicas. Aplicación a un pozo”. Informe de avance No 9. Grupo Estabilidad de pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.
15. Lo, Tien-when, Coyner, Karl B. and Toksöz, M. Nafi : “Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite. Geophysics, 51, 164-171.

16. Wang, Zhijing: Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: A single plug laboratory method. *Geophysics*, Vol. 67, No 5 (September – October 2002). P 1415- 1422.
17. Scott T.E. And Abousleiman Y.: Determination of the stress-induced dynamic moduli of a porous medium subjected to various deformational pathways.
18. Thomsen, L., 1986: "Weak elastic anisotropy". *Geophysics*, 51, 1954-1966.
19. Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. Número 12. Bucaramanga. 1963.
20. Rueda, Jenny Paola: Descripción de secciones delgadas de muestras de la formación Tambor. Grupo Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.
21. Fotografías laboratorio de Mecánica de Rocas. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).
22. Valera Lara, Luz Carime: "Prueba experimental para el estudio de anisotropía de la formación Tambor". Informe de avance 14. Grupo de investigación de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.
23. Valera Lara, Luz Carime: "Pruebas acústicas para estudios de anisotropía. Presentación No 6. Grupo de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.
24. MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems. Technical description.

BIBLIOGRAFIA

ASTM D 2845 – 90. “Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.

ASTM D 3148 – 02: Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression.

ASTM D 5407 – 95: Standard Test Method for Elastic Moduli of Undrained Rock Core Specimens in Triaxial Compression Without Pore Pressure Measurement.

Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. Número 12. Bucaramanga. 1963.

Da Fontoura, Sergio A.B.: “Rock Mechanics Principles and Petroleum Engineering”. Cap 1 y Cap 5.

Eberhart-Phillips, D. Han, D-H, y Zoback, M.D.: “ Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and content in sandstone”. Geophysics (1989), Vol 54, p. 82-89.

Fotografías laboratorio de Mecánica de Rocas. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

Gardner, G.H.F., Wyllie, M.R.J., y Droschak, D.M. : “Hysteresis in the Velocity-Pressure Characteristics of Rocks”. Geophysics (1965), Vol 30, p. 111-116.

Johnston, David H.: "Physical properties of shale at temperature and pressure". Geophysics (1987), Vol 52, p 1391-1401.

King, M. S.: "Wave Velocities in Rocks as a Function of Changes in Overburden Pressure and Pore Fluid Saturants". Geophysics, Vol 31, Febrero 1969

Krief, M., Garat, J., Stellingwerf, J., Ventre. J.: "A Petrophysical Interpretation Using the Velocities of P and S Waves (Full-Waveform Sonic). Log Analyst. November-December, 1990. p 355-369.

Lo, Tien-when, Coyner, Karl B., and Toksöz, M. Nafi. "Experimental Determination of Elastic Anisotropy of Berea Sandstone, Chicopee Shale, and Chelmsford Granite". Geophysics, 51, 164-171.

MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems. Technical description.

Mobarak, S.A., and Somerton, W.S. : "The Effect of Temperature and Pressure on Wave Velocities in Porous Rocks".

Mohammed Azeemuddin and Scott Jr, T.E.: "Acoustic Velocity Anisotropies in Cordoba Cream Limestone during Different Deformational Stress Paths". School of Petroleum and Geological Engineering the University of Oklahoma. December 1993.

Montmayeur, H y Graves, R.M. : "Prediction of Static Elastic/Mechanical Properties of Consolidated and Unconsolidated Sands From Acoustic Measurements: Basic Measurements". SPE 14159.

Montmayeur, H y Graves, R.M. : "Prediction of Static Elastic/Mechanical Properties of Consolidated and Unconsolidated Sands From Acoustic Measurements: Correlations". SPE 15644.

Moreno Hernández, Eduardo: Propagación de Ondas Mecánicas y Aplicaciones de los Ultrasonidos. Centro de Ultrasonica ICIMAF. La Habana, Cuba.

Rai, Chandra S. and Hanson, Kenneth E.: "Shear wave velocity anisotropy in sedimentary rocks: A laboratory study". Geophysics, 53, 800 -806.

Rueda, Jenny Paola: Descripción de secciones delgadas de muestras de la formación Tambor. Grupo Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

Saunders, Simon: Antennas and Propagation, Cap 3 "Propagation Mechanisms".

Scott Jr, T.E. and Abousleiman, Y.: "Determination of the Stress-induced Dynamic moduli of a porous medium subjected to various deformational pathways".

Scott Jr, T.E. and Qinggang Ma. "Acoustic Velocity Anisotropy Induced During Triaxial Compression of Berea Sandstone". School of Petroleum and Geological Engineering the University of Oklahoma. March 25, 1993.

Scott Jr, T.E. and Qinggang Ma. "Modelling Acoustic Velocity Anisotropy Induced During Triaxial Tests of Rocks". School of Petroleum and Geological Engineering the University of Oklahoma. October 26, 1993.

T. Bourbié; O. Coussy; B. Zinszner. "Acoustics of Porous Media". Institut Français du Petrole Publications. Ediciones Technip.

Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs: “Acoustic Properties of Rocks”. Cap 3

Thomsen, L., 1986: “Weak elastic anisotropy”. *Geophysics*, 51, 1954-1966.

Valera Lara, Luz Carime: “Fundamentos sobre las propiedades acústicas de las rocas”, Informe de avance No 2. Grupo Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP

Valera Lara, Luz Carime y Galvis, Jorge Leonardo: “Medición de velocidades acústicas y determinación de parámetros elásticos sobre una muestra de Berea”. Presentación No 3. Grupo de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

Valera Lara, Luz Carime: “Desarrollo metodológico para la obtención del tensor de esfuerzos y determinación de los parámetros mecánicos de la formación Tambor a partir de la medición de velocidades acústicas”. Bucaramanga, 2005.

Valera Lara, Luz Carime: “Prueba del estudio del efecto de la presión en el comportamiento de las velocidades acústicas. Aplicación a un pozo”. Informe de avance No 9. Grupo Estabilidad de pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

Valera Lara, Luz Carime: “Prueba experimental para el estudio de anisotropía de la formación Tambor”. Informe de avance 14. Grupo de investigación de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

Valera Lara, Luz Carime: “Pruebas acústicas para estudios de anisotropía. Presentación No 6. Grupo de Estabilidad de Pozo. Convenio 002 de 2003 UIS-ICP.

Wang, Zhijing: "Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: A single-plug laboratory method". *Geophysics*, Vol 67, No 5 (September – October 2002). P. 1415-1422.

Wang, Zhijing: "Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 2: Laboratory data". *Geophysics*, Vol 67, No 5 (September – October 2002). P. 1423-1440.

Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, G.H.F., 1958: "An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media". *Geophysics*, 23. p. 459 –493.

ANEXOS

ANEXO A

Anexo A.1

| Ondas verticales ciclo de carga 1 | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P (Encap mas roca) □s | Onda P (roca sola) □s | Onda S (Encap mas roca) □s | Onda S (roca sola) □s | Velocidad P m/s | Velocidad S m/s |
| 1 | 55.3 | 43.2 | 100.6 | 78.0 | 1726.85 | 956.41 |
| 2 | 52.0 | 39.9 | 96.0 | 73.4 | 1869.67 | 1016.35 |
| 3 | 49.2 | 37.1 | 91.0 | 68.4 | 2010.78 | 1090.64 |
| 4 | 46.0 | 33.9 | 91.0 | 68.4 | 2200.59 | 1090.64 |
| 5 | 45.8 | 33.7 | 84.5 | 61.9 | 2213.65 | 1205.17 |
| 6 | 44.4 | 32.3 | 80.8 | 58.2 | 2309.60 | 1281.79 |
| 7 | 43.6 | 31.5 | 79.5 | 56.9 | 2368.25 | 1311.07 |
| 8 | 42.5 | 30.4 | 79.1 | 56.5 | 2453.95 | 1320.35 |
| 9 | 41.4 | 29.3 | 78.6 | 56.0 | 2546.08 | 1332.14 |
| 10 | 41.2 | 29.1 | 77.8 | 55.2 | 2563.57 | 1351.45 |
| 11 | 40.4 | 28.3 | 76.6 | 54.0 | 2636.04 | 1381.48 |
| 12 | 40.3 | 28.2 | 75.6 | 53.0 | 2645.39 | 1407.55 |
| 13 | 39.6 | 27.5 | 75.4 | 52.8 | 2712.73 | 1412.88 |
| 14 | 39.2 | 27.1 | 75.4 | 52.8 | 2752.77 | 1412.88 |
| 15 | 38.8 | 26.7 | 74.0 | 51.4 | 2794.01 | 1451.36 |
| 16 | 38.8 | 26.7 | 73.8 | 51.2 | 2794.01 | 1457.03 |
| 17 | 38.4 | 26.3 | 73.8 | 51.2 | 2836.50 | 1457.03 |
| 18 | 38.0 | 25.9 | 72.7 | 50.1 | 2880.31 | 1489.02 |
| 19 | 37.6 | 25.5 | 71.4 | 48.8 | 2925.49 | 1528.69 |
| 20 | 37.6 | 25.5 | 71.4 | 48.8 | 2925.49 | 1528.69 |
| 21 | 37.2 | 25.1 | 71.0 | 48.4 | 2972.11 | 1541.32 |
| 22 | 37.2 | 25.1 | 70.8 | 48.2 | 2972.11 | 1547.72 |
| 23 | 36.7 | 24.6 | 70.7 | 48.1 | 3032.52 | 1550.94 |
| 24 | 36.7 | 24.6 | 70.0 | 47.4 | 3032.52 | 1573.84 |
| 25 | 36.3 | 24.2 | 69.4 | 46.8 | 3082.64 | 1594.02 |
| 26 | 36.3 | 24.2 | 69.4 | 46.8 | 3082.64 | 1594.02 |
| 27 | 35.9 | 23.8 | 67.2 | 44.6 | 3134.45 | 1672.65 |
| 28 | 35.9 | 23.8 | 67.2 | 44.6 | 3134.45 | 1672.65 |
| 29 | 35.9 | 23.8 | 65.4 | 42.8 | 3134.45 | 1742.99 |
| 30 | 35.9 | 23.8 | 64.4 | 41.8 | 3134.45 | 1784.69 |
| 31 | 35.5 | 23.4 | 64.4 | 41.8 | 3188.03 | 1784.69 |
| 32 | 35.5 | 23.4 | 63.5 | 40.9 | 3188.03 | 1823.96 |
| 33 | 35.5 | 23.4 | 63.5 | 40.9 | 3188.03 | 1823.96 |
| 34 | 35.0 | 22.9 | 62.4 | 39.8 | 3257.64 | 1874.37 |
| 35 | 35.0 | 22.9 | 62.4 | 39.8 | 3257.64 | 1874.37 |
| 36 | 35.0 | 22.9 | 62.4 | 39.8 | 3257.64 | 1874.37 |
| 37 | 35.0 | 22.9 | 61.4 | 38.8 | 3257.64 | 1922.68 |
| 38 | 35.0 | 22.9 | 61.4 | 38.8 | 3257.64 | 1922.68 |
| 39 | 35.0 | 22.9 | 61.4 | 38.8 | 3257.64 | 1922.68 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|------|---------|---------|
| 40 | 35.0 | 22.9 | 61.4 | 38.8 | 3257.64 | 1922.68 |
| 41 | 35.0 | 22.9 | 61.4 | 38.8 | 3257.64 | 1922.68 |
| 42 | 35.0 | 22.9 | 60.5 | 37.9 | 3257.64 | 1968.34 |
| 43 | 35.0 | 22.9 | 60.5 | 37.9 | 3257.64 | 1968.34 |
| 44 | 35.0 | 22.9 | 60.5 | 37.9 | 3257.64 | 1968.34 |
| 45 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 46 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 47 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 48 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 49 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 50 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |

Anexo A.2

| Ondas verticales ciclo de descarga 1 | | | | | | |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P (Endcap mas roca) μ s | Onda P (roca sola) μ s | Onda S (Endcap mas roca) μ s | Onda S (roca sola) μ s | Velocidad P m/s | Velocidad S m/s |
| 50 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 49 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 48 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 47 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 46 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 45 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 44 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 43 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 42 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 41 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 40 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 39 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 38 | 35.0 | 22.9 | 59.8 | 37.2 | 3257.64 | 2005.38 |
| 37 | 35.4 | 23.3 | 59.8 | 37.2 | 3201.72 | 2005.38 |
| 36 | 35.4 | 23.3 | 59.8 | 37.2 | 3201.72 | 2005.38 |
| 35 | 35.4 | 23.3 | 59.8 | 37.2 | 3201.72 | 2005.38 |
| 34 | 35.4 | 23.3 | 59.8 | 37.2 | 3201.72 | 2005.38 |
| 33 | 35.4 | 23.3 | 59.8 | 37.2 | 3201.72 | 2005.38 |
| 32 | 35.4 | 23.3 | 60.0 | 37.4 | 3201.72 | 1994.65 |
| 31 | 35.4 | 23.3 | 60.0 | 37.4 | 3201.72 | 1994.65 |
| 30 | 35.4 | 23.3 | 60.0 | 37.4 | 3201.72 | 1994.65 |
| 29 | 35.4 | 23.3 | 60.0 | 37.4 | 3201.72 | 1994.65 |
| 28 | 35.4 | 23.3 | 60.0 | 37.4 | 3201.72 | 1994.65 |
| 27 | 35.8 | 23.7 | 60.0 | 37.4 | 3147.68 | 1994.65 |
| 26 | 35.8 | 23.7 | 60.0 | 37.4 | 3147.68 | 1994.65 |
| 25 | 35.8 | 23.7 | 61.2 | 38.6 | 3147.68 | 1932.64 |
| 24 | 36.8 | 24.7 | 61.2 | 38.6 | 3020.24 | 1932.64 |
| 23 | 36.8 | 24.7 | 61.2 | 38.6 | 3020.24 | 1932.64 |
| 22 | 36.8 | 24.7 | 61.2 | 38.6 | 3020.24 | 1932.64 |
| 21 | 36.8 | 24.7 | 61.2 | 38.6 | 3020.24 | 1932.64 |
| 20 | 36.9 | 24.8 | 61.2 | 38.6 | 3008.06 | 1932.64 |
| 19 | 37.2 | 25.1 | 61.8 | 39.2 | 2972.11 | 1903.06 |
| 18 | 37.2 | 25.1 | 61.8 | 39.2 | 2972.11 | 1903.06 |
| 17 | 37.2 | 25.1 | 63.0 | 40.4 | 2972.11 | 1846.53 |
| 16 | 37.6 | 25.5 | 64.4 | 41.8 | 2925.49 | 1784.69 |
| 15 | 38.0 | 25.9 | 64.4 | 41.8 | 2880.31 | 1784.69 |
| 14 | 38.0 | 25.9 | 66.4 | 43.8 | 2880.31 | 1703.20 |
| 13 | 38.8 | 26.7 | 67.2 | 44.6 | 2794.01 | 1672.65 |
| 12 | 38.8 | 26.7 | 67.2 | 44.6 | 2794.01 | 1672.65 |
| 11 | 39.6 | 27.5 | 67.2 | 44.6 | 2712.73 | 1672.65 |
| 10 | 39.6 | 27.5 | 67.6 | 45.0 | 2712.73 | 1657.78 |

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|---------|---------|
| 9 | 40.4 | 28.3 | 73.2 | 50.6 | 2636.04 | 1474.31 |
| 8 | 41.2 | 29.1 | 74.6 | 52.0 | 2563.57 | 1434.62 |
| 7 | 41.6 | 29.5 | 76.8 | 54.2 | 2528.81 | 1376.38 |
| 6 | 42.5 | 30.4 | 79.2 | 56.6 | 2453.95 | 1318.02 |
| 5 | 43.6 | 31.5 | 82.6 | 60.0 | 2368.25 | 1243.33 |
| 4 | 45.0 | 32.9 | 84.8 | 62.2 | 2267.48 | 1199.36 |
| 3 | 46.6 | 34.5 | 85.0 | 62.4 | 2162.32 | 1195.51 |
| 2 | 48.8 | 36.7 | 85.2 | 62.6 | 2032.70 | 1191.69 |
| 1 | 52.0 | 39.9 | 85.6 | 63.0 | 1869.67 | 1184.13 |

Anexo A.3

| Ondas verticales ciclo de carga 2 | | | | | | |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P (Endcap mas roca) μ s | Onda P (roca sola) μ s | Onda S (Endcap mas roca) μ s | Onda S (roca sola) μ s | Velocidad P m/s | Velocidad S m/s |
| 1 | 52.0 | 39.9 | 85.6 | 63 | 1869.67 | 1184.13 |
| 2 | 49.9 | 37.8 | 85.0 | 62 | 1973.54 | 1195.51 |
| 3 | 47.9 | 35.8 | 81.8 | 59 | 2083.80 | 1260.14 |
| 4 | 46.2 | 34.1 | 81.8 | 59 | 2187.68 | 1260.14 |
| 5 | 44.6 | 32.5 | 79.0 | 56 | 2295.38 | 1322.70 |
| 6 | 43.8 | 31.7 | 79.0 | 56 | 2353.31 | 1322.70 |
| 7 | 42.9 | 30.8 | 79.0 | 56 | 2422.08 | 1322.70 |
| 8 | 42.5 | 30.4 | 76.0 | 53 | 2453.95 | 1397.00 |
| 9 | 41.7 | 29.6 | 76.0 | 53 | 2520.27 | 1397.00 |
| 10 | 40.9 | 28.8 | 75.2 | 53 | 2590.28 | 1418.25 |
| 11 | 40.4 | 28.3 | 75.2 | 53 | 2636.04 | 1418.25 |
| 12 | 40.4 | 28.3 | 75.2 | 53 | 2636.04 | 1418.25 |
| 13 | 39.6 | 27.5 | 73.8 | 51 | 2712.73 | 1457.03 |
| 14 | 39.2 | 27.1 | 73.8 | 51 | 2752.77 | 1457.03 |
| 15 | 38.8 | 26.7 | 72.6 | 50 | 2794.01 | 1492.00 |
| 16 | 38.8 | 26.7 | 72.6 | 50 | 2794.01 | 1492.00 |
| 17 | 38.4 | 26.3 | 72.6 | 50 | 2836.50 | 1492.00 |
| 18 | 38.0 | 25.9 | 72.6 | 50 | 2880.31 | 1492.00 |
| 19 | 37.6 | 25.5 | 72.6 | 50 | 2925.49 | 1492.00 |
| 20 | 37.6 | 25.5 | 71.8 | 49 | 2925.49 | 1516.26 |
| 21 | 37.2 | 25.1 | 71.8 | 49 | 2972.11 | 1516.26 |
| 22 | 37.2 | 25.1 | 71.8 | 49 | 2972.11 | 1516.26 |
| 23 | 36.8 | 24.7 | 71.8 | 49 | 3020.24 | 1516.26 |
| 24 | 36.8 | 24.7 | 71.8 | 49 | 3020.24 | 1516.26 |
| 25 | 36.3 | 24.2 | 71.8 | 49 | 3082.64 | 1516.26 |
| 26 | 36.3 | 24.2 | 71.8 | 49 | 3082.64 | 1516.26 |
| 27 | 36.3 | 24.2 | 70.0 | 47 | 3082.64 | 1573.84 |
| 28 | 35.9 | 23.8 | 70.0 | 47 | 3134.45 | 1573.84 |
| 29 | 35.9 | 23.8 | 70.0 | 47 | 3134.45 | 1573.84 |
| 30 | 35.9 | 23.8 | 70.0 | 47 | 3134.45 | 1573.84 |
| 31 | 35.5 | 23.4 | 70.0 | 47 | 3188.03 | 1573.84 |
| 32 | 35.5 | 23.4 | 69.6 | 47 | 3188.03 | 1587.23 |
| 33 | 35.5 | 23.4 | 69.6 | 47 | 3188.03 | 1587.23 |
| 34 | 35.1 | 23.0 | 69.6 | 47 | 3243.48 | 1587.23 |
| 35 | 35.1 | 23.0 | 69.6 | 47 | 3243.48 | 1587.23 |
| 36 | 35.1 | 23.0 | 69.6 | 47 | 3243.48 | 1587.23 |
| 37 | 35.1 | 23.0 | 69.6 | 47 | 3243.48 | 1587.23 |
| 38 | 34.7 | 22.6 | 69.6 | 47 | 3300.88 | 1587.23 |
| 39 | 34.7 | 22.6 | 69.6 | 47 | 3300.88 | 1587.23 |
| 40 | 34.7 | 22.6 | 69.6 | 47 | 3300.88 | 1587.23 |
| 41 | 34.7 | 22.6 | 69.6 | 47 | 3300.88 | 1587.23 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|----|---------|---------|
| 42 | 34.7 | 22.6 | 69.6 | 47 | 3300.88 | 1587.23 |
| 43 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 44 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 45 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 46 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 47 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 48 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 49 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |
| 50 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47 | 3360.36 | 1587.23 |

