

Valoración de los Materiales Aluviales presentes en el Río Reventazón para ser utilizados como Enrocado en la Construcción del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón



Abstract

The development of this paper took motivation from the characterization of the alluvial material from the Reventazón River in two possible extraction places, to be applicable for the dam construction.

A detailed valuation of the material is the main purpose of the paper. These materials are in two extraction places that were established such as Carazo and Presa places, this was made because of the application of a series of index tests where granular material, abrasion, absorption, specific gravity, accelerated interperism, volumetric heaviness, relative density, grain rupture, point load, unidimensional compression and mineralogical classification, which will be used to give a geotechnical criterion which is supported with the application of several concerning theories, that will give crucial parameters to consider in the dam design such as the effective angle of internal friction of the material, the deformational module and the cut resistance from them.

At the end of the application of these index tests, and from the methodologies of the established applications to determine the designed parameters, satisfactory results are obtained from the investigated theory, moreover differences are established from the analyzed and studied extraction places.

As conclusion, the material from the extraction places, present similar characteristics with small variation among both materials.

Resumen

El desarrollo del presente trabajo fue motivado a la caracterización de los materiales aluviales del Río Reventazón en dos posibles sitios de préstamo, aplicables a la construcción de la represa.

Se pretende realizar una valoración detallada de los materiales presentes en dos de los sitios de préstamos establecidos como lo son sitio Carazo y sitio Presa, mediante la aplicación de una serie de ensayos índices, entre los que sobresalen la granulometría de los materiales, abrasión, absorción, gravedad específica, interperismo acelerado, pesos volumétricos, densidad relativa, ruptura de granos, carga puntual, compresión unidimensional y la clasificación mineralógica, los cuales se utilizarán con la finalidad de brindar un criterio geotécnico sustentado en la aplicación de varias teorías referentes, de las cuales se obtendrán parámetros claves a considerar en el diseño de la represa como lo son el ángulo de fricción interno efectivo de los materiales, el módulo de deformabilidad y la resistencia al corte de los mismos.

Al final de la aplicación de este conjunto de pruebas índice, y de la aplicación de las metodologías establecidas para determinar los parámetros de diseño, se logra obtener resultados satisfactorios y esperados reportados por la teoría investigada al respecto, además de establecer las diferencias entre sitios de préstamo analizados y estudiados.

Como conclusión los materiales de los sitios de préstamo, presentan características muy similares con pequeñas variantes entre ambos materiales.

Valoración de los Materiales Aluviales presentes en el Río Reventazón para ser utilizados como Enrocado en la Construcción del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón

ROY GERARDO RUIZ VÁSQUEZ

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio del 2009

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	3	Resultados	26
Resumen Ejecutivo.....	4	Granulometrías	26
Introducción	6	Densidad Máxima de los Materiales	30
Objetivos.....	6	Ensayo de Odómetro para Determinar el	
Objetivo General.....	6	Módulo de Deformación	33
Objetivos Específicos	6	Ensayo de Odómetro a una Densidad	
Marco Teórico.....	7	Máxima del 100%.....	33
Teoría de Barton y Kjaernsli	7	Rotura de Granos para los Materiales del	
Teoría de Raúl Marsal	8	Odometro #1 del sitio Carazo	36
Teoría de Douglas	8	Rotura de Granos para los Materiales del	
Teoría de Leps.....	9	Odometro #1 del sitio Presa.....	40
Planteamiento del Problema	9	Ensayo de Odómetro a un 95% de su	
Antecedentes.....	9	Densidad Máxima	41
Zonificación de una Represa del Tipo		Rotura de Granos para los Materiales del	
C.F.R.D. y	10	Odometro #2 del sitio Carazo	44
Ventajas de una Represa C.F.R.D.	12	Rotura de Granos para los Materiales del	
Requerimientos Generales.....	13	Odometro #2 del sitio Presa.....	48
Tipos de Rocas que se podrían Utilizar como		Ensayo de Odómetro a un 90% de su	
Material de Enrocado	13	Densidad Máxima	48
Módulo de Deformabilidad de los Materiales		Rotura de Granos para los Materiales del	
.....	14	Odometro #3 del sitio Carazo	52
Metodología.....	16	Rotura de Granos para los Materiales del	
Clasificación Mineralógica	16	Odometro #3 del sitio Presa.....	56
Granulometría.....	17	Comparación Ensayos Odométricos para los	
Abrasión o Desgaste de los Materiales	17	Materiales del Sitio Carazo	56
Intemperismo Acelerado.....	18	Valores Máximos del Módulo de	
Peso Volumétrico.....	19	Deformabilidad para los Materiales del Sitio	
Gravedad Específica y Absorción	21	Carazo.....	58
Límites de Atterberg	23	Comparación Ensayos Odométricos para los	
Ruptura de Granos	23	Materiales del Sitio Presa.	59
Compresión Unidimensional.....	24	Valores Módulo de Deformabilidad para los	
Carga Puntual.....	25	Materiales del Sitio Presa	60
		Pesos Volumétricos	60
		Gravedades Específicas y Absorción	62
		Abrasión o Desgaste de los Materiales	63
		Intemperismo Acelerado	64

Ruptura de Granos	64	Pesos Volumétricos	114
Coefficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura	66	Intemperismo Acelerado	115
Clasificación de los Enrocados.....	67	Clasificación Mineralógica.....	115
Clasificación del Origen Mineralógico de los Materiales	69	Aplicación de las Teorías	116
Sección Delgada Roca #1	69	Ángulo de Fricción Interna Efectivo de los Materiales.....	116
Sección Delgada Roca #2	69	Resistencia al Corte de los Materiales.....	119
Sección Delgada Roca #3	69	Módulos de Deformabilidad de los Materiales	119
Sección Delgada Roca #4	69	Conclusiones.....	122
Sección Delgada Roca #5	70	Apéndices.....	126
Sección Delgada Roca #1	71	Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 100%.....	128
Sección Delgada Roca #2	72	Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 95%.....	138
Sección Delgada Roca #3	72	Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 90%.....	149
Sección Delgada Roca #4	72	Valores del Módulo de Deformabilidad para los Materiales del Sitio Carazo.....	160
Sección Delgada Roca #5	72	Valores del Módulo de Deformabilidad para los Materiales del Sitio Presa.....	161
Carga Puntual.....	74	Gravedades Específicas y Absorción	162
Granulometría Propuesta por Sherard	74	Intemperismo Acelerado	162
Aplicación de la Teoría de Barton y Kjaernsli.....	76	Ruptura de Granos.....	164
Aplicación de la Teoría de Marsal	90	Anexos	171
Aplicación de la Teoría de Douglas.....	96	Ilustraciones de los Ensayos	171
Aplicación de la Teoría de Leps	99	Referencias	183
Análisis de Resultados	102		
Módulo de Deformabilidad a una Densidad Máxima del 100%	102		
Módulo de Deformabilidad a un 95% de su Densidad Máxima	104		
Módulo de Deformabilidad a un 90% de su Densidad Máxima	105		
Comparación entre Ensayos de Odómetro	108		
Efectos de Escala	110		
Porcentajes de Materiales Retenidos Propuestos por Sherard	110		
Gravedad Específica y Absorción de los Materiales	111		
Abrasión o Desgaste de los Materiales	112		
Ruptura de Granos	112		
Clasificación del Enrocado	113		
Carga Puntual.....	114		

Prefacio

El presente trabajo, se realizó con la firme posición de solventar una necesidad por parte del Instituto Costarricense de Electricidad, en cuanto a la investigación y valoración de las características mecánicas que poseían los materiales aluviales del Río Reventazón, para emitir un criterio técnico basado en fundamentos teóricos que permitan caracterizar distintos materiales de zonas definidas como préstamo para la construcción de la represa del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón.

El Proyecto Hidroeléctrico Reventazón plantea la construcción de un tipo de represa única en su clase en el país conocida en sus siglas en inglés como C.F.R.D (Concrete Face Rockfill Dam), es decir, una represa con losa aguas arriba de la represa de enrocado de concreto.

Es de suma importancia el valorizar los materiales de acuerdo con sus características mecánicas, con base en la ejecución de varias pruebas de laboratorio, que permitan clasificar los materiales para su uso en algunas de las zonas que conforman una represa de este tipo.

La importancia radica básicamente en reportar un valor de resistencia de los materiales por utilizar como enrocado, así como también de un ángulo de fricción interna de los materiales. Éste es uno de los mayores problemas que enfrenta un Ingeniero Geotecnista, al realizar un análisis de compresibilidad de los materiales.

Se reportará una caracterización de los materiales de dos de los sitios de préstamo del proyecto, a los cuales se les aplicará una serie de metodologías, que permitan reportar valores de resistencia de los materiales y valores del ángulo de fricción interna de los mismos, a fin de ser utilizados estos parámetros en el diseño de la represa.

Finalmente, agradezco al Instituto Costarricense de Electricidad, específicamente al

Departamento de Ingeniería Geotecnia por permitirme desarrollar este proyecto de graduación. Agradezco al Ingeniero Eduardo

Avilés Madrigal, coordinador del departamento al momento de iniciar este proyecto, por su gran ayuda en la ejecución del proyecto. De igual manera al Ingeniero Julio Delgado Sancho, por su aporte incondicional al igual que a mí profesor guía el Ingeniero Marco Antonio Tapia Balladares, por atender a todas mis consultas y dudas al respecto y brindarme su criterio técnico en cada una de las labores realizadas y en todo momento.

No puedo terminar sin antes agradecer el gran apoyo técnico y ayuda incondicional del señor Luis Bermúdez Chacón, pieza fundamental para la realización de este proyecto, agradezco su enorme interés que desde un inicio depositó en este proyecto y el tiempo que invirtió en el mismo, a pesar de sus múltiples obligaciones. Sin dejar de lado la enorme ayuda brindada por el conjunto de técnicos del Laboratorio de Materiales, a los cuales agradezco mucho su ayuda y comprensión, especialmente al señor Jesús Bravo por su aporte incalculable en la obtención de los resultados en cada una de las pruebas realizadas, como parte de este trabajo.

Resumen Ejecutivo

El Instituto Costarricense de Electricidad presentó la necesidad de realizar la valoración de los materiales de origen aluvial, ubicados en el río Reventazón, para validar su uso en la construcción de la represa del proyecto hidroeléctrico Reventazón.

El desarrollo del presente trabajo, tiene por finalidad, el presentar una valoración mecánica completa y detallada de dos de los materiales ubicados en sitios de préstamo distintos entre sí, ubicados en las márgenes del río Reventazón, con la firme intención de brindar un criterio técnico apropiado acerca de los mismos y ver su comportamiento para el uso en la construcción de una represa del tipo C.F.R.D (por sus siglas en inglés) y que corresponde a una presa de enrocado con cara de concreto.

Se aplicó una serie de pruebas índice para obtener de las mismas la mayor cantidad de información posible, que permitieran valorizar correctamente estos materiales. Las pruebas llevadas a cabo fueron las siguientes:

- Clasificación Mineralógica.
- Granulometrías de los Materiales.
- Desgaste o Abrasión.
- Límites de Atterberg.
- Intemperismo Acelerado.
- Pesos Volumétricos.
- Densidad Máxima de Laboratorio.
- Gravedad Específica.
- Absorción.
- Ruptura de Granos.
- Compresión Unidimensional.
- Carga Puntual.

Por medio de cada una de ellas se establece la caracterización de los materiales,

además, de emplear los resultados obtenidos de las mismas, con la finalidad de aplicar una serie de teorías o metodologías que permitan determinar parámetros de diseño como lo son:

- Ángulo de Fricción Interna de los Materiales.
- Resistencia al Corte.
- Módulos de Deformabilidad.

Se aplicaron las siguientes metodologías, de las cuales se desprendieron valores de cada uno de los parámetros anteriormente citados:

- Teoría de Barton y Kjaernsli (1981).
- Teoría de Marsal (1975).
- Teoría de Douglas (2003).
- Teoría de Leps (1970).

A partir de estas teorías se obtuvieron valores del ángulo de fricción interna, de la cual se desprendieron resultados muy similares, en cuanto a este parámetro, para las dos primeras y la última de ellas, donde se obtuvieron valores que se encuentran en el rango de los 38° a los 52°; esto, para diferentes valores del esfuerzo normal aplicado sobre los materiales. La teoría de Douglas presentó valores un tanto menores a los estimados por las demás, establecidos en el rango de los 35°.

La metodología establecida por Barton y Kjaernsli, permitió obtener el parámetro de la resistencia al corte de los materiales tanto para el sitio Carazo como para el sitio Presa en cada uno de los ensayos odométricos que se realizaron, donde se obtuvieron valores de resistencia de hasta 50 kg/cm².

Por último, con la metodología presentada por Marsal, se obtuvieron valores del

módulo de deformabilidad de los materiales, que permitieron compararlos con los obtenidos directamente de las pruebas de odómetro realizadas para los materiales, obtenidos mediante la pendiente de la curva esfuerzo - deformación.

Se realizaron seis pruebas de odómetro, variando el parámetro de la densidad máxima obtenida en el laboratorio de los materiales, es decir, se realizaron pruebas al 100%, 95% y 90%. De las seis pruebas realizadas, tres correspondieron a los materiales del sitio Carazo y las restantes tres a materiales del sitio Presa.

De los resultados obtenidos de cada una de ellas, se concluye que los materiales del sitio Carazo presentaron valores más elevados del módulo de deformabilidad, del orden de los 1300 kg/cm². De las tres pruebas realizadas por materiales de cada sitio, fue el ensayo realizado a un 100% de la densidad máxima la que presentó para cada caso, el mayor módulo de deformación; de ahí que se recomienda que a la hora de realizar la construcción de la represa, compactar los materiales lo más cercano posible a su densidad máxima; se controla para ello los espesores de las capas, así como su energía de compactación.

Además, se recomienda cumplir con los porcentajes de arenas establecidos por Sherard, quien estableció que los materiales por utilizar, como enrocados, deberán presentar entre un 35% a un 55% de arenas; esto, queda demostrado con la ejecución de las pruebas de odómetro, por cuanto los materiales del sitio Carazo presentaban mayor cantidad de arenas que ayudaron a distribuir de mejor manera los esfuerzos aplicados sobre los materiales y a disminuir considerablemente los vacíos dentro del odómetro. Lo anterior, llevó indudablemente a obtener una densidad de laboratorio de los materiales más alta, respecto de la de los materiales del sitio Presa; ello condujo a su vez a obtener menores asentamientos en las pruebas de odómetro realizadas.

Importante es que se determinó, además, el origen geológico de los materiales, que corresponde mayoritariamente a materiales ígneos. Sin embargo, se presentan dentro de los sitios de préstamo, materiales de origen sedimentario, en menor grado claro está, esto con la firme intención de clasificar mejor el tipo de material presente en los sitios definidos de

préstamo y así tener una mejor idea de su calidad.

Los materiales del sitio Carazo son catalogados como blandos y los materiales del sitio Presa como semiduros. De ahí que se establece que los materiales del sitio Presa son de una mejor calidad que los materiales presentes en el sitio Carazo, en cuanto a la dureza de su grano.

La clasificación de los enrocados involucró resultados de varios ensayos previos como lo son:

- Resistencia a la Ruptura de Granos.
- Absorción de los Materiales.
- Abrasión o Desgaste en la Máquina los Ángeles.
- Intemperismo Acelerado.
- Granulometría.
- Coeficiente de Uniformidad.

Con la ejecución de este conjunto de ensayos, se determinó que, si bien los materiales del sitio Carazo son de menor resistencia en cuanto a la dureza de su grano, respecto de los materiales del sitio Presa, la granulometría de los materiales del sitio Carazo es mucho mejor que la del sitio Presa. Queda demostrado esto a la hora de determinar la densidad máxima de los materiales en el laboratorio y con la ejecución de los ensayos de odómetro. Esto, conlleva a concluir que, sin duda alguna, los finos se convierten en parte importante de los materiales, a la hora de utilizarlos como enrocados, ya que disminuyen en gran parte los vacíos entre la fracción gruesos del enrocado y permiten una mejor distribución de los esfuerzos a la que se verán sometidos los materiales cuando se inicie con la construcción de la represa.

Se concluye que los materiales del sitio Carazo, a pesar de que presentan una resistencia geomecánica, menor a la de los materiales del sitio Presa, son aptos para su uso en la zona 2B, no así para el caso de los provenientes del sitio Presa. Sin embargo, se deja la inquietud de que al mejorar la granulometría de los materiales del sitio Presa, indudablemente serían aptos para su uso en esta misma zona 2B.

Introducción

El presente trabajo trata la valoración de los materiales de origen aluvial provenientes de dos de los sitios de préstamo que se tienen planeado utilizar como parte de la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón. Esto, mediante la ejecución de una serie de pruebas a los materiales, en los que se busca estudiar y analizar su comportamiento y resistencia mecánica para su uso en la construcción de la represa en el sitio del proyecto.

El origen del proyecto, surge de la necesidad que presentaba el Instituto Costarricense de Electricidad de analizar una serie de materiales extraídos de diferentes trincheras provenientes de sitios de préstamo. Se pretenden utilizar: el sitio Carazo y el sitio Presa, para la ejecución de ensayos de odómetro, de los cuales se pueda estudiar y analizar el módulo de deformación de los materiales, entre otras características.

Los materiales serán sometidos a pruebas, en busca de poder utilizar los valores arrojados en cada uno de estos ensayos, para el uso de una serie de metodologías ó teorías. La primera de ellas presentada por Nick Barton y Björn Kjaernsli, de la cual se obtendrá la resistencia al corte de los materiales por utilizar como enrocado, así como también el ángulo de fricción interna de los materiales. La segunda de ellas expuesta por Raúl Marsal, se obtendrá el ángulo de fricción interna de los materiales, así como una clasificación de los materiales por utilizar como enrocado, con base en la dureza de los granos; para ello se necesita realizar una serie de pruebas complementarias, para su respectiva clasificación.

Se aplicará una tercera teoría, basada en una serie de correlaciones, expuesta por Douglas, de la cual se permite obtener el ángulo de fricción interna efectivo de los materiales.

Finalmente se empleará la metodología expuesta por Thomas Leps, ya que la misma ha sido utilizada en muchos casos concretos de represas de este tipo alrededor del mundo, para

determinar el ángulo de fricción interna de los materiales. Esto se realiza con la finalidad de observar el comportamiento en cuanto a la aplicación de estas teorías y ver la variación para un mismo parámetro en común, como lo es el ángulo de fricción interna de los materiales.

Objetivos

Objetivo General

- Caracterizar y evaluar los materiales provenientes de sitios de préstamo, para caracterizarlo y clasificarlo como material apto para su uso en alguna de las zonas que conforman el tipo de represa C.F.R.D (Concrete Face Rockfill Dam) del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón. Esto mediante la ejecución de diversas pruebas de laboratorio, además del empleo de una serie de teorías que evalúan los parámetros de diseño como lo son la resistencia al corte de los materiales, el ángulo de fricción interna de los materiales y los módulos de deformabilidad de los materiales, establecidas por Raúl Marsal, Nick Barton - Björn Kjaernsli, Douglas y Thomas Leps.

Objetivos Específicos

- Revisar la clasificación mineralógica de los materiales a ser utilizados como enrocados, mediante la ejecución del ensayo de sección delgada a los materiales.
- Realizar varias pruebas índice (granulometrías, abrasión, intemperismo acelerado, pesos volumétricos, densidad

máxima de los materiales, adsorción, gravedad específica, límites de Atterberg, carga puntual, rotura de granos y ruptura de granos), para caracterizar físicamente los materiales del sitio de préstamo.

- Aplicar el ensayo de compresión unidimensional para determinar las características de deformabilidad de los materiales presentes en el sitio de préstamo.
- Clasificar el tipo de enrocado según su dureza.
- Aplicar teorías para determinar la resistencia al corte de los materiales, el ángulo de fricción interna y el módulo de deformabilidad de los mismos, establecidas por Raúl Marsal y Nick Barton junto con Björn Kjaernsli, Thomas Leps y Douglas, con el fin de evaluar la respuesta de los materiales en su uso como enrocado.

Marco Teórico

El desarrollo del presente trabajo, se ve motivado por determinar las principales características geomecánicas de los materiales de dos de los sitios de préstamos del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón como lo son el Sitio Carazo y el Sitio Presa, con la finalidad de utilizar los resultados que del análisis se desprende para consideraciones propias en la selección de los materiales para las diferentes zonas que conforman la represa del proyecto.

Como parte del contenido del trabajo, se aplican un conjunto de teorías que permitan brindar parámetros en cuanto a la resistencia de los materiales, deformación de los mismos, así como también valores del ángulo de fricción efectivos de los materiales.

Es así como se llega a utilizar las siguientes teorías para determinar los parámetros anteriormente expuestos:

- Teoría de Barton y Kjaernsli (1981).
- Teoría de Raúl Marsa (1969).
- Teoría de Douglas (2003).
- Teoría de Leps (1970).

Seguidamente se tratará cada una de estas metodologías por separado, con la finalidad de esclarecer qué se pretende con la aplicación de cada una de ellas.

Teoría de Barton y Kjaernsli¹

El método desarrollado por estos dos investigadores se basa en el hecho de que la resistencia al corte de los materiales, se puede correlacionar con el comportamiento de la resistencia de un macizo rocoso diaclasado.

Además de obtener la resistencia al corte de los materiales, permite obtener valores del ángulo de fricción interna efectivo. Éste es uno de los mayores obstáculos al que se ve expuesto un ingeniero geotecnista a la hora de analizar la estabilidad y compresibilidad de un enrocado; es de gran importancia para poder caracterizar un material.

Se establece que el ángulo de fricción efectivo de los materiales, se puede determinar si se conocen los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión simple de los materiales.
- El tamaño d_{50} (tamaño medio) de su curva granulométrica.
- El grado de angulosidad de sus partículas.
- La porosidad del material después de compactado.

Cada uno de estos parámetros se establecen realizando pruebas preliminares de por medio; de los resultados que se desprenden de las mismas, se emplean para ejecutar esta metodología.

Se implementan una serie de gráficos y de ecuaciones, establecidas por los autores de la teoría, que se detallan, presentan y aplican en la sección de resultados del presente informe.

Quizás la gran ventaja que presenta esta teoría, es que relaciona, de manera lineal, el logaritmo de la razón resistencia equivalente y esfuerzo normal aplicado y el ángulo de fricción efectivo. Esto se observará más adelante en este mismo informe.

¹ Información tomada del artículo The Shear Strength of Rock and Joint in Theory and Practice.

Teoría de Raúl Marsal.²

Por medio de la metodología propuesta por Raúl Marsal (1969), se pueden obtener el ángulo de fricción interna de los materiales, el módulo de deformabilidad de los mismos y se establece la clasificación de los materiales por utilizar como enrocado en cuanto a la dureza de sus granos.

Para la determinación de los valores del ángulo de fricción interna efectivo de los materiales, así como el módulo de deformabilidad de los mismos, se hace necesario conocer inicialmente la clasificación de los materiales por utilizar como enrocado.

La determinación de la clasificación, se realiza por medio de la ejecución de varios ensayos previos que permiten obtener parámetros índices tales como:

- Ruptura de Granos.
- Adsorción de los Materiales.
- Desgaste o Abrasión en la Máquina de Los Ángeles.
- Granulometría de los Materiales.
- Coeficiente de Uniformidad.

Es solo a partir de la ejecución de estas pruebas índices que se logra establecer la clasificación de los enrocados, necesaria para la posterior determinación del ángulo de fricción interna efectivo de los materiales, así como también del módulo de deformabilidad.

El empleo de esta metodología basa su puesta en ejecución, además de los parámetros anteriormente mencionados, en el parámetro de la rotura de granos, la cual se obtiene de la diferencia de los porcentajes de los pesos retenidos de las curvas granulométricas inicial menos final.

El parámetro de la rotura de granos se determina para las pruebas de enrocados realizadas en el odómetro, establecidas según los porcentajes de la densidad máxima de los materiales. Por medio de la granulometría inicial de los materiales retenidos, que se obtiene de la misma curva granulométrica de los materiales pasando, que se emplea para determinar las

² Información tomada del libro Presas de Tierra y Enrocamiento.

cantidades específicas en cada tamaño nominal por colocar dentro del odómetro, es que se obtiene después de realizar la prueba odométrica, los porcentajes de la rotura de granos, como consecuencia directa de la aplicación de los esfuerzos normales aplicados a los materiales dentro del odómetro.

El porcentaje de la rotura de granos, se permite correlacionar con la relación de esfuerzos principales, a partir de los cuales, se obtienen los valores del ángulo de fricción interna de los materiales. Estos valores se utilizarán para comparar los que se desprenden de la metodología establecida por Barton y Kjaernsli, para determinar este mismo parámetro.

La obtención de la relación de esfuerzos principales de los materiales, se realiza por medio de un nomograma, el cual introduciendo el porcentaje de rotura de granos, para cada ensayo de odómetro, establece el valor de esta relación de esfuerzos, a partir de los cuales, se obtiene el valor del ángulo de fricción efectivo. Este nomograma se presenta en la sección de Resultados del presente informe, así como también la ecuación que permite determinar el valor del ángulo de fricción efectivo de los materiales.

La metodología establecida por Marsal, permite además determinar el módulo de deformabilidad (E) de los materiales; esto, por medio de un nomograma que, igualmente conociendo el porcentaje de rotura de granos, para cada ensayo de odómetro, arroja un valor del módulo. Éste, se permite comparar con el que se obtiene directamente de la pendiente de la curva esfuerzo, respecto de la deformación de los materiales, para cada prueba odométrica.

Este nomograma igualmente se presenta en la sección de Resultados del presente informe.

Teoría de Douglas³

De las cuatro metodologías aplicadas, la establecida por Douglas es la más reciente de todas (2003).

Dicha teoría consiste en determinar valores del ángulo de fricción interno efectivo de los materiales por utilizar como enrocado, por

³ Información tomada del artículo The Shear Strength of Rockfill.

medio de una ecuación que se fundamenta en un análisis matemático, para llegar a brindar dichos valores.

Esta teoría se basa en un análisis estadístico no lineal; la estimación de este método se hizo utilizando los mínimos cuadrados.

Para poder aplicar dicha metodología, se hace necesario el conocimiento de una serie de parámetros iniciales, que se presentan a continuación:

- Índice de Angularidad de los materiales.
- Porcentajes de Finos.
- Resistencia a la Compresión Inconfinada de los materiales rocosos.
- Coeficiente de Curvatura.

Cada uno de estos parámetros, se obtienen por medio de la aplicación de ensayos preliminares, que llevan a la obtención de los resultados y valores necesarios para la aplicación de la metodología de Douglas.

La ecuación que se emplea para determinar el valor del ángulo, igualmente que en los casos anteriores, se presenta en la sección de Resultados del informe, junto con los parámetros iniciales bajo los cuales se llega a determinar dicho valor.

La finalidad será la de comparar los resultados obtenidos con las restantes metodologías que igualmente determinan a su manera los valores del ángulo de fricción interna efectivo de los materiales.

Teoría de Leps⁴

La metodología establecida por Thomas Leps (1970), es sin duda una de las más utilizadas por muchos consultores en el área de la ingeniería geotécnica, para la determinación del ángulo de fricción interna efectivo de los materiales.

Se basa en la aplicación de un nomograma, a partir del cual, conociendo los valores del esfuerzo normal aplicado a los materiales, se determina directamente los valores del ángulo para cada nivel de esfuerzos, experimentado por los materiales.

⁴ Información tomada del artículo Journal of the Soil Mechanics on Foundations Division.

La idea de aplicar esta teoría, es la de tener una metodología, que, aparte de ser muy utilizada, permita obtener valores de referencia que sean comparables con los obtenidos por las anteriores metodologías que se han expuesto.

Planteamiento del Problema

En un proyecto de construcción de una represa del tipo C.F.R.D (Concrete Face Rockfill Dams), el conocer las características de los materiales por utilizar para cada una de las zonas en que se divide una represa de este tipo, es de suma importancia.

Caracterizar los materiales geomecánicamente, ayudan a conocer, de una mejor manera, los materiales que se van a implementar en el proceso de construcción.

Cada zona en específico de una represa del tipo C.F.R.D, debe cumplir con una serie de requisitos en cuanto a su resistencia y módulo de deformación.

Es por ello, que la importancia de clasificar los posibles materiales de diferentes zonas de préstamo es importante, puesto que así se define claramente en qué zona en específico se pueden utilizar esos materiales.

Por la naturaleza de la represa, existen zonas dentro de la misma, en la cual los materiales requieren mejores características que otras.

El proyecto radica, en evaluar las características geomecánicas de los materiales de dos de los sitios de préstamo definidos, como lo son el sitio Carazo y el sitio Presa. Se realizarán varias pruebas índices de laboratorio, para clasificar los materiales por utilizar en el enrocado según la dureza de los granos, además de determinar los valores del ángulo de fricción interna de los materiales, módulo de deformabilidad y resistencia al corte de los mismos; esto, mediante la aplicación de varias metodologías que permiten obtener estos parámetros de diseño.

Antecedentes

La construcción del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón cuenta con el diseño

de represa de enrocado con una losa impermeable, aguas arriba del embalse de concreto, conocida como C.F.R.D (Concrete Face Rockfill Dam) por sus siglas en inglés.

Este tipo de represa demanda la utilización de gran cantidad de materiales, ya sean provenientes de los márgenes o sitios de acopio dentro del río propio, así como también de zonas aledañas al mismo y que puedan ser utilizables.

De ahí la importancia de realizar una valoración de los materiales; en este caso, de dos de los posibles zonas de préstamo dentro del río, para determinar si los mismos son capaces de ser utilizables en alguna de las zonas que conforman una represa de este tipo.

Una represa del tipo C.F.R.D, está conformada mayoritariamente de materiales rocosos, que se colocan en diferentes zonas, cada una de ellas catalogada según una graduación en específico.

Zonificación de una Represa del Tipo C.F.R.D^{5, 6 y 7}

Zona 1A: Debe estar constituida por material impermeable, esto para garantizar la estanqueidad en la zona con mayores presiones hidrostáticas y sujetos al movimiento de la junta perimetral. Se puede emplear material limoso no cohesivo, es recomendable colocarlo en capas de 30 cm y compactarlo con equipo vibratorio **(5 y 7)**.

Zona 1B: Puede estar constituida por materiales no seleccionados y utilizados como material confinante de la Zona 1A. Pueden ser materiales como conglomerados, lavas, brechas. Se recomienda colocar el material en capas de 60cm y compactar con equipo de construcción. Esta zona en particular no requiere control de la humedad de los materiales, ya que posee como función principal confinar el material de la zona 1A **(5 y 7)**.

⁵Información tomada del Libro Geotechnical Engineering of Dams.

⁶ Información tomada del Informe de Factibilidad del Proyecto Boruca. ICE.

⁷ Informe Técnico desarrollado por el Ingeniero Bayardo Materón para el Instituto Costarricense de Electricidad.

Zona 2A: Constituida por un filtro fino de arena de un tamaño máximo de 20mm, colocado a lo largo de la junta perimetral. Lo ideal para el material de esta zona es que presente una granulometría que sea capaz de servir de filtro a los materiales de la zona 1A. Esta zona se emplea para retener los finos no plásticos colocados sobre la misma; esto, para sellar eventuales filtraciones, en el peor de los casos, debido a la ruptura de los sellos de la junta perimetral. Se coloca en capas pequeñas de no más de 20cm y se debe de compactar con equipo vibratorio manual. **(5 y 7)**.

Zona 2B: Esta zona se encuentra constituida por material semipermeable, que sirve de apoyo directo a la losa de concreto. En caso de que se presenten agrietamientos en la losa de concreto, el material por colocar en esta zona, tiene la función de servir de sello para las grietas con el objetivo de minimizar, en la medida de lo posible, las filtraciones. Esto se logra arrojando material fino desde el embalse mismo, que es retenido por la graduación de los materiales presentados en esta zona.

Los materiales por utilizar en esta zona deben colocarse en capas con espesores de por lo menos 30cm y ser compactados con un rodillo vibratorio de al menos 12 toneladas y realizar entre 4 y 6 pasadas por capa.

Esta zona, a diferencia de las demás, se recomienda presente la granulometría propuesta por Sherard, que presenta los siguientes porcentajes pasando los diferentes tamaños nominales de las mallas:

CUADRO 1. GRANULOMETRÍA PROPUESTA POR SHERARD.	
Tamaño	% Pasando
10 cm	100%
7,5 cm	90%-100%
3,8 cm	70%-95%
1,9 cm	55%-80%
N° 4	35%-55%
N° 30	8%-30%
N° 200	2%-8%

(5).

Zona 3A: Se caracteriza por ser enrocado libre, el cual permite el libre drenado del enrocado. El material perteneciente a esta zona debe ser colocado en capas de materiales de por lo menos 30cm de espesor. Esta zona es la que brinda el principal soporte a la losa; por ello, debe ser compactada a un alto módulo para mitigar los asentamientos que se puedan producir en la losa superficial, similar al procedimiento seguido en la zona 2B. Se encuentra ubicada inmediatamente aguas abajo de la zona 2B. Posee la función de servir de transición entre la zona 2B y los materiales de la zona 3B; esto, para evitar la posibilidad de grandes vacíos adyacentes a la zona que soporta la losa. Su tamaño máximo es de 30 cm y procede de materiales utilizados para la zona 2B **(5 y 7)**.

Zona 3B: Se caracteriza por ser materiales de enrocada áspero, debe ser un enrocado de libre drenado colocado en capas de 60cm de espesor. Esta zona es menos afectada por la carga de agua que la zona 3A, así que un bajo módulo de deformación puede ser aceptado. El espesor de la capa permite la colocación de grandes tamaños de roca; el tamaño máximo recomendado es de 55cm. Esta zona constituye el espaldón aguas arriba de la represa, del cual depende la magnitud de las deformaciones que podría experimentar la cara de concreto durante la etapa de construcción y llenado del embalse. Corresponden por lo general a gravas naturales. **(5 y 7)**.

Zonas 3C: Estas zonas conforman lo que será el espaldón aguas debajo de la represa. Los requisitos, en cuanto a la calidad de los materiales y la compactación de los mismos, puede ser menor a la de los materiales requeridos para el espaldón aguas arriba, ya que estos solo reciben una pequeña parte de la carga del embalse. La zona 3C debe ser gravas compactadas en capas de aproximadamente 80cm con tamaños máximos de hasta los 70cm, y compactados en forma similar a la de la zona 3B. **(5 y 7)**.

Zona 2E: El material que se emplea para esta zona debe ser un material fino, conformada por roca fina, que actúan en conjunto como un filtro de transición entre las zonas 2D y 3A; esto, ante una eventualidad de escape o fuga de líquidos a través de la represa **(5 y 7)**.

Zona 2F: Algunas represas modernas incluyen una zona 2F, que se emplea como una zona de filtro justo debajo de la junta perimetral. Esta zona desempeña básicamente dos funciones bien definidas.

1. Los materiales que se emplean en esta zona deben presentar un alto módulo de deformación, para limitar la posible deformación que puede presentar la losa de concreto, en la junta perimetral.
2. Los materiales presentes en esta zona actúan como un filtro, para limitar el flujo de líquidos ante un eventual agrietamiento o abrimiento de las juntas, en la losa de concreto.

Los materiales por utilizar en esta zona 2F, deben de presentar un tamaño máximo de 19mm a 37mm, con algunos materiales finos, colocados en capas de no más de 20cm **(5 y 7)**.

Zona 4: Por lo general, corresponden a materiales de gran tamaño, colocadas en el talud aguas debajo de la presa, con la finalidad de brindar una apariencia uniforme a la presa **(5)**.

Zona T: Se ubica hacia el centro de la represa. Es una zona en donde se pueden colocar gravas, lavas, brechas o conglomerados en capas definidas de aproximadamente 80cm de espesor. Se realiza una compactación semejante a la de la zona 3B **(7)**.

Plinto: El plinto consiste en una losa de concreto reforzado lanzado en sólido, en zonas de baja permeabilidad de las rocas, que sirva de unión con respecto a la losa de superficie **(5)**.

Losa de Concreto: Consiste en concreto reforzado, preferiblemente con un ancho entre los 25cm y los 60cm de espesor de losa. Posee juntas horizontales y verticales; estas, se utilizan para albergar o soportar la deformación, que ocurre durante la construcción y el primer llenado de la presa **(5)**.

A continuación se brinda una serie de figuras donde se ilustra más claramente las diferentes zonas en las que se encuentra conformada una represa del tipo C.F.R.D, además de los elementos que en conjunto forman una represa de este caso.

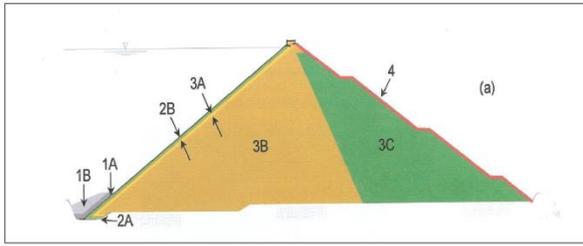


Figura 1. Zonificación de una Represa del Tipo C.F.R.D.⁸

Adicionalmente a esta figura, se ha establecido una nueva alternativa de zonificación para los materiales, que, a diferencia de la anterior, se incluye una zona T, con la salvedad de que la zona 3B se debe extender por debajo de las zonas T y 3C hasta una altura de 8m, hasta el pie de presa. El detalle de esta zonificación se presenta a continuación.

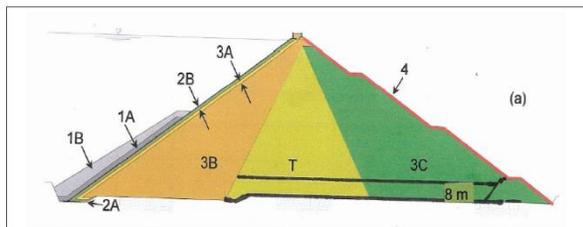


Figura 2. Zonificación alternativa de una Represa del Tipo C.F.R.D.⁹

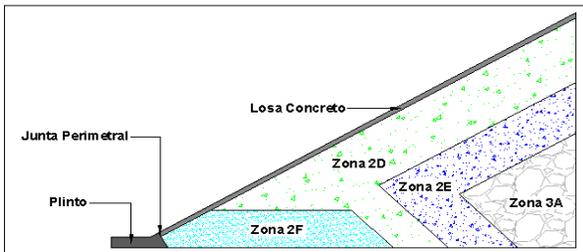


Figura 3. Diferentes zonas en las que se encuentra conformada una represa del tipo C.F.R.D.¹⁰.

⁸ Figura tomada del Informe del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón realizado por el Ingeniero Bayardo Materón.

⁹ Figura tomada del Informe del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón realizado por el Ingeniero Bayardo Materón.

¹⁰ Figura tomada del libro Geotechnical Engineering of Dams.

Esta Figura 3, representa las zonas establecidas por Sherard, que varían un poco en cuanto a la nomenclatura de los nombres de las zonas anteriormente mostradas, pero básicamente representan características muy similares en cuanto a ellas.

Ventajas de una Represa C.F.R.D.¹¹

Una represa del tipo C.F.R.D (Concrete Face Rockfill Dam), se adecua para sitios de presa que posean una fundación de material rocoso, además de que posean un origen adecuado de enrocado. En muchos casos una represa de este tipo podría ser una alternativa de bajos costos si se compara con otro tipo de represas.

Existen factores que hacen de una represa del tipo C.F.R.D la mejor opción económica, entre ellas sobresalen:

- La no disponibilidad de un relleno adecuado de tierra.
- El clima. Las represa C.F.R.D son adecuadas para climas húmedos. En periodos cortos de tiempo, el material puede ser colocado. Esto puede significar un ahorro en cuanto a tiempo se refiere.
- Las lechadas para una represa del tipo C.F.R.D, pueden ser llevadas a cabo independientemente a la construcción del cuerpo rocoso de la presa; esto, da como principal resultado un ahorro en cuanto al tiempo de construcción de la represa.

Según los investigadores Sherard y Cooke (1987), mencionan que el costo de una represa de enrocado, con cara de concreto, es con frecuencia menor en comparación a los costos adicionales de una represa de rellenos de tierra y filtros.

Sherard y Cooke (1987), señalan que las represas de este tipo han sido empleadas con frecuencia para alturas superiores a los 40

¹¹ Información tomada del libro Geotechnical Engineering of Dams.

metros. Ellos sugieren que estas represas pueden resultar en un ahorro económico importante respecto de represas bajas de otros tipos, por las siguientes razones:

- El costo en lo que se refiere al tratamiento de fundación para una determinada longitud, en una represa de baja altura, es relativamente alto respecto del costo total de la obra. Esto podría ser menor si se tuviera una represa C.F.R.D, porque la misma requiere una pequeña anchura (plinto) para poder ser atada respecto del resto del cuerpo de la represa.
- El costo de los filtros, para una determinada longitud de presa, en represas de baja altura de núcleo de arcilla y enrocados simples, es relativamente alto, porque los filtros constituyen es este tipo de proyectos un alto porcentaje del volumen total de material.

Igualmente estos dos investigadores afirman, que las represas del tipo C.F.R.D deben de ser consideradas para la construcción de represas de una mayor altura. Una represa de este tipo presenta una ventaja principal sobre represas de tierra o enrocado simple y es que no existe una posibilidad de que el sistema de tuberías sufra erosión alguna, a diferencia del caso de una represa con núcleo de arcilla.

Requerimientos Generales¹²

Las represas del tipo C.F.R.D, presentan, entre sus características, una serie de requerimientos que deberían acatarse con la firme intención de obtener resultados satisfactorios en cuanto al proceso de construcción y al posterior periodo de servicio de una represa de este tipo.

Estos lineamientos se deben procurar cumplir puesto que en la medida en que los mismos sean acatados se obtendrán resultados satisfactorios a corto plazo. Estos requerimientos

por respetar, en toda presa de este tipo, se detallan seguidamente:

- Se debe procurar presentar un enrocado libre, drenado, para evitar incrementar la presión de poro durante el periodo de construcción y así controlar el adecuado drenado del agua por la zona en donde es conveniente sea llevado a cabo.
- El módulo de deformación de los materiales por utilizar, como enrocado, debe ser lo suficientemente alto, después de realizar la compactación de los materiales. Esto, con la firme intención de limitar las posibles deformaciones que se puedan presentar en la losa de concreto, bajo la acción de una carga de agua.

Tipos de Rocas que se podrían Utilizar como Material de Enrocado¹³

Los materiales por utilizar, como enrocados, como ya se observó, deben cumplir con ciertos requerimientos importantes para su buen desempeño en un determinado proyecto. Es así, cómo, según investigaciones y estudios llevados al respecto, detallan de una mejor manera, los tipos de rocas más óptimos, que se podrían emplear en la ejecución de un determinado proyecto.

Estos materiales, por su origen geológico, presentan un comportamiento geomecánico superior a otros tipos de materiales. Entre los tipos de roca que se consideran adecuados para su uso en un enrocado para la construcción de una represa del tipo C.F.R.D, se encuentran los siguientes **(13)**:

- Granito.
- Basalto.
- Diorita.
- Cuarzita.
- Riolita.
- Limonita.
- Gneiss.

¹² Información tomada del libro Geotechnical Engineering of Dams.

¹³ Información tomada del libro Geotechnical Engineering of Dams.

- Andesita.
- Dolerita.
- Hornfels.
- Greywacke.

La gran mayoría de estos materiales clasifican como de origen ígneo; sin embargo, también se encuentran rocas de origen metamórfico. Esto, los hace materiales de alta resistencia, que resulta en altos valores de resistencia a la compresión de los enrocados y por ende altos valores del módulo de deformabilidad de los materiales.

Módulo de Deformabilidad de los Materiales¹⁴

Es importante considerar, que el módulo de deformabilidad de los materiales no solo depende del tipo de roca, sino también de las fuerzas, formas, graduación de los tamaños de roca en el enrocado y espesor de las capas **(14)**.

Existen, además, otros factores que se deben considerar para alcanzar módulos de deformabilidad altos, más específicamente durante el proceso de construcción de la represa, tales como: tipo de rodillo de compactación, número de pasadas del mismo, si el agua es agregada durante el proceso de compactación, los esfuerzos de confinamiento de los enrocados, entre los principales **(14)**.

Investigaciones llevadas a cabo por diversos autores mencionan, que el uso de rocas que presenten altas fuerzas no garantiza que se obtenga un alto módulo de deformación. Por otro lado, se afirma que se pueden presentar bajos módulos de deformación debido básicamente a dos razones primordiales. Estas, son una graduación de los materiales pobres y a una carencia en la misma granulometría de tamaño de partículas de arena **(14)**.

Se han dado casos en que se han utilizado materiales rocosos con un bajo esfuerzo, que presentan un alto módulo de deformación; sin embargo, esto conduce a otra situación importante y es que estos materiales podrían presentar una baja permeabilidad de los materiales por utilizar como enrocado **(14)**.

El módulo de deformación de los materiales depende indudablemente del espesor de las capas; se recomienda que los enrocados sean compactados y colocados en espesores pequeños, para alcanzar altos valores del módulo de deformabilidad **(14)**.

La relación de vacíos de los materiales, es otro factor importante que se debe estudiar y analizar. La teoría recomienda que los materiales por utilizar como enrocado en la construcción de una represa del tipo C.F.R.D, no deben presentar relaciones de vacíos superiores a 0,25 **(14)**.

Cabe mencionarse, que los valores del módulo de deformación de los materiales y de la relación de vacíos son parámetros obtenidos y determinados antes de comenzar con la construcción de la represa propiamente. Estos parámetros se deben controlar una vez que se inicie el proceso de construcción.

Se debe definir claramente en que etapas del proyecto se deben dar seguimiento a los mismos, con motivo de controlar que estos sean los más ajustables posible a lo que dictan las teorías que se aplicaron inicialmente.

Específicamente, el módulo de deformabilidad de los materiales, se determina tanto durante la construcción de la represa como al momento del primer llenado. Para ello se aplican entre otras metodologías la establecida por Fitzpatrick (1985), la cual no es aplicable en el presente trabajo dado que no se ha iniciado con la construcción de la represa.

El control del módulo de deformación de los materiales es de vital importancia en toda etapa durante este proyecto. Es por ello que se determina un valor inicial al cual aspirar por parte de los materiales en los diferentes sitios de préstamo, razón por la cual se determina este parámetro de diseño, para que a la hora de comenzar con la construcción, se conozca el dato inicial con base en el cual medirse y ajustarse.

Sin embargo, se establece que el control del mismo debe continuar durante la construcción del proyecto, puesto que de él depende entre otras cosas que la losa de concreto aguas arriba de la represa, se mantenga lo más uniformemente estable, no experimente deformaciones excesivas, que conduzcan al fisuramiento de la misma, principalmente en sus juntas de construcción, lo que ponga en riesgo la estanqueidad del embalse.

Esta es una de las razones primordiales, por las cuales el módulo de deformación de los

¹⁴ Información tomada del libro Geotechnical Engineering of Dams.

materiales, debe ser lo más alto posible y por lo cual, el control que se debe seguir sobre el mismo debe ser constante.

Metodología

Se presenta a continuación la metodología de cada una de las pruebas realizadas a los sitios de préstamo Carazo y Presa, para poder caracterizar los materiales presentes en el lugar.

Clasificación Mineralógica

Para llevar a cabo esta clasificación, se escogen los materiales de los cuales se desea conocer su origen geológico. Esto se realiza por medio del ensayo de Sección Delgada, tomando una franja del material y sometiéndolo inicialmente a un pulido del mismo, para posteriormente ser colocado en un microscopio petromineralográfico de luz polarizada y determinar su composición mineralógica, para, por último, estimar con base en los porcentajes de minerales, presentes en las mismas, el origen y clasificación del tipo de roca presente en el sitio de préstamo.

Este ensayo se lleva a cabo en el Laboratorio Petrográfico del Instituto Costarricense de Electricidad. Se realizará con la ayuda del Geólogo del proyecto conocedor de los materiales más representativos así como también con la ayuda del Ingeniero a cargo del proyecto.

Para efectos de determinar esta clasificación se escogieron cinco muestras para cada uno de los sitios de préstamo de las más representativas, las cuales se presentan a continuación.



Figura 4. Muestra de Roca para realizar la Sección Delgada del sitio Carazo.



Figura 5. Muestra de Roca para realizar la Sección Delgada del sitio Carazo.



Figura 6. Muestra de Roca para realizar la Sección Delgada del sitio Carazo.



Figura 7. Muestra de Roca para realizar la Sección Delgada del sitio Presa.



Figura 8. Muestra de Roca para realizar la Sección Delgada del sitio Presa.

Granulometría

La granulometría de los materiales se determinó con base en el procedimiento establecido en la Norma ASTM C-33, en cada una de las trincheras de donde se extrajo el material para ser analizados en el laboratorio; esto, dentro de los sitios de préstamo Carazo y Presa. Se establecerá una granulometría promedio de todas las trincheras, a partir de la cual se definirá la graduación de materiales por seguir.

La Granulometría de los materiales se cortó en un tamaño máximo de 3", por dos razones básicamente. La primera de ellas se basa en que para el uso del Odómetro (ver imagen más adelante y plano en sección de Apéndices) se establece una relación que se debe respetar entre el diámetro del odómetro versus diámetro medio de las partículas de cinco.

La segunda de ellas es que para el desarrollo de las pruebas de laboratorio como lo es la densidad máxima de laboratorio de los materiales y pesos volumétricos, necesarias para caracterizar los materiales, solo se pueden utilizar hasta un tamaño máximo de 3", ya que el equipo presente en el laboratorio se encuentra normado para un tamaño máximo de 3".

Se deberá determinar una granulometría inicial de los materiales retenidos en su respectiva malla, con base en la cual se determinarán las cantidades específicas de los pesos en los diferentes tamaños, de los materiales que se deben introducir en el odómetro. Además, se debe realizar una granulometría de los materiales, una vez que hayan sido ensayados en el odómetro. Esto, por cuanto puede haber una tendencia de los materiales granulares a fragmentarse. Esto, se verá reflejado, de ser así, en las graduaciones de menor tamaño, al quedar retenidas en las mallas respectivas, con la finalidad de establecer esa diferencia entre granulometrías inicial y final.

Abrasión o Desgaste de los Materiales

La prueba de abrasión que se implementó, corresponde según a la norma ASTM C-131; esta, consiste en determinar el porcentaje de desgaste de los materiales al ser

expuestos a una degradación determinada, en un lapso determinado, por un ciclo de vueltas establecido según el tipo de abrasión que se practique, que corresponde a 500 vueltas, al realizarse la abrasión Tipo A, la cual se detalla seguidamente.

El ensayo de abrasión se lleva a cabo en la máquina Los Ángeles que se encuentra instalada en el Laboratorio de Materiales del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La prueba consiste en determinar la Abrasión Tipo A, la cual se obtiene mediante el seguimiento del siguiente procedimiento:

- Se utiliza una muestra de 5000 gramos, compuesta por materiales retenidos en las mallas de 1", 3/4", 1/2" y 3/8".
- De cada una se toman 1250 gramos para completar un total de 5000 gramos de material.
- Una vez determinada la muestra, se procede a introducir el material dentro de la máquina Los Ángeles.
- Se introducen junto al material 12 balines de acero, los cuales girarán junto con el material dentro de la máquina.
- Se inicia el ensayo a una velocidad constante. La prueba se detiene una vez que se hayan alcanzado las 500 vueltas. La máquina se detiene automáticamente una vez que se ha programado.
- El material es extraído de la máquina Los Ángeles y se procede a pasar por la malla N° 12, para separar los fragmentos finos de roca del material ensayado que se desprendieron al momento de ejecutar la prueba.
- El material es nuevamente pesado para conocer el peso final del material.
- Conociendo los pesos inicial y final del material se determina el porcentaje de desgaste por degradación de los materiales.

A continuación se ilustra la máquina de Los Ángeles, por medio de la cual se lleva a

cabo la abrasión Tipo A, tal y como se detalló anteriormente. Es importante recalcar, que los resultados de la prueba de abrasión se relacionan con otros ensayos, como lo son la Ruptura de Granos, Absorción de Agua de los materiales y el coeficiente de uniformidad, para establecer la clasificación de los enrocados en cuanto a su dureza y resistencia.



Figura 9. Máquina de los Ángeles instalada en el Laboratorio de Materiales del ICE.

Intemperismo Acelerado

La prueba de intemperismo acelerado, que se realizó, corresponde a la normada según la ASTM C-88. Consiste en determinar el grado de degradación de los materiales rocosos y finos en cinco ciclos de inmersión y secado en una solución salina de sulfato de sodio (NaSO_4).

Los materiales seleccionados corresponden tanto a finos como a gruesos, de ahí que se especifican cantidades concretas de cada uno para realizar la prueba. De los materiales gruesos se seleccionan los materiales retenidos en las mallas de 1", 3/4", 1/2", 3/8" hasta la N°4. Las cantidades específicas de materiales retenidos en cada una de las mallas deben ser, para la malla de 1" un total de 1000 gramos, para la malla de 3/4" una cantidad de 500 gramos, para la malla de 1/2" una cantidad de material de 670 gramos, para la malla de 3/8" un total de 330 gramos y por último para la malla N°4 un total de 300 gramos.

Las cantidades de material retenidos en las mallas de 1" y de 3/4" son colocadas por igual en una canasta, las cantidades retenidas en las

mallas de 1/2" y de 3/8" igualmente son colocadas en una misma canasta y por último los 300 gramos retenidos en la malla N°4 son colocados en una canasta solitariamente; esto, para efectos de los ciclos de inmersión en la solución salina de sulfato de sodio y su posterior secado al horno.

De los materiales finos, se toman en consideración nuevamente los materiales retenidos en la malla N°4, además de las mallas N°8, N°16, N°30 y N°50. Esto, se considera, para efectos de realizar esta prueba de sanidad de los materiales retenidos en cada una de estas mallas son 100 gramos, para completar una muestra en total de 500 gramos. Estos materiales son inmersos en la solución salina de sulfato de sodio para posteriormente ser secados al horno.

Esto se repite por cinco ciclos y comprende, por ciclo, una inmersión en la solución salina durante un período de tiempo de alrededor de 8 horas y un tiempo similar que debe permanecer en el horno a una temperatura constante de 110°C.

De esta manera se exponen los materiales a condiciones de meteorización o degradación severa simulando de manera un tanto exagerada, a la que van a presentar estos mismos materiales, pero con el pasar de los años.

Es una prueba dura para los materiales que condiciona los mismos y los clasifica en cuanto a su dureza, al tener un muy buen parámetro de su resistencia a condiciones extremas.

Peso Volumétrico

El peso volumétrico se determina según el procedimiento que se presenta en la Norma ASTM C-29, para el material en conjunto, es decir, el material homogenizado en gruesos y finos. Se realiza de dos maneras, suelto y envarillado o compactado.

Permite dar una idea de la densidad del material expuesto a dos condiciones. Se emplea para determinar la cantidad de material por colocar, en una represa, conociendo el volumen de la misma. Se utiliza la condición compactada pues la relación de vacíos es menor que la condición suelta.

Se emplea para la prueba un tambor de acero con un volumen de 0,0303m³. El material para el ensayo suelto, se llena respetando una

caída a una misma altura y bajo una velocidad constante durante todo el llenado. Al llenar el tambor se enraza el material sobrante con el cuidado de no ejercer una presión excesiva al material contenido en el tambor, que pueda provocar una compactación no deseada del mismo. Este procedimiento se repite para tres ciclos, a manera de determinar tres pesos y sacar un promedio de los tres, para determinar el peso volumétrico del material suelto.

En el caso del peso volumétrico envarillado el procedimiento varía un tanto en comparación al procedimiento anterior. Primeramente se llena el tambor por tercios del mismo y se emplea una varilla de punta redondeada para evitar fragmentar el material. Se compacta, a razón de 25 golpes, con la varilla uniformemente dados en el espesor seleccionado; este proceso se repite para los dos tercios siguientes. Al finalizar el envarillado, se enraza el material con el cuidado de no ejercer mayor presión de la necesaria para un buen enrazado. Al igual que el proceso del peso volumétrico suelto, se determinan tres pesos para obtener un peso promedio, con base en el peso volumétrico compactado.



Figura 10. Peso Volumétrico Suelto del Material.



Figura 11. Peso Volumétrico Compactado y Enrasado.

Densidad Máxima de los Materiales

La densidad máxima de los materiales es un ensayo que se rige, según el procedimiento establecido en la norma ASTM D-4253. Esta, permite obtener el punto exacto de compactación que requiere el material, al ser colocado en alguna de las zonas que conforman el cuerpo de la presa. Se emplea un tambor con un volumen interno de $14,136 \text{ cm}^3$, el cual es llenado con el material que se utilizará dentro del proceso constructivo de la represa.

Se escoge inicialmente una muestra de 250 kg, se realiza un cuarteo del material, escogiéndose uno de los cuartos efectuados para determinar la densidad máxima; generalmente se requiere una cantidad de material que se encuentra en el rango de los 30 kg a los 35 kg.

Una vez seleccionada la muestra, se procede a colocar la cantidad de agua necesaria para dejar el material en el estado saturado con superficie seca. Este estado se logra mediante la experiencia que poseen los técnicos de laboratorio en la ejecución de este ensayo, puesto que se debe visualizar, dentro del material, ciertas características que hacen presumir que ha alcanzado el mismo.

Una vez que se tiene la certeza de que se encuentra en el estado de saturación con superficie seca, se debe dejar cubierto o sellado completamente en una bandeja por un periodo de 24 horas, para que el proceso de saturación del material continúe y se alcance totalmente.

Al cabo de transcurridas las 24 horas se observa el material y si presenta exceso de

secado, se le adiciona el agua necesaria para garantizar el saturado con superficie seca; de lo contrario se deja tal y como se saturó inicialmente.

El material es colocado dentro del tambor de acero, en un periodo máximo de seis minutos; éste, es el tiempo en el cual el tambor, junto con el material, es vibrado en la mesa vibratoria. Transcurridos los seis minutos se enrasa el material sobrante y se limpia la superficie de la mesa vibratoria y del tambor en su exterior. Se coloca un mazo con dimensiones un tanto menores al diámetro interno del tambor, de manera que el mismo una vez colocado en la parte superior del material compacte el mismo con su propio peso y el inmediato vibrado de la mesa vibratoria, por un tiempo máximo de ocho minutos.



Figura 12. Colocación del material en el molde listo para ser compactado.

Transcurridos estos ocho minutos, se limpia el molde que pudiere tener derramamiento del material, debido al peso del mazo, para inmediatamente colocar deformímetros en dos de los extremos del mismo, con la finalidad de medir el asentamiento o deformación que presentan los materiales, debido al peso inducido. Se realizan un par de lecturas por extremo para posteriormente sacar un promedio de la deformación que experimenta el material.

Una vez determinada la deformación, se extrae el material del tambor de acero y se coloca en una bandeja, para ser pesada junto con el material húmedo. Posteriormente es introducida al horno donde permanecerá a una temperatura constante de 110°C , por un periodo no menor de 24 horas.

Trascurrido este período, se determina el peso seco del material. Una vez que se disponen de los pesos, tanto húmedo como seco, se determina, el contenido de agua óptimo de la muestra. Luego, se resta el contenido de humedad que presentaba el material en su sitio de recolección, al contenido de agua que se obtiene de agregar la suficiente agua para crear el estado de saturamiento, con superficie seca. Esto permite encontrar la cantidad de agua necesaria para determinar la densidad que se anda buscando.

Lo segundo es que, conociendo tanto los pesos seco como húmedo, además del volumen del tambor, se determina la densidad máxima húmeda y seca. Estas, se utilizan respectivamente, para determinar el máximo esfuerzo que deben soportar los materiales, una vez que se conozca la altura de la presa, así como también las cantidades de material, necesarias para realizar la prueba de compresión unidimensional, esto en el odómetro.



Figura 13. Densificado del material por medio de la mesa de vibrado y el peso del mazo.



Figura 14. Colocación de los Deformímetros para medir el asentamiento del material.

Gravedad Específica y Absorción

La gravedad específica y la absorción es un ensayo que se realiza con base en el procedimiento establecido, según las normas ASTM C-127 y ASTM C-128, para los casos de gruesos y finos, respectivamente. En el caso de los enrocados al contar, tanto con gruesos como con finos, es determinante ponderar los resultados obtenidos para cada caso.

Iniciando con los finos, se escoge una muestra, pasando la malla N°12 y dejando en saturación durante un periodo de al menos 24 horas. Pasado este tiempo, se toma una muestra de alrededor de 1000 gramos, que se deja al horno por un periodo igualmente de 24 horas a una temperatura constante de 110°C. Una vez que se tiene la muestra, completamente seca, se encuentra la condición saturada, superficie seca. Esto, se logra adicionando agua al material, a la vez que se va homogenizando el mismo. Una vez que se esté seguro de que todo el material se encuentra humedecido, se utiliza un cono truncado para determinar si el material se encuentra en la condición saturada, superficie seca; esto, mediante una simple prueba.

El cono se llena con el material y apoyando el mismo sobre una superficie limpia, plana y no adsorbente, adicionando un total de 25 golpes por medio de un mazo distribuidos por toda la muestra, con la finalidad de conferirle al material una cierta compactación. El material se compacta con el peso propio del mazo; se establece que el mismo debe estar 5 mm por encima de la superficie del agregado fino.

Posteriormente al llenado del cono, la superficie se enrasa y se extrae el cono cuidadosamente y de la manera más recta posible, contemplando que no se apoye en las paredes del material conformado. Así que se extrajo el mismo, se le aplica un golpe a la superficie en donde se encuentra apoyado el material. Si el material se desprende por sectores, esto significa que se encuentra en el estado superficie saturada seca, si caso contrario el material no sufre cambio alguno al momento de aplicarle el golpe, esto es indicio de que el material aún posee suficiente agua de más. Por ello se debe secar nuevamente y por último, si el material, al momento de aplicarle el golpe, sufre un desprendimiento considerable del material, esto indica que la muestra se secó de más y se le debe agregar agua nuevamente para alcanzar dicho estado. Cuando se alcanza la condición superficie saturada, el material es pesado para determinar una muestra de 500 gramos. Posteriormente, el material se introduce en el picnómetro, donde se le adiciona agua hasta el nivel del material, dentro del interior del mismo, donde se le aplican ciertos golpes externamente y se agita el material; esto, con la finalidad de eliminar los vacíos ocasionados por el aire en la muestra. Una vez terminado este procedimiento se procede a llenar con agua destilada hasta alcanzar un máximo del 90% de la capacidad del picnómetro o alcanzar la capacidad máxima calibrada en él mismo.

Cuando se ha llevado a cabo la introducción del material dentro del picnómetro y se ha alcanzado la eliminación de los vacíos ocasionados por el aire del material, además de que se ha elevado el nivel del agua hasta alcanzar la marca establecida, se pesa en una balanza analítica el material, más el picnómetro y el agua que se añade hasta la marca de graduación del mismo. Cuando ya se haya pesado la muestra en conjunto, se procede a retirar el material del picnómetro y colocar el material dentro de una bandeja donde se deposita toda la muestra que se encontraba en el picnómetro. Se puede utilizar agua de más para realizar el lavado de los finos que se puedan quedar dentro del picnómetro. Todo el material, incluyendo el agua de más que se utiliza para el lavado de los finos dentro del picnómetro, deben ser secados al horno a una temperatura constante de 110°C por un período de 24 horas.

Así que el material se encuentre totalmente seco, se pesa la muestra ya seca y se utiliza para el cálculo pertinente de la gravedad específica bruta, la gravedad específica saturada superficie seca y la absorción; se emplean las ecuaciones para cada caso en específico.

Los cálculos que se arrojan de este ensayo así como las ecuaciones que se necesitan se presentarán más adelante, en la sección de Resultados de este informe.

Analizando el caso de los gruesos, se inicia tomando una muestra representativa de todos los materiales, siendo el referente el máximo tamaño presente en la muestra. Dependiendo de éste, se introduce a una tabla, que es normada según la ASTM, y permite determinar la cantidad de material que se requiere para efectos de realizar la prueba.

En este caso, el tamaño máximo de agregado es pasando 3 pulgadas; de ahí que se utiliza un tamaño de material de 2" como máximo, para determinar el peso mínimo de muestra, que en este caso es de 8 kg como mínimo, para realizar el ensayo.

El material seleccionado de muestra, se deja saturando en un recipiente con la suficiente capacidad para albergar el tamaño de muestra por un periodo de 24 horas.

Para el caso de la gravedad específica y adsorción de los gruesos, se debe eliminar el material que pasa la malla N°4; de ahí que la muestra se debe tamizar para eliminar todo este material. Este tamizado se realiza en húmedo, puesto que se aprovecha para seleccionar el material y lavarlo de toda muestra de finos que pudiese traer implícito. Del resultado del tamizado se selecciona un tamaño de muestra ligeramente mayor al establecido, según la norma (que en este caso es de 8 kg como mínimo); se lava y se coloca en el horno a secar por un periodo de 24 horas a una temperatura constante de 110°C, para determinar el peso de la muestra seca. Posteriormente, se obtiene el peso de la muestra, pero sumergida en agua. Para ello, se utiliza una modificación realizada en el Laboratorio de Materiales del Instituto Costarricense de Electricidad, para su respectiva determinación; esta modificación se ilustrará más adelante por medio de figuras que detallan el debido proceso, para la determinación de este peso.

Por último, el peso de la muestra saturada superficie seca se obtiene de saturar los materiales, posterior a la determinación del peso

sumergido, secando los mismos por medio de franelas o algún material adsorbente, dejando los materiales de la muestra solamente humedecidos u opacos.

Así que se obtienen los tres pesos anteriormente descritos, se procede a la aplicación de las fórmulas correspondientes para determinar la gravedad específica bruta, la gravedad específica saturada superficie seca y la absorción de los agregados gruesos. Los resultados se presentarán oportunamente en la sección pertinente. Cabe destacar que, como los enrocados están compuestos tanto por partículas finas como gruesas, los resultados obtenidos se deben ponderar para obtener un resultado acorde al material por utilizar como enrocado en la construcción de la presa.

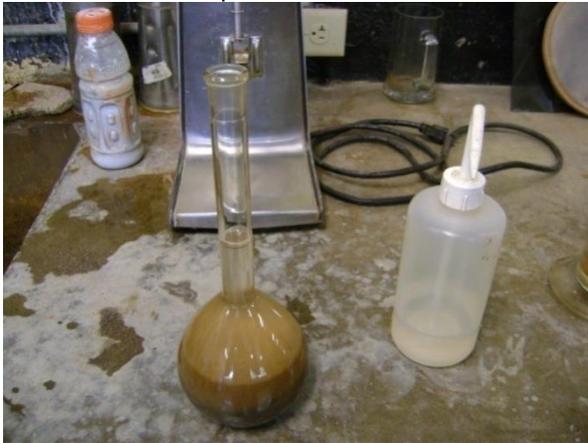


Figura 15. Picnómetro con la muestra saturada superficie seca para la determinación de la Gravedad Específica y Absorción en Finos.



Figura 16. Determinación del Peso Sumergido para determinar la Gravedad Específica y Absorción de los gruesos.

Límites de Atterberg

La obtención de los límites de estado de los materiales, se determina según se establece en la norma ASTM D-2487. Se verifica si el material presente posee alguno de los límites de Atterberg, como lo son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción. Sin embargo, dadas las características del material presentado en las curvas de granulometría de cada una de las trincheras analizadas en cada uno de los dos sitios en estudio y la poca cantidad de material que presenta pasando la malla N°200, se espera que el material presente es de muy baja a casi nula la plasticidad y con ello los límites de Atterberg se deprecien. Sin embargo se realizará las pruebas respectivas para determinar cada uno de estos límites o desestimar la obtención de los mismos.

Ruptura de Granos

La ruptura de granos es un ensayo de placa propuesto por Raúl Marsal, que se utiliza para medir la resistencia de la granulometría gruesa del enrocado. Consiste en realizar un mínimo de 10 determinaciones con fracciones de material grueso que van desde los materiales pasando las 3" hasta el material retenido en 1".

Esta prueba consiste en aplicar a tres granos de aproximadamente igual tamaño y semejantes características, fuerzas que son transmitidas por medio de una placa de acero. Se coloca por encima y debajo de la placa un papel donde quedarán impregnados el número de contactos que tendrán las partículas. Se determina el número de contactos y la carga máxima aplicada al momento en que una de las tres partículas se fracture. Se entiende por fractura de los materiales, cuando se quiebren en cualquier sección, exceptuando desprendimientos de pequeñas partículas producidas en las esquinas o aristas de las rocas.

De los resultados desprendidos de la prueba se establece la relación entre el número de contactos y la carga máxima aplicada al momento de la ruptura del primer grano; este valor se denomina Ruptura de Granos, representado por las siglas P_a . En este caso se realizarán las pruebas a los granos en dos estados distintos:

- Secados al Aire.

- Sumergidos en Agua.

Ahora bien, si se ordenan los materiales con base en las pérdidas por abrasión y se comparan con los resultados obtenidos de las pruebas de rotura de granos, es posible establecer una correlación entre ambos parámetros que permite clasificar los materiales, según la dureza de los granos; esto, da una mejor idea de la resistencia de los enrocados.

Compresión Unidimensional

El ensayo de compresión unidimensional, permite establecer una relación entre el esfuerzo máximo que experimentará el material y el asentamiento que sufrirá el mismo debido a este esfuerzo. Es un ensayo que involucra el Odómetro (ver figura), que presenta las siguientes características físicas:

1. Está formado por un cilindro de acero con dimensiones internas de 49,10 cm de diámetro por 54,10 cm de alto, con un espesor de 6,0 mm, con dos placas en sus extremos de un espesor de 5 cm cada uno. De una de estas placas se sujeta el cilindro de acero, la otra placa de acero se encuentra sujeta por medio de 8 tensores de un diámetro de 2,54cm y de una longitud de 165 cm. Además, cuenta con 2 tensores anclados de la placa inferior a las argollas de anclaje del odómetro, con un diámetro de 2,54cm y una longitud de 70 cm; estas, son las encargadas de brindar soporte al odómetro para que permanezca inamovible cuando reciba los incrementos de carga y la carga máxima.
2. Posee un pistón hidráulico (gata hidráulica) con una capacidad de transmitir 200 toneladas de fuerza, que es la encargada de transmitir el esfuerzo de compresión en el sentido axial al material, que se encuentra contenido en el tambor de acero del odómetro. Este pistón hidráulico se encuentra colocado justo por encima de la tapa cabezal, lo más concéntricamente posible para garantizar la no creación de asentamientos diferenciales por causa de una mala colocación del pistón.
3. En la parte superior cuenta con un anillo de rigidización de un espesor de 2 cm, que se fija a la placa superior y es anclada por medio de los tensores junto con la placa superior en conjunto.
4. Posee una placa cabezal que se adecua a las dimensiones internas del tambor del odómetro y es la encargada de distribuir el esfuerzo de compresión uniformemente sobre los materiales ensayados. Esta placa posee un espesor de 5 cm. La carga inducida a la muestra es transmitida por medio de una bomba manual, que actúa conjuntamente con el pistón hidráulico de 200 toneladas de capacidad.
5. Para medir la presión a la cual el material está siendo comprimido se le adapta al equipo un manómetro diferencial, que dictará los valores a los cuales se efectuará la prueba. Estos manómetros se deben calibrar inicialmente antes de comenzar la prueba.
6. Para determinar la deformación y los asentamientos que sufrirá el material en la placa que distribuye los esfuerzos proporcionados por el pistón hidráulico, se colocan tres deformímetros, distribuidos uniformemente sobre la Placa Cabezal.
7. El equipo con que cuenta el Laboratorio de Materiales, del Instituto Costarricense de Electricidad, fue construido y diseñado para soportar una capacidad de 75 kg/cm². El tamaño máximo de partículas presentes en la muestra se limitó a 7,62 cm, a causa del diámetro de la probeta. Se han hecho investigaciones al respecto que han arrojado resultados tales como que la dimensión de la probeta no influye en el comportamiento de la prueba, siempre y cuando esta sea lo suficientemente grande comparada con la fracción gruesa del material. Para una relación diámetro de la probeta, respecto del diámetro de la partícula mayor que 5, el efecto que se presenta es muy pequeño.

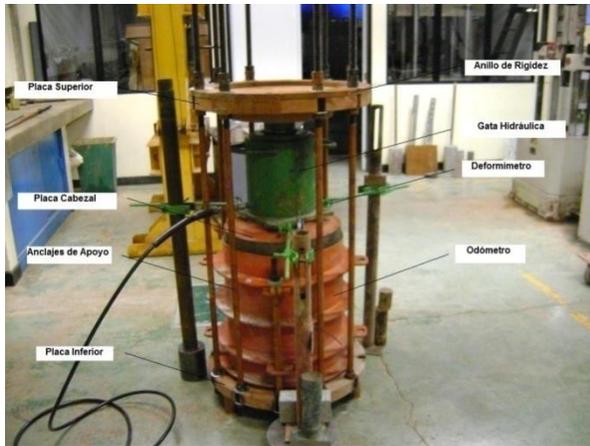


Figura 17. Equipo necesario para la prueba de Compresión Unidimensional.