Anexo A.4

| Ondas verticales ciclo de descarga 2 | | | | | | |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P (Endcap mas roca) μ s | Onda P (roca sola) μ s | Onda S (Endcap mas roca) μ s | Onda S (roca sola) μ s | Velocidad P m/s | Velocidad S m/s |
| 50 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 49 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 48 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 47 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 46 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 45 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 44 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 43 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 42 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 41 | 34.3 | 22.2 | 69.6 | 47.0 | 3360.36 | 1587.23 |
| 40 | 34.3 | 22.2 | 73.4 | 50.8 | 3360.36 | 1468.50 |
| 39 | 34.3 | 22.2 | 73.4 | 50.8 | 3360.36 | 1468.50 |
| 38 | 34.3 | 22.2 | 73.4 | 50.8 | 3360.36 | 1468.50 |
| 37 | 34.3 | 22.2 | 73.4 | 50.8 | 3360.36 | 1468.50 |
| 36 | 34.7 | 22.6 | 73.4 | 50.8 | 3300.88 | 1468.50 |
| 35 | 34.7 | 22.6 | 73.4 | 50.8 | 3300.88 | 1468.50 |
| 34 | 34.7 | 22.6 | 73.4 | 50.8 | 3300.88 | 1468.50 |
| 33 | 34.7 | 22.6 | 74.8 | 52.2 | 3300.88 | 1429.12 |
| 32 | 35.1 | 23.0 | 74.8 | 52.2 | 3243.48 | 1429.12 |
| 31 | 35.1 | 23.0 | 74.8 | 52.2 | 3243.48 | 1429.12 |
| 30 | 35.1 | 23.0 | 74.8 | 52.2 | 3243.48 | 1429.12 |
| 29 | 35.1 | 23.0 | 76.3 | 53.7 | 3243.48 | 1389.20 |
| 28 | 35.5 | 23.4 | 76.3 | 53.7 | 3188.03 | 1389.20 |
| 27 | 35.5 | 23.4 | 76.3 | 53.7 | 3188.03 | 1389.20 |
| 26 | 35.5 | 23.4 | 80.1 | 57.5 | 3188.03 | 1297.39 |
| 25 | 36.4 | 24.3 | 80.1 | 57.5 | 3069.96 | 1297.39 |
| 24 | 36.4 | 24.3 | 80.1 | 57.5 | 3069.96 | 1297.39 |
| 23 | 36.4 | 24.3 | 84.8 | 62.2 | 3069.96 | 1199.36 |
| 22 | 36.4 | 24.3 | 84.8 | 62.2 | 3069.96 | 1199.36 |
| 21 | 37.2 | 25.1 | 84.8 | 62.2 | 2972.11 | 1199.36 |
| 20 | 37.2 | 25.1 | 85.4 | 62.8 | 2972.11 | 1187.90 |
| 19 | 37.2 | 25.1 | 85.4 | 62.8 | 2972.11 | 1187.90 |
| 18 | 37.2 | 25.1 | 85.6 | 63.0 | 2972.11 | 1184.13 |
| 17 | 37.2 | 25.1 | 85.6 | 63.0 | 2972.11 | 1184.13 |
| 16 | 37.6 | 25.5 | 85.6 | 63.0 | 2925.49 | 1184.13 |
| 15 | 38.0 | 25.9 | 85.8 | 63.2 | 2880.31 | 1180.38 |
| 14 | 38.0 | 25.9 | 85.8 | 63.2 | 2880.31 | 1180.38 |
| 13 | 38.4 | 26.3 | 85.8 | 63.2 | 2836.50 | 1180.38 |
| 12 | 38.8 | 26.7 | 86.0 | 63.4 | 2794.01 | 1176.66 |
| 11 | 39.2 | 27.1 | 86.0 | 63.4 | 2752.77 | 1176.66 |
| 10 | 39.7 | 27.6 | 86.0 | 63.4 | 2702.90 | 1176.66 |

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|---------|---------|
| 9 | 40.5 | 28.4 | 86.6 | 64.0 | 2626.76 | 1165.63 |
| 8 | 41.3 | 29.2 | 86.6 | 64.0 | 2554.79 | 1165.63 |
| 7 | 42.2 | 30.1 | 86.8 | 64.2 | 2478.41 | 1161.99 |
| 6 | 42.6 | 30.5 | 87.0 | 64.4 | 2445.90 | 1158.39 |
| 5 | 43.4 | 31.3 | 88.7 | 66.1 | 2383.39 | 1128.59 |
| 4 | 44.2 | 32.1 | 89.0 | 66.4 | 2323.99 | 1123.49 |
| 3 | 46.3 | 34.2 | 89.0 | 66.4 | 2181.29 | 1123.49 |
| 2 | 48.4 | 36.3 | 90.3 | 67.7 | 2055.10 | 1101.92 |
| 1 | 52.6 | 40.5 | 90.8 | 68.2 | 1841.98 | 1093.84 |

Anexo A.5

| Ondas laterales ciclo de carga 1A | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P μs | Onda P45 μs | Onda Sa μs | Onda Sb μs | Velocidad P m/s | Velocidad P45 m/s | Velocidad Sa m/s | Velocidad Sb m/s |
| 1 | 22 | 42 | 39.7 | 39.9 | 1744.55 | 1739.52 | 965.96 | 961.90 |
| 2 | 20.4 | 39 | 37.3 | 37.5 | 1881.37 | 1873.33 | 1028.39 | 1023.47 |
| 3 | 18.8 | 36 | 34.7 | 35.0 | 2041.49 | 2029.44 | 1104.77 | 1095.31 |
| 4 | 17.3 | 33 | 34.7 | 35.0 | 2218.50 | 2213.94 | 1104.77 | 1095.31 |
| 5 | 17 | 32.8 | 31.6 | 31.7 | 2257.65 | 2227.44 | 1213.94 | 1210.73 |
| 6 | 16.4 | 31.6 | 29.6 | 29.7 | 2340.24 | 2312.02 | 1297.95 | 1293.58 |
| 7 | 16 | 30.8 | 29.1 | 29.2 | 2398.75 | 2372.08 | 1320.13 | 1315.60 |
| 8 | 15.4 | 29.6 | 28.9 | 29.0 | 2492.21 | 2468.24 | 1329.55 | 1324.96 |
| 9 | 14.8 | 28.4 | 28.6 | 28.7 | 2593.24 | 2572.53 | 1342.24 | 1337.56 |
| 10 | 14.8 | 28.4 | 28.1 | 28.2 | 2593.24 | 2572.53 | 1364.24 | 1359.41 |
| 11 | 14.4 | 27.6 | 27.6 | 27.7 | 2665.28 | 2647.10 | 1390.74 | 1385.72 |
| 12 | 14.4 | 27.6 | 27.1 | 27.2 | 2665.28 | 2647.10 | 1416.30 | 1411.09 |
| 13 | 14 | 26.8 | 27.0 | 27.1 | 2741.43 | 2726.12 | 1422.10 | 1416.85 |
| 14 | 13.8 | 26.4 | 27.0 | 27.1 | 2781.16 | 2767.42 | 1422.10 | 1416.85 |
| 15 | 13.8 | 26 | 26.3 | 26.4 | 2781.16 | 2810.00 | 1461.28 | 1455.73 |
| 16 | 13.8 | 26 | 26.1 | 26.2 | 2781.16 | 2810.00 | 1469.73 | 1464.12 |
| 17 | 13.8 | 25.6 | 26.1 | 26.2 | 2781.16 | 2853.90 | 1469.73 | 1464.12 |
| 18 | 13.2 | 25.2 | 25.6 | 25.7 | 2907.58 | 2899.20 | 1498.77 | 1492.94 |
| 19 | 12.8 | 24.8 | 24.9 | 25.0 | 2998.44 | 2945.97 | 1539.22 | 1533.07 |
| 20 | 12.8 | 24.8 | 24.9 | 25.0 | 2998.44 | 2945.97 | 1539.22 | 1533.07 |
| 21 | 12.8 | 24.4 | 24.7 | 24.8 | 2998.44 | 2994.26 | 1553.96 | 1547.69 |
| 22 | 12.8 | 24.4 | 24.6 | 24.7 | 2998.44 | 2994.26 | 1558.32 | 1552.02 |
| 23 | 12.4 | 24 | 24.6 | 24.7 | 3095.16 | 3044.16 | 1561.51 | 1555.18 |
| 24 | 12.4 | 24 | 24.2 | 24.3 | 3095.16 | 3044.16 | 1585.80 | 1579.28 |
| 25 | 12.3 | 23.6 | 23.9 | 24.0 | 3120.33 | 3095.76 | 1604.41 | 1597.73 |
| 26 | 12.3 | 23.6 | 23.9 | 24.0 | 3120.33 | 3095.76 | 1604.41 | 1597.73 |
| 27 | 12.1 | 23.2 | 22.8 | 22.9 | 3171.90 | 3149.14 | 1686.62 | 1679.24 |
| 28 | 12.1 | 23.2 | 22.8 | 22.9 | 3171.90 | 3149.14 | 1686.62 | 1679.24 |

| | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|
| 29 | 12.1 | 23.2 | 21.9 | 22.0 | 3171.90 | 3149.14 | 1753.30 | 1745.33 |
| 30 | 12.1 | 23.2 | 21.4 | 21.5 | 3171.90 | 3149.14 | 1797.10 | 1788.72 |
| 31 | 11.9 | 22.8 | 21.4 | 21.5 | 3225.21 | 3204.38 | 1797.10 | 1788.72 |
| 32 | 11.9 | 22.8 | 20.9 | 21.0 | 3225.21 | 3204.38 | 1838.88 | 1830.11 |
| 33 | 11.9 | 22.8 | 20.9 | 21.0 | 3225.21 | 3204.38 | 1838.88 | 1830.11 |
| 34 | 11.7 | 22.4 | 20.3 | 20.4 | 3280.34 | 3261.61 | 1886.31 | 1877.09 |
| 35 | 11.7 | 22.4 | 20.3 | 20.4 | 3280.34 | 3261.61 | 1886.31 | 1877.09 |
| 36 | 11.7 | 22.4 | 20.3 | 20.4 | 3280.34 | 3261.61 | 1886.31 | 1877.09 |
| 37 | 11.3 | 22 | 19.8 | 19.9 | 3396.46 | 3320.91 | 1933.96 | 1924.26 |
| 38 | 11.3 | 22 | 19.8 | 19.9 | 3396.46 | 3320.91 | 1933.96 | 1924.26 |
| 39 | 11.3 | 22 | 19.8 | 19.9 | 3396.46 | 3320.91 | 1933.96 | 1924.26 |
| 40 | 11.3 | 22 | 19.8 | 19.9 | 3396.46 | 3320.91 | 1933.96 | 1924.26 |
| 41 | 11.3 | 22 | 19.8 | 19.9 | 3396.46 | 3320.91 | 1933.96 | 1924.26 |
| 42 | 11.3 | 22 | 19.3 | 19.4 | 3396.46 | 3320.91 | 1983.77 | 1973.57 |
| 43 | 11.3 | 22 | 19.3 | 19.4 | 3396.46 | 3320.91 | 1983.77 | 1973.57 |
| 44 | 11.3 | 22 | 19.3 | 19.4 | 3396.46 | 3320.91 | 1983.77 | 1973.57 |
| 45 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2008.95 |
| 46 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2008.95 |
| 47 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2008.95 |
| 48 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2008.95 |
| 49 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2008.95 |
| 50 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2008.95 |

Anexo A.6

| Ondas laterales ciclo de descarga 1 | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P μ s | Onda P45 μ s | Onda Sa μ s | Onda Sb μ s | Velocidad P m/s | Velocidad P45 m/s | Velocidad Sa m/s | Velocidad Sb m/s |
| 50 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 49 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 48 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 47 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 46 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 45 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 44 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 43 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 42 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 41 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 40 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 39 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 38 | 11.3 | 21.6 | 19.0 | 19.1 | 3396.46 | 3382.41 | 2019.52 | 2009.42 |
| 37 | 11.4 | 22 | 19.0 | 19.1 | 3366.67 | 3320.91 | 2019.52 | 2009.42 |
| 36 | 11.4 | 22 | 19.0 | 19.1 | 3366.67 | 3320.91 | 2019.52 | 2009.42 |
| 35 | 11.4 | 22 | 19.0 | 19.1 | 3366.67 | 3320.91 | 2019.52 | 2009.42 |
| 34 | 11.4 | 22 | 19.0 | 19.1 | 3366.67 | 3320.91 | 2019.52 | 2009.42 |
| 33 | 11.4 | 22 | 19.0 | 19.1 | 3366.67 | 3320.91 | 2019.52 | 2009.42 |
| 32 | 11.4 | 22 | 19.1 | 19.2 | 3366.67 | 3320.91 | 2013.17 | 1998.96 |
| 31 | 11.7 | 22.4 | 19.1 | 19.2 | 3280.34 | 3261.61 | 2013.17 | 1998.96 |
| 30 | 11.7 | 22.4 | 19.1 | 19.2 | 3280.34 | 3261.61 | 2013.17 | 1998.96 |
| 29 | 11.7 | 22.4 | 19.1 | 19.2 | 3280.34 | 3261.61 | 2012.96 | 1998.96 |
| 28 | 11.7 | 22.4 | 19.1 | 19.2 | 3280.34 | 3261.61 | 2012.96 | 1998.96 |
| 27 | 11.9 | 22.8 | 19.1 | 19.2 | 3225.21 | 3204.38 | 2012.96 | 1998.96 |
| 26 | 11.9 | 22.8 | 19.1 | 19.2 | 3225.21 | 3204.38 | 2012.96 | 1998.96 |
| 25 | 11.9 | 22.8 | 19.6 | 19.7 | 3225.21 | 3204.38 | 1959.53 | 1943.73 |
| 24 | 12.3 | 23.6 | 19.6 | 19.7 | 3120.33 | 3095.76 | 1959.53 | 1943.73 |
| 23 | 12.3 | 23.6 | 19.6 | 19.7 | 3120.33 | 3095.76 | 1959.53 | 1943.73 |

| | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|
| 22 | 12.3 | 23.6 | 19.9 | 19.7 | 3120.33 | 3095.76 | 1926.53 | 1943.73 |
| 21 | 12.3 | 23.6 | 19.9 | 19.7 | 3120.33 | 3095.76 | 1926.53 | 1943.73 |
| 20 | 12.3 | 24 | 19.9 | 19.7 | 3120.33 | 3044.16 | 1926.53 | 1943.73 |
| 19 | 12.7 | 24.4 | 20.0 | 20.1 | 3022.05 | 2994.26 | 1920.13 | 1909.45 |
| 18 | 12.7 | 24.4 | 20.0 | 20.1 | 3022.05 | 2994.26 | 1920.13 | 1909.45 |
| 17 | 12.7 | 24.4 | 20.5 | 20.6 | 3022.05 | 2994.26 | 1870.27 | 1863.11 |
| 16 | 12.9 | 24.8 | 21.3 | 21.4 | 2975.19 | 2945.97 | 1805.38 | 1793.46 |
| 15 | 13 | 25.2 | 21.3 | 21.4 | 2952.31 | 2899.20 | 1805.38 | 1793.46 |
| 14 | 13 | 25.2 | 22.3 | 22.4 | 2952.31 | 2899.20 | 1722.67 | 1713.39 |
| 13 | 13.5 | 26 | 22.7 | 22.8 | 2842.96 | 2810.00 | 1687.32 | 1683.33 |
| 12 | 13.5 | 26 | 22.7 | 22.8 | 2842.96 | 2810.00 | 1687.32 | 1683.33 |
| 11 | 13.8 | 26.8 | 22.7 | 22.8 | 2781.16 | 2726.12 | 1687.32 | 1683.33 |
| 10 | 13.8 | 26.8 | 22.8 | 22.9 | 2781.16 | 2726.12 | 1683.98 | 1675.98 |
| 9 | 14.3 | 27.6 | 25.6 | 25.7 | 2683.92 | 2647.10 | 1498.44 | 1493.39 |
| 8 | 14.8 | 28.4 | 26.5 | 26.6 | 2593.24 | 2572.53 | 1447.59 | 1442.86 |
| 7 | 15 | 28.8 | 27.5 | 27.6 | 2558.67 | 2536.80 | 1393.59 | 1390.58 |
| 6 | 15.4 | 29.6 | 28.7 | 28.8 | 2492.21 | 2468.24 | 1335.21 | 1332.64 |
| 5 | 16 | 30.8 | 30.5 | 30.6 | 2398.75 | 2372.08 | 1258.00 | 1254.25 |
| 4 | 16.7 | 32 | 31.7 | 31.8 | 2298.20 | 2283.12 | 1210.86 | 1205.38 |
| 3 | 17.5 | 33.6 | 31.8 | 31.9 | 2193.14 | 2174.40 | 1207.53 | 1203.22 |
| 2 | 18.4 | 35.6 | 31.8 | 31.9 | 2085.87 | 2052.25 | 1205.38 | 1203.13 |
| 1 | 20.2 | 38.8 | 32.1 | 32.2 | 1900.00 | 1882.99 | 1196.54 | 1191.93 |

Anexo A.7

| Ondas laterales ciclo de carga 2 | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P μ s | Onda P45 μ s | Onda Sa μ s | Onda Sb μ s | Velocidad P m/s | Velocidad P45 m/s | Velocidad Sa m/s | Velocidad Sb m/s |
| 1 | 20.2 | 38.8 | 32.1 | 32.2 | 1900.00 | 1882.99 | 1196.54 | 1191.93 |
| 2 | 19.1 | 36.8 | 31.8 | 31.9 | 2009.42 | 1985.32 | 1205.65 | 1203.13 |
| 3 | 18.2 | 34.8 | 30.2 | 30.3 | 2108.79 | 2099.42 | 1271.86 | 1266.67 |
| 4 | 17.2 | 33.2 | 30.2 | 30.3 | 2231.40 | 2200.60 | 1271.86 | 1266.67 |
| 5 | 16.4 | 31.6 | 28.8 | 28.9 | 2340.24 | 2312.02 | 1333.67 | 1328.03 |
| 6 | 16 | 30.8 | 28.8 | 28.9 | 2398.75 | 2372.08 | 1333.67 | 1328.03 |
| 7 | 15.6 | 30 | 28.8 | 28.9 | 2460.26 | 2435.33 | 1333.67 | 1328.03 |
| 8 | 15.4 | 29.6 | 27.2 | 27.3 | 2492.21 | 2468.24 | 1411.61 | 1405.86 |
| 9 | 15 | 28.8 | 27.2 | 27.3 | 2558.67 | 2536.80 | 1411.61 | 1405.86 |
| 10 | 14.6 | 28 | 26.8 | 26.9 | 2628.77 | 2609.28 | 1433.61 | 1426.77 |
| 11 | 14.4 | 27.6 | 26.8 | 26.9 | 2665.28 | 2647.10 | 1433.61 | 1426.77 |
| 12 | 14.4 | 27.6 | 26.8 | 26.9 | 2665.28 | 2647.10 | 1433.61 | 1426.77 |
| 13 | 14 | 26.8 | 26.1 | 26.2 | 2741.43 | 2726.12 | 1470.37 | 1464.89 |
| 14 | 13.8 | 26.4 | 26.1 | 26.2 | 2781.16 | 2767.42 | 1470.37 | 1464.89 |
| 15 | 13.4 | 26 | 25.5 | 25.6 | 2864.18 | 2810.00 | 1503.34 | 1499.22 |
| 16 | 13.3 | 26 | 25.5 | 25.6 | 2885.71 | 2810.00 | 1503.34 | 1499.22 |
| 17 | 13.2 | 25.6 | 25.5 | 25.6 | 2907.58 | 2853.90 | 1503.34 | 1499.22 |
| 18 | 13.1 | 25.2 | 25.5 | 25.6 | 2929.77 | 2899.20 | 1503.34 | 1499.22 |
| 19 | 13.1 | 24.8 | 25.5 | 25.6 | 2929.77 | 2945.97 | 1503.34 | 1499.22 |
| 20 | 13.1 | 24.8 | 25.1 | 25.2 | 2929.77 | 2945.97 | 1529.08 | 1523.02 |
| 21 | 12.6 | 24.4 | 25.1 | 25.2 | 3046.03 | 2994.26 | 1529.08 | 1523.02 |
| 22 | 12.6 | 24.4 | 25.1 | 25.2 | 3046.03 | 2994.26 | 1529.08 | 1523.02 |
| 23 | 12.5 | 24 | 25.1 | 25.2 | 3070.40 | 3044.16 | 1529.08 | 1523.02 |
| 24 | 12.5 | 24 | 25.1 | 25.2 | 3070.40 | 3044.16 | 1529.08 | 1523.02 |
| 25 | 12.3 | 23.6 | 25.1 | 25.2 | 3120.33 | 3095.76 | 1529.08 | 1523.02 |
| 26 | 12.3 | 23.6 | 25.1 | 25.2 | 3120.33 | 3095.76 | 1529.08 | 1523.02 |
| 27 | 12.3 | 23.6 | 24.2 | 24.3 | 3120.33 | 3095.76 | 1585.90 | 1579.42 |
| 28 | 12.1 | 23.2 | 24.2 | 24.3 | 3171.90 | 3149.14 | 1585.90 | 1579.42 |

| | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|
| 29 | 12.1 | 23.2 | 24.2 | 24.3 | 3171.90 | 3149.14 | 1585.90 | 1579.42 |
| 30 | 12.1 | 23.2 | 24.2 | 24.3 | 3171.90 | 3149.14 | 1585.90 | 1579.42 |
| 31 | 11.8 | 22.8 | 24.2 | 24.3 | 3252.54 | 3204.38 | 1585.90 | 1579.42 |
| 32 | 11.8 | 22.8 | 24.0 | 24.1 | 3252.54 | 3204.38 | 1599.17 | 1592.53 |
| 33 | 11.8 | 22.8 | 24.0 | 24.1 | 3252.54 | 3204.38 | 1599.17 | 1592.53 |
| 34 | 11.7 | 22.4 | 24.0 | 24.1 | 3280.34 | 3261.61 | 1599.17 | 1592.53 |
| 35 | 11.7 | 22.4 | 24.0 | 24.1 | 3280.34 | 3261.61 | 1599.17 | 1592.53 |
| 36 | 11.7 | 22.4 | 24.0 | 24.1 | 3280.34 | 3261.61 | 1599.17 | 1592.53 |
| 37 | 11.7 | 22.4 | 24.0 | 24.1 | 3280.34 | 3261.61 | 1599.17 | 1592.53 |
| 38 | 11.4 | 22 | 24.0 | 24.1 | 3366.67 | 3320.91 | 1599.17 | 1592.53 |
| 39 | 11.4 | 22 | 24.0 | 24.1 | 3366.67 | 3320.91 | 1599.17 | 1592.53 |
| 40 | 11.4 | 22 | 24.0 | 24.1 | 3366.67 | 3320.91 | 1599.17 | 1592.53 |
| 41 | 11.4 | 22 | 24.0 | 24.1 | 3366.67 | 3320.91 | 1599.17 | 1592.53 |
| 42 | 11.4 | 22 | 24.0 | 24.1 | 3366.67 | 3320.91 | 1599.17 | 1592.53 |
| 43 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 44 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 45 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 46 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 47 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 48 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 49 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 50 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |

Anexo A.8

| Ondas laterales ciclo de descarga 2 | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Fuerza Axial kN | Onda P μ s | Onda P45 μ s | Onda Sa μ s | Onda Sb μ s | Velocidad P m/s | Velocidad P45 m/s | Velocidad Sa m/s | Velocidad Sb m/s |
| 50 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 49 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 48 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 47 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 46 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 45 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 44 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 43 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 42 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 41 | 11.2 | 21.6 | 24.0 | 24.1 | 3426.79 | 3382.41 | 1599.17 | 1592.53 |
| 40 | 11.2 | 21.6 | 25.9 | 26.0 | 3426.79 | 3382.41 | 1479.21 | 1476.15 |
| 39 | 11.2 | 21.6 | 25.9 | 26.0 | 3426.79 | 3382.41 | 1479.21 | 1476.15 |
| 38 | 11.2 | 21.6 | 25.9 | 26.0 | 3426.79 | 3382.41 | 1479.21 | 1476.15 |
| 37 | 11.2 | 21.6 | 25.9 | 26.0 | 3426.79 | 3382.41 | 1479.21 | 1476.15 |
| 36 | 11.4 | 22 | 25.9 | 26.0 | 3366.67 | 3320.91 | 1479.21 | 1476.15 |
| 35 | 11.4 | 22 | 25.9 | 26.0 | 3366.67 | 3320.91 | 1479.21 | 1476.15 |
| 34 | 11.4 | 22 | 25.9 | 26.0 | 3366.67 | 3320.91 | 1479.21 | 1476.15 |
| 33 | 11.4 | 22 | 26.6 | 26.7 | 3366.67 | 3320.91 | 1440.86 | 1437.45 |
| 32 | 11.7 | 22.4 | 26.6 | 26.7 | 3280.34 | 3261.61 | 1440.86 | 1437.45 |
| 31 | 11.7 | 22.4 | 26.6 | 26.7 | 3280.34 | 3261.61 | 1440.86 | 1437.45 |
| 30 | 11.7 | 22.4 | 26.6 | 26.7 | 3280.34 | 3261.61 | 1440.86 | 1437.45 |
| 29 | 11.7 | 22.4 | 27.4 | 27.5 | 3280.34 | 3261.61 | 1401.86 | 1395.64 |
| 28 | 11.8 | 22.8 | 27.4 | 27.5 | 3252.54 | 3204.38 | 1401.86 | 1395.64 |
| 27 | 11.8 | 22.8 | 27.4 | 27.5 | 3252.54 | 3204.38 | 1401.86 | 1395.64 |
| 26 | 11.8 | 22.8 | 29.3 | 29.4 | 3252.54 | 3204.38 | 1309.33 | 1305.44 |
| 25 | 12.3 | 23.6 | 29.3 | 29.4 | 3120.33 | 3095.76 | 1309.33 | 1305.44 |
| 24 | 12.3 | 23.6 | 29.3 | 29.4 | 3120.33 | 3095.76 | 1309.33 | 1305.44 |

| | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|
| 23 | 12.3 | 23.6 | 31.7 | 31.8 | 3120.33 | 3095.76 | 1210.62 | 1206.92 |
| 22 | 12.3 | 23.6 | 31.7 | 31.8 | 3120.33 | 3095.76 | 1210.62 | 1206.92 |
| 21 | 12.7 | 24.4 | 31.7 | 31.8 | 3022.05 | 2994.26 | 1210.62 | 1206.92 |
| 20 | 12.7 | 24.4 | 32.0 | 32.1 | 3022.05 | 2994.26 | 1198.70 | 1195.64 |
| 19 | 12.7 | 24.4 | 32.0 | 32.1 | 3022.05 | 2994.26 | 1198.70 | 1195.64 |
| 18 | 12.7 | 24.4 | 32.1 | 32.2 | 3022.05 | 2994.26 | 1196.59 | 1191.93 |
| 17 | 12.7 | 24.4 | 32.1 | 32.2 | 3022.05 | 2994.26 | 1196.59 | 1191.93 |
| 16 | 12.9 | 24.8 | 32.1 | 32.2 | 2975.19 | 2945.97 | 1196.59 | 1191.93 |
| 15 | 13 | 25.2 | 32.2 | 32.3 | 2952.31 | 2899.20 | 1192.45 | 1188.24 |
| 14 | 13 | 25.2 | 32.2 | 32.3 | 2952.31 | 2899.20 | 1192.45 | 1188.24 |
| 13 | 13.3 | 25.6 | 32.2 | 32.3 | 2885.71 | 2853.90 | 1192.45 | 1188.24 |
| 12 | 13.4 | 26 | 32.3 | 32.4 | 2864.18 | 2810.00 | 1188.39 | 1184.57 |
| 11 | 13.8 | 26.4 | 32.3 | 32.4 | 2781.16 | 2767.42 | 1188.39 | 1184.57 |
| 10 | 14 | 26.8 | 32.3 | 32.4 | 2741.43 | 2726.12 | 1188.39 | 1184.57 |
| 9 | 14.4 | 27.6 | 32.6 | 32.7 | 2665.28 | 2647.10 | 1176.23 | 1173.70 |
| 8 | 14.8 | 28.4 | 32.6 | 32.7 | 2593.24 | 2572.53 | 1176.23 | 1173.70 |
| 7 | 15 | 29.2 | 32.7 | 32.8 | 2558.67 | 2502.05 | 1172.31 | 1170.12 |
| 6 | 15.4 | 29.6 | 32.8 | 32.9 | 2492.21 | 2468.24 | 1171.07 | 1166.57 |
| 5 | 15.6 | 30.4 | 33.7 | 33.8 | 2460.26 | 2403.29 | 1140.13 | 1135.50 |
| 4 | 16 | 31.2 | 33.8 | 33.9 | 2398.75 | 2341.67 | 1136.51 | 1132.15 |
| 3 | 17 | 33.2 | 33.8 | 33.9 | 2257.65 | 2200.60 | 1135.58 | 1132.15 |
| 2 | 18.3 | 35.2 | 34.5 | 34.6 | 2097.27 | 2075.57 | 1112.08 | 1109.25 |
| 1 | 20.2 | 39.2 | 34.8 | 34.9 | 1900.00 | 1863.77 | 1103.01 | 1099.71 |

ANEXO B

Anexo B.1

| Constantes elásticas ciclo de carga 1 | | | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| C11 Pa | C12 Pa | C33 Pa | C44 Pa | C13 Pa | C66 Pa |
| 7.9799E+09 | 3.1278E+09 | 7.8188E+09 | 2.3984E+09 | 3.1713E+09 | 2.4260E+09 |
| 9.2807E+09 | 3.7877E+09 | 9.1657E+09 | 2.7084E+09 | 3.7628E+09 | 2.7465E+09 |
| 1.0928E+10 | 4.6364E+09 | 1.0601E+10 | 3.1189E+09 | 4.5941E+09 | 3.1456E+09 |
| 1.2905E+10 | 6.6135E+09 | 1.2697E+10 | 3.1189E+09 | 6.6642E+09 | 3.1456E+09 |
| 1.3364E+10 | 5.6773E+09 | 1.2848E+10 | 3.8083E+09 | 5.2914E+09 | 3.8435E+09 |
| 1.4360E+10 | 5.5850E+09 | 1.3986E+10 | 4.3079E+09 | 5.2408E+09 | 4.3875E+09 |
| 1.5087E+10 | 6.0106E+09 | 1.4706E+10 | 4.5070E+09 | 5.5945E+09 | 4.5382E+09 |
| 1.6286E+10 | 7.0796E+09 | 1.5789E+10 | 4.5710E+09 | 6.7654E+09 | 4.6029E+09 |
| 1.7633E+10 | 8.2508E+09 | 1.6997E+10 | 4.6530E+09 | 8.0795E+09 | 4.6909E+09 |
| 1.7633E+10 | 7.9418E+09 | 1.7232E+10 | 4.7889E+09 | 7.6930E+09 | 4.8454E+09 |
| 1.8626E+10 | 8.5562E+09 | 1.8220E+10 | 5.0041E+09 | 8.3130E+09 | 5.0348E+09 |
| 1.8626E+10 | 8.1841E+09 | 1.8349E+10 | 5.1947E+09 | 7.8679E+09 | 5.2209E+09 |
| 1.9705E+10 | 9.1783E+09 | 1.9295E+10 | 5.2341E+09 | 9.0020E+09 | 5.2636E+09 |
| 2.0281E+10 | 9.7536E+09 | 1.9869E+10 | 5.2341E+09 | 9.6174E+09 | 5.2636E+09 |
| 2.0281E+10 | 9.1679E+09 | 2.0469E+10 | 5.5231E+09 | 9.9859E+09 | 5.5564E+09 |
| 2.0281E+10 | 9.0394E+09 | 2.0469E+10 | 5.5663E+09 | 9.8994E+09 | 5.6207E+09 |
| 2.0281E+10 | 9.0394E+09 | 2.1096E+10 | 5.5663E+09 | 1.0885E+10 | 5.6207E+09 |
| 2.2166E+10 | 1.0478E+10 | 2.1753E+10 | 5.8135E+09 | 1.0490E+10 | 5.8441E+09 |
| 2.3573E+10 | 1.1248E+10 | 2.2440E+10 | 6.1273E+09 | 1.0240E+10 | 6.1625E+09 |
| 2.3573E+10 | 1.1248E+10 | 2.2440E+10 | 6.1273E+09 | 1.0240E+10 | 6.1625E+09 |
| 2.3573E+10 | 1.1012E+10 | 2.3161E+10 | 6.2290E+09 | 1.1189E+10 | 6.2806E+09 |
| 2.3573E+10 | 1.0942E+10 | 2.3161E+10 | 6.2808E+09 | 1.1085E+10 | 6.3158E+09 |
| 2.5119E+10 | 1.2436E+10 | 2.4112E+10 | 6.3070E+09 | 1.1359E+10 | 6.3415E+09 |
| 2.5119E+10 | 1.2040E+10 | 2.4112E+10 | 6.4946E+09 | 1.0984E+10 | 6.5396E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.2142E+10 | 2.4916E+10 | 6.6622E+09 | 1.1708E+10 | 6.6933E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.2142E+10 | 2.4916E+10 | 6.6622E+09 | 1.1708E+10 | 6.6933E+09 |
| 2.6380E+10 | 1.1593E+10 | 2.5761E+10 | 7.3357E+09 | 1.1261E+10 | 7.3937E+09 |
| 2.6380E+10 | 1.1593E+10 | 2.5761E+10 | 7.3357E+09 | 1.1261E+10 | 7.3937E+09 |
| 2.6380E+10 | 1.0406E+10 | 2.5761E+10 | 7.9657E+09 | 1.0001E+10 | 7.9871E+09 |
| 2.6380E+10 | 9.6015E+09 | 2.5761E+10 | 8.3514E+09 | 9.2294E+09 | 8.3891E+09 |
| 2.7274E+10 | 1.0496E+10 | 2.6649E+10 | 8.3514E+09 | 1.0179E+10 | 8.3891E+09 |
| 2.7274E+10 | 9.7103E+09 | 2.6649E+10 | 8.7230E+09 | 9.4358E+09 | 8.7819E+09 |
| 2.7274E+10 | 9.7103E+09 | 2.6649E+10 | 8.7230E+09 | 9.4358E+09 | 8.7819E+09 |
| 2.8214E+10 | 9.7374E+09 | 2.7825E+10 | 9.2118E+09 | 9.3416E+09 | 9.2385E+09 |
| 2.8214E+10 | 9.7374E+09 | 2.7825E+10 | 9.2118E+09 | 9.3416E+09 | 9.2385E+09 |
| 2.8214E+10 | 9.7374E+09 | 2.7825E+10 | 9.2118E+09 | 9.3416E+09 | 9.2385E+09 |
| 3.0247E+10 | 1.0830E+10 | 2.7825E+10 | 9.6927E+09 | 9.3729E+09 | 9.7087E+09 |
| 3.0247E+10 | 1.0830E+10 | 2.7825E+10 | 9.6927E+09 | 9.3729E+09 | 9.7087E+09 |
| 3.0247E+10 | 1.0830E+10 | 2.7825E+10 | 9.6927E+09 | 9.3729E+09 | 9.7087E+09 |
| 3.0247E+10 | 1.0830E+10 | 2.7825E+10 | 9.6927E+09 | 9.3729E+09 | 9.7087E+09 |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3.0247E+10 | 1.0830E+10 | 2.7825E+10 | 9.6927E+09 | 9.3729E+09 | 9.7087E+09 |
| 3.0247E+10 | 9.8219E+09 | 2.7825E+10 | 1.0159E+10 | 8.4403E+09 | 1.0213E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.8219E+09 | 2.7825E+10 | 1.0159E+10 | 8.4403E+09 | 1.0213E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.8219E+09 | 2.7825E+10 | 1.0159E+10 | 8.4403E+09 | 1.0213E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0832E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0582E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0832E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0582E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0832E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0582E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0832E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0582E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0832E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0582E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0832E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0582E+10 |

Anexo B.2

| Constantes elásticas ciclo de descarga 1 | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| C11 Pa | C12 Pa | C33 Pa | C44 Pa | C13 Pa | C66 Pa |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 3.0247E+10 | 9.0731E+09 | 2.7825E+10 | 1.0544E+10 | 9.8337E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.5448E+09 | 2.6878E+10 | 1.0544E+10 | 8.3924E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.5448E+09 | 2.6878E+10 | 1.0544E+10 | 8.3924E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.5448E+09 | 2.6878E+10 | 1.0544E+10 | 8.3924E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.5448E+09 | 2.6878E+10 | 1.0544E+10 | 8.3924E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.5448E+09 | 2.6878E+10 | 1.0544E+10 | 8.3924E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.5448E+09 | 2.6878E+10 | 1.0544E+10 | 8.3924E+09 | 1.0587E+10 |
| 2.9719E+10 | 8.7648E+09 | 2.6878E+10 | 1.0432E+10 | 8.6177E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.8214E+10 | 7.2602E+09 | 2.6878E+10 | 1.0432E+10 | 7.3633E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.8214E+10 | 7.2602E+09 | 2.6878E+10 | 1.0432E+10 | 7.3633E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.8214E+10 | 7.2602E+09 | 2.6878E+10 | 1.0432E+10 | 7.3633E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.8214E+10 | 7.2602E+09 | 2.6878E+10 | 1.0432E+10 | 7.3633E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.8214E+10 | 7.2602E+09 | 2.6878E+10 | 1.0432E+10 | 7.3633E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.7274E+10 | 6.3198E+09 | 2.5978E+10 | 1.0432E+10 | 6.3431E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.7274E+10 | 6.3198E+09 | 2.5978E+10 | 1.0432E+10 | 6.3431E+09 | 1.0477E+10 |
| 2.7274E+10 | 7.4618E+09 | 2.5978E+10 | 9.7935E+09 | 7.6206E+09 | 9.9061E+09 |
| 2.5529E+10 | 5.7167E+09 | 2.3918E+10 | 9.7935E+09 | 5.9263E+09 | 9.9061E+09 |
| 2.5529E+10 | 5.7167E+09 | 2.3918E+10 | 9.7935E+09 | 5.9263E+09 | 9.9061E+09 |
| 2.5529E+10 | 5.7167E+09 | 2.3918E+10 | 9.7935E+09 | 5.9263E+09 | 9.9061E+09 |
| 2.5529E+10 | 5.7167E+09 | 2.3918E+10 | 9.7935E+09 | 5.9263E+09 | 9.9061E+09 |
| 2.5529E+10 | 5.7167E+09 | 2.3725E+10 | 9.7935E+09 | 4.3532E+09 | 9.9061E+09 |
| 2.3946E+10 | 4.8264E+09 | 2.3161E+10 | 9.4959E+09 | 4.4645E+09 | 9.5598E+09 |
| 2.3946E+10 | 4.8264E+09 | 2.3161E+10 | 9.4959E+09 | 4.4645E+09 | 9.5598E+09 |
| 2.3946E+10 | 5.7433E+09 | 2.3161E+10 | 8.9402E+09 | 5.5762E+09 | 9.1014E+09 |
| 2.3209E+10 | 6.3421E+09 | 2.2440E+10 | 8.3514E+09 | 5.9784E+09 | 8.4336E+09 |
| 2.2854E+10 | 5.9864E+09 | 2.1753E+10 | 8.3514E+09 | 5.0607E+09 | 8.4336E+09 |
| 2.2854E+10 | 7.4588E+09 | 2.1753E+10 | 7.6061E+09 | 6.5518E+09 | 7.6974E+09 |
| 2.1192E+10 | 6.3327E+09 | 2.0469E+10 | 7.3357E+09 | 5.9004E+09 | 7.4297E+09 |
| 2.1192E+10 | 6.3327E+09 | 2.0469E+10 | 7.3357E+09 | 5.9004E+09 | 7.4297E+09 |
| 2.0281E+10 | 5.4213E+09 | 1.9295E+10 | 7.3357E+09 | 4.5024E+09 | 7.4297E+09 |
| 2.0281E+10 | 5.5508E+09 | 1.9295E+10 | 7.2059E+09 | 4.7622E+09 | 7.3650E+09 |
| 1.8887E+10 | 7.1922E+09 | 1.8220E+10 | 5.6991E+09 | 6.7892E+09 | 5.8476E+09 |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1.7633E+10 | 6.7156E+09 | 1.7232E+10 | 5.3964E+09 | 6.4778E+09 | 5.4586E+09 |
| 1.7166E+10 | 7.0253E+09 | 1.6767E+10 | 4.9672E+09 | 6.8445E+09 | 5.0702E+09 |
| 1.6286E+10 | 6.9725E+09 | 1.5789E+10 | 4.5549E+09 | 6.7977E+09 | 4.6565E+09 |
| 1.5087E+10 | 6.8375E+09 | 1.4706E+10 | 4.0533E+09 | 6.5019E+09 | 4.1248E+09 |
| 1.3849E+10 | 6.2296E+09 | 1.3481E+10 | 3.7716E+09 | 6.1254E+09 | 3.8096E+09 |
| 1.2611E+10 | 5.0196E+09 | 1.2259E+10 | 3.7475E+09 | 4.8615E+09 | 3.7960E+09 |
| 1.1408E+10 | 3.8171E+09 | 1.0834E+10 | 3.7236E+09 | 3.5125E+09 | 3.7954E+09 |
| 9.4654E+09 | 2.0153E+09 | 9.1657E+09 | 3.6765E+09 | 1.9229E+09 | 3.7250E+09 |

Anexo B.3

| Constantes elásticas ciclo de carga 2 | | | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| C11 Pa | C12 Pa | C33 Pa | C44 Pa | C13 Pa | C66 Pa |
| 9.4654E+09 | 2.0153E+09 | 9.1657E+09 | 3.6765E+09 | 1.9229E+09 | 3.7250E+09 |
| 1.0587E+10 | 2.9962E+09 | 1.0212E+10 | 3.7475E+09 | 2.7719E+09 | 3.7954E+09 |
| 1.1660E+10 | 3.2463E+09 | 1.1385E+10 | 4.1636E+09 | 3.2623E+09 | 4.2069E+09 |
| 1.3055E+10 | 4.6416E+09 | 1.2549E+10 | 4.1636E+09 | 4.2618E+09 | 4.2069E+09 |
| 1.4360E+10 | 5.1114E+09 | 1.3815E+10 | 4.5872E+09 | 4.7657E+09 | 4.6243E+09 |
| 1.5087E+10 | 5.8384E+09 | 1.4521E+10 | 4.5872E+09 | 5.5243E+09 | 4.6243E+09 |
| 1.5871E+10 | 6.6220E+09 | 1.5382E+10 | 4.5872E+09 | 6.2979E+09 | 4.6243E+09 |
| 1.6286E+10 | 5.9210E+09 | 1.5789E+10 | 5.1171E+09 | 5.6730E+09 | 5.1822E+09 |
| 1.7166E+10 | 6.8012E+09 | 1.6654E+10 | 5.1171E+09 | 6.6000E+09 | 5.1822E+09 |
| 1.8119E+10 | 7.4441E+09 | 1.7592E+10 | 5.2740E+09 | 7.2966E+09 | 5.3375E+09 |
| 1.8626E+10 | 7.9509E+09 | 1.8220E+10 | 5.2740E+09 | 7.7731E+09 | 5.3375E+09 |
| 1.8626E+10 | 7.9509E+09 | 1.8220E+10 | 5.2740E+09 | 7.7731E+09 | 5.3375E+09 |
| 1.9705E+10 | 8.4524E+09 | 1.9295E+10 | 5.5663E+09 | 8.3375E+09 | 5.6265E+09 |
| 2.0281E+10 | 9.0277E+09 | 1.9869E+10 | 5.5663E+09 | 8.9529E+09 | 5.6265E+09 |
| 2.1510E+10 | 9.7229E+09 | 2.0469E+10 | 5.8367E+09 | 8.7352E+09 | 5.8934E+09 |
| 2.1834E+10 | 1.0048E+10 | 2.0469E+10 | 5.8367E+09 | 8.5660E+09 | 5.8934E+09 |
| 2.2166E+10 | 1.0380E+10 | 2.1096E+10 | 5.8367E+09 | 9.3971E+09 | 5.8934E+09 |
| 2.2506E+10 | 1.0719E+10 | 2.1753E+10 | 5.8367E+09 | 1.0271E+10 | 5.8934E+09 |
| 2.2506E+10 | 1.0719E+10 | 2.2440E+10 | 5.8367E+09 | 1.1364E+10 | 5.8934E+09 |
| 2.2506E+10 | 1.0342E+10 | 2.2440E+10 | 6.0281E+09 | 1.0982E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.4328E+10 | 1.2164E+10 | 2.3161E+10 | 6.0281E+09 | 1.1205E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.4328E+10 | 1.2164E+10 | 2.3161E+10 | 6.0281E+09 | 1.1205E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.4719E+10 | 1.2555E+10 | 2.3918E+10 | 6.0281E+09 | 1.2217E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.4719E+10 | 1.2555E+10 | 2.3918E+10 | 6.0281E+09 | 1.2217E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.3365E+10 | 2.4916E+10 | 6.0281E+09 | 1.2976E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.3365E+10 | 2.4916E+10 | 6.0281E+09 | 1.2976E+10 | 6.0819E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.2447E+10 | 2.4916E+10 | 6.4946E+09 | 1.2043E+10 | 6.5408E+09 |
| 2.6380E+10 | 1.3298E+10 | 2.5761E+10 | 6.4946E+09 | 1.2943E+10 | 6.5408E+09 |
| 2.6380E+10 | 1.3298E+10 | 2.5761E+10 | 6.4946E+09 | 1.2943E+10 | 6.5408E+09 |
| 2.6380E+10 | 1.3298E+10 | 2.5761E+10 | 6.4946E+09 | 1.2943E+10 | 6.5408E+09 |
| 2.7738E+10 | 1.4657E+10 | 2.6649E+10 | 6.4946E+09 | 1.3656E+10 | 6.5408E+09 |
| 2.7738E+10 | 1.4439E+10 | 2.6649E+10 | 6.6056E+09 | 1.3434E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.7738E+10 | 1.4439E+10 | 2.6649E+10 | 6.6056E+09 | 1.3434E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.4915E+10 | 2.7584E+10 | 6.6056E+09 | 1.4673E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.4915E+10 | 2.7584E+10 | 6.6056E+09 | 1.4673E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.4915E+10 | 2.7584E+10 | 6.6056E+09 | 1.4673E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.4915E+10 | 2.7584E+10 | 6.6056E+09 | 1.4673E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.6419E+10 | 2.8569E+10 | 6.6056E+09 | 1.5470E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.6419E+10 | 2.8569E+10 | 6.6056E+09 | 1.5470E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.6419E+10 | 2.8569E+10 | 6.6056E+09 | 1.5470E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.6419E+10 | 2.8569E+10 | 6.6056E+09 | 1.5470E+10 | 6.6498E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.6419E+10 | 2.8569E+10 | 6.6056E+09 | 1.5470E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |

Anexo B.4

| Constantes elásticas ciclo de descarga 2 | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| C11 Pa | C12 Pa | C33 Pa | C44 Pa | C13 Pa | C66 Pa |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.7490E+10 | 2.9608E+10 | 6.6056E+09 | 1.6577E+10 | 6.6498E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.9363E+10 | 2.9608E+10 | 5.6544E+09 | 1.8480E+10 | 5.7134E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.9363E+10 | 2.9608E+10 | 5.6544E+09 | 1.8480E+10 | 5.7134E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.9363E+10 | 2.9608E+10 | 5.6544E+09 | 1.8480E+10 | 5.7134E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.9363E+10 | 2.9608E+10 | 5.6544E+09 | 1.8480E+10 | 5.7134E+09 |
| 3.0790E+10 | 1.9363E+10 | 2.9608E+10 | 5.6544E+09 | 1.8480E+10 | 5.7134E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.8292E+10 | 2.8569E+10 | 5.6544E+09 | 1.7373E+10 | 5.7134E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.8292E+10 | 2.8569E+10 | 5.6544E+09 | 1.7373E+10 | 5.7134E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.8292E+10 | 2.8569E+10 | 5.6544E+09 | 1.7373E+10 | 5.7134E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.8292E+10 | 2.8569E+10 | 5.6544E+09 | 1.7373E+10 | 5.7134E+09 |
| 2.9719E+10 | 1.8883E+10 | 2.8569E+10 | 5.3551E+09 | 1.7972E+10 | 5.4178E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.7379E+10 | 2.7584E+10 | 5.3551E+09 | 1.7174E+10 | 5.4178E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.7379E+10 | 2.7584E+10 | 5.3551E+09 | 1.7174E+10 | 5.4178E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.7379E+10 | 2.7584E+10 | 5.3551E+09 | 1.7174E+10 | 5.4178E+09 |
| 2.8214E+10 | 1.8000E+10 | 2.7584E+10 | 5.0601E+09 | 1.7764E+10 | 5.1071E+09 |
| 2.7738E+10 | 1.7524E+10 | 2.6649E+10 | 5.0601E+09 | 1.6525E+10 | 5.1071E+09 |
| 2.7738E+10 | 1.7524E+10 | 2.6649E+10 | 5.0601E+09 | 1.6525E+10 | 5.1071E+09 |
| 2.7738E+10 | 1.8802E+10 | 2.6649E+10 | 4.4134E+09 | 1.7819E+10 | 4.4684E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.6592E+10 | 2.4711E+10 | 4.4134E+09 | 1.6306E+10 | 4.4684E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.6592E+10 | 2.4711E+10 | 4.4134E+09 | 1.6306E+10 | 4.4684E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.7890E+10 | 2.4711E+10 | 3.7716E+09 | 1.7590E+10 | 3.8193E+09 |
| 2.5529E+10 | 1.7890E+10 | 2.4711E+10 | 3.7716E+09 | 1.7590E+10 | 3.8193E+09 |
| 2.3946E+10 | 1.6307E+10 | 2.3161E+10 | 3.7716E+09 | 1.5915E+10 | 3.8193E+09 |
| 2.3946E+10 | 1.6450E+10 | 2.3161E+10 | 3.6999E+09 | 1.6058E+10 | 3.7483E+09 |
| 2.3946E+10 | 1.6450E+10 | 2.3161E+10 | 3.6999E+09 | 1.6058E+10 | 3.7483E+09 |
| 2.3946E+10 | 1.6496E+10 | 2.3161E+10 | 3.6765E+09 | 1.6105E+10 | 3.7250E+09 |
| 2.3946E+10 | 1.6496E+10 | 2.3161E+10 | 3.6765E+09 | 1.6105E+10 | 3.7250E+09 |
| 2.3209E+10 | 1.5759E+10 | 2.2440E+10 | 3.6765E+09 | 1.5330E+10 | 3.7250E+09 |
| 2.2854E+10 | 1.5450E+10 | 2.1753E+10 | 3.6532E+09 | 1.4460E+10 | 3.7020E+09 |
| 2.2854E+10 | 1.5450E+10 | 2.1753E+10 | 3.6532E+09 | 1.4460E+10 | 3.7020E+09 |
| 2.1834E+10 | 1.4430E+10 | 2.1096E+10 | 3.6532E+09 | 1.3936E+10 | 3.7020E+09 |
| 2.1510E+10 | 1.4151E+10 | 2.0469E+10 | 3.6302E+09 | 1.3149E+10 | 3.6792E+09 |
| 2.0281E+10 | 1.2922E+10 | 1.9869E+10 | 3.6302E+09 | 1.2825E+10 | 3.6792E+09 |
| 1.9705E+10 | 1.2347E+10 | 1.9155E+10 | 3.6302E+09 | 1.2279E+10 | 3.6792E+09 |
| 1.8626E+10 | 1.1402E+10 | 1.8091E+10 | 3.5625E+09 | 1.1259E+10 | 3.6120E+09 |

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1.7633E+10 | 1.0409E+10 | 1.7114E+10 | 3.5625E+09 | 1.0204E+10 | 3.6120E+09 |
| 1.7166E+10 | 9.9856E+09 | 1.6106E+10 | 3.5403E+09 | 9.1015E+09 | 3.5900E+09 |
| 1.6286E+10 | 9.1491E+09 | 1.5686E+10 | 3.5183E+09 | 8.9216E+09 | 3.5682E+09 |
| 1.5871E+10 | 9.1092E+09 | 1.4894E+10 | 3.3397E+09 | 8.2161E+09 | 3.3807E+09 |
| 1.5087E+10 | 8.3654E+09 | 1.4161E+10 | 3.3096E+09 | 7.5017E+09 | 3.3608E+09 |
| 1.3364E+10 | 6.6426E+09 | 1.2476E+10 | 3.3096E+09 | 5.8450E+09 | 3.3608E+09 |
| 1.1533E+10 | 5.0806E+09 | 1.1074E+10 | 3.1837E+09 | 4.9170E+09 | 3.2262E+09 |
| 9.4654E+09 | 3.1235E+09 | 8.8961E+09 | 3.1372E+09 | 2.7538E+09 | 3.1710E+09 |

ANEXO C

| Primer ciclo de carga | | Primer ciclo de descarga | | Segundo ciclo de carga | | Segundo ciclo de descarga | |
|-----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| Anisotropía onda P | Anisotropía onda S | Anisotropía onda P | Anisotropía onda S | Anisotropía onda P | Anisotropía onda S | Anisotropía onda P | Anisotropía onda S |
| ϵ | γ | ϵ | γ | ϵ | γ | ϵ | γ |
| 0.0103 | 0.0058 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0164 | 0.0066 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0063 | 0.0070 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0183 | 0.0064 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0154 | 0.0043 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0121 | 0.0052 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0082 | 0.0043 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0202 | 0.0052 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0201 | 0.0046 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0197 | 0.0040 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0134 | 0.0092 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0195 | 0.0040 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0130 | 0.0035 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0159 | 0.0040 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0157 | 0.0035 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0157 | 0.0064 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0187 | 0.0041 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0154 | 0.0064 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0116 | 0.0059 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0150 | 0.0060 | 0.0200 | 0.0033 |
| 0.0112 | 0.0031 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0112 | 0.0060 | 0.0200 | 0.0052 |
| 0.0075 | 0.0025 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0112 | 0.0060 | 0.0200 | 0.0052 |
| 0.0106 | 0.0028 | 0.0435 | 0.0020 | 0.0106 | 0.0054 | 0.0200 | 0.0052 |
| 0.0104 | 0.0028 | 0.0528 | 0.0020 | 0.0104 | 0.0054 | 0.0200 | 0.0052 |
| -0.0046 | 0.0030 | 0.0528 | 0.0020 | 0.0254 | 0.0049 | 0.0201 | 0.0052 |
| -0.0046 | 0.0049 | 0.0528 | 0.0020 | 0.0334 | 0.0049 | 0.0201 | 0.0052 |
| -0.0193 | 0.0049 | 0.0528 | 0.0020 | 0.0254 | 0.0049 | 0.0201 | 0.0052 |
| 0.0095 | 0.0026 | 0.0528 | 0.0020 | 0.0173 | 0.0049 | 0.0201 | 0.0058 |
| 0.0252 | 0.0029 | 0.0528 | 0.0022 | 0.0015 | 0.0049 | 0.0114 | 0.0058 |
| 0.0252 | 0.0029 | 0.0249 | 0.0022 | 0.0015 | 0.0045 | 0.0114 | 0.0058 |
| 0.0089 | 0.0041 | 0.0249 | 0.0022 | 0.0252 | 0.0045 | 0.0114 | 0.0058 |
| 0.0089 | 0.0028 | 0.0249 | 0.0022 | 0.0252 | 0.0045 | 0.0114 | 0.0046 |
| 0.0209 | 0.0027 | 0.0249 | 0.0022 | 0.0167 | 0.0045 | 0.0204 | 0.0046 |
| 0.0209 | 0.0035 | 0.0249 | 0.0022 | 0.0167 | 0.0045 | 0.0204 | 0.0046 |
| 0.0123 | 0.0023 | 0.0249 | 0.0022 | 0.0123 | 0.0045 | 0.0204 | 0.0062 |

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.0123 | 0.0023 | 0.0249 | 0.0058 | 0.0123 | 0.0045 | 0.0165 | 0.0062 |
| 0.0120 | 0.0040 | 0.0337 | 0.0058 | 0.0123 | 0.0036 | 0.0165 | 0.0062 |
| 0.0120 | 0.0040 | 0.0337 | 0.0058 | 0.0120 | 0.0036 | 0.0165 | 0.0063 |
| 0.0120 | 0.0013 | 0.0337 | 0.0058 | 0.0120 | 0.0036 | 0.0165 | 0.0063 |
| 0.0120 | 0.0023 | 0.0337 | 0.0058 | 0.0120 | 0.0036 | 0.0169 | 0.0063 |
| 0.0117 | 0.0023 | 0.0380 | 0.0058 | 0.0204 | 0.0036 | 0.0169 | 0.0065 |
| 0.0117 | 0.0034 | 0.0169 | 0.0034 | 0.0204 | 0.0033 | 0.0169 | 0.0065 |
| 0.0117 | 0.0034 | 0.0169 | 0.0034 | 0.0204 | 0.0033 | 0.0169 | 0.0066 |
| 0.0070 | 0.0015 | 0.0169 | 0.0090 | 0.0114 | 0.0033 | 0.0169 | 0.0066 |
| 0.0070 | 0.0015 | 0.0171 | 0.0049 | 0.0114 | 0.0033 | 0.0171 | 0.0066 |
| 0.0070 | 0.0015 | 0.0253 | 0.0049 | 0.0114 | 0.0033 | 0.0253 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0008 | 0.0253 | 0.0060 | 0.0114 | 0.0033 | 0.0253 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0008 | 0.0177 | 0.0064 | 0.0201 | 0.0033 | 0.0175 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0008 | 0.0177 | 0.0064 | 0.0201 | 0.0033 | 0.0254 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0008 | 0.0255 | 0.0064 | 0.0201 | 0.0033 | 0.0104 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0008 | 0.0255 | 0.0110 | 0.0201 | 0.0033 | 0.0144 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0027 | 0.0183 | 0.0130 | 0.0201 | 0.0033 | 0.0148 | 0.0070 |
| 0.0435 | 0.0027 | 0.0116 | 0.0058 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0152 | 0.0070 |
| 0.0435 | 0.0027 | 0.0119 | 0.0104 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0329 | 0.0070 |
| 0.0435 | 0.0018 | 0.0157 | 0.0112 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0191 | 0.0071 |
| 0.0435 | 0.0018 | 0.0130 | 0.0088 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0328 | 0.0061 |
| 0.0435 | 0.0018 | 0.0136 | 0.0050 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0327 | 0.0077 |
| 0.0435 | 0.0018 | 0.0144 | 0.0065 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0356 | 0.0077 |
| 0.0435 | 0.0018 | 0.0265 | 0.0096 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0207 | 0.0067 |
| 0.0435 | 0.0018 | 0.0164 | 0.0066 | 0.0200 | 0.0033 | 0.0320 | 0.0054 |

ANEXO D

Anexo D.1

| Parámetros mecánicos primer ciclo de carga | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| Determinante | Ev Pa | Ev Psi | Eh Pa | Eh Psi | v1 | v2 | v3 | K Pa | K Psi |
| 3.2381E+29 | 6.0080E+09 | 8.7117E+05 | 6.1870E+09 | 8.9711E+05 | 0.2751 | 0.2940 | 0.2855 | 4.7464E+09 | 6.8823E+05 |
| 5.0241E+29 | 6.9988E+09 | 1.0148E+06 | 7.0856E+09 | 1.0274E+06 | 0.2899 | 0.2915 | 0.2879 | 5.5946E+09 | 8.1122E+05 |
| 7.7249E+29 | 7.8892E+09 | 1.1439E+06 | 8.1536E+09 | 1.1823E+06 | 0.2960 | 0.3051 | 0.2952 | 6.6768E+09 | 9.6814E+05 |
| 1.0003E+30 | 8.1465E+09 | 1.1812E+06 | 8.3750E+09 | 1.2144E+06 | 0.3312 | 0.3510 | 0.3414 | 8.7098E+09 | 1.2629E+06 |
| 1.4502E+30 | 9.9076E+09 | 1.4366E+06 | 1.0091E+10 | 1.4632E+06 | 0.3127 | 0.2830 | 0.2779 | 8.0031E+09 | 1.1605E+06 |
| 1.9658E+30 | 1.1232E+10 | 1.6287E+06 | 1.1338E+10 | 1.6441E+06 | 0.2921 | 0.2652 | 0.2628 | 8.3113E+09 | 1.2051E+06 |
| 2.2479E+30 | 1.1739E+10 | 1.7021E+06 | 1.1796E+10 | 1.7104E+06 | 0.2996 | 0.2665 | 0.2652 | 8.8038E+09 | 1.2765E+06 |
| 2.5535E+30 | 1.1871E+10 | 1.7214E+06 | 1.2081E+10 | 1.7517E+06 | 0.3123 | 0.2947 | 0.2896 | 9.9482E+09 | 1.4425E+06 |
| 2.9026E+30 | 1.1953E+10 | 1.7332E+06 | 1.2382E+10 | 1.7954E+06 | 0.3198 | 0.3233 | 0.3121 | 1.1226E+10 | 1.6278E+06 |
| 3.1236E+30 | 1.2603E+10 | 1.8275E+06 | 1.2767E+10 | 1.8513E+06 | 0.3175 | 0.3047 | 0.3008 | 1.1014E+10 | 1.5970E+06 |
| 3.5952E+30 | 1.3135E+10 | 1.9046E+06 | 1.3303E+10 | 1.9290E+06 | 0.3211 | 0.3097 | 0.3058 | 1.1756E+10 | 1.7047E+06 |
| 3.8439E+30 | 1.3731E+10 | 1.9910E+06 | 1.3735E+10 | 1.9916E+06 | 0.3154 | 0.2936 | 0.2935 | 1.1491E+10 | 1.6662E+06 |
| 4.1608E+30 | 1.3684E+10 | 1.9842E+06 | 1.3907E+10 | 2.0165E+06 | 0.3211 | 0.3167 | 0.3117 | 1.2561E+10 | 1.8213E+06 |
| 4.3346E+30 | 1.3710E+10 | 1.9879E+06 | 1.3962E+10 | 2.0245E+06 | 0.3263 | 0.3261 | 0.3202 | 1.3154E+10 | 1.9074E+06 |
| 4.4822E+30 | 1.3696E+10 | 1.9860E+06 | 1.4211E+10 | 2.0606E+06 | 0.2788 | 0.3518 | 0.3391 | 1.3249E+10 | 1.9211E+06 |
| 4.5431E+30 | 1.3784E+10 | 1.9987E+06 | 1.4326E+10 | 2.0773E+06 | 0.2744 | 0.3509 | 0.3376 | 1.3182E+10 | 1.9113E+06 |
| 4.2893E+30 | 1.3014E+10 | 1.8870E+06 | 1.3865E+10 | 2.0105E+06 | 0.2334 | 0.3955 | 0.3712 | 1.3641E+10 | 1.9780E+06 |
| 5.7274E+30 | 1.5011E+10 | 2.1766E+06 | 1.5391E+10 | 2.2317E+06 | 0.3168 | 0.3295 | 0.3213 | 1.4333E+10 | 2.0782E+06 |
| 7.0463E+30 | 1.6418E+10 | 2.3806E+06 | 1.6613E+10 | 2.4089E+06 | 0.3479 | 0.2976 | 0.2941 | 1.4756E+10 | 2.1397E+06 |
| 7.0463E+30 | 1.6418E+10 | 2.3806E+06 | 1.6613E+10 | 2.4089E+06 | 0.3479 | 0.2976 | 0.2941 | 1.4756E+10 | 2.1397E+06 |
| 6.9170E+30 | 1.5922E+10 | 2.3086E+06 | 1.6438E+10 | 2.3835E+06 | 0.3086 | 0.3340 | 0.3235 | 1.5232E+10 | 2.2086E+06 |
| 6.9934E+30 | 1.6041E+10 | 2.3259E+06 | 1.6529E+10 | 2.3967E+06 | 0.3085 | 0.3309 | 0.3212 | 1.5170E+10 | 2.1996E+06 |
| 8.2119E+30 | 1.7241E+10 | 2.4999E+06 | 1.7229E+10 | 2.4981E+06 | 0.3584 | 0.3023 | 0.3025 | 1.6049E+10 | 2.3271E+06 |
| 8.5628E+30 | 1.7619E+10 | 2.5548E+06 | 1.7654E+10 | 2.5599E+06 | 0.3498 | 0.2962 | 0.2956 | 1.5795E+10 | 2.2903E+06 |
| 8.8951E+30 | 1.7639E+10 | 2.5577E+06 | 1.7826E+10 | 2.5847E+06 | 0.3316 | 0.3141 | 0.3108 | 1.6337E+10 | 2.3689E+06 |

| | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| 8.8951E+30 | 1.7639E+10 | 2.5577E+06 | 1.7826E+10 | 2.5847E+06 | 0.3316 | 0.3141 | 0.3108 | 1.6337E+10 | 2.3689E+06 |
| 1.0715E+31 | 1.9082E+10 | 2.7668E+06 | 1.9384E+10 | 2.8107E+06 | 0.3108 | 0.3013 | 0.2966 | 1.6301E+10 | 2.3636E+06 |
| 1.0715E+31 | 1.9082E+10 | 2.7668E+06 | 1.9384E+10 | 2.8107E+06 | 0.3108 | 0.3013 | 0.2966 | 1.6301E+10 | 2.3636E+06 |
| 1.1942E+31 | 2.0323E+10 | 2.9468E+06 | 2.0606E+10 | 2.9879E+06 | 0.2900 | 0.2757 | 0.2719 | 1.5477E+10 | 2.2441E+06 |
| 1.2693E+31 | 2.1026E+10 | 3.0488E+06 | 2.1356E+10 | 3.0966E+06 | 0.2728 | 0.2605 | 0.2565 | 1.4956E+10 | 2.1686E+06 |
| 1.3411E+31 | 2.1162E+10 | 3.0685E+06 | 2.1519E+10 | 3.1202E+06 | 0.2825 | 0.2740 | 0.2695 | 1.5874E+10 | 2.3018E+06 |
| 1.4183E+31 | 2.1834E+10 | 3.1660E+06 | 2.2238E+10 | 3.2245E+06 | 0.2661 | 0.2598 | 0.2551 | 1.5370E+10 | 2.2286E+06 |
| 1.4183E+31 | 2.1834E+10 | 3.1660E+06 | 2.2238E+10 | 3.2245E+06 | 0.2661 | 0.2598 | 0.2551 | 1.5370E+10 | 2.2286E+06 |
| 1.6287E+31 | 2.3227E+10 | 3.3678E+06 | 2.3341E+10 | 3.3844E+06 | 0.2632 | 0.2474 | 0.2461 | 1.5675E+10 | 2.2728E+06 |
| 1.6287E+31 | 2.3227E+10 | 3.3678E+06 | 2.3341E+10 | 3.3844E+06 | 0.2632 | 0.2474 | 0.2461 | 1.5675E+10 | 2.2728E+06 |
| 1.6287E+31 | 2.3227E+10 | 3.3678E+06 | 2.3341E+10 | 3.3844E+06 | 0.2632 | 0.2474 | 0.2461 | 1.5675E+10 | 2.2728E+06 |
| 1.8782E+31 | 2.3548E+10 | 3.4144E+06 | 2.4917E+10 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 1.6329E+10 | 2.3677E+06 |
| 1.8782E+31 | 2.3548E+10 | 3.4144E+06 | 2.4917E+10 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 1.6329E+10 | 2.3677E+06 |
| 1.8782E+31 | 2.3548E+10 | 3.4144E+06 | 2.4917E+10 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 1.6329E+10 | 2.3677E+06 |
| 1.8782E+31 | 2.3548E+10 | 3.4144E+06 | 2.4917E+10 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 1.6329E+10 | 2.3677E+06 |
| 1.9863E+31 | 2.4269E+10 | 3.5191E+06 | 2.5782E+10 | 3.7385E+06 | 0.2623 | 0.2238 | 0.2106 | 1.5695E+10 | 2.2758E+06 |
| 1.9863E+31 | 2.4269E+10 | 3.5191E+06 | 2.5782E+10 | 3.7385E+06 | 0.2623 | 0.2238 | 0.2106 | 1.5695E+10 | 2.2758E+06 |
| 1.9863E+31 | 2.4269E+10 | 3.5191E+06 | 2.5782E+10 | 3.7385E+06 | 0.2623 | 0.2238 | 0.2106 | 1.5695E+10 | 2.2758E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |
| 1.9068E+31 | 2.2908E+10 | 3.3216E+06 | 2.5597E+10 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 1.6191E+10 | 2.3477E+06 |