Este ensayo requiere establecer una granulometría inicial de los materiales con cantidades específicas de cada tamaño de material pasando su respectiva malla. Al finalizar la prueba se vuelve a realizar nuevamente una granulometría, pero esta vez final, con el propósito de determinar si al momento de la ejecución de la prueba se dio una fragmentación de las partículas gruesas que dieran como resultado un incremento en la cantidad de partículas de menor tamaño.

Carga Puntual

Este ensayo o prueba de resistencia se realiza con base en la norma ASTM D-5731. Debe ser entendida como una prueba índice para clasificación por resistencia de la roca intacta; se utiliza para correlacionar los resultados obtenidos con valores de resistencia a la compresión simple que se utilicen para hacer uso de la teoría presentada por Nick Barton y Björn Kjaernsll, para determinar la resistencia al corte de los enrocados y obtener un ángulo de fricción interna que sirvan como parámetro inicial antes de comenzar con la construcción de la represa.

La prueba mide el índice de resistencia a carga puntual de especímenes de roca. Es una prueba muy utilizada en el sitio propio de la obra. Las muestras por probar deben contar con la suficiente cantidad de especímenes de roca de características similares, a las cuales se les determinará el índice de carga puntual. Los materiales rocosos que serán probados deben

permanecer en condiciones de humedad no variables. Este ensayo se utilizará para obtener un valor de resistencia a la compresión, por medio de correlaciones, al ejecutar una serie de pruebas a materiales rocosos de características similares, que van desde las tres pulgadas hasta un mínimo de una pulgada. Se requiere analizar un mínimo de 10 pruebas por muestra de rocas de tamaño similar, que permitan obtener un valor de resistencia a la tracción representativo. En promedio, la resistencia a la compresión simple es de 20 a 25 veces la resistencia a la carga puntual. Como en toda prueba de resistencia en rocas, la resistencia a la carga puntual, varía respecto del contenido de humedad del espécimen. Por último, la prueba de resistencia a la carga puntual, es una forma de prueba de tracción indirecta.



Figura 18. Roca fragmentada por la implementación de presión en sus extremos, correspondiente a materiales del sitio Carazo.



Figura 19. Roca fragmentada por la implementación de presión en sus extremos correspondiente a materiales del sitio Presa.

Resultados

En esta sección del informe, se presentan los resultados que se han obtenido para la valoración de los materiales, tanto para el sitio de préstamo Carazo como el sitio Presa. Esta sección incluye los resultados de las siguientes pruebas:

- Clasificación Mineralógica.
- Granulometrías de los Materiales.
- Desgaste o Abrasión.
- Límites de Attemberg.
- Intemperismo Acelerado.
- Pesos Volumétricos.
- Densidad Máxima de los Materiales.
- Gravedad Específica.
- Absorción.
- Ruptura de Granos.
- Compresión Unidimensional.
- Carga Puntual.

Granulometrías

Se inicia con los ensayos de granulometría que se realizaron en el sitio Carazo y posteriormente con los materiales provenientes del sitio Presa.

La granulometría se cortó en la malla de tres pulgadas, con la finalidad de respetar la relación que debe existir entre el diámetro del odómetro y el diámetro nominal de los materiales, que no debe sobrepasar de cinco. Además de la granulometría de materiales pasando la malla de tres pulgadas, se obtiene la granulometría de materiales retenidos, la cual permite determinar las cantidades específicas de cada tamaño nominal que se debe utilizar para los ensayos de odómetro.

La densidad máxima de los materiales, determinada en el laboratorio, permite determinar las cantidades de material necesarias, esto conociendo las características del odómetro como lo son la altura del cilindro, diámetro interno, área de la tapa cabezal, para determinar el volumen interno del odómetro. Además, conociendo la densidad máxima, se obtiene el esfuerzo máximo en la base de la presa y partiendo de una altura promedio de diseño de 120 metros.

A continuación se presenta la curva granulométrica de los materiales pasando cada malla, en cada una de las trincheras que se analizaron en el Sitio de Préstamo Carazo, a partir de los cuales se obtuvo la curva granulométrica promedio del material.

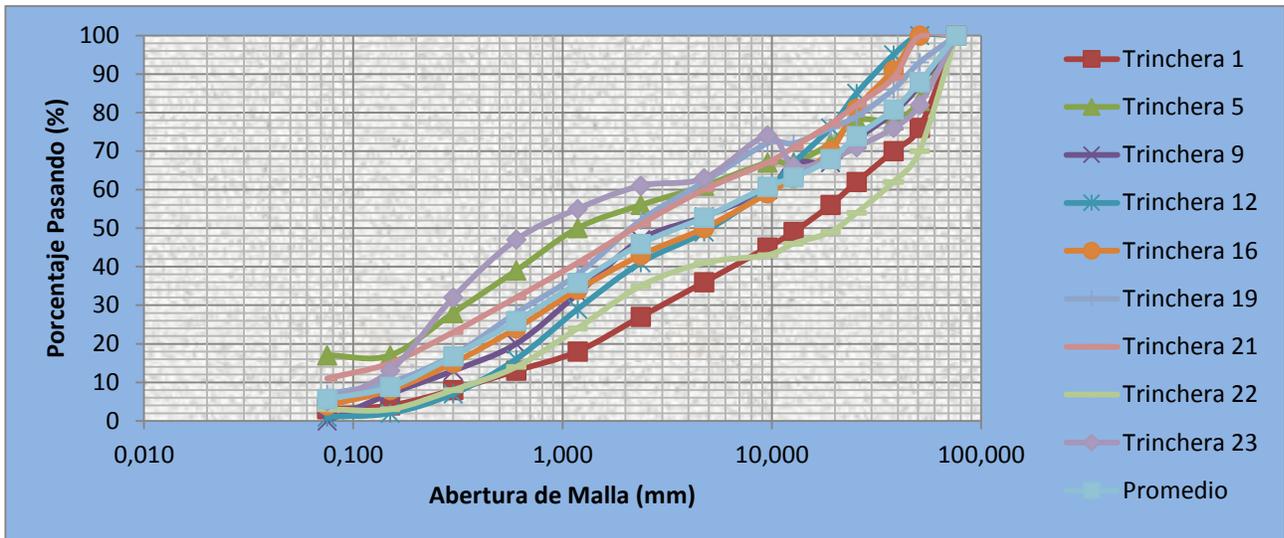


Figura 20. Curvas granulométricas de cada una de las trincheras realizadas en el sitio de préstamo Carazo.

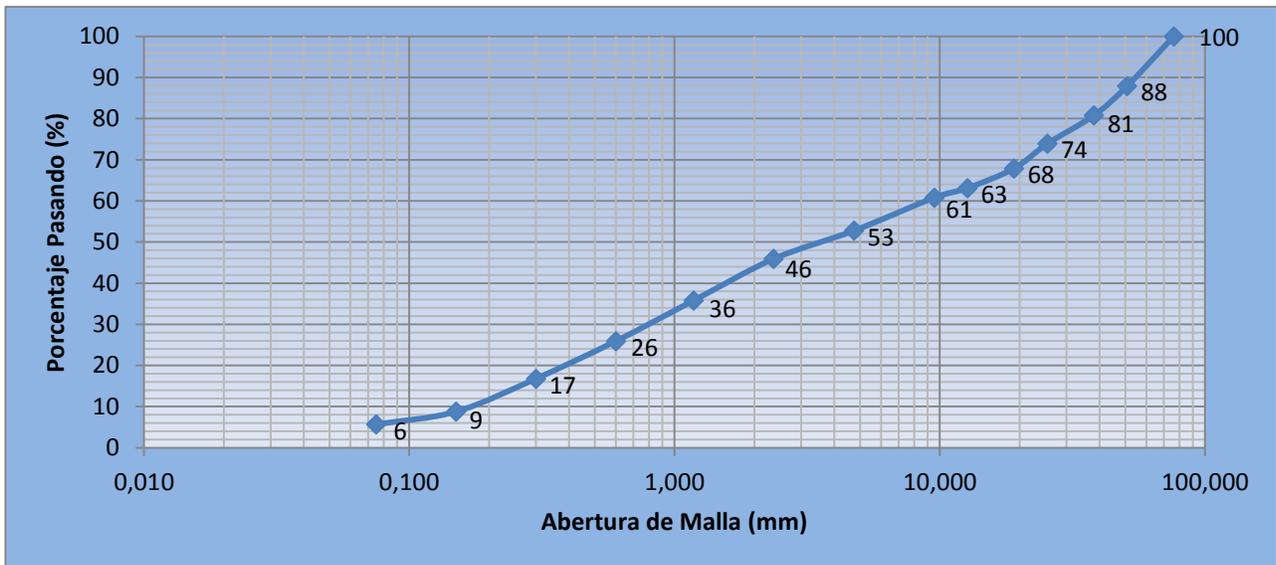


Figura 21. Curva granulométrica promedio de los materiales obtenidos de las diferentes trincheras del sitio de préstamo Carazo.

Con base en la curva granulométrica de los materiales de las trincheras, se obtuvo la curva promedio que se presenta en la Figura 21. Esta, es la que se utiliza para determinar las cantidades específicas de material retenido en cada malla, tal y como se detalla en la Figura 22. Con base en ella se conforman los pesos específicos por tamaño nominal, que serán

colocados en el odómetro, para realizar las pruebas de compresión unidimensional; la densidad de los materiales varía en cada una de ellas.

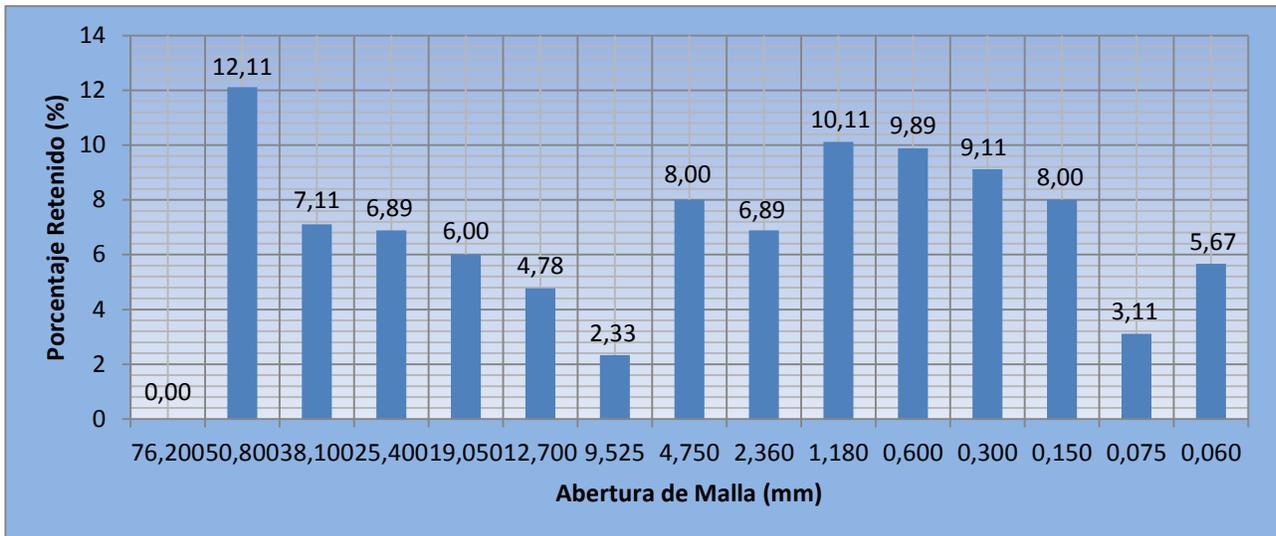


Figura 22. Curva de materiales retenidos en cada una de las mallas utilizadas con los materiales del sitio de préstamo Carazo.

A continuación se presentan las curvas granulométricas de los materiales pasando cada malla, en cada una de las trincheras que se

analizaron en el sitio de préstamo Presa; a partir de ellos se obtuvo la curva granulométrica promedio, del material.

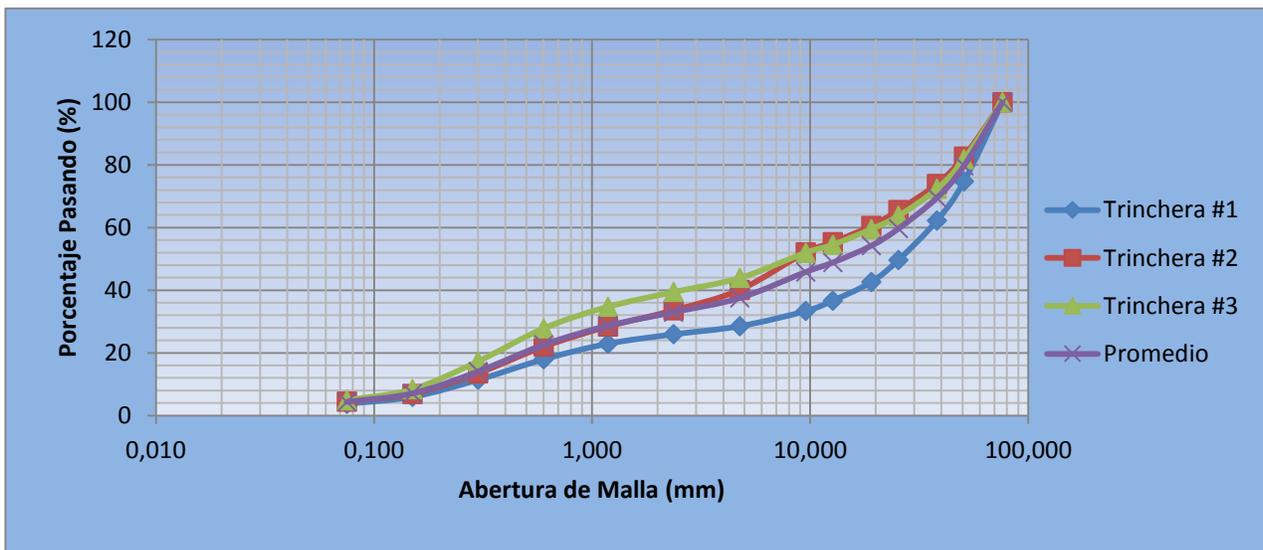


Figura 23. Curvas granulométricas de cada una de las trincheras realizadas en el sitio de préstamo Presa.

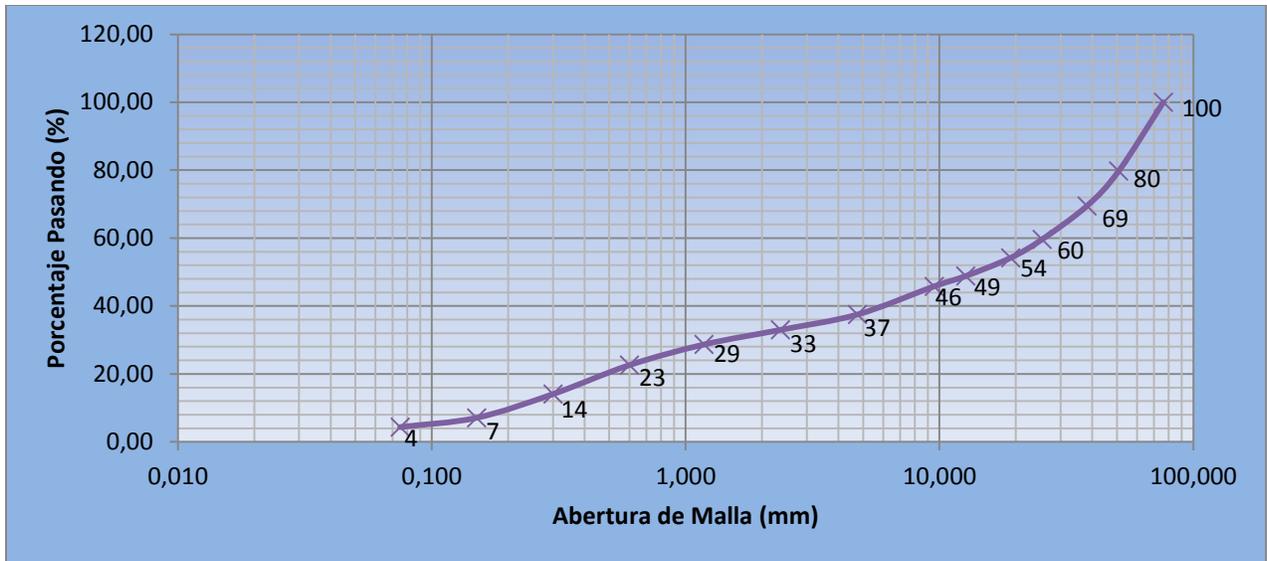


Figura 24. Curva granulométrica promedio de los materiales obtenidos de las diferentes trincheras del sitio de préstamo Presa.

Cabe mencionar que a diferencia del sitio de préstamo Carazo, para el sitio de préstamo Presa, solamente se analizaron los materiales en tres puntos distintos dentro de la zona de ubicación. Esto, básicamente por motivos de tiempo para el desarrollo del presente trabajo. Con base en la curva granulométrica de los materiales pasando en cada una de las trincheras, se obtuvo la curva promedio que se presenta en la Figura 24.

La Figura 25, hace referencia a los porcentajes de materiales retenidos en cada una de las mallas, que se utilizarán para determinar las cantidades específicas para cada ensayo de odómetro.

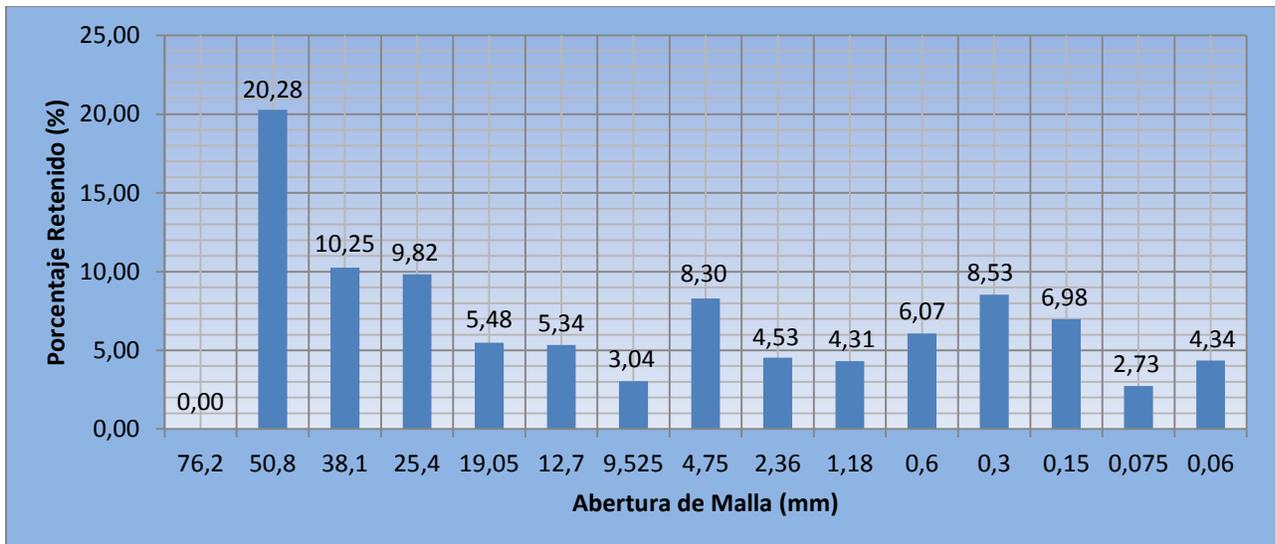


Figura 25. Curva de materiales retenidos en cada una de las mallas utilizadas con los materiales del sitio de préstamo Presa.

Densidad Máxima de los Materiales

La Densidad Máxima de los materiales, se define haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{W}{V} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

En donde se tiene que:

ρ = Densidad Máxima del Material (kg/m²).

W = Peso del Material (kg).

V = Volumen Interno del Odómetro (m³).

Los valores que se presentarán a continuación corresponden a los resultados de los materiales provenientes del sitio de préstamo Carazo.

Los resultados de la densidad, se presentan para dos estados del material. El primero de ellos en estado seco, mientras que el segundo de ellos en estado saturado superficie seca.

CUADRO 2. VALORES DE LA DENSIDAD MÁXIMA DEL MATERIAL.		
Densidad Material Húmedo	2.269,63	kg/m ³
Densidad Material Seco	2.033,80	kg/m ³
Contenido de Humedad del Material	11,60	%
Contenido Humedad Material Sitio	2,93	%
Contenido de Humedad Óptimo	8,67	%
Esfuerzo Máximo en la Presa	27,24	kg/cm ²
Esfuerzo Máximo en la Presa (FS=2)	54,47	kg/cm ²
Altura de la Presa	120,00	m
Diámetro de la Tapa del Odómetro	0,49	m
Área del Odómetro	1.885,74	cm ²
Carga Puntual a los Materiales	102.718,36	kg

Como se observa en el Cuadro 2, se presentan los valores de la densidad máxima de los materiales obtenida en laboratorio, tanto seco como saturado, superficie seca. Estos, aunados a factores, que igualmente se presentan en este cuadro, como lo es la altura de la represa, permiten obtener los esfuerzos máximos que experimentan los materiales de la presa, tanto real como de diseño (aplicando un factor de seguridad de dos). Este último es el que permite obtener la máxima carga puntual que le será transmitida a los materiales en los ensayos odométricos, por medio de la placa cabezal.

Es con base en la densidad máxima de los materiales en estado saturado superficie seca, que se determinan las cantidades específicas de los materiales. Se entiende por materiales, tanto a los sólidos como al líquido, necesario para alcanzar el estado saturado superficie seca.

Cabe destacar que al realizar el ensayo para determinar la densidad de los materiales, se obtiene el contenido de humedad del material, para alcanzar el estado saturado superficie seca y el contenido de humedad óptimo; este último, restando el contenido de humedad que presentan los materiales en sitio.

Una vez realizada esta aclaración, se presentan a continuación, las cantidades específicas para cada ensayo de odómetro tanto de sólidos como de líquidos (agua) para el caso de los materiales del sitio Carazo.

CUADRO 3. MATERIALES PARA ODÓMETRO #1 A UNA DENSIDAD DEL 100%.		
Peso Total Muestra	231,54	kg
Peso Muestra Sin Agua	213,08	kg
Peso del Agua a Colocar	18,47	kg
Peso Muestra Bandeja #1	71,03	kg
Peso Muestra Bandeja #2	71,03	kg
Peso Muestra Bandeja #3	71,03	kg
Peso Agua Bandeja #1	6,16	kg
Peso Agua Bandeja #2	6,16	kg
Peso Agua Bandeja #3	6,16	kg

En este cuadro y los siguientes, se presentan las cantidades de materiales divididos en tres bandejas por pesos iguales. Esto se debe a que el odómetro presenta una altura interna total de 54,10 cm y como parte del procedimiento para el llenado del odómetro, se estableció

hacerlo en tres capas iguales. Esto, representa, para completar dicha altura, capas, en este caso de aproximadamente 18 cm; de ahí que se utiliza una bandeja con el mismo peso, mostrado en el Cuadro 3, para alcanzar dicha altura y al cabo de las tres bandejas colocadas dentro del odómetro alcanzar la altura total. Igualmente se presentan las cantidades de líquido que se deben de adicionar por bandeja para que todo el material se encuentre en estado de saturado superficie seca. Este procedimiento se repitió para cada uno de los ensayos de odómetro, al variar su densidad; de ahí que se presentarán, en las tablas posteriores a esta, las cantidades requeridas para cada caso.

CUADRO 4. MATERIALES PARA ODÓMETRO #2 A UNA DENSIDAD DEL 95%.		
Peso Total Muestra	219,97	kg
Peso Muestra Sin Agua	202,42	kg
Peso del Agua a Colocar	17,54	kg
Peso Muestra Bandeja #1	67,47	kg
Peso Muestra Bandeja #2	67,47	kg
Peso Muestra Bandeja #3	67,47	kg
Peso Agua Bandeja #1	5,85	kg
Peso Agua Bandeja #2	5,85	kg
Peso Agua Bandeja #3	5,85	kg

CUADRO 5. MATERIALES PARA ODÓMETRO #3 A UNA DENSIDAD DEL 90%.		
Peso Total Muestra	208,39	kg
Peso Muestra Sin Agua	191,77	kg
Peso del Agua a Colocar	16,62	kg
Peso Muestra Bandeja #1	63,92	kg
Peso Muestra Bandeja #2	63,92	kg
Peso Muestra Bandeja #3	63,92	kg
Peso Agua Bandeja #1	5,54	kg
Peso Agua Bandeja #2	5,54	kg
Peso Agua Bandeja #3	5,54	kg

Las cantidades que se presentan en los Cuadros 3, 4 y 5 son específicas para cada ensayo. La variación en cuanto a las cantidades que presentan cada uno de ellos se debe básicamente a la densidad de los materiales, a la cual se vaya a ejecutar la prueba de odómetro.

La obtención de los resultados para determinar la densidad de los materiales del sitio Presa, va asociada a una serie de características del equipo con que se realiza la prueba, así como

también del material del sitio propio, que para el caso de estos materiales a diferencia de los del sitio Carazo, presentan mayor cantidad de granos gruesos y menor cantidad de arenas, tal y como se muestra en la Figura 24, que corresponde a la curva granulométrica promedio de los materiales del sitio Presa.

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos, para la densidad máxima de los materiales del sitio de préstamo Presa, en la cual se presentan las siguientes determinaciones.

CUADRO 6. VALORES DE LA DENSIDAD MÁXIMA DEL MATERIAL.		
Densidad Material Húmedo	2.060,74	kg/m ³
Densidad Material Seco	1.912,90	kg/m ³
Contenido de Humedad del Material	7,73	%
Contenido de Humedad Óptimo	7,73	%
Esfuerzo Máximo en la Presa	24,73	kg/cm ²
Esfuerzo Máximo en la Presa (FS=2)	49,46	kg/cm ²
Altura de la Presa	120,00	m
Diámetro de la Tapa del Odómetro	0,49	m
Área del Odómetro	1.885,74	cm ²
Carga Puntual a los Materiales	93.264,59	kg

Como se observa en el cuadro anterior, se obtuvo un valor de la densidad máxima de los materiales en cualquiera de los estados realizados, menor al obtenido para el caso de los materiales del sitio Carazo. Esto, conlleva a obtener un valor de esfuerzo máximo tanto real como ajustado, aplicable a los materiales, menor al obtenido para los del sitio Carazo.

Es por ello que, para realizar las pruebas de odómetro correspondientes a dichos materiales del sitio Presa, se empleó la misma escala de esfuerzos definida para los materiales del sitio Carazo; esto, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos al final de realizadas las pruebas odométricas.

Con base en la densidad de los materiales en estado saturado superficie seca,

que se presenta en el Cuadro 6, es que se determinan las cantidades específicas de los materiales. Se entiende por materiales, tanto a los sólidos como al líquido, necesario para alcanzar el estado saturado, superficie seca.

Una vez realizada esta aclaración, se presentan a continuación, las cantidades específicas para cada ensayo de odómetro, tanto de sólidos como de líquidos (agua).

CUADRO 7. MATERIALES PARA ODÓMETRO #1 A UNA DENSIDAD DEL 100%.		
Peso Total Muestra	210,23	kg
Peso Muestra Sin Agua	195,15	kg
Peso del Agua a Colocar	15,09	kg
Peso Muestra Bandeja #1	65,05	kg
Peso Muestra Bandeja #2	65,05	kg
Peso Muestra Bandeja #3	65,05	kg
Peso Agua Bandeja #1	5,03	kg
Peso Agua Bandeja #2	5,03	kg
Peso Agua Bandeja #3	5,03	kg

En este cuadro y en los siguientes, se presentan las cantidades de materiales divididos en tres bandejas por pesos iguales. Esto se debe a que el odómetro presenta una altura interna total de 54,10 cm y, como parte del procedimiento para el llenado del odómetro, se estableció hacerlo en tres capas del mismo espesor.

CUADRO 8. MATERIALES PARA ODÓMETRO #2 A UNA DENSIDAD DEL 95%.		
Peso Total Muestra	199,72	kg
Peso Muestra Sin Agua	185,39	kg
Peso del Agua a Colocar	14,33	kg
Peso Muestra Bandeja #1	61,80	kg
Peso Muestra Bandeja #2	61,80	kg
Peso Muestra Bandeja #3	61,80	kg
Peso Agua Bandeja #1	4,78	kg
Peso Agua Bandeja #2	4,78	kg
Peso Agua Bandeja #3	4,78	kg

CUADRO 9. MATERIALES PARA ODÓMETRO #3 A UNA DENSIDAD DEL 90%.		
Peso Total Muestra	189,21	kg
Peso Muestra Sin Agua	175,63	kg
Peso del Agua a Colocar	13,58	kg
Peso Muestra Bandeja #1	58,54	kg
Peso Muestra Bandeja #2	58,54	kg
Peso Muestra Bandeja #3	58,54	kg
Peso Agua Bandeja #1	4,53	kg
Peso Agua Bandeja #2	4,53	kg
Peso Agua Bandeja #3	4,53	kg

Las cantidades que se presentan en los Cuadros 7, 8 y 9, son específicas para cada ensayo. La variación en cuanto a las cantidades que presentan cada uno de ellos se debe básicamente a los porcentajes de la densidad máxima al que se vaya a realizar el respectivo ensayo.

Ensayo de Odómetro para Determinar el Módulo de Deformación

El ensayo de compresión unidimensional, permite establecer una relación entre el esfuerzo máximo que experimentará el material y el asentamiento que sufrirá el mismo debido a este esfuerzo.

Este ensayo permite establecer básicamente el módulo de deformación de los materiales por ser utilizados como enrocados; se aplica la secuencia del procedimiento que se presentó en la sección pertinente de Metodología del ensayo.

Permite brindar una idea de la posible deformación que presentaron los materiales en una de las zonas más críticas de la represa, como lo es su base.

Tal y como se presentará más adelante en esta sección, los materiales ensayados presentan diferentes valores del módulo de deformación, según sea el esfuerzo bajo a que son sometidos los materiales.

Esta prueba se realizará tanto para los materiales del sitio de préstamo Carazo como también para los del sitio Presa.

A manera de aclaración, el módulo de deformación que se obtuvo mediante la realización de este ensayo, puede ser mucho menor del que se presentará en la represa a la hora de su construcción, ya que los materiales no tienen una limitante, como sí lo presentan los materiales en este ensayo, como lo es el cilindro del odómetro.¹⁵

A continuación se presentarán los resultados del primer ensayo de odómetro, que se realizó a una densidad máxima de laboratorio del 100%, para los materiales del sitio de préstamo Carazo.

Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 100%

Los valores arrojados de este ensayo se resumen en la siguiente figura, que contempla las

variables principales de la prueba. Inicialmente se mostrarán los resultados obtenidos al emplear los materiales del sitio Carazo, posterior a ello se presentarán los resultados de la prueba de odómetro, al utilizar, esta vez, los materiales del sitio de préstamo Presa.

Como parte de este ensayo de odómetro, se obtuvo la curva de Esfuerzo versus Deformación de los materiales para cada uno de los sitios en estudio, la cual dicta el comportamiento que presentaron. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

¹⁵ Información recabada de una consulta con el Ingeniero Eduardo Avilés Madrigal.

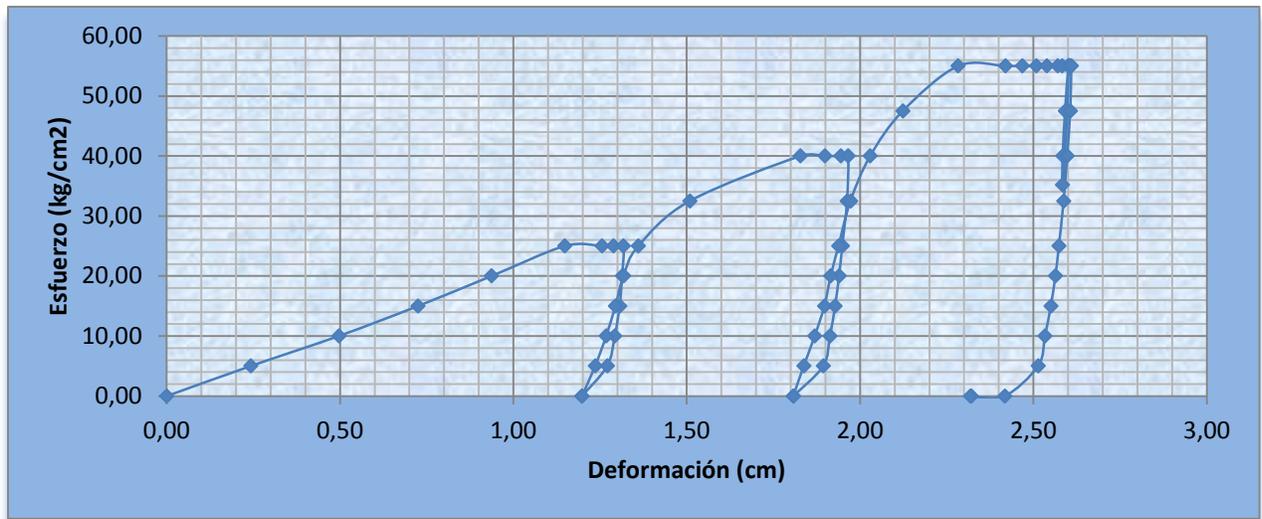


Figura 26. Curva promedio del Esfuerzo respecto de la Deformación de los materiales, definidos en ciclos de carga y descarga para el Odómetro #1, para los materiales del sitio Carazo.

En la Figura 26, se representan los resultados obtenidos del ensayo de odómetro realizado y se observan claramente tres pendientes en la curva; esto, representa tres módulos de deformación distintos, para un mismo tipo de material, pero a distintos niveles de esfuerzo. Los tres ciclos que se presentan en esta figura, corresponden a porcentajes del esfuerzo máximo total aplicado a los materiales; de ahí que la primer pendiente que se observa

corresponde a un 50% del esfuerzo máximo, la segunda representa un 75% del máximo esfuerzo y por último la tercera pendiente representa el 100% del esfuerzo máximo al que se sometió a los materiales. A continuación se representa el comportamiento que presenta la densidad de los materiales al aumentar la deformación, producto de un incremento en el esfuerzo aplicado a los materiales.

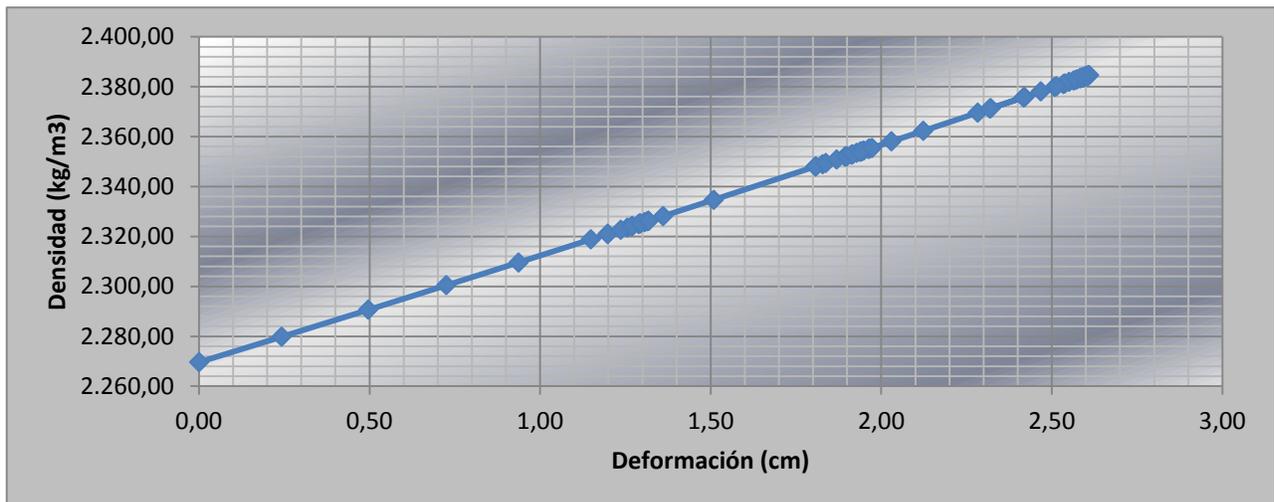


Figura 27. Comportamiento de la Densidad del material, conforme aumenta la Deformación producto de un aumento en el Esfuerzo, para los materiales del sitio Carazo en el odómetro #1.

Como se aprecia, el comportamiento básicamente es lineal, notándose que conforme aumenta el esfuerzo en los materiales, la densidad de los mismos tiende a aumentar; esto, es de esperar, ya que la relación de vacíos tiende a disminuir.

Seguidamente se representa el comportamiento de la relación de vacíos

conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los materiales. Se observa en la figura la tendencia demostrada en el Cuadro 9, presentado en la sección de Apéndices, que conforme se incrementa el esfuerzo sobre los materiales, la relación de vacíos tiende a disminuir, de ahí que se representa la tendencia en la siguiente figura.

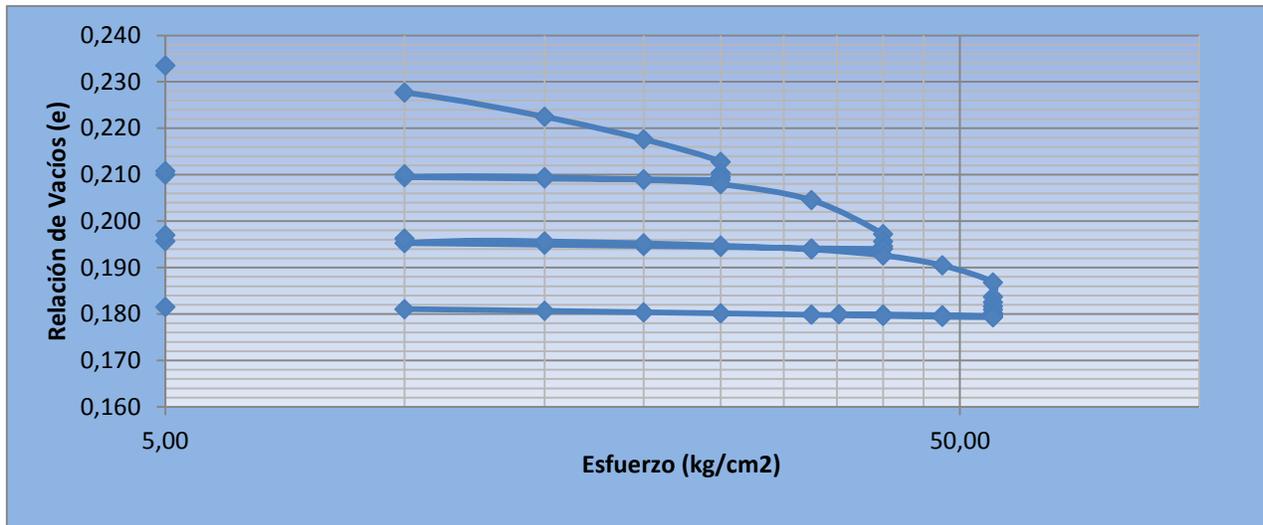


Figura 28. Comportamiento de la Relación de Vacíos conforme aumenta el Esfuerzo en los materiales del sitio Carazo, para el odómetro #1.

Una vez que se extraen los materiales del odómetro, se procede a su respectivo secado a horno, con la finalidad de realizar y obtener la granulometría de los materiales, después de ensayados y de recibir la carga aplicada en el odómetro, para compararla con la granulometría inicial de los materiales y así determinar el grado de rotura de los granos y observar en que tamaño nominal de las mallas, se encuentra marcada esa diferencia debido, básicamente, al incremento paulatino de esfuerzos. El detalle de la granulometría inicial y final de los materiales utilizados en el ensayo de odómetro #1, para los materiales del sitio Carazo, se presenta a continuación.

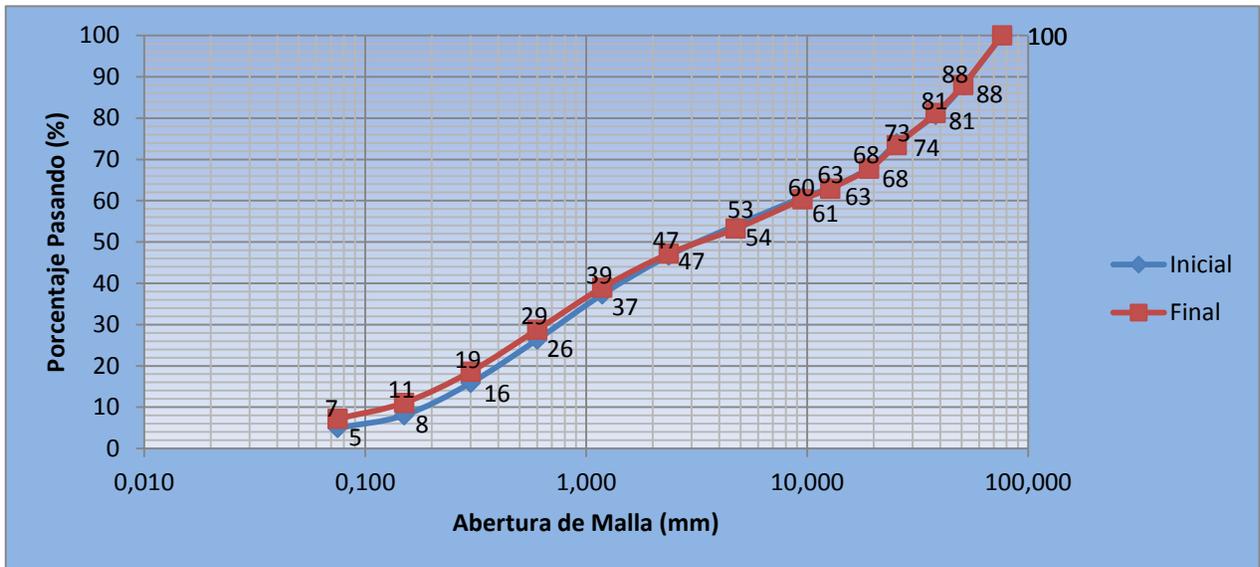


Figura 29. Comparación entre curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo odométrico, a una densidad máxima del 100%, para los materiales del sitio Carazo.

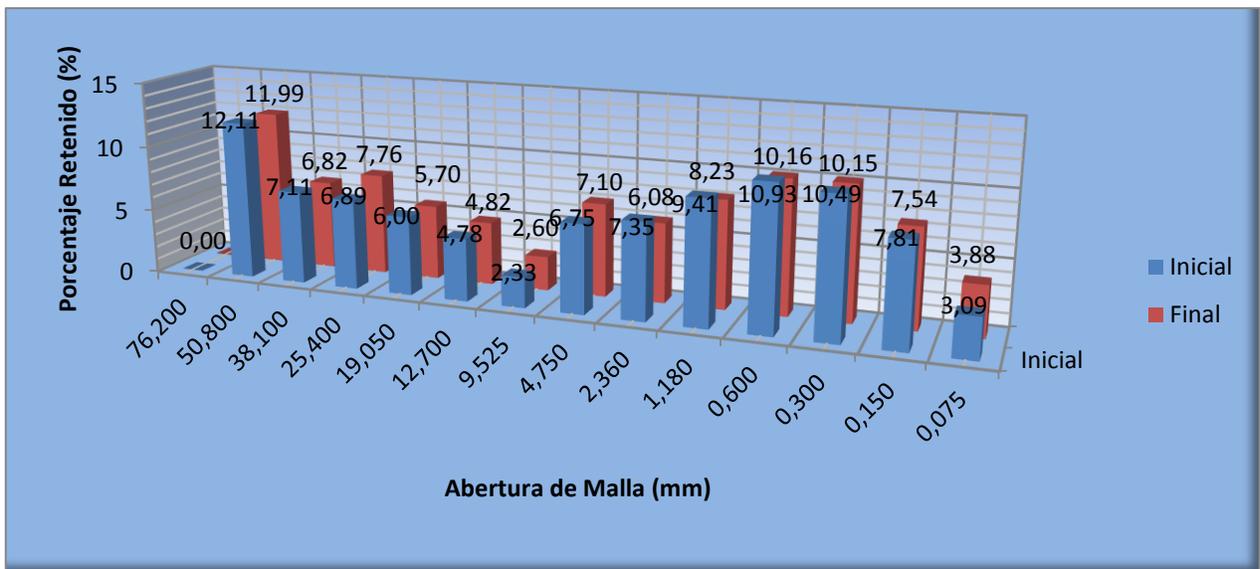


Figura 30. Comparación entre porcentajes de materiales retenidos para determinar el porcentaje de rotura de granos de los materiales del odómetro #1 del sitio Carazo.

Rotura de Granos para los Materiales del Odómetro #1 del sitio Carazo

Observando la Figura 29, se tiene que la fracción gruesa del material permanece constante en cuanto a porcentajes; se tienen diferencias del orden de décimas de porcentaje. La fracción más

fina del material presenta un incremento más notable y significativo, tal y como se ilustra en la figura anterior y se presenta en el siguiente cuadro.

CUADRO 10. PORCENTAJES DE ROTURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO CARAZO.				
Malla	Abertura	% Retenido Inicial	% Retenido Final	% Rotura Granos
3"	76,2	0	0	0
2"	50,8	12	12	0
1 1/2"	38,1	7	7	0
1"	25,4	7	8	-1
3/4"	19,05	6	6	0
1/2"	12,7	5	5	0
3/8"	9,525	2	3	0
4	4,75	7	7	0
8	2,36	7	6	1
16	1,18	9	8	1
30	0,6	11	10	1
50	0,3	10	10	0
100	0,15	8	8	0
200	0,075	3	4	-1
Charola	0,06	5	7	-2
				3%

Seguidamente se presentan los resultados de la prueba de odómetro realizada a un 100% de la densidad máxima de laboratorio para los materiales del sitio de préstamo Presa.

Como parte de este ensayo de odómetro se obtuvo la curva de Esfuerzo versus

Deformación de los materiales, para cada uno de los sitios en estudio; esta, dicta el comportamiento que presentaron. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

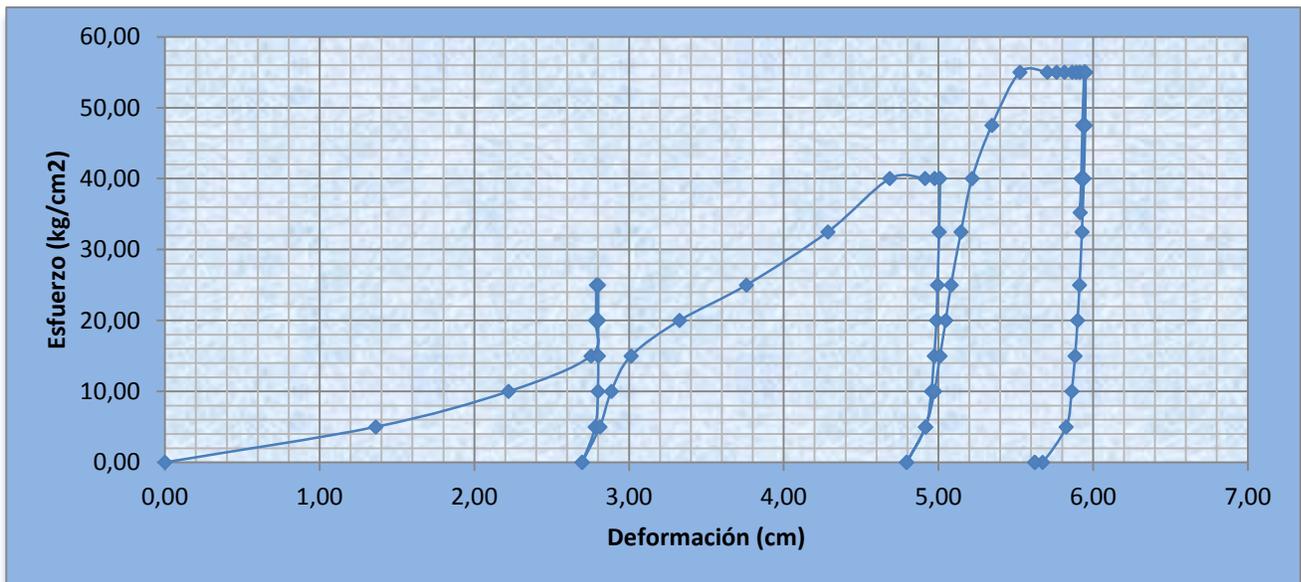


Figura 31. Curva promedio del esfuerzo respecto de la deformación de los materiales, definidos en ciclos de carga y descarga para el odómetro #1, para los materiales del sitio Presa.

En la Figura 31, se representan los resultados obtenidos del ensayo de odómetro realizado. Se observan claramente tres pendientes en la curva, lo que representa tres módulos de deformación distintos para un mismo tipo de material, pero a distintos niveles de

esfuerzo. A continuación se representa el comportamiento que presenta la densidad de los materiales al aumentar la deformación, producto de un incremento en el esfuerzo aplicado a los materiales.

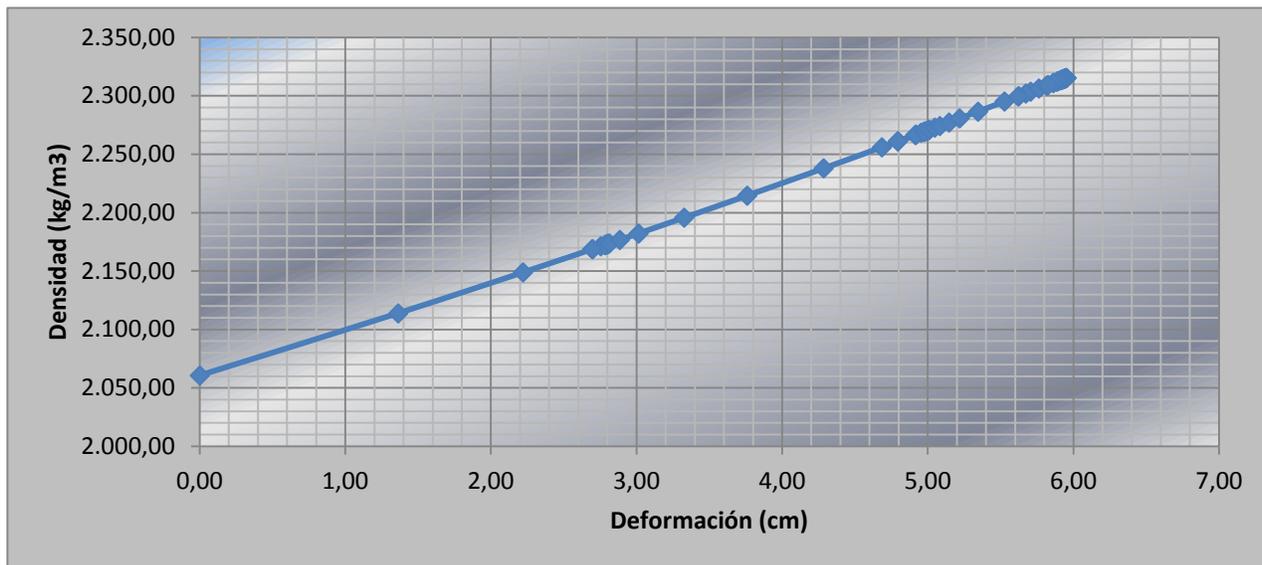


Figura 32. Comportamiento de la densidad del material conforme aumenta la deformación producto de un aumento en el esfuerzo, para los materiales del sitio Presa en el odómetro #1.

Como se aprecia el comportamiento básicamente es lineal, notándose que conforme aumenta el esfuerzo en los materiales, la densidad de los mismos tiende a aumentar; esto, es de esperar, ya que la relación de vacíos tiende a disminuir.

Seguidamente se representa el comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los materiales. Se observa en la figura la tendencia demostrada en el Cuadro 13, presentado en la sección de Apéndices. Conforme se incrementa el esfuerzo sobre los materiales, la relación de vacíos tiende a disminuir; de ahí que se representa la tendencia en la siguiente figura.

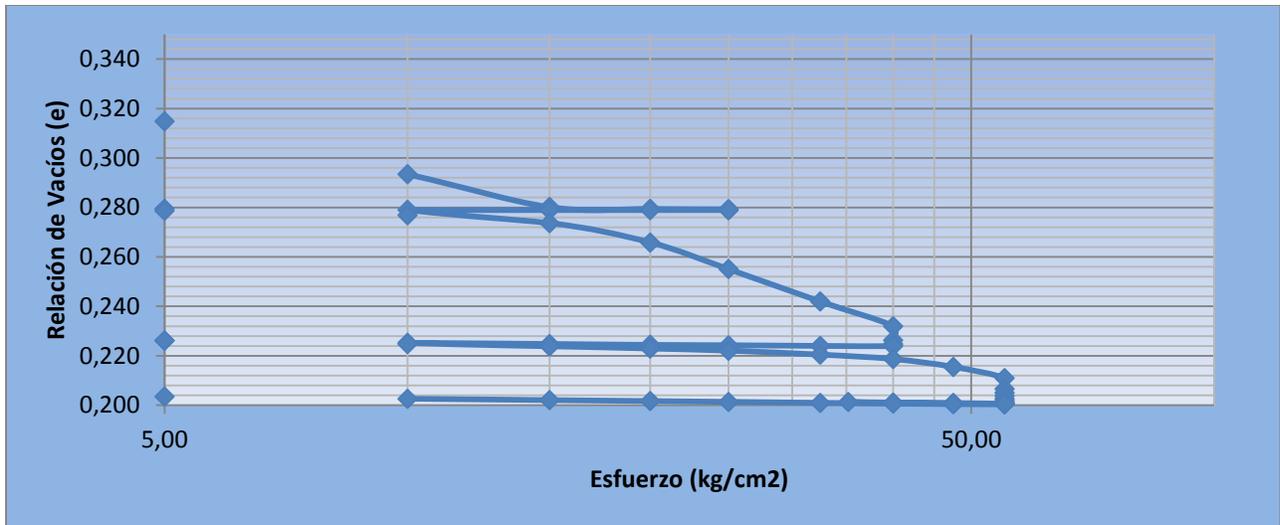


Figura 33. Comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo en los materiales del sitio Presa, para el odómetro #1.

Una vez que se extraen los materiales del odómetro, se procede a su respectivo secado a horno, con la finalidad de realizar y obtener la granulometría de los materiales después de ensayados y de recibir la carga aplicada en el odómetro, para compararla con la granulometría inicial de los materiales y así determinar el grado de rotura de los granos y observar en qué tamaño

nominal de las mallas, se encuentra marcada esa diferencia, debido básicamente al incremento paulatino de esfuerzos. El detalle de la granulometría inicial y final de los materiales utilizados en el ensayo de odómetro #1, para los materiales del sitio Presa, se presenta a continuación.

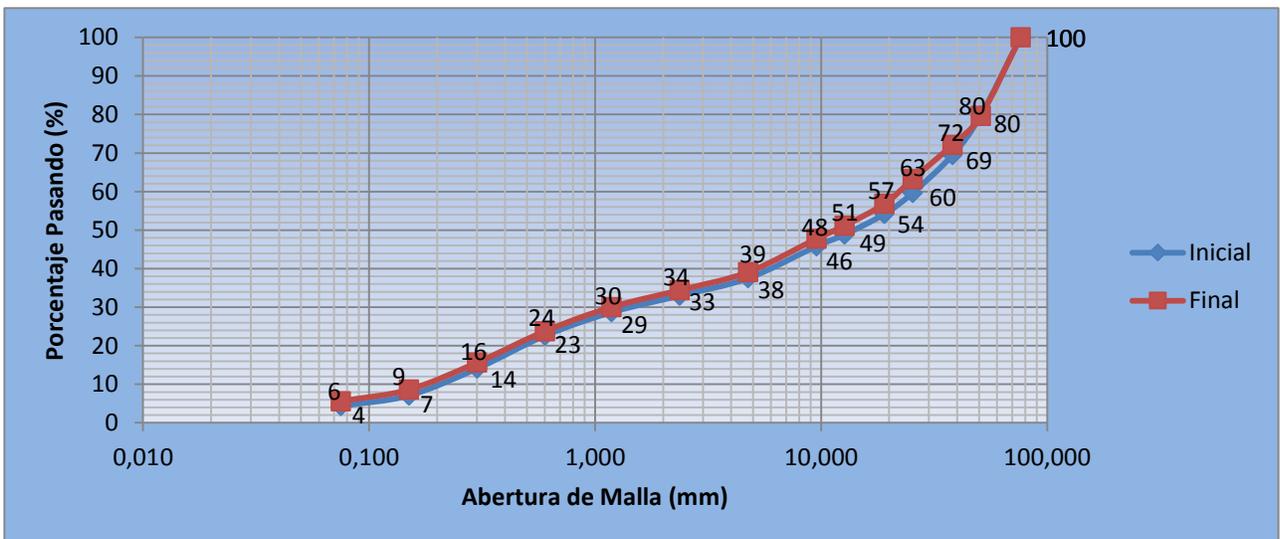


Figura 34. Comparación entre curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo odométrico a una densidad máxima del 100%, para los materiales del sitio Presa.

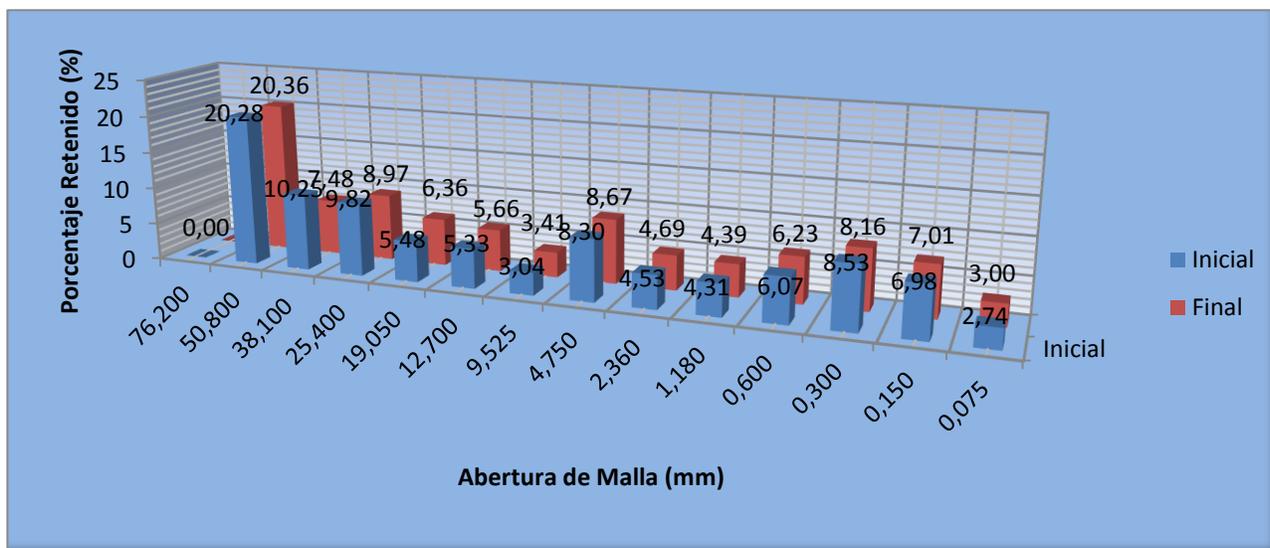


Figura 35. Comparación entre porcentajes de materiales retenidos para determinar el porcentaje de rotura de granos de los materiales del odómetro #1 del sitio Presa.

Rotura de Granos para los Materiales del Odometro #1 del sitio Presa

Observando la Figura 34, se tiene que en la fracción gruesa del material es donde se marcan las diferencias en cuanto a porcentajes de rotura de granos para estos materiales, mientras que la sección fina permanece prácticamente constante,

al tener diferencias del orden de décimas de porcentaje, en algunos casos. El porcentaje de rotura de granos para los materiales del sitio de préstamo Presa, se presentan a continuación.

CUADRO 11. PORCENTAJES DE ROTURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO PRESA.				
Malla	Abertura	% Retenido Inicial	% Retenido Final	% Rotura Granos
3"	76,200	0	0	0
2"	50,800	20	20	0
1 1/2"	38,100	10	7	3
1"	25,400	10	9	1
3/4"	19,050	5	6	-1
1/2"	12,700	5	6	-1
3/8"	9,525	3	3	0
4	4,750	8	9	-1
8	2,360	5	5	0
16	1,180	4	4	0
30	0,600	6	6	0
50	0,300	9	8	1
100	0,150	7	7	0
200	0,075	3	3	0
Charola	0,060	4	6	-2
				5%

Ensayo de Odómetro a un 95% de su Densidad Máxima

Los valores arrojados de este ensayo se resumen en la siguiente figura; esta, contempla las variables principales de la prueba. Inicialmente se mostrarán los resultados obtenidos al emplear los materiales del sitio Carazo, posterior a ello se presentan los resultados de la prueba de odómetro, al utilizar los materiales del sitio de préstamo Presa.

Como parte de este ensayo de odómetro, se obtuvo la curva de Esfuerzo versus Deformación de los materiales, para cada uno de los sitios en estudio; esta dicta el comportamiento que presentaron. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

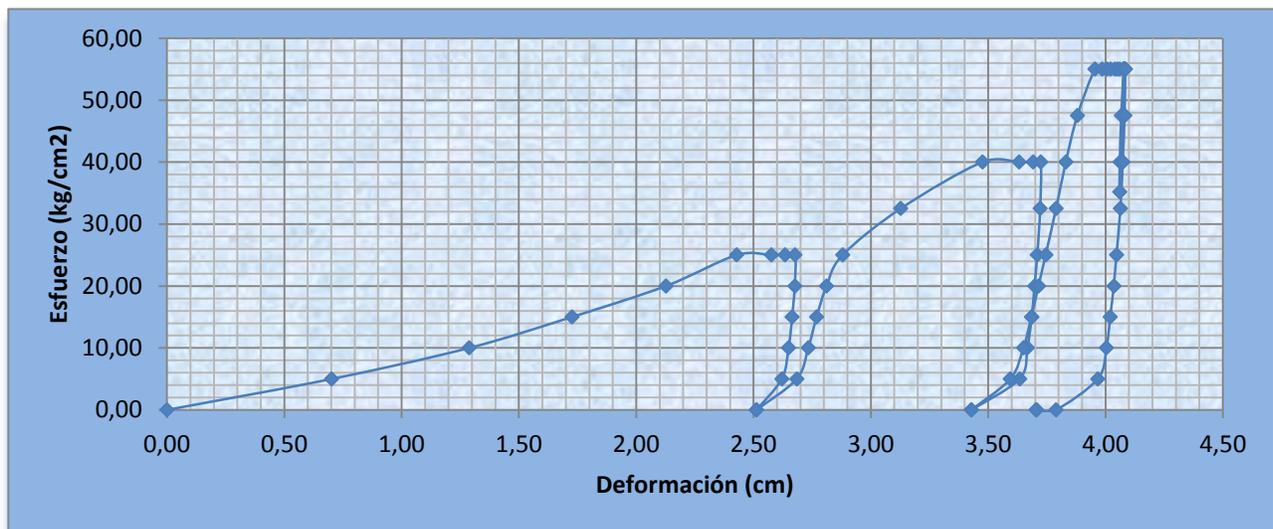


Figura 36. Curva promedio del esfuerzo respecto de la deformación de los materiales, definidos en ciclos de carga y descarga para el Odómetro #2, para los materiales del sitio Carazo.

En la Figura 36, se representan los resultados obtenidos del ensayo de odómetro realizado, se observan claramente tres pendientes en la curva, lo que representa tres módulos de deformación distintos para un mismo tipo de material, pero a distintos niveles de esfuerzo. A continuación se representa el comportamiento que presenta la densidad de los materiales al aumentar la deformación, producto de un incremento en el esfuerzo aplicado a los materiales.

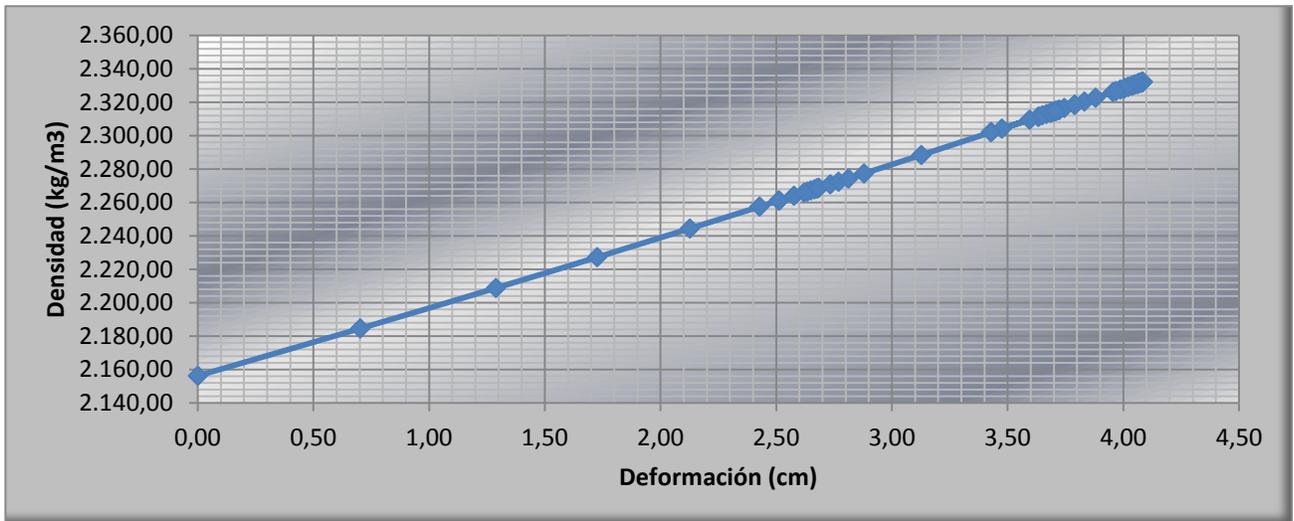


Figura 37. Comportamiento de la Densidad del material conforme aumenta la Deformación producto de un aumento en el Esfuerzo, para los materiales del sitio Carazo en el odómetro #2.

Como se puede observar, el comportamiento que se presenta en la Figura 37, básicamente es lineal; esto, se debe a que al aumentar el esfuerzo sobre los materiales, experimentan una reducción de los vacíos entre sus alrededores; esto, ocasiona un aumento en la densidad del material, que se observa reflejado en la curva anterior.

conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los materiales. Se observa en la figura la tendencia demostrada en el Cuadro 17, presentado en la sección de Apéndices, que conforme se incrementa el esfuerzo sobre los materiales, la relación de vacíos tiende a disminuir, de ahí que se representa la tendencia en la siguiente figura.

Seguidamente se representa el comportamiento de la relación de vacíos

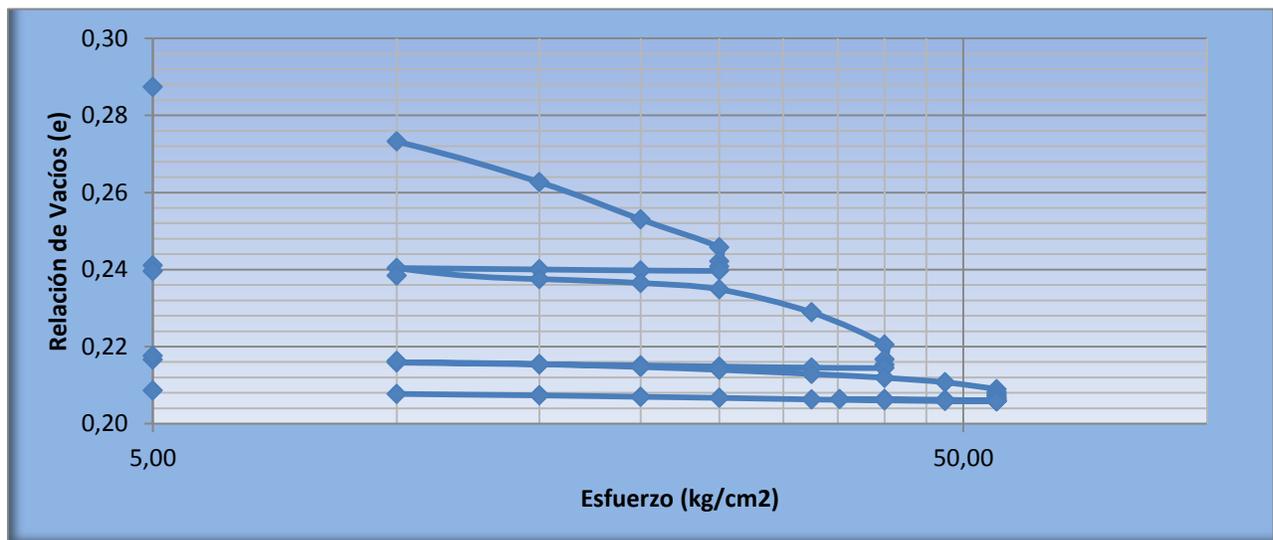


Figura 38. Comportamiento de la Relación de Vacíos conforme aumenta el Esfuerzo en los materiales del sitio Carazo, para el odómetro#2.

Con base en estos porcentajes de materiales pasando, se establece las curvas granulométricas de los materiales, tanto inicial como final. De esta curva granulométrica se establece el gráfico de los materiales retenidos; esta, se utiliza para considerar el porcentaje de la rotura de granos, que se define como la

diferencia positiva entre porcentajes retenidos inicial menos final, según establece Raúl Marsal, (1965). Este parámetro da una idea del porcentaje de la muestra que sufrió fragmentación después de realizado el ensayo de odómetro.

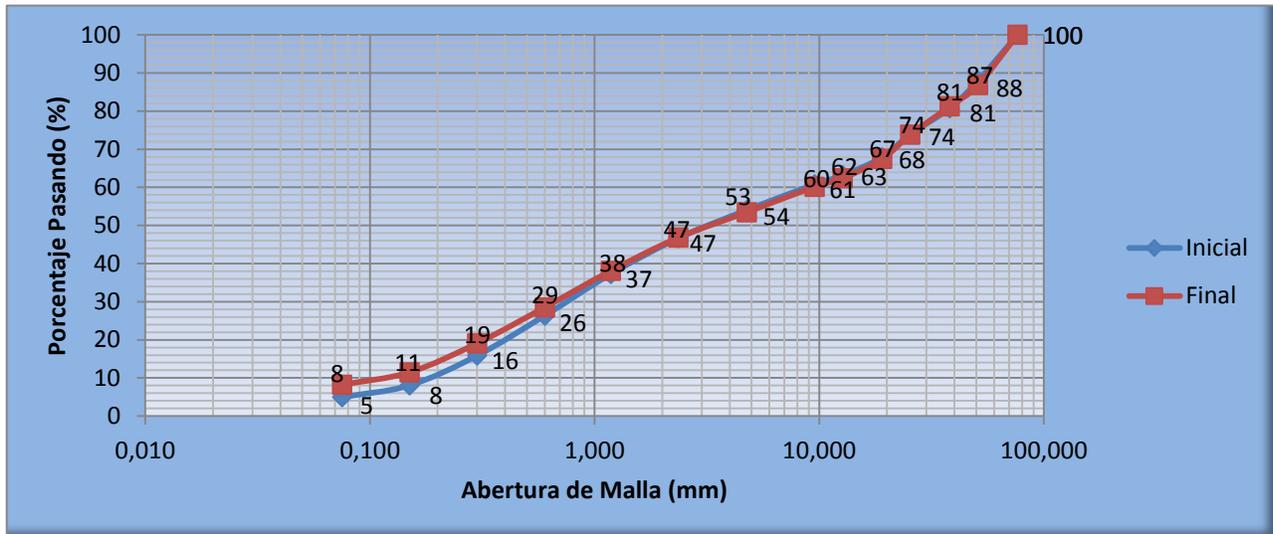


Figura 39. Comparación entre curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo odométrico a una densidad máxima del 95%, para los materiales del sitio Carazo.