Anexo D.2

| Parámetros mecánicos primer ciclo de descarga | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| Determinante | Ev Pa | Ev Psi | Eh Pa | Eh Psi | v1 | v2 | v3 | K Pa | K Psi |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.9071E+31 | 2.2907E+10 | 3.3215E+06 | 2.5601E+10 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 1.6189E+10 | 2.3474E+06 |
| 1.8794E+31 | 2.3197E+10 | 3.3635E+06 | 2.5803E+10 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 1.5185E+10 | 2.2019E+06 |
| 1.8794E+31 | 2.3197E+10 | 3.3635E+06 | 2.5803E+10 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 1.5185E+10 | 2.2019E+06 |
| 1.8794E+31 | 2.3197E+10 | 3.3635E+06 | 2.5803E+10 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 1.5185E+10 | 2.2019E+06 |
| 1.8794E+31 | 2.3197E+10 | 3.3635E+06 | 2.5803E+10 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 1.5185E+10 | 2.2019E+06 |
| 1.8794E+31 | 2.3197E+10 | 3.3635E+06 | 2.5803E+10 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 1.5185E+10 | 2.2019E+06 |
| 1.8562E+31 | 2.3019E+10 | 3.3377E+06 | 2.5620E+10 | 3.7148E+06 | 0.2227 | 0.2492 | 0.2239 | 1.5334E+10 | 2.2234E+06 |
| 1.7707E+31 | 2.3821E+10 | 3.4541E+06 | 2.5148E+10 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 1.4137E+10 | 2.0498E+06 |
| 1.7707E+31 | 2.3821E+10 | 3.4541E+06 | 2.5148E+10 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 1.4137E+10 | 2.0498E+06 |
| 1.7707E+31 | 2.3821E+10 | 3.4541E+06 | 2.5148E+10 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 1.4137E+10 | 2.0498E+06 |
| 1.7707E+31 | 2.3821E+10 | 3.4541E+06 | 2.5148E+10 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 1.4137E+10 | 2.0498E+06 |
| 1.6601E+31 | 2.3583E+10 | 3.4196E+06 | 2.4840E+10 | 3.6019E+06 | 0.1855 | 0.1989 | 0.1888 | 1.3165E+10 | 1.9089E+06 |
| 1.6601E+31 | 2.3583E+10 | 3.4196E+06 | 2.4840E+10 | 3.6019E+06 | 0.1855 | 0.1989 | 0.1888 | 1.3165E+10 | 1.9089E+06 |
| 1.5577E+31 | 2.2635E+10 | 3.2820E+06 | 2.3948E+10 | 3.4724E+06 | 0.2087 | 0.2321 | 0.2194 | 1.3987E+10 | 2.0282E+06 |
| 1.3414E+31 | 2.1669E+10 | 3.1421E+06 | 2.3310E+10 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.2227E+10 | 1.7729E+06 |
| 1.3414E+31 | 2.1669E+10 | 3.1421E+06 | 2.3310E+10 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.2227E+10 | 1.7729E+06 |

| | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| 1.3414E+31 | 2.1669E+10 | 3.1421E+06 | 2.3310E+10 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.2227E+10 | 1.7729E+06 |
| 1.3414E+31 | 2.1669E+10 | 3.1421E+06 | 2.3310E+10 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.2227E+10 | 1.7729E+06 |
| 1.3936E+31 | 2.2512E+10 | 3.2642E+06 | 2.3752E+10 | 3.4441E+06 | 0.1989 | 0.1470 | 0.1393 | 1.1478E+10 | 1.6643E+06 |
| 1.1979E+31 | 2.1776E+10 | 3.1575E+06 | 2.2404E+10 | 3.2486E+06 | 0.1718 | 0.1596 | 0.1552 | 1.0946E+10 | 1.5872E+06 |
| 1.1979E+31 | 2.1776E+10 | 3.1575E+06 | 2.2404E+10 | 3.2486E+06 | 0.1718 | 0.1596 | 0.1552 | 1.0946E+10 | 1.5872E+06 |
| 1.1385E+31 | 2.1067E+10 | 3.0547E+06 | 2.1747E+10 | 3.1533E+06 | 0.1947 | 0.1939 | 0.1878 | 1.1646E+10 | 1.6886E+06 |
| 9.9797E+30 | 2.0021E+10 | 2.9031E+06 | 2.0573E+10 | 2.9831E+06 | 0.2197 | 0.2079 | 0.2023 | 1.1712E+10 | 1.6982E+06 |
| 9.7177E+30 | 1.9977E+10 | 2.8966E+06 | 2.0609E+10 | 2.9884E+06 | 0.2219 | 0.1810 | 0.1755 | 1.1058E+10 | 1.6033E+06 |
| 8.8293E+30 | 1.8920E+10 | 2.7434E+06 | 1.9439E+10 | 2.8187E+06 | 0.2627 | 0.2221 | 0.2161 | 1.2046E+10 | 1.7467E+06 |
| 7.3371E+30 | 1.7939E+10 | 2.6011E+06 | 1.8391E+10 | 2.6666E+06 | 0.2376 | 0.2198 | 0.2144 | 1.1007E+10 | 1.5960E+06 |
| 7.3371E+30 | 1.7939E+10 | 2.6011E+06 | 1.8391E+10 | 2.6666E+06 | 0.2376 | 0.2198 | 0.2144 | 1.1007E+10 | 1.5960E+06 |
| 6.7667E+30 | 1.7718E+10 | 2.5690E+06 | 1.8237E+10 | 2.6443E+06 | 0.2273 | 0.1803 | 0.1752 | 9.8391E+09 | 1.4267E+06 |
| 6.6736E+30 | 1.7539E+10 | 2.5432E+06 | 1.8103E+10 | 2.6250E+06 | 0.2290 | 0.1903 | 0.1844 | 9.9853E+09 | 1.4479E+06 |
| 4.4789E+30 | 1.4685E+10 | 2.1293E+06 | 1.5029E+10 | 2.1791E+06 | 0.2850 | 0.2664 | 0.2603 | 1.0830E+10 | 1.5704E+06 |
| 3.6642E+30 | 1.3785E+10 | 1.9988E+06 | 1.3992E+10 | 2.0288E+06 | 0.2816 | 0.2700 | 0.2660 | 1.0202E+10 | 1.4792E+06 |
| 3.1630E+30 | 1.2894E+10 | 1.8697E+06 | 1.3126E+10 | 1.9033E+06 | 0.2944 | 0.2880 | 0.2829 | 1.0278E+10 | 1.4904E+06 |
| 2.5593E+30 | 1.1816E+10 | 1.7133E+06 | 1.2134E+10 | 1.7594E+06 | 0.3029 | 0.3001 | 0.2923 | 9.9404E+09 | 1.4414E+06 |
| 1.9623E+30 | 1.0849E+10 | 1.5732E+06 | 1.0926E+10 | 1.5843E+06 | 0.3245 | 0.2987 | 0.2966 | 9.3913E+09 | 1.3617E+06 |
| 1.4906E+30 | 9.7435E+09 | 1.4128E+06 | 9.9921E+09 | 1.4489E+06 | 0.3114 | 0.3129 | 0.3051 | 8.6799E+09 | 1.2586E+06 |
| 1.2821E+30 | 9.5785E+09 | 1.3889E+06 | 9.7889E+09 | 1.4194E+06 | 0.2894 | 0.2818 | 0.2757 | 7.4383E+09 | 1.0786E+06 |
| 1.0648E+30 | 9.2130E+09 | 1.3359E+06 | 9.5706E+09 | 1.3877E+06 | 0.2608 | 0.2397 | 0.2307 | 6.1407E+09 | 8.9040E+05 |
| 7.2887E+29 | 8.5215E+09 | 1.2356E+06 | 8.7753E+09 | 1.2724E+06 | 0.1779 | 0.1725 | 0.1675 | 4.4228E+09 | 6.4130E+05 |

Anexo D.3

| Parámetros mecánicos segundo ciclo de carga | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| Determinante | Ev Pa | Ev Psi | Eh Pa | Eh Psi | v1 | v2 | v3 | K Pa | K Psi |
| 7.2887E+29 | 8.5215E+09 | 1.2356E+06 | 8.7753E+09 | 1.2724E+06 | 0.1779 | 0.1725 | 0.1675 | 4.4228E+09 | 6.4130E+05 |
| 9.3634E+29 | 9.0811E+09 | 1.3168E+06 | 9.3228E+09 | 1.3518E+06 | 0.2282 | 0.2095 | 0.2041 | 5.3817E+09 | 7.8035E+05 |
| 1.2488E+30 | 9.9574E+09 | 1.4438E+06 | 1.0227E+10 | 1.4829E+06 | 0.2155 | 0.2248 | 0.2189 | 6.0268E+09 | 8.7389E+05 |
| 1.5628E+30 | 1.0496E+10 | 1.5219E+06 | 1.0729E+10 | 1.5557E+06 | 0.2752 | 0.2462 | 0.2408 | 7.2143E+09 | 1.0461E+06 |
| 2.0677E+30 | 1.1482E+10 | 1.6649E+06 | 1.1771E+10 | 1.7067E+06 | 0.2727 | 0.2509 | 0.2448 | 7.9738E+09 | 1.1562E+06 |
| 2.2457E+30 | 1.1604E+10 | 1.6826E+06 | 1.1910E+10 | 1.7270E+06 | 0.2878 | 0.2710 | 0.2640 | 8.7126E+09 | 1.2633E+06 |
| 2.4662E+30 | 1.1855E+10 | 1.7190E+06 | 1.2062E+10 | 1.7490E+06 | 0.3042 | 0.2849 | 0.2800 | 9.5013E+09 | 1.3777E+06 |
| 2.9669E+30 | 1.2891E+10 | 1.8692E+06 | 1.3189E+10 | 1.9124E+06 | 0.2725 | 0.2614 | 0.2555 | 9.2065E+09 | 1.3349E+06 |
| 3.2340E+30 | 1.3019E+10 | 1.8878E+06 | 1.3346E+10 | 1.9352E+06 | 0.2877 | 0.2823 | 0.2754 | 1.0106E+10 | 1.4654E+06 |
| 3.6641E+30 | 1.3427E+10 | 1.9469E+06 | 1.3800E+10 | 2.0010E+06 | 0.2927 | 0.2934 | 0.2854 | 1.0875E+10 | 1.5769E+06 |
| 3.8790E+30 | 1.3673E+10 | 1.9825E+06 | 1.3907E+10 | 2.0165E+06 | 0.3027 | 0.2975 | 0.2925 | 1.1383E+10 | 1.6505E+06 |
| 3.8790E+30 | 1.3673E+10 | 1.9825E+06 | 1.3907E+10 | 2.0165E+06 | 0.3027 | 0.2975 | 0.2925 | 1.1383E+10 | 1.6505E+06 |
| 4.5494E+30 | 1.4358E+10 | 2.0819E+06 | 1.4642E+10 | 2.1231E+06 | 0.3012 | 0.3020 | 0.2961 | 1.2105E+10 | 1.7552E+06 |
| 4.7490E+30 | 1.4399E+10 | 2.0879E+06 | 1.4712E+10 | 2.1332E+06 | 0.3074 | 0.3121 | 0.3055 | 1.2698E+10 | 1.8412E+06 |
| 5.7363E+30 | 1.5582E+10 | 2.2594E+06 | 1.5761E+10 | 2.2853E+06 | 0.3371 | 0.2829 | 0.2797 | 1.3073E+10 | 1.8955E+06 |
| 5.9620E+30 | 1.5866E+10 | 2.3005E+06 | 1.5961E+10 | 2.3143E+06 | 0.3541 | 0.2703 | 0.2687 | 1.3120E+10 | 1.9023E+06 |
| 6.0110E+30 | 1.5669E+10 | 2.2721E+06 | 1.5847E+10 | 2.2978E+06 | 0.3445 | 0.2920 | 0.2887 | 1.3728E+10 | 1.9905E+06 |
| 6.0321E+30 | 1.5403E+10 | 2.2334E+06 | 1.5705E+10 | 2.2773E+06 | 0.3325 | 0.3152 | 0.3091 | 1.4356E+10 | 2.0816E+06 |
| 5.7436E+30 | 1.4666E+10 | 2.1266E+06 | 1.5280E+10 | 2.2156E+06 | 0.2963 | 0.3563 | 0.3420 | 1.4925E+10 | 2.1642E+06 |
| 6.0324E+30 | 1.5098E+10 | 2.1892E+06 | 1.5691E+10 | 2.2752E+06 | 0.2900 | 0.3475 | 0.3343 | 1.4672E+10 | 2.1274E+06 |
| 7.2264E+30 | 1.6280E+10 | 2.3606E+06 | 1.6502E+10 | 2.3928E+06 | 0.3566 | 0.3112 | 0.3071 | 1.5636E+10 | 2.2673E+06 |
| 7.2264E+30 | 1.6280E+10 | 2.3606E+06 | 1.6502E+10 | 2.3928E+06 | 0.3566 | 0.3112 | 0.3071 | 1.5636E+10 | 2.2673E+06 |
| 7.2127E+30 | 1.5909E+10 | 2.3067E+06 | 1.6320E+10 | 2.3665E+06 | 0.3417 | 0.3363 | 0.3278 | 1.6362E+10 | 2.3725E+06 |
| 7.2127E+30 | 1.5909E+10 | 2.3067E+06 | 1.6320E+10 | 2.3665E+06 | 0.3417 | 0.3363 | 0.3278 | 1.6362E+10 | 2.3725E+06 |
| 7.6916E+30 | 1.6258E+10 | 2.3574E+06 | 1.6445E+10 | 2.3846E+06 | 0.3520 | 0.3375 | 0.3336 | 1.7173E+10 | 2.4900E+06 |
| 7.6916E+30 | 1.6258E+10 | 2.3574E+06 | 1.6445E+10 | 2.3846E+06 | 0.3520 | 0.3375 | 0.3336 | 1.7173E+10 | 2.4900E+06 |
| 8.5836E+30 | 1.7278E+10 | 2.5053E+06 | 1.7480E+10 | 2.5346E+06 | 0.3362 | 0.3208 | 0.3171 | 1.6554E+10 | 2.4004E+06 |
| 8.9881E+30 | 1.7316E+10 | 2.5109E+06 | 1.7554E+10 | 2.5453E+06 | 0.3419 | 0.3307 | 0.3262 | 1.7427E+10 | 2.5269E+06 |

| | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| 8.9881E+30 | 1.7316E+10 | 2.5109E+06 | 1.7554E+10 | 2.5453E+06 | 0.3419 | 0.3307 | 0.3262 | 1.7427E+10 | 2.5269E+06 |
| 8.9881E+30 | 1.7316E+10 | 2.5109E+06 | 1.7554E+10 | 2.5453E+06 | 0.3419 | 0.3307 | 0.3262 | 1.7427E+10 | 2.5269E+06 |
| 9.9004E+30 | 1.7852E+10 | 2.5885E+06 | 1.7912E+10 | 2.5973E+06 | 0.3693 | 0.3232 | 0.3221 | 1.8428E+10 | 2.6720E+06 |
| 1.0148E+31 | 1.8092E+10 | 2.6233E+06 | 1.8163E+10 | 2.6336E+06 | 0.3657 | 0.3198 | 0.3185 | 1.8281E+10 | 2.6507E+06 |
| 1.0148E+31 | 1.8092E+10 | 2.6233E+06 | 1.8163E+10 | 2.6336E+06 | 0.3657 | 0.3198 | 0.3185 | 1.8281E+10 | 2.6507E+06 |
| 1.0095E+31 | 1.7600E+10 | 2.5519E+06 | 1.7932E+10 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 1.9166E+10 | 2.7791E+06 |
| 1.0095E+31 | 1.7600E+10 | 2.5519E+06 | 1.7932E+10 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 1.9166E+10 | 2.7791E+06 |
| 1.0095E+31 | 1.7600E+10 | 2.5519E+06 | 1.7932E+10 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 1.9166E+10 | 2.7791E+06 |
| 1.0095E+31 | 1.7600E+10 | 2.5519E+06 | 1.7932E+10 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 1.9166E+10 | 2.7791E+06 |
| 1.1164E+31 | 1.8194E+10 | 2.6382E+06 | 1.8311E+10 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.0279E+10 | 2.9405E+06 |
| 1.1164E+31 | 1.8194E+10 | 2.6382E+06 | 1.8311E+10 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.0279E+10 | 2.9405E+06 |
| 1.1164E+31 | 1.8194E+10 | 2.6382E+06 | 1.8311E+10 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.0279E+10 | 2.9405E+06 |
| 1.1164E+31 | 1.8194E+10 | 2.6382E+06 | 1.8311E+10 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.0279E+10 | 2.9405E+06 |
| 1.1164E+31 | 1.8194E+10 | 2.6382E+06 | 1.8311E+10 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.0279E+10 | 2.9405E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |

Anexo D.4

| Parámetros mecánicos segundo ciclo de descarga | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| Determinante | Ev Pa | Ev Psi | Eh Pa | Eh Psi | v1 | v2 | v3 | K Pa | K Psi |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 1.1702E+31 | 1.8224E+10 | 2.6424E+06 | 1.8375E+10 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.1363E+10 | 3.0976E+06 |
| 9.1629E+30 | 1.5989E+10 | 2.3183E+06 | 1.6072E+10 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 2.2621E+10 | 3.2801E+06 |
| 9.1629E+30 | 1.5989E+10 | 2.3183E+06 | 1.6072E+10 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 2.2621E+10 | 3.2801E+06 |
| 9.1629E+30 | 1.5989E+10 | 2.3183E+06 | 1.6072E+10 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 2.2621E+10 | 3.2801E+06 |
| 9.1629E+30 | 1.5989E+10 | 2.3183E+06 | 1.6072E+10 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 2.2621E+10 | 3.2801E+06 |
| 9.1629E+30 | 1.5989E+10 | 2.3183E+06 | 1.6072E+10 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 2.2621E+10 | 3.2801E+06 |
| 8.7754E+30 | 1.5996E+10 | 2.3193E+06 | 1.6037E+10 | 2.3253E+06 | 0.4034 | 0.3628 | 0.3619 | 2.1538E+10 | 3.1230E+06 |
| 8.7754E+30 | 1.5996E+10 | 2.3193E+06 | 1.6037E+10 | 2.3253E+06 | 0.4034 | 0.3628 | 0.3619 | 2.1538E+10 | 3.1230E+06 |
| 8.7754E+30 | 1.5996E+10 | 2.3193E+06 | 1.6037E+10 | 2.3253E+06 | 0.4034 | 0.3628 | 0.3619 | 2.1538E+10 | 3.1230E+06 |
| 8.0458E+30 | 1.5278E+10 | 2.2153E+06 | 1.5295E+10 | 2.2177E+06 | 0.4115 | 0.3702 | 0.3698 | 2.1934E+10 | 3.1805E+06 |
| 7.2350E+30 | 1.4645E+10 | 2.1235E+06 | 1.4970E+10 | 2.1707E+06 | 0.3816 | 0.3850 | 0.3767 | 2.0825E+10 | 3.0196E+06 |
| 7.2350E+30 | 1.4645E+10 | 2.1235E+06 | 1.4970E+10 | 2.1707E+06 | 0.3816 | 0.3850 | 0.3767 | 2.0825E+10 | 3.0196E+06 |
| 7.2350E+30 | 1.4645E+10 | 2.1235E+06 | 1.4970E+10 | 2.1707E+06 | 0.3816 | 0.3850 | 0.3767 | 2.0825E+10 | 3.0196E+06 |
| 6.5741E+30 | 1.3927E+10 | 2.0194E+06 | 1.4209E+10 | 2.0603E+06 | 0.3911 | 0.3922 | 0.3844 | 2.1225E+10 | 3.0776E+06 |
| 6.7417E+30 | 1.4582E+10 | 2.1144E+06 | 1.4464E+10 | 2.0972E+06 | 0.4160 | 0.3621 | 0.3651 | 2.0334E+10 | 2.9484E+06 |
| 6.7417E+30 | 1.4582E+10 | 2.1144E+06 | 1.4464E+10 | 2.0972E+06 | 0.4160 | 0.3621 | 0.3651 | 2.0334E+10 | 2.9484E+06 |
| 5.4086E+30 | 1.3004E+10 | 1.8856E+06 | 1.2826E+10 | 1.8598E+06 | 0.4352 | 0.3776 | 0.3829 | 2.1189E+10 | 3.0724E+06 |
| 4.5497E+30 | 1.2086E+10 | 1.7525E+06 | 1.2466E+10 | 1.8076E+06 | 0.3949 | 0.3993 | 0.3871 | 1.9343E+10 | 2.8047E+06 |
| 4.5497E+30 | 1.2086E+10 | 1.7525E+06 | 1.2466E+10 | 1.8076E+06 | 0.3949 | 0.3993 | 0.3871 | 1.9343E+10 | 2.8047E+06 |
| 3.4691E+30 | 1.0460E+10 | 1.5167E+06 | 1.0792E+10 | 1.5648E+06 | 0.4128 | 0.4180 | 0.4051 | 2.0200E+10 | 2.9290E+06 |

| | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|------------|
| 3.4691E+30 | 1.0460E+10 | 1.5167E+06 | 1.0792E+10 | 1.5648E+06 | 0.4128 | 0.4180 | 0.4051 | 2.0200E+10 | 2.9290E+06 |
| 3.2523E+30 | 1.0577E+10 | 1.5337E+06 | 1.0793E+10 | 1.5649E+06 | 0.4129 | 0.4034 | 0.3954 | 1.8578E+10 | 2.6939E+06 |
| 3.1477E+30 | 1.0394E+10 | 1.5072E+06 | 1.0607E+10 | 1.5380E+06 | 0.4149 | 0.4057 | 0.3975 | 1.8674E+10 | 2.7077E+06 |
| 3.1477E+30 | 1.0394E+10 | 1.5072E+06 | 1.0607E+10 | 1.5380E+06 | 0.4149 | 0.4057 | 0.3975 | 1.8674E+10 | 2.7077E+06 |
| 3.1137E+30 | 1.0334E+10 | 1.4985E+06 | 1.0546E+10 | 1.5292E+06 | 0.4156 | 0.4064 | 0.3982 | 1.8705E+10 | 2.7122E+06 |
| 3.1137E+30 | 1.0334E+10 | 1.4985E+06 | 1.0546E+10 | 1.5292E+06 | 0.4156 | 0.4064 | 0.3982 | 1.8705E+10 | 2.7122E+06 |
| 3.0134E+30 | 1.0380E+10 | 1.5051E+06 | 1.0543E+10 | 1.5287E+06 | 0.4151 | 0.3996 | 0.3934 | 1.7952E+10 | 2.6030E+06 |
| 3.0728E+30 | 1.0835E+10 | 1.5711E+06 | 1.0668E+10 | 1.5469E+06 | 0.4408 | 0.3717 | 0.3775 | 1.7315E+10 | 2.5107E+06 |
| 3.0728E+30 | 1.0835E+10 | 1.5711E+06 | 1.0668E+10 | 1.5469E+06 | 0.4408 | 0.3717 | 0.3775 | 1.7315E+10 | 2.5107E+06 |
| 2.7885E+30 | 1.0386E+10 | 1.5059E+06 | 1.0467E+10 | 1.5177E+06 | 0.4137 | 0.3873 | 0.3843 | 1.6582E+10 | 2.4043E+06 |
| 2.8264E+30 | 1.0771E+10 | 1.5618E+06 | 1.0572E+10 | 1.5329E+06 | 0.4367 | 0.3619 | 0.3687 | 1.6005E+10 | 2.3207E+06 |
| 2.4336E+30 | 9.9607E+09 | 1.4443E+06 | 1.0205E+10 | 1.4798E+06 | 0.3869 | 0.3958 | 0.3863 | 1.5284E+10 | 2.2161E+06 |
| 2.2991E+30 | 9.7480E+09 | 1.4135E+06 | 1.0142E+10 | 1.4705E+06 | 0.3782 | 0.3985 | 0.3831 | 1.4704E+10 | 2.1321E+06 |
| 2.0928E+30 | 9.6477E+09 | 1.3989E+06 | 9.9564E+09 | 1.4437E+06 | 0.3782 | 0.3870 | 0.3750 | 1.3682E+10 | 1.9839E+06 |
| 1.9625E+30 | 9.6877E+09 | 1.4047E+06 | 9.9292E+09 | 1.4397E+06 | 0.3745 | 0.3730 | 0.3639 | 1.2663E+10 | 1.8361E+06 |
| 1.9502E+30 | 1.0004E+10 | 1.4505E+06 | 1.0072E+10 | 1.4604E+06 | 0.4028 | 0.3375 | 0.3352 | 1.1832E+10 | 1.7156E+06 |
| 1.7112E+30 | 9.4272E+09 | 1.3669E+06 | 9.7302E+09 | 1.4109E+06 | 0.3635 | 0.3620 | 0.3508 | 1.1353E+10 | 1.6462E+06 |
| 1.6028E+30 | 9.4897E+09 | 1.3760E+06 | 9.4908E+09 | 1.3762E+06 | 0.4037 | 0.3289 | 0.3289 | 1.0822E+10 | 1.5692E+06 |
| 1.4758E+30 | 9.3620E+09 | 1.3575E+06 | 9.3777E+09 | 1.3598E+06 | 0.3952 | 0.3204 | 0.3199 | 1.0087E+10 | 1.4625E+06 |
| 1.2184E+30 | 9.0603E+09 | 1.3137E+06 | 9.1913E+09 | 1.3327E+06 | 0.3674 | 0.2964 | 0.2921 | 8.4006E+09 | 1.2181E+06 |
| 8.7508E+29 | 8.1633E+09 | 1.1837E+06 | 8.4519E+09 | 1.2255E+06 | 0.3099 | 0.3064 | 0.2960 | 7.1031E+09 | 1.0300E+06 |
| 6.1406E+29 | 7.6913E+09 | 1.1152E+06 | 8.0142E+09 | 1.1621E+06 | 0.2637 | 0.2279 | 0.2187 | 4.9998E+09 | 7.2497E+05 |

ANEXO E

Anexo E.1

| Primer ciclo de caga | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-------------------------|------------|------------|--------|--------|--------|----------------|
| Dinámicos isotrópicos verticales | | Dinámicos isotrópicos horizontales | | Dinámicos anisotrópicos | | | | | | |
| E | v | E | v | K isotrópico | Ev | Eh | v1 | v2 | v3 | K anisotrópico |
| Psi | | Psi | | Psi | Psi | Psi | | | | Psi |
| 8.8943E+05 | 0.2788 | 9.0453E+05 | 0.2803 | 6.7004E+05 | 8.7117E+05 | 8.9711E+05 | 0.2751 | 0.2940 | 0.2855 | 6.8823E+05 |
| 1.0134E+06 | 0.2903 | 1.0311E+06 | 0.2884 | 8.0539E+05 | 1.0148E+06 | 1.0274E+06 | 0.2899 | 0.2915 | 0.2879 | 8.1122E+05 |
| 1.1682E+06 | 0.2916 | 1.1920E+06 | 0.2954 | 9.3422E+05 | 1.1439E+06 | 1.1823E+06 | 0.2960 | 0.3051 | 0.2952 | 9.6814E+05 |
| 1.2095E+06 | 0.3372 | 1.2302E+06 | 0.3370 | 1.2381E+06 | 1.1812E+06 | 1.2144E+06 | 0.3312 | 0.3510 | 0.3414 | 1.2629E+06 |
| 1.4240E+06 | 0.2894 | 1.4499E+06 | 0.2974 | 1.1268E+06 | 1.4366E+06 | 1.4632E+06 | 0.3127 | 0.2830 | 0.2779 | 1.1605E+06 |
| 1.5959E+06 | 0.2775 | 1.6328E+06 | 0.2789 | 1.1952E+06 | 1.6287E+06 | 1.6441E+06 | 0.2921 | 0.2652 | 0.2628 | 1.2051E+06 |
| 1.6717E+06 | 0.2790 | 1.6954E+06 | 0.2838 | 1.2610E+06 | 1.7021E+06 | 1.7104E+06 | 0.2996 | 0.2665 | 0.2652 | 1.2765E+06 |
| 1.7183E+06 | 0.2963 | 1.7441E+06 | 0.3020 | 1.4057E+06 | 1.7214E+06 | 1.7517E+06 | 0.3123 | 0.2947 | 0.2896 | 1.4425E+06 |
| 1.7697E+06 | 0.3115 | 1.7991E+06 | 0.3179 | 1.5650E+06 | 1.7332E+06 | 1.7954E+06 | 0.3198 | 0.3233 | 0.3121 | 1.6278E+06 |
| 1.8159E+06 | 0.3076 | 1.8468E+06 | 0.3096 | 1.5727E+06 | 1.8275E+06 | 1.8513E+06 | 0.3175 | 0.3047 | 0.3008 | 1.5970E+06 |
| 1.9020E+06 | 0.3107 | 1.9253E+06 | 0.3139 | 1.6744E+06 | 1.9046E+06 | 1.9290E+06 | 0.3211 | 0.3097 | 0.3058 | 1.7047E+06 |
| 1.9622E+06 | 0.3025 | 1.9820E+06 | 0.3043 | 1.6563E+06 | 1.9910E+06 | 1.9916E+06 | 0.3154 | 0.2936 | 0.2935 | 1.6662E+06 |
| 1.9943E+06 | 0.3139 | 2.0175E+06 | 0.3168 | 1.7858E+06 | 1.9842E+06 | 2.0165E+06 | 0.3211 | 0.3167 | 0.3117 | 1.8213E+06 |
| 2.0054E+06 | 0.3212 | 2.0283E+06 | 0.3239 | 1.8690E+06 | 1.9879E+06 | 2.0245E+06 | 0.3263 | 0.3261 | 0.3202 | 1.9074E+06 |
| 2.1066E+06 | 0.3152 | 2.1195E+06 | 0.3103 | 1.9001E+06 | 1.9860E+06 | 2.0606E+06 | 0.2788 | 0.3518 | 0.3391 | 1.9211E+06 |
| 2.1199E+06 | 0.3132 | 2.1390E+06 | 0.3073 | 1.8918E+06 | 1.9987E+06 | 2.0773E+06 | 0.2744 | 0.3509 | 0.3376 | 1.9113E+06 |
| 2.1321E+06 | 0.3208 | 2.1390E+06 | 0.3073 | 1.9828E+06 | 1.8870E+06 | 2.0105E+06 | 0.2334 | 0.3955 | 0.3712 | 1.9780E+06 |
| 2.2214E+06 | 0.3176 | 2.2459E+06 | 0.3200 | 2.0302E+06 | 2.1766E+06 | 2.2317E+06 | 0.3168 | 0.3295 | 0.3213 | 2.0782E+06 |
| 2.3317E+06 | 0.3122 | 2.3722E+06 | 0.3221 | 2.0692E+06 | 2.3806E+06 | 2.4089E+06 | 0.3479 | 0.2976 | 0.2941 | 2.1397E+06 |
| 2.3317E+06 | 0.3122 | 2.3722E+06 | 0.3221 | 2.0692E+06 | 2.3806E+06 | 2.4089E+06 | 0.3479 | 0.2976 | 0.2941 | 2.1397E+06 |
| 2.3774E+06 | 0.3161 | 2.4092E+06 | 0.3174 | 2.1541E+06 | 2.3086E+06 | 2.3835E+06 | 0.3086 | 0.3340 | 0.3235 | 2.2086E+06 |
| 2.3933E+06 | 0.3140 | 2.4201E+06 | 0.3160 | 2.1441E+06 | 2.3259E+06 | 2.3967E+06 | 0.3085 | 0.3309 | 0.3212 | 2.1996E+06 |
| 2.4196E+06 | 0.3229 | 2.4563E+06 | 0.3302 | 2.2769E+06 | 2.4999E+06 | 2.4981E+06 | 0.3584 | 0.3023 | 0.3025 | 2.3271E+06 |
| 2.4780E+06 | 0.3157 | 2.5195E+06 | 0.3230 | 2.2407E+06 | 2.5548E+06 | 2.5599E+06 | 0.3498 | 0.2962 | 0.2956 | 2.2903E+06 |

| | | | | | | | | | | |
|------------|--------|------------|--------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 2.5455E+06 | 0.3175 | 2.5755E+06 | 0.3213 | 2.3248E+06 | 2.5577E+06 | 2.5847E+06 | 0.3316 | 0.3141 | 0.3108 | 2.3689E+06 |
| 2.5455E+06 | 0.3175 | 2.5755E+06 | 0.3213 | 2.3248E+06 | 2.5577E+06 | 2.5847E+06 | 0.3316 | 0.3141 | 0.3108 | 2.3689E+06 |
| 2.7675E+06 | 0.3009 | 2.8085E+06 | 0.3041 | 2.3171E+06 | 2.7668E+06 | 2.8107E+06 | 0.3108 | 0.3013 | 0.2966 | 2.3636E+06 |
| 2.7675E+06 | 0.3009 | 2.8085E+06 | 0.3041 | 2.3171E+06 | 2.7668E+06 | 2.8107E+06 | 0.3108 | 0.3013 | 0.2966 | 2.3636E+06 |
| 2.9480E+06 | 0.2762 | 2.9817E+06 | 0.2814 | 2.1953E+06 | 2.9468E+06 | 2.9879E+06 | 0.2900 | 0.2757 | 0.2719 | 2.2441E+06 |
| 3.0519E+06 | 0.2601 | 3.0926E+06 | 0.2652 | 2.1207E+06 | 3.0488E+06 | 3.0966E+06 | 0.2728 | 0.2605 | 0.2565 | 2.1686E+06 |
| 3.0801E+06 | 0.2718 | 3.1198E+06 | 0.2764 | 2.2495E+06 | 3.0685E+06 | 3.1202E+06 | 0.2825 | 0.2740 | 0.2695 | 2.3018E+06 |
| 3.1790E+06 | 0.2567 | 3.2265E+06 | 0.2609 | 2.1776E+06 | 3.1660E+06 | 3.2245E+06 | 0.2661 | 0.2598 | 0.2551 | 2.2286E+06 |
| 3.1790E+06 | 0.2567 | 3.2265E+06 | 0.2609 | 2.1776E+06 | 3.1660E+06 | 3.2245E+06 | 0.2661 | 0.2598 | 0.2551 | 2.2286E+06 |
| 3.3461E+06 | 0.2526 | 3.3783E+06 | 0.2548 | 2.2537E+06 | 3.3678E+06 | 3.3844E+06 | 0.2632 | 0.2474 | 0.2461 | 2.2728E+06 |
| 3.3461E+06 | 0.2526 | 3.3783E+06 | 0.2548 | 2.2537E+06 | 3.3678E+06 | 3.3844E+06 | 0.2632 | 0.2474 | 0.2461 | 2.2728E+06 |
| 3.3461E+06 | 0.2526 | 3.3783E+06 | 0.2548 | 2.2537E+06 | 3.3678E+06 | 3.3844E+06 | 0.2632 | 0.2474 | 0.2461 | 2.2728E+06 |
| 3.4651E+06 | 0.2327 | 3.5708E+06 | 0.2619 | 2.1607E+06 | 3.4144E+06 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 2.3677E+06 |
| 3.4651E+06 | 0.2327 | 3.5708E+06 | 0.2619 | 2.1607E+06 | 3.4144E+06 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 2.3677E+06 |
| 3.4651E+06 | 0.2327 | 3.5708E+06 | 0.2619 | 2.1607E+06 | 3.4144E+06 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 2.3677E+06 |
| 3.4651E+06 | 0.2327 | 3.5708E+06 | 0.2619 | 2.1607E+06 | 3.4144E+06 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 2.3677E+06 |
| 3.4651E+06 | 0.2327 | 3.5708E+06 | 0.2619 | 2.1607E+06 | 3.4144E+06 | 3.6129E+06 | 0.2832 | 0.2414 | 0.2282 | 2.3677E+06 |
| 3.5720E+06 | 0.2125 | 3.7008E+06 | 0.2431 | 2.0707E+06 | 3.5191E+06 | 3.7385E+06 | 0.2623 | 0.2238 | 0.2106 | 2.2758E+06 |
| 3.5720E+06 | 0.2125 | 3.7008E+06 | 0.2431 | 2.0707E+06 | 3.5191E+06 | 3.7385E+06 | 0.2623 | 0.2238 | 0.2106 | 2.2758E+06 |
| 3.5720E+06 | 0.2125 | 3.7008E+06 | 0.2431 | 2.0707E+06 | 3.5191E+06 | 3.7385E+06 | 0.2623 | 0.2238 | 0.2106 | 2.2758E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7907E+06 | 0.2288 | 1.9961E+06 | 3.3216E+06 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 2.3477E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7907E+06 | 0.2288 | 1.9961E+06 | 3.3216E+06 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 2.3477E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7907E+06 | 0.2288 | 1.9961E+06 | 3.3216E+06 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 2.3477E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7907E+06 | 0.2288 | 1.9961E+06 | 3.3216E+06 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 2.3477E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7907E+06 | 0.2288 | 1.9961E+06 | 3.3216E+06 | 3.7116E+06 | 0.2095 | 0.2794 | 0.2500 | 2.3477E+06 |

Anexo E.2

| Primer ciclo de descarga | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-------------------------|------------|------------|--------|--------|--------|----------------|
| Dinámicos isotrópicos verticales | | Dinámicos isotrópicos horizontales | | Dinámicos anisotrópicos | | | | | | |
| E | v | E | v | K isotrópico | Ev | Eh | v1 | v2 | v3 | K anisotrópico |
| Psi | | Psi | | Psi | Psi | Psi | | | | Psi |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.6539E+06 | 0.1949 | 3.7913E+06 | 0.2287 | 1.9961E+06 | 3.3215E+06 | 3.7122E+06 | 0.2091 | 0.2795 | 0.2501 | 2.3474E+06 |
| 3.5998E+06 | 0.1772 | 3.7681E+06 | 0.2211 | 1.9961E+06 | 3.3635E+06 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 2.3474E+06 |
| 3.5998E+06 | 0.1772 | 3.7681E+06 | 0.2211 | 1.8587E+06 | 3.3635E+06 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 2.2019E+06 |
| 3.5998E+06 | 0.1772 | 3.7681E+06 | 0.2211 | 1.8587E+06 | 3.3635E+06 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 2.2019E+06 |
| 3.5998E+06 | 0.1772 | 3.7681E+06 | 0.2211 | 1.8587E+06 | 3.3635E+06 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 2.2019E+06 |
| 3.5998E+06 | 0.1772 | 3.7681E+06 | 0.2211 | 1.8587E+06 | 3.3635E+06 | 3.7415E+06 | 0.2186 | 0.2440 | 0.2193 | 2.2019E+06 |
| 3.5784E+06 | 0.1828 | 3.7477E+06 | 0.2247 | 1.8587E+06 | 3.3377E+06 | 3.7148E+06 | 0.2227 | 0.2492 | 0.2239 | 2.2019E+06 |
| 3.5784E+06 | 0.1828 | 3.6760E+06 | 0.2013 | 1.8805E+06 | 3.4541E+06 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 2.2234E+06 |
| 3.5784E+06 | 0.1828 | 3.6760E+06 | 0.2013 | 1.8805E+06 | 3.4541E+06 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 2.0498E+06 |
| 3.5784E+06 | 0.1828 | 3.6757E+06 | 0.2013 | 1.8805E+06 | 3.4541E+06 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 2.0498E+06 |
| 3.5784E+06 | 0.1828 | 3.6757E+06 | 0.2013 | 1.8805E+06 | 3.4541E+06 | 3.6464E+06 | 0.2001 | 0.2191 | 0.2076 | 2.0498E+06 |
| 3.5229E+06 | 0.1645 | 3.6244E+06 | 0.1846 | 1.8805E+06 | 3.4196E+06 | 3.6019E+06 | 0.1855 | 0.1989 | 0.1888 | 2.0498E+06 |
| 3.5229E+06 | 0.1645 | 3.6244E+06 | 0.1846 | 1.7500E+06 | 3.4196E+06 | 3.6019E+06 | 0.1855 | 0.1989 | 0.1888 | 1.9089E+06 |
| 3.4009E+06 | 0.1975 | 3.5077E+06 | 0.2111 | 1.7500E+06 | 3.2820E+06 | 3.4724E+06 | 0.2087 | 0.2321 | 0.2194 | 1.9089E+06 |
| 3.2755E+06 | 0.1533 | 3.4138E+06 | 0.1787 | 1.8735E+06 | 3.1421E+06 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 2.0282E+06 |