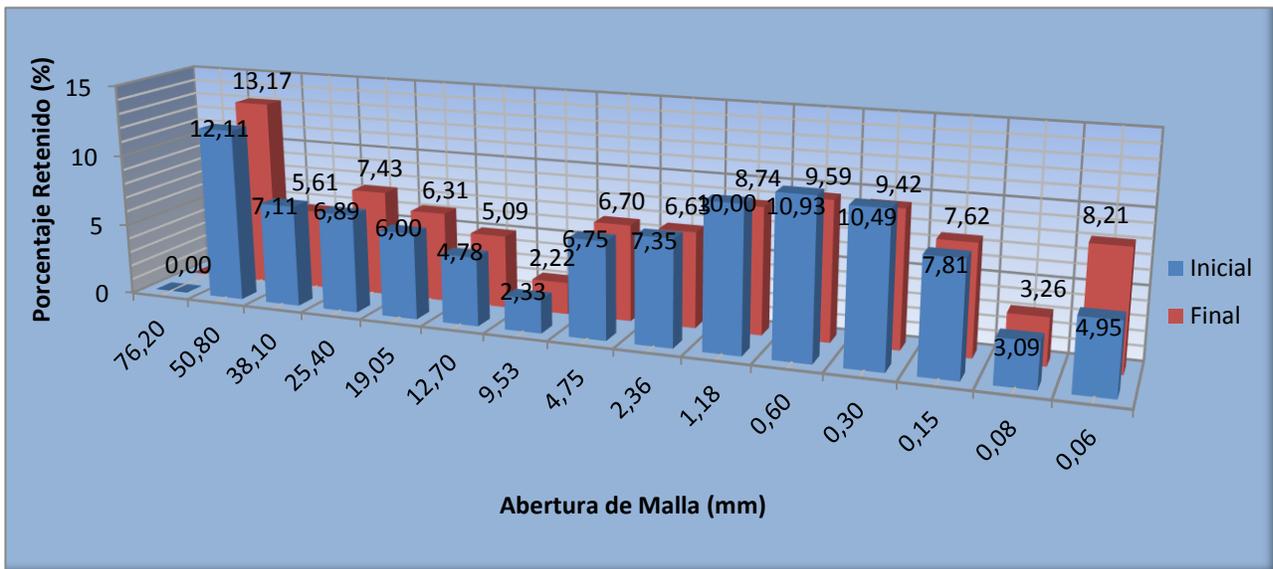


Figura 40. Comparación entre porcentajes de materiales retenidos para determinar el porcentaje de rotura de granos de los materiales del odómetro #2 del sitio Carazo.

Rotura de Granos para los Materiales del Odómetro #2 del sitio Carazo

Observando tanto las Figuras 39 y 40, se tiene que la fracción gruesa del material permanece muy constante en cuanto a porcentajes; se tienen diferencias del orden de décimas de porcentaje. La fracción más fina del

material presenta un incremento un tanto más notable y significativo, tal y como se ilustra en la figura anterior y se presentará a continuación en el siguiente cuadro.

CUADRO 12. PORCENTAJES DE ROTURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO CARAZO.				
Malla	Abertura	% Retenida Inicial	% Retenida Final	% Rotura Granos
3"	76,2	0	0	0
2"	50,8	12	13	-1
1 1/2"	38,1	7	6	1
1"	25,4	7	7	-1
3/4"	19,05	6	6	0
1/2"	12,7	5	5	0
3/8"	9,525	2	2	0
4	4,75	7	7	0
8	2,36	7	7	1
16	1,18	10	9	1
30	0,6	11	10	1
50	0,3	10	9	1
100	0,15	8	8	0
200	0,075	3	3	0
Charola	0,06	5	8	-3
				5%

Seguidamente se presentarán los resultados de la prueba de odómetro realizada a un 95% de la densidad máxima de laboratorio, para los materiales del sitio de préstamo Presa.

Como parte de este ensayo de odómetro, se obtuvo la curva de Esfuerzo versus Deformación de los materiales, para cada uno de los sitios en estudio, que dicta el comportamiento que presentaron. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

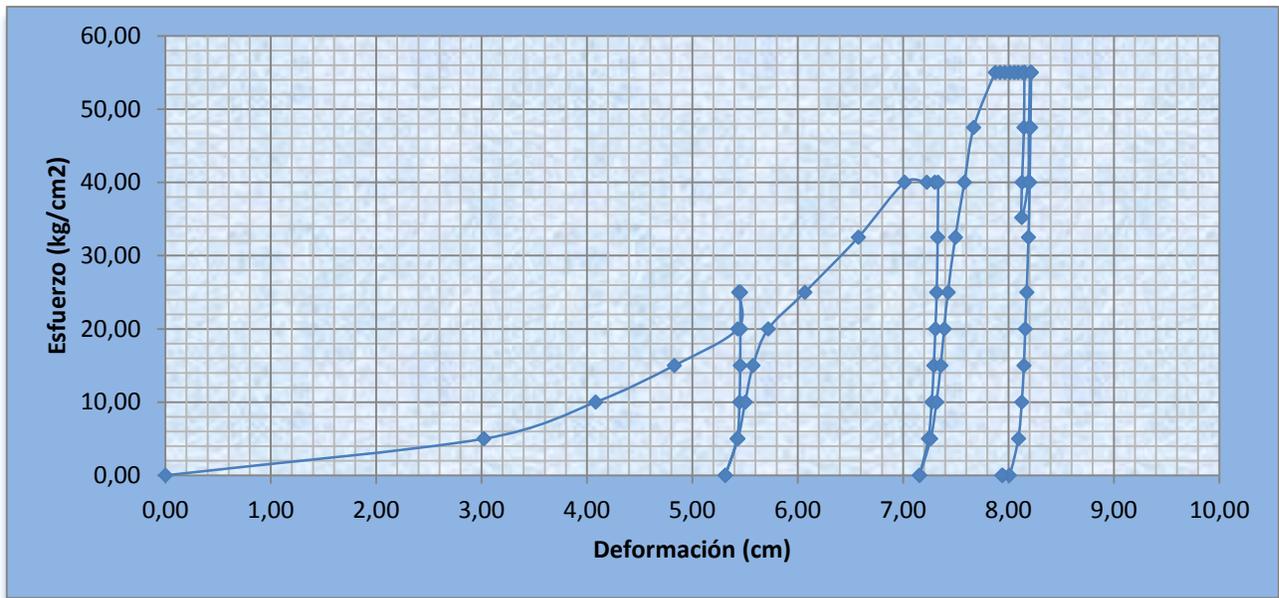


Figura 41. Curva promedio del esfuerzo respecto de la deformación de los materiales, definidos en ciclos de carga y descarga para el odómetro #2, para los materiales del sitio Presa.

En la Figura 41, se representan los resultados obtenidos del ensayo de odómetro realizado, se observan claramente tres pendientes en la curva, lo que representa tres módulos de deformación distintos para un mismo tipo de material pero a distintos niveles de

esfuerzo. A continuación, se representa el comportamiento que presenta la densidad de los materiales al aumentar la deformación, producto de un incremento en el esfuerzo aplicado a los materiales.

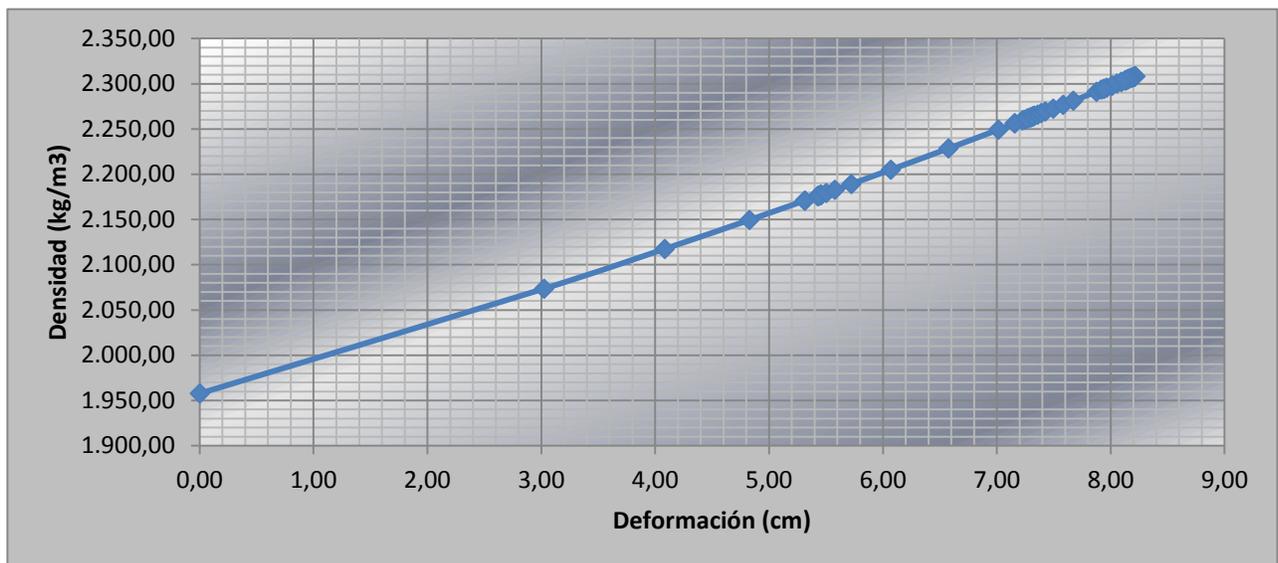


Figura 42. Comportamiento de la densidad del material, conforme aumenta la deformación producto de un aumento en el esfuerzo, para los materiales del sitio Presa en el odómetro #2.

Como se puede observar, el comportamiento que se presenta en la Figura 42, básicamente es lineal; esto se debe a que al aumentar el esfuerzo sobre los materiales, los mismos experimentan una reducción de los vacíos entre sus alrededores; esto, ocasiona un aumento en la densidad del material, que se observa reflejado en la curva anterior.

Seguidamente se representa el comportamiento de la relación de vacíos

conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los materiales. Se observa en la figura la tendencia demostrada en el Cuadro 21, de la sección de Apéndices, que conforme se incrementa el esfuerzo sobre los materiales, la relación de vacíos tiende a disminuir; de ahí que se representa la tendencia en la siguiente figura.

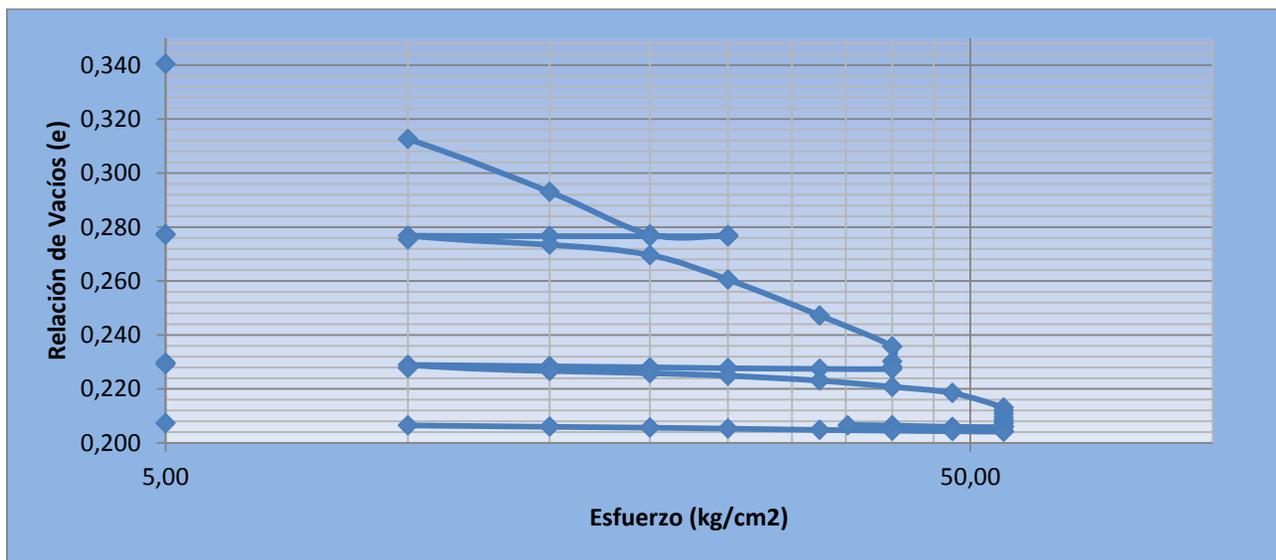


Figura 43. Comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo en los materiales del sitio Presa, para el odómetro #2.

Una vez que se extraen los materiales del odómetro, se procede a su respectivo secado a horno, con la finalidad de realizar y obtener la granulometría de los materiales, después de ensayados y de recibir la carga aplicada en el odómetro, para compararla con la granulometría inicial de los materiales y así determinar el grado de rotura de los granos y observar en que tamaño nominal de las mallas, se encuentra marcada esa diferencia, debido básicamente al incremento paulatino de esfuerzos. El detalle de la granulometría inicial y final de los materiales utilizados en el ensayo de odómetro #2, para los materiales del sitio Presa, se presenta a continuación.

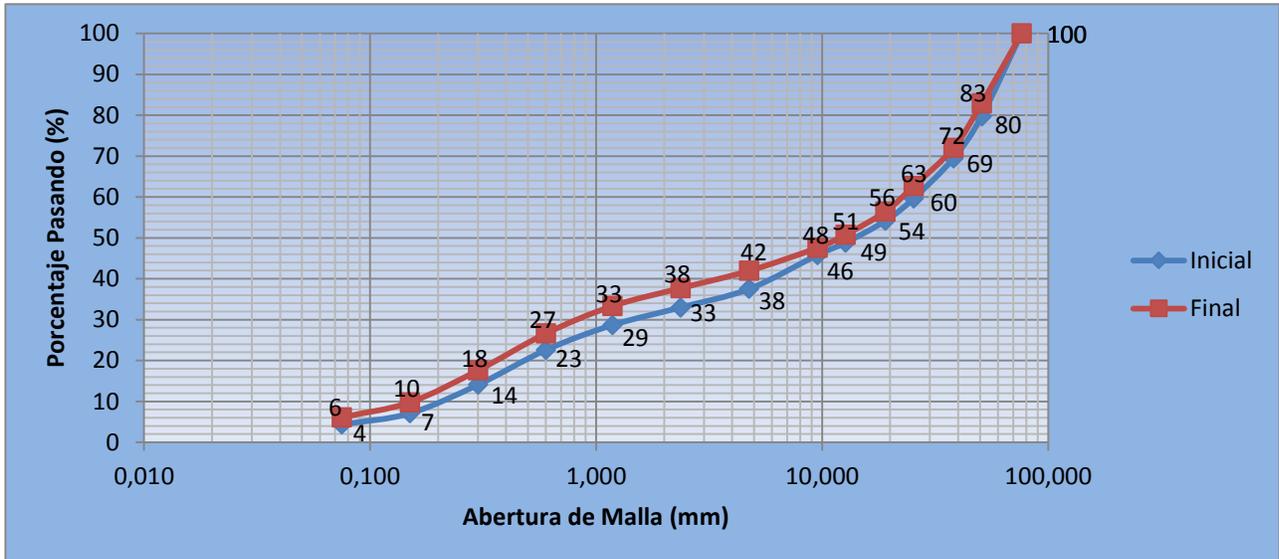


Figura 44. Comparación entre curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo odométrico a una densidad máxima del 95%, para los materiales del sitio Presa.

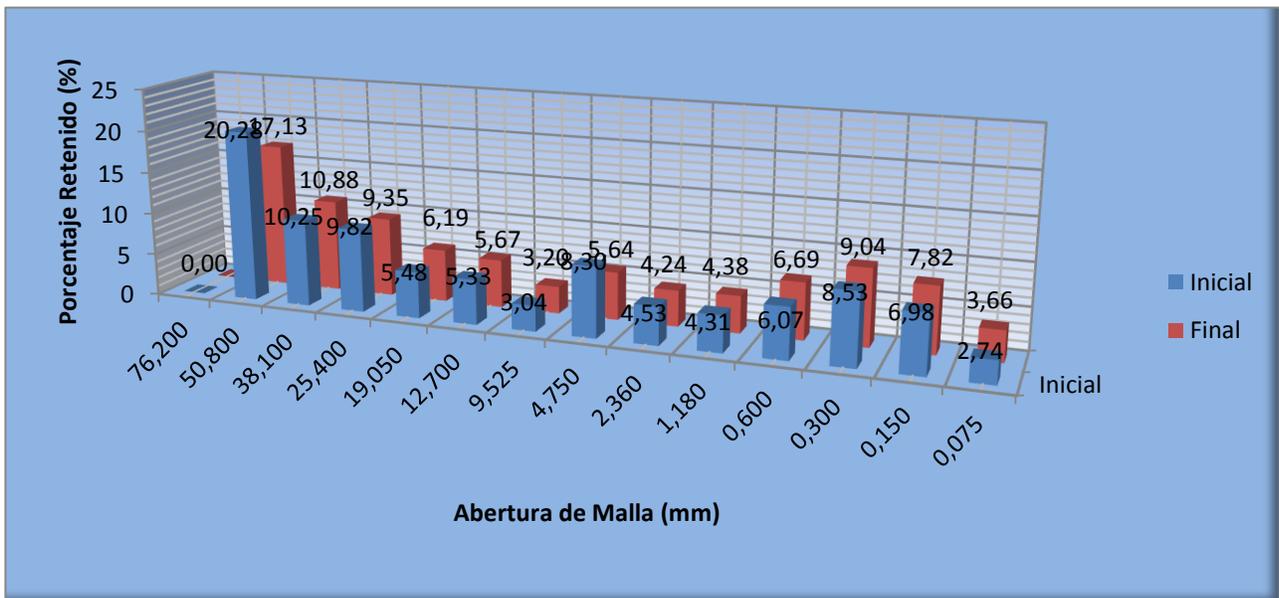


Figura 45. Comparación entre porcentajes de materiales retenidos para determinar el porcentaje de rotura de granos de los materiales del odómetro #2 del sitio Presa.

Rotura de Granos para los Materiales del Odómetro #2 del sitio Presa

Observando las Figuras 44 y 45, se tiene que la fracción gruesa del material permanece constante en cuanto a porcentajes y se tienen diferencias mínimas de porcentaje. La fracción

más fina del material presenta un incremento un tanto más notable y significativo, tal y como se ilustra en la figura anterior; se representa en el siguiente cuadro lo anteriormente expuesto.

CUADRO 13. PORCENTAJES DE ROTURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO PRESA.				
Malla	Abertura	% Retenido Inicial	% Retenido Final	% Rotura Granos
3"	76,200	0	0	0
2"	50,800	20	17	3
1 1/2"	38,100	10	11	-1
1"	25,400	10	9	1
3/4"	19,050	5	6	-1
1/2"	12,700	5	6	-1
3/8"	9,525	3	3	0
4	4,750	8	6	2
8	2,360	5	4	1
16	1,180	4	4	0
30	0,600	6	7	-1
50	0,300	9	9	0
100	0,150	7	8	-1
200	0,075	3	4	-1
Charola	0,060	4	6	-2
				7%

Ensayo de Odómetro a un 90% de su Densidad Máxima

Los valores arrojados de este ensayo se resumen en la siguiente figura, la cual contempla las variables principales de la prueba. Inicialmente se muestran los resultados obtenidos al emplear los materiales del sitio Carazo; posterior a ello, se presentan los resultados de la prueba de odómetro, al utilizar esta vez los materiales del sitio de préstamo Presa.

Como parte de este ensayo de odómetro se obtuvo la curva de Esfuerzo versus Deformación de los materiales, para cada uno de los sitios en estudio, que dicta el comportamiento que presentaron. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

0,25	17,80
------	-------

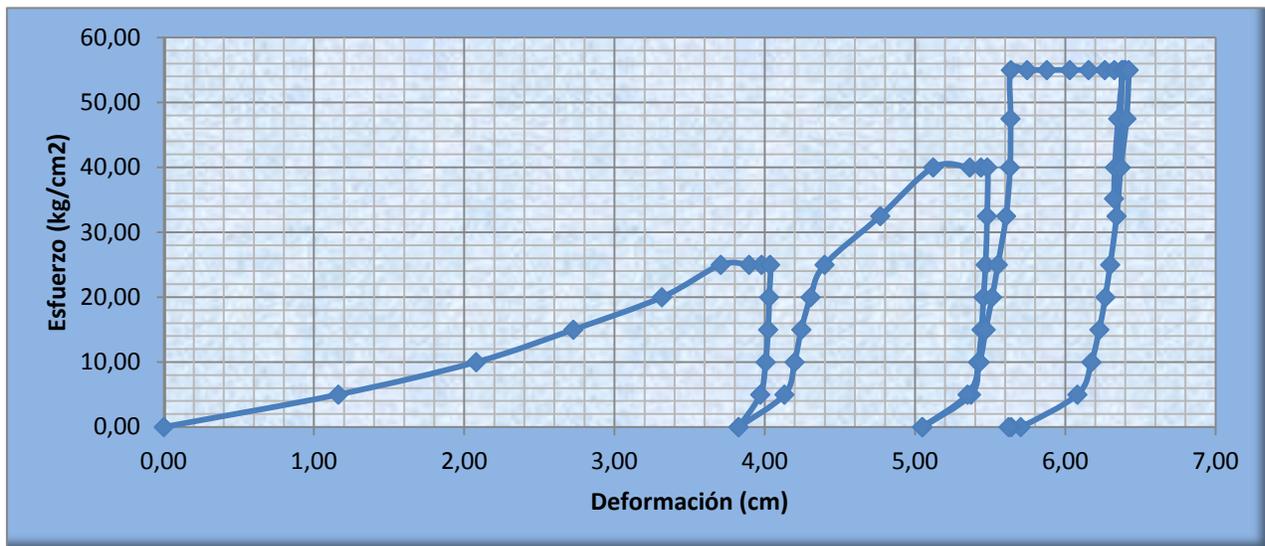


Figura 46. Curva promedio del Esfuerzo respecto a la Deformación de los materiales, definidos en ciclos de carga y descarga para el Odómetro #3, para los materiales del sitio Carazo.

En la Figura 46, se representan los resultados obtenidos del ensayo de odómetro realizado, se observan claramente tres pendientes en la curva, lo que representa tres módulos de deformación distintos para un mismo tipo de material pero a distintos niveles de

esfuerzo. A continuación se representa el comportamiento que presenta la densidad de los materiales al aumentar la deformación, producto de un incremento en el esfuerzo aplicado a los materiales.

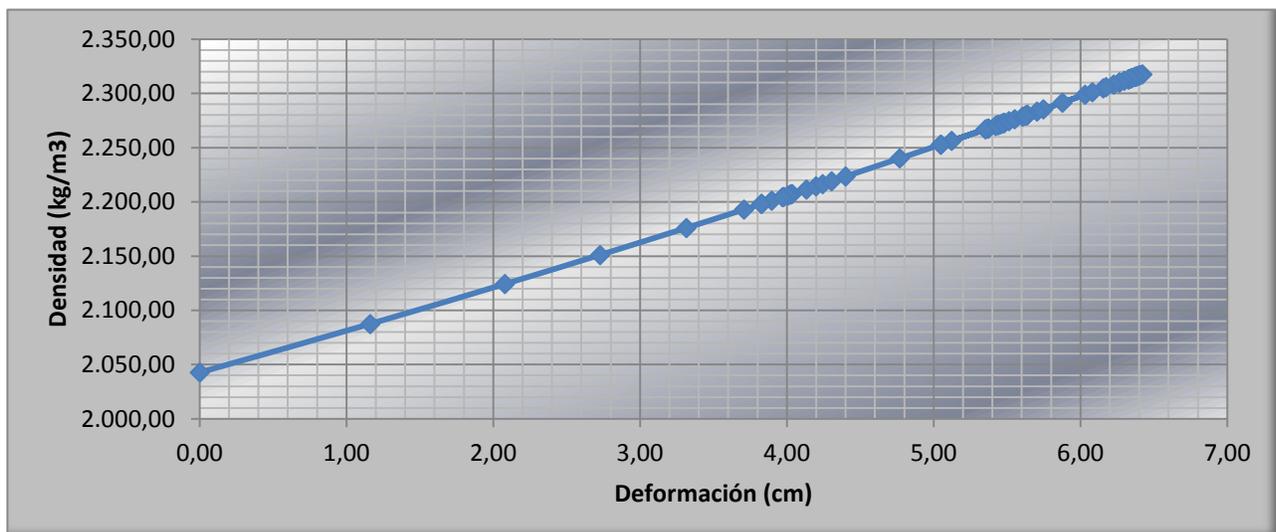


Figura 47. Comportamiento de la densidad del material conforme aumenta la deformación producto de un aumento en el esfuerzo, para los materiales del sitio Carazo en el odómetro #3.

Como se puede observar, el comportamiento que se presenta en la Figura 47, básicamente es lineal; esto, se debe a que al aumentar el esfuerzo sobre los materiales, experimentan una reducción de los vacíos entre sus alrededores y ocasionan un aumento en la densidad del material, que se observa reflejado en la curva anterior.

Seguidamente se representa el comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los

materiales. Se observa en la figura la tendencia demostrada en el Cuadro 25, de la sección de Apéndices, que conforme se incrementa el esfuerzo sobre los materiales, la relación de vacíos tiende a disminuir; de ahí que se representa la tendencia en la siguiente figura.

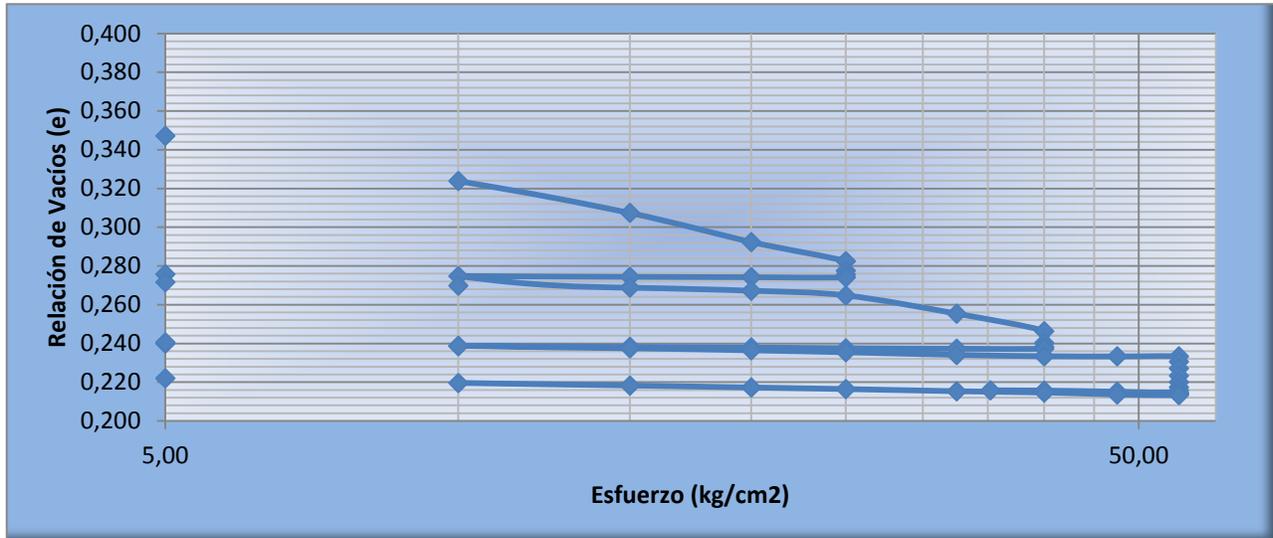


Figura 48. Comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo en los materiales del sitio Carazo, para el odómetro #3.

Una vez que se extraen los materiales del odómetro, se procede a su respectivo secado a horno, con la finalidad de realizar y obtener la granulometría de los materiales después de ensayados y de recibir la carga aplicada en el odómetro, para compararla con la granulometría inicial de los materiales y así determinar el grado de rotura de los granos y observar en que tamaño nominal de las mallas, se encuentra marcada esa diferencia debido básicamente al incremento paulatino de esfuerzos. El detalle de la granulometría inicial y final de los materiales utilizados en el ensayo de odómetro #3, para los materiales del sitio Carazo, se presenta a continuación.

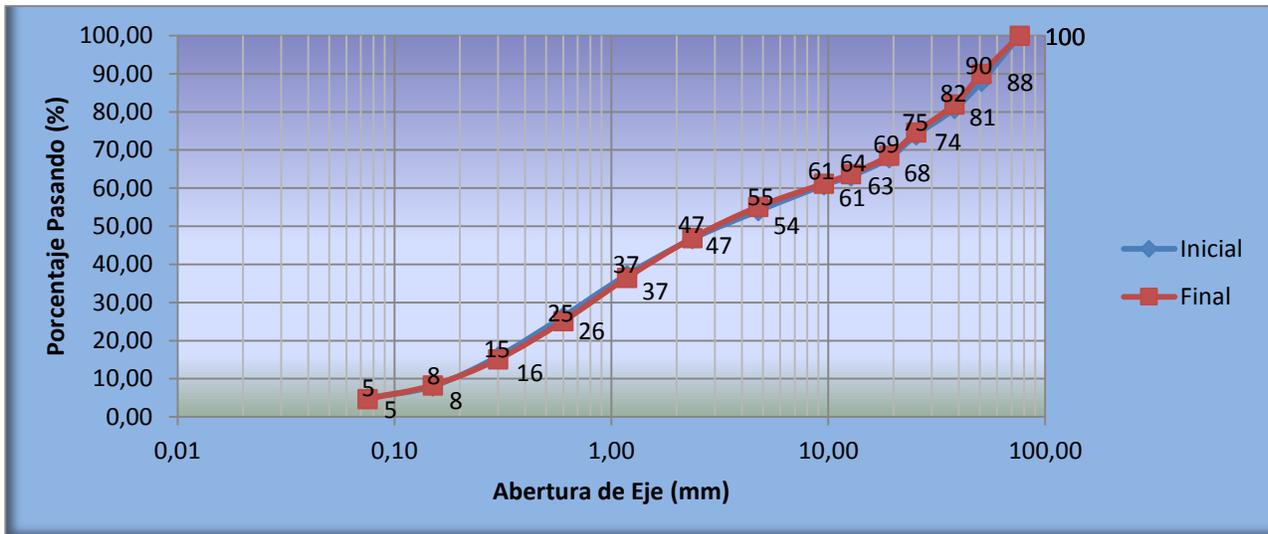


Figura 49. Comparación entre curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo odométrico a una densidad máxima del 90%, para los materiales del sitio Carazo.

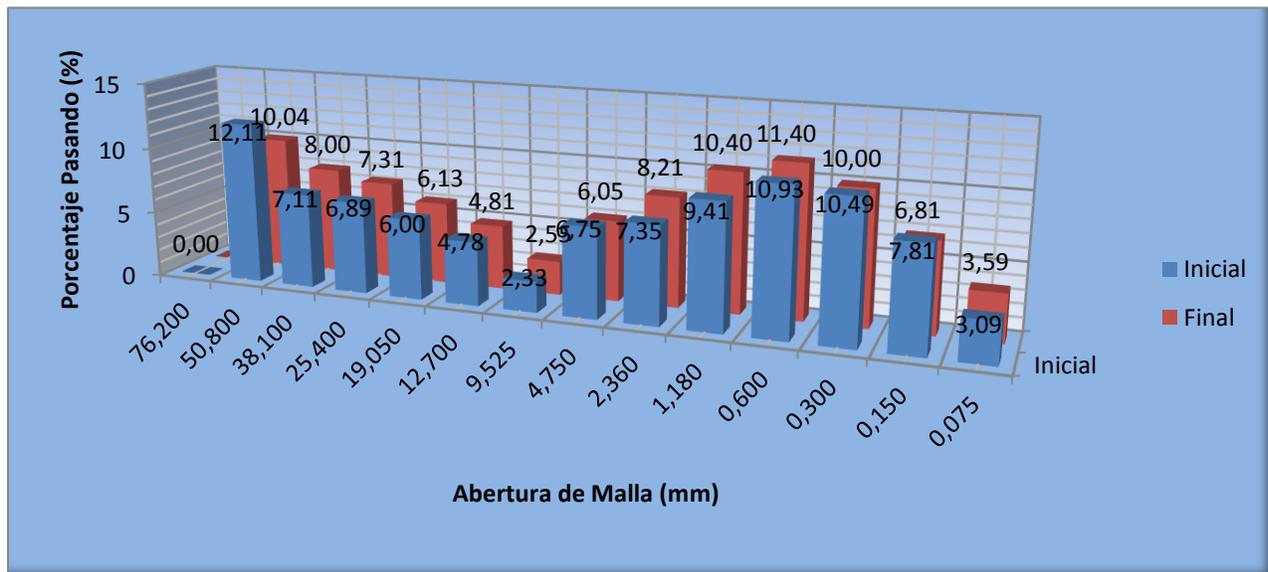


Figura 50. Comparación entre porcentajes de materiales retenidos para determinar el porcentaje de rotura de granos de los materiales del odómetro #3 del sitio Carazo.

Rotura de Granos para los Materiales del Odómetro #3 del sitio Carazo

Observando tanto las Figuras 49 y 50, se tiene que la fracción gruesa del material permanece muy constante en cuanto a porcentajes y tiene diferencias del orden de décimas de porcentaje. La fracción más fina del

material presenta un incremento un tanto más significativo respecto a la fracción gruesa, pero las diferencias básicamente son del orden pequeño.

CUADRO 14. PORCENTAJES DE ROTURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO CARAZO.				
Malla	Abertura	% Retenido Inicial	% Retenido Final	% Rotura Granos
3"	76,200	0	0	0
2"	50,800	12	10	2
1 1/2"	38,100	7	8	-1
1"	25,400	7	7	0
3/4"	19,050	6	6	0
1/2"	12,700	5	5	0
3/8"	9,525	2	3	-1
4	4,750	7	6	1
8	2,360	7	8	-1
16	1,180	9	10	-1
30	0,600	11	11	0
50	0,300	10	10	0
100	0,150	8	7	1
200	0,075	3	4	-1
Charola	0,060	5	5	0
				4%

Seguidamente se presentarán los resultados de la prueba de odómetro realizada a un 90% de la densidad máxima de laboratorio, para los materiales del sitio de préstamo Presa.

Como parte de este ensayo de odómetro, se obtuvo la curva de Esfuerzo versus Deformación de los materiales para cada uno de los sitios en estudio, la cual dicta el comportamiento que presentaron. Los resultados obtenidos se presentan seguidamente.

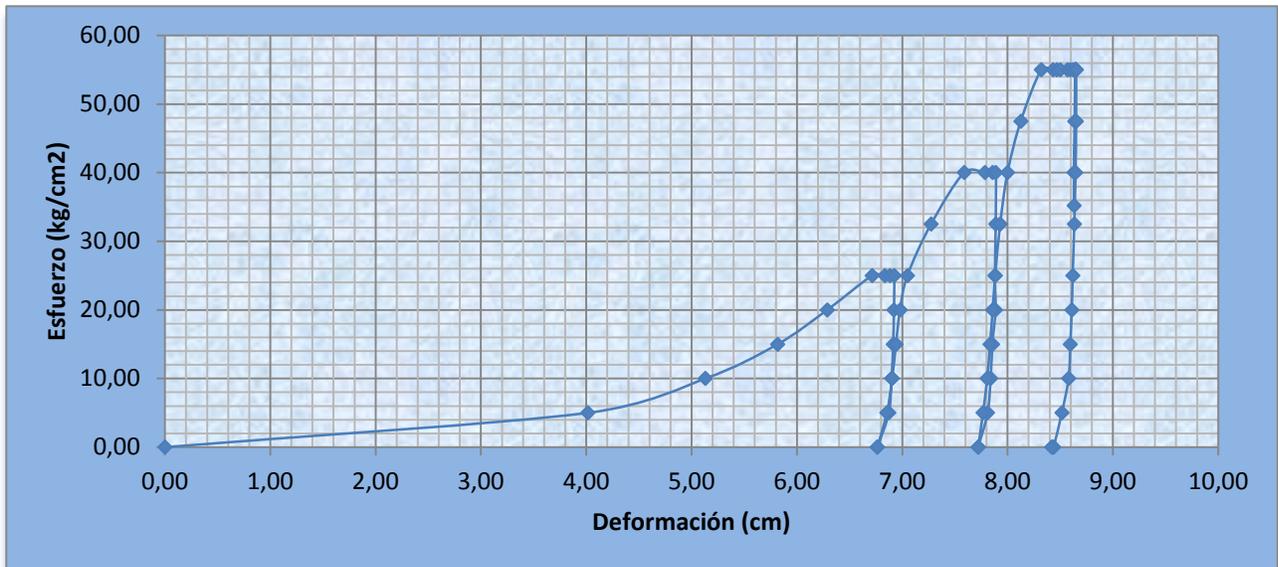


Figura 51. Curva promedio del esfuerzo respecto de la deformación de los materiales, definidos en ciclos de carga y descarga para el odómetro #3, para los materiales del sitio Presa.

En la Figura 51, se representan los resultados obtenidos del ensayo de odómetro realizado, se observan claramente tres pendientes en la curva, lo que representa tres módulos de deformación distintos para un mismo tipo de material pero a distintos niveles de

esfuerzo. A continuación se representa el comportamiento que presenta la densidad de los materiales al aumentar la deformación, producto de un incremento en el esfuerzo aplicado a los materiales.

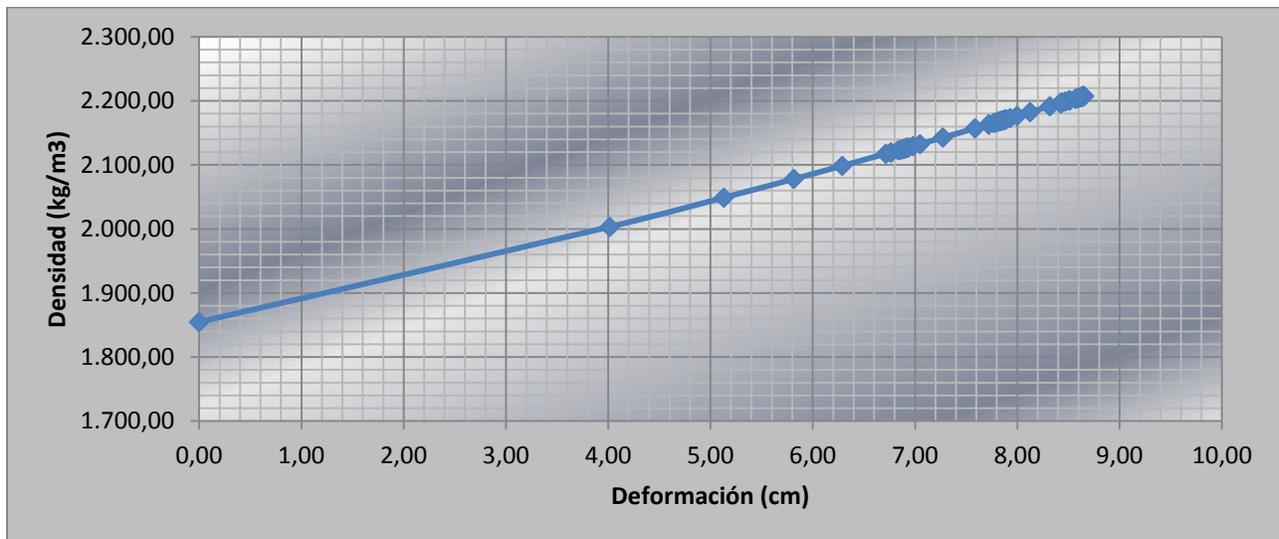


Figura 52. Comportamiento de la densidad del material conforme aumenta la deformación producto de un aumento en el esfuerzo, para los materiales del sitio Presa en el odómetro #3.

Como se puede observar, el comportamiento que se presenta en la Figura 52, básicamente es lineal; esto, se debe a que al

aumentar el esfuerzo sobre los materiales. Estos experimentan una reducción de los vacíos entre sus alrededores y ocasiona un aumento en la

densidad del material, lo que se observa reflejado en la curva anterior.

Seguidamente se representa el comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los

materiales. Se observa en la figura la tendencia demostrada en el Cuadro 29, de la sección de Apéndices, que conforme se incrementa el esfuerzo sobre los materiales, la relación de vacíos disminuye.

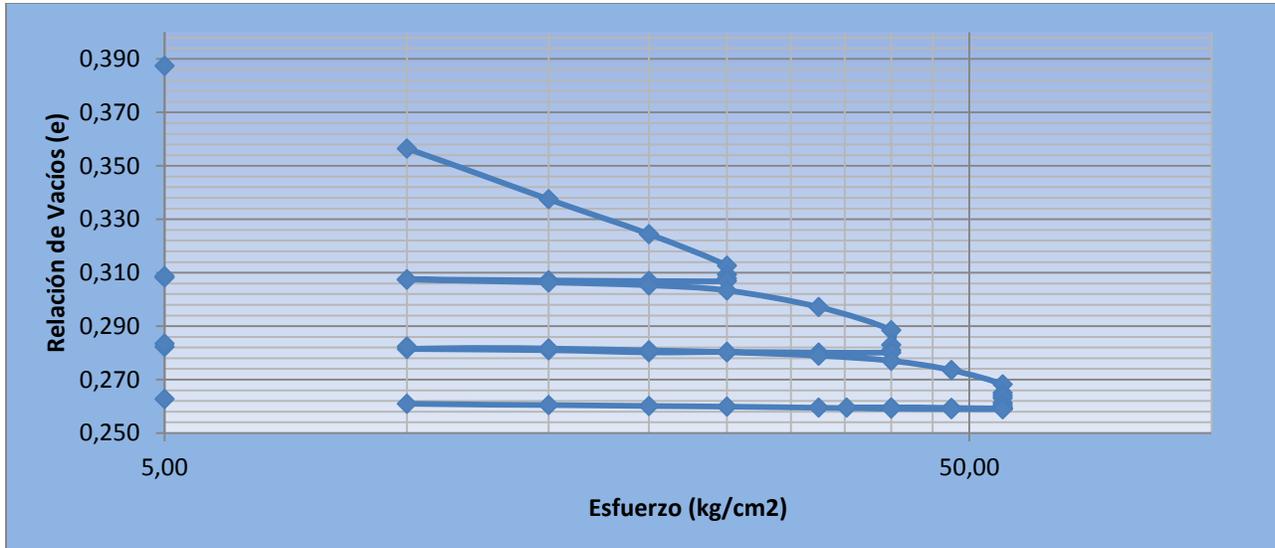


Figura 53. Comportamiento de la relación de vacíos conforme aumenta el esfuerzo en los materiales del sitio Presa, para el odómetro #3.

Una vez que se extraen los materiales del odómetro, se procede a su respectivo secado a horno, con la finalidad de realizar y obtener la granulometría de los materiales después de ensayados y de recibir la carga aplicada en el odómetro. Esto, para compararla con la granulometría inicial de los materiales, determinar el grado de rotura de los granos y observar en qué tamaño nominal de las mallas, se encuentra marcada esa diferencia, debida básicamente al incremento paulatino de esfuerzos. El detalle de la granulometría inicial y final de los materiales utilizados en el ensayo de odómetro #3, para los materiales del sitio Presa, se presenta a continuación.

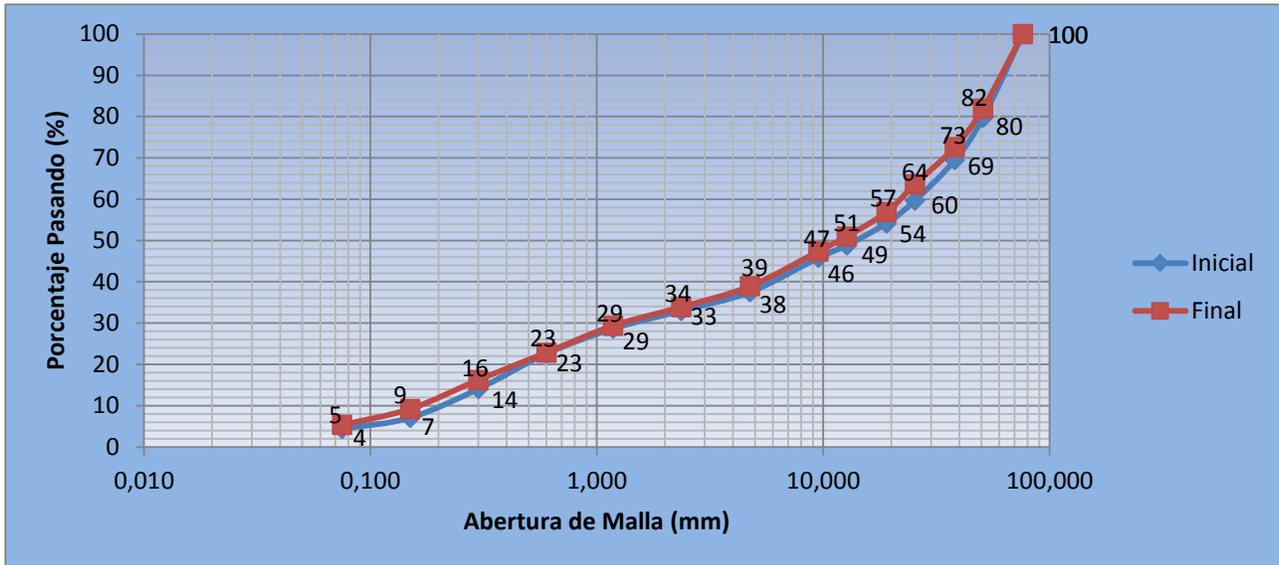


Figura 54. Comparación entre curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo odométrico a una densidad máxima del 90%, para los materiales del sitio Presa.

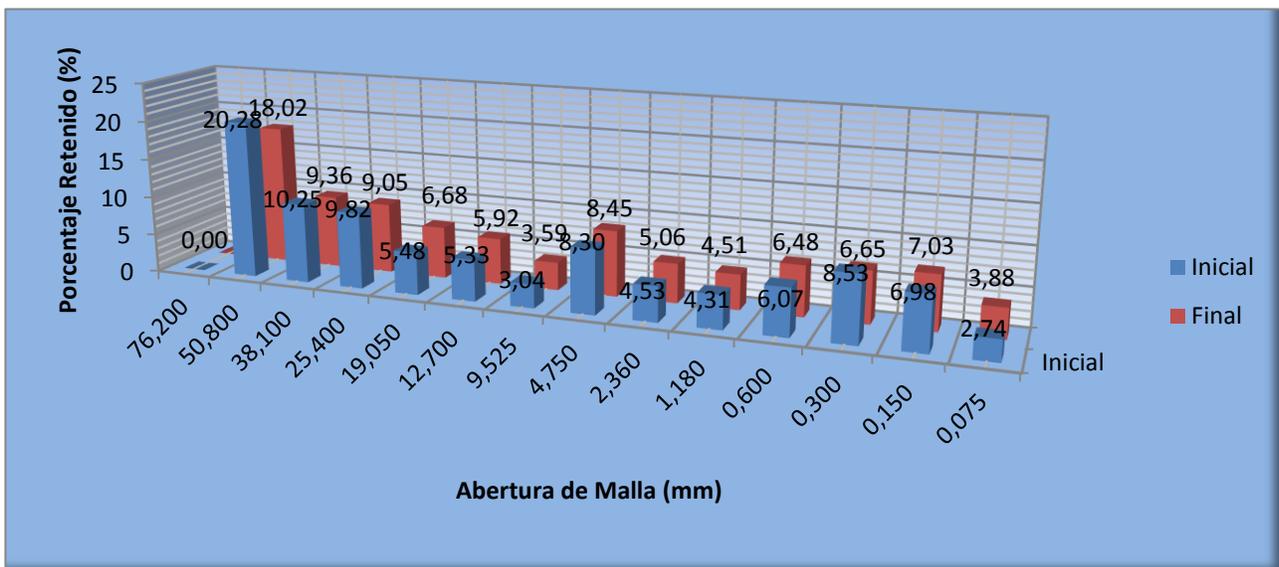


Figura 55. Comparación entre porcentajes de materiales retenidos para determinar el porcentaje de rotura de granos de los materiales del odómetro #3 del sitio Presa.

Rotura de Granos para los Materiales del Odómetro #3 del sitio Presa

Observando tanto las Figuras 54 y 55, se tiene que la fracción gruesa del material permanece muy constante en cuanto a porcentajes, con diferencias mínimas de

porcentaje. La fracción más fina del material presenta un incremento un tanto más notable y significativo, tal y como se ilustra en la figura anterior y se presenta en el siguiente cuadro.

CUADRO 15. PORCENTAJES DE ROTURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO PRESA.				
<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>% Retenido Inicial</i>	<i>% Retenido Final</i>	<i>% Rotura Granos</i>
3"	76,200	0	0	0
2"	50,800	20	18	2
1 1/2"	38,100	10	9	1
1"	25,400	10	9	1
3/4"	19,050	5	7	-2
1/2"	12,700	5	6	-1
3/8"	9,525	3	4	-1
4	4,750	8	8	0
8	2,360	5	5	0
16	1,180	4	5	-1
30	0,600	6	6	0
50	0,300	9	7	2
100	0,150	7	7	0
200	0,075	3	4	-1
Charola	0,060	4	5	-1
				6%

Comparación Ensayos Odométricos para los Materiales del Sitio Carazo

Al término de realizar las tres pruebas de compresión unidimensional para el caso de los materiales del sitio de préstamo Carazo, tomando como variable la densidad máxima de los materiales, estableciendo como porcentajes de

ensayo el 100%, 95% y 90% de la misma, se llega al punto de comparar las tres curvas que se desprenden de cada uno de estos ensayos de odómetro.

Se presenta una gráfica que resume estas tres curvas, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos y observar las variaciones en cuanto al módulo de deformabilidad que presentan los materiales ensayados bajo cada condición previamente establecida.

La realización de esta gráfica permite en manera conjunta, observar la tendencia que presentan los materiales una vez ejecutado el ensayo y permite determinar cuál es la deformación máxima alcanzada para cada caso en estudio, empleando para ello los mismos niveles de esfuerzo.

El conocer los resultados arrojados por esta prueba, permite brindar un parámetro inicial para el momento en que se inicie con la construcción de la presa, empleando estos materiales.

Cabe hacer notar, que el valor del módulo de deformación obtenido, mediante la ejecución de este ensayo, es un módulo previo, de un valor inferior al que se espera alcanzar conforme se avance con la construcción de la represa; éste, únicamente podrá ser determinado en el sitio de obra y en el proceso de ejecución.

Los resultados alcanzados por esta prueba de odómetro, se presentan en la siguiente figura.

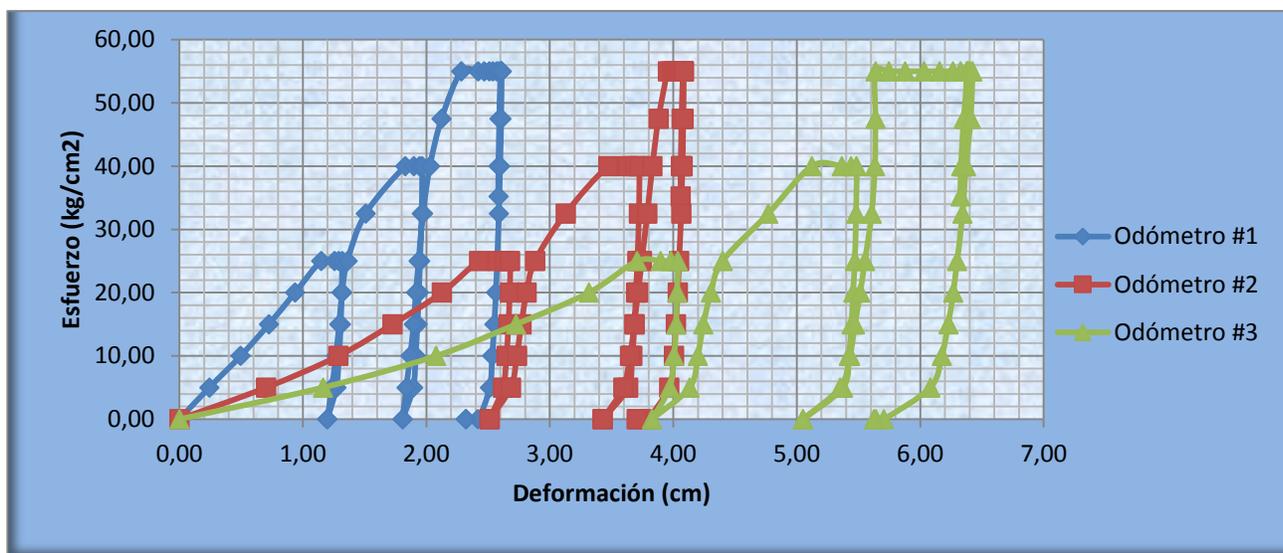


Figura 56. Comparación de curvas obtenidas en cada uno de los ensayos de odómetro realizados a los materiales del sitio Carazo.

La Figura 56, presenta en resumen el comportamiento de las tres curvas que se obtuvieron como parte de los ensayos realizados individualmente y la deformación obtenida en centímetros. A continuación, una curva que representa el Esfuerzo aplicado a los materiales respecto de la Deformación Unitaria en porcentaje; básicamente, la tendencia es la misma que la que se representa en la figura anterior y se muestra a continuación.

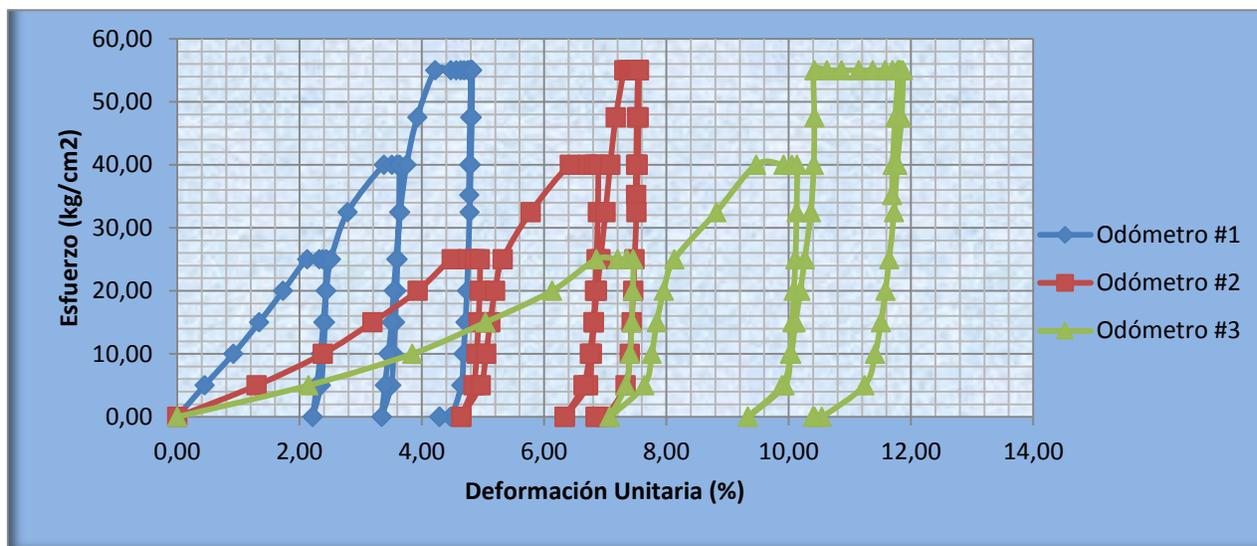


Figura 57. Comparación de las curvas de esfuerzo respecto de la deformación unitaria de los materiales del sitio Carazo.

Valores Máximos del Módulo de Deformabilidad para los Materiales del Sitio Carazo

A continuación se presentan los valores máximos obtenidos en cada uno de los ensayos de odómetro realizados. Se presentan los valores determinados en cada uno de los ensayos de odómetro realizados. Los valores obtenidos en cada uno de los puntos que conforman las diferentes pendientes de la anterior figura se

muestran en los Cuadros 32, 33 y 34 en la sección de Apéndices del presente informe. Además, se presenta el valor máximo obtenido de la deformación del material bajo la acción del máximo esfuerzo transmitido a los materiales.

CUADRO 16. VALORES MÁXIMOS DEL MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.				
Ensayo de Odómetro	Sitio de Préstamo	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Máximo Módulo Alcanzado (kg/cm ²)	Deformación Máxima (cm)
#1	Carazo	55,00	1.305,04	2,28
#2	Carazo	55,00	753,29	3,95
#3	Carazo	55,00	527,57	5,64

Comparación Ensayos Odométricos para los Materiales del Sitio Presa.

Al término de realizar las tres pruebas de compresión unidimensional para el caso de los materiales del sitio de préstamo Presa, tomando como variable la densidad máxima de los materiales, estableciendo como porcentajes de ensayo el 100%, 95% y 90% de la misma, se llega al punto de comparar las tres curvas que se desprenden de cada uno de estos ensayos de odómetro.

Se presenta una gráfica que resumirá estas tres curvas, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos y observar las variaciones en cuanto al módulo de deformabilidad que presentan los materiales

ensayados bajo cada condición previamente establecida.

La realización de esta gráfica permite, en manera conjunta, observar la tendencia que presentan los materiales una vez ejecutado el ensayo y permite determinar cuál es la deformación máxima alcanzada para cada caso en estudio; se emplea para ello los mismos niveles de esfuerzo, aplicados a los materiales del sitio Carazo.

Los resultados alcanzados por esta prueba de odómetro, se presentan en la siguiente figura.

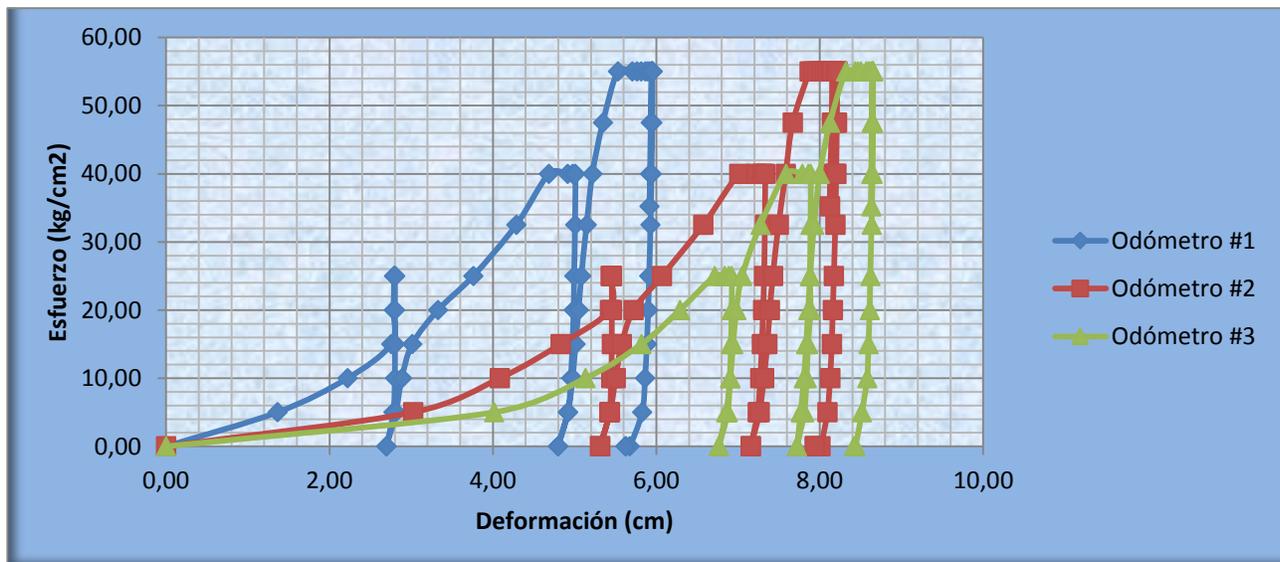


Figura 58. Comparación de curvas obtenidas en cada uno de los ensayos de odómetro realizados a los materiales del sitio Presa.

La Figura 58, presenta en resumen el comportamiento de las tres curvas que se obtuvieron como parte de los ensayos realizados individualmente y representan la deformación obtenida en centímetros. A continuación una curva que representa el Esfuerzo aplicado a los materiales respecto de la Deformación Unitaria en porcentaje, básicamente la tendencia es la

misma que la que se representa en la figura anterior y se muestra a continuación.

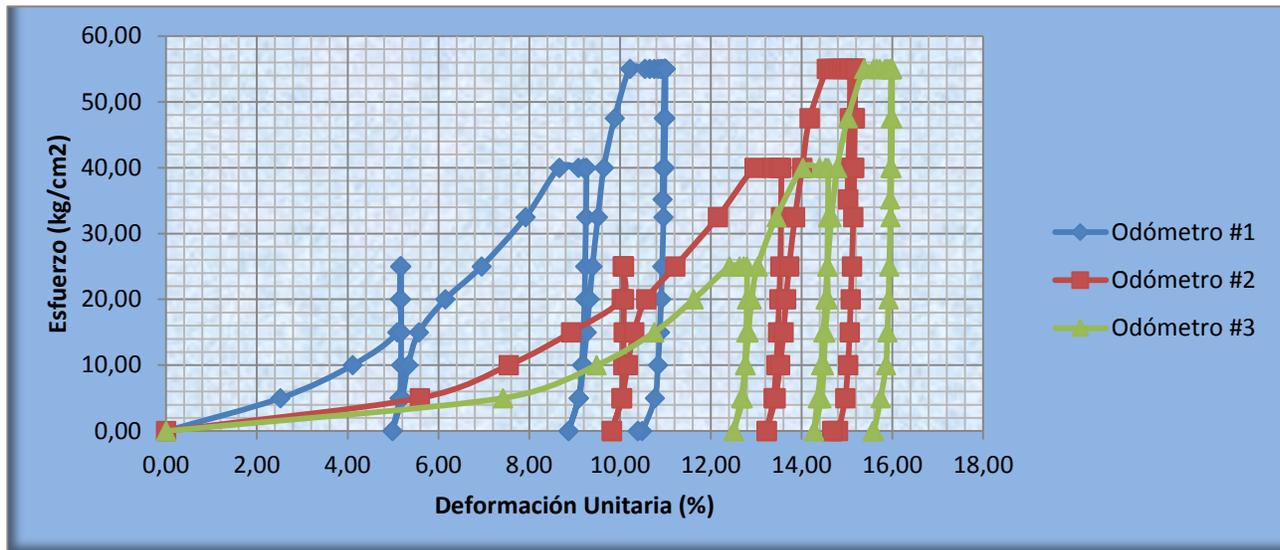


Figura 59. Comparación de las curvas de esfuerzo respecto de la deformación unitaria de los materiales del sitio Presa.

Valores Módulo de Deformabilidad para los Materiales del Sitio Presa

A continuación se presentan los valores máximos obtenidos en cada uno de los ensayos de odómetro realizados. Se presentan los valores determinados en cada uno de los ensayos de odómetro realizados. Los valores obtenidos en cada uno de los puntos que conforman las

diferentes pendientes de la anterior figura se muestran en los Cuadros 35, 36 y 37 en la sección de Apéndices del presente informe. Además, se presenta el valor máximo obtenido de la deformación del material bajo la acción del máximo esfuerzo transmitido a los materiales.

CUADRO 17. VALORES MÁXIMOS DEL MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.				
Ensayo de Odómetro	Sitio de Préstamo	Esfuerzo Máximo (kg/cm ²)	Máximo Módulo Alcanzado (kg/cm ²)	Deformación Máxima (cm)
#1	Presa	55,00	538,07	5,53
#2	Presa	55,00	377,60	7,88
#3	Presa	55,00	340,51	8,32

Pesos Volumétricos

Para el sitio de préstamo Carazo y cada una de las trincheras que se realizaron en el mismo, se realizó el ensayo de pesos volumétricos.

Los resultados de cada una de estas trincheras, se presentan, tanto en estado suelto como envarillado de los

materiales, que fueron los dos tipos de metodologías que se implementaron. Los

resultados obtenidos se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 18. VALORES OBTENIDOS EN CADA UNA DE LAS TRINCHERAS ANALIZADAS DE LOS PESOS VOLUMÉTRICOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Peso Volumétrico (kg/m³)	Trinch. 1	Trinch. 5	Trinch. 9	Trinch. 12	Trinch. 16	Trinch. 19	Trinch. 21	Trinch. 22	Trinch. 23	Promedio (kg/m³)
Peso Vol. Suelto Finos	1.595,00	1.391,00	1.552,00	1.563,00	1.492,00	1.535,00	1.415,00	1.514,00	1.391,00	1.494,22
Peso Vol. Envar. Finos	1.692,00	1.533,00	1.635,00	1.652,00	1.641,00	1.640,00	1.553,00	1.674,00	1.563,00	1.620,33
Peso Vol. Suelto Gruesos	1.838,00	1.617,00	1.770,00	1.801,00	1.677,00	1.759,00	1.636,00	1.776,00	1.538,00	1.712,44
Peso Vol. Envar. Gruesos	1.971,00	1.769,00	1.903,00	1.883,00	1.822,00	1.905,00	1.778,00	1.880,00	1.656,00	1.840,78

Para el caso del sitio de préstamo Presa, se realizó el ensayo de pesos volumétricos, donde los materiales de cada una de las trincheras que se realizaron en el sitio, se

utilizaron para determinar este parámetro tanto en estado suelto como envarillado. Los resultados de este ensayo se muestran y detallan a continuación.

CUADRO 19. VALORES OBTENIDOS EN CADA UNA DE LAS TRINCHERAS ANALIZADAS DE LOS PESOS VOLUMÉTRICOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Peso Volumétrico (kg/m³)	Trinchera 1	Trinchera 2	Trinchera 3	Promedio (kg/m³)
Peso Vol. Suelto Finos	1.478,70	1.550,86	1.517,69	1.515,75
Peso Vol. Envar. Finos	1.654,45	1.670,16	1.656,77	1.660,46
Peso Vol. Suelto Gruesos	1.478,70	1.575,35	1.585,86	1.546,64
Peso Vol. Envar. Gruesos	1.667,88	1.663,03	1.648,89	1.659,93

Gravedades Específicas y Absorción

El ensayo para determinar la Gravedad Específica y la Adsorción de los materiales de los sitios de préstamo Carazo y Presa, se realiza tanto para la parte fina, como también para la parte gruesa de los materiales. Este ensayo se realiza para la muestra en conjunto, es decir, los valores arrojados de esta prueba corresponden al material homogenizado de todas y cada una de las trincheras.

Los parámetros iniciales bajo los cuales se obtuvieron los resultados para este ensayo, se detallan en la sección de Apéndices del presente informe.

Inicialmente se presentarán los resultados para los materiales del sitio Carazo.

Tanto para determinar la gravedad específica de los gruesos como de los finos, las fórmulas que se involucran para cada caso son independientes una de las otras. De ahí que a continuación se presentaran las ecuaciones que se utilizaron para cada caso.

En el caso de la gravedad específica de los finos, las ecuaciones que se utilizan corresponden a las siguientes:

$$G_s = \frac{A}{(V-W)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

En donde se tiene que;

- G_s = Gravedad Específica Bruta (adimensional).
- A = Peso de la Muestra Seca (gramos).
- V = Volumen del Picnómetro (gramos).
- W = Peso del Agua Agregada (gramos).

$$G_{s\ s.s.s} = \frac{B}{(V-W)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

En donde se tiene que;

- G_{s s.s.s.} = Gravedad Específica Saturada Superficie Seca (adimensional).
- B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).
- V = Volumen del Picnómetro (gramos).
- W = Peso del Agua Agregada (gramos).

En el caso de la gravedad específica de los gruesos, las ecuaciones que se utilizan corresponden a las siguientes:

$$G_s = \frac{A}{(B-W)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

En donde se tiene que;

- G_s = Gravedad Específica Bruta (adimensional).
- A = Peso de la Muestra Seca (gramos).
- B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).
- W = Peso Sumergido (gramos).

$$G_{s\ s.s.s} = \frac{B}{(B-W)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 5}$$

- G_{s s.s.s.} = Gravedad Específica Saturada Superficie Seca (adimensional).
- B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).
- W = Peso Sumergido (gramos).

Por último, la adsorción de los materiales finos y gruesos involucra la misma ecuación para su obtención, la misma se presenta a continuación.

$$\text{Absorción} = \frac{(B-A)}{A} * 100 \dots\dots \text{Ecuación 6}$$

- B = Peso de la Muestra Saturada Superficie Seca (gramos).
- A = Peso de la Muestra Seca (gramos).

Con base en estas ecuaciones anteriormente mostradas y al Cuadro 38 que se presenta en la sección de Apéndices, en donde se presentan los parámetros iniciales que se emplean para alcanzar los resultados, se obtienen los siguientes resultados, tanto para los materiales finos como para los gruesos del sitio Carazo.

CUADRO 20. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES FINOS DEL SITIO CARAZO.	
Gravedad Específica Bruta de Finos	2,24
Gravedad Específica Bruta S.S.S de Finos	2,42
Porcentaje de Absorción de Finos	7,87

CUADRO 21. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES GRUESOS DEL SITIO CARAZO.	
Gravedad Específica Bruta de Gruesos	2,54
Gravedad Específica Bruta S.S.S de Gruesos	2,62
Porcentaje de Absorción de Gruesos	3,08

A continuación se presentan, de manera resumida, los valores obtenidos de la absorción de los materiales, tanto de los finos como de los gruesos. Para efectos de considerar el material de manera homogénea, los resultados obtenidos para cada tipo de material, se promediaron para obtener un valor más representativo de los enrocados. Este valor se presenta a continuación:

CUADRO 22. VALOR PROMEDIO DE LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.	
Muestra del Material	% Adsorción
Muestra de Finos	7,87
Muestra de Gruesos	3,08

Los resultados, anteriormente mostrados, se utilizarán para caracterizar los enrocados y para clasificar el tipo de grano según el grado de su dureza.

A continuación se presentan los resultados para los materiales del sitio de préstamo Presa. Se hace referencia al Cuadro 39, de la sección de Apéndices, donde se muestran los parámetros iniciales para la obtención de los siguientes resultados que a continuación se detallan para los materiales de este sitio.

CUADRO 23. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES FINOS DEL SITIO PRESA.	
Gravedad Específica Bruta de Finos	2,35
Gravedad Específica Bruta S.S.S de Finos	2,49
Porcentaje de Absorción de Finos	6,27

CUADRO 24. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES GRUESOS DEL SITIO PRESA.	
Gravedad Específica Bruta de Gruesos	2,61
Gravedad Específica Bruta S.S.S de Gruesos	2,67
Porcentaje de Absorción de Gruesos	2,25

A continuación se presentan, de manera resumida, los valores obtenidos de la absorción de los materiales, tanto de los finos como también de los gruesos. Para efectos de considerar el material, de manera homogénea, los resultados obtenidos para cada tipo de material se promediaron para obtener un valor más representativo de los enrocados. Este valor se presenta a continuación:

CUADRO 25. VALOR PROMEDIO DE LA ABSORCIÓN DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.	
Muestra del Material	% Adsorción
Muestra de Finos	6,27
Muestra de Gruesos	2,25

Abrasión o Desgaste de los Materiales

El desgaste de materiales que se realizó, corresponde al Tipo A en la máquina de Los Ángeles, que se presenta su procedimiento de ejecución, en la sección de este informe de Metodologías de Ejecución de los Ensayos. Los resultados que se obtuvieron al realizar esta prueba, en la máquina de Los Ángeles, se presentan y se detallan a continuación, tanto para los materiales del sitio Carazo como del sitio Presa.

CUADRO 26. RESULTADOS DE LA ABRASIÓN DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO A UTILIZAR COMO ENROCADO.

Peso Inicial (kg)	Peso Final (kg)	Porcentaje de Pérdida (%)
5000,00	3545,00	29,10

CUADRO 27. RESULTADOS DE LA ABRASIÓN DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA A UTILIZAR COMO ENROCADO.

Peso Inicial (kg)	Peso Final (kg)	Porcentaje de Pérdida (%)
5000,00	3955,00	20,90

Como se observa en los anteriores cuadros, el porcentaje de pérdida, al realizar esta prueba, es alto para ambos casos. El resultado mostrado se utilizará para clasificar el tipo de grano de los enrocados según su dureza, que se presentará más adelante en esta sección de este informe.

Intemperismo Acelerado

La prueba de Intemperismo Acelerado o de la Sanidad de los materiales se realiza tanto para el agregado grueso como para el fino de los materiales por utilizar como enrocado. La secuencia de obtención de los resultados, se resume en la sección de Apéndices.

Inicialmente se presentan los resultados obtenidos para los materiales del sitio Carazo y seguidamente se presentan los resultados para el caso de los materiales del sitio Presa.

Como los enrocados están compuestos por la mezcla entre gruesos y finos, los valores de pérdida por sanidad se deben promediar, para obtener un porcentaje que involucre a ambos tamaños; es decir, tanto a los finos como a los gruesos. El resultado promedio de la pérdida por sanidad de los materiales, se presenta a continuación.

CUADRO 28. VALOR PROMEDIO DE PÉRDIDA POR SANIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Agregado	Porcentaje de Pérdida	Promedio
Fino	13,01%	8,00%
Grueso	2,99%	

Seguidamente se detallan los resultados obtenidos para los materiales del sitio de préstamo Presa.

CUADRO 29. VALOR PROMEDIO DE PÉRDIDA POR SANIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Agregado	Porcentaje de Pérdida	Promedio
Fino	7,94%	5,45%
Grueso	2,97%	

Ruptura de Granos

La Ruptura de Granos es una prueba índice, utilizada para la clasificación de los granos según su dureza. Se realiza para los materiales, tanto del sitio Carazo, como del sitio Presa. Para su determinación se emplea la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{P}{N_c} \dots \dots \dots \text{Ecuación 7}$$

En donde se tiene que;

- P_a = Carga de Ruptura de Granos (kg).
- P = Carga Máxima registrada al momento de la falla de una de las tres muestras (kg).
- N_c = Número de Contactos Total.

Esta prueba se realiza para dos estados de los materiales:

- Secado al Aire.
- Saturado Superficie Seca.

Se deben realizar al menos diez determinaciones por cada uno de los tamaños nominales de 2 pulgadas, 1 ½ pulgadas y 1 pulgada. Sin embargo, el tamaño utilizado para

clasificar los enrocados, según su dureza de grano, es el tamaño nominal de 2 pulgadas; los otros dos se realizan para verificar el comportamiento en cuanto a resistencia de los materiales seleccionados.

Cabe destacar que para los materiales del sitio Carazo, no se contaba con las cantidades suficientes de material para realizar el mínimo establecido de diez determinaciones

para el tamaño nominal de 2 pulgadas, de ahí que en las tablas que se presentan en la sección de Apéndices, aparecen únicamente seis determinaciones por estado de los materiales.

Los resultados se presentan a continuación para los materiales del sitio Carazo inicialmente.

CUADRO 30. VALORES OBTENIDOS DE RUPTURA DE GRANOS ESTADO SECO AL AIRE PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Tamaño	Carga Ruptura Promedio (kg)	Promedio General (kg)
2"	342,73	334,70
1 1/2"	389,20	
1"	272,17	

CUADRO 31. VALORES OBTENIDOS DE RUPTURA DE GRANOS ESTADO SATURADO SUPERFICIE SECA PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Tamaño	Carga Ruptura Promedio (kg)	Promedio General (kg)
2"	516,19	389,80
1 1/2"	518,21	
1"	135,00	

Seguidamente, se presentan los resultados para el ensayo de ruptura de granos Pa, correspondiente a los materiales del sitio Presa, en sus dos estados ya establecidos. Las

determinaciones para llegar a obtener estos valores se presentan en la sección de Apéndices de este informe.

CUADRO 32. VALORES OBTENIDOS DE RUPTURA DE GRANOS ESTADO SECO AL AIRE PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Tamaño	Carga Ruptura Promedio	Promedio General
2"	900,78	643,30
1 1/2"	656,94	
1"	372,17	

CUADRO 33. VALORES OBTENIDOS DE RUPTURA DE GRANOS ESTADO SATURADO SUPERFICIE SECA PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Tamaño	Carga Ruptura Promedio	Promedio General
2"	702,88	495,46
1 1/2"	436,26	
1"	347,25	

Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura

Tanto el Coeficiente de Uniformidad como el Coeficiente de curvatura se obtiene de la aplicación de las siguientes ecuaciones. Estos, se basan en las curvas granulométricas de los materiales para las distintas pruebas de odómetro que se realizaron.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

En donde se tiene que;

C_u = Coeficiente de Uniformidad (adimensional).

D_{60} = Abertura de Malla pasando el 60% de los Materiales (mm).

D_{10} = Abertura de Malla pasando el 10% de los Materiales (mm).

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

En donde se tiene que;

C_c = Coeficiente de Curvatura (adimensional).

D_{30} = Abertura de Malla pasando el 30% de los Materiales (mm).

D_{60} = Abertura de Malla pasando el 60% de los Materiales (mm).

D_{10} = Abertura de Malla pasando el 10% de los Materiales (mm).

Los resultados obtenidos para cada prueba de odómetro para los materiales de los sitios Carazo y Presa se presentan a continuación.

CUADRO 34. VALORES OBTENIDOS PARA LOS COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO CARAZO.						
Granulometría Ensayada	Prueba de Odómetro	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Coeficiente de Uniformidad (C_u)	Coeficiente de Curvatura (C_c)
Inicial	#1	0,19	0,75	9,00	47,37	0,33
Final	#1	0,14	0,65	9,00	64,29	0,34

CUADRO 35. VALORES OBTENIDOS PARA LOS COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO CARAZO.						
Granulometría Ensayada	Prueba de Odómetro	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Coeficiente de Uniformidad (C_u)	Coeficiente de Curvatura (C_c)
Inicial	#2	0,19	0,75	9,00	47,37	0,33
Final	#2	0,12	0,65	9,50	79,17	0,37

CUADRO 36. VALORES OBTENIDOS PARA LOS COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO CARAZO.						
Granulometría Ensayada	Prueba de Odómetro	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Coeficiente de Uniformidad (C_u)	Coeficiente de Curvatura (C_c)
Inicial	#3	0,19	0,75	9,00	47,37	0,33
Final	#3	0,19	0,80	8,50	44,74	0,40

Seguidamente se presentan los materiales del sitio de préstamo Presa, aplicando resultados obtenidos para el caso de los las mismas ecuaciones anteriormente mostradas.

CUADRO 37. VALORES OBTENIDOS PARA LOS COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO PRESA.						
Granulometría Ensayada	Prueba de Odómetro	D₁₀ (mm)	D₃₀ (mm)	D₆₀ (mm)	Coefficiente de Uniformidad (C_u)	Coefficiente de Curvatura (C_c)
Inicial	#1	0,20	1,50	26,00	130,00	0,43
Final	#1	0,18	1,30	22,00	122,22	0,43

CUADRO 38. VALORES OBTENIDOS PARA LOS COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO PRESA.						
Granulometría Ensayada	Prueba de Odómetro	D₁₀ (mm)	D₃₀ (mm)	D₆₀ (mm)	Coefficiente de Uniformidad (C_u)	Coefficiente de Curvatura (C_c)
Inicial	#2	0,20	1,50	26,00	130,00	0,43
Final	#2	0,16	0,85	22,00	137,50	0,21

CUADRO 39. VALORES OBTENIDOS PARA LOS COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA DE LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO PRESA.						
Granulometría Ensayada	Prueba de Odómetro	D₁₀ (mm)	D₃₀ (mm)	D₆₀ (mm)	Coefficiente de Uniformidad (C_u)	Coefficiente de Curvatura (C_c)
Inicial	#3	0,20	1,50	26,00	130,00	0,43
Final	#3	0,16	1,40	22,00	137,50	0,56

Clasificación de los Enrocados

Los materiales por utilizar como enrocado, se clasifican según Raúl Marsal en cuanto a la dureza de su grano en tres tipos:

- Granos Duros.
- Granos Semiduros.
- Granos Blandos.

Para alcanzar esta clasificación es necesario el empleo de varias de las pruebas, cuyos resultados se mostraron anteriormente. El cuadro de clasificación de enrocados, determinado por Raúl Marsal se presenta a continuación.

CUADRO 40. CLASIFICACIÓN DE LOS ENROCADOS SEGÚN LA DUREZA DE SUS GRANOS.

Material	P_a $d_n=2''$ (kg)	Absorción (%)	Desgaste (%)	Granulometría	Cu	Tipo Enrocamiento
Granos Duros	> 1000	1 a 2,5	10 a 15	Uniforme	1 a 3	1 U
				Bien Graduado	> 10	1 W
Granos Semiduros	500 a 1000		15 a 25	Uniforme	1 a 3	2 U
				Bien Graduado	> 10	2 W
Granos Blandos	< 500	2,5 a 15	> 25	Uniforme	1 a 3	3 U
				Bien Graduado	> 10	3 W

Con base en los resultados de las pruebas realizadas a los diferentes materiales, tanto del sitio Carazo como del sitio Presa, que según a la clasificación de los enrocados dependiendo de la dureza de sus granos propuso por Raúl Marsal, los materiales del sitio Carazo clasifican como granos blandos, mientras que los materiales del sitio Presa clasifican como granos semiduros; esto, según el Cuadro 40 anteriormente mostrado. La respectiva discusión de esta clasificación se lleva a cabo en la sección de Análisis de Resultados del presente informe.

Clasificación del Origen Mineralógico de los Materiales

Para obtener los resultados de esta prueba, se tomaron un total de cinco muestras de las más representativas del enrocado para cada uno de los sitios a los que se realizó la valoración respectiva de sus materiales, con la finalidad de realizar un corte de sección delgada a cada una de ellas y poder determinar los minerales presentes en cada una de ellas y al final poder brindar una clasificación geológica de los materiales presentes en los sitios de préstamo Carazo y Presa.

Los resultados de los materiales presentes en el sitio Carazo se detallan a continuación.

Sección Delgada Roca #1

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Magnetita.
- Augita.
- Cuarzo.
- Sericita.
- Clorita.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionado, es que era un cuerpo rocoso bastante alterado, las plagioclasas están sericitadas y al realizar el corte y observarlo al microscopio se notan betas de cuarzo. La clasificación que se desprende según el tipo de roca, arroja que pertenece a la familia de las **Rocas Ígneas, Intrusiva**.

Sección Delgada Roca #2

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Olivino.
- Plagioclasas.

- Augitas.
- Magnetita.
- Sericita.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionado, consistió en que algunas plagioclasas se encuentran reventadas y rellenas de Sericita debido a la alteración. La matriz de la roca está totalmente rellena o compuesta de plagioclasita lo que hace que la roca sea más compacta. La clasificación que se desprende del tipo de roca arroja que la misma es de origen volcánico y clasifica como una **Roca Ígnea Andesita**.

Sección Delgada Roca #3

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Magnetita.
- Fósiles.
 - Foraminíferos.
 - Algas.
 - Globigerinos.
- Augitas.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionado consistió que la misma se encuentra muy alterada, con mucha presencia de fósiles. Las plagioclasas que se encuentran en la roca se encuentran muy alteradas. La clasificación que se desprende del tipo de roca arroja que la misma es de origen **Sedimentario** y clasifica como una **Caliza Fosilífera**.

Sección Delgada Roca #4

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Augitas.
- Magnetita.
- Óxidos de Hierro.
- Fragmentos de roca con plagioclasitas.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionado, consistió en que es una roca bastante alterada, las plagioclasas se encuentran rellenas y reventadas por su alteración. La clasificación que se desprende del tipo de roca arroja que la misma es de origen volcánico y clasifica como una **Roca Ígnea Andesita Basáltica**.

Sección Delgada Roca #5

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Magnetita.
- Fragmentos de Roca Ígnea Plagioclasitas.
- Óxidos de Hierro.
- Plagioclasas.
- Augitas.

La descripción que se brindó al tipo de roca seleccionado, consistió en que es una roca bastante alterada. Presenta algunas plagioclasas reventadas y sericitadas. Además se presentan bastantes fragmentos de roca con plagioclasitas. La clasificación que se desprende del tipo de roca arroja que la misma es de origen volcánico y clasifica como una **Roca Ígnea tipo Brecha**.

Al final, se concluye que la mayor parte del material presente en el sitio de préstamo Carazo es de origen Ígneo, sin embargo, se desprenden del sitio ciertas muestras de origen sedimentario que tienen su porcentaje de representación en el Enrocado.

Cabe destacar que estos materiales seleccionados se tomaron en cuenta teniendo en cuenta el criterio técnico de uno de los Geólogos del proyecto, además del Ingeniero que selecciono el sitio Carazo como uno de los sitios posibles de préstamo para utilizar en la construcción del proyecto. Es por ello que fueron escogidas estas cinco muestras, siendo las más representativas de los materiales extraídos del sitio de préstamo respetando los criterios de los profesionales a los que se les tomó su opinión.

Se detallan mediante ilustraciones los resultados obtenidos de realizar este ensayo. Las muestras que se analizaron antes de realizar el ensayo se presentan a continuación.



Figura 60. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #1 para los materiales del sitio Carazo.



Figura 63. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #4 para los materiales del sitio Carazo.



Figura 61. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #2 para los materiales del sitio Carazo.



Figura 64. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #5 para los materiales del sitio Carazo.



Figura 62. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #3 para los materiales del sitio Carazo.

Los resultados de los materiales presentes en el sitio Presa mayoritariamente, se detallan a continuación.

Sección Delgada Roca #1

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arrojó como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Magnetita.
- Fósiles.
 - Foraminíferos.
 - Globigerínos.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionada arrojó que la misma se encuentra bastante alterada, donde las plagioclasas que se encontraron en la roca son de un tamaño bastante pequeño. Además tal y como se hizo mención anteriormente, hay presencia de diferentes fósiles dentro de la misma.

La clasificación que se desprende del tipo de roca, arroja que la misma es de origen **Sedimentario** y se clasifica como una **Arenisca Fosilífera**.

Sección Delgada Roca #2

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Augitas.
- Magnetitas.
- Vidrio.
- Olivino.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionada, determinó que la misma presenta algunas plagioclasas con cierta alteración o Sericita, es una roca dura, constituida por granos fuertes.

La clasificación que se desprende del tipo de roca, arroja que la misma es de origen volcánico lo que la convierte en una **Roca Ígnea** y se clasifica como un **Basalto**.

Sección Delgada Roca #3

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arroja como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Augita.
- Olivino.
- Magnetita.

La descripción que se le brindó al tipo de roca seleccionada, determino que la misma presenta en la matriz de la roca, gran presencia de plagioclasitas, con presencia de gran cantidad

de olivino y en menores porcentajes presencia de minerales como la augita y la magnetita.

La clasificación que se desprende del tipo de roca, arroja que la misma es de origen volcánico, correspondiendo a una **Roca Ígnea**, la cual se clasifica como una **Andesita Basáltica**.

Sección Delgada Roca #4

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arrojo como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Augita.
- Olivino.
- Magnetita.
- Sericita.
- Epídote.

La descripción que se brindó al tipo de roca seleccionada, determinó que la misma se encuentra bastante alterada, en donde algunas plagioclasas se encuentran bastantes reventadas, esto por la presencia de la Sericita en la misma.

La clasificación que se desprende del tipo de roca arroja que la misma es de origen volcánico, correspondiendo a una **Roca Ígnea**, la cual se clasifica como una **Andesita Alterada**.

Sección Delgada Roca #5

El ensayo de sección delgada practicada a esta roca, arrojo como minerales presentes los siguientes:

- Plagioclasas.
- Augita.
- Olivino.
- Magnetita.

La descripción que se brindó al tipo de roca seleccionada determinó que algunas plagioclasas se encuentran alteradas con presencia de Sericita.

La clasificación que se desprende del tipo de roca, arroja que la misma es de origen volcánico, correspondiendo a una **Roca Ígnea**, la cual se clasifica como una **Andesita**.

Al final, se concluye que la mayor parte del material presente en el sitio de préstamo Presa es de origen Ígneo, sin embargo, se desprenden del sitio ciertas muestras de origen Sedimentario, las cuales a pesar de ser minorías se encuentran presentes en el lugar, por lo cual tienen su porcentaje de representación en el Enrocado.

Cabe destacar que estos materiales seleccionados se tomaron en cuenta teniendo en cuenta el criterio técnico de uno de los Geólogos del proyecto, además del Ingeniero que selecciono el sitio Presa como uno de los sitios posibles de préstamo para utilizar en la construcción del proyecto. Es por ello que fueron escogidas estas cinco muestras, siendo las más representativas de los materiales extraídos del sitio de préstamo respetando los criterios de los profesionales a los que se les tomó su opinión.

Con base en los resultados que se obtuvieron donde tres de las cinco muestras clasificaron como andesitas, la cual es una roca ígnea de gran dureza y resistencia, es que se demuestra la mejor calidad de los materiales correspondientes a este sitio de préstamo respecto a los materiales anteriormente expuestos y que corresponden a los materiales del sitio Carazo.

Se detallan mediante ilustraciones los resultados obtenidos de realizar este ensayo. Las muestras que se analizaron antes de realizar el ensayo se presentan a continuación.



Figura 65. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #1 para los materiales del sitio Presa.



Figura 66. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #2 para los materiales del sitio Presa.



Figura 67. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #3 para los materiales del sitio Presa.



Figura 68. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #4 para los materiales del sitio Presa.



Figura 69. Muestra de Roca a la que se le realizó el Ensayo de Sección Delgada #5 para los materiales del sitio Presa.

Carga Puntual

El ensayo de carga puntual se realiza para correlacionar los valores obtenidos con los de compresión simple, necesarios para aplicar la Teoría de Nick Barton y Björn Kjaernsll. Esta, además de determinar un valor de resistencia, al corte de los enrocados, permite brindar un valor del ángulo de fricción interna de los materiales.

Es una prueba que permite clasificar los materiales rocosos intactos en cuanto a su resistencia.

El conjunto de determinaciones que se llevaron a cabo tanto para los materiales de los sitios Carazo como Presa, se muestran en la sección de Apéndices.

A continuación se presentan los resultados promedios arrojados para esta prueba para los materiales de ambos sitios de préstamo en estudio, así como se respectiva correlación al valor de resistencia a la compresión simple.

CUADRO 41. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Tamaño Nominal	Carga Promedio (kg)	Resistencia Compresión Promedio (kg/cm²)
1"	144,13	1.670,04
1 1/2"	120,11	1.740,07
2"	68,99	1.302,73

CUADRO 42. VALORES PROMEDIO POR TAMAÑO NOMINAL DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Tamaño Nominal	Carga Promedio (kg)	Resistencia Compresión Promedio (kg/cm²)
1"	54,49	1.193,89
1 1/2"	119,52	1.883,28
2"	191,94	1.612,42

Como se observa en los Cuadros 51 y 52, de la sección de Apéndices, donde se resumen los resultados arrojados para la determinación de los valores de esta prueba, para los materiales de los sitios Carazo y Presa, respectivamente, se presentan unos valores marcados en color rojo. Estos, representan los valores, según el proceso de selección del valor promedio, que dicta que se deben escoger los dos valores mayores y los dos valores menores de cada tamaño nominal para ser ensayado y erradicarlos de la obtención de la media.

Esto se realiza con la finalidad de obtener un valor más representativo y que permita mostrar un parámetro de la resistencia de las muestras de rocas seleccionadas igualmente representativos.

Granulometría Propuesta por Sherard

Sherard en sus investigaciones propone una granulometría a los materiales que se van emplear como enrocados. Seguidamente se presentan los porcentajes que se deben respetar para cumplir con lo presentado por Sherard. Esto, para ser utilizados en la zona 2B, que es la zona encargada en brindarle apoyo a la losa de concreto y por ende de la columna de agua. Estos porcentajes se presentan para los materiales de los sitios Carazo y Presa.

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos para los materiales del sitio Carazo inicialmente.

CUADRO 43. GRANULOMETRÍA PROPUESTA POR SHERARD RESPECTO A LOS PORCENTAJES OBTENIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.			
Arenas		Limos o Arcillas	
49%	35% - 55%	5%	Máx. 8%

Los materiales del sitio de préstamo Carazo cumplen satisfactoriamente con estos porcentajes propuestos tal y como se aprecia en el Cuadro 43. Aquí, se presentan los porcentajes de arenas y de limos o arcillas arrojados de la granulometría inicial que se usó para realizar cada una de las pruebas de odómetro. La comparación de los porcentajes que deben presentar los materiales para ser utilizados en la zona 2B, se presentan en el Cuadro 1 en la sección de la Introducción de este informe. A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las granulometrías finales de cada una de las pruebas de odómetro realizadas con los materiales del sitio de préstamo Carazo.

Inicialmente se presenta los porcentajes arrojados por la granulometría retenida final de los materiales ensayados en el odómetro #1.

CUADRO 44. PORCENTAJES RETENIDOS ADECUADOS PARA USAR COMO MATERIAL DE ENROCADO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.			
Arenas		Limos o Arcillas	
46%	35% - 55%	7%	Máx. 8%

Seguidamente se presentan los porcentajes arrojados por la granulometría retenida, final de los materiales ensayados en el odómetro #2.

CUADRO 45. PORCENTAJES RETENIDOS ADECUADOS PARA USAR COMO MATERIAL DE ENROCADO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.			
Arenas		Limos o Arcillas	
45%	35% - 55%	8%	Máx. 8%

Por último, se muestran los porcentajes arrojados por la granulometría retenida final de los materiales ensayados en el odómetro #3.

CUADRO 46. PORCENTAJES RETENIDOS ADECUADOS PARA USAR COMO MATERIAL DE ENROCADO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.			
Arenas		Limos o Arcillas	
50%	35% - 55%	5%	Máx. 8%

Como se aprecia en los cuadros anteriores, para cada una de las granulometrías realizadas, tanto antes como después de realizar el ensayo, los materiales cumplen satisfactoriamente, ya que en cada uno de los casos los valores resultantes se encuentran en el rango propuesto por Sherard.

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos para los materiales del sitio Presa.

CUADRO 47. GRANULOMETRÍA PROPUESTA POR SHERARD RESPECTO A LOS PORCENTAJES OBTENIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.			
Arenas		Limos o Arcillas	
33%	35% - 55%	4%	Máx. 8%

Los materiales del sitio de préstamo Presa no cumplen satisfactoriamente con estos porcentajes propuestos, tal y como se aprecia en el Cuadro 47, donde se presentan los porcentajes de arenas y de limos o arcillas arrojados de la granulometría inicial que se usó para realizar cada una de las pruebas de odómetro. El porcentaje de arenas para los materiales del sitio Presa, respecto de los materiales del sitio Carazo es mucho menor. Esto arrojó como consecuencia directa que los valores del sitio Presa presentarán un valor de la densidad máxima de laboratorio de los materiales mucho menor, a la obtenida para los materiales del sitio Carazo. Esto, indudablemente afecta los resultados esperados en las pruebas de odómetro como se apreció anteriormente en los valores del módulo de deformabilidad.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las granulometrías finales de cada una de las

pruebas de odómetro realizadas con los materiales del sitio de préstamo Carazo.

Inicialmente se presentan los porcentajes arrojados por la granulometría retenida final de los materiales ensayados en el odómetro #1.

CUADRO 48. PORCENTAJES RETENIDOS ADECUADOS PARA USAR COMO MATERIAL DE ENROCADO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.			
Arenas		Limos o Arcillas	
33%	35% - 55%	6%	Máx. 8%

Seguidamente se presentan los porcentajes arrojados por la granulometría retenida final de los materiales ensayados en el odómetro #2.

CUADRO 49. PORCENTAJES RETENIDOS ADECUADOS PARA USAR COMO MATERIAL DE ENROCADO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.			
Arenas		Limos o Arcillas	
36%	35% - 55%	6%	Máx. 8%

Por último, se muestran los porcentajes arrojados por la granulometría retenida final de los materiales ensayados en el odómetro #3.

CUADRO 50. PORCENTAJES RETENIDOS ADECUADOS PARA USAR COMO MATERIAL DE ENROCADO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.			
Arenas		Limos o Arcillas	
34%	35% - 55%	5%	Máx. 8%

Como se aprecia en el Cuadro 47, para los materiales del sitio presa, inicialmente los materiales no cumplen con el porcentaje mínimo para ser utilizados en la zona 2B de la represa según establece Sherard. Si comparamos los resultados obtenidos posterior a la realización de los ensayos de odómetro, se aprecia en los respectivos cuadros que para los casos de los odómetros #1 y #3 tampoco se cumple con el mínimo de arenas requerido; para el caso del odómetro #2 si se cumple satisfactoriamente. Esto se discutirá más adelante en la sección de Análisis de Resultados.

Aclaratoriamente en cada uno de los cuadros anteriormente presentados, en su última fila se presentan cuatro divisiones. En las divisiones 2 y 4 de izquierda a derecha se presentan los porcentajes de materiales retenidos propuestos por Sherard, mientras que en las divisiones 1 y 3 igualmente de izquierda a derecha se presentan los porcentajes obtenidos de los materiales que se están caracterizando para su uso en alguna de las zonas que conforman una represa del tipo C.F.R.D (Concrete Face Rockfill Dam), por sus siglas en inglés.

Aplicación de la Teoría de Barton y Kjaernsli

La teoría propuesta por Barton y Kjaernsli (1981), permite determinar el valor de la resistencia al corte de los materiales por utilizar como enrocado y del ángulo de fricción interna de los materiales, a partir de correlaciones y nomogramas que brindan detalle de las siguientes características de los materiales:

- Angulosidad de los Materiales.
- Origen de los Materiales.
- Resistencia a la Compresión Simple de los Materiales.
- El tamaño d_{50} de los Materiales.
- Porosidad del Material después de Compactado.
- Rugosidad de los Materiales.

La ecuación que permite conocer el valor de la resistencia al corte de los materiales es la que se muestra a continuación:

$$\tau = \sigma'_n \tan [R \log \left(\frac{S}{\sigma'_n} \right) + \phi_b] \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

En donde se tiene que;

- τ = Resistencia de los Materiales (kg/cm²).
- σ'_n = Esfuerzo Normal Aplicado (kg/cm²).
- R = Rugosidad Equivalente (adimensional).
- S = Resistencia Equivalente (kg/cm²).
- ϕ_b = Ángulo de Fricción Básico (grados).

El esfuerzo normal aplicado (σ'_n), es el que se le aplica a los materiales en la prueba de

odómetro siendo en este caso el esfuerzo máximo que varía desde los **5 kg/cm²**, hasta los **55 kg/cm²**, asociado a cada ciclo de carga y descarga de los materiales.

La rugosidad equivalente (**R**) se determina en base a la Figura 70, la cual se muestra seguidamente. Para determinar este parámetro, se utiliza el valor de la porosidad (**%n**) de los materiales después de compactado, además del origen de los materiales, grado de angulosidad y rugosidad de las caras de los materiales.

La resistencia equivalente (**S**), se determina igualmente que en el caso de la rugosidad equivalente (**R**) por medio de un nomograma que se presenta en la Figura 71. En él, se utilizan dos parámetros para determinar el valor de la resistencia equivalente como lo es la resistencia a la compresión simple de los materiales (σ_c) y el diámetro medio de las partículas d_{50} . De la figura se arroja la relación entre la resistencia a la compresión simple (σ_c) y la resistencia equivalente de los materiales (**S**), en donde la variable conocida es la resistencia a la compresión simple y por medio de ello se logra determinar de manera directa el valor de la resistencia equivalente de los materiales.

Los valores de la resistencia a la compresión simple de los materiales, se obtuvieron correlacionando los valores arrojados del ensayo de carga puntual, cuyos resultados se presentan en la sección de Apéndices del presente informe, más específicamente en los Cuadros 51 y 52 para los materiales de los sitios Carazo y Presa.

El Ángulo de Fricción Básico (ϕ_b), es aquel que se logra determinar entre las caras lisas de los materiales. Cuando este parámetro se aplica al estudio del comportamiento de materiales por utilizar, como enrocados, suele estimarse a partir de valores reportados por la literatura (Referencia 2)

Sobre esta información se presenta que, el ángulo de fricción básico varía entre los 25° y los 35°. Para la aplicación de este parámetro se utilizará como valor del ángulo de fricción básico el de 30°.

A continuación se presentan las Figuras 70 y 71 a partir de las cuales se obtienen los parámetros de rugosidad equivalente (**R**) y de resistencia equivalente (**S**), con base en ellas se obtendrá el valor de la resistencia al corte de los

enrocados y del ángulo de fricción interna para cada material de su respectivo sitio de préstamo.

Los valores que se presentarán de la resistencia de los enrocados, serán para diferentes valores del esfuerzo normal aplicado a los materiales, dado la naturaleza de la prueba de odómetro. Se presentarán valores de la resistencia para los diferentes esfuerzos a los que si vieron sometidos los materiales, tanto del sitio de préstamo Carazo como Presa.

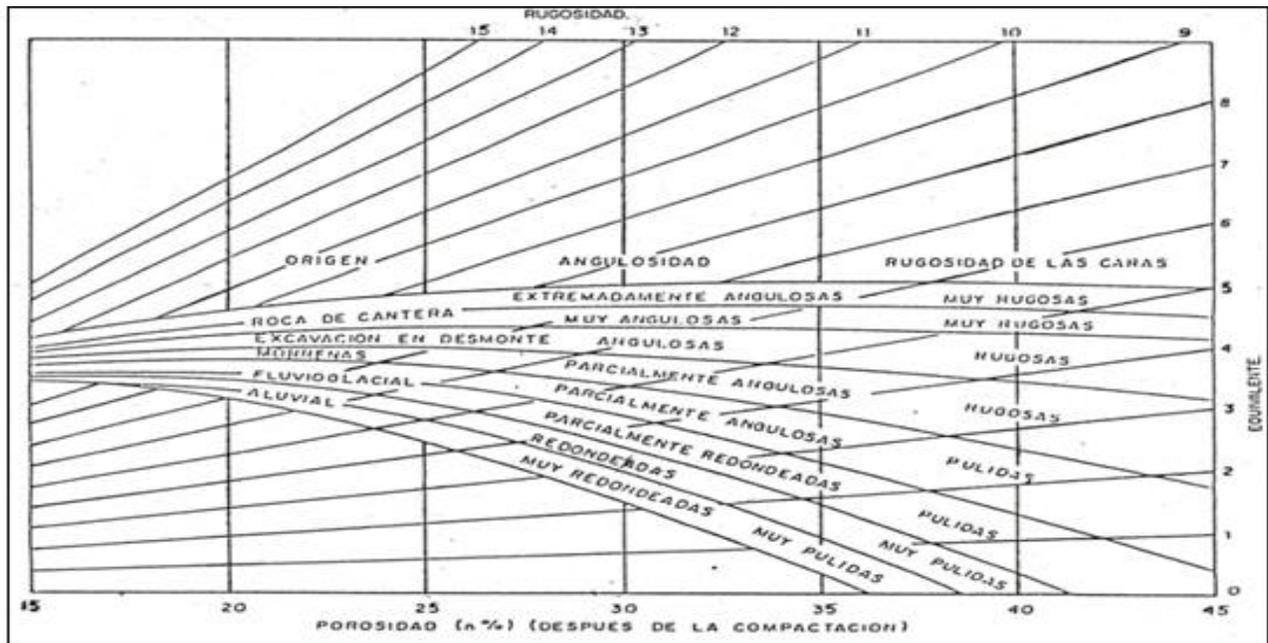


Figura 70. Determinación de la Rugosidad Equivalente en función del Origen, Angulosidad y Rugosidad de los materiales por utilizar como enrocado.

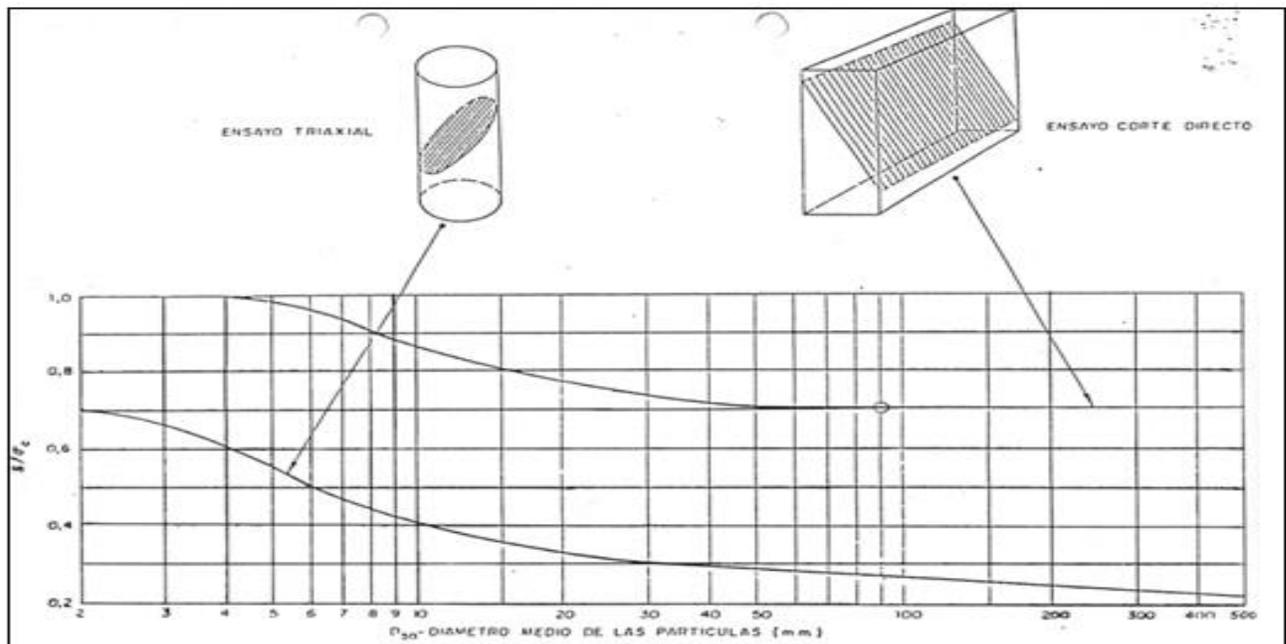


Figura 71. Determinación de la Resistencia Equivalente en función del Diámetro Medio de las partículas y de la Resistencia a la Compresión Unidimensional.

Haciendo uso de la Figura 70, y conociendo el porcentaje de porosidad promedio de los materiales, una vez que se ha alcanzado el

máximo esfuerzo en cada uno de los odómetros ensayados, se puede determinar la rugosidad equivalente de los materiales, sabiendo que el

origen de los mismos es aluvial y que son partículas redondeadas y muy pulidas.

Tomando ahora como referencia la Figura 71, y conociendo el diámetro medio de las partículas (d_{50}), el cual se desprende de las curvas granulométricas de cada una de los odómetros realizados y que se muestra en las Figuras 29, 39 y 49 respectivamente en su orden de ejecución para el caso de los materiales del sitio Carazo y en las Figuras 34, 44 y 54 respectivamente en su orden de ejecución para el caso de los materiales del sitio Presa.

Se observa que el diámetro medio de las partículas (d_{50}) coincide en cada una de las tres curvas granulométricas en un mismo punto tanto para la granulometría inicial como final de los materiales ensayados en el odómetro, para el caso de los materiales del sitio Carazo. Esto mismo no se repite para el caso de los materiales del sitio Presa, ya que no coincide en un mismo punto el diámetro medio de las partículas para las granulometrías inicial y final. Así el valor que se

determine para cada curva granulométrica hará referencia tanto a la granulometría inicial como final, siendo el valor promedio de las curvas granulométricas el que se utilice.

El otro parámetro que se utiliza para hacer uso de la Figura 71 es la resistencia a la compresión simple de los materiales, la cual para el caso de los materiales del sitio de préstamo Carazo arroja un valor promedio de **1570,95 kg/cm²**, mientras que para el caso de los materiales del sitio de préstamo Presa se obtiene un valor promedio de **1563,19 kg/cm²**, los cuales se emplearán para determinar la resistencia equivalente (S).

Conociendo estas premisas se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos de odómetro realizados en cada uno de los respectivos sitios de préstamo analizados y valorizados.

CUADRO 51. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES POR UTILIZAR, COMO ENROCADO DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.				
Ensayo	Origen Material	Angulosidad	Rugosidad	%n promedio
Odómetro #1	Aluvial	Redondeadas	Muy Pulidas	15,73
Odómetro #2	Aluvial	Redondeadas	Muy Pulidas	17,03
Odómetro #3	Aluvial	Redondeadas	Muy Pulidas	17,80

CUADRO 52. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES POR UTILIZAR, COMO ENROCADO DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.				
Ensayo	Origen Material	Angulosidad	Rugosidad	%n promedio
Odómetro #1	Aluvial	Redondeadas	Muy Pulidas	17,23
Odómetro #2	Aluvial	Redondeadas	Muy Pulidas	16,68
Odómetro #3	Aluvial	Redondeadas	Muy Pulidas	19,08

Los resultados de la obtención de la Rugosidad Equivalente se presentan marcados en la Figura 72.

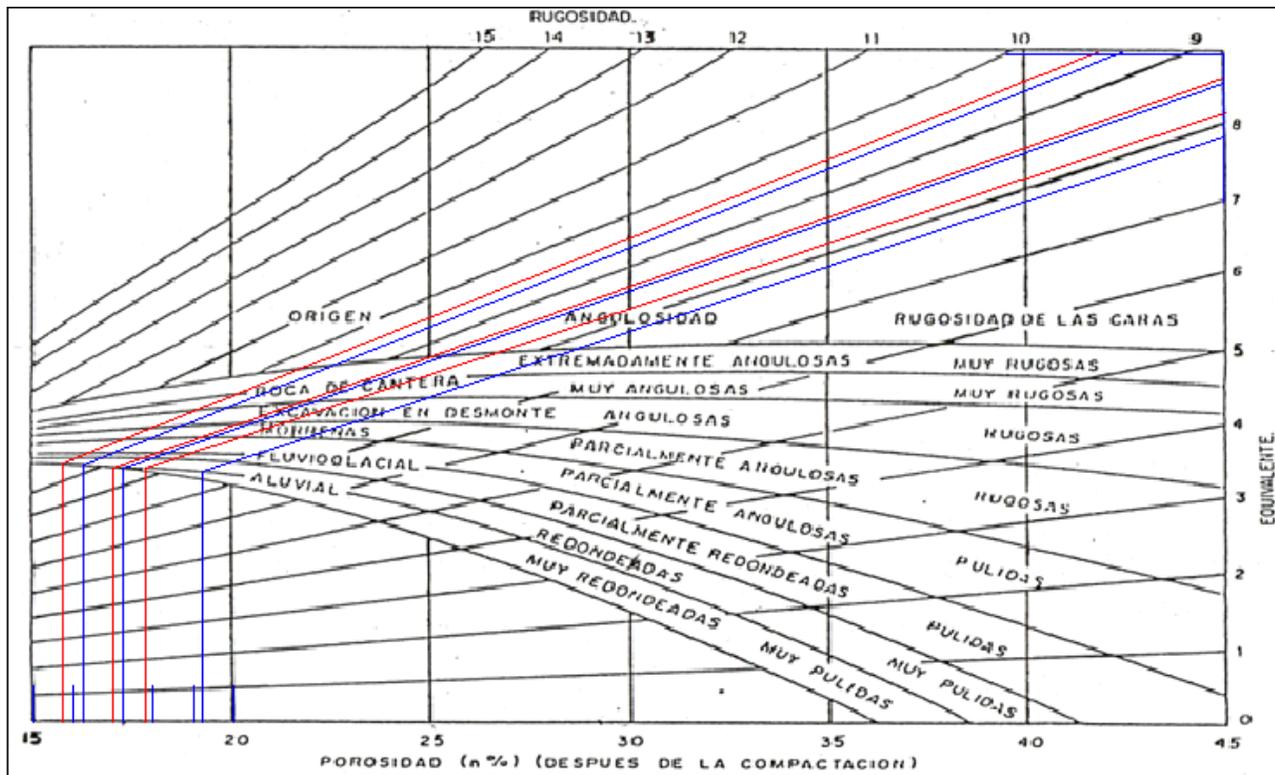


Figura 72. Determinación de los valores de la rugosidad equivalente en función de los valores del porcentaje de porosidad promedio, obtenido en cada prueba de odómetro tanto para los materiales del sitio Carazo como del sitio Presa.

Los resultados que se presentan demarcados en la Figura 72, fueron obtenidos por medio del programa computacional AutoCAD 2008, a partir del cual se logró determinar a escala real las divisiones necesarias en donde se clasificaban los porcentajes de porosidad de los materiales para cada ensayo de odómetro realizado de manera muy precisa. Esto, se ve reflejado en la figura anterior, por medio de líneas de color rojo, para el caso de los materiales del sitio Carazo y la única línea azul denota el común

valor que se arroja del nomograma anterior para los materiales del sitio Presa. Para cada ensayo de odómetro realizado para estos materiales, el porcentaje de porosidad fue menor al 15% tal y, como se aprecia en el Cuadro 52, que se establece como la escala menor del presente nomograma, de ahí que se procedió a emplear este valor mínimo para su determinación.

Los valores arrojados de realizar esta determinación se presentan a continuación:

CUADRO 53. VALORES OBTENIDOS DE LA RUGOSIDAD EQUIVALENTE (R) PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Ensayo	%n promedio	Rugosidad Equivalente (R)
Odómetro #1	15,73	8,10
Odómetro #2	17,03	8,44
Odómetro #3	17,80	9,50

CUADRO 54. VALORES OBTENIDOS DE LA RUGOSIDAD EQUIVALENTE (R) PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Ensayo	%n promedio	Rugosidad Equivalente (R)
Odómetro #1	17,23	8,39
Odómetro #2	16,68	9,28
Odómetro #3	19,08	7,84

Posteriormente se procede a determinar el valor de la Resistencia Equivalente, por medio de la Figura 71. Para ello, se utiliza el diámetro medio de las partículas, obtenido de las curvas

granulométricas, para cada uno de los ensayos de odómetro realizados. Los resultados del diámetro medio de las partículas (d_{50}) se presentan a continuación:

CUADRO 55. VALORES ARROJADOS DE LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DEL DIÁMETRO MEDIO DE LAS PARTÍCULAS, PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Ensayo	Diámetro Medio de las Partículas (mm)
Odómetro #1	3,30
Odómetro #2	3,30
Odómetro #3	3,20

CUADRO 56. VALORES ARROJADOS DE LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DEL DIÁMETRO MEDIO DE LAS PARTÍCULAS, PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Ensayo	Diámetro Medio de las Partículas (mm)
Odómetro #1	13,50
Odómetro #2	14,00
Odómetro #3	13,50

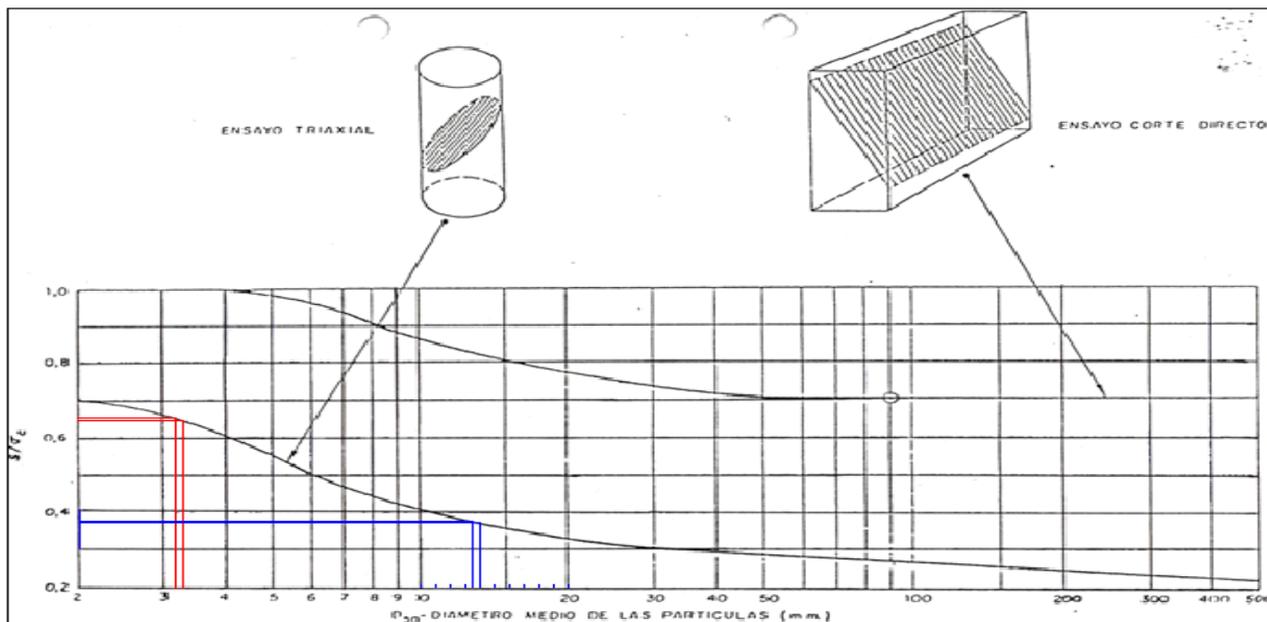


Figura 73. Determinación de los valores de la resistencia equivalente, en función del diámetro medio de las partículas (d_{50}) para los materiales de los sitios Carazo y Presa.

Los resultados que se presentan demarcados en la Figura 73, fueron obtenidos por medio del programa computacional AutoCAD 2008, a partir del cual se logró determinar a escala real las divisiones necesarias. Aquí, se clasificaban los diámetros medios de las partículas, obtenidas para cada curva granulométrica resultante de cada ensayo de odómetro. Esto se ve reflejado en la figura anterior por medio de líneas de color rojo para el caso de los materiales del sitio Carazo y las líneas de color azul representan a los valores

obtenidos para los materiales del sitio Presa. El utilizar este nomograma anterior permite determinar la relación entre la resistencia equivalente y el esfuerzo de compresión de los materiales. De ahí que se utiliza el valor promedio del esfuerzo de compresión promedio, presentado en el Cuadro 41 para los materiales del sitio Carazo y el Cuadro 42 para los materiales del sitio Presa. A continuación se presentan los valores arrojados de realizar esta determinación.

CUADRO 57. VALORES DETERMINADOS DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE (S) PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.				
Ensayo	Diámetro Medio de las Partículas	Esfuerzo Compresión (kg/cm²)	Relación S/σ_c	Resistencia Equivalente (S) (kg/cm²)
Odómetro #1	3,30	1.570,95	0,650	1.021,12
Odómetro #2	3,30	1.570,95	0,650	1.021,12
Odómetro #3	3,20	1.570,95	0,660	1.036,83

CUADRO 58. VALORES DETERMINADOS DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE (S) PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.				
Ensayo	Diámetro Medio de las Partículas	Esfuerzo Compresión (kg/cm²)	Relación S/σ_c	Resistencia Equivalente (S)
Odómetro #1	13,50	1.563,19	0,371	579,94
Odómetro #2	14,00	1.563,19	0,366	572,13
Odómetro #3	13,50	1.563,19	0,371	579,94

Una vez determinados los valores de la rugosidad equivalente (R) y de la resistencia equivalente (S), se procede a determinar el valor de la resistencia al corte de los materiales y del ángulo de fricción interna de los mismos, para cada uno de los ensayos de odómetro que se realizaron. Primeramente se presentan los valores de la resistencia al corte de los enrocados, al aplicar esta teoría de Barton y Kjaernsli, para cada ensayo de odómetro del sitio Carazo.

CUADRO 59. VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ENROCADOS, PARA LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO CARAZO, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	σ'_n (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	τ (kg/cm ²)
Odómetro #1	5	8,10	1.021,12	5	204,22	30	5,69
Odómetro #1	10	8,10	1.021,12	10	102,11	30	10,45
Odómetro #1	15	8,10	1.021,12	15	68,07	30	14,92
Odómetro #1	20	8,10	1.021,12	20	51,06	30	19,20
Odómetro #1	25	8,10	1.021,12	25	40,84	30	23,35
Odómetro #1	30	8,10	1.021,12	30	34,04	30	27,40
Odómetro #1	35	8,10	1.021,12	35	29,17	30	31,37
Odómetro #1	40	8,10	1.021,12	40	25,53	30	35,26
Odómetro #1	45	8,10	1.021,12	45	22,69	30	39,09
Odómetro #1	55	8,10	1.021,12	55	18,57	30	46,60

CUADRO 60. VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ENROCADOS, PARA LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO CARAZO, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	σ'_n (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	τ (kg/cm ²)
Odómetro #2	5	8,44	1.021,12	5	204,22	30	5,85
Odómetro #2	10	8,44	1.021,12	10	102,11	30	10,71
Odómetro #2	15	8,44	1.021,12	15	68,07	30	15,25
Odómetro #2	20	8,44	1.021,12	20	51,06	30	19,60
Odómetro #2	25	8,44	1.021,12	25	40,84	30	23,81
Odómetro #2	30	8,44	1.021,12	30	34,04	30	27,91
Odómetro #2	35	8,44	1.021,12	35	29,17	30	31,92
Odómetro #2	40	8,44	1.021,12	40	25,53	30	35,86
Odómetro #2	45	8,44	1.021,12	45	22,69	30	39,73
Odómetro #2	55	8,44	1.021,12	55	18,57	30	47,32

CUADRO 61. VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ENROCADOS, PARA LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO CARAZO, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	σ'_n (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	τ (kg/cm ²)
Odómetro #3	5	9,50	1.036,83	5	207,37	30	6,40
Odómetro #3	10	9,50	1.036,83	10	103,68	30	11,56
Odómetro #3	15	9,50	1.036,83	15	69,12	30	16,36
Odómetro #3	20	9,50	1.036,83	20	51,84	30	20,92
Odómetro #3	25	9,50	1.036,83	25	41,47	30	25,32
Odómetro #3	30	9,50	1.036,83	30	34,56	30	29,60
Odómetro #3	35	9,50	1.036,83	35	29,62	30	33,78
Odómetro #3	40	9,50	1.036,83	40	25,92	30	37,87
Odómetro #3	45	9,50	1.036,83	45	23,04	30	41,88
Odómetro #3	55	9,50	1.036,83	55	18,85	30	49,72

A continuación se presentan los valores obtenidos para la resistencia al corte de los materiales presentes en el sitio de préstamo Presa.

CUADRO 62. VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ENROCADOS, PARA LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO PRESA, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	σ'_n (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	τ (kg/cm ²)
Odómetro #1	5	8,39	579,94	5	115,99	30	5,42
Odómetro #1	10	8,39	579,94	10	57,99	30	9,93
Odómetro #1	15	8,39	579,94	15	38,66	30	14,14
Odómetro #1	20	8,39	579,94	20	29,00	30	18,18
Odómetro #1	25	8,39	579,94	25	23,20	30	22,08
Odómetro #1	30	8,39	579,94	30	19,33	30	25,89
Odómetro #1	35	8,39	579,94	35	16,57	30	29,61
Odómetro #1	40	8,39	579,94	40	14,50	30	33,26
Odómetro #1	45	8,39	579,94	45	12,89	30	36,85
Odómetro #1	55	8,39	579,94	55	10,54	30	43,88

CUADRO 63. VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ENROCADOS, PARA LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO PRESA, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	σ'_n (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	τ (kg/cm ²)
Odómetro #2	5	9,28	572,13	5	114,43	30	5,77
Odómetro #2	10	9,28	572,13	10	57,21	30	10,47
Odómetro #2	15	9,28	572,13	15	38,14	30	14,83
Odómetro #2	20	9,28	572,13	20	28,61	30	18,99
Odómetro #2	25	9,28	572,13	25	22,89	30	23,00
Odómetro #2	30	9,28	572,13	30	19,07	30	26,90
Odómetro #2	35	9,28	572,13	35	16,35	30	30,71
Odómetro #2	40	9,28	572,13	40	14,30	30	34,43
Odómetro #2	45	9,28	572,13	45	12,71	30	38,09
Odómetro #2	55	9,28	572,13	55	10,40	30	45,24

CUADRO 64. VALORES OBTENIDOS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ENROCADOS, PARA LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO PRESA, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	σ'_n (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	τ (kg/cm ²)
Odómetro #3	5	7,84	579,94	5	115,99	30	5,21
Odómetro #3	10	7,84	579,94	10	57,99	30	9,60
Odómetro #3	15	7,84	579,94	15	38,66	30	13,72
Odómetro #3	20	7,84	579,94	20	29,00	30	17,67
Odómetro #3	25	7,84	579,94	25	23,20	30	21,51
Odómetro #3	30	7,84	579,94	30	19,33	30	25,25
Odómetro #3	35	7,84	579,94	35	16,57	30	28,91
Odómetro #3	40	7,84	579,94	40	14,50	30	32,51
Odómetro #3	45	7,84	579,94	45	12,89	30	36,06
Odómetro #3	55	7,84	579,94	55	10,54	30	43,00

El ángulo de fricción interna de los materiales (ϕ'), se obtiene por medio de la siguiente ecuación, la cual permite determinar su valor.

$$\phi' = R \log \left(\frac{S}{\sigma'_n} \right) + \phi_b \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

En donde se tiene que;

ϕ_b = Ángulo de Fricción Interna de los Materiales ($^{\circ}$).

σ'_n = Esfuerzo Norman Aplicado (kg/cm^2).

R = Rugosidad Equivalente (adimensional).

S = Resistencia Equivalente (kg/cm^2).

ϕ_b = Ángulo de Fricción Básico (grados).

A partir de los parámetros que se muestran en la anterior Ecuación 11, se obtiene el valor del ángulo de fricción interna de los

materiales, igualmente para cada ensayo de odómetro, realizado a diferentes valores de la densidad máxima de los materiales.

Los valores arrojados de la aplicación de esta ecuación, que se desprenden de la Teoría de Barton y Kjaernsli se presentan a continuación, primeramente para los materiales del sitio de préstamo Carazo.

CUADRO 65. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1.						
Ensayo	σ'_n (kg/cm^2)	R	S (kg/cm^2)	S/σ'_n	ϕ_b ($^{\circ}$)	ϕ' ($^{\circ}$)
Odómetro #1	5	8,10	1.021,12	204,22	30	48,71
Odómetro #1	10	8,10	1.021,12	102,11	30	46,27
Odómetro #1	15	8,10	1.021,12	68,07	30	44,85
Odómetro #1	20	8,10	1.021,12	51,06	30	43,84
Odómetro #1	25	8,10	1.021,12	40,84	30	43,05
Odómetro #1	30	8,10	1.021,12	34,04	30	42,41
Odómetro #1	35	8,10	1.021,12	29,17	30	41,87
Odómetro #1	40	8,10	1.021,12	25,53	30	41,40
Odómetro #1	45	8,10	1.021,12	22,69	30	40,98
Odómetro #1	55	8,10	1.021,12	18,57	30	40,28

CUADRO 66. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2.						
Ensayo	σ'_n (kg/cm^2)	R	S (kg/cm^2)	S/σ'_n	ϕ_b ($^{\circ}$)	ϕ' ($^{\circ}$)
Odómetro #2	5	8,44	1.021,12	204,22	30	49,50
Odómetro #2	10	8,44	1.021,12	102,11	30	46,96
Odómetro #2	15	8,44	1.021,12	68,07	30	45,47
Odómetro #2	20	8,44	1.021,12	51,06	30	44,42
Odómetro #2	25	8,44	1.021,12	40,84	30	43,60
Odómetro #2	30	8,44	1.021,12	34,04	30	42,93
Odómetro #2	35	8,44	1.021,12	29,17	30	42,36
Odómetro #2	40	8,44	1.021,12	25,53	30	41,88
Odómetro #2	45	8,44	1.021,12	22,69	30	41,44
Odómetro #2	55	8,44	1.021,12	18,57	30	40,71

CUADRO 67. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	ϕ' (°)
Odómetro #3	5	9,50	1.036,83	207,37	30	52,01
Odómetro #3	10	9,50	1.036,83	103,68	30	49,15
Odómetro #3	15	9,50	1.036,83	69,12	30	47,48
Odómetro #3	20	9,50	1.036,83	51,84	30	46,29
Odómetro #3	25	9,50	1.036,83	41,47	30	45,37
Odómetro #3	30	9,50	1.036,83	34,56	30	44,62
Odómetro #3	35	9,50	1.036,83	29,62	30	43,98
Odómetro #3	40	9,50	1.036,83	25,92	30	43,43
Odómetro #3	45	9,50	1.036,83	23,04	30	42,94
Odómetro #3	55	9,50	1.036,83	18,85	30	42,12

La relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales, en cada uno de los ensayos de odómetro y el valor del ángulo de fricción interna de los materiales, se presenta a continuación, en donde claramente se observa la

relación lineal entre ambos parámetros. Esto se presenta para cada uno de los ensayos de odómetro, realizados para los materiales de este sitio de préstamo Carazo.

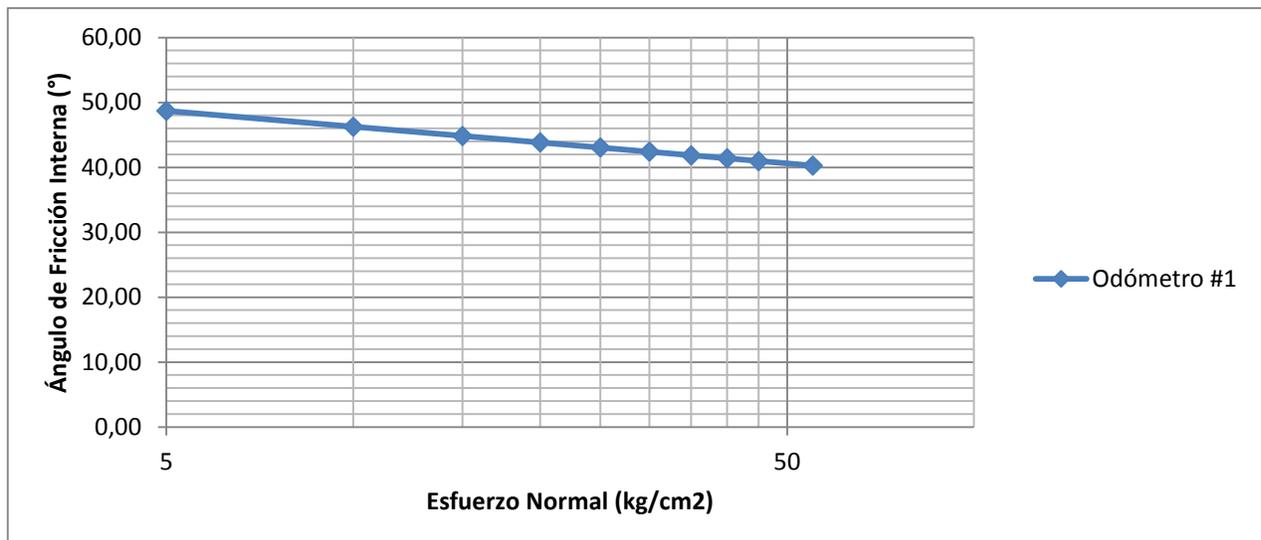


Figura 74. Relación entre el esfuerzo normal, aplicado a los materiales, respecto al valor obtenido del ángulo de fricción efectivo, de los materiales del odómetro #1 del sitio Carazo.

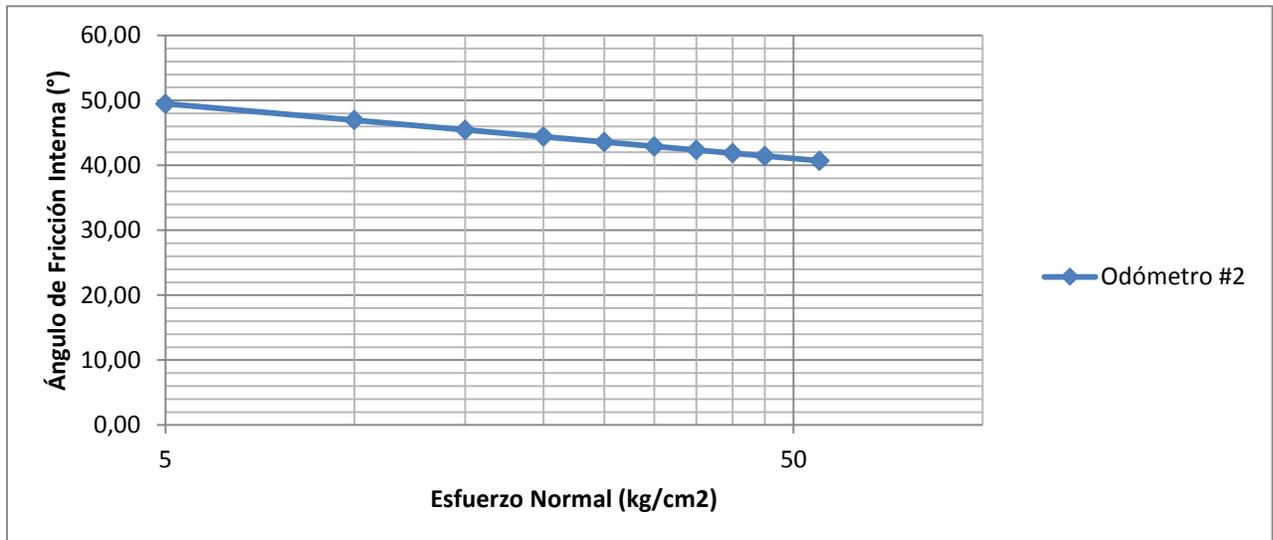


Figura 75. Relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales, respecto del valor obtenido del ángulo de fricción efectivo de los materiales del odómetro #2 del sitio Carazo.

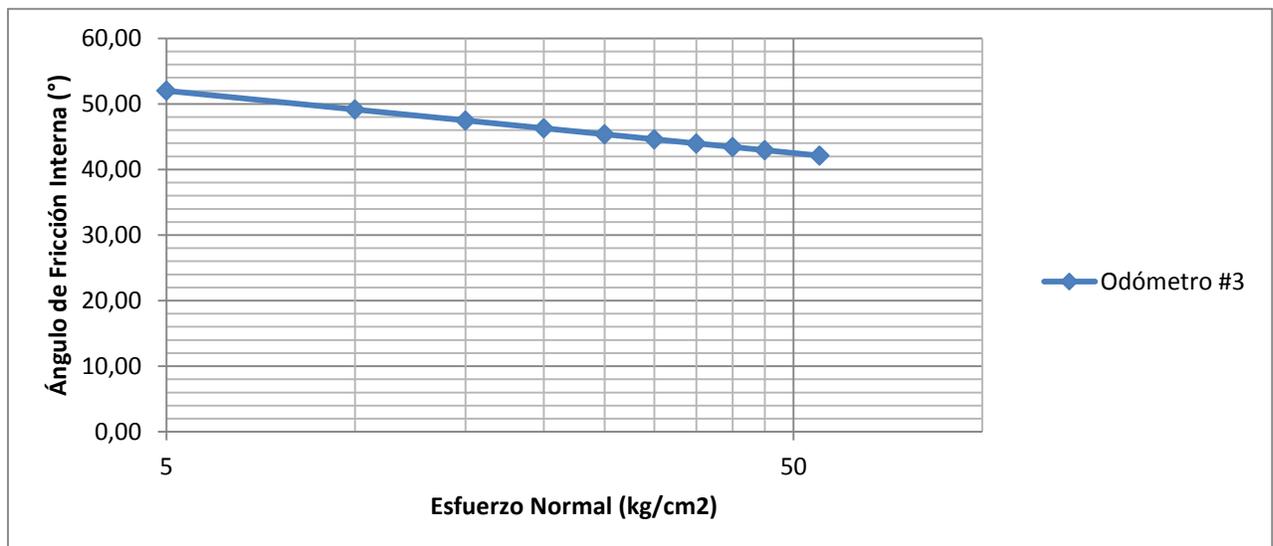


Figura 76. Relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales respecto del valor obtenido del ángulo de fricción efectivo de los materiales del odómetro #3 del sitio Carazo.

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la Teoría establecida por Barton y Kjaernsli, para el ángulo de fricción interna, respecto de los materiales empleados del sitio de préstamo Presa.

CUADRO 68. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	ϕ' (°)
Odómetro #1	5	8,39	579,94	115,99	30	47,32
Odómetro #1	10	8,39	579,94	57,99	30	44,79
Odómetro #1	15	8,39	579,94	38,66	30	43,32
Odómetro #1	20	8,39	579,94	29,00	30	42,27
Odómetro #1	25	8,39	579,94	23,20	30	41,46
Odómetro #1	30	8,39	579,94	19,33	30	40,79
Odómetro #1	35	8,39	579,94	16,57	30	40,23
Odómetro #1	40	8,39	579,94	14,50	30	39,74
Odómetro #1	45	8,39	579,94	12,89	30	39,31
Odómetro #1	55	8,39	579,94	10,54	30	38,58

CUADRO 69. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	ϕ' (°)
Odómetro #2	5	9,28	572,13	114,43	30	49,10
Odómetro #2	10	9,28	572,13	57,21	30	46,31
Odómetro #2	15	9,28	572,13	38,14	30	44,68
Odómetro #2	20	9,28	572,13	28,61	30	43,52
Odómetro #2	25	9,28	572,13	22,89	30	42,62
Odómetro #2	30	9,28	572,13	19,07	30	41,88
Odómetro #2	35	9,28	572,13	16,35	30	41,26
Odómetro #2	40	9,28	572,13	14,30	30	40,72
Odómetro #2	45	9,28	572,13	12,71	30	40,25
Odómetro #2	55	9,28	572,13	10,40	30	39,44

CUADRO 70. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA, APLICANDO LA TEORÍA DE BARTON Y KJAERNSLI A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3.

Ensayo	σ'_n (kg/cm ²)	R	S (kg/cm ²)	S/ σ'_n	ϕ_b (°)	ϕ' (°)
Odómetro #3	5	7,84	579,94	115,99	30	46,18
Odómetro #3	10	7,84	579,94	57,99	30	43,82
Odómetro #3	15	7,84	579,94	38,66	30	42,44
Odómetro #3	20	7,84	579,94	29,00	30	41,46
Odómetro #3	25	7,84	579,94	23,20	30	40,71
Odómetro #3	30	7,84	579,94	19,33	30	40,08
Odómetro #3	35	7,84	579,94	16,57	30	39,56
Odómetro #3	40	7,84	579,94	14,50	30	39,10
Odómetro #3	45	7,84	579,94	12,89	30	38,70
Odómetro #3	55	7,84	579,94	10,54	30	38,02

La relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales en cada uno de los

ensayos de odómetro y el valor del ángulo de fricción interna de los materiales, se presenta a

continuación, en donde claramente se observa la relación lineal entre ambos parámetros. Esto se presenta para cada uno de los ensayos de odómetro realizados para los materiales de este sitio de préstamo Presa.

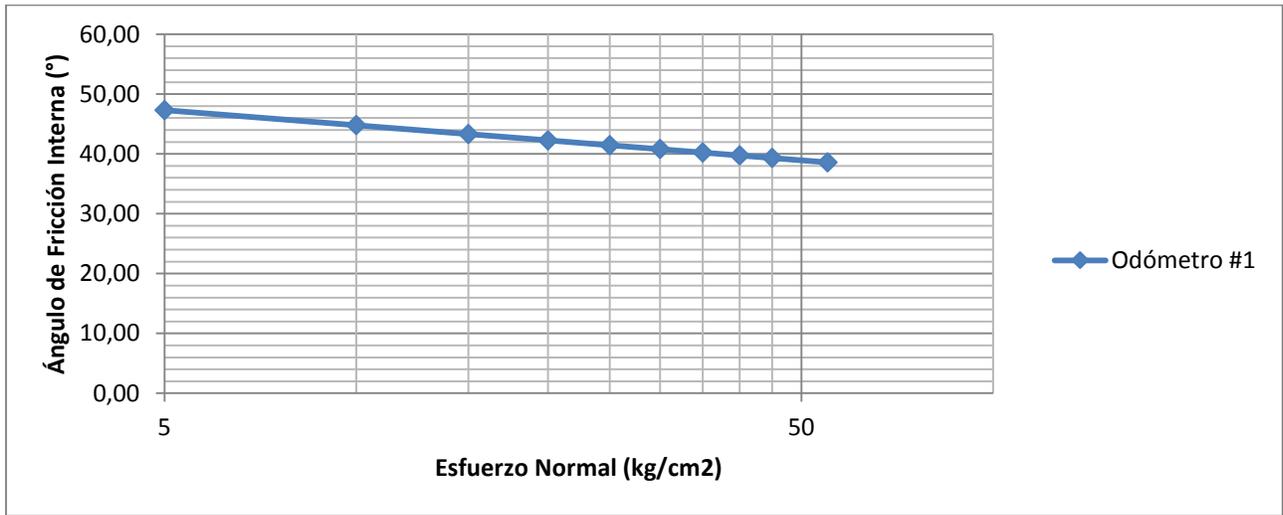


Figura 77. Relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales, respecto del valor obtenido del ángulo de fricción efectivo de los materiales del odómetro #1 del sitio Presa.

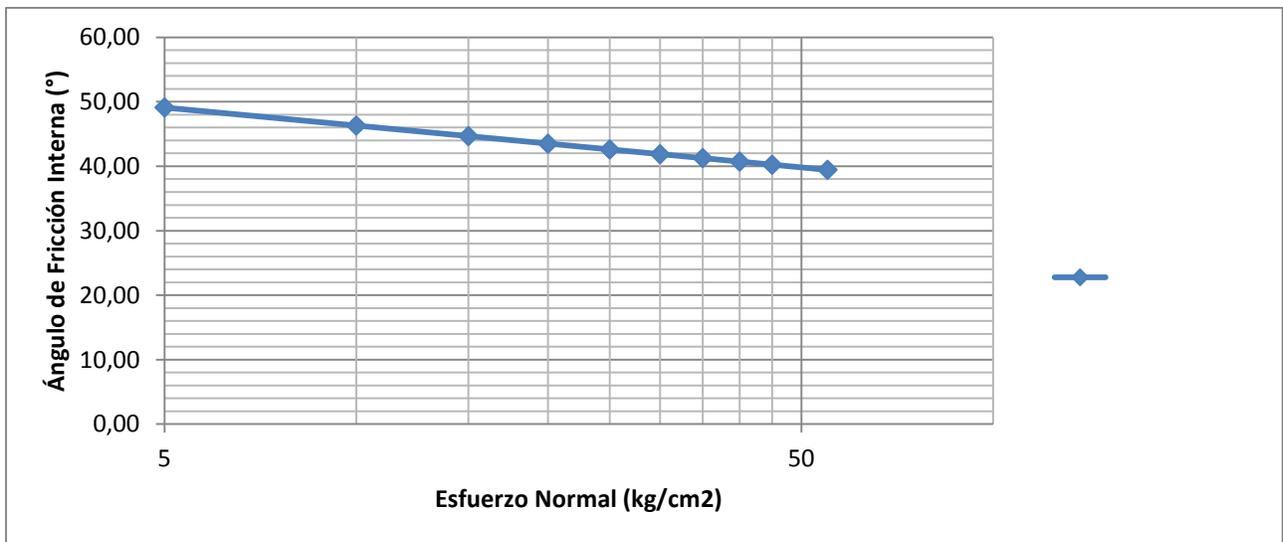


Figura 78. Relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales, respecto del valor obtenido del ángulo de fricción efectivo de los materiales del odómetro #2 del sitio Presa.

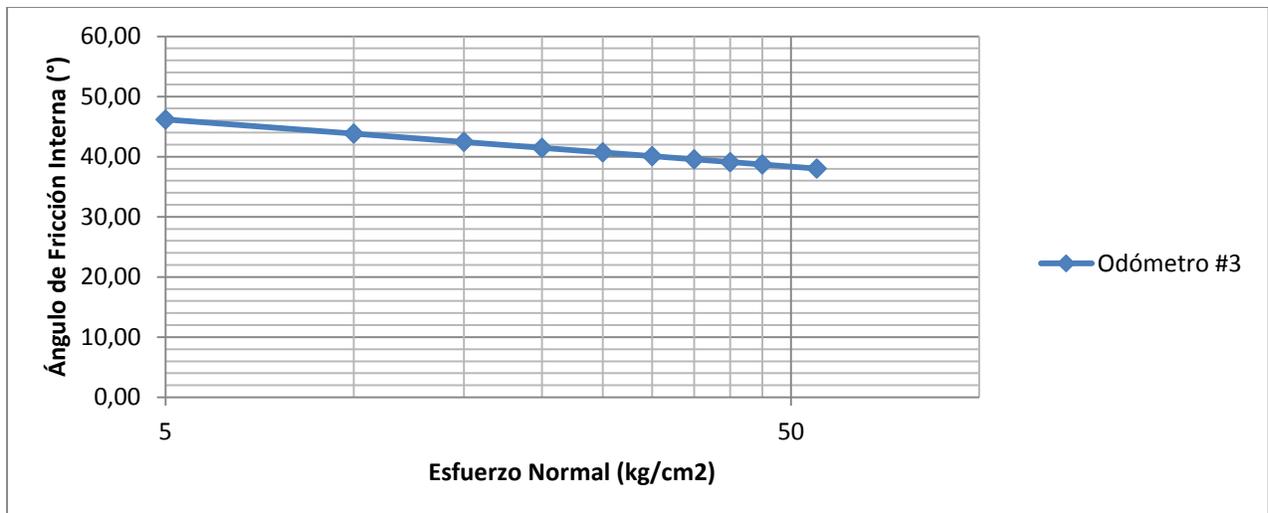


Figura 79. Relación entre el esfuerzo normal aplicado a los materiales, respecto del valor obtenido del ángulo de fricción efectivo de los materiales del odómetro #3 del sitio Presa.

Aplicación de la Teoría de Marsal

La teoría de Marsal (1965) basa sus fundamentos en determinar el valor del ángulo de fricción interna de los materiales y el módulo de deformación de los mismos, por medio del parámetro de la rotura de granos que se desprende de las pruebas de odómetro.

El valor del ángulo de fricción, se permite correlacionar con la razón de esfuerzos principales mediante la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{\frac{\sigma'_1}{\sigma_3} - 1}{\frac{\sigma'_1}{\sigma_3} + 1} \right] \text{sen}^{-1} = \phi \dots \dots \dots \text{Ecuación 12}$$

En donde se tiene que;

- ϕ = Ángulo de Fricción Interna (grados).
- σ'_1 = Esfuerzo Normal Principal (kg/cm²).
- σ_3 = Esfuerzo Confinante Principal (kg/cm²).