| | | | | | | | | | | |
|------------|--------|------------|--------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 3.2755E+06 | 0.1533 | 3.4138E+06 | 0.1787 | 1.5746E+06 | 3.1421E+06 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.7729E+06 |
| 3.2755E+06 | 0.1533 | 3.3813E+06 | 0.1875 | 1.5746E+06 | 3.1421E+06 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.7729E+06 |
| 3.2755E+06 | 0.1533 | 3.3813E+06 | 0.1875 | 1.5746E+06 | 3.1421E+06 | 3.3800E+06 | 0.1766 | 0.2040 | 0.1897 | 1.7729E+06 |
| 3.2619E+06 | 0.1485 | 3.3813E+06 | 0.1875 | 1.5746E+06 | 3.2642E+06 | 3.4441E+06 | 0.1989 | 0.1470 | 0.1393 | 1.7729E+06 |
| 3.1739E+06 | 0.1526 | 3.2469E+06 | 0.1646 | 1.5467E+06 | 3.1575E+06 | 3.2486E+06 | 0.1718 | 0.1596 | 0.1552 | 1.6643E+06 |
| 3.1739E+06 | 0.1526 | 3.2469E+06 | 0.1646 | 1.5225E+06 | 3.1575E+06 | 3.2486E+06 | 0.1718 | 0.1596 | 0.1552 | 1.5872E+06 |
| 3.0740E+06 | 0.1857 | 3.1571E+06 | 0.1915 | 1.5225E+06 | 3.0547E+06 | 3.1533E+06 | 0.1947 | 0.1939 | 0.1878 | 1.5872E+06 |
| 2.9150E+06 | 0.2036 | 2.9830E+06 | 0.2116 | 1.6299E+06 | 2.9031E+06 | 2.9831E+06 | 0.2197 | 0.2079 | 0.2023 | 1.6886E+06 |
| 2.8782E+06 | 0.1884 | 2.9655E+06 | 0.2045 | 1.6393E+06 | 2.8966E+06 | 2.9884E+06 | 0.2219 | 0.1810 | 0.1755 | 1.6982E+06 |
| 2.7157E+06 | 0.2312 | 2.7919E+06 | 0.2440 | 1.5395E+06 | 2.7434E+06 | 2.8187E+06 | 0.2627 | 0.2221 | 0.2161 | 1.6033E+06 |
| 2.5969E+06 | 0.2207 | 2.6545E+06 | 0.2291 | 1.6836E+06 | 2.6011E+06 | 2.6666E+06 | 0.2376 | 0.2198 | 0.2144 | 1.7467E+06 |
| 2.5969E+06 | 0.2207 | 2.6545E+06 | 0.2291 | 1.5497E+06 | 2.6011E+06 | 2.6666E+06 | 0.2376 | 0.2198 | 0.2144 | 1.5960E+06 |
| 2.5386E+06 | 0.1933 | 2.6129E+06 | 0.2098 | 1.5497E+06 | 2.5690E+06 | 2.6443E+06 | 0.2273 | 0.1803 | 0.1752 | 1.5960E+06 |
| 2.1030E+06 | 0.2724 | 2.1689E+06 | 0.2747 | 1.3795E+06 | 2.1293E+06 | 2.1791E+06 | 0.2850 | 0.2664 | 0.2603 | 1.4267E+06 |
| 1.9907E+06 | 0.2720 | 2.0245E+06 | 0.2747 | 1.4046E+06 | 1.9988E+06 | 2.0288E+06 | 0.2816 | 0.2700 | 0.2660 | 1.4479E+06 |
| 1.8576E+06 | 0.2895 | 1.9005E+06 | 0.2898 | 1.5400E+06 | 1.8697E+06 | 1.9033E+06 | 0.2944 | 0.2880 | 0.2829 | 1.5704E+06 |
| 1.7136E+06 | 0.2973 | 1.7579E+06 | 0.2993 | 1.4553E+06 | 1.7133E+06 | 1.7594E+06 | 0.3029 | 0.3001 | 0.2923 | 1.4792E+06 |
| 1.5396E+06 | 0.3097 | 1.5730E+06 | 0.3111 | 1.4710E+06 | 1.5732E+06 | 1.5843E+06 | 0.3245 | 0.2987 | 0.2966 | 1.4904E+06 |
| 1.4282E+06 | 0.3058 | 1.4528E+06 | 0.3091 | 1.4088E+06 | 1.4128E+06 | 1.4489E+06 | 0.3114 | 0.3129 | 0.3051 | 1.4414E+06 |
| 1.3909E+06 | 0.2799 | 1.4181E+06 | 0.2836 | 1.3487E+06 | 1.3889E+06 | 1.4194E+06 | 0.2894 | 0.2818 | 0.2757 | 1.3617E+06 |
| 1.3370E+06 | 0.2381 | 1.3784E+06 | 0.2500 | 1.2255E+06 | 1.3359E+06 | 1.3877E+06 | 0.2608 | 0.2397 | 0.2307 | 1.2586E+06 |
| 1.2422E+06 | 0.1651 | 1.2726E+06 | 0.1735 | 1.0531E+06 | 1.2356E+06 | 1.2724E+06 | 0.1779 | 0.1725 | 0.1675 | 1.0786E+06 |

Anexo E.3

| Segundo ciclo de carga | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|-------------------------|------------|------------|--------|--------|--------|----------------|
| Dinámicos isotrópicos verticales | | Dinámicos isotrópicos horizontales | | Dinámicos anisotrópicos | | | | | | |
| E | v | E | v | K isotrópico | Ev | Eh | v1 | v2 | v3 | K anisotrópico |
| Psi | | Psi | | Psi | Psi | Psi | | | | Psi |
| 1.24222E+06 | 0.1651 | 1.27256E+06 | 0.1735 | 6.1824E+05 | 1.2356E+06 | 1.2724E+06 | 0.1779 | 0.1725 | 0.1675 | 6.4130E+05 |
| 1.31518E+06 | 0.2102 | 1.34527E+06 | 0.2197 | 7.5628E+05 | 1.3168E+06 | 1.3518E+06 | 0.2282 | 0.2095 | 0.2041 | 7.8035E+05 |
| 1.46309E+06 | 0.2117 | 1.48955E+06 | 0.2160 | 8.4591E+05 | 1.4438E+06 | 1.4829E+06 | 0.2155 | 0.2248 | 0.2189 | 8.7389E+05 |
| 1.51139E+06 | 0.2517 | 1.54452E+06 | 0.2608 | 1.0146E+06 | 1.5219E+06 | 1.5557E+06 | 0.2752 | 0.2462 | 0.2408 | 1.0461E+06 |
| 1.66479E+06 | 0.2514 | 1.69827E+06 | 0.2610 | 1.1163E+06 | 1.6649E+06 | 1.7067E+06 | 0.2727 | 0.2509 | 0.2448 | 1.1562E+06 |
| 1.68829E+06 | 0.2691 | 1.72068E+06 | 0.2777 | 1.2187E+06 | 1.6826E+06 | 1.7270E+06 | 0.2878 | 0.2710 | 0.2640 | 1.2633E+06 |
| 1.71279E+06 | 0.2875 | 1.74158E+06 | 0.2932 | 1.3435E+06 | 1.7190E+06 | 1.7490E+06 | 0.3042 | 0.2849 | 0.2800 | 1.3777E+06 |
| 1.87019E+06 | 0.2603 | 1.90923E+06 | 0.2652 | 1.3001E+06 | 1.8692E+06 | 1.9124E+06 | 0.2725 | 0.2614 | 0.2555 | 1.3349E+06 |
| 1.89686E+06 | 0.2782 | 1.93530E+06 | 0.2825 | 1.4256E+06 | 1.8878E+06 | 1.9352E+06 | 0.2877 | 0.2823 | 0.2754 | 1.4654E+06 |
| 1.96677E+06 | 0.2859 | 2.00600E+06 | 0.2898 | 1.5313E+06 | 1.9469E+06 | 2.0010E+06 | 0.2927 | 0.2934 | 0.2854 | 1.5769E+06 |
| 1.98264E+06 | 0.2963 | 2.01850E+06 | 0.2978 | 1.6222E+06 | 1.9825E+06 | 2.0165E+06 | 0.3027 | 0.2975 | 0.2925 | 1.6505E+06 |
| 1.98264E+06 | 0.2963 | 2.01850E+06 | 0.2978 | 1.6222E+06 | 1.9825E+06 | 2.0165E+06 | 0.3027 | 0.2975 | 0.2925 | 1.6505E+06 |
| 2.09411E+06 | 0.2973 | 2.12772E+06 | 0.2991 | 1.7216E+06 | 2.0819E+06 | 2.1231E+06 | 0.3012 | 0.3020 | 0.2961 | 1.7552E+06 |
| 2.10724E+06 | 0.3054 | 2.14065E+06 | 0.3070 | 1.8048E+06 | 2.0879E+06 | 2.1332E+06 | 0.3074 | 0.3121 | 0.3055 | 1.8412E+06 |
| 2.20138E+06 | 0.3005 | 2.24606E+06 | 0.3106 | 1.8395E+06 | 2.2594E+06 | 2.2853E+06 | 0.3371 | 0.2829 | 0.2797 | 1.8955E+06 |
| 2.20138E+06 | 0.3005 | 2.25268E+06 | 0.3145 | 1.8395E+06 | 2.3005E+06 | 2.3143E+06 | 0.3541 | 0.2703 | 0.2687 | 1.9023E+06 |
| 2.21526E+06 | 0.3087 | 2.25918E+06 | 0.3182 | 1.9305E+06 | 2.2721E+06 | 2.2978E+06 | 0.3445 | 0.2920 | 0.2887 | 1.9905E+06 |
| 2.22861E+06 | 0.3166 | 2.26555E+06 | 0.3220 | 2.0257E+06 | 2.2334E+06 | 2.2773E+06 | 0.3325 | 0.3152 | 0.3091 | 2.0816E+06 |
| 2.24147E+06 | 0.3242 | 2.26555E+06 | 0.3220 | 2.1254E+06 | 2.1266E+06 | 2.2156E+06 | 0.2963 | 0.3563 | 0.3420 | 2.1642E+06 |
| 2.30118E+06 | 0.3164 | 2.32653E+06 | 0.3138 | 2.0884E+06 | 2.1892E+06 | 2.2752E+06 | 0.2900 | 0.3475 | 0.3343 | 2.1274E+06 |
| 2.31469E+06 | 0.3241 | 2.35949E+06 | 0.3324 | 2.1930E+06 | 2.3606E+06 | 2.3928E+06 | 0.3566 | 0.3112 | 0.3071 | 2.2673E+06 |
| 2.31469E+06 | 0.3241 | 2.35949E+06 | 0.3324 | 2.1930E+06 | 2.3606E+06 | 2.3928E+06 | 0.3566 | 0.3112 | 0.3071 | 2.2673E+06 |
| 2.32769E+06 | 0.3315 | 2.36572E+06 | 0.3360 | 2.3026E+06 | 2.3067E+06 | 2.3665E+06 | 0.3417 | 0.3363 | 0.3278 | 2.3725E+06 |
| 2.32769E+06 | 0.3315 | 2.36572E+06 | 0.3360 | 2.3026E+06 | 2.3067E+06 | 2.3665E+06 | 0.3417 | 0.3363 | 0.3278 | 2.3725E+06 |
| 2.34326E+06 | 0.3404 | 2.37784E+06 | 0.3428 | 2.4474E+06 | 2.3574E+06 | 2.3846E+06 | 0.3520 | 0.3375 | 0.3336 | 2.4900E+06 |
| 2.34326E+06 | 0.3404 | 2.37784E+06 | 0.3428 | 2.4474E+06 | 2.3574E+06 | 2.3846E+06 | 0.3520 | 0.3375 | 0.3336 | 2.4900E+06 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|-------------|--------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 2.49315E+06 | 0.3237 | 2.52707E+06 | 0.3268 | 2.3572E+06 | 2.5053E+06 | 2.5346E+06 | 0.3362 | 0.3208 | 0.3171 | 2.4004E+06 |
| 2.50770E+06 | 0.3314 | 2.54123E+06 | 0.3343 | 2.4797E+06 | 2.5109E+06 | 2.5453E+06 | 0.3419 | 0.3307 | 0.3262 | 2.5269E+06 |
| 2.50770E+06 | 0.3314 | 2.54123E+06 | 0.3343 | 2.4797E+06 | 2.5109E+06 | 2.5453E+06 | 0.3419 | 0.3307 | 0.3262 | 2.5269E+06 |
| 2.50770E+06 | 0.3314 | 2.54123E+06 | 0.3343 | 2.4797E+06 | 2.5109E+06 | 2.5453E+06 | 0.3419 | 0.3307 | 0.3262 | 2.5269E+06 |
| 2.52169E+06 | 0.3389 | 2.56149E+06 | 0.3449 | 2.6085E+06 | 2.5885E+06 | 2.5973E+06 | 0.3693 | 0.3232 | 0.3221 | 2.6720E+06 |
| 2.55778E+06 | 0.3352 | 2.59774E+06 | 0.3415 | 2.5870E+06 | 2.6233E+06 | 2.6336E+06 | 0.3657 | 0.3198 | 0.3185 | 2.6507E+06 |
| 2.55778E+06 | 0.3352 | 2.59774E+06 | 0.3415 | 2.5870E+06 | 2.6233E+06 | 2.6336E+06 | 0.3657 | 0.3198 | 0.3185 | 2.6507E+06 |
| 2.57185E+06 | 0.3426 | 2.60452E+06 | 0.3450 | 2.7226E+06 | 2.5519E+06 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 2.7791E+06 |
| 2.57185E+06 | 0.3426 | 2.60452E+06 | 0.3450 | 2.7226E+06 | 2.5519E+06 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 2.7791E+06 |
| 2.57185E+06 | 0.3426 | 2.60452E+06 | 0.3450 | 2.7226E+06 | 2.5519E+06 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 2.7791E+06 |
| 2.57185E+06 | 0.3426 | 2.60452E+06 | 0.3450 | 2.7226E+06 | 2.5519E+06 | 2.6002E+06 | 0.3483 | 0.3467 | 0.3402 | 2.7791E+06 |
| 2.58538E+06 | 0.3496 | 2.62413E+06 | 0.3551 | 2.8654E+06 | 2.6382E+06 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.9405E+06 |
| 2.58538E+06 | 0.3496 | 2.62413E+06 | 0.3551 | 2.8654E+06 | 2.6382E+06 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.9405E+06 |
| 2.58538E+06 | 0.3496 | 2.62413E+06 | 0.3551 | 2.8654E+06 | 2.6382E+06 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.9405E+06 |
| 2.58538E+06 | 0.3496 | 2.62413E+06 | 0.3551 | 2.8654E+06 | 2.6382E+06 | 2.6551E+06 | 0.3768 | 0.3375 | 0.3353 | 2.9405E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 2.8654E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 2.9405E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |

Anexo E.4

| Segundo ciclo de descarga | | | | | | | | | | |
|---|----------|---|----------|--------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| Dinámicos isotrópicos verticales | | Dinámicos isotrópicos horizontales | | Dinámicos anisotrópicos | | | | | | |
| E | v | E | v | K isotrópico | Ev | Eh | v1 | v2 | v3 | K anisotrópico |
| Psi | | Psi | | Psi | Psi | Psi | | | | Psi |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.59839E+06 | 0.3564 | 2.63659E+06 | 0.3615 | 3.0160E+06 | 2.6424E+06 | 2.6644E+06 | 0.3816 | 0.3462 | 0.3434 | 3.0976E+06 |
| 2.26610E+06 | 0.3820 | 2.30086E+06 | 0.3858 | 3.1999E+06 | 2.3183E+06 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 3.2801E+06 |
| 2.26610E+06 | 0.3820 | 2.30086E+06 | 0.3858 | 3.1999E+06 | 2.3183E+06 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 3.2801E+06 |
| 2.26610E+06 | 0.3820 | 2.30086E+06 | 0.3858 | 3.1999E+06 | 2.3183E+06 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 3.2801E+06 |
| 2.26610E+06 | 0.3820 | 2.30086E+06 | 0.3858 | 3.1999E+06 | 2.3183E+06 | 2.3305E+06 | 0.4066 | 0.3704 | 0.3685 | 3.2801E+06 |
| 2.25733E+06 | 0.3766 | 2.29240E+06 | 0.3807 | 3.0493E+06 | 2.3193E+06 | 2.3253E+06 | 0.4034 | 0.3628 | 0.3619 | 3.1230E+06 |
| 2.25733E+06 | 0.3766 | 2.29240E+06 | 0.3807 | 3.0493E+06 | 2.3193E+06 | 2.3253E+06 | 0.4034 | 0.3628 | 0.3619 | 3.1230E+06 |
| 2.25733E+06 | 0.3766 | 2.29240E+06 | 0.3807 | 3.0493E+06 | 2.3193E+06 | 2.3253E+06 | 0.4034 | 0.3628 | 0.3619 | 3.1230E+06 |
| 2.15035E+06 | 0.3847 | 2.18626E+06 | 0.3882 | 3.1072E+06 | 2.2153E+06 | 2.2177E+06 | 0.4115 | 0.3702 | 0.3698 | 3.1805E+06 |
| 2.14241E+06 | 0.3795 | 2.17463E+06 | 0.3808 | 2.9643E+06 | 2.1235E+06 | 2.1707E+06 | 0.3816 | 0.3850 | 0.3767 | 3.0196E+06 |
| 2.14241E+06 | 0.3795 | 2.17463E+06 | 0.3808 | 2.9643E+06 | 2.1235E+06 | 2.1707E+06 | 0.3816 | 0.3850 | 0.3767 | 3.0196E+06 |
| 2.14241E+06 | 0.3795 | 2.17463E+06 | 0.3808 | 2.9643E+06 | 2.1235E+06 | 2.1707E+06 | 0.3816 | 0.3850 | 0.3767 | 3.0196E+06 |
| 2.03632E+06 | 0.3877 | 2.06622E+06 | 0.3889 | 3.0214E+06 | 2.0194E+06 | 2.0603E+06 | 0.3911 | 0.3922 | 0.3844 | 3.0776E+06 |
| 2.02918E+06 | 0.3828 | 2.06274E+06 | 0.3865 | 2.8858E+06 | 2.1144E+06 | 2.0972E+06 | 0.4160 | 0.3621 | 0.3651 | 2.9484E+06 |
| 2.02918E+06 | 0.3828 | 2.06274E+06 | 0.3865 | 2.8858E+06 | 2.1144E+06 | 2.0972E+06 | 0.4160 | 0.3621 | 0.3651 | 2.9484E+06 |
| 1.79282E+06 | 0.4008 | 1.82430E+06 | 0.4036 | 3.0108E+06 | 1.8856E+06 | 1.8598E+06 | 0.4352 | 0.3776 | 0.3829 | 3.0724E+06 |
| 1.78069E+06 | 0.3913 | 1.81116E+06 | 0.3935 | 2.7299E+06 | 1.7525E+06 | 1.8076E+06 | 0.3949 | 0.3993 | 0.3871 | 2.8047E+06 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|-------------|--------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 1.78069E+06 | 0.3913 | 1.81116E+06 | 0.3935 | 2.7299E+06 | 1.7525E+06 | 1.8076E+06 | 0.3949 | 0.3993 | 0.3871 | 2.8047E+06 |
| 1.54216E+06 | 0.4099 | 1.56843E+06 | 0.4117 | 2.8540E+06 | 1.5167E+06 | 1.5648E+06 | 0.4128 | 0.4180 | 0.4051 | 2.9290E+06 |
| 1.54216E+06 | 0.4099 | 1.56843E+06 | 0.4117 | 2.8540E+06 | 1.5167E+06 | 1.5648E+06 | 0.4128 | 0.4180 | 0.4051 | 2.9290E+06 |
| 1.53428E+06 | 0.4027 | 1.56071E+06 | 0.4048 | 2.6292E+06 | 1.5337E+06 | 1.5649E+06 | 0.4129 | 0.4034 | 0.3954 | 2.6939E+06 |
| 1.50747E+06 | 0.4049 | 1.53326E+06 | 0.4069 | 2.6431E+06 | 1.5072E+06 | 1.5380E+06 | 0.4149 | 0.4057 | 0.3975 | 2.7077E+06 |
| 1.50747E+06 | 0.4049 | 1.53326E+06 | 0.4069 | 2.6431E+06 | 1.5072E+06 | 1.5380E+06 | 0.4149 | 0.4057 | 0.3975 | 2.7077E+06 |
| 1.49867E+06 | 0.4057 | 1.52638E+06 | 0.4075 | 2.6476E+06 | 1.4985E+06 | 1.5292E+06 | 0.4156 | 0.4064 | 0.3982 | 2.7122E+06 |
| 1.49867E+06 | 0.4057 | 1.52638E+06 | 0.4075 | 2.6476E+06 | 1.4985E+06 | 1.5292E+06 | 0.4156 | 0.4064 | 0.3982 | 2.7122E+06 |
| 1.49481E+06 | 0.4020 | 1.52259E+06 | 0.4040 | 2.5431E+06 | 1.5051E+06 | 1.5287E+06 | 0.4151 | 0.3996 | 0.3934 | 2.6030E+06 |
| 1.48223E+06 | 0.3991 | 1.51152E+06 | 0.4029 | 2.4478E+06 | 1.5711E+06 | 1.5469E+06 | 0.4408 | 0.3717 | 0.3775 | 2.5107E+06 |
| 1.48223E+06 | 0.3991 | 1.51152E+06 | 0.4029 | 2.4478E+06 | 1.5711E+06 | 1.5469E+06 | 0.4408 | 0.3717 | 0.3775 | 2.5107E+06 |
| 1.47821E+06 | 0.3953 | 1.50564E+06 | 0.3975 | 2.3526E+06 | 1.5059E+06 | 1.5177E+06 | 0.4137 | 0.3873 | 0.3843 | 2.4043E+06 |
| 1.46566E+06 | 0.3922 | 1.49475E+06 | 0.3964 | 2.2661E+06 | 1.5618E+06 | 1.5329E+06 | 0.4367 | 0.3619 | 0.3687 | 2.3207E+06 |
| 1.46147E+06 | 0.3882 | 1.48654E+06 | 0.3888 | 2.1791E+06 | 1.4443E+06 | 1.4798E+06 | 0.3869 | 0.3958 | 0.3863 | 2.2161E+06 |
| 1.45606E+06 | 0.3831 | 1.48226E+06 | 0.3848 | 2.0757E+06 | 1.4135E+06 | 1.4705E+06 | 0.3782 | 0.3985 | 0.3831 | 2.1321E+06 |
| 1.42301E+06 | 0.3774 | 1.44800E+06 | 0.3794 | 1.9345E+06 | 1.3989E+06 | 1.4437E+06 | 0.3782 | 0.3870 | 0.3750 | 1.9839E+06 |
| 1.41387E+06 | 0.3686 | 1.43902E+06 | 0.3708 | 1.7927E+06 | 1.4047E+06 | 1.4397E+06 | 0.3745 | 0.3730 | 0.3639 | 1.8361E+06 |
| 1.39540E+06 | 0.3591 | 1.42633E+06 | 0.3675 | 1.6509E+06 | 1.4505E+06 | 1.4604E+06 | 0.4028 | 0.3375 | 0.3352 | 1.7156E+06 |
| 1.38296E+06 | 0.3554 | 1.41172E+06 | 0.3590 | 1.5942E+06 | 1.3669E+06 | 1.4109E+06 | 0.3635 | 0.3620 | 0.3508 | 1.6462E+06 |
| 1.31280E+06 | 0.3555 | 1.34270E+06 | 0.3640 | 1.5140E+06 | 1.3760E+06 | 1.3762E+06 | 0.4037 | 0.3289 | 0.3289 | 1.5692E+06 |
| 1.29331E+06 | 0.3475 | 1.32668E+06 | 0.3560 | 1.4135E+06 | 1.3575E+06 | 1.3598E+06 | 0.3952 | 0.3204 | 0.3199 | 1.4625E+06 |
| 1.26639E+06 | 0.3195 | 1.30149E+06 | 0.3313 | 1.1691E+06 | 1.3137E+06 | 1.3327E+06 | 0.3674 | 0.2964 | 0.2921 | 1.2181E+06 |
| 1.19864E+06 | 0.2982 | 1.22419E+06 | 0.3051 | 9.9019E+05 | 1.1837E+06 | 1.2255E+06 | 0.3099 | 0.3064 | 0.2960 | 1.0300E+06 |
| 1.11687E+06 | 0.2276 | 1.15013E+06 | 0.2470 | 6.8341E+05 | 1.1152E+06 | 1.1621E+06 | 0.2637 | 0.2279 | 0.2187 | 7.2497E+05 |