La teoría expuesta por Raúl Marsal, permite determinar el módulo de deformabilidad de los materiales por medio del parámetro de la rotura de granos, como parte de las pruebas de odómetro. Las mismas se realizaron para los tres

porcentajes de la densidad máxima tal y como se ha venido acotando en este informe.

Para evaluar el orden de magnitud de la relación de esfuerzos principales (σ'_1/σ_3), se requiere conocer el tipo de enrocado, es decir, realizar la clasificación de los materiales según su dureza. El resultado de esta clasificación se presenta en el Cuadro 40 de la sección de Resultados, en donde según las derivaciones de las pruebas necesarias para su clasificación, consiste en un enrocado tipo 3W bien graduado. Esto, para el caso de los materiales del sitio de préstamo Carazo, mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa, el enrocado corresponde al tipo 2W bien graduado.

El conocer esta clasificación, permite emplear el siguiente nomograma, que depende de los porcentajes de rotura de granos que se presentan en los Cuadros 10, 12 y 14 para el caso de los materiales del sitio Carazo y los Cuadros 11, 13 y 15, para el caso de los materiales del sitio Presa y cada uno de los ensayos de odómetro realizados al 100%, 95% y 90% de la densidad máxima de los materiales respectivamente.

Los resultados del máximo módulo de deformabilidad de los materiales se presentan en los Cuadros 16 y 17, para el caso de los materiales de los sitios Carazo y Presa respectivamente, en donde se resumen los resultados obtenidos producto de los ensayos de odómetro realizados para cada caso.

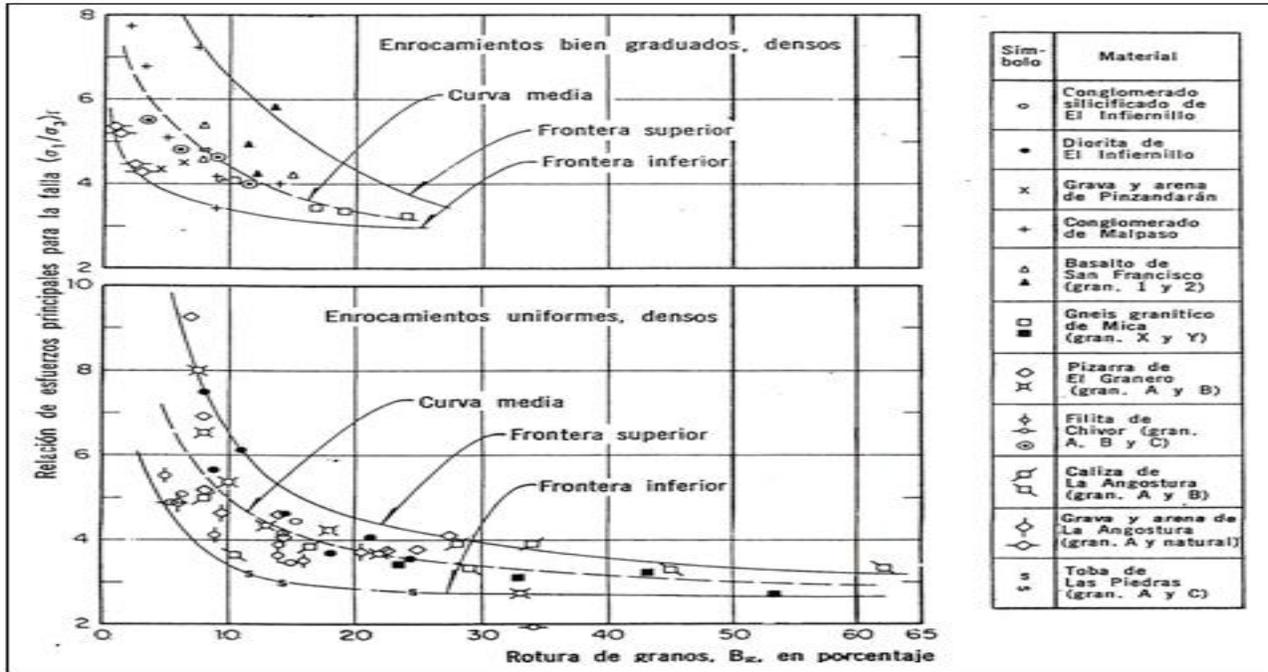


Figura 80. Relación de esfuerzos principales en un ensayo de compresión unidimensional, respecto de la rotura de granos propuesto por Raúl Marsal.

Con base en la figura anterior y conociendo el porcentaje de rotura de granos que se obtuvo para cada ensayo de odómetro, se procede a determinar la relación de esfuerzos

principales σ_1 y σ_3 , y a partir de estos, determinar los valores del ángulo de fricción interna de los materiales.

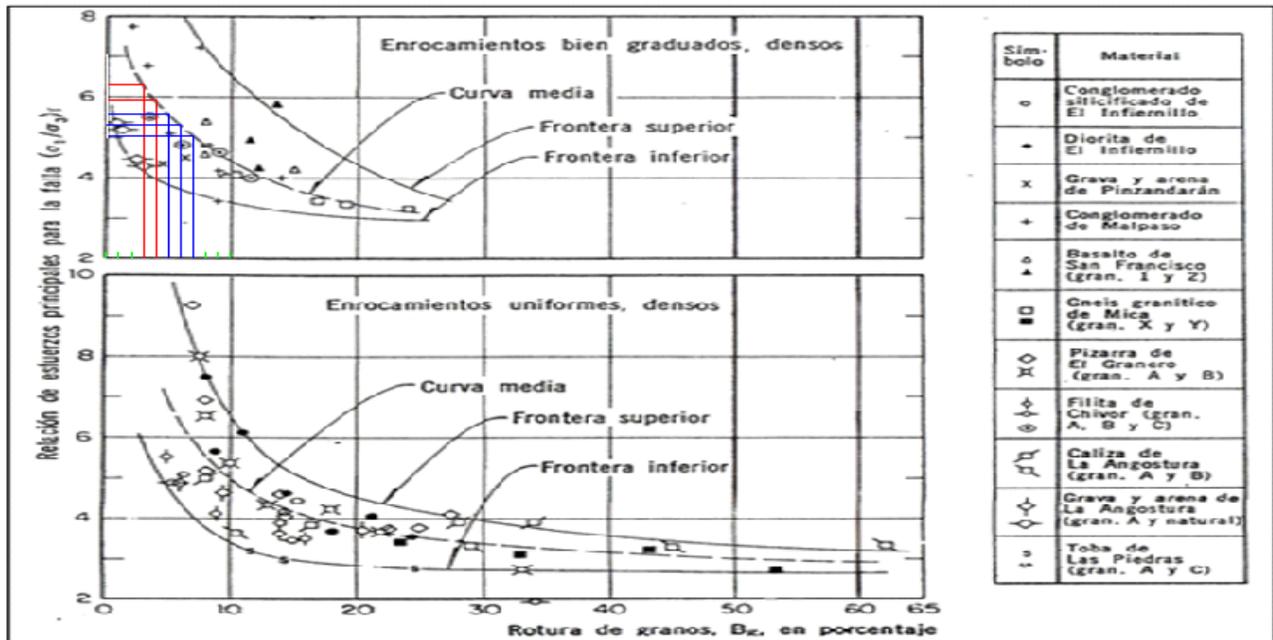


Figura 81. Determinación de la relación de esfuerzos principales respecto de la rotura de granos para cada ensayo de odómetro.

Como se observa en la anterior figura, se emplea la misma para determinar la relación de esfuerzos principales (σ'_1/σ_3), para cada uno de los ensayos de odómetro que se realizaron.

La obtención de la escala se realizó con la ayuda del programa computacional AutoCAD 2008, con base en el cual se lograron determinar los valores precisos de la relación de esfuerzos principales.

Se emplea la parte superior de la gráfica, ya que la clasificación que se realizó anteriormente del enrocado, arroja que él mismo es bien graduado. Las líneas que se muestran en la anterior Figura 81, de colores rojo y azul, corresponden a los porcentajes de rotura de granos para cada uno de los ensayos de odómetro realizados para cada sitio de préstamo valorizados en este informe.

Es así como las líneas denotadas en color rojo hacen referencia a los porcentajes de

rotura de granos, para los materiales utilizados en los odómetros del sitio Carazo y las líneas de color azul, corresponden a los materiales utilizados para realizar los ensayos de odómetro del sitio Presa.

Cabe hacer notar que para el caso del ensayo de odómetro realizado a una densidad máxima de los materiales del 95%, con los materiales del sitio Carazo, se presentó un porcentaje de rotura de granos del 5% al igual que el ensayo de odómetro realizado a una densidad máxima del 100%, pero con los materiales del sitio Presa. De ahí que en este punto en la anterior figura se presenten dos líneas de distinto color, siguiendo la nomenclatura que anteriormente se definió.

Los resultados obtenidos de la relación de esfuerzos principales al momento de falla (σ'_1/σ_3), producto del empleo de la anterior figura, se presentan resumidos en el siguiente cuadro.

CUADRO 71. VALORES OBTENIDOS PARA LA RELACIÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES CON LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Ensayo	% Rotura	σ_1/σ_3
Odómetro #1	3%	6,30
Odómetro #2	5%	5,55
Odómetro #3	4%	5,88

CUADRO 72. VALORES OBTENIDOS PARA LA RELACIÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES CON LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.		
Ensayo	% Rotura	σ_1/σ_3
Odómetro #1	5%	5,55
Odómetro #2	7%	5,05
Odómetro #3	6%	5,30

Aplicando la Ecuación 12, anteriormente establecida y con los valores de la relación de esfuerzos principales, antes de la falla igualmente establecidos y que se muestran en los dos

cuadros anteriores, se establecen los valores del ángulo de fricción interna para los materiales tanto del sitio Carazo como del sitio Presa. Estos valores de presentan seguidamente.

CUADRO 73. VALORES OBTENIDOS DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO POR MEDIO DE LA TEORÍA DE MARSAL.		
Ensayo	σ_1/σ_3	ϕ' (grados)
Odómetro #1	6,30	46,55
Odómetro #2	5,55	44,00
Odómetro #3	5,88	45,18

CUADRO 74. VALORES OBTENIDOS DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA POR MEDIO DE LA TEORÍA DE MARSAL.

Ensayo	σ_1/σ_3	ϕ' (grados)
Odómetro #1	5,55	44,00
Odómetro #2	5,05	42,00
Odómetro #3	5,30	43,04

La teoría de Raúl Marsal permite obtener los valores del módulo de deformabilidad con base en los porcentajes de rotura de granos, que se desprenden de cada ensayo de odómetro. Esto se realiza haciendo uso del siguiente

nomograma, el cual conociendo el origen de los materiales se puede implementar para determinar este módulo y compararlo con los valores arrojados del ensayo de odómetro.

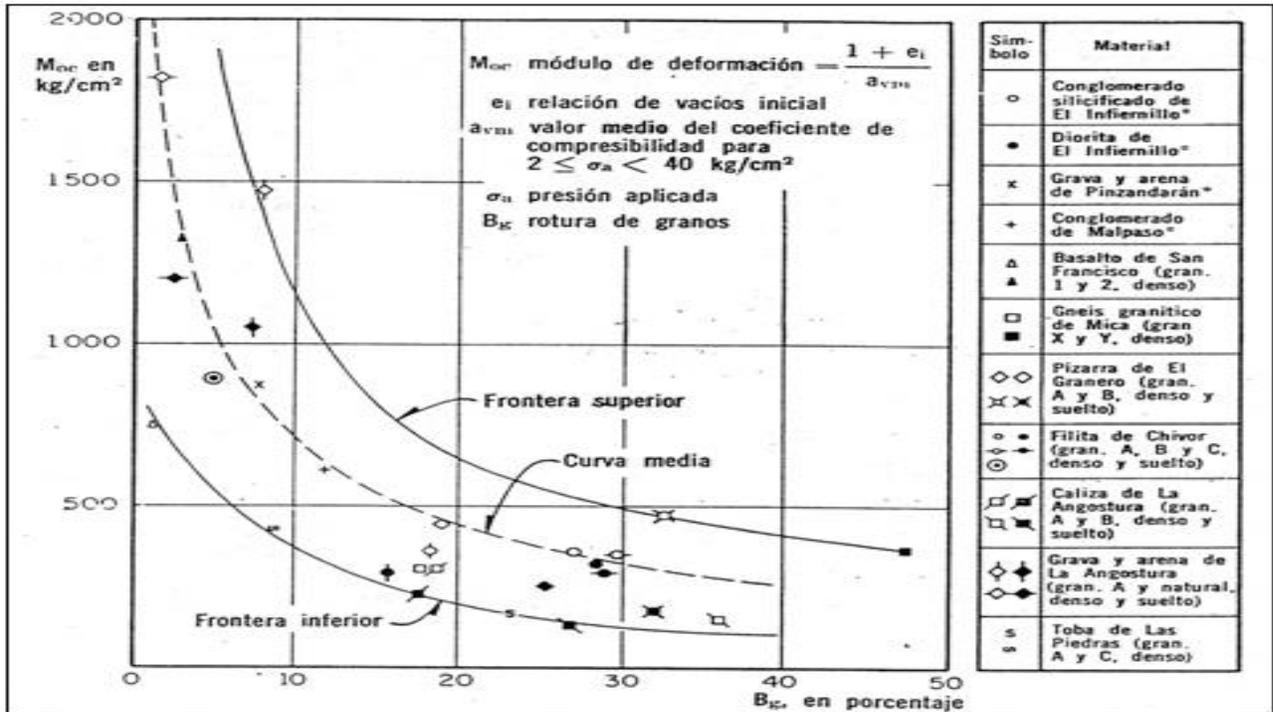


Figura 82. Determinación del módulo de deformabilidad de los materiales con base en el porcentaje de rotura de granos para los ensayos de odómetro de los sitios Carazo y Presa.

Como se aprecia en la figura anterior, Raúl Marsal estableció tres curvas con base en diferentes ensayos que él realizó en los diferentes materiales de diferentes presas en donde él participó.

En la sección derecha de la anterior figura se muestran diferentes tipos de materiales de sitios diferentes y mediante la ejecución de

pruebas de compresión unidimensional se logra ordenarlas según los valores arrojados del módulo de deformación de los materiales y en función del porcentaje de rotura de granos.

Si comparamos el origen de los materiales de los sitios de préstamo Carazo y Presa, con los materiales que él presenta en esta figura, mayoritariamente los materiales de Carazo

y Presa corresponden a gravas y arenas, según las curvas granulométricas determinadas en el sitio mismo.

Estos materiales según Raúl Marsal se encuentran ubicados en la curva promedio, que se denota con el trazo discontinuo en la figura anterior.

Con los porcentajes de rotura de granos determinados anteriormente para cada uno de los ensayos de odómetro realizados y que se resumen en los Cuadros 10, 12 y 14 para el caso de los materiales del sitio Carazo y en los Cuadros 11, 13 y 15 para los materiales del sitio Presa y que corresponden a cada ensayo de odómetro ejecutado a la densidad pertinente y

que se muestran en esta sección de Resultados, se introduce en la Figura 82 y con ello al tocar la curva promedio demarcada y desviando el trazo a la extrema izquierda de la figura, se obtiene el valor del módulo de deformación para los materiales establecidos por Raúl Marsal.

Cabe mencionar que los valores arrojados se compararán con los obtenidos mediante la pendiente de la curva esfuerzo versus deformación de los materiales, en cada uno de las pruebas de odómetro realizadas.

El empleo de la Figura 82, se representa seguidamente con los porcentajes de rotura de granos establecidos para cada caso en particular.

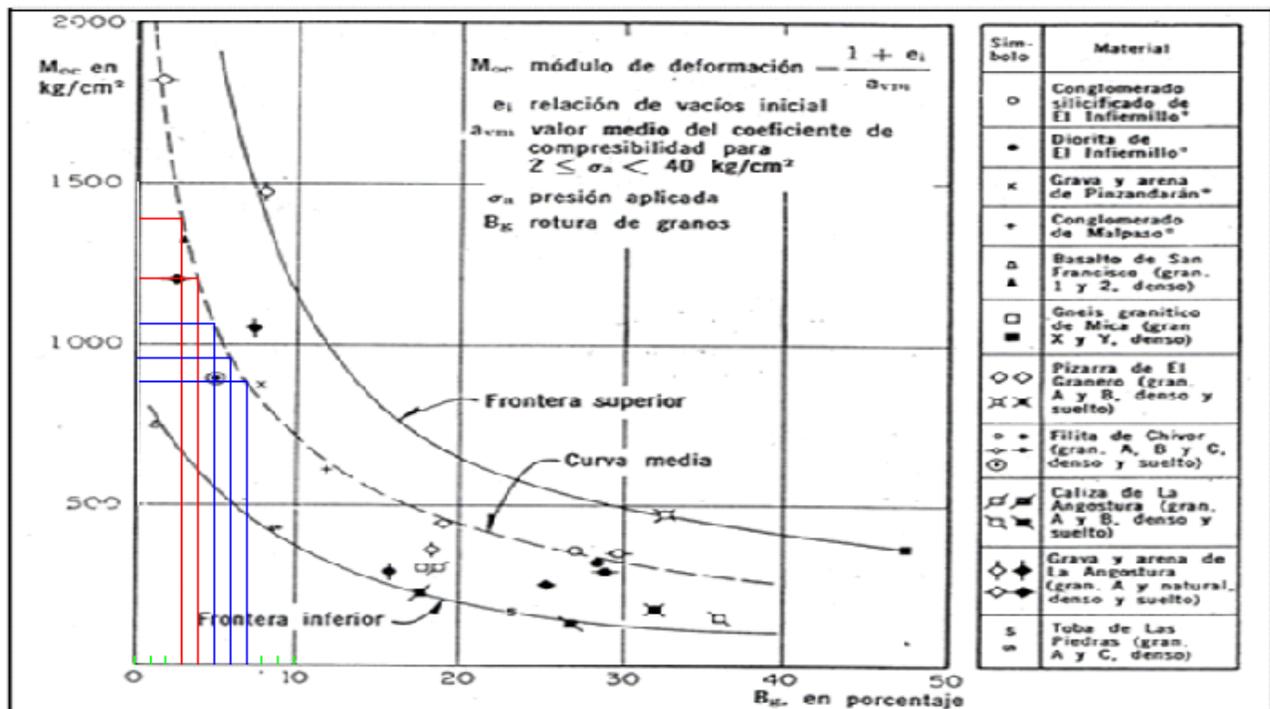


Figura 83. Aplicación de la determinación del módulo de deformabilidad de los materiales con base en el porcentaje de rotura de granos para los ensayos de odómetro de los sitios Carazo y Presa.

Los resultados obtenidos de la aplicación de la teoría de Raúl Marsal para determinar los valores del módulo de deformabilidad de los materiales se resumen en el siguiente cuadro. A manera de aclaración, las líneas que se demarcan en la Figura 83 de colores rojo corresponden a los porcentajes de rotura de granos para los ensayos de odómetro realizados con los materiales del sitio Carazo; las líneas de color azul corresponden a los porcentajes de rotura de granos para los ensayos de odómetro

realizados con los materiales del sitio Presa, cada uno de ellos determinado al 100%, 95% y 90% de la densidad máxima de los materiales, respectivamente. Para el caso del odómetro #2 del sitio Carazo y el odómetro #1 del sitio Presa, se obtuvo el mismo porcentaje de rotura. En la Figura 83, solo se demarca de un solo color, pero se presenta independiente para los valores reportados en los Cuadros 75 y 76.

La obtención de la escala se realizó con la ayuda del programa computacional AutoCAD

2008, con en base al cual se lograron determinar los valores precisos del módulo de deformabilidad

de los materiales.

CUADRO 75. VALORES OBTENIDOS DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO, SEGÚN MARSAL.

Ensayo	% Rotura	Módulo Deformación (kg/cm ²)
Odómetro #1	3%	1324,46
Odómetro #2	5%	1064,57
Odómetro #3	4%	1202,58

CUADRO 76. VALORES OBTENIDOS DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA, SEGÚN MARSAL.

Ensayo	% Rotura	Módulo Deformación (kg/cm ²)
Odómetro #1	5%	1064,57
Odómetro #2	7%	882,96
Odómetro #3	6%	957,33

Los resultados acá mostrados se discutirán en la sección de Análisis de Resultados con los obtenidos para cada ensayo de odómetro específicamente.

Los valores que se presentan en la siguiente Figura 84, que se representan por

medio de círculos de color magenta y cian, corresponden a los valores que se desprenden de los ensayos de odómetro y que corresponden a los módulos de deformación para los sitios Carazo y Presa respectivamente.

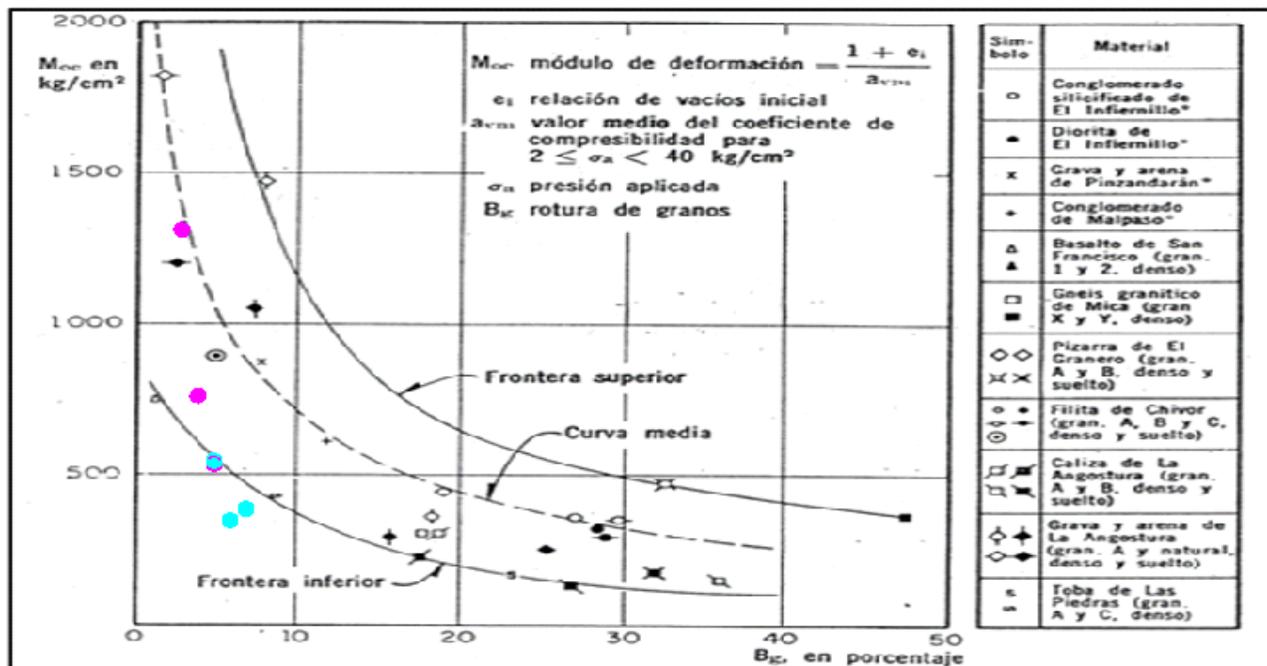


Figura 84. Comparación de los Módulos de Deformabilidad de los materiales de los sitios Carazo y Presa, respecto a los reportados por Raúl Marsal mediante su metodología establecida.

Aplicación de la Teoría de Douglas

La teoría de Douglas (2003) se utiliza para determinar el valor del ángulo de fricción efectivo de los materiales. Esta teoría se basa en un análisis estadístico no lineal. La estimación de este método fue dado al utilizar los mínimos cuadrados. Para ello, se emplea la siguiente ecuación que define los parámetros que se utilizan para obtener el valor del ángulo de fricción interno efectivo de los materiales.

$$\phi' = a + (b\sigma'_n)^c \dots \dots \dots \text{Ecuación 13}$$

En donde se tiene que;

$$a = 36,43 - 0,267*ANG - 0,172*FINOS + 0,756(C_c - 2) + 0,0459(UCS - 150)$$

$$b = 69,51 + 10,27*ANG + 0,549*FINOS - 5,105(C_c - 2) - 0,408(UCS - 150) - 0,408$$

$$c = -0,3974$$

Los parámetros que se emplean en las anteriores variables se presentan a continuación:

ANG = Índice de Angularidad (Índice de Angularidad – 5) para valores mayores a 5,5. Las partículas redondeadas tienen un valor de 0 (adimensional).

FINOS = Representa el porcentaje de Finos pasando la Malla N° 200 (%).

C_c = Coeficiente de Curvatura (adimensional).

UCS = Esfuerzo de Compresión Inconfinada (MPa).

Para ser uso de esta teoría se hace referencia a las Figuras 29, 39 y 49, que muestran las curvas granulométricas de cada uno de los odómetros realizados con los materiales del sitio Carazo y de las Figuras 34, 44 y 54, que muestran las curvas granulométricas de cada uno de los odómetros realizados con los materiales del sitio Presa; de ellos se desprende el porcentaje de finos, necesario para la aplicación de dicha metodología.

De los Cuadros 34, 35 y 36 se obtuvieron los coeficientes de curvatura final para cada curva granulométrica, producto de cada ensayo de odómetro realizado para los materiales del sitio Carazo. Mientras que de los Cuadros 37, 38 y 39 se obtuvieron los coeficientes de curvatura final para cada curva granulométrica producto de cada ensayo de odómetro realizado para los materiales del sitio Presa.

Estos resultados preliminares para la aplicación de dicha teoría se muestran a continuación.

CUADRO 77. PARÁMETROS INICIALES PARA APLICAR LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Ensayo	% Finos	Coeficiente Curvatura C _c Final
Odómetro #1	7%	0,34
Odómetro #2	8%	0,37
Odómetro #3	5%	0,40

CUADRO 78. PARÁMETROS INICIALES PARA APLICAR LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.		
Ensayo	% Finos	Coeficiente Curvatura C _c
Odómetro #1	6%	0,43
Odómetro #2	6%	0,21
Odómetro #3	5%	0,56

Los resultados obtenidos de aplicar esta teoría se muestran seguidamente para cada prueba de odómetro realizado, a la densidad

máxima establecida para cada caso en específico.

CUADRO 79. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EFECTIVO, APLICANDO LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO CARAZO.									
Ensayo	σ'_n (MPa)	UCS (MPa)	% Finos	Cc	ANG	a	b	c	ϕ' (grados)
Odómetro #1	0,49	154,06	7	0,34	0	35,35	75,96	-0,3974	35,59
Odómetro #1	0,98	154,06	7	0,34	0	35,35	75,81	-0,3974	35,53
Odómetro #1	1,47	154,06	7	0,34	0	35,35	75,65	-0,3974	35,50
Odómetro #1	1,96	154,06	7	0,34	0	35,35	77,69	-0,3974	35,48
Odómetro #1	2,45	154,06	7	0,34	0	35,35	77,69	-0,3974	35,47
Odómetro #1	3,19	154,06	7	0,34	0	35,35	77,69	-0,3974	35,46
Odómetro #1	3,92	154,06	7	0,34	0	35,35	77,69	-0,3974	35,45
Odómetro #1	4,66	154,06	7	0,34	0	35,35	77,69	-0,3974	35,45
Odómetro #1	5,39	154,06	7	0,34	0	35,35	77,69	-0,3974	35,44

CUADRO 80. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EFECTIVO, APLICANDO LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO CARAZO.									
Ensayo	σ'_n (MPa)	UCS (MPa)	% Finos	Cc	ANG	a	b	c	ϕ' (grados)
Odómetro #2	0,49	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,61
Odómetro #2	0,98	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,55
Odómetro #2	1,47	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,52
Odómetro #2	1,96	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,51
Odómetro #2	2,45	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,49
Odómetro #2	3,19	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,48
Odómetro #2	3,92	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,47
Odómetro #2	4,66	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,47
Odómetro #2	5,39	154,06	8	0,37	0	35,37	77,70	-0,3974	35,46

CUADRO 81. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EFECTIVO, APLICANDO LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO CARAZO.									
Ensayo	σ'_n (MPa)	UCS (MPa)	% Finos	Cc	ANG	a	b	c	ϕ' (grados)
Odómetro #3	0,49	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,63
Odómetro #3	0,98	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,58
Odómetro #3	1,47	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,55
Odómetro #3	1,96	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,53
Odómetro #3	2,45	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,52
Odómetro #3	3,19	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,51
Odómetro #3	3,92	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,50
Odómetro #3	4,66	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,49
Odómetro #3	5,39	154,06	5	0,40	0	35,40	77,68	-0,3974	35,49

CUADRO 82. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EFECTIVO, APLICANDO LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #1 DEL SITIO PRESA.

Ensayo	σ'_n (MPa)	UCS (MPa)	% Finos	Cc	ANG	a	b	c	ϕ' (grados)
Odómetro #1	0,49	153,20	6	0,43	0	35,38	75,84	-0,3974	35,62
Odómetro #1	0,98	153,20	6	0,43	0	35,38	76,97	-0,3974	35,56
Odómetro #1	1,47	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,53
Odómetro #1	1,96	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,52
Odómetro #1	2,45	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,50
Odómetro #1	3,19	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,49
Odómetro #1	3,92	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,48
Odómetro #1	4,66	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,48
Odómetro #1	5,39	153,20	6	0,43	0	35,38	78,04	-0,3974	35,47

CUADRO 83. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EFECTIVO, APLICANDO LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #2 DEL SITIO PRESA.

Ensayo	σ'_n (MPa)	UCS (MPa)	% Finos	Cc	ANG	a	b	c	ϕ' (grados)
Odómetro #2	0,49	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,45
Odómetro #2	0,98	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,39
Odómetro #2	1,47	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,37
Odómetro #2	1,96	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,35
Odómetro #2	2,45	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,34
Odómetro #2	3,19	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,32
Odómetro #2	3,92	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,32
Odómetro #2	4,66	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,31
Odómetro #2	5,39	153,20	6	0,21	0	35,21	78,04	-0,3974	35,30

CUADRO 84. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EFECTIVO, APLICANDO LA TEORÍA DE DOUGLAS A LOS MATERIALES DEL ODÓMETRO #3 DEL SITIO PRESA.

Ensayo	σ'_n (MPa)	UCS (MPa)	% Finos	Cc	ANG	a	b	c	ϕ' (grados)
Odómetro #3	0,49	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,71
Odómetro #3	0,98	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,66
Odómetro #3	1,47	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,63
Odómetro #3	1,96	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,62
Odómetro #3	2,45	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,60
Odómetro #3	3,19	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,59
Odómetro #3	3,92	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,58
Odómetro #3	4,66	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,58
Odómetro #3	5,39	153,20	5	0,56	0	35,48	78,03	-0,3974	35,57

Aplicación de la Teoría de Leps

Esta teoría establecida por Thomas Leps (1970), es de gran utilidad, ya que permite obtener un valor preliminar del ángulo de fricción interna, respecto a valores del esfuerzo normal aplicado a los materiales. En nuestro caso se emplea dicha teoría para poder comparar los resultados obtenidos, respecto de los presentados por Barton, Kjaernsli y Marsal.

La idea fundamental es la de obtener un punto de comparación muy utilizado por varios autores e investigadores a la hora de determinar los valores del ángulo de fricción interna de los materiales, para estudiar y analizar su comportamiento, a la hora de funcionar como una gran masa, en determinado proyecto.

Para hacer uso de esta teoría, se emplea la figura que se mostrará posteriormente, en donde conociendo los valores del esfuerzo normal aplicado a los materiales, se determina un valor del ángulo de fricción.

La figura se encuentra conformada por el empleo de varios tipos de materiales de diferentes represas construidas en el mundo con características distintas.

Se presentan tres rectas, la primera de ellas determinada por valores de densidad altos, materiales bien graduados y rocas resistentes. La segunda de ellas, ubicada al centro de las tres, representa las características promedios de los materiales. Por último, la tercera de ellas representa los materiales con valores de densidad bajos, materiales pobremente graduados y partículas débiles ante el sometimiento de esfuerzos.

En nuestro caso, para los materiales del sitio Carazo y sitio Presa, se utilizará la curva promedio, para determinar los valores del ángulo de fricción.

La figura se representa en escala semi logarítmica. En ella, los valores de los esfuerzos normales se encuentran en unidades inglesas, de ahí que para poder hacer uso del mismo se deben convertir nuestros valores del esfuerzo normal, que se encuentran en unidades del sistema internacional SI, a unidades del sistema inglés.

El rango de esfuerzos normales aplicados a los materiales se encuentra entre los 5 kg/cm² y los 55 kg/cm². Si se verifica el rango de valores que acepta la gráfica propuesta por Leps, solamente se podrían determinar valores del ángulo de fricción interna, hasta un máximo de 35,20kg/cm², puesto que hasta acá lo permite la escala de valores establecida en unidades del sistema inglés que presenta la figura. Esto se convertiría en una limitante de la teoría, para nuestro caso en específico, pero se debe recordar que el esfuerzo real de los materiales, a nivel de base de la presa, es de 27,24 kg/cm². Estos, al aplicar un factor de seguridad se duplican y representan el valor de 55 kg/cm², que se convierte en el esfuerzo normal aplicado a los materiales protegidos por este factor de seguridad.

Los valores que se determinan del ángulo de fricción interna, corresponde a los mismos valores del parámetro, tanto para los materiales del sitio Carazo como Presa. Esto, ya que para su determinación solamente es necesario conocer el rango de esfuerzos normales aplicables a los materiales, tal y como se detalla en la Figura 85; de ahí que se presente un solo cuadro con los valores obtenidos de aplicar esta metodología para ambos sitios de materiales.

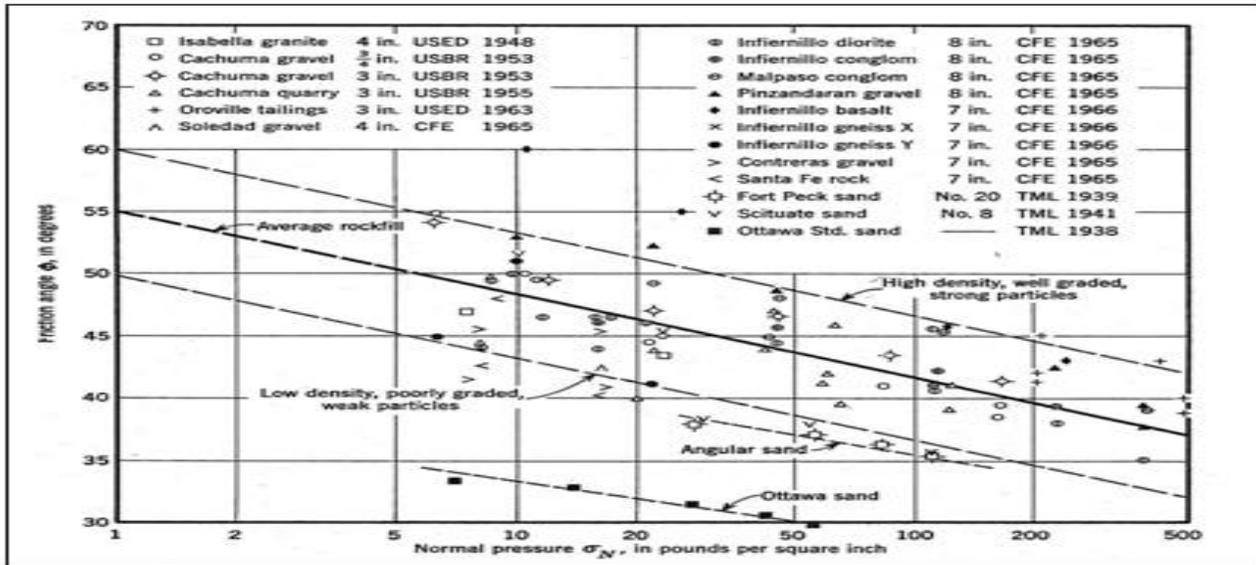


Figura 85. Determinación del ángulo de fricción interna de los materiales en función del esfuerzo normal aplicado a los mismos establecido por Leps.

Los valores que se obtienen del ángulo de fricción interna para los materiales del sitio Carazo y Presa, que se desprenden de la aplicación práctica de la figura anterior, se presenta en la misma Figura 86 demarcados para su mayor claridad. Cabe destacar que los valores acá obtenidos son consistentes con las demás teorías aplicadas en cuanto a que al aumentar el nivel de esfuerzos de los materiales, los valores del ángulo de fricción interna de los materiales tienden a disminuir.

Si se observa el rango de valores obtenidos y se compara con los valores arrojados de las demás teorías aplicadas, estos se encuentran en el rango que se maneja para enrocados. De esto se desprende que la aplicación de esta teoría servirá para realizar una comparación más detallada de este parámetro en cuestión, esto en la sección de Análisis de Resultados. Seguidamente se presentan tanto la figura anterior con los valores demarcados así como un cuadro con los valores arrojados.

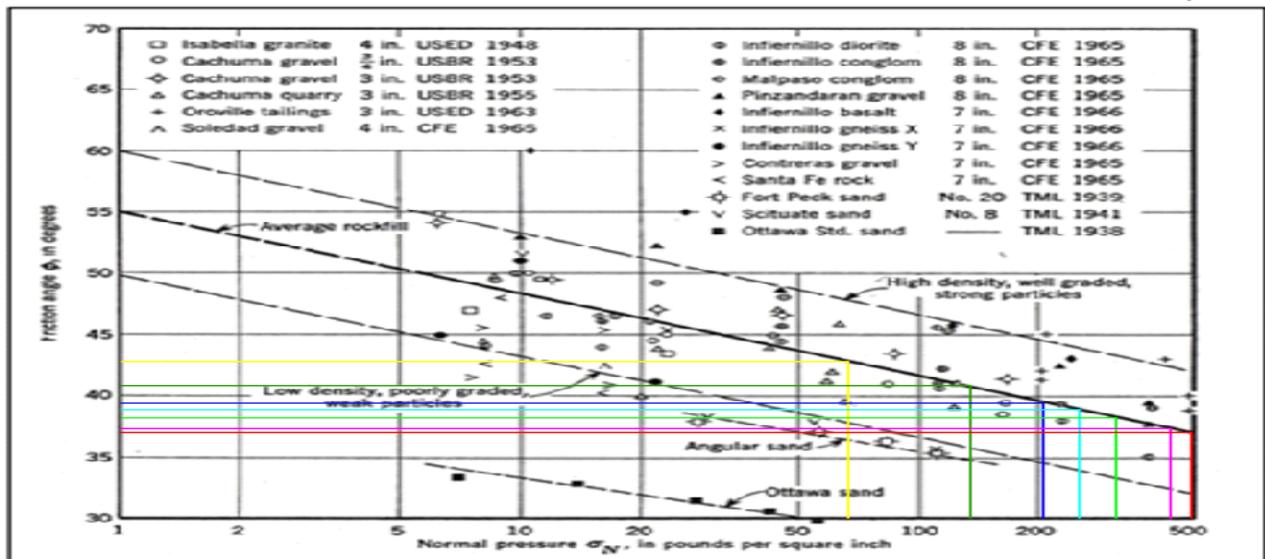


Figura 86. Aplicación práctica de la determinación del ángulo de fricción interna de los materiales, en función del esfuerzo normal aplicado a los mismos establecido por Thomas Leps.

CUADRO 85. VALORES DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DE LOS MATERIALES EN FUNCIÓN DEL ESFUERZO NORMAL, APLICADO A LOS MATERIALES DE LOS SITIOS CARAZO Y PRESA, ESTABLECIDO POR LEPS.

Esfuerzo Normal (PSI)	Esfuerzo Normal (Kg/cm²)	φ (grados)
71,12	5,00	42,74
142,23	10,00	40,70
213,35	15,00	39,36
284,47	20,00	38,77
355,58	25,00	38,07
462,26	32,50	37,25
500,00	35,20	36,91

Análisis de Resultados

Los resultados anteriormente mostrados en las diferentes pruebas realizadas, se emplean como parámetro índice para la selección y clasificación. Esto se presenta en el Cuadro 40, en donde se observan claramente los tres tipos de granos que existen para enrocados, según la clasificación propuesta por Raúl Marsal (1965), para enrocados.

Los valores de la densidad máxima en el laboratorio, obtenidos según el ensayo respectivo, se utilizan para determinar el máximo esfuerzo de los materiales en la base de la presa, al considerar la densidad humedad y una altura de diseño de la misma de 120 metros. Además, la densidad de los materiales en estado saturado, superficie seca, permite determinar las cantidades específicas de materiales, al conocer las características del odómetro como lo son su diámetro y altura internas.

Cuando se habla de materiales, se hace referencia tanto a los sólidos como a los líquidos (agua), necesarios en este último caso, para saturar los sólidos y mantenerlos en estado saturado superficie seca.

La prueba de compresión unidimensional de los materiales realizada en el odómetro, se basa en la densidad máxima de los mismos, para determinar las cantidades que corresponden por prueba, al considerar como variante este parámetro.

Como se muestra en los resultados anteriores, se realizaron tres ensayos de odómetro para los materiales de los sitios de préstamo Carazo y Presa, variando la densidad de los materiales, realizando la primera a una densidad del 100%, la segunda a un 95% y la

última a una densidad máxima de laboratorio del 90%. Para cada una de estas pruebas se obtuvieron los resultados mostrados anteriormente.

Módulo de Deformabilidad a una Densidad Máxima del 100%

Para el caso de la prueba a una densidad máxima de los materiales del 100%, utilizando los materiales del sitio Carazo, el máximo asentamiento del material alcanzado fue de **2,61 cm** al momento de aplicarles la máxima carga, tal y como se detalla en el Cuadro 9 en la sección de Apéndices. En el caso de la primer prueba de odómetro realizada con los materiales del sitio Presa, se obtuvo **5,95 cm** de deformación, en el mayor asentamiento, respecto de los materiales del sitio Carazo; esto se demuestra en el Cuadro 13 de la sección de Apéndices, al momento de aplicarles la máxima carga. Este comportamiento tan divergente entre materiales de ambos sitios, se debe a que se obtuvo un menor valor de la densidad de los materiales para el caso del sitio Presa; esto, indudablemente tendría su efecto en la prueba de odómetro.

Se obtuvo la curva del Esfuerzo respecto de la Deformación, para cada caso en particular. En las Figuras 26 y 31 de la sección de Resultados, se presentan los diferentes ciclos de carga y descarga del esfuerzo aplicado a los materiales de los sitios Carazo y Presa, respectivamente.

Como se puede observar en estas figuras, se vislumbran tres pendientes claramente definidas, que representan el módulo de

deformación de los materiales para cada nivel de esfuerzo.

El módulo de deformación aumenta respecto se va aumentando el esfuerzo en los materiales y por ende se incrementan los asentamientos en los mismos.

El módulo de deformación que se recomienda para materiales a ser utilizados como enrocados debe ser superior a los **100 MPa (1019,40 kg/cm²)**. Esto, según recomendación del Ingeniero Bayardo Materón, ingeniero especialista en la construcción de represas del tipo C.F.R.D.

Los materiales ensayados a una densidad del 100% para el caso del sitio Carazo, superan un módulo de deformación de los **1019,40 kg/cm²**; esto en cada uno de los ciclos de ejecución de la prueba, lo que los hace aceptables bajo este parámetro para ser utilizados. Para el punto máximo de esfuerzo, aplicado a los materiales el cual fue de **55 kg/cm²**; se obtuvo un valor del módulo de deformabilidad de **1305,04 kg/cm²**.

Ahora bien, considerando el caso de los materiales del sitio Presa, los resultados obtenidos en cuanto a su módulo de deformación no superan el valor recomendado para su utilización. El máximo valor presentado por estos materiales corresponde a **538,07 kg/cm²**, para el máximo esfuerzo aplicado a los materiales el cual fue de **55 kg/cm²**.

Esto se debe a que la cantidad de arenas que presentan los materiales del sitio Presa, respecto del sitio Carazo, es mucho menor, de ahí que su densidad presentó un valor relativamente menor y por ende en la prueba de odómetro se presentasen valores del módulo de deformabilidad de los materiales mucho menores a los obtenidos con los materiales del sitio Carazo.

Sin duda la influencia de las arenas es vital, ya que las mismas funcionan como distribuidoras del esfuerzo aplicado entre los materiales rocosos, además de servir para completar o rellenar vacíos entre el mismo material rocoso. Esto, conlleva a presentar porcentajes de rotura menor o mayores, según sea el caso del faltante o excedente de arena que presente el material.

El comportamiento para el módulo de deformación de los materiales es variable respecto del esfuerzo aplicado y presenta la tendencia de aumentar al aplicar un mayor

esfuerzo. Los resultados para este primer ensayo de odómetro se resumen en los Cuadros 32 y 35, respectivamente, para los sitios Carazo y Presa, presentados en la sección de Apéndices de este informe. En él se presenta lo que se describió anteriormente y que corresponde a la tendencia de incremento del módulo de deformabilidad, al aumentar el esfuerzo en los materiales.

En las Figuras 27 y 32 de la sección de Resultados, se presentan el comportamiento lineal que los materiales de los sitios Carazo y Presa, experimentan al aumentar el esfuerzo respecto de la densidad de los mismos. Se observa que al aumentar el nivel de esfuerzos sobre el material, los vacíos que se encuentran presentes en el odómetro tienden a disminuir; por ello, la densidad del material aumenta y esto es lo que se resume en estas figuras.

Las Figuras 28 y 33 de la sección de Resultados, presentan el comportamiento de la relación de vacíos de los materiales, en donde se ve claramente que al iniciar el ensayo de odómetro, se tiene una relación de vacíos inicial alta. Esta, tiende a disminuir conforme los esfuerzos siguen incrementando en cada ciclo de carga, hasta alcanzar un mínimo, al aplicar la máxima carga a los materiales y sostener la misma por un periodo de tiempo determinada.

Una vez que los materiales han sido ensayados en el odómetro, se procede a su extracción con la finalidad de observar el comportamiento de la masa rocosa, que compone la muestra y ver si la misma sufrió efectos en su composición, es decir, si los materiales se fragmentaron.

Es por ello, que se realiza una granulometría tanto inicial como final a los materiales, antes y después del ensayo. Esto, para observar si en realidad los materiales sufrieron fragmentación y ver en qué tamaño de las mallas se ve reflejada esa diferencia.

Los Cuadros 10, 11 y 14, 15, que se muestran en la sección de Apéndices, respectivamente presentan los datos granulométricos de los materiales antes como después de efectuar el ensayo de odómetro para el caso de los materiales del sitio Carazo y Presa en su orden de presentación. En ellos se presentan los porcentajes pasando en cada una de las mallas, así como también los porcentajes retenidos en cada una de ellas.

Las Figuras 29 y 34 de la sección de Resultados, presentan ambas curvas

granulométricas, tanto la inicial como la final para los materiales de Carazo y Presa respectivamente. Se observa en ella que la diferencia en los porcentajes pasando es más representativa en la parte fina de la curva, para el caso del sitio Carazo. En el sitio Presa la diferencia se aprecia desde la sección gruesa de la curva y se mantiene a lo largo de la misma, a pesar de que lo que se fragmenta es la parte gruesa de los materiales, pues es lo que predomina en los materiales de este sitio; esta, se ve reflejada a lo largo de toda la gráfica.

Las Figuras 30 y 35 de la sección de Resultados, muestran los porcentajes retenidos en cada una de las mallas y se presentan las cantidades hasta el orden de las centésimas, para determinar más claramente las diferencias entre ambas granulometrías, ya que en algunos casos la misma se nota en los decimales. Con base en estos porcentajes retenidos, se obtiene el porcentaje de la rotura de los granos, que se presenta en los Cuadros 10 y 11 de la sección de Resultados, para los sitios Carazo y Presa respectivamente. Para este ensayo de odómetro #1 se presentó un **3%**, para el caso de los materiales del sitio Carazo y un **5%** para el ensayo con los materiales del sitio Presa; esto, en porcentaje del peso total de la muestra.

Cabe destacar que el porcentaje de la rotura de granos establecido por Raúl Marsal corresponde a la diferencia de los porcentajes retenidos inicial menos final, al considerar únicamente los valores positivos de dicha diferencia.

Módulo de Deformabilidad a un 95% de su Densidad Máxima

El desarrollo del ensayo de odómetro realizado a una densidad del 95% de los materiales, tanto para los del sitio Carazo y Presa, presenta valores de asentamientos determinados en el odómetro un tanto mayores a los obtenidos en el primer ensayo odométrico.

Los valores que se determinaron para el caso de los materiales del sitio Carazo y del sitio Presa se muestran en los Cuadros 16 y 20, respectivamente, en la sección de Apéndices. El mayor de todos, es primeramente para el caso de los materiales del sitio Carazo, que se obtuvo al aplicar el esfuerzo máximo a los materiales y que

corresponde a **4,08 cm**; para el caso de los materiales del sitio Presa, el mayor asentamiento que se presentó para este ensayo corresponde a **8,22 cm**. Éste es casi el doble al presentado por los materiales del sitio Carazo, al momento de aplicar el máximo esfuerzo de **55 kg/cm²** a los materiales dentro del odómetro.

La razón de esta diferencia tan marcada, en cuanto al asentamiento experimentado por los materiales en ambas pruebas, se debe a la diferencia que se presentó en cuanto a los valores determinados de la densidad máxima de laboratorio, para los materiales de estos sitios y los porcentajes de arenas que presentaron los mismos.

Una razón para justificar el incremento en los valores obtenidos de asentamientos en los materiales, para esta prueba, respecto de la anterior, se debe a que la energía de compactación necesaria para introducir los materiales al interior del odómetro fue mucho menor a la que se necesitó para realizar la misma función; pero, esta vez en el odómetro realizado a una densidad del 100%. Lo anterior, se ve reflejado en los resultados que se muestran en este ensayo odométrico #2, en donde se da un incremento significativo en los asentamientos de los materiales. Esto, necesariamente se ve directamente relacionado con una significativa disminución en el módulo de deformación, ya que tal y como se aprecia en los Cuadros 33 y 36, de la sección de Apéndices, para los sitios Carazo y Presa respectivamente, los valores acá determinados para cada una de las pendientes de las Figuras 36 y 41, son mucho menores a las obtenidas en el primer ensayo de compresión unidimensional; para los materiales del sitio Carazo se obtuvo un máximo módulo de deformabilidad de **753,29 kg/cm²**, mientras que con los materiales provenientes del sitio Presa, el valor obtenido para el módulo de deformación fue de **377,60 kg/cm²**. En ambos casos, son valores menores a los ideales propuestos por el Ingeniero Bayardo Materón y que corresponden a valores superiores o iguales a los **100 MPa (1019,40 kg/cm²)**.

Igualmente que en el ensayo de odómetro a una densidad del 100%, la densidad de los materiales incrementa, conforme el esfuerzo aplicado a los mismos crece de igual manera; esto explica la relación lineal entre ambos parámetros. Además, al iniciar con esta prueba de compresión, se inicia con una relación

de vacíos alta, que irá disminuyendo conforme el esfuerzo aplicado a los materiales incrementa, hasta alcanzar un mínimo absoluto que será el punto en que los materiales experimenten la mayor densificación.

El comportamiento, tanto de la densidad respecto a la deformación y de la relación de vacíos respecto al esfuerzo aplicado a los materiales, se ilustra en las Figuras 37 y 42, para el caso del comportamiento de la densidad y en las Figuras 38 y 43, para el caso del comportamiento de la relación de vacíos respectivamente, a los materiales de los sitios Carazo y Presa. Estas figuras se muestran en la sección de Resultados del presente informe.

Al igual que en el caso del odómetro anterior, se cuenta con una granulometría inicial y una granulometría final de los materiales, una vez que los mismos han sido ensayados y extraídos del odómetro. Ambas curvas granulométricas se observan en las Figuras 39 y 44, respectivamente en la sección de Resultados, para los ensayos de odómetro con los materiales de los sitios Carazo y Presa. Para el caso de los materiales del sitio Carazo extraídos del odómetro, se define un incremento en las cantidades de finos de la muestra, producto de la ejecución de la prueba y los niveles de esfuerzo alcanzados y soportados por los materiales; mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa extraídos de este segundo ensayo de odómetro, se presenta una diferencia entre curvas inicial y final a lo largo de la misma; es un poco más marcada en la sección fina de la curva.

Producto de estas granulometrías de materiales, se establecen las Figuras 40 y 45, presentadas en la sección de Resultados, que muestran las cantidades de materiales retenidas por tamaño nominal de malla y que, en resumidas cuentas, permiten determinar el porcentaje de rotura de granos que experimentó la muestra ensayada.

Para ambos casos, el porcentaje de rotura de granos sufrió un leve aumento, respecto del ensayo anterior y se presenta que para el ensayo del odómetro realizado con materiales del sitio Carazo. El porcentaje de rotura de granos fue del **5%**, como se detalla en el Cuadro 12 de la sección de Resultados; el porcentaje corresponde al peso total de la muestra. Este leve aumento, en cuanto a la rotura de granos, respecto al ensayo de odómetro realizado al 100% de la densidad máxima de los materiales, puede deberse a la

mayor relación de vacíos presentes en la muestra. Esto, ocasiona que la parte de granos gruesos soporten la mayor cantidad de esfuerzo en ciertas zonas en el interior del odómetro.

Por otro lado, para el caso de los materiales del sitio Presa, se obtuvo un porcentaje de rotura del **7%**, tal y como se presenta en el Cuadro 13 de la sección de Resultados. Éste, incrementa respecto del ensayo realizado a un 100% de su densidad y con respecto al mismo ensayo, pero con los materiales del sitio Carazo. Esto es, básicamente, debido a que en el caso del ensayo de odómetro, con los materiales del sitio Presa, los esfuerzos son mayoritariamente soportados por la fracción gruesa de los materiales; existe mayor cantidad de vacíos producto de la menor cantidad de arenas presentes en este sitio.

Módulo de Deformabilidad a un 90% de su Densidad Máxima

El desarrollo de este ensayo de odómetro a una densidad del 90% de los materiales, presenta valores de asentamiento respecto de los dos anteriores ensayos mayores. Esto, es entendido en el hecho de que, como el ensayo se realiza a una densidad del 90%, la energía de compactación necesaria, para lograr introducir los materiales dentro del odómetro, es mucho menor a la requerida en los dos ensayos anteriores.

Es por ello que sin duda alguna los valores de asentamiento alcanzados por los materiales son los mayores de todos los ensayos realizados. Se presentan, como máximo valor el de **6,42 cm**, para el caso de la utilización de los materiales del sitio Carazo. Para el caso de la prueba de odómetro realizada con materiales del sitio Presa, el máximo asentamiento registrado fue de **8,65 cm**, al aplicar el máximo esfuerzo sobre los materiales, el cual es de **55 kg/cm²**.

Los valores de asentamiento, a lo largo de toda la prueba, se presentan en los Cuadros 24 y 28, correspondientes a la sección de Apéndices, para los materiales de los sitios Carazo y Presa respectivamente. En ellos se detalla el comportamiento que experimentan los materiales en los diferentes ciclos de carga y descarga propuestos.

En las Figuras 46 y 51, se observa el comportamiento promedio de los materiales en los ciclos de carga y descarga. En estas figuras

se puede notar los tres módulos de deformación que presentan los materiales, tanto del sitio Carazo, como del sitio Presa, representado por las pendientes desarrolladas en los diferentes ciclos de carga.

Si se remonta a los Cuadros 34 y 37, presentados en la sección de Apéndices; estos, presentan los valores del módulo de deformabilidad de los materiales. Para cada uno de estos sitios en específico, se observa que para el caso de los materiales del sitio Carazo, el máximo valor del módulo de deformabilidad, obtenido, corresponde a **527,57 kg/cm²**, mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa, el valor máximo del módulo de deformabilidad, presentado, corresponde a **340,51 kg/cm²**; en ambos casos, por debajo de lo recomendado de **100 MPa (1019,40 kg/cm²)**.

En cada una de las tres pendientes que se muestran en las Figuras 46 y 51, se compara, respecto de los dos ensayos anteriores, que corresponden a los ensayos realizados al 100% y 95%, respectivamente, de la densidad máxima. Los resultados se resumen en los Cuadros 32, 33, y 35, 36, presentados en la sección de Apéndices; se observa una clara tendencia en el decrecimiento de estos valores, conforme se disminuye la densidad de los materiales como parámetro de inicio de la prueba.

Este efecto se asocia a los demás resultados obtenidos. Así por ejemplo, si se comparan los valores de densidad alcanzados por los materiales, conforme se aumentaba el esfuerzo en los mismos, se observa la tendencia que se ha venido presentando en cada uno de los ensayos de odómetro anteriores, en donde al aumentar el esfuerzo aplicado a los materiales, la densidad de los mismos igualmente se incrementa.

Para este caso se observa en las Figuras 47 y 52, de la sección de Resultados, el comportamiento lineal de la densidad de los materiales respecto del esfuerzo aplicado a los mismos, para los materiales de cada uno de los sitios en estudio.

A su vez, el comportamiento presentado por los materiales en cuanto a disminuir la relación de vacíos conforme se va aumentando el esfuerzo aplicable a los materiales, es de entender. La energía de compactación, a la que se ven sometidos los materiales, igualmente aumenta y los vacíos entre partículas de material, dentro del odómetro, disminuyen, tal y como se

aprecia en las Figuras 48 y 53, de la sección de Resultados, para cada uno de los respectivos sitios de materiales.

Al comparar los valores de la relación de vacíos arrojados en cada uno de los ensayos realizados a los materiales del sitio Carazo, se observa la tendencia creciente a partir del primer ensayo y respecto de los otros dos. Así por ejemplo, para el ensayo de odómetro #1, el valor promedio de la relación de vacíos presente en los materiales a lo largo de la prueba fue de **0,19**, mientras que para el odómetro #2, considerando las mismas condiciones de ejecución de la prueba, la relación de vacíos fue de **0,22** y ya por último para el odómetro #3, realizado al porcentaje de la densidad máxima más bajo, la relación de vacíos promedio de los materiales fue de **0,25**. Esto se deja ver en cada uno de los Cuadros 9, 17 y 25, al final de los mismos, presentados en la sección de Apéndices.

Esta misma tendencia se aprecia en los materiales del sitio de préstamo Presa, ya que para los ensayos de odómetro #1 se obtuvo un valor promedio de relación de vacíos de **0,23**, mientras que para el caso del odómetro #2, la relación de vacíos promedio incrementó a **0,24** y para el caso del último ensayo odométrico, la relación de vacíos promedio fue la mayor de los tres ensayos para este sitio, siendo de **0,29**, tal y como se aprecia en los Cuadros 13, 21 y 29 de la sección de Apéndices del presente informe.

A continuación se brindan algunos ejemplos de relaciones de vacíos inicial y final de materiales utilizados en la construcción de una serie de represas alrededor del mundo.

CUADRO 86. EJEMPLOS DE RELACIÓN DE VACÍOS INICIAL EN DIFERENTES REPRESAS EN EL MUNDO CONFORMADAS POR GRAVA Y ARENAS.	
Represa	e_i
Grava y Arena de Pinzandarán	0,33
	0,36
	0,29
	0,28
	0,29
	0,31
	0,29

Grava y Arena de la Angostura	0,31
	0,32
	0,30
	0,30
	0,26
	0,24
	0,25
	0,24

16

CUADRO 87. EJEMPLOS DE RELACIÓN DE VACÍOS FINAL EN DIFERENTES REPRESAS EN EL MUNDO.

Represa	e_f
Aguamilpa (3A)	0,18
Crotty (3A)	0,20
Golillas (3A)	0,24
Salvajina (3A)	0,25
Bastyan (3A)	0,23
Kangaroo Creek (3A)	0,20
Little Para (3A)	0,22
Mackintosh (3A)	0,24
Mangrove Creek (3A)	0,18
Murchinson (3A)	0,23
Serpentine (3A)	0,26
Shiroro (3A)	0,20
White Spur (3A)	0,18 a 0,25
Salvajina (3B)	0,21
Mangrove Creek (3B)	0,26
Tianshengquao 1 (3B)	0,21
For Do Areia (3B)	0,27
Ita (3B)	0,33
Xingo (3B)	0,31

17

El anterior Cuadro 87, presenta una serie de valores de la relación de vacíos final alcanzados durante los terraplenes construidos en las represas ahí mostradas.

Si se compara los valores obtenidos de los resultados de los diferentes odómetros realizados tanto con los materiales de los sitios Carazo como Presa, con los mostrados en estos dos cuadros anteriormente presentados, nos dan

¹⁶ Valores tomados del Libro Presas de Tierra y Enrocado de Raúl Marsal.

¹⁷ Valores Tomados del Libro Geotechnical Engineering of Dams.

una referencia de que es posible alcanzar relaciones de vacíos bajas. Esto se puede relacionar a la graduación presentada por los materiales en los sitios estudiados y al esfuerzo confinante suministrado a los materiales dentro del odómetro principalmente y por ende a la carga puntual transmitida.

Además, la teoría recomienda que los materiales a utilizar como enrocado en la construcción del tipo de represas C.F.R.D, no debe de presentar relaciones de vacíos superiores a 0,25.

Analizando las diferencias marcadas entre los sitios Carazo como Presa, las relaciones de vacíos alcanzadas para el sitio Presa tienden a ser mayores, dados los porcentajes de materiales retenidos en cada malla, siendo mayor la presencia de gravas que de arenas, viéndose esto reflejado en la curva granulométrica presentada en la sección de Resultados de este informe. Los porcentajes de limos y arcillas se mantienen muy constantes en cuanto a porcentajes se refiere para ambos sitios, de ahí que este no afecte los resultados obtenidos.

Lo que sí se presenta como una tendencia común, en cada uno de los tres ensayos odométricos tanto de los sitios Carazo como Presa, es que conforme se realizaban los ensayos y disminuía la densidad de los materiales, la relación de vacíos inicial de los materiales para cada uno de estos ensayos incrementó. El ensayo realizado a un 100% de su densidad, fue el que presentó menor relación de vacíos inicial y el último ensayo de odómetro realizado a una densidad del material del 90%, el que presentó mayor relación de vacíos inicial.

Finalmente, así que los materiales han sido extraídos del interior del odómetro, se realiza la granulometría final de los materiales, que se detalla en las Figuras 49 y 54, de la sección de Resultados para cada uno de los sitios Carazo y Presa, respectivamente.

Se aprecia, en esta ocasión, que las curvas, tanto inicial como final de los materiales del sitio Carazo, presentan una diferencia un poco más marcada, en la parte gruesa de los materiales, a diferencia de los otros dos casos anteriores en donde se presentaba esta diferencia pero en la parte final de la curva.

Los porcentajes retenidos en cada una de las mallas se representan en las Figuras 50 y 55, de la sección de Resultados respectivamente, para los materiales de los sitios Carazo y Presa;

aquí, claramente se aprecian las diferencias porcentuales entre cada una de las granulometrías, tanto inicial como final.

Es con base en estas Figuras 50 y 55 que se obtienen los Cuadros 14 y 15, presentados en la sección de Resultados, que representa el porcentaje de rotura de granos que experimentan los materiales para este odómetro #3, en cada uno de estos sitios en estudio. Se obtiene un valor del **4%** del peso total ensayado para los materiales del sitio Carazo y un **6%** del peso total de la muestra ensayada, para los materiales del sitio Presa; estos, a diferencia del ensayo de odómetro #2, disminuyen para ambos casos.

En general, la tendencia mostrada en los tres ensayos de compresión unidimensional, respecto de los materiales del sitio Carazo, en lo que a rotura de granos se refiere, se mantiene en un rango que va del **3% al 5%** del peso total de la muestra ensayada.

Para el caso de los materiales del sitio Presa, el rango de rotura de granos se encuentra entre un **5%** y un **7%** del peso total de la muestra ensayada. Esto, hace ver que en realidad la cantidad de material granular que experimenta la fragmentación, para ambos casos, es poca.

Es un tanto mayor para el caso de los materiales del sitio Presa, por la poca presencia en su muestra de arenas, lo cual, es poco beneficioso para la determinación del módulo de deformabilidad, como anteriormente se acotó.

Comparación entre Ensayos de Odómetro

En la sección de Resultados de este informe se presentan en las Figuras 56 y 58 la tendencia final arrojada por los tres ensayos de odómetro; esto, en lo que se refiere a las curvas esfuerzo respecto de la deformación, para cada uno de los dos sitios en estudio.

Se aprecia la clara diferencia entre cada uno de ellos, en cuanto a la máxima deformación alcanzada por los materiales en cada uno de los ciclos de carga y descarga y más generalmente en cada uno de los ensayos.

En los Cuadros 16 y 17 de la sección de Resultados, se presentan los máximos valores del módulo de deformabilidad de los materiales de ambos sitios, obtenidos por medio de la prueba de odómetro, en donde si se comparan

los materiales en cuanto a este parámetro, se concluye que los pertenecientes al sitio Carazo presentan mejores características para alcanzar valores altos del módulo de deformación respecto a los del sitio Presa.

Se aprecia, por ejemplo, que para el caso de los materiales del sitio Carazo, la curva que se obtuvo para el ensayo odométrico #2, una vez alcanzado el primer ciclo del ensayo, la deformación que presentaban los materiales a este punto, ya superaba a la máxima deformación alcanzada en el ensayo de odómetro #1. Así mismo se presentó este caso entre los ensayos de odómetro #2 y #3, donde se tuvo que, una vez alcanzado el primer ciclo de carga y descarga del odómetro #3, ya se había superado la máxima deformación presentada por los materiales en el ensayo odométrico #2.

Esta tendencia que se experimenta en los materiales del sitio Carazo, no se repite para con los materiales del sitio Presa, ya que las deformaciones alcanzadas como parte de la aplicación de los ensayos de odómetro, no fueron tan marcadas entre ensayos, como si sucedió con los materiales del sitio Carazo.

Esto se ve reflejado a su vez, en cuanto a que los valores obtenidos del módulo de deformabilidad para los materiales del sitio Presa, mediante la aplicación del ensayo odométrico, arroja valores más cercanos en cuanto a la ejecución de los ensayos, tal y como se aprecia en los Cuadros 35, 36 y 37 de la sección de Apéndices, a la respectiva densidad a la que se ejecutaron. Esto, en comparación con los resultados que se desprenden para los materiales del sitio Carazo, cuya diferencia entre los resultados obtenidos, para los ensayos de odómetro, es un tanto más abultada.

Los valores arrojados para el módulo de deformación, en cada uno de los ensayos de odómetro, han manifestado un decrecimiento conforme se disminuye la densidad de los materiales.

Para los ensayos de odómetro realizados a una densidad máxima de los materiales del 100% tanto para los materiales del sitio Carazo, como del sitio Presa, se desprenden resultados muy diferentes en cuanto a su módulo de deformación. Para el primer sitio, el máximo valor del módulo de deformación que se obtuvo, corresponde a **1305,04 kg/cm²**, mientras que para el caso del segundo sitio, el máximo valor obtenido fue de **538,07 kg/cm²**. Se evidencia una

clara diferencia entre los resultados obtenidos para los materiales de ambos sitios, marcada básicamente por la diferencia que se presentó, en cuanto al valor arrojado del ensayo de la densidad máxima de los materiales en el laboratorio, del sitio Presa respecto de los materiales del sitio Carazo.

Para una densidad de los materiales del 95%, se obtuvo, como valor máximo del módulo de deformabilidad **753,29 kg/cm²**, para los materiales del sitio Carazo. Esto, respecto del valor que se desprende del ensayo de odómetro para los materiales del sitio Presa, fue de **377,60 kg/cm²**. Si se comparan con el criterio extenuado por el Ingeniero Bayardo Materón, un material para ser catalogado como aceptable para su uso como enrocado, debe presentar valores del módulo de deformabilidad superiores a los **1019,40 kg/cm²** o su equivalente a **100 MPa**; es así como los materiales de los sitios de préstamo Carazo y Presa, no cumplirían, para su uso como enrocado, si se compactan a una densidad máxima del laboratorio del 95%.

Se comparan los resultados del odómetro #3, con los materiales de ambos sitios, en donde el máximo valor del módulo de deformabilidad para el caso de los materiales del sitio Carazo, que se obtuvo, fue de **527,57 kg/cm²**; mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa, el máximo valor del módulo de deformabilidad que se obtuvo fue de **340,51 kg/cm²**. Se concluye que, igualmente que en los casos del odómetro #2, se está en la situación de que se obtiene un valor del módulo de deformabilidad inferior a los **1019,40 kg/cm²**; es un material no apropiado, con esta condición de densidad al 90%; esto, según el criterio técnico del Ingeniero Materón.

Una vez obtenidos todos los resultados de las seis pruebas de odómetro realizadas, se concluye que es indispensable que los materiales por utilizar, como enrocado, presenten una buena graduación de sus materiales, con porcentajes de arenas superiores al 35% tal y como establece Sherard, para un enrocado por utilizar, dentro de la zona 2B de una represa del tipo C.F.R.D. Esto, porque se comprobó, mediante la ejecución de estas probetas, que las arenas ayudan a disminuir los vacíos presentes entre los materiales rocosos, además de ayudar a distribuir los esfuerzos de una mejor manera sobre los materiales. De ahí la diferencia tan marcada entre los valores arrojados de los módulos de deformabilidad, ya que los materiales del sitio

Carazo presentaron porcentajes de arenas, mucho mayores a los del sitio Presa.

Al presentarse los seis casos del ensayo de compresión unidimensional, se observa que únicamente los valores del primer odómetro que se llevó a cabo bajo una densidad del 100% para los materiales del sitio Carazo, cumple con lo requerido. Tal y como se presenta en el Cuadro 32 de la sección de Apéndices, todos los valores obtenidos se encuentran por encima de los **1019,40 kg/cm²** o bien **100 MPa**.

Esto conduce al criterio de que para superar o alcanzar valores del módulo de deformabilidad, superiores a este valor límite, se debe realizar una muy buena compactación de los materiales ya colocados en el sitio de presa. La densidad máxima de los materiales debe estar lo más cercana al 100% o exceder este valor, en espesores de capas que oportunamente se tendrán que determinar en el sitio mismo del proyecto.

Para rangos iguales o inferiores al 95% de la densidad de los materiales alcanzada en el laboratorio, ya no se alcanzarían valores adecuados del módulo de deformación, de ahí que esta opción no se debería considerar para la construcción de la represa.

Se debe tener presente, que los materiales ensayados poseen limitante de frontera, como las paredes del odómetro; esto, ocasiona que los materiales situados en este punto, ante un material que no sufre la misma deformación como lo es esta placa de acero, no experimenten esa deformación que sí experimentarían, como masa rocosa, que si ocurriría si lo que se tuviera en este límite fueran materiales del mismo tipo a los ensayados.

Es por ello que en el sitio propio de la construcción de la represa se pueden alcanzar valores cercanos o superiores del módulo de deformabilidad a los **1019,40 kg/cm²**. Es importante, por ello, estar realizando pruebas en sitio, donde se permitan determinar valores que sirvan de parámetro de consideración y evaluación para conocer si se están realizando las labores correctamente.

Existen metodologías, que permiten la obtención del módulo de deformación de los materiales en el sitio propio de construcción de la presa, tal como la expuesta por Fitzpatrick (1985). Éste, permite determinar el módulo de deformación de los materiales durante la construcción y un pseudo módulo de deformación

de los materiales, durante el primer llenado de la represa. Sin embargo, se deja la referencia del caso para su consideración, ya que la misma no es aplicable por el momento en este trabajo.

Por lo general, el módulo de deformación de los materiales que se obtiene al tiempo de construcción, arroja valores más altos a los obtenidos inicialmente mediante pruebas en laboratorio, como es nuestro caso.

Los valores acá presentados sirven de parámetro inicial y brindan una idea de la densidad (compactación) que se le debe de brindar a los materiales por utilizar como enrocado. Esto, para alcanzar valores altos desde un inicio para este parámetro y con ello asegurarse que en un tiempo posterior, como lo es el periodo de servicio de los materiales, los mismos presentasen valores de módulo de deformación menos altos a los que inicialmente se tenían planeado alcanzar.

Efectos de Escala

Para efectos de la realización de los diferentes ensayos, se tomo como tamaño máximo de los materiales, el que se encontrada pasando tres pulgadas. Esta situación se consideró, por dos razones básicamente:

1. Para las pruebas de la densidad máxima alcanzada en el laboratorio y de los pesos volumétricos, no se puede considerar un tamaño máximo de partículas superiores a las tres pulgadas, ya que el equipo se encuentra normado y estandarizado únicamente para este tamaño como máximo, teniendo como referencia la Norma ASTM D-4254.
2. Se debe respetar una relación diámetro del odómetro respecto al diámetro de la partícula de 5, por lo que un tamaño máximo de los granos de cuatro pulgadas, ya no respeta dicha relación.

Esto conduce a considerar que sucede a nivel macro de la represa. Investigaciones realizadas por Fumagalli (1969)¹⁸ muestran para el caso de

¹⁸ Información tomada del libro Presas de Tierra y Enrocamiento de Raúl Marsal.

la dimensión de la probeta, en la realización de ensayos de compresión unidimensional, el efecto del espécimen puede ser apreciable aún para valores de la relación diámetro de la probeta respecto al diámetro máximo de los granos mayores de 50. Según estas pruebas realizadas la compresibilidad de los materiales aumenta cuando la relación entre el diámetro de la probeta respecto al diámetro máximo del grano igualmente aumenta, esto particularmente en granulometrías uniformes.

Es así como la resistencia al corte de los materiales y el módulo de deformabilidad obtenido por medio de los ensayos realizados, considerando una relación superior a cinco entre el diámetro de la probeta respecto al diámetro máximo de las partículas, pueden ser mayores a los obtenidos con las muestras de masa de material rocoso empleada en cada uno de los ensayos de odómetro tomando como diámetro máximo de partícula pasando tres pulgadas.

Considerando ahora el efecto de la composición granulométrica de los materiales, Marsal (1965)¹⁹ desarrolló en la Universidad de UNAM una serie de prototipos donde se conserva el coeficiente de uniformidad del material, variando únicamente el tamaño máximo de las partículas en una medida necesaria, logrando comprobarse en ensayos de compresión unidimensional que la resistencia al corte de los materiales fue notablemente mayor en especímenes de menor dimensión.

Porcentajes de Materiales Retenidos Propuestos por Sherard

Sherard se dedicó a realizar varias investigaciones en lo que a construcción y revisión de represas de este tipo se refiere. Uno de los puntos de mayor importancia por considerar en la construcción de este tipo de represas son los materiales con los que se cuenta. Mayoritariamente el comportamiento que presente la represa, en su etapa de servicio, se deberá a las características de los materiales que se utilizaron.

Es por ello que Sherard establece una serie de porcentajes de materiales retenidos en

¹⁹ Información tomada del libro Presas de Tierra y Enrocamiento de Raúl Marsal.

las mallas de granulometría, para que los mismos sean considerados en una de las zonas más importantes de la represa, como lo es la zona 2B. Según investigaciones desarrolladas por él, permite obtener represas de este tipo C.F.R.D, en las que los materiales utilizados para la construcción de las mismas se comportan adecuadamente en las condiciones de servicio de la represa.

Se establece que los materiales por utilizar en la construcción de las represas deben presentar los siguientes porcentajes.

- Entre un 35% y un 55% de los materiales retenidos en las mallas N°8 y N°200.
- Máximo un 8% pasando la malla N°200.

Básicamente, los porcentajes que se deben respetar para la zona 2B, se presentan en el Cuadro 1, en la sección de Introducción del presente informe.

Si se observan los resultados obtenidos en la sección de Resultados de este informe, más específicamente en los Cuadros 43, 44, 45 y 46, en donde se presentan los porcentajes obtenidos producto de la granulometría de los materiales retenidos para el caso de los materiales del sitio Carazo, se establece que los porcentajes resultantes cumplen satisfactoriamente con los establecidos por Sherard. Esto, ya que los porcentajes de arenas que éste establece, se encuentra entre el 35% y el 55% y para el caso de los materiales del sitio Carazo, se presentan porcentajes superiores al 45%. Por ello, se cumple a cabalidad con este requisito, además de presentar porcentajes de limos o arcillas en todos los casos analizados menores o iguales al 8% tal y como establece Sherard.

Se concluye que estos materiales sí son viables para su uso en alguna de las zonas que conforman este tipo de represa C.F.R.D y son aptos, principalmente para su empleo, en la zona 2B.

Al analizar el caso de los materiales del sitio Presa, se presenta en el Cuadro 47 de la sección de Resultados, que presenta los porcentajes de arenas y limos o arcillas que presentan estos materiales inicialmente. Estos, se encuentran por debajo del rango establecido por Sherard, para el caso de arenas (35% - 55%), ya que los materiales de este sitio de préstamo poseen un 33% de arenas. Sin embargo, sí cumplen con el porcentaje máximo permitido para

limos o arcillas y establecido por Sherard para su uso en la zona 2B de la represa.

De los resultados que se arrojaron de las curvas granulométricas de los materiales, una vez realizados los diferentes ensayos de odómetro, se presenta que para el caso del primer ensayo odométrico de estos materiales, no se cumple con el porcentaje mínimo de arenas que deben presentar los materiales, ya que se conserva el 33% con que partieron los materiales inicialmente antes de ejecutar este ensayo. Lo mismo se presenta para el caso del tercer ensayo de odómetro; para ello, los materiales presentan un 34% de arenas igualmente incumpliendo con lo establecido por Sherard. Sin embargo, para el caso del ensayo de odómetro dos, si se encuentra dentro del rango de arenas establecido por Sherard. Esto se demuestra en los Cuadros 48, 49 y 50 de la sección de Resultados.

En todos los casos, para estos materiales, se cumple satisfactoriamente con los porcentajes máximos de limos o arcillas que deben presentar los materiales para ser considerados como viables para su uso en la zona 2B.

Gravedad Específica y Absorción de los Materiales

El ensayo, para determinar la gravedad específica de los materiales en dos estados de los mismos, como lo son secados al aire y saturado superficie seca, se realizó tanto para los materiales del sitio Carazo como para los materiales del sitio Presa.

Al cabo de determinar los parámetros de gravedad específica de los materiales, se corrobora que para el caso de los materiales del sitio Carazo, se presentaron valores para la gravedad específica de los materiales gruesos, menores a los obtenidos para los del sitio Presa.

Igualmente, para los materiales finos, se presentaron valores más elevados para los materiales del sitio Presa respecto de los de Carazo.

Esta diferencia, para el caso de los materiales gruesos y finos, se debe a que los procedentes del sitio Carazo presentaron mayor cantidad de limos o arcillas pasando la malla N°200, a diferencia de los del sitio Presa, que se consideran por tal motivo materiales más limpios.

Estas diferencias se presentan más detalladamente en los Cuadros 20 y 21, para el caso de las gravedades específicas de finos y gruesos del sitio Carazo respectivamente, mientras que para el caso de los valores arrojados para la gravedad específica de los finos y gruesos del sitio Presa, se presentan en los Cuadros 23 y 24; estos cuadros presentados en la sección de Resultados.

En el caso de arenas totalmente limpias, la gravedad específica bruta saturado superficie seca promedio es de **2,67** (Braja Das). La gravedad específica saturada superficie seca del material fino que corresponden a arenas de río, arroja un valor de gravedad específica bruta de **2,42**, para el caso de los materiales del sitio Carazo, mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa se obtuvo un valor para la gravedad específica bruta de **2,49**.

En el caso de la absorción de los materiales se obtiene que para el caso de los agregados gruesos se obtuviera un porcentaje de adsorción de **3,08%**, para el caso de los materiales del sitio Carazo, mientras que para los materiales del sitio Presa se obtuvo un valor de **2,25%**. Los valores acá mostrados se resumen en los Cuadros 22 y 25 respectivamente para los materiales de los sitios Carazo y Presa, de la sección de Resultados.

Estos valores de absorción de los materiales, se utilizan para clasificar los enrocados, según el Cuadro 40, que se presenta en la sección de Resultados. En él, se introduce con este valor y se verifica en la columna correspondiente a la prueba de absorción en qué rango se encuentra la misma. Esto se realizará más adelante en esta misma sección del presente informe.

Abrasión o Desgaste de los Materiales

La prueba de abrasión de los materiales se realizó en la máquina de Los Ángeles y consistió en un tipo de prueba denominada **Abrasión Tipo A**, tanto para los materiales del sitio Carazo como los materiales del sitio Presa.

Los resultados obtenidos al realizar esta prueba, se resumen en los Cuadros 26 y 27, de la sección de Resultados, respectivamente con los materiales de ambos sitios de préstamo.

Para el caso de los materiales del sitio Carazo, se presenta un valor de porcentaje de pérdida del **29,10%**; éste, es un valor alto según la naturaleza de los materiales.

Ahora bien, para el caso de los materiales del sitio Presa, se presenta un valor de porcentaje de pérdida de **20,90%**, que es un poco más bajo al presentado por los materiales del sitio Carazo.

Los resultados arrojados por esta prueba se emplean más adelante para realizar una clasificación directa de los materiales por utilizar como enrocado.

Ruptura de Granos

En la sección de Resultados de este informe, se presentan los valores obtenidos para este ensayo, tanto para los materiales rocosos del sitio Carazo como del sitio Presa, en donde se realizó para tres tamaños nominales de granos, que son de **2 pulgadas**, **1 ½ pulgadas** y **1 pulgada**. En la sección de Metodologías en este informe se describe el procedimiento empleado para su obtención.

A pesar de que se realizó el ensayo para tres tamaños diferentes nominales, en la clasificación de los enrocados, no se utiliza no más que el tamaño de **2 pulgadas**, ya que así lo estableció Raúl Marsal en la confección de su Clasificación de Enrocados según la dureza de los granos. Sin embargo, se realiza este mismo ensayo para los tamaños nominales de **1 ½ pulgadas** y de **1 pulgada** para constatar que la resistencia a la ruptura de granos P_a , sea lo más constante posible a los valores obtenidos para el tamaño de 2 pulgadas.

El ensayo se realiza para dos estados de los materiales. El primero de ellos, seco al aire y el segundo saturado superficie seca.

En los Cuadros 47, 48, 49 y 50, que se muestran en la sección de Apéndices de este informe, se muestran respectivamente los resultados de cada una de las determinaciones por tamaño nominal de los materiales.

Los resultados promedios para cada tamaño nominal, producto de todas sus determinaciones, además del promedio general, se detallan en los Cuadros 30 y 32 de la sección de Resultados, para el estado seco al aire, de los materiales de ambos sitios de préstamo.

En los Cuadros 31 y 33 de la sección de Resultados, se presentan los mismos valores anteriormente descritos y en el mismo orden, solo

que esta vez para el estado saturado superficie seca de los materiales de ambos sitios de préstamo.

Si se obtiene el promedio de la resistencia a la ruptura de granos P_a para el tamaño nominal de 2 pulgadas, para el caso de los materiales del sitio Carazo primeramente, se observa que para el estado seco al aire se arroja un valor de **342,73 kg**, mientras que para el estado saturado superficie seca se obtiene un valor de **516,19 kg**. El promedio de ambos estados corresponde a **429,46 kg**.

Para el caso de la resistencia a la ruptura de granos, para el tamaño nominal de 2 pulgadas, pero esta vez para los materiales del sitio Presa, se obtuvo para el estado seco al aire el valor promedio de **900,78 kg**, mientras que para el estado saturado superficie seca se presentó un valor promedio de **702,88 kg**. El promedio que se obtuvo de ambos estados y con base en el cual se clasifican los materiales por utilizar, como enrocado, fue de **801,83 kg**.

Como se aprecia, la diferencia en cuanto al promedio de los valores obtenidos para la prueba de ruptura de granos, es apreciable entre ambos sitios de préstamo de materiales. Por ello, se puede concluir, con base en este ensayo, que los materiales del sitio Presa presentan mayor resistencia en cuanto a la ruptura de los granos; esto, para observar el comportamiento de los materiales funcionando como una masa granular dentro del enrocado.

Al tener en cuenta estos promedios, para el tamaño nominal de 2 pulgadas, que se utilizan para clasificar los enrocados, se utiliza el Cuadro 40, expuesto en la sección de Resultados de este informe, para realizar dicha clasificación.

Estos resultados se utilizan más adelante para clasificar los enrocados.

Clasificación del Enrocado

Como ya se ha venido mencionando en cada uno de los análisis anteriores, correspondientes a las pruebas que se han realizado para su clasificación, los materiales por utilizar, como enrocado, tanto de los sitios de préstamo Carazo como Presa, se clasifican, según el grado de dureza de sus granos, respecto del Cuadro 40 propuesto por Raúl Marsal (1965) y que se presenta en la sección de Resultados del presente informe.

En él se toman en consideración varios parámetros:

- Ruptura de Granos.
- Absorción de los Materiales.
- Abrasión o Desgaste de los materiales.
- Coeficiente de Uniformidad.
- Granulometría del Enrocado.

Los resultados de todos y cada una de estas pruebas se presentaron en la sección de Resultados del presente informe.

Para el caso de la ruptura de granos se obtuvo un valor promedio de **429,46 kg**, para el caso de los materiales del sitio Carazo, mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa el valor promedio fue de **801,83 kg**, como ya se acotó anteriormente.

Si con este resultado se comparan los rangos establecidos en el Cuadro 40, en donde para valores inferiores a los **500 kg** de ruptura de granos P_a , los materiales por utilizar como enrocados clasificarían como de granos blandos, mientras que para valores de ruptura de granos que se encuentren en el rango de **500kg a 1000kg**, como es el caso de los materiales del sitio Presa, los granos clasifican como semiduros.

Sin embargo, a la hora de realizar la clasificación de los materiales, según su respectivo sitio, se deben considerar los demás parámetros clasificatorios, antes de emitir un criterio final.

En el caso de los resultados obtenidos para la absorción de agua, por parte de los materiales, los provenientes del sitio Carazo, tal y como se presentó anteriormente, presentan un valor de este parámetro para el caso de los gruesos de **3,08%**. Si se compara este valor con los reportados en el Cuadro 40, clasifica dentro del rango de **2,5% a 15%** y arroja que los materiales se encuentran clasificados como de granos blandos, una vez más, por medio de los resultados de esta nueva prueba.

Considerando ahora el caso de los materiales del sitio Presa, se presenta que los materiales granulares por utilizar como enrocado, presentan un absorción de agua del **2,25%**. Si se considera el Cuadro 40 de clasificación de los enrocados, éste se encuentra en el parámetro de la absorción dentro del rango del **1% al 2,5%**. Si se clasifican los materiales, según esta prueba, los materiales granulares del sitio Presa se

considerarían como de granos semiduros, nuevamente.

Considerando ahora la prueba o ensayo de abrasión, se presentan que se tuvo un desgaste de los materiales para el caso del sitio Carazo del **29,10%**, mayor al **25%**, que es el rango para el cual se clasifican los granos como blandos. Para el caso de los materiales del sitio Presa, se obtuvo un porcentaje de desgaste de los materiales del **20,90%**, que se encuentre en el rango presentado en el Cuadro 40 del **15% al 25%**; para ello, se clasifican los materiales como de granos semiduros, una vez más.

Por último, se considera el parámetro que resta por verificar y determinar el tipo de enrocado, que corresponde al coeficiente de uniformidad. Para cada uno de las curvas granulométricas realizadas a los materiales, tanto antes como después de ensayado los materiales, superan el valor de **10** propuesto en el Cuadro 40 de Raúl Marsal, tanto para los materiales de los sitios Carazo y Presa; esto, de igual forma establece que la granulometría de los materiales es **bien graduada**.

Con base en todos estos parámetros discutidos, se permite concluir que el enrocado por utilizar del sitio de préstamo Carazo corresponde a un tipo **3W**. Esto, indica que es un enrocado bien graduado y de granos blandos, ya que se clasifica respecto de granulometría de los materiales. Para el caso de los materiales del sitio Presa, se concluye que el enrocado corresponde a un tipo **2W**, que indica que es un enrocado bien graduado y de granos semiduros.

Carga Puntual

El ensayo de carga puntual se realiza con la finalidad de correlacionar los valores que se desprenden propiamente de este ensayo, con valores razonables que resultarían si se realizara un ensayo de compresión simple.

La necesidad de obtener los valores de resistencia a la compresión simple de los materiales, radica en que estos se emplean para utilizar la metodología de Barton-Kjaernsli (1981), y la establecida por Douglas (2003). Con ello determinan o reporta un valor de resistencia al corte de los enrocados y del ángulo de fricción interna de los mismos; este último parámetro, para el caso de ambas teorías.

El ensayo de Carga Puntual se emplea para tamaños nominales de los materiales de 2 pulgadas, 1 ½ pulgadas y de 1 pulgada.

Los valores arrojados de este ensayo se muestran en los Cuadros 51 y 52, de la sección de Apéndices, específicamente para los materiales de ambos sitios de préstamo en donde se realizan al menos 10 determinaciones por tamaño nominal, mientras que en los Cuadros 41 y 42 de la sección de Resultados, se presentan los valores promedios por tamaño nominal de resistencia a la compresión tanto para los materiales de los sitios Carazo y Presa, respectivamente.

El valor promedio para el caso de los materiales del sitio Carazo fue de **1570,95 kg/cm²**, mientras que el valor promedio que se obtuvo para el caso de los materiales del sitio Presa fue de **1563,20 kg/cm²**, siendo valores muy semejantes dado el mismo origen aluvial y mayoritariamente ígneo que presentan los mismos.

La diferencia entre los valores obtenidos de la resistencia a la compresión simple de los materiales, entre ambos sitios, presentan una diferencia de apenas **0,49%**, mínima, estadísticamente hablando.

Pesos Volumétricos

El ensayo de Pesos Volumétricos se realiza con la finalidad de observar el comportamiento, tanto del material por funcionar, como enrocado, así como también del mismo material separadamente en gruesos y finos.

Brinda una idea del comportamiento del material una vez que el mismo sea colocado en la zona correspondiente de la represa.

En los Cuadros 18 y 19 de la sección de Resultados, se resumen los valores obtenidos en estos ensayos realizados en dos estados, suelto y envarillado.

Se aprecia una marcada diferencia entre ambas pruebas tanto para finos, como gruesos, en estos mismos cuadros.

Además de esta diferencia entre la ejecución de la prueba para materiales gruesos como finos, se presenta una clara diferencia entre los valores obtenidos en la ejecución de este mismo ensayo entre los materiales de los sitios Carazo y Presa.

Se obtienen valores para este ensayo, para el caso de los materiales finos del sitio

Carazo, respecto de los del sitio Presa relativamente menores, obteniéndose una diferencia porcentual para los materiales de ambos sitios del **1,42%** en el estado suelto y del **2,42%** para los materiales en estado envarillado o compactado.

En el caso de los materiales gruesos, los valores arrojados de la ejecución de este ensayo, para con los materiales de ambos sitios, presentan una diferencia un tanto más marcada a favor de los provenientes del sitio Carazo. Estos materiales presentan una diferencia porcentual del orden del **9,68%**, para el estado suelto; mientras que para el estado envarillado o compactado se obtuvo una diferencia porcentual del **9,82%**.

Esto permite dar a conocer la necesidad de que los materiales que vayan a ser colocados en la represa deben ser densificados o compactados para que la relación de peso entre volumen de material sea lo más alta posible.

Es por esta razón que se establecen diferencias tan marcadas en los resultados obtenidos; las diferencias radican en la energía de compactación que se le aplique al material, así como también de su granulometría.

El conocer los valores del peso volumétrico, permite, además, determinar las cantidades de materiales que se deben colocar en una represa, al conocer, de antemano, su volumen.

Intemperismo Acelerado

La prueba de Intemperismo Acelerado se emplea como parámetro de caracterización de los materiales por emplear como enrocados. De una manera un tanto extrema, se hace pasar a los mismos por condiciones naturales que se puedan presentar en el ambiente por muchos años, pero de una manera muy radical.

Los resultados que se desprendan de esta prueba son indicadores de la calidad de los materiales presentes en los sitios de préstamo analizados; esto, ya que, como se mencionó, esta prueba establece resultados de forma muy extrema.

En la sección de Resultados se presentan los datos arrojados de este ensayo. En el Cuadro 28 se presentan los resultados obtenidos para los materiales del sitio Carazo; se obtuvo un porcentaje de pérdida de los finos del **13,01%**, mientras tanto para el caso de los materiales

granulares se observa, que el porcentaje de pérdida de los mismos, fue del **2,99%**. De estos dos, se obtiene el promedio general del material por utilizar, como enrocado, que fue del **8%**.

Analizando el caso de los materiales del sitio de préstamo Presa, se presenta en el Cuadro 29, los valores obtenidos tanto para los materiales finos como gruesos. En el caso de los materiales finos, se obtuvo un porcentaje promedio de pérdida del **7,94%**, mientras que para el caso de los materiales granulares se obtuvo un porcentaje promedio del **2,97%**. Esto, arroja un valor promedio de porcentaje de pérdida para la prueba de sanidad, de los materiales del sitio Presa del **5,45%**.

Comparando los resultados obtenidos en ambos sitios, con lo que se establecen en la norma ASTM C-33, se establece, como porcentajes máximos de pérdida, para el caso de los gruesos el de un **8%**, mientras que para el caso de los finos el de un **12%**.

Si se comparan con los resultados que se desprenden de ambos sitios de préstamo, los materiales granulares de ambos se encuentran dentro de la norma. El del sitio Presa, es el mejor de ellos, mientras que en el caso de los materiales finos de ambos sitios de préstamo, los que corresponden al sitio Carazo no cumplen, pues se encuentra por encima de lo establecido; pero, los materiales del sitio Presa cumplen satisfactoriamente con este porcentaje.

Con esto se concluye, que los materiales del sitio Presa son de una mayor resistencia y calidad en cuanto a la prueba de intemperismo acelerado o sanidad, respecto de los materiales del sitio Carazo; esto, evidencia la mayor calidad y dureza de los materiales del sitio Presa.

Clasificación Mineralógica

La clasificación mineralógica se realizó para un total de cinco muestras de las más representativas, tanto para los materiales de los sitios Carazo como Presa, a fin de determinar el origen de las muestras que se encuentran mayoritariamente en estos sitios de préstamo.

Los resultados arrojados de cada uno de los cortes de sección delgada, practicados a cada una de las muestras seleccionadas, se presentan en la sección de Resultados del presente informe.

Se establece, para el caso de las muestras analizadas del sitio Carazo, que con

base en los resultados de estos cortes de sección delgada, cuatro de las cinco muestras analizadas se clasifican como rocas ígneas, claro está con diferente composición mineralógica y solo una de las muestras seleccionadas corresponde a una roca sedimentaria.

Estadísticamente se establece que con base en los resultados mostrados el **80%** de los materiales corresponden a rocas ígneas, mientras que tan solo el **20%** de los materiales en este Sitio de Préstamo Carazo corresponden a rocas sedimentarias.

Con estos resultados se concluye que mayoritariamente en el sitio de préstamo Carazo, el material por utilizar es de origen ígneo, producto de actividad volcánica que se pudo haber desarrollado en el lugar en cientos de años anteriores.

Analizando los resultados obtenidos de las muestras de cortes de sección delgada, practicados a las cinco muestras de las más representativas de los materiales del sitio Presa, se presenta que cuatro de las cinco muestras corresponden a rocas ígneas de gran dureza y resistencia.

Si bien es cierto que para ambos casos se conserva la relación de un **80%** de rocas ígneas y un **20%** de rocas sedimentarias, estadísticamente hablando, los materiales ígneos y sedimentarios del sitio Presa presenta una alta resistencia y dureza, en comparación con los presentados por los materiales del sitio Carazo. Esto, se ve reflejado en el conjunto de pruebas que se han practicado a los materiales de este sitio y que los hace de una mejor calidad en cuanto a la resistencia de los materiales en comparación con los presentados para el caso del sitio Carazo.

Se concluye por tanto, que los materiales del sitio Presa son mayoritariamente materiales de origen ígneo y de una gran calidad en cuanto a resistencia y dureza de sus granos.

Aplicación de las Teorías

La aplicación de las teorías o metodologías establecidas previamente, con la finalidad de determinar, comparar y analizar los resultados obtenidos para los parámetros de diseño, permiten tener un panorama más claro de los valores reales que presentan los materiales de estos sitios de préstamo establecidos. Algunas: son el ángulo de fricción interna efectivo

de los materiales, la resistencia al corte y el módulo de deformabilidad de los mismos.

Se muestran en la sección de Resultados del presente informe, la aplicación de cada una de estas metodologías. Se analizarán, parámetro por parámetro, los resultados arrojados por parte de cada una de estas metodologías:

Ángulo de Fricción Interna Efectivo de los Materiales

El parámetro de diseño, como lo es el ángulo de fricción interna efectivo de los materiales, se obtuvo mediante la aplicación de cuatro metodologías distintas entre sí.

Inicialmente se aplicó la metodología de Barton y Kjaernsli, primeramente para los materiales del sitio de préstamo Carazo y seguidamente para los materiales del sitio Presa.

Los resultados obtenidos se muestran en los Cuadros 65, 66 y 67, presentados en este orden para cada ensayo odométrico realizado; esto, para los materiales del sitio de préstamo Carazo, en la sección de Resultados del presente informe.

Se observa en ellos, que se presentan valores altos del ángulo de fricción, cuando se aplican sobre los materiales, esfuerzos normales bajos, el mismo tiende a disminuir conforme el esfuerzo normal aplicado aumenta, es decir, a mayor esfuerzo aplicado sobre los materiales, el ángulo de fricción de los mismos disminuye y se mantiene la tendencia.

De los tres ensayos de odómetro realizados, fue para los materiales del ensayo efectuado a una densidad del 90%, es decir, el ensayo de odómetro #3, para los materiales del sitio de préstamo Carazo, que se obtuvieron los valores más altos del ángulo de fricción, tal y como se presentan en el Cuadro 67, de los Resultados.

Se observa, además, en la sección de Resultados, por medio de las Figuras 74, 75 y 76, la relación lineal decreciente del esfuerzo normal aplicado, respecto del valor obtenido del ángulo de fricción interna efectivo. En ellas se observa que, conforme aumente el esfuerzo normal aplicado a los materiales, los valores del ángulo de fricción tienden a disminuir; de ahí el comportamiento que se muestra en las figuras anteriormente mencionadas y que sirven para ilustrar lo que se acotó oportunamente.

Considerando ahora los resultados que se desprenden para los materiales del sitio Presa, se observa, por medio de los Cuadros 68, 69 y 70, presentados en este orden en la sección de los Resultados, para cada ensayo de odómetro realizado, que los valores obtenidos del ángulo de fricción interna de los materiales es levemente menor a los obtenidos para el caso de los materiales del sitio Carazo, esto básicamente se debe a la diferencia presentada en cuanto a la granulometría de los materiales de ambos sitios.

Los materiales del sitio Presa presentan una granulometría de los materiales compuesta mayoritariamente por material granular, de ahí que haya un mayor roce entre partículas lo que genera un mayor quebramiento de sus partículas, tal y como se demuestra mediante el ensayo de odómetro.

Cabe hacer notar, que los valores del ángulo de fricción dependen de tres factores. La granulometría que presenten los materiales, los valores de la densidad de los materiales en sitio y de la resistencia propia de los materiales.

En este caso en particular predomina la granulometría de los materiales por encima de resistencia de los mismos y, puesto que, como se mencionó anteriormente, los materiales del sitio Presa presentan mayor resistencia que los materiales del sitio Carazo esto no predominó para el caso de la obtención del ángulo de fricción interna de los materiales, ya que peso aún más la diferencia presentada en cuanto a la granulometría de los materiales.

Por último y para el caso de la aplicación a los materiales del sitio Presa de la metodología expuesta por Barton - Kjaernsli, se observa la relación lineal decreciente entre los valores obtenidos del ángulo de fricción interna, respecto del esfuerzo normal aplicado a los mismos en las Figuras 77, 78 y 79 de la sección de Resultados.

Con esto se verifica, que conforme aumenta el esfuerzo normal sobre los materiales, los valores del ángulo de fricción disminuyen.

Al aplicar la metodología establecida por Raúl Marsal (1975), se observa que para el caso de los materiales del sitio Carazo, dada la secuencia establecida para la obtención del mismo, se obtuvieron tres valores diferentes del ángulo de fricción, más específicamente un valor del ángulo para cada ensayo de odómetro, que se detallan en el Cuadro 73 de los Resultados.

Los valores acá mostrados son independientes del esfuerzo aplicado, es decir, no

dependen de manera directa del mismo, ya que su obtención radica en los porcentajes de rotura que los granos de los materiales presenten. Esto, para cada ensayo de odómetro en particular realizado y cuyos porcentajes para cada prueba se presentan en el Cuadro 71, de la sección de Resultados.

Comparando los resultados obtenidos de aplicar, la metodología de Marsal y los resultados que se desprenden de los ensayos de odómetro para el caso de los materiales del sitio Presa respecto de los de Carazo, se encuentra una diferencia entre unos y otros. Los valores se resumen en el Cuadro 74, que se presenta en la sección de Resultados. Estos, arrojan que los materiales del sitio Presa, son menores a los obtenidos por medio de la metodología de Marsal, para el caso de los materiales del sitio Carazo. Esto, se debe a la influencia directa en la obtención de los valores del ángulo de fricción, de los porcentajes de rotura de granos, obtenidos por medio de los ensayos de odómetro, entre los diferentes sitios de préstamo.

Para esta metodología, la diferencia entre los valores obtenidos del ángulo de fricción, radica en la resistencia de los materiales, ya que la mayor resistencia de los granos del sitio Presa, respecto a la presentada por los materiales del sitio Carazo ocasiona un mayor contacto entre el material presente dentro de los distintos ensayos de odómetro del sitio Presa, contacto positivo, ya que los materiales son de gran resistencia y el número de contactos entre sus granos es favorable para evitar la excesiva fricción entre sus materiales al funcionar como masa rocosa. Esto, a diferencia de los materiales del sitio Carazo, donde como se mostró en los resultados, mayoritariamente los materiales corresponden a gravas con un gran porcentaje de arenas las cuales ocasionan una mayor fricción entre sus granos.

Es por esta razón que los valores obtenidos para el ángulo de fricción interna de los materiales del sitio Carazo son mayores a los que se presentan para los materiales del sitio Presa, al aplicar la metodología expuesta por Marsal.

Se observa, además, en el Cuadro 73, que se encuentra en la sección de Resultados, el valor más elevado del ángulo de fricción efectivo de los materiales del sitio Carazo. Éste, fue de **46,55°** y se presentó para la relación de esfuerzos principales que se desprende del

ensayo de odómetro #1. Esto, por cuanto fue la prueba que presentó menor porcentaje de rotura de granos; se consideran tanto los materiales del sitio Carazo como Presa.

Para este mismo caso, pero considerando ahora los materiales del sitio Presa, se obtuvo un valor del ángulo de fricción interna de **44,00°**, tal y como se detalla en el Cuadro 74 de los Resultados, donde se nota la diferencia respecto de los materiales del sitio Carazo; esto, por lo anteriormente expuesto.

Ahora bien, la Teoría establecida por Douglas, es un poco más conservadora en cuanto a su metodología. Los valores del ángulo de fricción, dependen de manera directa del esfuerzo aplicado sobre los materiales, al igual que en el caso de la metodología de Barton y Kjaernsli.

Los valores arrojados de aplicar esta metodología, son un tanto menores a los obtenidos de las anteriores dos teorías. Se observa igualmente la tendencia que conforme aumenta el esfuerzo aplicado a los materiales, los valores del ángulo de fricción tienden a disminuir; pero, esta vez, la disminución es más pausada y no tan marcada como en la teoría de Barton y Kjaernsli.

Los valores obtenidos por medio de esta teoría, son comparables con materiales constituidos mayoritariamente por arenas, ya que los valores son más bajos a los esperados que presentase un enrocado como el conformado por los materiales del sitio Carazo o el sitio Presa; esto se discutirá más adelante tomando como referencia la teoría de Leps.

Se observa que para el caso de los valores del ángulo de fricción obtenidos con respecto a los materiales del sitio Carazo, la diferencia entre los distintos ensayos de odómetro resulta muy pequeña. Para los materiales del sitio Carazo el rango de valores se encuentra establecido por **35,63° a 35,44°**; igual caso se presenta con los valores arrojados pero esta vez empleando los materiales del sitio Presa, en donde el rango de valores que se obtuvo de la aplicación de la metodología de Douglas se encuentra entre **35,71 a 35,30**.

Como se aprecia con los anteriores valores, la diferencia entre los mismos, obtenidos para los materiales de los sitios de préstamo en estudio es muy similar en cuanto a su comportamiento, al aplicar esta metodología de Douglas.

Al aplicar la última metodología que hace referencia a la obtención de los ángulos de fricción y que corresponde a la publicada por Thomas Leps (1970), según se hace referencia al *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, más específicamente a la publicación *Review of Shearing Strength of Rockfill*. Se obtuvieron valores del mismo comparables tanto con las metodologías de Barton-Kjaernsli y Douglas, ya que dependen del esfuerzo normal aplicable a los materiales.

Los valores obtenidos por medio de Leps se encuentran en el rango de los **42,74° - 36,91°**, donde se establecen estos valores primeramente para esfuerzos normales bajos del orden de los **5 kg/cm²**. Estos, aumentan hasta un máximo de **35,20 kg/cm²**, momento al cual se obtiene el valor más bajo del ángulo de fricción interna, tal y como se observa en el Cuadro 85 de los Resultados.

La aplicación de la metodología establecida por Leps, tiene la limitante que a diferencia de las metodologías establecidas por Barton-Kjaernsli y Douglas, únicamente permite ser utilizada hasta el valor de esfuerzo normal de **35,20 kg/cm²** a diferencia de estas dos últimas que se emplearon para el máximo valor aplicado a los materiales del esfuerzo normal, el cual fue de **55 kg/cm²**.

Se debe tener en cuenta que el máximo esfuerzo real aplicado, al que se verán sometidos los materiales al momento de la construcción de la represa en la base de la misma, es de **27,24 kg/cm²**. Al aplicar la metodología de Leps, se obtienen valores del ángulo de fricción de los materiales para este valor de esfuerzo máximo, aplicable a los mismos, tal y como se presenta en el Cuadro 85 y se observa en las Figuras 85 y 86 de la sección de Resultados. Aquí, se obtienen valores del ángulo de fricción hasta el máximo que permite el nomograma de Leps, que es de **500 PSI** o su equivalente a unidades del Sistema Internacional de **35,20 kg/cm²**.

Al valor del esfuerzo máximo obtenido de los materiales a nivel de base, en la represa, se le aplicó un factor de seguridad de **2**, de ahí que se aplique tanto en las metodologías de Barton – Kjaernsli y Douglas valores de esfuerzo normal de hasta **55 kg/cm²**.

Comparando los valores obtenidos por Leps y su rango establecido anteriormente, para diferentes valores de esfuerzo, él establece valores semejantes en su publicación arriba

mencionada. Establece que para enrocados constituidos por arenas mayoritariamente, los valores del ángulo de fricción interna de los materiales se encuentran en el rango de los **38° a los 30°** y para materiales constituidos por gravas el rango mostrado es de **54,7° a los 38,5°**, esto para materiales con un tamaño máximo de 3”.

Los materiales del Sitio Carazo presentan un **49% de arenas** y un **46% de gravas**. De ahí que los valores del ángulo de fricción interna, calculados mediante la metodología de Leps, son lógicos, ya que los materiales de este sitio poseen gran cantidad de arenas y gravas tal y como se demuestra; por ello, son comparables con los que él mismo presenta en su publicación.

Los materiales del sitio Presa, presentan un **33% de arenas** y un **63% de gravas**, constituidos mayoritariamente por gravas tal y como se demuestra; de ahí que estos valores obtenidos, por medio de Leps, son acordes con lo presentado por estos materiales.

Haciendo referencia al valor aportado por el Ingeniero Consultor en represas del tipo C.F.R.D Bayardo Materón, en su informe técnico correspondiente a su primer visita al país acerca del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, él mismo aporta como valor por considerar para el diseño de la represa, del ángulo de fricción de los materiales por utilizar, como enrocado, el de **45°**. Esto, de acuerdo con su vasta experiencia en la construcción de represas del este tipo y visitando los materiales de los diversos sitios definidos, como zonas de préstamo. A su vez, el Ingeniero Materón establece que un valor por considerar para materiales constituidos por gravas, principalmente sería el de **42°**, establecido por medio de la metodología de Thomas Leps (1970).

Con base en esta referencia aportada, los valores obtenidos del ángulo de fricción interna de los materiales, al aplicar las diferentes metodologías aquí discutidas, se obtienen valores bastantes acordes con lo que dicta la experiencia en la construcción de represas de este tipo y con materiales de un origen similar.

Resistencia al Corte de los Materiales

La Resistencia al Corte de los Materiales se obtuvo mediante la aplicación de la metodología de Barton y Kjaernsli únicamente,

mediante la aplicación de la Ecuación 10, presentada en la sección de Resultados. Los valores arrojados para el caso de los materiales del sitio Carazo, para diferentes valores del esfuerzo normal, aplicado a los materiales, se presentan en los Cuadros 59, 60 y 61; esto para cada uno de los ensayos realizados, de odómetro.

Los valores obtenidos de resistencia al corte aumentan conforme al esfuerzo normal aplicado a los materiales, igualmente se incrementan, esto como tendencia general en cada uno de los tres ensayos de odómetro realizados, para los materiales del sitio de préstamo Carazo.

Para el odómetro a una densidad del 90%, el cual corresponde al tercer ensayo realizado, se obtuvieron los mayores valores de resistencia al corte, tal y como se reportan en el Cuadro 61.

Considerando el comportamiento, en cuanto a los materiales del sitio Presa, se presentan en los Cuadros 62, 63 y 64 de la sección de Resultados, los valores obtenidos de la aplicación de esta metodología.

Se observa que los valores obtenidos para cada ensayo de odómetro presentan un comportamiento muy semejante. Básicamente la diferencia presentada para este parámetro de resistencia al corte en cada uno de estos odómetros es mínima; se obtiene un rango de valores que varía entre los **5,42 kg/cm²** y **49,72 kg/cm²**.

A diferencia que en el caso de los materiales del sitio Carazo, es para el caso del odómetro realizado a una densidad máxima del 95%, con los materiales del sitio Presa, para el que se obtuvieron los valores de resistencia al corte más altos, tal y como se detalla en el Cuadro 63 de la sección de Resultados.

El comportamiento que presentan los materiales, tanto del sitio Carazo como del sitio Presa, respecto al esfuerzo normal aplicado a los materiales, es lineal creciente. Como se observa en los cuadros de resultados obtenidos para cada sitio en particular, los valores de la resistencia al corte aumentan, conforme el esfuerzo normal aplicado a los materiales incrementa igualmente.

Módulos de Deformabilidad de los Materiales

El Módulo de Deformabilidad de los materiales, se obtuvo mediante la ejecución de ensayos de odómetro. Se obtiene con ello, el máximo asentamiento de los materiales dentro del odómetro, bajo una carga aplicada a los materiales, producto del esfuerzo máximo que experimentarán los materiales, determinado, justo en la base de la represa.

Este módulo de deformabilidad, además de ser determinado de manera directa, por medio de los ensayos de odómetro, a través de la pendiente de la curva esfuerzo, respecto de la deformación de los materiales, se logró obtener por medio de la metodología propuesta por Raúl Marsal de manera teórica.

En el caso de los materiales del sitio de préstamo Carazo, los valores del módulo de deformabilidad obtenidos mediante el ensayo de odómetro, se resumen en los Cuadros 32, 33 y 34 de la sección de Apéndices, para cada uno de los ensayos llevados a cabo a una densidad máxima de laboratorio del 100%, 95% y 90% respectivamente. Se obtienen, como valores máximos, al aplicar el máximo esfuerzo sobre los materiales, los de **1305,04 kg/cm²**, **753,29 kg/cm²** y **527,57 kg/cm²**, para cada probeta fabricada.

A tener en cuenta, los materiales del sitio Presa, al realizar los diferentes ensayos odométricos, a las densidades ya comentadas y siguiendo la secuencia establecida, se obtienen los siguientes valores máximos determinados; fueron **538,07 kg/cm²**, **377,60 kg/cm³** y **340,51 kg/cm²** y se muestran en los Cuadros 35, 36 y 37 de la sección de Apéndices. Estos, comparados con los obtenidos del sitio Carazo, resultan mucho más bajos, como consecuencia directa de la densidad de los materiales obtenida para los correspondientes del sitio Presa, que es mucho menor a la determinada para los materiales del sitio Carazo.

Estos datos arrojados, para cada uno de los diferentes sitios en estudio, se comparan con los valores determinados mediante la metodología propuesta por Marsal. En ella se emplea para su determinación el nomograma que se presenta en la Figura 82, en donde se hace uso de los porcentajes de rotura de granos, determinados directamente de los ensayos de odómetro realizados, producto del esfuerzo transmitido a los materiales.

Se emplea la curva media o promedio del nomograma de la Figura 82, para la

determinación del módulo de deformabilidad, con base en el porcentaje de rotura de granos, debido a que Marsal estableció dicha curva, según los ensayos elaborados por él con los diferentes materiales de las diferentes presas alrededor del mundo en las que él participo.

Al ser los materiales del sitio de préstamo Carazo mayoritariamente gravas y arenas al igual que los materiales del sitio Presa y al estar constituida, esta curva promedio de materiales, con características similares a las que presentan los sitios Carazo y Presa, se optó por emplear la misma para determinar los valores del módulo de deformabilidad.

Se realizó, además, una comparación empleando esta Figura 82, con la finalidad de establecer los máximos valores correspondientes al módulo de deformabilidad que se presentaron, tanto para los materiales de los sitios Carazo y Presa y notar así la diferencia entre sitios, respecto de los parámetros que establece Marsal. Se nota una clara diferencia entre los módulos de deformabilidad de ambos materiales.

Comparando los valores obtenidos por ambas formas, se nota que para el caso de la metodología establecida por Marsal, los valores obtenidos son un tanto mayor a los arrojados mediante los ensayos de odómetro, tal y como se demuestra en los Cuadros 75 y 76, de la sección de Resultados, para los sitios Carazo y Presa, respectivamente. Se presenta, para el caso de los materiales del odómetro uno del sitio Carazo, los cuales, presentan el menor porcentaje de rotura de granos de todos los ensayos odométricos realizados, el cual que fue del 3%. Se obtuvo mediante la metodología establecida por Marsal un valor del módulo de deformabilidad de **1324,46 kg/cm²**, que se comparara con el máximo valor obtenido mediante la pendiente de la curva esfuerzo, respecto de la deformación para la prueba de odómetro a una densidad del 100%. Estos, se presentan en el Cuadro 32 de la sección de Apéndices, es muy semejante al presentado por medio de esta metodología de Marsal; el obtenido por este último, es levemente mayor.

Comparando los resultados obtenidos por medio de los ensayos de odómetro dos y tres, para los materiales del sitio Carazo, respecto de los reportados por medio de Marsal, se presenta una diferencia más marcada en cuanto a los valores obtenidos; estos últimos son

determinados, no concordantes con los arrojados por medio de los ensayos.

A la hora de comparar los resultados obtenidos para el módulo de deformabilidad, por medio de los ensayos odométricos, respecto de los materiales del sitio Presa, se presenta para todos los casos una diferencia sustancial, con los valores determinados, mediante esta metodología de Marsal. Esta, se debe a las características propias de los materiales del sitio Presa, comentadas y discutidas.

La razón que hace tan vulnerable la obtención del módulo de deformabilidad, por medio de los materiales del sitio Presa, es su granulometría promedio presentada y obtenida mediante las trincheras realizadas en el sitio. Se ha notado que la presencia de altos porcentajes de arenas en los materiales (del orden del 35% al 55%) por emplear en las pruebas de odómetro, benefician a la obtención de altos módulos de deformación; se da como ejemplo, el caso propio de los materiales del sitio Carazo, que presentan un 49% de este material.

Las arenas funcionan como un amortiguador al esfuerzo transmitido dentro del odómetro a los materiales granulares; en este caso, las gravas. Esto, lo beneficia enormemente, porque reducen sustancialmente la deformación del material y la relación de vacíos entre los materiales rocosos y por ende aumentan los valores del módulo de deformación, al tener bajos asentamientos.

La metodología establecida por Marsal, es tal vez un poco más conservadora, mientras que la probeta de compresibilidad ejecutada en el odómetro es más severa, respecto de los materiales, en cuanto a su procedimiento de ejecución establecido; razón por la cual la diferencia que se presenta entre ambos procedimientos de obtención, sea tan marcada.

Cabe destacar, que el porcentaje de rotura de granos, empleado para hacer uso de la metodología de Marsal, se obtiene de la diferencia entre porcentajes retenidos de los materiales antes y después de realizar la prueba de odómetro respectiva.

Esta diferencia, entre los valores del módulo de deformabilidad de los materiales entre distintas metodologías, desprende como puntos más relevantes por considerar o tomar en cuenta, que los materiales por colocar en la represa deben ser compactados lo más cercano posible al 100% de su densidad máxima de laboratorio o

sobrepasar este porcentaje. El material por utilizar debe presentar altos porcentajes de arenas y ser bien graduado; todo esto, con la finalidad de garantizar la obtención de altos módulos de deformabilidad.

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones a las que se llegó luego de analizar los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los materiales del sitio de préstamo Carazo.

- Mayoritariamente los materiales del sitio Carazo son de origen ígneo, tal y como se desprende de la pruebas de sección delgada practicadas a las muestras más representativas, que pertenecen a este sitio; se obtuvo un **80%** de materiales ígneos respecto de un **20%** de materiales sedimentarios.
- Se obtuvieron mayores módulos de deformación para los materiales a los que se realizó la prueba odométrica a una densidad máxima del 100%.
- Con base en el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de odómetro, si se desean alcanzar valores altos del módulo de deformabilidad de los materiales, es necesario realizar una compactación de los mismos lo más cercano al 100% de la densidad de los materiales. Según se experimentó, a valores del 95% de la densidad, los valores máximos del módulo de deformabilidad disminuyen considerablemente respecto de los datos obtenidos al realizar la prueba al 100% de la densidad.
- Los asentamientos registrados para cada uno de los ensayos de odómetro que se realizaron, bajo una misma escala de esfuerzos establecidos para las pruebas, presentaron menores valores para el caso de los materiales del ensayo de odómetro, realizado a una densidad del 100%.
- Al realizar una serie de pruebas índice, se determina que los granos de los mismos se clasifican como del tipo blando.
- Los materiales por utilizar, como enrocado, se clasifican como del tipo **3W**; esto, quiere decir que corresponde a un enrocado bien graduado con presencia de granos blandos entre sus materiales.
- Se presentan porcentajes de rotura de granos entre el **3%** y el **5%**, del peso total de la muestra; son porcentajes muy bajos, como consecuencia de la presencia de altos porcentajes de arenas.
- La aplicación de las teorías de Barton-Kjaernsli, Marsal y Leps, arroja valores del ángulo de fricción interna de los materiales en un rango entre los **52,01°** y los **36,91°**. La teoría de Douglas, a pesar de que se empleó para determinar este mismo parámetro de diseño, no parece ser aplicable en este caso, dados sus resultados tan pocos acordes respecto de las demás metodologías que se aplicaron.
- Se establece que, para determinar los valores del ángulo de fricción de los materiales, la teoría establecida por Barton y Kjaernsli, se convierte en la metodología, que, según los procedimientos de realización de los diferentes ensayos practicados, arroja valores razonables a los esperados, según la teoría estudiada para los materiales por utilizar.

- Los valores determinados del ángulo de fricción interna de los materiales tiende a disminuir, conforme se incrementa el esfuerzo normal aplicable a los materiales dentro del odómetro; esto, para cada una de las metodologías aplicadas en este trabajo.
- Para el caso de los valores obtenidos de la resistencia al corte, al aplicar la metodología de Barton-Kjaernsli, se concluye para los materiales del sitio Carazo, que los utilizados para el ensayo de odómetro #3, presentan los mayores valores reportados, tanto para el sitio Carazo como para el sitio Presa.
- La relación que se establece entre la resistencia al corte y el esfuerzo normal aplicado a los materiales, es lineal creciente para los materiales del sitio Carazo y en cada uno de los ensayos de odómetro realizados; por ello, siguen la ley de Mohr - Coulomb.

A continuación se presentan las conclusiones a las que se llegó en relación con los materiales del sitio de préstamo Presa.

- Los materiales presentes en el sitio de préstamo Presa, mayoritariamente corresponden también a materiales de origen ígneo, dadas las pruebas de sección delgada practicadas a los mismos. Dados los resultados obtenidos de los materiales, se concluye que el **80%** corresponden a materiales ígneos y el **20%** a materiales de origen sedimentario.
- Se presentaron deformaciones más elevadas que las obtenidas con los materiales del sitio Carazo, debido a un menor valor de la densidad de los materiales del sitio Presa.
- La prueba odométrica realizada a un 100% de la densidad, presentó los menores valores de asentamiento y por ende mayores valores para el módulo de deformación; mientras que la prueba

realizada al 90% de su densidad máxima presentó los mayores valores de deformación de los materiales y por ende los menores módulos de deformación.

- Los valores del módulo de deformabilidad de los materiales del sitio Presa, presentó valores similares en las distintas pruebas de odómetro realizadas al 100%, 95% y 90% de su densidad máxima; la más pequeña, es la diferencia entre los valores de los dos últimos ensayos de odómetro, a diferencia de los resultados obtenidos para el caso de los materiales del sitio Carazo, que fueron más dispersos.
- Al realizar la clasificación de los materiales por utilizar, como enrocado, mediante la aplicación de varias pruebas catalogadas como índices, se concluye que para el caso de los materiales del sitio de préstamo Presa, los enrocados se clasifican como del tipo **2W**; esto, caracteriza que los materiales son bien graduados y de granos semiduros.
- De las diferentes pruebas realizadas a los materiales del sitio Presa, se concluye que los materiales de este sitio presentan un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia de la ruptura de sus granos que los materiales del sitio Carazo.
- Los porcentajes de rotura de granos se encuentran entre el **5%** y el **7%** del peso total de la muestra; estos, son levemente mayores a los presentados para el caso de los materiales del sitio Carazo. Se evidencia, una vez más, la necesidad de que los materiales por utilizar, como enrocado, presenten altos porcentajes de arenas que ayuden a amortiguar el efecto de los esfuerzos a los que se ven expuestos los materiales rocosos.
- La aplicación de las teorías de Barton-Kjaernsli, Marsal y Leps, arrojan valores del ángulo de fricción interna más consistentes y razonables, según el comportamiento de los enrocados. Estos se encuentran en el rango de **49,10°** a

36,91°, y son muy semejantes a los arrojados para el caso del sitio Carazo.

- A partir de la aplicación de la metodología de Barton - Kjaernsli, se desprende que los ensayos de odómetro uno y tres son los que presentan mayores valores de resistencia al corte.
- La relación que se establece entre la resistencia al corte y el esfuerzo normal, aplicado a los materiales, es lineal creciente para los materiales del sitio Presa, tal y como se demuestra en cada una de las tablas de resultados que se obtuvieron de la aplicación de la teoría de Barton – Kjaernsli.

Como conclusiones generales, producto de los resultados obtenidos para los materiales de ambos sitios de préstamo, se presentan las siguientes:

- La diferencia en cuanto a los módulos de deformación presentados entre materiales de ambos sitios de préstamo, radica en los valores obtenidos para el ensayo de la densidad máxima de los materiales. Esto, ya que los materiales del sitio Carazo presentaron valores más altos de esta prueba, que los materiales del sitio Presa. La presencia de menor cantidad de arenas y mayor presencia de gravas en este último sitio, conllevó a una relación de vacíos más elevada en la prueba de densidad de estos últimos materiales.
- El máximo módulo de deformabilidad registrado por los materiales del sitio Carazo, correspondió al realizado a un 100% de su densidad máxima de laboratorio. Para ello se obtuvo **1305,04 kg/cm²**, mientras que para el caso de los materiales del sitio Presa, el máximo módulo de deformabilidad, igualmente correspondió al del ensayo de odómetro realizado a un 100% de su densidad y se presentó como valor el de **538,07 kg/cm²**.
- Los materiales del sitio Presa son de mejor calidad, respecto de los materiales

del sitio Carazo, en cuanto a la resistencia de los granos, tal y como se demuestra en el conjunto de pruebas aplicadas a ambos materiales. La diferencia entre los valores obtenidos del módulo de deformabilidad, hacen pensar en la conveniencia de adicionar a los materiales del sitio Presa un porcentaje de arenas mayor al que presentan, con la finalidad de aumentar su módulo considerablemente, si se decide que estos materiales sean usados como enrocados en la zona 2B.

- Los materiales del sitio de préstamo Carazo son adecuados para ser utilizados como enrocado en una de las zonas más importantes de una represa del tipo C.F.R.D como es la zona 2B. Los materiales del sitio Presa no son convenientes, en primera instancia, para su uso en esta zona; sin embargo, se pueden utilizar en otras que requieran menor capacidad en cuanto a su módulo de deformación, como lo es la 3B.
- Se debe considerar, para efectos de la construcción del cuerpo de la represa, que el material por utilizar, como enrocado, debe presentar una buena graduación de sus materiales y altos valores de la densidad máxima determinada en el laboratorio, para disponer de valores altos del módulo de deformabilidad, aunque algunas veces predominen unos sobre los otros.
- A la hora de empezar con el proceso de construcción de la represa y por ende a colocar los materiales en las distintas zonas en que está conformada una represa del tipo C.F.R.D, se deben determinar los espesores de las capas de los materiales por utilizar. Además, para asegurar la obtención de altos módulos de deformabilidad de los materiales, se debe tomar en cuenta su energía de compactación,
- Se debe analizar y revisar el factor económico, si se pensase en mezclar materiales de diferentes sitios, ya que sin duda esto incrementa los costos de la

construcción de la represa. Lo ideal sería utilizar los materiales en zonas distintas de la represa, según sus características de resistencia y deformabilidad presentadas y requeridas. En algunos casos y, dependiendo de la necesidad que se tenga, la mezcla de materiales se convierte en una clara opción.

- Los valores determinados del ángulo de fricción interna disminuyen conforme el esfuerzo normal aplicable a los materiales aumenta. Esto, dado que se experimenta un comportamiento parabólico entre el esfuerzo aplicado a los materiales y la resistencia. Conforme el esfuerzo incrementa el ángulo de fricción disminuye, caso contrario de aplicar la teoría de Mohr – Coulomb.
- El uso del odómetro, permitió obtener valores iniciales que sirven de referencia en cuanto al módulo de deformabilidad que los materiales pueden experimentar, una vez que se encuentre el proyecto en ejecución. Sin embargo, se hace la aclaración de la limitante de frontera del odómetro, conformada por las paredes y que en cierta manera afectan los resultados que se obtuvieron.
- La utilización del ensayo de odómetro es una buena manera de determinar la deformación que experimentan los materiales bajo ciertas condiciones de servicio. Sin embargo, este estudio se debe complementar con la obtención de terraplenes de prueba, que brinden resultados de la deformabilidad de los

materiales una vez que se encuentre en fase constructiva el proyecto.

- Los valores que se obtuvieron para el ángulo de fricción interna de los materiales, por medio de la metodología de Barton y Kjaernsli, hacen entender que esta sea la metodología de más fácil aplicación y de resultados más fiables, dado los valores obtenidos y los presentados por los especialistas en la teoría consultada.
- Los valores que se obtuvieron para el ángulo de fricción interna de los materiales, por medio de la metodología de Douglas, fueron resultados poco consistentes, dado el material por el que están conformados los enrocados. A pesar de que se utilizó dicha aplicación, los valores obtenidos no son convincentes y por tanto no vinculantes.
- Se contó como principal limitación el no poder utilizar en los diferentes ensayos de odómetro y, por ende, en todos aquellos ensayos vinculados a la aplicación de éste, tamaños superiores a las tres pulgadas. Esto, dada la relación que se debe cumplir entre el diámetro del odómetro y el diámetro nominal de los materiales de no sobrepasar cinco, así como también la limitante en las pruebas de la densidad máxima de laboratorio y los pesos volumétricos. Aquí, no se puede utilizar un tamaño nominal de material rocoso, superior a las tres pulgadas, ya que el equipo de laboratorio no se encuentra normado para su utilización a tamaños superiores.

Apéndices

Se presentan cuadros y figuras que surgieron de las diferentes pruebas realizadas en los ensayos practicados a los materiales de los sitios Carazo y Presa.

Granulometrías

CUADRO 1. PORCENTAJES PASANDO EN CADA MALLA DE LOS MATERIALES DEL SITIO DE PRÉSTAMO CARAZO.

Malla	Abertura	Trinc. 1	Trinc. 5	Trinc. 9	Trinc. 12	Trinc. 16	Trinc. 19	Trinc. 21	Trinc. 22	Trinc. 23	Promedio
3"	76,2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2"	50,8	76	83	87	100	100	93	100	70	82	88
1 1/2"	38,1	70	78	80	95	91	86	89	62	76	81
1"	25,4	62	78	73	85	81	79	82	54	71	74
3/4"	19,05	56	72	67	76	70	76	77	49	68	68
1/2"	12,7	49	67	67	67	63	72	71	46	66	63
3/8"	9,525	45	67	60	60	59	72	67	43	74	61
4	4,75	36	61	53	49	50	62	60	41	63	53
8	2,36	27	56	47	41	43	52	51	35	61	46
16	1,18	18	50	33	29	34	38	41	24	55	36
30	0,6	13	39	20	16	24	28	32	14	47	26
50	0,3	8	28	13	7	15	17	23	8	32	17
100	0,15	4	17	7	2	8	10	15	3	13	9
200	0,075	3	17	0	1	4	7	11	3	5	6

CUADRO 2. PORCENTAJES PASANDO EN CADA MALLA DE LOS MATERIALES DEL SITIO DE PRÉSTAMO PRESA.

Malla	Abertura	Trinchera 1	Trinchera 2	Trinchera 3	Promedio
3"	76,200	100	100	100	100,00
2"	50,800	75	83	82	79,72
1 1/2"	38,100	62	74	72	69,47
1"	25,400	50	66	64	59,65
3/4"	19,050	43	60	59	54,17
1/2"	12,700	37	55	55	48,84
3/8"	9,525	33	52	52	45,80
4	4,750	29	40	44	37,50
8	2,360	26	34	39	32,97
16	1,180	23	28	35	28,66
30	0,600	18	22	28	22,59
50	0,300	11	13	17	14,06
100	0,150	6	7	8	7,08
200	0,075	4	4	5	4,34
Charola	0,060	0	0	0	0,00

Densidad Máxima de los Materiales en el Laboratorio

CUADRO 3. LECTURAS DE DEFORMACIÓN PARA DETERMINAR LA DENSIDAD MÁXIMA DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Lectura Deformímetro Derecho	0,150	pulg.
Lectura Deformímetro Izquierdo	0,165	pulg.
Lectura Promedio de Deformímetros	0,158	pulg.
Lectura Promedio de Deformímetros	0,400	cm

CUADRO 4. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE PRUEBA PARA OBTENER LA DENSIDAD MÁXIMA DE LOS MATERIALES.		
Altura Tapa de Molde de Prueba	1,29	cm
Altura del Molde de Prueba	23,10	cm
Área de Molde de Prueba	611,90	cm ²
Peso del Molde	9,12	kg
Volumen del Molde	14.136,00	cm ³
Peso Bandeja de Secado	10,52	kg

CUADRO 5. PARÁMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA DENSIDAD MÁXIMA EN LABORATORIO RESPECTO A LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Altura Tapa menos Deformación	0,89*	cm
Altura del Molde menos Altura *	22,21	cm
Volumen del Material Deformado	13.590,33	cm ³
Peso del Material Húmedo + Molde	39,96	kg
Peso del Material Húmedo	30,845	kg
Peso del Material Seco + Bandeja	38,16	kg
Peso del Material Seco	27,64	kg

CUADRO 6. LECTURAS DE DEFORMACIÓN PARA DETERMINAR LA DENSIDAD MÁXIMA DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.		
Lectura Deformímetro Derecho	0,343	pulg.
Lectura Deformímetro Izquierdo	0,284	pulg.
Lectura Promedio de Deformímetros	0,313	pulg.
Lectura Promedio de Deformímetros	0,80	Cm

CUADRO 7. PARÁMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA DENSIDAD MÁXIMA EN LABORATORIO RESPECTO A LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Altura Tapa menos Deformación	0,494	cm *
Altura del Molde menos Altura *	22,606	Cm
Volumen del Material Deformado	13.832,400	cm ³
Peso del Material Húmedo + Molde	37,620	Kg
Peso del Material Húmedo	28,505	Kg
Peso del Material Seco	26,460	Kg

Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 100%

CUADRO 8. LECTURAS DE DEFORMACIÓN REALIZADAS EN PERIODOS DE TIEMPO DEFINIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Tiempo (min)	Carga (kg)	Carga (PSI)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Lec. Def. #1 10-3 pulg	Lec. Def. #2 10-3 pulg	Lec. Def. #3 10-3 pulg	Promedio 10-3 pulg	Promedio (cm)	Deformación Unitaria (%)
0"	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1"	9.553,00	500	5	92	117	77	95,33	0,24	0,45
2"	19.106,00	950	10	195	213	178	195,33	0,5	0,92
3"	28.659,00	1.350,00	15	290	296	270	285,33	0,72	1,34
4"	38.212,00	1.750,00	20	375	375	356	368,67	0,94	1,73
5"	47.765,00	2.200,00	25	460	454	442	452	1,15	2,12
10"	47.765,00	2.200,00	25	503	495	485	494,33	1,26	2,32
20"	47.765,00	2.200,00	25	516,5	508	497,5	507,33	1,29	2,38
40"	47.765,00	2.200,00	25	527	519,5	509	518,5	1,32	2,43
41"	38.212,00	1.750,00	20	526	518,5	507	517,17	1,31	2,43
42"	28.659,00	1.350,00	15	524	515	504	514,33	1,31	2,41
43"	19.106,00	950	10	518	510,5	498	508,83	1,29	2,39
44"	9.553,00	500	5	509	502,5	489	500,17	1,27	2,35
45"	0	0	0	490	471,5	453	471,5	1,2	2,21
0"	0	0	0	490	471,5	453	471,5	1,2	2,21
1'	9.553,00	500	5	498,5	490	471	486,5	1,24	2,28
2"	19.106,00	950	10	509,5	502,5	485	499	1,27	2,34
3"	28.659,00	1.350,00	15	520,5	512	496	509,5	1,29	2,39
4"	38.212,00	1.750,00	20	529,5	520,5	506	518,67	1,32	2,44
5"	47.765,00	2.200,00	25	546,5	536	524	535,5	1,36	2,51
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	607	590,5	584	593,83	1,51	2,79
10"	76.424,00	3.500,00	40	735	712,5	711	719,5	1,83	3,38
20"	76.424,00	3.500,00	40	764,5	742	736	747,5	1,9	3,51
40"	76.424,00	3.500,00	40	782	758,5	755,2	765,23	1,94	3,59
60"	76.424,00	3.500,00	40	790,5	767	763,5	773,67	1,97	3,63
62,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	790	765,5	762	772,5	1,96	3,63
65"	47.765,00	2.200,00	25	784	760,5	757	767,17	1,95	3,6

66"	38.212,00	1.750,00	20	780	757,5	753	763,5	1,94	3,58
67"	28.659,00	1.350,00	15	774,5	753,5	749	759	1,93	3,56
68"	19.106,00	950	10	769	748,5	742	753,17	1,91	3,54
69"	9.553,00	500	5	759	738,5	739	745,5	1,89	3,5
70"	0	0	0	735	703,5	696	711,5	1,81	3,34
0"	0	0	0	735	703,5	696	711,5	1,81	3,34
1"	9.553,00	500	5	743	720	707	723,33	1,84	3,4
2"	19.106,00	950	10	753	732,5	722	735,83	1,87	3,45
3"	28.659,00	1.350,00	15	762	741,5	737	746,83	1,9	3,51
4"	38.212,00	1.750,00	20	771,5	748,5	742	754	1,92	3,54
5"	47.765,00	2.200,00	25	780,5	757	751	762,83	1,94	3,58
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	794	769,5	766	776,5	1,97	3,65
10"	76.424,00	3.500,00	40	818	790,5	788	798,83	2,03	3,75
12,5"	90.753,00	4.150,00	47,5	855	826,5	826	835,83	2,12	3,92
15"	105.083,00	4.800,00	55	919	887,5	889	898,5	2,28	4,22
30"	105.083,00	4.800,00	55	974	940,5	943	952,5	2,42	4,47
60"-1H	105.083,00	4.800,00	55	993	959,5	962	971,5	2,47	4,56
120"-2H	105.083,00	4.800,00	55	1.007,00	978,5	976,5	987,33	2,51	4,64
240"-4H	105.083,00	4.800,00	55	1.018,50	992,5	987	999,33	2,54	4,69
480"-8H	105.083,00	4.800,00	55	1.030,50	1.005,00	999	1.011,50	2,57	4,75
960"-16H	105.083,00	4.800,00	55	1.034,00	1.010,50	1.005,50	1.016,67	2,58	4,77
1440"-24H	105.083,00	4.800,00	55	1.041,00	1.018,00	1.013,00	1.024,00	2,6	4,81
0"	105.083,00	4.800,00	55	1.041,00	1.018,00	1.013,00	1.024,00	2,6	4,81
1"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.039,00	1.017,50	1.012,00	1.022,83	2,6	4,8
2"	76.424,00	3.500,00	40	1.036,00	1.014,50	1.008,00	1.019,50	2,59	4,79
3"	67.253,12	3.100,00	35,2	1.033,00	1.012,50	1.005,50	1.017,00	2,58	4,77
4"	76.424,00	3.500,00	40	1.033,50	1.013,00	1.006,00	1.017,50	2,58	4,78
5"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.037,00	1.015,50	1.008,00	1.020,17	2,59	4,79
6"	105.083,00	4.800,00	55	1.040,50	1.018,50	1.013,00	1.024,00	2,6	4,81
12"	105.083,00	4.800,00	55	1.042,00	1.019,50	1.014,00	1.025,17	2,6	4,81
24"	105.083,00	4.800,00	55	1.042,50	1.020,00	1.015,00	1.025,83	2,61	4,82
48"	105.083,00	4.800,00	55	1.043,00	1.022,50	1.016,00	1.027,17	2,61	4,82
50,5"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.042,00	1.021,50	1.014,50	1.026,00	2,61	4,82
53"	76.424,00	3.500,00	40	1.038,50	1.018,00	1.011,00	1.022,50	2,6	4,8
55,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	1.034,50	1.014,50	1.006,50	1.018,50	2,59	4,78
58"	47.765,00	2.200,00	25	1.029,00	1.009,50	1.001,00	1.013,17	2,57	4,76
59"	38.212,00	1.750,00	20	1.025,00	1.006,00	996,5	1.009,17	2,56	4,74
60"	28.659,00	1.350,00	15	1.019,00	1.002,00	991	1.004,00	2,55	4,71
61"	19.106,00	950	10	1.012,00	996	984	997,33	2,53	4,68
62"	9.553,00	500	5	1.002,00	985,5	981	989,5	2,51	4,65
63"	0	0	0	980	945,5	929	951,5	2,42	4,47
73"	0	0	0	920	900	920,5	913,5	2,32	4,29
83"	0	0	0	919	900	919	912,67	2,32	4,28

CUADRO 9. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS EN EL ODÓMETRO #1 PARA EL SITIO CARAZO.

Densidad (Kg/m ³)	W Muestra (kg)	Deform. (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (m ³)	Volumen Vacíos (cm ³)	Reducción Vacíos (cm ³)	Relación Vacíos (e)	Porosid. %n
2.269,59	231,54	0,00	1.885,74	54,1	102.018,53	0,102019	19.684,98	0	0,239	19,3
2.279,79	231,54	0,24	1.885,74	53,86	101.561,91	0,101562	19.228,35	456,63	0,234	18,85
2.290,59	231,54	0,50	1.885,74	53,6	101.082,93	0,101083	18.749,38	935,6	0,228	18,38
2.300,40	231,54	0,72	1.885,74	53,38	100.651,85	0,100652	18.318,30	1.366,68	0,222	17,96
2.309,56	231,54	0,94	1.885,74	53,16	100.252,70	0,100253	17.919,15	1.765,83	0,218	17,56
2.318,80	231,54	1,15	1.885,74	52,95	99.853,55	0,099854	17.520,00	2.164,98	0,213	17,17
2.323,51	231,54	1,26	1.885,74	52,84	99.650,79	0,099651	17.317,23	2.367,75	0,21	16,97
2.324,97	231,54	1,29	1.885,74	52,81	99.588,52	0,099589	17.254,97	2.430,01	0,21	16,91
2.326,22	231,54	1,32	1.885,74	52,78	99.535,03	0,099535	17.201,48	2.483,50	0,209	16,86
2.326,07	231,54	1,31	1.885,74	52,79	99.541,42	0,099541	17.207,87	2.477,11	0,209	16,87
2.325,75	231,54	1,31	1.885,74	52,79	99.554,99	0,099555	17.221,44	2.463,54	0,209	16,88
2.325,13	231,54	1,29	1.885,74	52,81	99.581,33	0,099581	17.247,78	2.437,20	0,209	16,91
2.324,17	231,54	1,27	1.885,74	52,83	99.622,85	0,099623	17.289,29	2.395,69	0,21	16,95
2.320,97	231,54	1,20	1.885,74	52,9	99.760,15	0,09976	17.426,60	2.258,38	0,212	17,08
2.320,97	231,54	1,20	1.885,74	52,9	99.760,15	0,09976	17.426,60	2.258,38	0,212	17,08
2.322,64	231,54	1,24	1.885,74	52,86	99.688,31	0,099688	17.354,75	2.330,23	0,211	17,01
2.324,04	231,54	1,27	1.885,74	52,83	99.628,43	0,099628	17.294,88	2.390,10	0,21	16,95
2.325,21	231,54	1,29	1.885,74	52,81	99.578,14	0,099578	17.244,59	2.440,39	0,209	16,9
2.326,23	231,54	1,32	1.885,74	52,78	99.534,23	0,099534	17.200,68	2.484,30	0,209	16,86
2.328,12	231,54	1,36	1.885,74	52,74	99.453,61	0,099454	17.120,05	2.564,93	0,208	16,78
2.334,68	231,54	1,51	1.885,74	52,59	99.174,20	0,099174	16.840,65	2.844,33	0,205	16,51
2.348,94	231,54	1,83	1.885,74	52,27	98.572,29	0,098572	16.238,73	3.446,25	0,197	15,92
2.352,14	231,54	1,90	1.885,74	52,2	98.438,17	0,098438	16.104,62	3.580,36	0,196	15,79
2.354,17	231,54	1,94	1.885,74	52,16	98.353,23	0,098353	16.019,68	3.665,30	0,195	15,7
2.355,13	231,54	1,97	1.885,74	52,13	98.312,84	0,098313	15.979,29	3.705,69	0,194	15,66
2.355,00	231,54	1,96	1.885,74	52,14	98.318,43	0,098318	15.984,88	3.700,10	0,194	15,67
2.354,39	231,54	1,95	1.885,74	52,15	98.343,97	0,098344	16.010,42	3.674,56	0,194	15,69
2.353,97	231,54	1,94	1.885,74	52,16	98.361,54	0,098362	16.027,98	3.657,00	0,195	15,71
2.353,45	231,54	1,93	1.885,74	52,17	98.383,09	0,098383	16.049,54	3.635,44	0,195	15,73
2.352,79	231,54	1,91	1.885,74	52,19	98.411,03	0,098411	16.077,48	3.607,50	0,195	15,76
2.351,91	231,54	1,89	1.885,74	52,21	98.447,75	0,098448	16.114,20	3.570,78	0,196	15,8
2.348,02	231,54	1,81	1.885,74	52,29	98.610,61	0,098611	16.277,05	3.407,93	0,198	15,95
2.348,02	231,54	1,81	1.885,74	52,29	98.610,61	0,098611	16.277,05	3.407,93	0,198	15,95
2.349,37	231,54	1,84	1.885,74	52,26	98.553,93	0,098554	16.220,37	3.464,61	0,197	15,9
2.350,80	231,54	1,87	1.885,74	52,23	98.494,05	0,098494	16.160,50	3.524,48	0,196	15,84
2.352,06	231,54	1,90	1.885,74	52,2	98.441,37	0,098441	16.107,81	3.577,17	0,196	15,79
2.352,88	231,54	1,92	1.885,74	52,18	98.407,04	0,098407	16.073,49	3.611,49	0,195	15,76
2.353,89	231,54	1,94	1.885,74	52,16	98.364,73	0,098365	16.031,18	3.653,80	0,195	15,71
2.355,46	231,54	1,97	1.885,74	52,13	98.299,27	0,098299	15.965,72	3.719,26	0,194	15,65
2.358,03	231,54	2,03	1.885,74	52,07	98.192,30	0,098192	15.858,74	3.826,24	0,193	15,54
2.362,29	231,54	2,12	1.885,74	51,98	98.015,08	0,098015	15.681,52	4.003,46	0,19	15,37
2.369,55	231,54	2,28	1.885,74	51,82	97.714,92	0,097715	15.381,36	4.303,62	0,187	15,08

2.375,83	231,54	2,42	1.885,74	51,68	97.456,27	0,097456	15.122,72	4.562,27	0,184	14,82
2.378,06	231,54	2,47	1.885,74	51,63	97.365,26	0,097365	15.031,71	4.653,27	0,183	14,73
2.379,91	231,54	2,51	1.885,74	51,59	97.289,42	0,097289	14.955,87	4.729,11	0,182	14,66
2.381,32	231,54	2,54	1.885,74	51,56	97.231,95	0,097232	14.898,39	4.786,59	0,181	14,6
2.382,74	231,54	2,57	1.885,74	51,53	97.173,67	0,097174	14.840,12	4.844,86	0,18	14,55
2.383,35	231,54	2,58	1.885,74	51,52	97.148,92	0,097149	14.815,37	4.869,61	0,18	14,52
2.384,21	231,54	2,60	1.885,74	51,5	97.113,80	0,097114	14.780,25	4.904,73	0,18	14,49
2.384,21	231,54	2,60	1.885,74	51,5	97.113,80	0,097114	14.780,25	4.904,73	0,18	14,49
2.384,08	231,54	2,60	1.885,74	51,5	97.119,39	0,097119	14.785,83	4.899,15	0,18	14,49
2.383,68	231,54	2,59	1.885,74	51,51	97.135,35	0,097135	14.801,80	4.883,18	0,18	14,51
2.383,39	231,54	2,58	1.885,74	51,52	97.147,33	0,097147	14.813,77	4.871,21	0,18	14,52
2.383,45	231,54	2,58	1.885,74	51,52	97.144,93	0,097145	14.811,38	4.873,60	0,18	14,52
2.383,76	231,54	2,59	1.885,74	51,51	97.132,16	0,097132	14.798,61	4.886,37	0,18	14,51
2.384,21	231,54	2,60	1.885,74	51,5	97.113,80	0,097114	14.780,25	4.904,73	0,18	14,49
2.384,35	231,54	2,60	1.885,74	51,5	97.108,21	0,097108	14.774,66	4.910,32	0,179	14,48
2.384,43	231,54	2,61	1.885,74	51,49	97.105,02	0,097105	14.771,46	4.913,52	0,179	14,48
2.384,59	231,54	2,61	1.885,74	51,49	97.098,63	0,097099	14.765,08	4.919,90	0,179	14,47
2.384,45	231,54	2,61	1.885,74	51,49	97.104,22	0,097104	14.770,67	4.914,31	0,179	14,48
2.384,04	231,54	2,60	1.885,74	51,5	97.120,98	0,097121	14.787,43	4.897,55	0,18	14,49
2.383,57	231,54	2,59	1.885,74	51,51	97.140,14	0,09714	14.806,59	4.878,39	0,18	14,51
2.382,94	231,54	2,57	1.885,74	51,53	97.165,69	0,097166	14.832,14	4.852,85	0,18	14,54
2.382,47	231,54	2,56	1.885,74	51,54	97.184,85	0,097185	14.851,29	4.833,69	0,18	14,56
2.381,86	231,54	2,55	1.885,74	51,55	97.209,60	0,09721	14.876,04	4.808,94	0,181	14,58
2.381,08	231,54	2,53	1.885,74	51,57	97.241,53	0,097242	14.907,97	4.777,01	0,181	14,61
2.380,16	231,54	2,51	1.885,74	51,59	97.279,05	0,097279	14.945,49	4.739,49	0,182	14,65
2.375,72	231,54	2,42	1.885,74	51,68	97.461,06	0,097461	15.127,51	4.557,48	0,184	14,83
2.371,29	231,54	2,32	1.885,74	51,78	97.643,07	0,097643	15.309,52	4.375,46	0,186	15,01
2.371,19	231,54	2,32	1.885,74	51,78	97.647,06	0,097647	15.313,51	4.371,47	0,186	15,01
									0,19	15,73

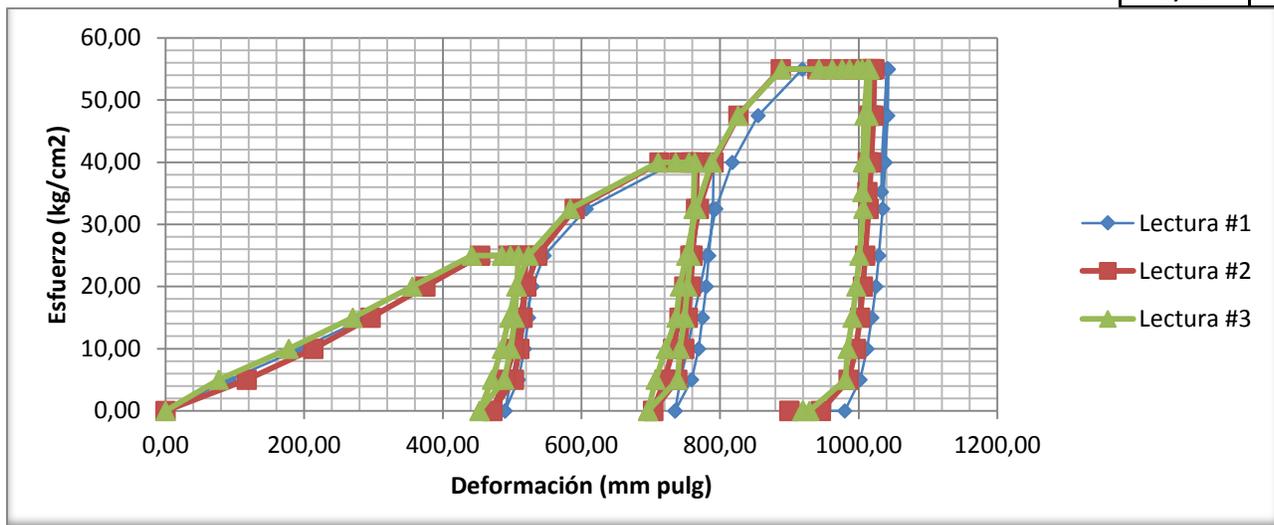


Figura 1. Curva del Esfuerzo respecto a la Deformación obtenida de la toma de datos que se realizó en los tres deformímetros, colocados en diferentes puntos de la tapa cabezal del odómetro #1, para el caso de los materiales del sitio Carazo.