ANEXO F

Anexo F.1

| TENSOR DE ESFUERZOS | | | | | |
|---------------------|--------------|---|---|---------|---|
| Fuerza kN | Esfuerzo Psi | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 125.33 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 250.67 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 376.00 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 501.34 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 626.67 | 0 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 752.00 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 877.34 | 0 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1002.67 | 0 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|---|---|---------|
| | | 3 | 0 | 0 | 1128.00 |
| 10 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1253.34 |
| 11 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1378.67 |
| 12 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1504.01 |
| 13 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1629.34 |
| 14 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1754.67 |
| 15 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1880.01 |
| 16 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2005.34 |
| 17 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2130.67 |
| 18 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2256.01 |
| 19 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2381.34 |

| | | | | |
|----|---|---|---|---------|
| 20 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2506.68 |
| 21 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2632.01 |
| 22 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2757.34 |
| 23 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2882.68 |
| 24 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3008.01 |
| 25 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3133.34 |
| 26 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3258.68 |
| 27 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3384.01 |
| 28 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3509.35 |
| 29 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3634.68 |
| 30 | 1 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|----|---|---|---|---------|
| | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3760.01 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3885.35 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4010.68 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4136.02 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4261.35 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4386.68 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4512.02 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4637.35 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4762.68 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4888.02 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 2 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|---|---|---------|
| | | 3 | 0 | 0 | 5013.35 |
| 41 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5138.69 |
| 42 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5264.02 |
| 43 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5389.35 |
| 44 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5514.69 |
| 45 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5640.02 |
| 46 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5765.35 |
| 47 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5890.69 |
| 48 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 6016.02 |
| 49 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 6141.36 |
| 50 | | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 6266.69 |

Anexo F.2

| Tensor de deformación primer ciclo de carga | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|----------|
| Fuerza kN | Deformación | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 1 | 3.3729E-07 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 3.3729E-07 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.45E-06 |
| 2 | 1 | -4.0345E-05 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -4.0345E-05 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.69E-04 |
| 3 | 1 | -7.9299E-05 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -7.9299E-05 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.17E-04 |
| 4 | 1 | -0.00011427 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00011427 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 7.62E-04 |
| 5 | 1 | -0.00014403 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00014403 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 9.44E-04 |
| 6 | 1 | -0.00017681 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00017681 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.15E-03 |
| 7 | 1 | -0.0002013 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.0002013 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.33E-03 |
| 8 | 1 | -0.00023112 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00023112 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.53E-03 |
| 9 | 1 | -0.00025587 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00025587 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.68E-03 |
| 10 | 1 | -0.00027775 | 0 | 0 |

| | | | | |
|----|---|-------------|-------------|----------|
| | 2 | 0 | -0.00027775 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.83E-03 |
| 11 | 1 | -0.00029957 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00029957 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.98E-03 |
| 12 | 1 | -0.00032248 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00032248 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.11E-03 |
| 13 | 1 | -0.00034166 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00034166 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.26E-03 |
| 14 | 1 | -0.00036082 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00036082 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.39E-03 |
| 15 | 1 | -0.00038214 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00038214 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.50E-03 |
| 16 | 1 | -0.00040092 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00040092 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.63E-03 |
| 17 | 1 | -0.00041722 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00041722 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.74E-03 |
| 18 | 1 | -0.00043204 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00043204 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.85E-03 |
| 19 | 1 | -0.00044784 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00044784 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.95E-03 |
| 20 | 1 | -0.00046666 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00046666 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 3 | 0 | 0 | 3.06E-03 |
| 21 | | 1 | -0.00048028 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00048028 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.14E-03 |
| 22 | | 1 | -0.0004961 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.0004961 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.24E-03 |
| 23 | | 1 | -0.00051443 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00051443 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.33E-03 |
| 24 | | 1 | -0.00053095 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00053095 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.42E-03 |
| 25 | | 1 | -0.0005384 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.0005384 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.50E-03 |
| 26 | | 1 | -0.00055651 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00055651 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.59E-03 |
| 27 | | 1 | -0.00056994 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00056994 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.67E-03 |
| 28 | | 1 | -0.00058685 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00058685 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.76E-03 |
| 29 | | 1 | -0.00059905 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00059905 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.82E-03 |
| 30 | | 1 | -0.00060959 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00060959 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.90E-03 |

| | | | | | |
|----|----|---|-------------|-------------|----------|
| | | 1 | -0.00063002 | 0 | 0 |
| 31 | | 2 | 0 | -0.00063002 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.99E-03 |
| | | 1 | -0.00064658 | 0 | 0 |
| 32 | | 2 | 0 | -0.00064658 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.06E-03 |
| | | 1 | -0.00065681 | 0 | 0 |
| 33 | | 2 | 0 | -0.00065681 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.13E-03 |
| | | 1 | -0.00067416 | 0 | 0 |
| 34 | | 2 | 0 | -0.00067416 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.19E-03 |
| | | 1 | -0.00068851 | 0 | 0 |
| 35 | | 2 | 0 | -0.00068851 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.27E-03 |
| | | 1 | -0.00070507 | 0 | 0 |
| 36 | | 2 | 0 | -0.00070507 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.33E-03 |
| | | 1 | -0.00072014 | 0 | 0 |
| 37 | | 2 | 0 | -0.00072014 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.40E-03 |
| | | 1 | -0.00073268 | 0 | 0 |
| 38 | | 2 | 0 | -0.00073268 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.47E-03 |
| | | 1 | -0.00074754 | 0 | 0 |
| 39 | | 2 | 0 | -0.00074754 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.52E-03 |
| | | 1 | -0.00075947 | 0 | 0 |
| 40 | | 2 | 0 | -0.00075947 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.59E-03 |
| | 41 | | 1 | -0.00077573 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 2 | 0 | -0.00077573 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.65E-03 |
| 42 | | 1 | -0.00079477 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00079477 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.71E-03 |
| 43 | | 1 | -0.00080601 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00080601 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.78E-03 |
| 44 | | 1 | -0.00082188 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.83E-03 |
| 45 | | 1 | -0.00084238 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00084238 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.90E-03 |
| 46 | | 1 | -0.00085487 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00085487 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.96E-03 |
| 47 | | 1 | -0.00087408 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00087408 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.01E-03 |
| 48 | | 1 | -0.0008886 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.0008886 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.07E-03 |
| 49 | | 1 | -0.00090574 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00090574 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.12E-03 |
| 50 | | 1 | -0.00092786 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00092786 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.18E-03 |

Anexo F.3

| Tensor de deformación primer ciclo de descarga | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|----------|
| Fuerza kN | Deformación | 1 | 2 | 3 |
| 50 | 1 | -0.00092786 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00092786 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.18E-03 |
| 49 | 1 | -0.00094356 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00094356 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.18E-03 |
| 48 | 1 | -0.00093888 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00093888 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.15E-03 |
| 47 | 1 | -0.00093513 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00093513 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.11E-03 |
| 46 | 1 | -0.00093059 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00093059 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.07E-03 |
| 45 | 1 | -0.00092686 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00092686 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.03E-03 |
| 43 | 1 | -0.00091404 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00091404 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4.96E-03 |
| 42 | 1 | -0.00091175 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00091175 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4.92E-03 |
| 41 | 1 | -0.00090563 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00090563 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 4.88E-03 |
| 40 | 1 | -0.00090046 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 2 | 0 | -0.00090046 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.84E-03 |
| 39 | | 1 | -0.00089339 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00089339 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.80E-03 |
| 38 | | 1 | -0.00088946 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00088946 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.76E-03 |
| 37 | | 1 | -0.00088422 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00088422 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.73E-03 |
| 36 | | 1 | -0.00088152 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00088152 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.68E-03 |
| 35 | | 1 | -0.00087787 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00087787 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.64E-03 |
| 34 | | 1 | -0.00086814 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00086814 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.59E-03 |
| 33 | | 1 | -0.00086412 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00086412 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.55E-03 |
| 32 | | 1 | -0.00085827 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00085827 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.51E-03 |
| 31 | | 1 | -0.00084745 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00084745 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.46E-03 |
| 30 | | 1 | -0.00084465 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00084465 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 3 | 0 | 0 | 4.42E-03 |
| 29 | | 1 | -0.00083691 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00083691 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.37E-03 |
| 28 | | 1 | -0.00083136 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00083136 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.32E-03 |
| 27 | | 1 | -0.00082385 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00082385 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.28E-03 |
| 26 | | 1 | -0.00081768 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00081768 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.23E-03 |
| 25 | | 1 | -0.00081078 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00081078 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.18E-03 |
| 24 | | 1 | -0.00080244 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00080244 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.12E-03 |
| 23 | | 1 | -0.00079681 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00079681 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.07E-03 |
| 22 | | 1 | -0.00078475 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00078475 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.02E-03 |
| 21 | | 1 | -0.00077697 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00077697 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.96E-03 |
| 20 | | 1 | -0.00076728 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00076728 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.90E-03 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| 19 | | 1 | -0.00075594 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00075594 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.84E-03 |
| 18 | | 1 | -0.00075262 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00075262 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.79E-03 |
| 17 | | 1 | -0.00073974 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00073974 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.72E-03 |
| 16 | | 1 | -0.00072909 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00072909 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.65E-03 |
| 15 | | 1 | -0.00072141 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00072141 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.60E-03 |
| 14 | | 1 | -0.00070812 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00070812 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.52E-03 |
| 13 | | 1 | -0.00069903 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00069903 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.46E-03 |
| 12 | | 1 | -0.00068548 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00068548 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.37E-03 |
| 11 | | 1 | -0.00066988 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00066988 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.29E-03 |
| 9 | | 1 | -0.00064522 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00064522 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.12E-03 |
| 8 | | 1 | -0.00062697 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|---|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 2 | 0 | -0.00062697 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.02E-03 |
| 7 | | 1 | -0.00061043 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00061043 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.92E-03 |
| 6 | | 1 | -0.00058701 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00058701 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.80E-03 |
| 5 | | 1 | -0.00056714 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00056714 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.68E-03 |
| 4 | | 1 | -0.00054524 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00054524 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.55E-03 |
| 3 | | 1 | -0.00052018 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00052018 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.38E-03 |
| 2 | | 1 | -0.00048698 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00048698 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.19E-03 |
| 1 | | 1 | -0.00045155 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00045155 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 1.94E-03 |

Anexo F.4

| Tensor de deformación segundo ciclo de carga | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|----------|
| Fuerza kN | Deformación | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 1 | -0.00045155 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00045155 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1.94E-03 |
| 2 | 1 | -0.0004527 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.0004527 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.06E-03 |
| 3 | 1 | -0.0004612 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.0004612 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.21E-03 |
| 4 | 1 | -0.00047082 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00047082 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.35E-03 |
| 5 | 1 | -0.00048249 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00048249 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.46E-03 |
| 6 | 1 | -0.00049363 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00049363 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.58E-03 |
| 7 | 1 | -0.00050525 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00050525 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.69E-03 |
| 8 | 1 | -0.00051929 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00051929 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.79E-03 |
| 9 | 1 | -0.00052859 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00052859 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.89E-03 |
| 10 | 1 | -0.00053826 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 2 | 0 | -0.00053826 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 2.97E-03 |
| 11 | | 1 | -0.00054894 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00054894 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.06E-03 |
| 12 | | 1 | -0.00055895 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00055895 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.15E-03 |
| 13 | | 1 | -0.0005705 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.0005705 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.22E-03 |
| 14 | | 1 | -0.00058323 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00058323 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.30E-03 |
| 15 | | 1 | -0.00059244 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00059244 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.37E-03 |
| 16 | | 1 | -0.00060289 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00060289 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.44E-03 |
| 17 | | 1 | -0.00061638 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00061638 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.52E-03 |
| 18 | | 1 | -0.00062386 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00062386 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.57E-03 |
| 19 | | 1 | -0.00063477 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00063477 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.65E-03 |
| 20 | | 1 | -0.00064636 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00064636 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 3 | 0 | 0 | 3.72E-03 |
| 21 | | 1 | -0.00065467 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00065467 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.79E-03 |
| 22 | | 1 | -0.00066548 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00066548 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.84E-03 |
| 23 | | 1 | -0.00067422 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00067422 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.90E-03 |
| 24 | | 1 | -0.00068397 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00068397 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.96E-03 |
| 25 | | 1 | -0.00069436 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00069436 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.02E-03 |
| 26 | | 1 | -0.00070831 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00070831 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.09E-03 |
| 27 | | 1 | -0.00071834 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00071834 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.14E-03 |
| 28 | | 1 | -0.00072659 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00072659 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.19E-03 |
| 29 | | 1 | -0.00073533 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00073533 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.25E-03 |
| 30 | | 1 | -0.00074998 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00074998 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.30E-03 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| 31 | | 1 | -0.00075834 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00075834 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.36E-03 |
| 32 | | 1 | -0.00076958 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00076958 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.41E-03 |
| 33 | | 1 | -0.00077945 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00077945 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.46E-03 |
| 34 | | 1 | -0.00078925 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00078925 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.51E-03 |
| 35 | | 1 | -0.00079877 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00079877 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.57E-03 |
| 36 | | 1 | -0.00080845 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00080845 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.62E-03 |
| 37 | | 1 | -0.00081859 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00081859 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.67E-03 |
| 38 | | 1 | -0.00082853 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00082853 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.72E-03 |
| 40 | | 1 | -0.00084714 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00084714 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.81E-03 |
| 41 | | 1 | -0.00086247 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00086247 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.87E-03 |
| 42 | | 1 | -0.00087169 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 2 | 0 | -0.00087169 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.92E-03 |
| 43 | | 1 | -0.00088576 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00088576 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.96E-03 |
| 44 | | 1 | -0.00089584 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00089584 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.01E-03 |
| 45 | | 1 | -0.00090714 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00090714 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.07E-03 |
| 46 | | 1 | -0.00092488 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00092488 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.12E-03 |
| 47 | | 1 | -0.00093259 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00093259 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.17E-03 |
| 48 | | 1 | -0.00094714 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00094714 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.22E-03 |
| 49 | | 1 | -0.00095909 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00095909 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.26E-03 |
| 50 | | 1 | -0.00097398 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00097398 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 5.32E-03 |

Anexo F.5

| Tensor de deformación segundo ciclo de descarga | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|----------|
| Fuerza kN | Deformación | 1 | 2 | 3 |
| 50 | 1 | -0.00097398 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00097398 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.32E-03 |
| 49 | 1 | -0.00097196 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00097196 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.29E-03 |
| 48 | 1 | -0.00097417 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00097417 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.26E-03 |
| 47 | 1 | -0.00096775 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00096775 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.22E-03 |
| 46 | 1 | -0.00096284 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00096284 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.19E-03 |
| 45 | 1 | -0.00096135 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00096135 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.15E-03 |
| 44 | 1 | -0.00095473 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00095473 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.11E-03 |
| 43 | 1 | -0.00094964 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00094964 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.08E-03 |
| 42 | 1 | -0.00094538 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00094538 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 5.04E-03 |
| 41 | 1 | -0.00094004 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 2 | 0 | -0.00094004 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.99E-03 |
| 40 | | 1 | -0.00093503 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00093503 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.96E-03 |
| 39 | | 1 | -0.00092733 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00092733 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.92E-03 |
| 38 | | 1 | -0.00091937 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00091937 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.88E-03 |
| 37 | | 1 | -0.00091775 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00091775 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.84E-03 |
| 36 | | 1 | -0.00090952 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00090952 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.80E-03 |
| 35 | | 1 | -0.0009051 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.0009051 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.76E-03 |
| 34 | | 1 | -0.00090041 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00090041 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.72E-03 |
| 33 | | 1 | -0.00089587 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00089587 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.68E-03 |
| 32 | | 1 | -0.00088606 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00088606 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.63E-03 |
| 31 | | 1 | -0.00088163 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00088163 | 0 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 3 | 0 | 0 | 4.59E-03 |
| 30 | | 1 | -0.00087432 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00087432 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.54E-03 |
| 29 | | 1 | -0.00086649 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00086649 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.50E-03 |
| 28 | | 1 | -0.00086095 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00086095 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.46E-03 |
| 27 | | 1 | -0.00085716 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00085716 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.40E-03 |
| 26 | | 1 | -0.00084864 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00084864 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.36E-03 |
| 25 | | 1 | -0.00083665 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00083665 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.30E-03 |
| 24 | | 1 | -0.00083066 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00083066 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.25E-03 |
| 23 | | 1 | -0.0008216 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.0008216 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.20E-03 |
| 22 | | 1 | -0.00081219 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00081219 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.14E-03 |
| 21 | | 1 | -0.00080337 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | -0.00080337 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.09E-03 |

| | | | | | |
|----|--|---|-------------|-------------|----------|
| | | 1 | -0.00079327 | 0 | 0 |
| 20 | | 2 | 0 | -0.00079327 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 4.03E-03 |
| | | 1 | -0.00078371 | 0 | 0 |
| 19 | | 2 | 0 | -0.00078371 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.97E-03 |
| | | 1 | -0.00077531 | 0 | 0 |
| 18 | | 2 | 0 | -0.00077531 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.92E-03 |
| | | 1 | -0.00076543 | 0 | 0 |
| 17 | | 2 | 0 | -0.00076543 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.85E-03 |
| | | 1 | -0.00075057 | 0 | 0 |
| 16 | | 2 | 0 | -0.00075057 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.79E-03 |
| | | 1 | -0.00074014 | 0 | 0 |
| 15 | | 2 | 0 | -0.00074014 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.72E-03 |
| | | 1 | -0.00073291 | 0 | 0 |
| 14 | | 2 | 0 | -0.00073291 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.66E-03 |
| | | 1 | -0.00071948 | 0 | 0 |
| 13 | | 2 | 0 | -0.00071948 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.58E-03 |
| | | 1 | -0.00070294 | 0 | 0 |
| 12 | | 2 | 0 | -0.00070294 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.50E-03 |
| | | 1 | -0.00069231 | 0 | 0 |
| 11 | | 2 | 0 | -0.00069231 | 0 |
| | | 3 | 0 | 0 | 3.42E-03 |
| | | 1 | -0.00067703 | 0 | 0 |

| | | | | |
|----|---|-------------|-------------|----------|
| 10 | 2 | 0 | -0.00067703 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3.34E-03 |
| 9 | 1 | -0.00066387 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00066387 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3.25E-03 |
| 8 | 1 | -0.00064546 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00064546 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3.15E-03 |
| 7 | 1 | -0.00062576 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00062576 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 3.05E-03 |
| 6 | 1 | -0.00060978 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00060978 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.93E-03 |
| 5 | 1 | -0.00059067 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00059067 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.81E-03 |
| 4 | 1 | -0.00056716 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00056716 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.67E-03 |
| 3 | 1 | -0.00053753 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00053753 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.50E-03 |
| 2 | 1 | -0.00050589 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00050589 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.30E-03 |
| 1 | 1 | -0.00047125 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | -0.00047125 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 2.07E-03 |

ANEXO G

Anexo G.1

| Valores promedios de parámetros Mecánicos | | | | | | |
|---|-----------|-----------|------|------|------|-----------|
| Ciclo de carga | Ev (Psi) | Eh (Psi) | v1 | v2 | v3 | K (Psi) |
| Carga 1 | 2.567 E06 | 2.674 E06 | 0.29 | 0.29 | 0.28 | 2.011 E06 |
| Descarga 1 | 2.920 E06 | 3.139 E06 | 0.22 | 0.24 | 0.22 | 1.875 E06 |
| Carga 2 | 2.285 E06 | 2.319 E06 | 0.33 | 0.31 | 0.31 | 2.268 E06 |
| Descarga 2 | 1.920 E06 | 1.941 E06 | 0.39 | 0.37 | 0.36 | 2.653 E06 |