CUADRO 10. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ANTES DE ENSAYAR ODÓMETRO #1 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Retenido (grs)</i>	<i>% Ret.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Ret. Correg.</i>
3"	76,2				100		100	0
2"	50,8				87,89		88	12
1 1/2"	38,1				80,78		81	7
1"	25,4				73,89		74	7
3/4"	19,05				67,89		68	6
1/2"	12,7				63,11		63	5
3/8"	9,525				60,78		61	2
4	4,75	262	11,11	11,11	88,89	54,03	54	7
8	2,36	285	12,09	23,2	76,8	46,68	47	7
16	1,18	365	15,48	38,68	61,32	37,27	37	9
30	0,6	424	17,98	56,66	43,34	26,34	26	11
50	0,3	407	17,26	73,92	26,08	15,85	16	10
100	0,15	303	12,85	86,77	13,23	8,04	8	8
200	0,075	120	5,09	91,86	8,14	4,95	5	3
Charola	0,06	192	8,14	100	0	0	0	5
		2358						

CUADRO 11. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES DESPUÉS DE ENSAYAR ODÓMETRO #1 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Retenido (grs)</i>	<i>% Ret.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Ret. Correg.</i>
3"	76,2	0	0	0	100		100	0
2"	50,8	24.855,00	11,99	11,99	88,01		88	12
1 1/2"	38,1	14.125,00	6,82	18,81	81,19		81	7
1"	25,4	16.075,00	7,76	26,57	73,43		73	8
3/4"	19,05	11.810,00	5,7	32,26	67,74		68	6
1/2"	12,7	9.985,00	4,82	37,08	62,92		63	5
3/8"	9,525	5.380,00	2,6	39,68	60,32		60	3
		82.230,00						
4	4,75	194	11,77	11,77	88,23	53,22	53	7
8	2,36	166	10,07	21,84	78,16	47,14	47	6
16	1,18	224,8	13,64	35,49	64,51	38,92	39	8
30	0,6	277,5	16,84	52,32	47,68	28,76	29	10
50	0,3	277,4	16,83	69,16	30,84	18,61	19	10
100	0,15	206	12,5	81,66	18,34	11,06	11	8
200	0,075	105,9	6,43	88,08	11,92	7,19	7	4
Charola	0,06	196,4	11,92	100	0	0	0	7
		1648						

CUADRO 12. LECTURAS DE DEFORMACIÓN REALIZADAS EN PERIODOS DE TIEMPO DEFINIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Tiempo (min)	Carga (kg)	Carga (PSI)	Esfuerzo (kg/cm²)	Lec. Def. #1 10-2 mm	Lec. Def. #2 10-2 mm	Lec. Def. #3 10-2 mm	Promedio 10-2 mm	Promedio (cm)	Deformación Unitaria (%)
0"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	9.553,00	500,00	5,00	1.375,00	1.360,00	1.350,00	1.361,67	1,36	2,52
2"	19.106,00	950,00	10,00	2.238,00	2.220,00	2.205,00	2.221,00	2,22	4,11
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	2.769,00	2.750,00	2.740,00	2.753,00	2,75	5,09
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	2.771,00	2.790,00	2.790,00	2.783,67	2,78	5,15
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.771,00	2.795,00	2.800,00	2.788,67	2,79	5,15
10"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.771,00	2.803,00	2.812,00	2.795,33	2,80	5,17
20"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.771,00	2.810,00	2.812,00	2.797,67	2,80	5,17
40"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.772,00	2.811,00	2.820,00	2.801,00	2,80	5,18
41"	38.212,00	1.750,00	20,00	2.772,00	2.811,00	2.820,00	2.801,00	2,80	5,18
42"	28.659,00	1.350,00	15,00	2.772,00	2.811,00	2.820,00	2.801,00	2,80	5,18
43"	19.106,00	950,00	10,00	2.772,00	2.809,00	2.816,00	2.799,00	2,80	5,17
44"	9.553,00	500,00	5,00	2.760,00	2.790,00	2.795,00	2.781,67	2,78	5,14
45"	0,00	0,00	0,00	2.660,00	2.720,00	2.710,00	2.696,67	2,70	4,98
0"	0,00	0,00	0,00	2.660,00	2.720,00	2.710,00	2.696,67	2,70	4,98
1'	9.553,00	500,00	5,00	2.768,00	2.841,00	2.826,00	2.811,67	2,81	5,20
2"	19.106,00	950,00	10,00	2.838,00	2.920,00	2.897,00	2.885,00	2,89	5,33
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	2.965,00	3.060,00	3.013,00	3.012,67	3,01	5,57
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	3.310,00	3.320,00	3.350,00	3.326,67	3,33	6,15
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	3.740,00	3.770,00	3.767,00	3.759,00	3,76	6,95
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	4.270,00	4.270,00	4.315,00	4.285,00	4,29	7,92
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	4.660,00	4.680,00	4.715,00	4.685,00	4,69	8,66
20"	76.424,00	3.500,00	40,00	4.886,00	4.901,00	4.955,00	4.914,00	4,91	9,08
40"	76.424,00	3.500,00	40,00	4.947,00	4.961,00	5.015,00	4.974,33	4,97	9,19
60"	76.424,00	3.500,00	40,00	4.980,00	4.993,00	5.051,00	5.008,00	5,01	9,26
62,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	4.977,00	4.990,00	5.047,00	5.004,67	5,00	9,25
65"	47.765,00	2.200,00	25,00	4.964,00	4.980,00	5.037,00	4.993,67	4,99	9,23
66"	38.212,00	1.750,00	20,00	4.978,00	4.965,00	5.021,00	4.988,00	4,99	9,22
67"	28.659,00	1.350,00	15,00	4.960,00	4.952,00	5.007,00	4.973,00	4,97	9,19
68"	19.106,00	950,00	10,00	4.938,00	4.935,00	4.989,00	4.954,00	4,95	9,16
69"	9.553,00	500,00	5,00	4.898,00	4.900,00	4.955,00	4.917,67	4,92	9,09
70"	0,00	0,00	0,00	4.768,00	4.770,00	4.845,00	4.794,33	4,79	8,86
0"	0,00	0,00	0,00	4.768,00	4.770,00	4.845,00	4.794,33	4,79	8,86
1"	9.553,00	500,00	5,00	4.903,00	4.896,00	4.950,00	4.916,33	4,92	9,09

2"	19.106,00	950,00	10,00	4.967,00	4.951,00	5.006,00	4.974,67	4,97	9,20
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	5.003,00	4.985,00	5.043,00	5.010,33	5,01	9,26
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	5.042,00	5.021,00	5.080,00	5.047,67	5,05	9,33
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.077,00	5.055,00	5.113,00	5.081,67	5,08	9,39
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	5.141,00	5.117,00	5.181,00	5.146,33	5,15	9,51
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	5.213,00	5.185,00	5.254,00	5.217,33	5,22	9,64
12,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	5.343,00	5.310,00	5.382,00	5.345,00	5,35	9,88
15"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.526,00	5.490,00	5.565,00	5.527,00	5,53	10,22
30"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.699,00	5.665,00	5.750,00	5.704,67	5,70	10,54
60"-1H	105.083,00	4.800,00	55,00	5.760,00	5.711,00	5.819,50	5.763,50	5,76	10,65
120"-2H	105.083,00	4.800,00	55,00	5.802,50	5.776,00	5.867,00	5.815,17	5,82	10,75
240"-4H	105.083,00	4.800,00	55,00	5.855,00	5.824,50	5.911,50	5.863,67	5,86	10,84
480"-8H	105.083,00	4.800,00	55,00	5.884,50	5.853,50	5.939,00	5.892,33	5,89	10,89
960"-16H	105.083,00	4.800,00	55,00	5.902,00	5.875,50	5.965,00	5.914,17	5,91	10,93
1440"-24H	105.083,00	4.800,00	55,00	5.929,50	5.903,00	5.994,00	5.942,17	5,94	10,98
0"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.929,50	5.903,00	5.994,00	5.942,17	5,94	10,98
1"	90.753,00	4.150,00	47,50	5.927,00	5.900,00	5.990,00	5.939,00	5,94	10,98
2"	76.424,00	3.500,00	40,00	5.917,50	5.890,00	5.980,00	5.929,17	5,93	10,96
3"	67.253,12	3.100,00	35,20	5.890,00	5.885,00	5.973,00	5.916,00	5,92	10,94
4"	76.424,00	3.500,00	40,00	5.909,50	5.885,00	5.975,00	5.923,17	5,92	10,95
5"	90.753,00	4.150,00	47,50	5.917,50	5.893,00	5.984,00	5.931,50	5,93	10,96
6"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.930,00	5.903,00	5.995,00	5.942,67	5,94	10,98
12"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.935,00	5.907,00	5.999,00	5.947,00	5,95	10,99
24"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.937,50	5.909,00	6.002,00	5.949,50	5,95	11,00
48"	105.083,00	4.800,00	55,00	5.939,00	5.911,50	6.005,00	5.951,83	5,95	11,00
50,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	5.937,00	5.909,00	6.001,00	5.949,00	5,95	11,00
53"	76.424,00	3.500,00	40,00	5.927,00	5.900,00	5.994,00	5.940,33	5,94	10,98
55,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	5.914,00	5.890,00	5.980,00	5.928,00	5,93	10,96
58"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.898,00	5.875,00	5.964,00	5.912,33	5,91	10,93
59"	38.212,00	1.750,00	20,00	5.884,00	5.864,00	5.951,00	5.899,67	5,90	10,91
60"	28.659,00	1.350,00	15,00	5.868,00	5.849,00	5.935,00	5.884,00	5,88	10,88
61"	19.106,00	950,00	10,00	5.845,00	5.828,00	5.912,00	5.861,67	5,86	10,83
62"	9.553,00	500,00	5,00	5.807,00	5.792,00	5.879,00	5.826,00	5,83	10,77
63"	0,00	0,00	0,00	5.643,00	5.637,00	5.740,00	5.673,33	5,67	10,49
73"	0,00	0,00	0,00	5.579,00	5.587,00	5.705,00	5.623,67	5,62	10,39
83"	0,00	0,00	0,00	5.576,00	5.584,00	5.702,00	5.620,67	5,62	10,39

CUADRO 13. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS EN EL ODÓMETRO #1 PARA EL SITIO PRESA.

Densidad (Kg/m ³)	W Muestra (kg)	Deform. (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (m ³)	Volumen Vacíos (cm ³)	Reducción Vacíos (cm ³)	Relación Vacíos (e)	Porosid. %n
2.060,70	210,23	0,00	1.885,74	54,10	102.018,53	0,102019	26.380,83	0,00	0,349	25,86
2.113,91	210,23	1,36	1.885,74	52,74	99.450,78	0,099451	23.813,08	2.567,75	0,315	23,34
2.148,93	210,23	2,22	1.885,74	51,88	97.830,31	0,097830	22.192,60	4.188,23	0,293	21,75
2.171,19	210,23	2,75	1.885,74	51,35	96.827,09	0,096827	21.189,39	5.191,44	0,280	20,77
2.172,49	210,23	2,78	1.885,74	51,32	96.769,26	0,096769	21.131,56	5.249,27	0,279	20,71
2.172,70	210,23	2,79	1.885,74	51,31	96.759,83	0,096760	21.122,13	5.258,70	0,279	20,70
2.172,98	210,23	2,80	1.885,74	51,30	96.747,26	0,096747	21.109,56	5.271,27	0,279	20,69
2.173,08	210,23	2,80	1.885,74	51,30	96.742,86	0,096743	21.105,16	5.275,67	0,279	20,69
2.173,22	210,23	2,80	1.885,74	51,30	96.736,58	0,096737	21.098,87	5.281,96	0,279	20,68
2.173,22	210,23	2,80	1.885,74	51,30	96.736,58	0,096737	21.098,87	5.281,96	0,279	20,68
2.173,22	210,23	2,80	1.885,74	51,30	96.736,58	0,096737	21.098,87	5.281,96	0,279	20,68
2.173,14	210,23	2,80	1.885,74	51,30	96.740,35	0,096740	21.102,65	5.278,19	0,279	20,69
2.172,40	210,23	2,78	1.885,74	51,32	96.773,03	0,096773	21.135,33	5.245,50	0,279	20,72
2.168,81	210,23	2,70	1.885,74	51,40	96.933,32	0,096933	21.295,62	5.085,21	0,282	20,87
2.168,81	210,23	2,70	1.885,74	51,40	96.933,32	0,096933	21.295,62	5.085,21	0,282	20,87
2.173,67	210,23	2,81	1.885,74	51,29	96.716,46	0,096716	21.078,76	5.302,07	0,279	20,66
2.176,79	210,23	2,89	1.885,74	51,22	96.578,17	0,096578	20.940,47	5.440,36	0,277	20,53
2.182,23	210,23	3,01	1.885,74	51,09	96.337,43	0,096337	20.699,73	5.681,11	0,274	20,29
2.195,72	210,23	3,33	1.885,74	50,77	95.745,31	0,095745	20.107,60	6.273,23	0,266	19,71
2.214,58	210,23	3,76	1.885,74	50,34	94.930,04	0,094930	19.292,34	7.088,50	0,255	18,91
2.237,96	210,23	4,29	1.885,74	49,82	93.938,14	0,093938	18.300,44	8.080,40	0,242	17,94
2.256,08	210,23	4,69	1.885,74	49,42	93.183,84	0,093184	17.546,14	8.834,69	0,232	17,20
2.266,58	210,23	4,91	1.885,74	49,19	92.752,01	0,092752	17.114,31	9.266,53	0,226	16,78
2.269,37	210,23	4,97	1.885,74	49,13	92.638,23	0,092638	17.000,53	9.380,30	0,225	16,66
2.270,92	210,23	5,01	1.885,74	49,09	92.574,75	0,092575	16.937,05	9.443,79	0,224	16,60
2.270,77	210,23	5,00	1.885,74	49,10	92.581,03	0,092581	16.943,33	9.437,50	0,224	16,61
2.270,26	210,23	4,99	1.885,74	49,11	92.601,78	0,092602	16.964,08	9.416,76	0,224	16,63
2.270,00	210,23	4,99	1.885,74	49,11	92.612,46	0,092612	16.974,76	9.406,07	0,224	16,64
2.269,30	210,23	4,97	1.885,74	49,13	92.640,75	0,092641	17.003,05	9.377,79	0,225	16,67
2.268,43	210,23	4,95	1.885,74	49,15	92.676,58	0,092677	17.038,88	9.341,96	0,225	16,70
2.266,75	210,23	4,92	1.885,74	49,18	92.745,09	0,092745	17.107,39	9.273,44	0,226	16,77
2.261,08	210,23	4,79	1.885,74	49,31	92.977,67	0,092978	17.339,97	9.040,87	0,229	17,00
2.261,08	210,23	4,79	1.885,74	49,31	92.977,67	0,092978	17.339,97	9.040,87	0,229	17,00
2.266,69	210,23	4,92	1.885,74	49,18	92.747,61	0,092748	17.109,91	9.270,93	0,226	16,77

2.269,38	210,23	4,97	1.885,74	49,13	92.637,61	0,092638	16.999,90	9.380,93	0,225	16,66
2.271,03	210,23	5,01	1.885,74	49,09	92.570,35	0,092570	16.932,65	9.448,19	0,224	16,60
2.272,76	210,23	5,05	1.885,74	49,05	92.499,95	0,092500	16.862,25	9.518,59	0,223	16,53
2.274,33	210,23	5,08	1.885,74	49,02	92.435,83	0,092436	16.798,13	9.582,70	0,222	16,47
2.277,34	210,23	5,15	1.885,74	48,95	92.313,89	0,092314	16.676,19	9.704,65	0,220	16,35
2.280,65	210,23	5,22	1.885,74	48,88	92.180,00	0,092180	16.542,30	9.838,53	0,219	16,21
2.286,62	210,23	5,35	1.885,74	48,76	91.939,25	0,091939	16.301,55	10.079,28	0,216	15,98
2.295,19	210,23	5,53	1.885,74	48,57	91.596,05	0,091596	15.958,35	10.422,48	0,211	15,64
2.303,61	210,23	5,70	1.885,74	48,40	91.261,02	0,091261	15.623,31	10.757,52	0,207	15,31
2.306,42	210,23	5,76	1.885,74	48,34	91.150,07	0,091150	15.512,37	10.868,46	0,205	15,21
2.308,88	210,23	5,82	1.885,74	48,28	91.052,64	0,091053	15.414,94	10.965,89	0,204	15,11
2.311,21	210,23	5,86	1.885,74	48,24	90.961,18	0,090961	15.323,48	11.057,35	0,203	15,02
2.312,58	210,23	5,89	1.885,74	48,21	90.907,13	0,090907	15.269,42	11.111,41	0,202	14,97
2.313,63	210,23	5,91	1.885,74	48,19	90.865,95	0,090866	15.228,25	11.152,58	0,201	14,93
2.314,97	210,23	5,94	1.885,74	48,16	90.813,15	0,090813	15.175,45	11.205,38	0,201	14,88
2.314,97	210,23	5,94	1.885,74	48,16	90.813,15	0,090813	15.175,45	11.205,38	0,201	14,88
2.314,82	210,23	5,94	1.885,74	48,16	90.819,12	0,090819	15.181,42	11.199,41	0,201	14,88
2.314,35	210,23	5,93	1.885,74	48,17	90.837,67	0,090838	15.199,97	11.180,87	0,201	14,90
2.313,72	210,23	5,92	1.885,74	48,18	90.862,50	0,090862	15.224,79	11.156,04	0,201	14,92
2.314,06	210,23	5,92	1.885,74	48,18	90.848,98	0,090849	15.211,28	11.169,55	0,201	14,91
2.314,46	210,23	5,93	1.885,74	48,17	90.833,27	0,090833	15.195,57	11.185,27	0,201	14,89
2.315,00	210,23	5,94	1.885,74	48,16	90.812,21	0,090812	15.174,51	11.206,32	0,201	14,87
2.315,21	210,23	5,95	1.885,74	48,15	90.804,04	0,090804	15.166,34	11.214,50	0,201	14,87
2.315,33	210,23	5,95	1.885,74	48,15	90.799,32	0,090799	15.161,62	11.219,21	0,200	14,86
2.315,44	210,23	5,95	1.885,74	48,15	90.794,92	0,090795	15.157,22	11.223,61	0,200	14,86
2.315,30	210,23	5,95	1.885,74	48,15	90.800,27	0,090800	15.162,56	11.218,27	0,200	14,86
2.314,88	210,23	5,94	1.885,74	48,16	90.816,61	0,090817	15.178,91	11.201,92	0,201	14,88
2.314,29	210,23	5,93	1.885,74	48,17	90.839,87	0,090840	15.202,17	11.178,67	0,201	14,90
2.313,54	210,23	5,91	1.885,74	48,19	90.869,41	0,090869	15.231,71	11.149,12	0,201	14,93
2.312,93	210,23	5,90	1.885,74	48,20	90.893,30	0,090893	15.255,59	11.125,24	0,202	14,95
2.312,18	210,23	5,88	1.885,74	48,22	90.922,84	0,090923	15.285,14	11.095,69	0,202	14,98
2.311,11	210,23	5,86	1.885,74	48,24	90.964,95	0,090965	15.327,25	11.053,58	0,203	15,02
2.309,40	210,23	5,83	1.885,74	48,27	91.032,21	0,091032	15.394,51	10.986,32	0,204	15,09
2.302,12	210,23	5,67	1.885,74	48,43	91.320,10	0,091320	15.682,40	10.698,43	0,207	15,37
2.299,76	210,23	5,62	1.885,74	48,48	91.413,76	0,091414	15.776,06	10.604,77	0,209	15,46
2.299,62	210,23	5,62	1.885,74	48,48	91.419,42	0,091419	15.781,72	10.599,12	0,209	15,47
									0,23	17,23

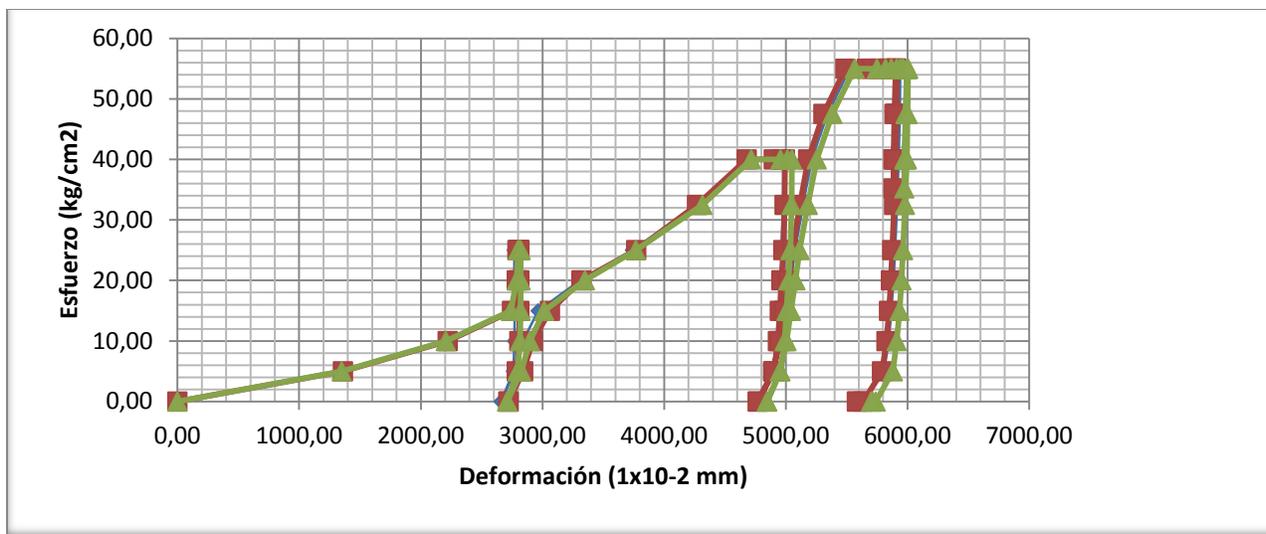


Figura 2. Curva del Esfuerzo respecto a la Deformación obtenida de la toma de datos que se realizó en los tres deformímetros, colocados en diferentes puntos de la tapa cabezal del odómetro #1, para el caso de los materiales del sitio Presa.

CUADRO 14. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ANTES DE ENSAYAR ODÓMETRO #1 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Malla	Abertura	Peso Retenido (grs)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasando	% Pas. Corr.	% Pas. Corr.	% Ret. Correg.
3"	76,200				100,00		100	0
2"	50,800				79,72		80	20
1 1/2"	38,100				69,47		69	10
1"	25,400				59,65		60	10
3/4"	19,050				54,17		54	5
1/2"	12,700				48,84		49	5
3/8"	9,525				45,80		46	3
4	4,750				37,50		38	8
8	2,360				32,97		33	5
16	1,180				28,66		29	4
30	0,600				22,59		23	6
50	0,300				14,06		14	9
100	0,150				7,08		7	7
200	0,075				4,34		4	3
Charola	0,060				0,00		0	4

CUADRO 15. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES DESPUÉS DE ENSAYAR ODÓMETRO #1 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.								
Malla	Abertura	Peso Retenido (grs)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasando	% Pas. Corr.	% Pas. Corr.	% Ret. Correg.
3"	76,200	0,00	0,00	0,00	100,00		100	0
2"	50,800	39.740,00	20,36	20,36	79,64		80	20
1 1/2"	38,100	14.605,00	7,48	27,85	72,15		72	7
1"	25,400	17.505,00	8,97	36,82	63,18		63	9
3/4"	19,050	12.420,00	6,36	43,18	56,82		57	6
1/2"	12,700	11.045,00	5,66	48,84	51,16		51	6
3/8"	9,525	6.645,00	3,41	52,25	47,75		48	3
		101.960,00						
4	4,750	239,20	18,15	18,15	81,85	39,09	39	9
8	2,360	129,50	9,83	27,97	72,03	34,39	34	5
16	1,180	121,30	9,20	37,18	62,82	30,00	30	4
30	0,600	172,00	13,05	50,23	49,77	23,77	24	6
50	0,300	225,20	17,09	67,31	32,69	15,61	16	8
100	0,150	193,40	14,67	81,99	18,01	8,60	9	7
200	0,075	82,70	6,27	88,26	11,74	5,61	6	3
Charola	0,060	154,70	11,74	100,00	0,00	0,00	0	6
		1318,00						

Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 95%

CUADRO 16. LECTURAS DE DEFORMACIÓN REALIZADAS EN PERIODOS DE TIEMPO DEFINIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.									
Tiempo (min)	Carga (kg)	Carga (PSI)	Esfuerzo (kg/cm²)	Lec. Def. #1 10-3 pulg	Lec. Def. #2 10-3 pulg	Lec. Def. #3 10-3 pulg	Promedio 10-3 pulg	Promedio (cm)	Deformación Unitaria (%)
0"	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1"	9.553,00	500	5	282	309	238	276,33	0,7	1,3
2"	19.106,00	950	10	509	542	470	507	1,29	2,38
3"	28.659,00	1.350,00	15	680	713	645	679,33	1,73	3,19
4"	38.212,00	1.750,00	20	830	859	822	837	2,13	3,93
5"	47.765,00	2.200,00	25	946	976	945	955,67	2,43	4,49
10"	47.765,00	2.200,00	25	1.005,00	1.035,00	1.002,00	1.014,00	2,58	4,76
20"	47.765,00	2.200,00	25	1.027,00	1.058,00	1.025,50	1.036,83	2,63	4,87
40"	47.765,00	2.200,00	25	1.043,00	1.075,00	1.043,00	1.053,67	2,68	4,95
41"	38.212,00	1.750,00	20	1.043,00	1.074,00	1.043,00	1.053,33	2,68	4,95
42"	28.659,00	1.350,00	15	1.040,00	1.069,00	1.038,00	1.049,00	2,66	4,93
43"	19.106,00	950	10	1.034,00	1.063,00	1.032,00	1.043,00	2,65	4,9
44"	9.553,00	500	5	1.023,00	1.052,00	1.020,00	1.031,67	2,62	4,84
45"	0	0	0	975	1.000,00	992	989	2,51	4,64
0"	0	0	0	975	1.000,00	992	989	2,51	4,64
1'	9.553,00	500	5	1.045,00	1.094,00	1.031,00	1.056,67	2,68	4,96
2'	19.106,00	950	10	1.064,00	1.114,00	1.050,00	1.076,00	2,73	5,05
3'	28.659,00	1.350,00	15	1.077,00	1.128,00	1.065,00	1.090,00	2,77	5,12

4"	38.212,00	1.750,00	20	1.092,00	1.145,00	1.083,00	1.106,67	2,81	5,2
5"	47.765,00	2.200,00	25	1.118,00	1.172,00	1.111,00	1.133,67	2,88	5,32
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	1.213,00	1.269,00	1.211,00	1.231,00	3,13	5,78
10"	76.424,00	3.500,00	40	1.349,00	1.405,00	1.350,00	1.368,00	3,47	6,42
20"	76.424,00	3.500,00	40	1.410,00	1.467,00	1.412,00	1.429,67	3,63	6,71
40"	76.424,00	3.500,00	40	1.434,00	1.491,00	1.435,00	1.453,33	3,69	6,82
60"	76.424,00	3.500,00	40	1.446,00	1.504,00	1.448,00	1.466,00	3,72	6,88
62,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	1.446,00	1.502,50	1.447,00	1.465,17	3,72	6,88
65"	47.765,00	2.200,00	25	1.442,00	1.497,00	1.442,00	1.460,33	3,71	6,86
66"	38.212,00	1.750,00	20	1.438,00	1.492,00	1.437,00	1.455,67	3,7	6,83
67"	28.659,00	1.350,00	15	1.433,00	1.488,00	1.432,00	1.451,00	3,69	6,81
68"	19.106,00	950	10	1.427,00	1.480,00	1.424,00	1.443,67	3,67	6,78
69"	9.553,00	500	5	1.413,00	1.467,00	1.412,00	1.430,67	3,63	6,72
70"	0	0	0	1.327,00	1.360,00	1.362,00	1.349,67	3,43	6,34
0"	0	0	0	1.327,00	1.360,00	1.362,00	1.349,67	3,43	6,34
1"	9.553,00	500	5	1.402,00	1.449,00	1.394,00	1.415,00	3,59	6,64
2"	19.106,00	950	10	1.426,00	1.471,00	1.414,00	1.437,00	3,65	6,75
3"	28.659,00	1.350,00	15	1.439,00	1.485,00	1.427,00	1.450,33	3,68	6,81
4"	38.212,00	1.750,00	20	1.451,00	1.496,00	1.440,00	1.462,33	3,71	6,87
5"	47.765,00	2.200,00	25	1.463,00	1.508,00	1.452,00	1.474,33	3,74	6,92
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	1.480,50	1.525,00	1.470,00	1.491,83	3,79	7
10"	76.424,00	3.500,00	40	1.497,50	1.541,00	1.486,00	1.508,17	3,83	7,08
12,5"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.516,50	1.560,00	1.506,00	1.527,50	3,88	7,17
15"	105.083,00	4.800,00	55	1.546,00	1.589,00	1.536,00	1.557,00	3,95	7,31
30"	105.083,00	4.800,00	55	1.558,50	1.601,00	1.548,50	1.569,33	3,99	7,37
60"-1H	105.083,00	4.800,00	55	1.566,50	1.608,50	1.556,00	1.577,00	4,01	7,4
120"-2H	105.083,00	4.800,00	55	1.572,50	1.615,00	1.562,00	1.583,17	4,02	7,43
240"-4H	105.083,00	4.800,00	55	1.580,00	1.622,50	1.569,00	1.590,50	4,04	7,47
480"-8H	105.083,00	4.800,00	55	1.584,00	1.627,00	1.573,00	1.594,67	4,05	7,49
960"-16H	105.083,00	4.800,00	55	1.588,00	1.631,50	1.576,50	1.598,67	4,06	7,51
1440"-24H	105.083,00	4.800,00	55	1.593,00	1.639,50	1.583,00	1.605,17	4,08	7,54
0"	105.083,00	4.800,00	55	1.593,00	1.639,50	1.583,00	1.605,17	4,08	7,54
1"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.592,00	1.639,00	1.582,00	1.604,33	4,08	7,53
2"	76.424,00	3.500,00	40	1.589,00	1.635,50	1.579,00	1.601,17	4,07	7,52
3"	67.253,12	3.100,00	35,2	1.586,50	1.632,50	1.576,00	1.598,33	4,06	7,5
4"	76.424,00	3.500,00	40	1.587,00	1.633,00	1.576,50	1.598,83	4,06	7,51
5"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.588,50	1.636,00	1.579,00	1.601,17	4,07	7,52
6"	105.083,00	4.800,00	55	1.592,00	1.641,00	1.584,00	1.605,67	4,08	7,54
12"	105.083,00	4.800,00	55	1.593,50	1.642,00	1.585,00	1.606,83	4,08	7,54
24"	105.083,00	4.800,00	55	1.594,00	1.642,50	1.585,50	1.607,33	4,08	7,55
48"	105.083,00	4.800,00	55	1.595,00	1.643,00	1.586,00	1.608,00	4,08	7,55
50,5"	90.753,00	4.150,00	47,5	1.594,00	1.641,50	1.585,00	1.606,83	4,08	7,54
53"	76.424,00	3.500,00	40	1.591,00	1.638,00	1.582,00	1.603,67	4,07	7,53
55,5"	62.094,50	2.875,00	32,5	1.587,50	1.634,00	1.578,00	1.599,83	4,06	7,51
58"	47.765,00	2.200,00	25	1.581,50	1.627,00	1.571,00	1.593,17	4,05	7,48
59"	38.212,00	1.750,00	20	1.577,00	1.623,00	1.566,00	1.588,67	4,04	7,46
60"	28.659,00	1.350,00	15	1.571,00	1.617,00	1.560,00	1.582,67	4,02	7,43

61"	19.106,00	950	10	1.564,00	1.611,00	1.554,00	1.576,33	4	7,4
62"	9.553,00	500	5	1.547,00	1.598,20	1.540,00	1.561,73	3,97	7,33
63"	0	0	0	1.467,00	1.501,00	1.507,00	1.491,67	3,79	7
73"	0	0	0	1.433,50	1.471,50	1.472,00	1.459,00	3,71	6,85
83"	0	0	0	1.432,00	1.471,00	1.471,00	1.458,00	3,7	6,85

CUADRO 17. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS EN EL ODÓMETRO #2 PARA EL SITIO CARAZO.

Densidad (Kg/m ³)	W Muestra (kg)	Deform. (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (m ³)	Volumen Vacíos (cm ³)	Reducción Vacíos (cm ³)	Relación de Vacíos (e)	Porosid. %n
2.156,18	219,97	0	1.885,74	54,1	102.018,53	0,102019	23.799,17	0	0,3	23,33
2.184,52	219,97	0,7	1.885,74	53,4	100.694,96	0,100695	22.475,59	1.323,58	0,29	22,03
2.208,75	219,97	1,29	1.885,74	52,81	99.590,12	0,09959	21.370,75	2.428,42	0,27	20,95
2.227,21	219,97	1,73	1.885,74	52,37	98.764,68	0,098765	20.545,31	3.253,86	0,26	20,14
2.244,37	219,97	2,13	1.885,74	51,97	98.009,49	0,098009	19.790,12	4.009,05	0,25	19,4
2.257,47	219,97	2,43	1.885,74	51,67	97.441,10	0,097441	19.221,73	4.577,43	0,25	18,84
2.263,96	219,97	2,58	1.885,74	51,52	97.161,70	0,097162	18.942,33	4.856,84	0,24	18,57
2.266,51	219,97	2,63	1.885,74	51,47	97.052,33	0,097052	18.832,96	4.966,20	0,24	18,46
2.268,39	219,97	2,68	1.885,74	51,42	96.971,70	0,096972	18.752,33	5.046,83	0,24	18,38
2.268,36	219,97	2,68	1.885,74	51,42	96.973,30	0,096973	18.753,93	5.045,23	0,24	18,38
2.267,87	219,97	2,66	1.885,74	51,44	96.994,06	0,096994	18.774,69	5.024,48	0,24	18,4
2.267,20	219,97	2,65	1.885,74	51,45	97.022,79	0,097023	18.803,42	4.995,74	0,24	18,43
2.265,93	219,97	2,62	1.885,74	51,48	97.077,08	0,097077	18.857,71	4.941,46	0,24	18,48
2.261,17	219,97	2,51	1.885,74	51,59	97.281,44	0,097281	19.062,07	4.737,09	0,24	18,68
2.261,17	219,97	2,51	1.885,74	51,59	97.281,44	0,097281	19.062,07	4.737,09	0,24	18,68
2.268,73	219,97	2,68	1.885,74	51,42	96.957,33	0,096957	18.737,96	5.061,20	0,24	18,37
2.270,90	219,97	2,73	1.885,74	51,37	96.864,73	0,096865	18.645,36	5.153,80	0,24	18,28
2.272,47	219,97	2,77	1.885,74	51,33	96.797,67	0,096798	18.578,31	5.220,86	0,24	18,21
2.274,35	219,97	2,81	1.885,74	51,29	96.717,84	0,096718	18.498,48	5.300,69	0,24	18,13
2.277,39	219,97	2,88	1.885,74	51,22	96.588,52	0,096589	18.369,15	5.430,01	0,23	18,01
2.288,44	219,97	3,13	1.885,74	50,97	96.122,32	0,096122	17.902,95	5.896,22	0,23	17,55
2.304,17	219,97	3,47	1.885,74	50,63	95.466,12	0,095466	17.246,75	6.552,42	0,22	16,91
2.311,32	219,97	3,63	1.885,74	50,47	95.170,75	0,095171	16.951,38	6.847,79	0,22	16,62
2.314,08	219,97	3,69	1.885,74	50,41	95.057,39	0,095057	16.838,02	6.961,15	0,22	16,5
2.315,55	219,97	3,72	1.885,74	50,38	94.996,72	0,094997	16.777,35	7.021,82	0,21	16,45
2.315,46	219,97	3,72	1.885,74	50,38	95.000,71	0,095001	16.781,34	7.017,83	0,21	16,45
2.314,89	219,97	3,71	1.885,74	50,39	95.023,86	0,095024	16.804,49	6.994,67	0,21	16,47
2.314,35	219,97	3,7	1.885,74	50,4	95.046,21	0,095046	16.826,84	6.972,32	0,22	16,49
2.313,80	219,97	3,69	1.885,74	50,41	95.068,56	0,095069	16.849,19	6.949,97	0,22	16,52
2.312,95	219,97	3,67	1.885,74	50,43	95.103,69	0,095104	16.884,32	6.914,85	0,22	16,55
2.311,44	219,97	3,63	1.885,74	50,47	95.165,96	0,095166	16.946,59	6.852,58	0,22	16,61
2.302,05	219,97	3,43	1.885,74	50,67	95.553,93	0,095554	17.334,56	6.464,61	0,22	16,99
2.302,05	219,97	3,43	1.885,74	50,67	95.553,93	0,095554	17.334,56	6.464,61	0,22	16,99
2.309,61	219,97	3,59	1.885,74	50,51	95.241,00	0,095241	17.021,63	6.777,54	0,22	16,68
2.312,17	219,97	3,65	1.885,74	50,45	95.135,62	0,095136	16.916,25	6.882,91	0,22	16,58
2.313,73	219,97	3,68	1.885,74	50,42	95.071,76	0,095072	16.852,39	6.946,78	0,22	16,52

2.315,13	219,97	3,71	1.885,74	50,39	95.014,28	0,095014	16.794,91	7.004,25	0,21	16,46
2.316,53	219,97	3,74	1.885,74	50,36	94.956,80	0,094957	16.737,43	7.061,73	0,21	16,41
2.318,57	219,97	3,79	1.885,74	50,31	94.872,98	0,094873	16.653,61	7.145,55	0,21	16,32
2.320,49	219,97	3,83	1.885,74	50,27	94.794,75	0,094795	16.575,38	7.223,79	0,21	16,25
2.322,76	219,97	3,88	1.885,74	50,22	94.702,15	0,094702	16.482,78	7.316,39	0,21	16,16
2.326,23	219,97	3,95	1.885,74	50,15	94.560,85	0,094561	16.341,48	7.457,69	0,21	16,02
2.327,68	219,97	3,99	1.885,74	50,11	94.501,77	0,094502	16.282,40	7.516,76	0,21	15,96
2.328,59	219,97	4,01	1.885,74	50,09	94.465,05	0,094465	16.245,68	7.553,48	0,21	15,92
2.329,31	219,97	4,02	1.885,74	50,08	94.435,51	0,094436	16.216,15	7.583,02	0,21	15,9
2.330,18	219,97	4,04	1.885,74	50,06	94.400,39	0,0944	16.181,02	7.618,14	0,21	15,86
2.330,67	219,97	4,05	1.885,74	50,05	94.380,43	0,09438	16.161,06	7.638,10	0,21	15,84
2.331,15	219,97	4,06	1.885,74	50,04	94.361,27	0,094361	16.141,90	7.657,26	0,21	15,82
2.331,92	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.330,14	0,09433	16.110,77	7.688,39	0,21	15,79
2.331,92	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.330,14	0,09433	16.110,77	7.688,39	0,21	15,79
2.331,82	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.334,13	0,094334	16.114,76	7.684,40	0,21	15,8
2.331,44	219,97	4,07	1.885,74	50,03	94.349,30	0,094349	16.129,93	7.669,24	0,21	15,81
2.331,11	219,97	4,06	1.885,74	50,04	94.362,87	0,094363	16.143,50	7.655,66	0,21	15,82
2.331,17	219,97	4,06	1.885,74	50,04	94.360,47	0,09436	16.141,11	7.658,06	0,21	15,82
2.331,44	219,97	4,07	1.885,74	50,03	94.349,30	0,094349	16.129,93	7.669,24	0,21	15,81
2.331,98	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.327,74	0,094328	16.108,38	7.690,79	0,21	15,79
2.332,11	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.322,16	0,094322	16.102,79	7.696,38	0,21	15,78
2.332,17	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.319,76	0,09432	16.100,39	7.698,77	0,21	15,78
2.332,25	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.316,57	0,094317	16.097,20	7.701,97	0,21	15,78
2.332,11	219,97	4,08	1.885,74	50,02	94.322,16	0,094322	16.102,79	7.696,38	0,21	15,78
2.331,74	219,97	4,07	1.885,74	50,03	94.337,32	0,094337	16.117,96	7.681,21	0,21	15,8
2.331,29	219,97	4,06	1.885,74	50,04	94.355,68	0,094356	16.136,32	7.662,85	0,21	15,82
2.330,50	219,97	4,05	1.885,74	50,05	94.387,62	0,094388	16.168,25	7.630,92	0,21	15,85
2.329,96	219,97	4,04	1.885,74	50,06	94.409,17	0,094409	16.189,80	7.609,36	0,21	15,87
2.329,26	219,97	4,02	1.885,74	50,08	94.437,91	0,094438	16.218,54	7.580,62	0,21	15,9
2.328,51	219,97	4	1.885,74	50,1	94.468,24	0,094468	16.248,88	7.550,29	0,21	15,93
2.326,78	219,97	3,97	1.885,74	50,13	94.538,18	0,094538	16.318,81	7.480,36	0,21	16
2.318,55	219,97	3,79	1.885,74	50,31	94.873,78	0,094874	16.654,41	7.144,75	0,21	16,32
2.314,74	219,97	3,71	1.885,74	50,39	95.030,25	0,09503	16.810,88	6.988,29	0,21	16,48
2.314,62	219,97	3,7	1.885,74	50,4	95.035,04	0,095035	16.815,67	6.983,50	0,21	16,48
									0,22	17,03

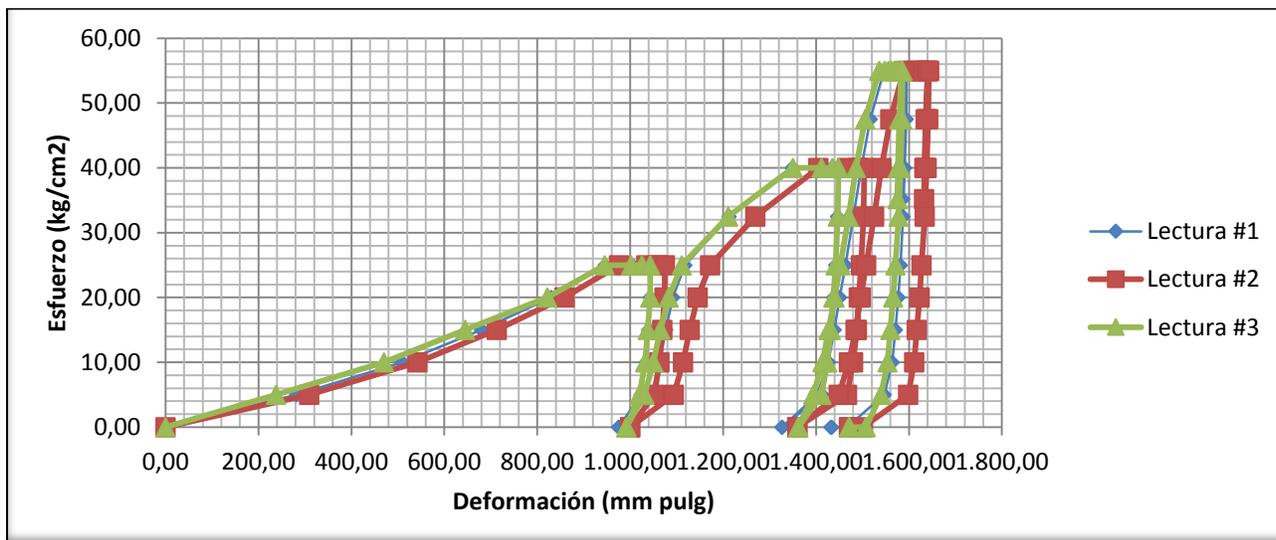


Figura 3. Curva del Esfuerzo respecto a la Deformación obtenida de la toma de datos que se realizó en los tres deformímetros, colocados en diferentes puntos de la tapa cabezal del odómetro #2, para el caso de los materiales del sitio Carazo.

CUADRO 18. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ANTES DE ENSAYAR ODÓMETRO #2 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Retenido (grs)</i>	<i>% Ret.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Ret. Correg.</i>
3"	76,2			100			100	0
2"	50,8			87,89			88	12
1 1/2"	38,1			80,78			81	7
1"	25,4			73,89			74	7
3/4"	19,05			67,89			68	6
1/2"	12,7			63,11			63	5
3/8"	9,525			60,78			61	2
4	4,75	262	11,11	11,11	88,89	54,03	54	7
8	2,36	285	12,09	23,2	76,8	46,68	47	7
16	1,18	365	15,48	38,68	61,32	37,27	37	10
30	0,6	424	17,98	56,66	43,34	26,34	26	11
50	0,3	407	17,26	73,92	26,08	15,85	16	10
100	0,15	303	12,85	86,77	13,23	8,04	8	8
200	0,075	120	5,09	91,86	8,14	4,95	5	3
Charola	0,06	192	8,14	100	0	0	0	5
		2358						

CUADRO 19. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES DESPUÉS DE ENSAYAR ODÓMETRO #2 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.								
Malla	Abertura	Peso Retenido (grs)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasando	% Pas. Corr.	% Pas. Corr.	% Ret. Correg.
3"	76,2	0	0	0	100		100	0
2"	50,8	25.900,00	13,17	13,17	86,83		87	13
1 1/2"	38,1	11.040,00	5,61	18,78	81,22		81	6
1"	25,4	14.615,00	7,43	26,22	73,78		74	7
3/4"	19,05	12.405,00	6,31	32,52	67,48		67	6
1/2"	12,7	10.010,00	5,09	37,61	62,39		62	5
3/8"	9,525	4.370,00	2,22	39,84	60,16		60	2
		78.340,00						
4	4,75	185,3	11,14	11,14	88,86	53,46	53	7
8	2,36	183,5	11,03	22,16	77,84	46,83	47	7
16	1,18	241,6	14,52	36,68	63,32	38,09	38	9
30	0,6	265,2	15,94	52,62	47,38	28,51	29	10
50	0,3	260,4	15,65	68,27	31,73	19,09	19	9
100	0,15	210,7	12,66	80,93	19,07	11,47	11	8
200	0,075	90,2	5,42	86,35	13,65	8,21	8	3
Charola	0,06	227,1	13,65	100	0	0	0	8
		1664						

CUADRO 20. LECTURAS DE DEFORMACIÓN REALIZADAS EN PERIODOS DE TIEMPO DEFINIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.									
Tiempo (min)	Carga (kg)	Carga (PSI)	Esfuerzo (kg/cm²)	Lec. Def. #1 10-2 mm	Lec. Def. #2 10-2 mm	Lec. Def. #3 10-2 mm	Promedio 10-2 mm	Promedio (cm)	Deformación Unitaria (%)
0"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	9.553,00	500,00	5,00	2.737,00	3.024,00	3.305,00	3.022,00	3,02	5,59
2"	19.106,00	950,00	10,00	3.880,00	4.011,00	4.355,00	4.082,00	4,08	7,55
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	4.287,00	4.943,00	5.253,00	4.827,67	4,83	8,92
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	5.219,00	5.366,00	5.705,00	5.430,00	5,43	10,04
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.234,00	5.374,50	5.710,00	5.439,50	5,44	10,05
10"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.242,00	5.379,00	5.726,00	5.449,00	5,45	10,07
20"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.243,50	5.381,50	5.731,00	5.452,00	5,45	10,08
40"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.246,00	5.384,00	5.736,00	5.455,33	5,46	10,08
41"	38.212,00	1.750,00	20,00	5.246,00	5.384,00	5.736,00	5.455,33	5,46	10,08
42"	28.659,00	1.350,00	15,00	5.245,50	5.383,50	5.733,00	5.454,00	5,45	10,08
43"	19.106,00	950,00	10,00	5.240,00	5.379,00	5.723,00	5.447,33	5,45	10,07
44"	9.553,00	500,00	5,00	5.213,50	5.357,00	5.702,00	5.424,17	5,42	10,03
45"	0,00	0,00	0,00	5.035,00	5.281,00	5.620,00	5.312,00	5,31	9,82
0"	0,00	0,00	0,00	5.035,00	5.281,00	5.620,00	5.312,00	5,31	9,82
1'	9.553,00	500,00	5,00	5.172,00	5.390,00	5.738,00	5.433,33	5,43	10,04
2"	19.106,00	950,00	10,00	5.246,50	5.456,00	5.802,00	5.501,50	5,50	10,17

3"	28.659,00	1.350,00	15,00	5.320,50	5.535,00	5.872,00	5.575,83	5,58	10,31
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	5.464,00	5.686,00	6.012,00	5.720,67	5,72	10,57
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	5.815,00	6.032,00	6.355,00	6.067,33	6,07	11,22
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	6.330,00	6.543,00	6.850,00	6.574,33	6,57	12,15
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	6.790,00	6.976,00	7.275,00	7.013,67	7,01	12,96
20"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.014,00	7.171,00	7.485,00	7.223,33	7,22	13,35
40"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.090,50	7.243,00	7.564,00	7.299,17	7,30	13,49
60"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.122,00	7.273,00	7.596,00	7.330,33	7,33	13,55
62,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	7.120,00	7.271,00	7.593,00	7.328,00	7,33	13,55
65"	47.765,00	2.200,00	25,00	7.119,50	7.257,00	7.580,00	7.318,83	7,32	13,53
66"	38.212,00	1.750,00	20,00	7.103,00	7.246,00	7.570,00	7.306,33	7,31	13,51
67"	28.659,00	1.350,00	15,00	7.083,00	7.234,00	7.558,00	7.291,67	7,29	13,48
68"	19.106,00	950,00	10,00	7.058,00	7.216,00	7.542,00	7.272,00	7,27	13,44
69"	9.553,00	500,00	5,00	7.012,00	7.189,00	7.519,00	7.240,00	7,24	13,38
70"	0,00	0,00	0,00	6.915,00	7.112,00	7.440,00	7.155,67	7,16	13,23
0"	0,00	0,00	0,00	6.915,00	7.112,00	7.440,00	7.155,67	7,16	13,23
1"	9.553,00	500,00	5,00	7.051,00	7.203,00	7.531,00	7.261,67	7,26	13,42
2"	19.106,00	950,00	10,00	7.113,00	7.255,00	7.582,00	7.316,67	7,32	13,52
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	7.159,50	7.293,00	7.620,00	7.357,50	7,36	13,60
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	7.197,00	7.322,50	7.649,00	7.389,50	7,39	13,66
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	7.237,00	7.356,00	7.683,00	7.425,33	7,43	13,73
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	7.313,00	7.423,00	7.749,00	7.495,00	7,50	13,85
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.414,00	7.504,00	7.828,00	7.582,00	7,58	14,01
12,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	7.582,00	7.553,50	7.874,00	7.669,83	7,67	14,18
15"	105.083,00	4.800,00	55,00	7.806,00	7.748,00	8.071,00	7.875,00	7,88	14,56
30"	105.083,00	4.800,00	55,00	7.852,00	7.790,00	8.112,00	7.918,00	7,92	14,64
60"-1H	105.083,00	4.800,00	55,00	7.903,50	7.833,50	8.156,00	7.964,33	7,96	14,72
120"-2H	105.083,00	4.800,00	55,00	7.966,00	7.893,00	8.184,00	8.014,33	8,01	14,81
240"-4H	105.083,00	4.800,00	55,00	8001,00	7.935,50	8.227,00	8.054,50	8,05	14,89
480"-8H	105.083,00	4.800,00	55,00	8048,00	7.969,00	8.261,00	8.092,67	8,09	14,96
960"-16H	105.083,00	4.800,00	55,00	8092,00	8.009,00	8.305,00	8.135,33	8,14	15,04
1440"-24H	105.083,00	4.800,00	55,00	8097,50	8.027,00	8.327,50	8.150,67	8,15	15,07
0"	105.083,00	4.800,00	55,00	8097,50	8.027,00	8.327,50	8.150,67	8,15	15,07
1"	90.753,00	4.150,00	47,50	8092,50	8.024,00	8.325,50	8.147,33	8,15	15,06
2"	76.424,00	3.500,00	40,00	8075,00	8.006,00	8.304,50	8.128,50	8,13	15,02
3"	67.253,12	3.100,00	35,20	8071,50	8.004,00	8.302,50	8.126,00	8,13	15,02
4"	76.424,00	3.500,00	40,00	8155,00	8.022,50	8.380,50	8.186,00	8,19	15,13
5"	90.753,00	4.150,00	47,50	8159,00	8.033,00	8.390,50	8.194,17	8,19	15,15
6"	105.083,00	4.800,00	55,00	8172,00	8.043,50	8.401,50	8.205,67	8,21	15,17

12"	105.083,00	4.800,00	55,00	8177,00	8.048,00	8.405,00	8.210,00	8,21	15,18
24"	105.083,00	4.800,00	55,00	8178,00	8.049,50	8.406,50	8.211,33	8,21	15,18
48"	105.083,00	4.800,00	55,00	8182,00	8.052,50	8.410,50	8.215,00	8,22	15,18
50,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	8176,50	8.047,00	8.403,00	8.208,83	8,21	15,17
53"	76.424,00	3.500,00	40,00	8166,50	8.040,00	8.395,50	8.200,67	8,20	15,16
55,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	8155,00	8.029,50	8.385,00	8.189,83	8,19	15,14
58"	47.765,00	2.200,00	25,00	8135,00	8.014,50	8.368,00	8.172,50	8,17	15,11
59"	38.212,00	1.750,00	20,00	8122,00	8.005,50	8.349,00	8.158,83	8,16	15,08
60"	28.659,00	1.350,00	15,00	8104,50	7.990,50	8.344,50	8.146,50	8,15	15,06
61"	19.106,00	950,00	10,00	8080,00	7.971,50	8.327,50	8.126,33	8,13	15,02
62"	9.553,00	500,00	5,00	8041,50	7.940,50	8.297,50	8.093,17	8,09	14,96
63"	0,00	0,00	0,00	7947,00	7.857,50	8.219,50	8.008,00	8,01	14,80
73"	0,00	0,00	0,00	7883,00	7.803,50	8.142,50	7.943,00	7,94	14,68
83"	0,00	0,00	0,00	7880,00	7.797,50	8.137,50	7.938,33	7,94	14,67

CUADRO 21. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS EN EL ODÓMETRO #2 PARA EL SITIO PRESA.

Densidad (Kg/m ³)	W Muestra (kg)	Deform. (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (m ³)	Volumen Vacíos (cm ³)	Reducción Vacíos (cm ³)	Relación Vacíos (e)	Porosid. %n
1.957,68	199,72	0,00	1.885,74	54,10	102.018,53	0,102019	30.162,18	0,00	0,420	29,57
2.073,51	199,72	3,02	1.885,74	51,08	96.319,83	0,096320	24.463,47	5.698,71	0,340	23,98
2.117,45	199,72	4,08	1.885,74	50,02	94.320,94	0,094321	22.464,59	7.697,59	0,313	22,02
2.149,50	199,72	4,83	1.885,74	49,27	92.914,81	0,092915	21.058,45	9.103,72	0,293	20,64
2.176,10	199,72	5,43	1.885,74	48,67	91.778,97	0,091779	19.922,61	10.239,57	0,277	19,53
2.176,52	199,72	5,44	1.885,74	48,66	91.761,05	0,091761	19.904,69	10.257,48	0,277	19,51
2.176,95	199,72	5,45	1.885,74	48,65	91.743,14	0,091743	19.886,78	10.275,40	0,277	19,49
2.177,08	199,72	5,45	1.885,74	48,65	91.737,48	0,091737	19.881,12	10.281,05	0,277	19,49
2.177,23	199,72	5,46	1.885,74	48,64	91.731,19	0,091731	19.874,84	10.287,34	0,277	19,48
2.177,23	199,72	5,46	1.885,74	48,64	91.731,19	0,091731	19.874,84	10.287,34	0,277	19,48
2.177,17	199,72	5,45	1.885,74	48,65	91.733,71	0,091734	19.877,35	10.284,83	0,277	19,48
2.176,87	199,72	5,45	1.885,74	48,65	91.746,28	0,091746	19.889,92	10.272,25	0,277	19,50
2.175,84	199,72	5,42	1.885,74	48,68	91.789,97	0,091790	19.933,61	10.228,57	0,277	19,54
2.170,83	199,72	5,31	1.885,74	48,79	92.001,48	0,092001	20.145,13	10.017,05	0,280	19,75
2.170,83	199,72	5,31	1.885,74	48,79	92.001,48	0,092001	20.145,13	10.017,05	0,280	19,75
2.176,25	199,72	5,43	1.885,74	48,67	91.772,68	0,091773	19.916,32	10.245,85	0,277	19,52
2.179,30	199,72	5,50	1.885,74	48,60	91.644,14	0,091644	19.787,78	10.374,40	0,275	19,40
2.182,64	199,72	5,58	1.885,74	48,52	91.503,96	0,091504	19.647,61	10.514,57	0,273	19,26
2.189,17	199,72	5,72	1.885,74	48,38	91.230,84	0,091231	19.374,49	10.787,69	0,270	18,99

2.204,97	199,72	6,07	1.885,74	48,03	90.577,12	0,090577	18.720,76	11.441,41	0,261	18,35
2.228,49	199,72	6,57	1.885,74	47,53	89.621,05	0,089621	17.764,69	12.397,48	0,247	17,41
2.249,29	199,72	7,01	1.885,74	47,09	88.792,58	0,088793	16.936,23	13.225,95	0,236	16,60
2.259,35	199,72	7,22	1.885,74	46,88	88.397,21	0,088397	16.540,85	13.621,33	0,230	16,21
2.263,01	199,72	7,30	1.885,74	46,80	88.254,20	0,088254	16.397,85	13.764,33	0,228	16,07
2.264,52	199,72	7,33	1.885,74	46,77	88.195,43	0,088195	16.339,07	13.823,10	0,227	16,02
2.264,40	199,72	7,33	1.885,74	46,77	88.199,83	0,088200	16.343,47	13.818,70	0,227	16,02
2.263,96	199,72	7,32	1.885,74	46,78	88.217,12	0,088217	16.360,76	13.801,42	0,228	16,04
2.263,35	199,72	7,31	1.885,74	46,79	88.240,69	0,088241	16.384,33	13.777,85	0,228	16,06
2.262,65	199,72	7,29	1.885,74	46,81	88.268,35	0,088268	16.411,99	13.750,19	0,228	16,09
2.261,70	199,72	7,27	1.885,74	46,83	88.305,43	0,088305	16.449,08	13.713,10	0,229	16,12
2.260,15	199,72	7,24	1.885,74	46,86	88.365,78	0,088366	16.509,42	13.652,76	0,230	16,18
2.256,09	199,72	7,16	1.885,74	46,94	88.524,81	0,088525	16.668,45	13.493,73	0,232	16,34
2.256,09	199,72	7,16	1.885,74	46,94	88.524,81	0,088525	16.668,45	13.493,73	0,232	16,34
2.261,20	199,72	7,26	1.885,74	46,84	88.324,92	0,088325	16.468,56	13.693,62	0,229	16,14
2.263,85	199,72	7,32	1.885,74	46,78	88.221,20	0,088221	16.364,85	13.797,33	0,228	16,04
2.265,83	199,72	7,36	1.885,74	46,74	88.144,20	0,088144	16.287,85	13.874,33	0,227	15,97
2.267,38	199,72	7,39	1.885,74	46,71	88.083,86	0,088084	16.227,50	13.934,68	0,226	15,91
2.269,13	199,72	7,43	1.885,74	46,67	88.016,29	0,088016	16.159,93	14.002,25	0,225	15,84
2.272,52	199,72	7,50	1.885,74	46,61	87.884,91	0,087885	16.028,56	14.133,62	0,223	15,71
2.276,77	199,72	7,58	1.885,74	46,52	87.720,85	0,087721	15.864,50	14.297,68	0,221	15,55
2.281,07	199,72	7,67	1.885,74	46,43	87.555,22	0,087555	15.698,87	14.463,31	0,218	15,39
2.291,20	199,72	7,88	1.885,74	46,23	87.168,33	0,087168	15.311,98	14.850,20	0,213	15,01
2.293,33	199,72	7,92	1.885,74	46,18	87.087,24	0,087087	15.230,89	14.931,29	0,212	14,93
2.295,64	199,72	7,96	1.885,74	46,14	86.999,87	0,087000	15.143,52	15.018,66	0,211	14,84
2.298,13	199,72	8,01	1.885,74	46,09	86.905,59	0,086906	15.049,23	15.112,95	0,209	14,75
2.300,13	199,72	8,05	1.885,74	46,05	86.829,84	0,086830	14.973,48	15.188,69	0,208	14,68
2.302,04	199,72	8,09	1.885,74	46,01	86.757,87	0,086758	14.901,51	15.260,67	0,207	14,61
2.304,18	199,72	8,14	1.885,74	45,96	86.677,41	0,086677	14.821,05	15.341,12	0,206	14,53
2.304,94	199,72	8,15	1.885,74	45,95	86.648,50	0,086648	14.792,14	15.370,04	0,206	14,50
2.304,94	199,72	8,15	1.885,74	45,95	86.648,50	0,086648	14.792,14	15.370,04	0,206	14,50
2.304,78	199,72	8,15	1.885,74	45,95	86.654,78	0,086655	14.798,43	15.363,75	0,206	14,51
2.303,83	199,72	8,13	1.885,74	45,97	86.690,30	0,086690	14.833,94	15.328,24	0,206	14,54
2.303,71	199,72	8,13	1.885,74	45,97	86.695,01	0,086695	14.838,65	15.323,52	0,207	14,55
2.306,72	199,72	8,19	1.885,74	45,91	86.581,87	0,086582	14.725,51	15.436,67	0,205	14,43
2.307,13	199,72	8,19	1.885,74	45,91	86.566,47	0,086566	14.710,11	15.452,07	0,205	14,42
2.307,71	199,72	8,21	1.885,74	45,89	86.544,78	0,086545	14.688,42	15.473,75	0,204	14,40
2.307,92	199,72	8,21	1.885,74	45,89	86.536,61	0,086537	14.680,25	15.481,93	0,204	14,39
2.307,99	199,72	8,21	1.885,74	45,89	86.534,09	0,086534	14.677,74	15.484,44	0,204	14,39

2.308,18	199,72	8,22	1.885,74	45,89	86.527,18	0,086527	14.670,82	15.491,35	0,204	14,38
2.307,87	199,72	8,21	1.885,74	45,89	86.538,81	0,086539	14.682,45	15.479,73	0,204	14,39
2.307,46	199,72	8,20	1.885,74	45,90	86.554,21	0,086554	14.697,85	15.464,33	0,205	14,41
2.306,91	199,72	8,19	1.885,74	45,91	86.574,64	0,086575	14.718,28	15.443,90	0,205	14,43
2.306,04	199,72	8,17	1.885,74	45,93	86.607,32	0,086607	14.750,97	15.411,21	0,205	14,46
2.305,35	199,72	8,16	1.885,74	45,94	86.633,10	0,086633	14.776,74	15.385,44	0,206	14,48
2.304,74	199,72	8,15	1.885,74	45,95	86.656,35	0,086656	14.800,00	15.362,18	0,206	14,51
2.303,72	199,72	8,13	1.885,74	45,97	86.694,38	0,086694	14.838,03	15.324,15	0,206	14,54
2.302,06	199,72	8,09	1.885,74	46,01	86.756,93	0,086757	14.900,57	15.261,61	0,207	14,61
2.297,81	199,72	8,01	1.885,74	46,09	86.917,53	0,086918	15.061,17	15.101,01	0,210	14,76
2.294,57	199,72	7,94	1.885,74	46,16	87.040,10	0,087040	15.183,74	14.978,43	0,211	14,88
2.294,34	199,72	7,94	1.885,74	46,16	87.048,90	0,087049	15.192,54	14.969,63	0,211	14,89
									0,24	16,68

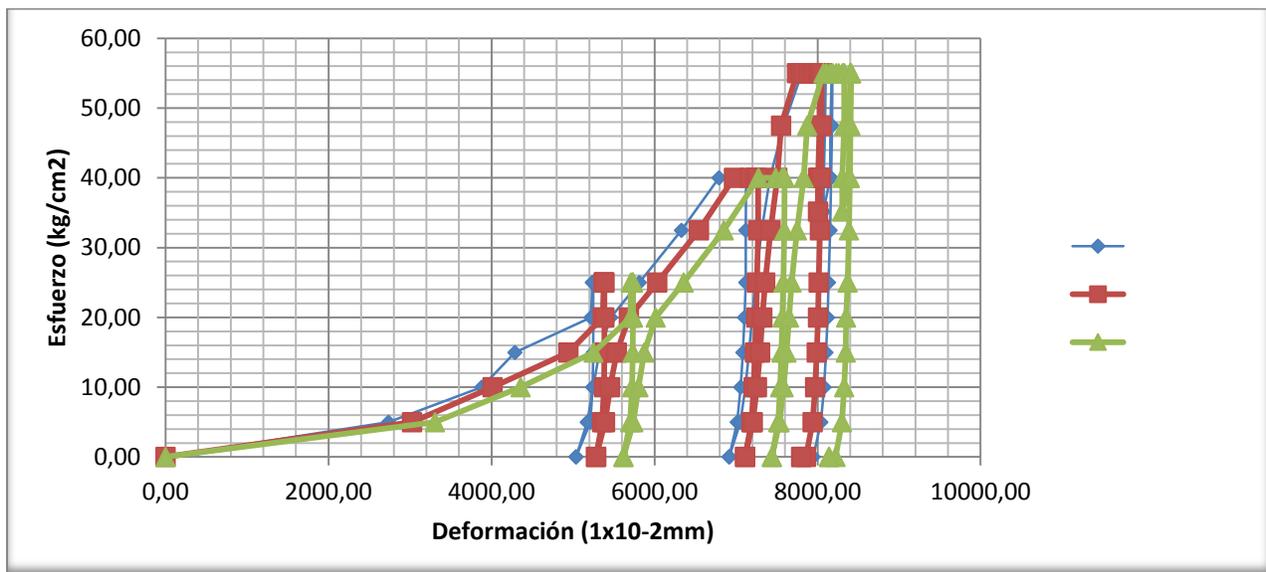


Figura 4. Curva del Esfuerzo respecto a la Deformación obtenida de la toma de datos que se realizó en los tres deformímetros, colocados en diferentes puntos de la tapa cabezal del odómetro #2, para el caso de los materiales del sitio Presa.

CUADRO 22. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ANTES DE ENSAYAR ODÓMETRO #2 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Retenido (grs)</i>	<i>% Ret.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Ret. Correg.</i>
3"	76,200				100,00		100	0
2"	50,800				79,72		80	20
1 1/2"	38,100				69,47		69	10
1"	25,400				59,65		60	10
3/4"	19,050				54,17		54	5
1/2"	12,700				48,84		49	5
3/8"	9,525				45,80		46	3
4	4,750				37,50		38	8
8	2,360				32,97		33	5
16	1,180				28,66		29	4
30	0,600				22,59		23	6
50	0,300				14,06		14	9
100	0,150				7,08		7	7
200	0,075				4,34		4	3
Charola	0,060				0,00		0	4

CUADRO 23. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES DESPUÉS DE ENSAYAR ODÓMETRO #2 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Retenido (grs)</i>	<i>% Ret.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Ret. Correg.</i>
3"	76,200	0,00	0,00	0,00	100,00		100	0
2"	50,800	31.755,00	17,13	17,13	82,87		83	17
1 1/2"	38,100	20.165,00	10,88	28,01	71,99		72	11
1"	25,400	17.340,00	9,35	37,36	62,64		63	9
3/4"	19,050	11.480,00	6,19	43,55	56,45		56	6
1/2"	12,700	10.515,00	5,67	49,22	50,78		51	6
3/8"	9,525	5.935,00	3,20	52,42	47,58		48	3
		97.190,00						
4	4,750	147,10	11,86	11,86	88,14	41,93	42	6
8	2,360	110,60	8,92	20,78	79,22	37,69	38	4
16	1,180	114,10	9,20	29,98	70,02	33,31	33	4
30	0,600	174,30	14,06	44,04	55,96	26,62	27	7
50	0,300	235,70	19,01	63,05	36,95	17,58	18	9
100	0,150	203,70	16,43	79,48	20,52	9,76	10	8
200	0,075	95,50	7,70	87,18	12,82	6,10	6	4
Charola	0,060	159,00	12,82	100,00	0,00	0,00	0	6
		1240,00						

Ensayo de Odómetro a una Densidad Máxima del 90%.

CUADRO 24. LECTURAS DE DEFORMACIÓN REALIZADAS EN PERIODOS DE TIEMPO DEFINIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.									
Tiempo (min)	Carga (kg)	Carga (PSI)	Esfuerzo (kg/cm²)	Lec. Def. #1 10-3 pulg	Lec. Def. #2 10-3 pulg	Lec. Def. #3 10-3 pulg	Promedio 10-3 pulg	Promedio (cm)	Deformación Unitaria (%)
0"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	9.553,00	500,00	5,00	472,00	501,00	399,00	457,33	1,16	2,15
2"	19.106,00	950,00	10,00	823,00	871,00	762,00	818,67	2,08	3,84
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	1.070,00	1.130,00	1.020,00	1.073,33	2,73	5,04
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	1.285,00	1.343,00	1.288,00	1.305,33	3,32	6,13
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	1.432,00	1.498,00	1.448,00	1.459,33	3,71	6,85
10"	47.765,00	2.200,00	25,00	1.507,00	1.575,00	1.519,00	1.533,67	3,90	7,20
20"	47.765,00	2.200,00	25,00	1.537,50	1.608,00	1.553,50	1.566,33	3,98	7,35
40"	47.765,00	2.200,00	25,00	1.559,00	1.630,50	1.577,00	1.588,83	4,04	7,46
41"	38.212,00	1.750,00	20,00	1.558,00	1.625,50	1.576,00	1.586,50	4,03	7,45
42"	28.659,00	1.350,00	15,00	1.556,00	1.623,00	1.572,00	1.583,67	4,02	7,44
43"	19.106,00	950,00	10,00	1.550,00	1.615,50	1.566,00	1.577,17	4,01	7,40
44"	9.553,00	500,00	5,00	1.537,00	1.601,50	1.551,00	1.563,17	3,97	7,34
45"	0,00	0,00	0,00	1.460,00	1.528,50	1.531,00	1.506,50	3,83	7,07
0"	0,00	0,00	0,00	1.460,00	1.528,50	1.531,00	1.506,50	3,83	7,07
1'	9.553,00	500,00	5,00	1.591,50	1.698,00	1.591,00	1.626,83	4,13	7,64
2"	19.106,00	950,00	10,00	1.618,50	1.725,50	1.615,00	1.653,00	4,20	7,76
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	1.633,50	1.744,00	1.634,00	1.670,50	4,24	7,84
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	1.654,50	1.769,50	1.660,00	1.694,67	4,30	7,96
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	1.689,50	1.808,00	1.698,00	1.731,83	4,40	8,13
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	1.819,00	1.975,50	1.838,00	1.877,50	4,77	8,81
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	1.963,00	2.097,50	1.989,00	2.016,50	5,12	9,47
20"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.055,50	2.192,00	2.088,00	2.111,83	5,36	9,92
40"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.086,00	2.223,50	2.114,50	2.141,33	5,44	10,05
60"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.101,50	2.241,00	2.132,50	2.158,33	5,48	10,13
62,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	2.101,00	2.239,50	2.132,00	2.157,50	5,48	10,13
65"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.100,00	2.233,50	2.127,00	2.153,50	5,47	10,11
66"	38.212,00	1.750,00	20,00	2.096,00	2.226,50	2.121,00	2.147,83	5,46	10,08
67"	28.659,00	1.350,00	15,00	2.091,50	2.222,50	2.115,00	2.143,00	5,44	10,06
68"	19.106,00	950,00	10,00	2.085,00	2.211,50	2.106,00	2.134,17	5,42	10,02
69"	9.553,00	500,00	5,00	2.067,00	2.195,50	2.085,00	2.115,83	5,37	9,93
70"	0,00	0,00	0,00	1.919,00	2.016,50	2.028,00	1.987,83	5,05	9,33
0"	0,00	0,00	0,00	1.919,00	2.016,50	2.028,00	1.987,83	5,05	9,33

1"	9.553,00	500,00	5,00	2.061,00	2.178,00	2.081,00	2.106,67	5,35	9,89
2"	19.106,00	950,00	10,00	2.099,00	2.209,50	2.106,00	2.138,17	5,43	10,04
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	2.116,00	2.228,50	2.117,00	2.153,83	5,47	10,11
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	2.130,50	2.243,50	2.138,00	2.170,67	5,51	10,19
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.145,50	2.259,00	2.153,00	2.185,83	5,55	10,26
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	2.167,00	2.280,50	2.174,00	2.207,17	5,61	10,36
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.177,00	2.291,50	2.184,00	2.217,50	5,63	10,41
12,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	2.178,00	2.293,50	2.186,00	2.219,17	5,64	10,42
15"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.173,00	2.296,00	2.189,00	2.219,33	5,64	10,42
30"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.215,00	2.340,00	2.232,00	2.262,33	5,75	10,62
60"-1H	105.083,00	4.800,00	55,00	2.267,00	2.391,00	2.284,00	2.314,00	5,88	10,86
120"-2H	105.083,00	4.800,00	55,00	2.327,00	2.452,00	2.343,00	2.374,00	6,03	11,15
240"-4H	105.083,00	4.800,00	55,00	2.380,00	2.495,00	2.394,00	2.423,00	6,15	11,38
480"-8H	105.083,00	4.800,00	55,00	2.419,00	2.546,00	2.432,00	2.465,67	6,26	11,58
960"-16H	105.083,00	4.800,00	55,00	2.446,00	2.572,00	2.455,00	2.491,00	6,33	11,70
1440"-24H	105.083,00	4.800,00	55,00	2.466,00	2.592,00	2.474,00	2.510,67	6,38	11,79
0"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.466,00	2.592,00	2.474,00	2.510,67	6,38	11,79
1"	90.753,00	4.150,00	47,50	2.465,50	2.587,50	2.470,50	2.507,83	6,37	11,77
2"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.454,50	2.577,50	2.461,50	2.497,83	6,34	11,73
3"	67.253,12	3.100,00	35,20	2.447,00	2.570,00	2.454,00	2.490,33	6,33	11,69
4"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.447,00	2.572,50	2.457,00	2.492,17	6,33	11,70
5"	90.753,00	4.150,00	47,50	2.455,00	2.582,00	2.466,00	2.501,00	6,35	11,74
6"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.468,00	2.596,00	2.478,00	2.514,00	6,39	11,80
12"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.471,50	2.599,00	2.481,00	2.517,17	6,39	11,82
24"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.473,50	2.602,50	2.484,00	2.520,00	6,40	11,83
48"	105.083,00	4.800,00	55,00	2.490,50	2.607,00	2.488,00	2.528,50	6,42	11,87
50,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	2.479,50	2.604,00	2.485,00	2.522,83	6,41	11,84
53"	76.424,00	3.500,00	40,00	2.466,50	2.581,00	2.476,00	2.507,83	6,37	11,77
55,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	2.455,00	2.570,00	2.466,00	2.497,00	6,34	11,72
58"	47.765,00	2.200,00	25,00	2.437,50	2.553,00	2.449,00	2.479,83	6,30	11,64
59"	38.212,00	1.750,00	20,00	2.425,50	2.540,00	2.436,00	2.467,17	6,27	11,58
60"	28.659,00	1.350,00	15,00	2.408,50	2.525,00	2.421,00	2.451,50	6,23	11,51
61"	19.106,00	950,00	10,00	2.390,50	2.503,00	2.399,00	2.430,83	6,17	11,41
62"	9.553,00	500,00	5,00	2.360,50	2.465,00	2.357,00	2.394,17	6,08	11,24
63"	0,00	0,00	0,00	2.236,50	2.314,00	2.186,00	2.245,50	5,70	10,54
73"	0,00	0,00	0,00	2.203,50	2.291,00	2.166,00	2.220,17	5,64	10,42
83"	0,00	0,00	0,00	2.191,50	2.288,00	2.163,00	2.214,17	5,62	10,40

CUADRO 25. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS EN EL ODÓMETRO #3 PARA EL SITIO CARAZO.

Densidad (Kg/m ³)	W Muestra (kg)	Deform. (cm)	Área (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (m ³)	Volumen Vacíos (cm ³)	Reducción Vacíos (cm ³)	Relación de Vacíos (e)	Porosid. %n
2.042,67	208,39	0,00	1.885,74	54,10	102.018,53	0,102019	27.916,91	0,00	0,377	27,36
2.087,49	208,39	1,16	1.885,74	52,94	99.828,01	0,099828	25.726,39	2.190,53	0,347	25,22
2.124,32	208,39	2,08	1.885,74	52,02	98.097,30	0,098097	23.995,68	3.921,23	0,324	23,52
2.151,07	208,39	2,73	1.885,74	51,37	96.877,50	0,096878	22.775,88	5.141,03	0,307	22,33
2.176,03	208,39	3,32	1.885,74	50,78	95.766,28	0,095766	21.664,65	6.252,26	0,292	21,24
2.192,92	208,39	3,71	1.885,74	50,39	95.028,65	0,095029	20.927,03	6.989,89	0,282	20,51
2.201,16	208,39	3,90	1.885,74	50,20	94.672,61	0,094673	20.570,99	7.345,93	0,278	20,16
2.204,81	208,39	3,98	1.885,74	50,12	94.516,14	0,094516	20.414,52	7.502,39	0,275	20,01
2.207,33	208,39	4,04	1.885,74	50,06	94.408,37	0,094408	20.306,75	7.610,16	0,274	19,90
2.207,06	208,39	4,03	1.885,74	50,07	94.419,55	0,094420	20.317,93	7.598,99	0,274	19,92
2.206,75	208,39	4,02	1.885,74	50,08	94.433,12	0,094433	20.331,50	7.585,41	0,274	19,93
2.206,02	208,39	4,01	1.885,74	50,09	94.464,25	0,094464	20.362,63	7.554,28	0,275	19,96
2.204,45	208,39	3,97	1.885,74	50,13	94.531,31	0,094531	20.429,69	7.487,22	0,276	20,03
2.198,14	208,39	3,83	1.885,74	50,27	94.802,73	0,094803	20.701,11	7.215,80	0,279	20,29
2.198,14	208,39	3,83	1.885,74	50,27	94.802,73	0,094803	20.701,11	7.215,80	0,279	20,29
2.211,59	208,39	4,13	1.885,74	49,97	94.226,36	0,094226	20.124,74	7.792,17	0,272	19,73
2.214,53	208,39	4,20	1.885,74	49,90	94.101,03	0,094101	19.999,41	7.917,51	0,270	19,60
2.216,51	208,39	4,24	1.885,74	49,86	94.017,21	0,094017	19.915,59	8.001,33	0,269	19,52
2.219,24	208,39	4,30	1.885,74	49,80	93.901,45	0,093901	19.799,83	8.117,08	0,267	19,41
2.223,46	208,39	4,40	1.885,74	49,70	93.723,43	0,093723	19.621,81	8.295,10	0,265	19,23
2.240,13	208,39	4,77	1.885,74	49,33	93.025,72	0,093026	18.924,10	8.992,81	0,255	18,55
2.256,28	208,39	5,12	1.885,74	48,98	92.359,94	0,092360	18.258,32	9.658,59	0,246	17,90
2.267,49	208,39	5,36	1.885,74	48,74	91.903,32	0,091903	17.801,70	10.115,22	0,240	17,45
2.270,98	208,39	5,44	1.885,74	48,66	91.762,02	0,091762	17.660,40	10.256,51	0,238	17,31
2.273,00	208,39	5,48	1.885,74	48,62	91.680,59	0,091681	17.578,97	10.337,94	0,237	17,23
2.272,90	208,39	5,48	1.885,74	48,62	91.684,58	0,091685	17.582,96	10.333,95	0,237	17,24
2.272,43	208,39	5,47	1.885,74	48,63	91.703,74	0,091704	17.602,12	10.314,79	0,238	17,25
2.271,75	208,39	5,46	1.885,74	48,64	91.730,89	0,091731	17.629,27	10.287,65	0,238	17,28
2.271,18	208,39	5,44	1.885,74	48,66	91.754,04	0,091754	17.652,42	10.264,50	0,238	17,30
2.270,13	208,39	5,42	1.885,74	48,68	91.796,35	0,091796	17.694,73	10.222,19	0,239	17,34
2.267,96	208,39	5,37	1.885,74	48,73	91.884,16	0,091884	17.782,54	10.134,38	0,240	17,43
2.252,93	208,39	5,05	1.885,74	49,05	92.497,25	0,092497	18.395,63	9.521,28	0,248	18,03
2.252,93	208,39	5,05	1.885,74	49,05	92.497,25	0,092497	18.395,63	9.521,28	0,248	18,03

2.266,88	208,39	5,35	1.885,74	48,75	91.928,06	0,091928	17.826,44	10.090,47	0,241	17,47
2.270,61	208,39	5,43	1.885,74	48,67	91.777,19	0,091777	17.675,57	10.241,35	0,239	17,33
2.272,47	208,39	5,47	1.885,74	48,63	91.702,15	0,091702	17.600,53	10.316,39	0,238	17,25
2.274,47	208,39	5,51	1.885,74	48,59	91.621,52	0,091622	17.519,90	10.397,01	0,236	17,17
2.276,27	208,39	5,55	1.885,74	48,55	91.548,87	0,091549	17.447,25	10.469,66	0,235	17,10
2.278,81	208,39	5,61	1.885,74	48,49	91.446,69	0,091447	17.345,07	10.571,84	0,234	17,00
2.280,05	208,39	5,63	1.885,74	48,47	91.397,20	0,091397	17.295,58	10.621,34	0,233	16,95
2.280,25	208,39	5,64	1.885,74	48,46	91.389,21	0,091389	17.287,59	10.629,32	0,233	16,95
2.280,27	208,39	5,64	1.885,74	48,46	91.388,42	0,091388	17.286,80	10.630,12	0,233	16,94
2.285,42	208,39	5,75	1.885,74	48,35	91.182,46	0,091182	17.080,84	10.836,08	0,231	16,74
2.291,64	208,39	5,88	1.885,74	48,22	90.934,98	0,090935	16.833,36	11.083,55	0,227	16,50
2.298,90	208,39	6,03	1.885,74	48,07	90.647,60	0,090648	16.545,98	11.370,94	0,223	16,22
2.304,87	208,39	6,15	1.885,74	47,95	90.412,90	0,090413	16.311,28	11.605,64	0,220	15,99
2.310,09	208,39	6,26	1.885,74	47,84	90.208,53	0,090209	16.106,91	11.810,00	0,217	15,79
2.313,20	208,39	6,33	1.885,74	47,77	90.087,19	0,090087	15.985,57	11.931,34	0,216	15,67
2.315,62	208,39	6,38	1.885,74	47,72	89.992,99	0,089993	15.891,37	12.025,54	0,214	15,58
2.315,62	208,39	6,38	1.885,74	47,72	89.992,99	0,089993	15.891,37	12.025,54	0,214	15,58
2.315,28	208,39	6,37	1.885,74	47,73	90.006,57	0,090007	15.904,94	12.011,97	0,215	15,59
2.314,04	208,39	6,34	1.885,74	47,76	90.054,46	0,090054	15.952,84	11.964,07	0,215	15,64
2.313,12	208,39	6,33	1.885,74	47,77	90.090,39	0,090090	15.988,77	11.928,15	0,216	15,67
2.313,35	208,39	6,33	1.885,74	47,77	90.081,60	0,090082	15.979,98	11.936,93	0,216	15,66
2.314,43	208,39	6,35	1.885,74	47,75	90.039,30	0,090039	15.937,67	11.979,24	0,215	15,62
2.316,04	208,39	6,39	1.885,74	47,71	89.977,03	0,089977	15.875,41	12.041,51	0,214	15,56
2.316,43	208,39	6,39	1.885,74	47,71	89.961,86	0,089962	15.860,24	12.056,67	0,214	15,55
2.316,78	208,39	6,40	1.885,74	47,70	89.948,29	0,089948	15.846,67	12.070,24	0,214	15,53
2.317,82	208,39	6,42	1.885,74	47,68	89.907,58	0,089908	15.805,96	12.110,96	0,213	15,49
2.317,13	208,39	6,41	1.885,74	47,69	89.934,72	0,089935	15.833,10	12.083,82	0,214	15,52
2.315,28	208,39	6,37	1.885,74	47,73	90.006,57	0,090007	15.904,94	12.011,97	0,215	15,59
2.313,94	208,39	6,34	1.885,74	47,76	90.058,45	0,090058	15.956,83	11.960,08	0,215	15,64
2.311,83	208,39	6,30	1.885,74	47,80	90.140,68	0,090141	16.039,06	11.877,86	0,216	15,72
2.310,28	208,39	6,27	1.885,74	47,83	90.201,35	0,090201	16.099,73	11.817,18	0,217	15,78
2.308,36	208,39	6,23	1.885,74	47,87	90.276,39	0,090276	16.174,77	11.742,14	0,218	15,85
2.305,83	208,39	6,17	1.885,74	47,93	90.375,38	0,090375	16.273,76	11.643,16	0,220	15,95
2.301,35	208,39	6,08	1.885,74	48,02	90.551,00	0,090551	16.449,38	11.467,53	0,222	16,12
2.283,40	208,39	5,70	1.885,74	48,40	91.263,08	0,091263	17.161,46	10.755,45	0,232	16,82
2.280,37	208,39	5,64	1.885,74	48,46	91.384,42	0,091384	17.282,80	10.634,11	0,233	16,94
2.279,65	208,39	5,62	1.885,74	48,48	91.413,16	0,091413	17.311,54	10.605,37	0,234	16,97

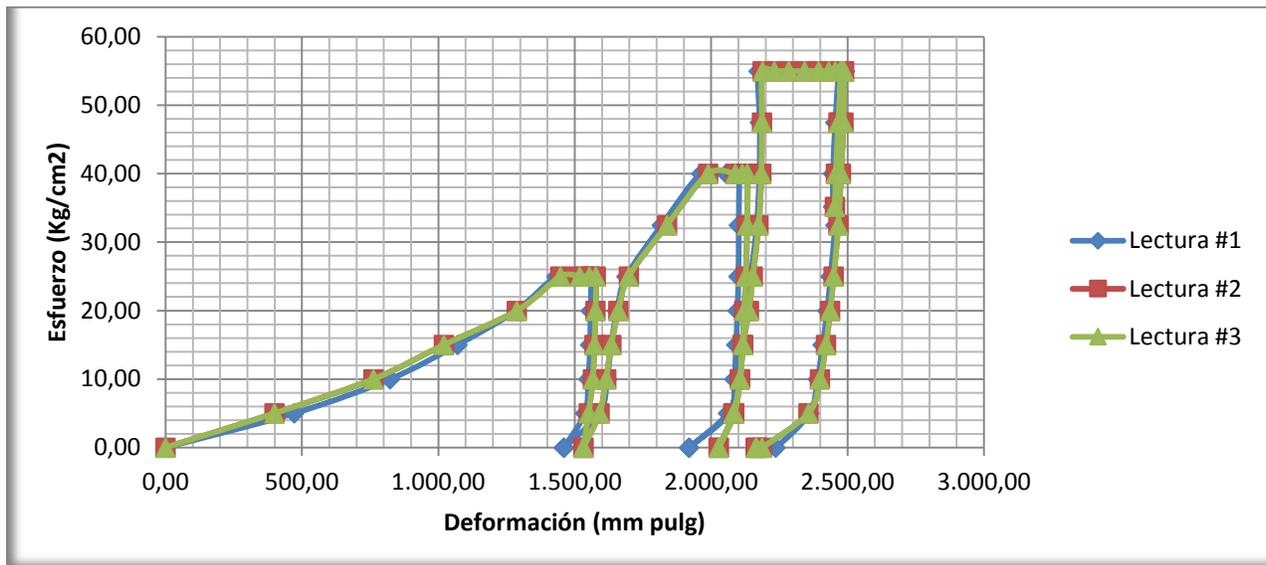


Figura 5. Curva del Esfuerzo respecto a la Deformación obtenida de la toma de datos que se realizó en los tres deformímetros, colocados en diferentes puntos de la tapa cabezal del odómetro #3, para el caso de los materiales del sitio Carazo.

CUADRO 26. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ANTES DE ENSAYAR ODÓMETRO #3 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.								
Malla	Abertura	Peso Retenido (grs)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasando	% Pas. Corr.	% Pas. Corr.	% Ret. Correg.
3"	76,2				100,00		100	0
2"	50,8				87,89		88	12
1 1/2"	38,1				80,78		81	7
1"	25,4				73,89		74	7
3/4"	19,05				67,89		68	6
1/2"	12,7				63,11		63	5
3/8"	9,525				60,78		61	2
4	4,75	262	11,11	11,11	88,89	54,03	54	7
8	2,36	285	12,09	23,2	76,80	46,68	47	7
16	1,18	365	15,48	38,68	61,32	37,27	37	9
30	0,6	424	17,98	56,66	43,34	26,34	26	11
50	0,3	407	17,26	73,92	26,08	15,85	16	10
100	0,15	303	12,85	86,77	13,23	8,04	8	8
200	0,075	120	5,09	91,86	8,14	4,95	5	3
Charola	0,06	192	8,14	100	0,00	0	0	5
		2358						

CUADRO 27. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES DESPUÉS DE ENSAYAR ODÓMETRO #3 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Retenido (grs)</i>	<i>% Ret.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Pas. Corr.</i>	<i>% Ret. Correg.</i>
3"	76,2	0	0	0	100		100	0
2"	50,8	18.825,00	10,04	10,04	89,96		90	10
1 1/2"	38,1	15.010,00	8	18,04	81,96		82	8
1"	25,4	13.715,00	7,31	25,35	74,65		75	7
3/4"	19,05	11.500,00	6,13	31,48	68,52		69	6
1/2"	12,7	9.015,00	4,81	36,29	63,71		64	5
3/8"	9,525	4.775,00	2,55	38,84	61,16		61	3
		72.840,00						
4	4,75	162,5	9,88	9,88	90,12	55,12	55	6
8	2,36	220,7	13,42	23,31	76,69	46,91	47	8
16	1,18	279,7	17,01	40,32	59,68	36,5	37	10
30	0,6	306,5	18,64	58,96	41,04	25,1	25	11
50	0,3	268,7	16,34	75,3	24,7	15,11	15	10
100	0,15	183,1	11,14	86,44	13,56	8,3	8	7
200	0,075	96,4	5,86	92,3	7,7	4,71	5	4
Charola	0,06	126,6	7,7	100	0	0	0	5
		1644,2						

CUADRO 28. LECTURAS DE DEFORMACIÓN REALIZADAS EN PERIODOS DE TIEMPO DEFINIDOS PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Carga (kg)</i>	<i>Carga (PSI)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Lec. Def. #1 10-2 mm</i>	<i>Lec. Def. #2 10-2 mm</i>	<i>Lec. Def. #3 10-2 mm</i>	<i>Promedio 10-2 mm</i>	<i>Promedio (cm)</i>	<i>Deformación Unitaria (%)</i>
0"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	9.553,00	500,00	5,00	3.641,00	4.246,00	4.155,00	4.014,00	4,01	7,42
2"	19.106,00	950,00	10,00	4.749,00	5.381,00	5.261,00	5.130,33	5,13	9,48
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	5.436,00	6.071,00	5.942,00	5.816,33	5,82	10,75
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	5.911,00	6.541,00	6.410,00	6.287,33	6,29	11,62
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	6.341,00	6.971,00	6.830,00	6.714,00	6,71	12,41
10"	47.765,00	2.200,00	25,00	6.461,00	7.091,00	6.954,00	6.835,33	6,84	12,63
20"	47.765,00	2.200,00	25,00	6.511,00	7.138,00	7.002,00	6.883,67	6,88	12,72
40"	47.765,00	2.200,00	25,00	6.552,00	7.167,00	7.047,00	6.922,00	6,92	12,79
41"	38.212,00	1.750,00	20,00	6.551,00	7.166,00	7.047,00	6.921,33	6,92	12,79
42"	28.659,00	1.350,00	15,00	6.544,00	7.156,00	7.040,00	6.913,33	6,91	12,78
43"	19.106,00	950,00	10,00	6.530,00	7.141,00	7.025,00	6.898,67	6,90	12,75
44"	9.553,00	500,00	5,00	6.500,00	7.111,00	7.007,00	6.872,67	6,87	12,70
45"	0,00	0,00	0,00	6.351,00	6.991,00	6.950,00	6.764,00	6,76	12,50
0"	0,00	0,00	0,00	6.351,00	6.991,00	6.950,00	6.764,00	6,76	12,50

1'	9.553,00	500,00	5,00	6.477,00	7.083,00	7.001,00	6.853,67	6,85	12,67
2"	19.106,00	950,00	10,00	6.536,00	7.135,00	7.044,00	6.905,00	6,91	12,76
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	6.573,00	7.170,00	7.077,00	6.940,00	6,94	12,83
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	6.613,00	7.209,00	7.115,00	6.979,00	6,98	12,90
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	6.681,00	7.281,00	7.184,00	7.048,67	7,05	13,03
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	6.916,00	7.503,00	7.400,00	7.273,00	7,27	13,44
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.241,00	7.761,00	7.760,00	7.587,33	7,59	14,02
20"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.410,00	8.024,00	7.923,00	7.785,67	7,79	14,39
40"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.485,00	8.095,00	7.993,00	7.857,67	7,86	14,52
60"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.516,00	8.125,00	8.023,00	7.888,00	7,89	14,58
62,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	7.516,00	8.123,00	8.023,00	7.887,33	7,89	14,58
65"	47.765,00	2.200,00	25,00	7.508,00	8.116,00	8.016,00	7.880,00	7,88	14,57
66"	38.212,00	1.750,00	20,00	7.498,00	8.103,00	8.055,00	7.885,33	7,89	14,58
67"	28.659,00	1.350,00	15,00	7.483,00	8.091,00	7.994,00	7.856,00	7,86	14,52
68"	19.106,00	950,00	10,00	7.465,00	8.071,00	7.982,00	7.839,33	7,84	14,49
69"	9.553,00	500,00	5,00	7.426,00	8.041,00	7.963,00	7.810,00	7,81	14,44
70"	0,00	0,00	0,00	7.311,00	7.951,00	7.900,00	7.720,67	7,72	14,27
0"	0,00	0,00	0,00	7.311,00	7.951,00	7.900,00	7.720,67	7,72	14,27
1"	9.553,00	500,00	5,00	7.376,00	7.996,00	7.928,00	7.766,67	7,77	14,36
2"	19.106,00	950,00	10,00	7.424,00	8.035,00	7.960,00	7.806,33	7,81	14,43
3"	28.659,00	1.350,00	15,00	7.455,00	8.061,00	7.984,00	7.833,33	7,83	14,48
4"	38.212,00	1.750,00	20,00	7.483,00	8.085,00	8.007,00	7.858,33	7,86	14,53
5"	47.765,00	2.200,00	25,00	7.510,00	8.108,00	8.030,00	7.882,67	7,88	14,57
7,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	7.558,00	8.155,00	8.076,00	7.929,67	7,93	14,66
10"	76.424,00	3.500,00	40,00	7.628,00	8.225,00	8.145,00	7.999,33	8,00	14,79
12,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	7.756,00	8.351,00	8.268,00	8.125,00	8,13	15,02
15"	105.083,00	4.800,00	55,00	7.951,00	8.556,00	8.450,00	8.319,00	8,32	15,38
30"	105.083,00	4.800,00	55,00	8.083,00	8.647,00	8.569,00	8.433,00	8,43	15,59
60"-1H	105.083,00	4.800,00	55,00	8.119,00	8.684,00	8.603,00	8.468,67	8,47	15,65
120"-2H	105.083,00	4.800,00	55,00	8.155,00	8.717,00	8.633,00	8.501,67	8,50	15,71
240"-4H	105.083,00	4.800,00	55,00	8212,00	8.774,00	8.718,00	8.568,00	8,57	15,84
480"-8H	105.083,00	4.800,00	55,00	8253,00	8.815,00	8.719,00	8.595,67	8,60	15,89
960"-16H	105.083,00	4.800,00	55,00	8280,50	8.845,00	8.744,50	8.623,33	8,62	15,94
1440"-24H	105.083,00	4.800,00	55,00	8299,50	8.866,00	8.764,00	8.643,17	8,64	15,98
0"	105.083,00	4.800,00	55,00	8299,50	8.866,00	8.764,00	8.643,17	8,64	15,98
1"	90.753,00	4.150,00	47,50	8298,00	8.865,50	8.763,00	8.642,17	8,64	15,97
2"	76.424,00	3.500,00	40,00	8292,00	8.858,50	8.756,00	8.635,50	8,64	15,96
3"	67.253,12	3.100,00	35,20	8287,00	8.853,50	8.749,00	8.629,83	8,63	15,95

4"	76.424,00	3.500,00	40,00	8288,50	8.854,00	8.750,00	8.630,83	8,63	15,95
5"	90.753,00	4.150,00	47,50	8291,50	8.864,50	8.754,00	8.636,67	8,64	15,96
6"	105.083,00	4.800,00	55,00	8300,00	8.867,50	8.764,00	8.643,83	8,64	15,98
12"	105.083,00	4.800,00	55,00	8303,00	8.870,00	8.766,00	8.646,33	8,65	15,98
24"	105.083,00	4.800,00	55,00	8306,50	8.873,00	8.769,00	8.649,50	8,65	15,99
48"	105.083,00	4.800,00	55,00	8309,00	8.875,00	8.770,00	8.651,33	8,65	15,99
50,5"	90.753,00	4.150,00	47,50	8308,00	8.875,00	8.770,00	8.651,00	8,65	15,99
53"	76.424,00	3.500,00	40,00	8302,00	8.872,00	8.763,00	8.645,67	8,65	15,98
55,5"	62.094,50	2.875,00	32,50	8291,00	8.857,00	8.752,00	8.633,33	8,63	15,96
58"	47.765,00	2.200,00	25,00	8274,00	8.841,00	8.740,00	8.618,33	8,62	15,93
59"	38.212,00	1.750,00	20,00	8265,00	8.831,00	8.733,00	8.609,67	8,61	15,91
60"	28.659,00	1.350,00	15,00	8248,00	8.816,00	8.724,00	8.596,00	8,60	15,89
61"	19.106,00	950,00	10,00	8225,00	8.798,00	8.715,00	8.579,33	8,58	15,86
62"	9.553,00	500,00	5,00	8183,00	8.661,00	8.702,00	8.515,33	8,52	15,74
63"	0,00	0,00	0,00	8071,00	8.581,00	8.658,00	8.436,67	8,44	15,59
73"	0,00	0,00	0,00	8049,00	8.570,00	8.648,00	8.422,33	8,42	15,57
83"	0,00	0,00	0,00	8046,50	8.567,50	8.647,00	8.420,33	8,42	15,56

CUADRO 29. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ENSAYADOS EN EL ODÓMETRO #3 PARA EL SITIO PRESA.

Densidad (Kg/m ³)	W Muestra (kg)	Deform. (cm)	Area (cm ²)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (m ³)	Volumen Vacíos (cm ³)	Reducción Vacíos (cm ³)	Relación Vacíos (e)	Porosid. %n
1.854,66	189,21	0,00	1.885,74	54,10	102.018,53	0,102019	33.943,52	0,00	0,499	33,27
2.003,30	189,21	4,01	1.885,74	50,09	94.449,17	0,094449	26.374,16	7.569,36	0,387	25,85
2.048,97	189,21	5,13	1.885,74	48,97	92.344,06	0,092344	24.269,05	9.674,47	0,357	23,79
2.078,08	189,21	5,82	1.885,74	48,28	91.050,44	0,091050	22.975,43	10.968,09	0,338	22,52
2.098,55	189,21	6,29	1.885,74	47,81	90.162,26	0,090162	22.087,25	11.856,28	0,324	21,65
2.117,45	189,21	6,71	1.885,74	47,39	89.357,68	0,089358	21.282,66	12.660,86	0,313	20,86
2.122,88	189,21	6,84	1.885,74	47,26	89.128,87	0,089129	21.053,86	12.889,66	0,309	20,64
2.125,05	189,21	6,88	1.885,74	47,22	89.037,73	0,089038	20.962,72	12.980,81	0,308	20,55
2.126,78	189,21	6,92	1.885,74	47,18	88.965,44	0,088965	20.890,43	13.053,09	0,307	20,48
2.126,75	189,21	6,92	1.885,74	47,18	88.966,70	0,088967	20.891,69	13.051,84	0,307	20,48
2.126,39	189,21	6,91	1.885,74	47,19	88.981,78	0,088982	20.906,77	13.036,75	0,307	20,49
2.125,73	189,21	6,90	1.885,74	47,20	89.009,44	0,089009	20.934,43	13.009,09	0,308	20,52
2.124,56	189,21	6,87	1.885,74	47,23	89.058,47	0,089058	20.983,46	12.960,06	0,308	20,57
2.119,68	189,21	6,76	1.885,74	47,34	89.263,39	0,089263	21.188,38	12.755,15	0,311	20,77
2.119,68	189,21	6,76	1.885,74	47,34	89.263,39	0,089263	21.188,38	12.755,15	0,311	20,77
2.123,70	189,21	6,85	1.885,74	47,25	89.094,30	0,089094	21.019,29	12.924,23	0,309	20,60

2.126,01	189,21	6,91	1.885,74	47,20	88.997,50	0,088997	20.922,49	13.021,03	0,307	20,51
2.127,59	189,21	6,94	1.885,74	47,16	88.931,50	0,088931	20.856,49	13.087,04	0,306	20,44
2.129,35	189,21	6,98	1.885,74	47,12	88.857,95	0,088858	20.782,94	13.160,58	0,305	20,37
2.132,51	189,21	7,05	1.885,74	47,05	88.726,58	0,088727	20.651,57	13.291,95	0,303	20,24
2.142,72	189,21	7,27	1.885,74	46,83	88.303,55	0,088304	20.228,54	13.714,99	0,297	19,83
2.157,20	189,21	7,59	1.885,74	46,51	87.710,80	0,087711	19.635,79	14.307,74	0,288	19,25
2.166,44	189,21	7,79	1.885,74	46,31	87.336,79	0,087337	19.261,78	14.681,74	0,283	18,88
2.169,81	189,21	7,86	1.885,74	46,24	87.201,02	0,087201	19.126,01	14.817,52	0,281	18,75
2.171,24	189,21	7,89	1.885,74	46,21	87.143,82	0,087144	19.068,81	14.874,72	0,280	18,69
2.171,21	189,21	7,89	1.885,74	46,21	87.145,07	0,087145	19.070,06	14.873,46	0,280	18,69
2.170,86	189,21	7,88	1.885,74	46,22	87.158,90	0,087159	19.083,89	14.859,63	0,280	18,71
2.171,11	189,21	7,89	1.885,74	46,21	87.148,85	0,087149	19.073,83	14.869,69	0,280	18,70
2.169,74	189,21	7,86	1.885,74	46,24	87.204,16	0,087204	19.129,15	14.814,37	0,281	18,75
2.168,95	189,21	7,84	1.885,74	46,26	87.235,59	0,087236	19.160,58	14.782,94	0,281	18,78
2.167,58	189,21	7,81	1.885,74	46,29	87.290,90	0,087291	19.215,89	14.727,63	0,282	18,84
2.163,40	189,21	7,72	1.885,74	46,38	87.459,36	0,087459	19.384,35	14.559,17	0,285	19,00
2.163,40	189,21	7,72	1.885,74	46,38	87.459,36	0,087459	19.384,35	14.559,17	0,285	19,00
2.165,55	189,21	7,77	1.885,74	46,33	87.372,62	0,087373	19.297,61	14.645,91	0,283	18,92
2.167,41	189,21	7,81	1.885,74	46,29	87.297,82	0,087298	19.222,81	14.720,72	0,282	18,84
2.168,67	189,21	7,83	1.885,74	46,27	87.246,90	0,087247	19.171,89	14.771,63	0,282	18,79
2.169,85	189,21	7,86	1.885,74	46,24	87.199,76	0,087200	19.124,75	14.818,77	0,281	18,75
2.170,99	189,21	7,88	1.885,74	46,22	87.153,87	0,087154	19.078,86	14.864,66	0,280	18,70
2.173,20	189,21	7,93	1.885,74	46,17	87.065,24	0,087065	18.990,23	14.953,29	0,279	18,61
2.176,48	189,21	8,00	1.885,74	46,10	86.933,87	0,086934	18.858,86	15.084,66	0,277	18,49
2.182,43	189,21	8,13	1.885,74	45,98	86.696,90	0,086697	18.621,89	15.321,64	0,274	18,25
2.191,68	189,21	8,32	1.885,74	45,78	86.331,06	0,086331	18.256,05	15.687,47	0,268	17,89
2.197,15	189,21	8,43	1.885,74	45,67	86.116,09	0,086116	18.041,08	15.902,45	0,265	17,68
2.198,87	189,21	8,47	1.885,74	45,63	86.048,83	0,086049	17.973,82	15.969,70	0,264	17,62
2.200,46	189,21	8,50	1.885,74	45,60	85.986,60	0,085987	17.911,59	16.031,93	0,263	17,56
2.203,66	189,21	8,57	1.885,74	45,53	85.861,51	0,085862	17.786,50	16.157,02	0,261	17,43
2.205,00	189,21	8,60	1.885,74	45,50	85.809,34	0,085809	17.734,33	16.209,19	0,261	17,38
2.206,35	189,21	8,62	1.885,74	45,48	85.757,17	0,085757	17.682,16	16.261,36	0,260	17,33
2.207,31	189,21	8,64	1.885,74	45,46	85.719,77	0,085720	17.644,76	16.298,77	0,259	17,30
2.207,31	189,21	8,64	1.885,74	45,46	85.719,77	0,085720	17.644,76	16.298,77	0,259	17,30
2.207,26	189,21	8,64	1.885,74	45,46	85.721,65	0,085722	17.646,64	16.296,88	0,259	17,30
2.206,94	189,21	8,64	1.885,74	45,46	85.734,23	0,085734	17.659,22	16.284,31	0,259	17,31
2.206,66	189,21	8,63	1.885,74	45,47	85.744,91	0,085745	17.669,90	16.273,62	0,260	17,32
2.206,71	189,21	8,63	1.885,74	45,47	85.743,03	0,085743	17.668,02	16.275,51	0,260	17,32
2.206,99	189,21	8,64	1.885,74	45,46	85.732,03	0,085732	17.657,02	16.286,51	0,259	17,31

2.207,34	189,21	8,64	1.885,74	45,46	85.718,51	0,085719	17.643,50	16.300,02	0,259	17,29
2.207,46	189,21	8,65	1.885,74	45,45	85.713,80	0,085714	17.638,79	16.304,74	0,259	17,29
2.207,62	189,21	8,65	1.885,74	45,45	85.707,83	0,085708	17.632,81	16.310,71	0,259	17,28
2.207,71	189,21	8,65	1.885,74	45,45	85.704,37	0,085704	17.629,36	16.314,17	0,259	17,28
2.207,69	189,21	8,65	1.885,74	45,45	85.705,00	0,085705	17.629,99	16.313,54	0,259	17,28
2.207,43	189,21	8,65	1.885,74	45,45	85.715,05	0,085715	17.640,04	16.303,48	0,259	17,29
2.206,83	189,21	8,63	1.885,74	45,47	85.738,31	0,085738	17.663,30	16.280,22	0,259	17,31
2.206,10	189,21	8,62	1.885,74	45,48	85.766,60	0,085767	17.691,59	16.251,94	0,260	17,34
2.205,68	189,21	8,61	1.885,74	45,49	85.782,94	0,085783	17.707,93	16.235,59	0,260	17,36
2.205,02	189,21	8,60	1.885,74	45,50	85.808,71	0,085809	17.733,70	16.209,82	0,261	17,38
2.204,21	189,21	8,58	1.885,74	45,52	85.840,14	0,085840	17.765,13	16.178,39	0,261	17,41
2.201,12	189,21	8,52	1.885,74	45,58	85.960,83	0,085961	17.885,82	16.057,70	0,263	17,53
2.197,33	189,21	8,44	1.885,74	45,66	86.109,17	0,086109	18.034,16	15.909,36	0,265	17,68
2.196,64	189,21	8,42	1.885,74	45,68	86.136,20	0,086136	18.061,19	15.882,33	0,265	17,70
2.196,54	189,21	8,42	1.885,74	45,68	86.139,97	0,086140	18.064,96	15.878,56	0,265	17,71
									0,29	19,08

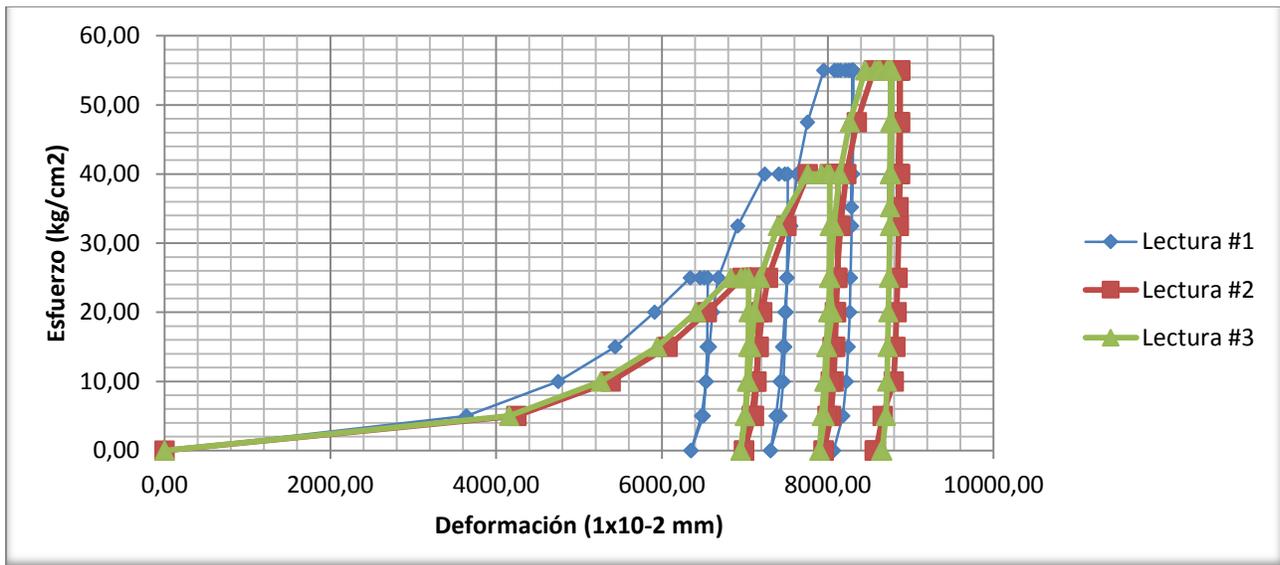


Figura 6. Curva del Esfuerzo respecto a la Deformación obtenida de la toma de datos que se realizó en los tres deformímetros, colocados en diferentes puntos de la tapa cabezal del odómetro #3, para el caso de los materiales del sitio Presa.

CUADRO 30. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES ANTES DE ENSAYAR ODÓMETRO #3 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Malla	Abertura	Peso Retenido (grs)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasando	% Pas. Corr.	% Pas. Corr.	% Ret. Correg.
3"	76,200				100,00		100	0
2"	50,800				79,72		80	20
1 1/2"	38,100				69,47		69	10
1"	25,400				59,65		60	10
3/4"	19,050				54,17		54	5
1/2"	12,700				48,84		49	5
3/8"	9,525				45,80		46	3
4	4,750				37,50		38	8
8	2,360				32,97		33	5
16	1,180				28,66		29	4
30	0,600				22,59		23	6
50	0,300				14,06		14	9
100	0,150				7,08		7	7
200	0,075				4,34		4	3
Charola	0,060				0,00		0	4
		0,00						

CUADRO 31. GRANULOMETRÍA DE LOS MATERIALES DESPUÉS DE ENSAYAR ODÓMETRO #3 PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Malla	Abertura	Peso Retenido (grs)	% Ret.	% Ret. Acum.	% Pasando	% Pas. Corr.	% Pas. Corr.	% Ret. Correg.
3"	76,200	0,00	0,00	0,00	100,00		100	0
2"	50,800	31.650,00	18,02	18,02	81,98		82	18
1 1/2"	38,100	16.435,00	9,36	27,38	72,62		73	9
1"	25,400	15.890,00	9,05	36,43	63,57		64	9
3/4"	19,050	11.740,00	6,68	43,11	56,89		57	7
1/2"	12,700	10.395,00	5,92	49,03	50,97		51	6
3/8"	9,525	6.310,00	3,59	52,62	47,38		47	4
		92.420,00						
4	4,750	220,50	17,84	17,84	82,16	38,93	39	8
8	2,360	132,00	10,68	28,52	71,48	33,87	34	5
16	1,180	117,60	9,51	38,03	61,97	29,36	29	5
30	0,600	169,10	13,68	51,71	48,29	22,88	23	6
50	0,300	173,40	14,03	65,74	34,26	16,23	16	7
100	0,150	183,30	14,83	80,57	19,43	9,21	9	7
200	0,075	101,20	8,19	88,75	11,25	5,33	5	4
Charola	0,060	139,00	11,25	100,00	0,00	0,00	0	5
		1236,10						

Valores del Módulo de Deformabilidad para los Materiales del Sitio Carazo

CUADRO 32. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO OBTENIDOS DE LA EJECUCIÓN DEL ODÓMETRO #1.			
<i>Módulo de Deformabilidad (kg/cm²)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Deformación (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>
1.127,08	5,00	0,24	54,10
1.082,00	10,00	0,50	54,10
1.127,08	15,00	0,72	54,10
1.151,06	20,00	0,94	54,10
1.176,09	25,00	1,15	54,10
1.164,40	32,50	1,51	54,10
1.182,51	40,00	1,83	54,10
1.212,15	47,50	2,12	54,10
1.305,04	55,00	2,28	54,10

CUADRO 33. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO OBTENIDOS DE LA EJECUCIÓN DEL ODÓMETRO #2.			
<i>Módulo de Deformabilidad (kg/cm²)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Deformación (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>
386,43	5,00	0,70	54,10
419,38	10,00	1,29	54,10
469,08	15,00	1,73	54,10
507,98	20,00	2,13	54,10
556,58	25,00	2,43	54,10
561,74	32,50	3,13	54,10
623,63	40,00	3,47	54,10
662,31	47,50	3,88	54,10
753,29	55,00	3,95	54,10

CUADRO 34. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO OBTENIDOS DE LA EJECUCIÓN DEL ODÓMETRO #3.			
<i>Módulo de Deformabilidad (kg/cm²)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Deformación (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>
233,19	5,00	1,16	54,10
260,1	10,00	2,08	54,10
297,25	15,00	2,73	54,10
325,9	20,00	3,32	54,10
364,56	25,00	3,71	54,10
368,61	32,50	4,77	54,10
422,66	40,00	5,12	54,10
455,63	47,50	5,64	54,10
527,57	55,00	5,64	54,10

Valores del Módulo de Deformabilidad para los Materiales del Sitio Presa

CUADRO 35. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA OBTENIDOS DE LA EJECUCIÓN DEL ODÓMETRO #1.			
<i>Módulo de Deformabilidad (kg/cm²)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Deformación (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>
198,90	5,00	1,36	54,10
243,69	10,00	2,22	54,10
295,09	15,00	2,75	54,10
324,92	20,00	3,33	54,10
359,71	25,00	3,76	54,10
409,85	32,50	4,29	54,10
461,41	40,00	4,69	54,10
480,33	47,50	5,35	54,10
538,07	55,00	5,53	54,10

CUADRO 36. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA OBTENIDOS DE LA EJECUCIÓN DEL ODÓMETRO #2.			
<i>Módulo de Deformabilidad (kg/cm²)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Deformación (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>
89,57	5,00	3,02	54,10
132,60	10,00	4,08	54,10
168,01	15,00	4,83	54,10
189,16	20,00	5,72	54,10
222,82	25,00	6,07	54,10
267,62	32,50	6,57	54,10
308,70	40,00	7,01	54,10
335,04	47,50	7,67	54,10
377,60	55,00	7,88	54,10

CUADRO 37. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA OBTENIDOS DE LA EJECUCIÓN DEL ODÓMETRO #3.			
<i>Módulo de Deformabilidad (kg/cm²)</i>	<i>Esfuerzo (kg/cm²)</i>	<i>Deformación (cm)</i>	<i>Altura (cm)</i>
64,23	5,00	4,01	51,51
100,41	10,00	5,13	51,51
132,76	15,00	5,82	51,51
163,78	20,00	6,29	51,51
182,66	25,00	7,05	51,51
230,27	32,50	7,27	51,51
257,55	40,00	8,00	51,51
300,95	47,50	8,13	51,51
340,51	55,00	8,32	51,51

Gravedades Específicas y Absorción

CUADRO 38. VALORES INICIALES PARA OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.		
Peso Muestra Seca (A)	463,50	grs.
Peso Muestra s.s.s (B)	500,00	grs.
Peso Agua Agregada (W) = W1 - W2	293,10	grs.
Volumen del Picnómetro (V)	500,00	ml.
Peso del Picnómetro (Wp)	165,50	grs.
W1 = Wp + 500,0 + Agua	958,60	grs.
W2 = Wp + 500,0	665,50	grs.

CUADRO 39. VALORES INICIALES PARA OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.		
Peso Muestra Seca (A)	470,50	grs.
Peso Muestra s.s.s (B)	500,00	grs.
Peso Agua Agregada (W) W1 - W2	299,40	grs.
Volumen del Picnómetro (V)	500,00	ml.
Peso del Picnómetro (Wp)	165,50	grs.
W1 = Wp + 500,0 + Agua	964,90	grs.
W2 = Wp + 500,0	665,50	grs.

Intemperismo Acelerado

CUADRO 40. GRANULOMETRÍA CORREGIDA PARA LA PRUEBA DE SANIDAD DE FINOS A LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.				
<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Ret.</i>
3/8"	9,525	100		
4	4,750	88,89	11,11	11,11
8	2,360	76,8	23,2	12,09
16	1,180	61,32	38,68	15,48
30	0,600	43,34	56,66	17,98
50	0,300	26,08	73,92	17,26

CUADRO 41. GRANULOMETRÍA CORREGIDA PARA LA PRUEBA DE SANIDAD DE GRUESOS A LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pasando Corr.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Ret.</i>
1 1/2"	38,10	80,78	100	0	0
1"	25,40	73,89	91,91	8,09	8,09
3/4"	19,05	67,89	84,07	15,93	7,84
1/2"	12,70	63,11	77,24	22,76	6,83
3/8"	9,53	60,78	71,81	28,19	5,44
N°4	4,75	54,03	69,15	30,85	2,65

CUADRO 42. VALORES OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE SANIDAD PARA FINOS CORRESPONDIENTES A LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Pasando</i>	<i>Retenido</i>	<i>Graduación</i>	<i>Peso Inicial (grs)</i>	<i>Peso Final (grs)</i>	<i>% Pérdida</i>	<i>% Pérdida Corregido</i>
N° 50						
N°30	N° 50	17,26	100,00	84,60	15,40%	2,66%
N°16	N°30	17,98	100,00	80,70	19,30%	3,47%
N°8	N°16	15,48	100,00	78,90	21,10%	3,27%
N°4	N°8	12,09	100,00	81,80	18,20%	2,20%
3/8"	N°4	11,11	100,00	87,30	12,70%	1,41%
Totales			500,00	413,30	86,70%	13,01%

CUADRO 43. VALORES OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE SANIDAD PARA GRUESOS CORRESPONDIENTES A LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Pasando</i>	<i>Retenido</i>	<i>Graduación</i>	<i>Peso Inicial (grs)</i>	<i>Peso Final (grs)</i>	<i>% Pérdida</i>	<i>% Pérdida Corregido</i>
1 1/2"	3/4"	15,93	1.500,00	1.323,00	11,80%	1,88%
3/4"	3/8"	12,27	1.000,00	942,00	5,80%	0,71%
3/8"	N°4	2,65	300,00	255,20	14,93%	0,40%
Totales			2.800,00	2.520,20	32,53%	2,99%

CUADRO 44. GRANULOMETRÍA CORREGIDA PARA LA PRUEBA DE SANIDAD DE FINOS A LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Ret.</i>
3/8"	9,525	100,00		
4	4,750	37,50	62,50	62,50
8	2,360	32,97	67,03	4,53
16	1,180	28,66	71,34	4,31
30	0,600	22,59	77,41	6,07
50	0,300	14,06	85,94	8,53

CUADRO 45. GRANULOMETRÍA CORREGIDA PARA LA PRUEBA DE SANIDAD DE GRUESOS A LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

<i>Malla</i>	<i>Abertura</i>	<i>% Pasando</i>	<i>% Pasando Corr.</i>	<i>% Ret. Acum.</i>	<i>% Ret.</i>
1 1/2"	38,10	69,47	100,00	0,00	69,47
1"	25,40	59,65	79,04	20,96	59,65
3/4"	19,05	54,17	67,87	32,13	54,17
1/2"	12,70	48,84	61,64	38,36	48,84
3/8"	9,53	45,80	55,57	44,43	45,80
Nº4	4,75	22,37	52,11	47,89	22,37

CUADRO 46. VALORES OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE SANIDAD PARA FINOS CORRESPONDIENTES A LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

<i>Pasando</i>	<i>Retenido</i>	<i>Graduación</i>	<i>Peso Inicial (grs)</i>	<i>Peso Final (grs)</i>	<i>% Pérdida</i>	<i>% Pérdida Corregido</i>
Nº 50						
Nº30	Nº 50	17,26	100,00	86,90	13,10%	1,12%
Nº16	Nº30	17,98	100,00	84,80	15,20%	0,92%
Nº8	Nº16	15,48	100,00	83,00	17,00%	0,73%
Nº4	Nº8	12,09	100,00	85,30	14,70%	0,67%
3/8"	Nº4	11,11	100,00	92,80	7,20%	4,50%
Totales			500,00	432,80	67,20%	7,94%

Ruptura de Granos

CUADRO 47. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE RUPTURA DE GRANOS EN ESTADO SECO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

<i>Muestra</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Carga (kg)</i>	<i># Contactos Superior</i>	<i># Contactos Inferior</i>	<i># Contactos Total</i>	<i>Carga de Ruptura (kg)</i>
1	2"	4.750,00	3	8	11	431,82
2	2"	4.000,00	3	7	10	400,00
3	2"	4.000,00	3	8	11	363,64
4	2"	6.500,00	3	11	14	464,29
5	2"	1.500,00	4	9	13	115,38
6	2"	3.375,00	3	9	12	281,25
1	1 1/2"	4.375,00	3	9	12	364,58
2	1 1/2"	4.625,00	5	5	10	462,50
3	1 1/2"	1.500,00	3	6	9	166,67
4	1 1/2"	6.000,00	3	6	9	666,67
5	1 1/2"	3.500,00	5	10	15	233,33
6	1 1/2"	2.125,00	3	3	6	354,17
7	1 1/2"	5.875,00	4	3	7	839,29
8	1 1/2"	5.000,00	4	8	12	416,67

9	1 1/2"	1.375,00	3	8	11	125,00
10	1 1/2"	5.000,00	7	12	19	263,16
1	1"	4.750,00	4	6	10	475,00
2	1"	1.875,00	3	5	8	234,38
3	1"	2.375,00	2	7	9	263,89
4	1"	2.375,00	3	10	13	182,69
5	1"	2.875,00	3	5	8	359,38
6	1"	1.375,00	3	6	9	152,78
7	1"	2.500,00	4	6	10	250,00
8	1"	2.250,00	4	5	9	250,00
9	1"	2.125,00	2	5	7	303,57
10	1"	3.000,00	3	9	12	250,00

CUADRO 48. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE RUPTURA DE GRANOS EN ESTADO SATURADO SUPERFICIE SECA PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Muestra	Tamaño	Carga (kg)	# Contactos Superior	# Contactos Inferior	# Contactos Total	Carga de Ruptura (kg)
1	2"	13.500,00	3	7	10	1.350,00
2	2"	7.375,00	6	5	11	670,45
3	2"	1.375,00	4	5	9	152,78
4	2"	6.375,00	3	8	11	579,55
5	2"	3.375,00	8	9	17	198,53
6	2"	875	3	3	6	145,83
1	1 1/2"	2.250,00	4	6	10	225,00
2	1 1/2"	625	3	6	9	69,44
3	1 1/2"	6.375,00	3	3	6	1.062,50
4	1 1/2"	2.875,00	3	3	6	479,17
5	1 1/2"	4.875,00	3	3	6	812,50
6	1 1/2"	4.125,00	3	3	6	687,50
7	1 1/2"	6.500,00	4	4	8	812,50
8	1 1/2"	3.375,00	3	3	6	562,50
9	1 1/2"	1.000,00	3	4	7	142,86
10	1 1/2"	2.625,00	4	4	8	328,13
1	1"	1.500,00	3	3	6	250,00
2	1"	1.875,00	3	5	8	234,38
3	1"	1.875,00	4	10	14	133,93
4	1"	875	3	3	6	145,83
5	1"	500	3	3	6	83,33
6	1"	125	3	3	6	20,83
7	1"	1.250,00	4	7	11	113,64

8	1"	2.250,00	5	5	10	225,00
9	1"	875	3	7	10	87,50
10	1"	500	3	6	9	55,56

CUADRO 49. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE RUPTURA DE GRANOS EN ESTADO SECO PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Muestra	Tamaño	Carga (kg)	# Contactos Superior	# Contactos Inferior	# Contactos Total	Carga de Ruptura (kg)
1	2"	5.500,00	4	4	8	687,50
2	2"	7.250,00	3	3	6	1.208,33
3	2"	5.375,00	3	4	7	767,86
4	2"	5.250,00	4	4	8	656,25
5	2"	7.500,00	4	5	9	833,33
6	2"	9.500,00	3	7	10	950,00
7	2"	7.500,00	4	4	8	937,50
8	2"	17.125,00	9	8	17	1.007,35
9	2"	7.375,00	6	4	10	737,50
10	2"	11.000,00	6	3	9	1.222,22
1	1 1/2"	6.375,00	3	4	7	910,71
2	1 1/2"	4.375,00	4	4	8	546,88
3	1 1/2"	4.000,00	3	3	6	666,67
4	1 1/2"	5.375,00	3	5	8	671,88
5	1 1/2"	9.875,00	3	6	9	1.097,22
6	1 1/2"	2.875,00	3	3	6	479,17
7	1 1/2"	3.375,00	3	3	6	562,50
8	1 1/2"	3.000,00	3	3	6	500,00
9	1 1/2"	7.875,00	3	5	8	984,38
10	1 1/2"	1.500,00	5	5	10	150,00
1	1"	1.750,00	3	3	6	291,67
2	1"	875,00	3	3	6	145,83
3	1"	2.750,00	4	3	7	392,86
4	1"	9.000,00	3	6	9	1.000,00
5	1"	2.875,00	3	3	6	479,17
6	1"	1.375,00	3	4	7	196,43
7	1"	2.750,00	3	5	8	343,75
8	1"	1.375,00	3	3	6	229,17
9	1"	1.500,00	3	3	6	250,00
10	1"	2.750,00	3	4	7	392,86

CUADRO 50. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ENSAYO DE RUPTURA DE GRANOS EN ESTADO SATURADO SUPERFICIE SECA PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Muestra	Tamaño	Carga (kg)	# Contactos Superior	# Contactos Inferior	# Contactos Total	Carga de Ruptura (kg)
1	2"	7.000,00	3	6	9	777,78
2	2"	3.625,00	3	3	6	604,17
3	2"	4.250,00	3	3	6	708,33
4	2"	7.375,00	3	6	9	819,44
5	2"	3.500,00	2	5	7	500,00
6	2"	3.750,00	3	3	6	625,00
7	2"	5.500,00	3	4	7	785,71
8	2"	5.000,00	3	3	6	833,33
9	2"	5.500,00	3	5	8	687,50
10	2"	6.875,00	5	5	10	687,50
1	1 1/2"	5.000,00	5	4	9	555,56
2	1 1/2"	1.000,00	2	2	4	250,00
3	1 1/2"	3.750,00	3	5	8	468,75
4	1 1/2"	3.500,00	3	6	9	388,89
5	1 1/2"	750,00	3	4	7	107,14
6	1 1/2"	1.750,00	3	3	6	291,67
7	1 1/2"	3.875,00	2	4	6	645,83
8	1 1/2"	4.000,00	4	3	7	571,43
9	1 1/2"	3.000,00	3	5	8	375,00
10	1 1/2"	6.375,00	3	6	9	708,33
1	1"	1.250,00	2	3	5	250,00
2	1"	1.500,00	3	4	7	214,29
3	1"	2.625,00	3	5	8	328,13
4	1"	2.250,00	3	3	6	375,00
5	1"	3.500,00	3	3	6	583,33
6	1"	2.750,00	3	5	8	343,75
7	1"	500,00	4	4	8	62,50
8	1"	5.000,00	3	7	10	500,00
9	1"	1.625,00	3	4	7	232,14
10	1"	3.500,00	3	3	6	583,33

CUADRO 51. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LOS MATERIALES DEL SITIO CARAZO.

Tamaño	N° Muestra	Forma Ruptura	B (cm)	D (cm)	W ₁ (cm)	W ₂ (cm)	Área (cm ²)	De (cm)	De ² (cm ²)	Carga P (kg)	Factor Corrección (F)	Factor Calibración (k)	Is (50)	Resistencia Compresión (Q _u) (kg/cm ²)
2"	1	Triangular	6,7	3,5	0	0	11,73	3,86	14,9	105,46	0,89	13,916	87,54	1.969,61
2"	2	Elipse	8,2	5,1	0	0	32,85	6,47	41,8	312,87	1,12	13,916	116,89	2.629,98
2"	3	Rectangular	8,2	4,6	0	0	37,72	6,93	48	256,62	1,16	13,916	86,12	1.937,77
2"	4	Elipse	6,3	4,6	0	0	22,76	5,38	29	98,43	1,03	13,916	48,86	1.099,42
2"	5	Elipse	6,2	4,7	0	0	22,89	5,4	29,1	59,76	1,04	13,916	29,54	664,65
2"	6	Trapezoidal	5,1	5,8	4	6,2	29,58	6,14	37,7	49,21	1,1	13,916	19,94	448,63
2"	7	Triangular	8,6	3,4	0	0	14,62	4,31	18,6	133,58	0,94	13,916	93,45	2.102,63
2"	8	Rectangular	6,1	5,2	0	0	31,72	6,36	40,4	221,47	1,11	13,916	85,01	1.912,66
2"	9	Rectangular	5,7	2,8	0	0	15,96	4,51	20,3	389,69	0,95	13,916	254,71	5.730,91
2"	10	Triangular	6,2	3,4	0	0	10,54	3,66	13,4	49,21	0,87	13,916	44,36	998,18
1 1/2"	1	Rectangular	5,5	4,3	0	0	23,65	5,49	30,1	140,61	1,04	13,916	67,76	1.524,59
1 1/2"	2	Trapezoidal	3,3	3,6	3	5,2	11,88	3,89	15,1	161,71	0,89	13,916	132,87	2.989,57
1 1/2"	3	Trapezoidal	4,15	4,1	4,2	6,7	17,02	4,65	21,7	179,28	0,97	13,916	111,51	2.508,95
1 1/2"	4	Triangular	6,2	5	0	0	15,5	4,44	19,7	94,91	0,95	13,916	63,46	1.427,78
1 1/2"	5	Elipse	6,7	3,9	0	0	20,52	5,11	26,1	77,34	1,01	13,916	41,6	936,01
1 1/2"	6	Triangular	5,6	4,3	0	0	12,04	3,92	15,3	137,1	0,9	13,916	111,49	2.508,46
1 1/2"	7	Elipse	6	3,8	0	0	17,91	4,77	22,8	73,82	0,98	13,916	44,13	992,97
1 1/2"	8	Elipse	5,6	3,3	0	0	14,51	4,3	18,5	140,61	0,93	13,916	98,92	2.225,78
1 1/2"	9	Elipse	5,9	3,8	0	0	17,61	4,73	22,4	126,55	0,98	13,916	76,65	1.724,57
1 1/2"	10	Elipse	4,8	5,1	0	0	19,23	4,95	24,5	80,85	1	13,916	45,74	1.029,23
1"	1	Elipse	4,7	3,5	0	0	12,92	4,06	16,5	56,25	0,91	13,916	43,31	974,44
1"	2	Desierta	0	0	0	0	0	0	-	-	-	13,916	-	-
1"	3	Rectangular	2,8	3,4	0	0	9,52	3,48	12,1	87,88	0,85	13,916	85,73	1.928,86
1"	4	Elipse	5,2	3,6	0	0	14,7	4,33	18,7	7,03	0,94	13,916	4,9	110,17
1"	5	Romboide	4,4	3,1	0	0	13,64	4,17	17,4	66,79	0,92	13,916	49,31	1.109,39
1"	6	Trapezoidal	2,6	2,7	1,3	3,9	7,02	2,99	8,94	38,67	0,79	13,916	47,77	1.074,78
1"	7	Elipse	5,8	3,3	0	0	28,24	6	36	31,64	1,09	13,916	13,29	298,98

1"	8	Elipse	3,7	6,2	0	0	14,24	4,26	18,1	168,74	0,93	13,916	120,49	2.710,94
1"	9	Rectangular	3,8	4,9	0	0	18,62	4,87	23,7	73,82	0,99	13,916	42,82	963,37
1"	10	Desierta	0	0	0	0	0	0	-	-	-	13,916	-	-
1"	11	Triangular	3	4,5	0	0	6,75	2,93	8,59	108,98	0,79	13,916	138,77	3.122,42
1"	12	Rectangular	3,5	3,6	0	0	12,6	4,01	16	73,82	0,91	13,916	57,95	1.303,89
1"	13	Elipse	2,9	5,1	0	0	11,62	3,85	14,8	87,88	0,89	13,916	73,48	1.653,20
1"	14	Trapezoidal	2,85	3,5	2,2	3,5	9,98	3,56	12,7	66,79	0,86	13,916	62,84	1.413,87

CUADRO 52. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL PARA LOS MATERIALES DEL SITIO PRESA.

Tamaño	N° Muestra	Forma Ruptura	B (cm)	D (cm)	W ₁ (cm)	W ₂ (cm)	Area (cm ²)	De (cm)	De ² (cm ²)	Carga P (kg)	Factor Corrección (F)	Factor Calibración (k)	Is (50)	Resistencia Compresión (qu)
2"	1	Rectangular	8,40	4,00	0,00	0,00	33,60	6,54	42,78	291,77	1,13	13,916	107,10	2.409,81
2"	2	Elipse	8,40	4,20	0,00	0,00	27,71	5,94	35,28	196,86	1,08	13,916	83,91	1.887,92
2"	3	Trapezoidal	0,00	6,70	4,90	8,50	44,89	7,56	57,16	274,20	1,20	13,916	80,41	1.809,28
2"	4	Circular	0,00	6,00	0,00	0,00	28,27	6,00	36,00	70,31	1,09	13,916	29,50	663,81
2"	5	Elipse	9,30	4,50	0,00	0,00	32,87	6,47	41,85	253,11	1,12	13,916	94,51	2.126,45
2"	6	Elipse	9,50	5,10	0,00	0,00	38,05	6,96	48,45	151,16	1,16	13,916	50,39	1.133,69
2"	7	Elipse	7,40	5,90	0,00	0,00	34,29	6,61	43,66	316,38	1,13	13,916	114,32	2.572,20
2"	8	Triangular	8,40	5,50	0,00	0,00	23,10	5,42	29,41	94,91	1,04	13,916	46,58	1.048,02
2"	9	Trapezoidal	0,00	3,60	5,80	4,50	18,54	4,86	23,61	84,37	0,99	13,916	49,10	1.104,73
2"	10	Desierta	0,00	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	13,916	-	-
1 1/2"	1	Elipse	6,00	3,20	0,00	0,00	15,08	4,38	19,20	165,22	0,94	13,916	112,84	2.539,01
1 1/2"	2	Elipse	6,40	4,00	3,00	5,20	20,11	5,06	25,60	101,95	1,01	13,916	55,72	1.253,61
1 1/2"	3	Elipse	5,90	3,70	0,00	0,00	17,15	4,67	21,83	91,40	0,97	13,916	56,51	1.271,57
1 1/2"	4	Rectangular	4,40	4,30	0,00	0,00	18,92	4,91	24,09	323,41	0,99	13,916	185,27	4.168,64
1 1/2"	5	Elipse	5,30	3,10	0,00	0,00	12,90	4,05	16,43	101,95	0,91	13,916	78,57	1.767,78
1 1/2"	6	Elipse	6,50	3,60	0,00	0,00	18,38	4,84	23,40	94,91	0,99	13,916	55,61	1.251,21
1 1/2"	7	Triangular	5,30	3,90	0,00	0,00	10,34	3,63	13,16	91,40	0,87	13,916	83,66	1.882,39
1 1/2"	8	Elipse	6,40	3,70	0,00	0,00	18,60	4,87	23,68	108,98	0,99	13,916	63,27	1.423,51
1 1/2"	9	Trapezoidal	0,00	2,90	3,00	4,50	10,88	3,72	13,85	291,77	0,88	13,916	256,73	5.776,48

1 1/2"	10	Circular	0,00	4,40	0,00	0,00	15,21	4,40	19,36	158,19	0,94	13,916	107,35	2.415,39
1"	1	Trapezoidal	0,00	3,40	2,30	3,50	9,86	3,54	12,55	63,28	0,86	13,916	60,07	1.351,66
1"	2	Rectangular	1,70	3,40	0,00	0,00	5,78	2,71	7,36	108,98	0,76	13,916	156,50	3.521,34
1"	3	Elipse	3,50	2,90	0,00	0,00	7,97	3,19	10,15	77,34	0,82	13,916	86,57	1.947,84
1"	4	Trapezoidal	0,00	3,80	2,50	3,80	11,97	3,90	15,24	49,21	0,89	13,916	40,20	904,45
1"	5	Elipse	4,10	3,30	0,00	0,00	10,63	3,68	13,53	59,76	0,87	13,916	53,53	1.204,52
1"	6	Trapezoidal	0,00	4,10	3,10	3,70	13,94	4,21	17,75	45,70	0,93	13,916	33,17	746,39
1"	7	Elipse	4,10	3,50	0,00	0,00	11,27	3,79	14,35	56,25	0,88	13,916	48,14	1.083,24
1"	8	Rectangular	3,60	2,50	0,00	0,00	11,88	3,89	15,13	35,15	0,89	13,916	28,88	649,83
1"	9	Triangular	3,10	3,30	0,00	0,00	5,12	2,55	6,51	52,73	0,74	13,916	83,25	1.873,09
1"	10	Elipse	4,60	3,20	0,00	0,00	11,56	3,84	14,72	31,64	0,89	13,916	26,55	597,40

Anexos

Ilustraciones de los Ensayos

A continuación se muestran un conjunto de fotografías que detallan el conjunto de pruebas que se efectuaron para alcanzar los resultados de este proyecto.

Granulometrías



Figura 1. Cuarteo del material proveniente de las distintas trincheras analizadas de los sitios en estudio.



Figura 2. Proceso para la realización del cuarteo de los materiales, para la determinación de las curvas granulométricas.



Figura 3. Separación de los materiales en cuartos, para de determinación de las curvas granulométricas.



Figura 4. Reducción de la muestra para la determinación de la granulometría de los materiales de las distintas trincheras.

Densidad Máxima de Laboratorio



Figura 5. Saturamiento de los materiales para determinar la densidad máxima en laboratorio.



Figura 6. Colocación de los materiales, dentro del cilindro de ejecución, para determinar la densidad máxima de los materiales.



Figura 7. Enrasado de los materiales dentro del cilindro para obtener la densidad del material.



Figura 8. Colocación del mazo dentro de la camisa del cilindro, para determinar el asentamiento del material.



Figura 9. Determinación de las lecturas del asentamiento de los materiales posterior al tiempo de vibrado y compactación del material.



Figura 10. Finalización de la prueba de densidad relativa con la extracción del material dentro del cilindro.

Pesos Volumétricos



Figura 11. Llenado del cilindro para la determinación del peso volumétrico para el enrocado.



Figura 12. Enrasado del material para posteriormente realizar el pesado del mismo.



Figura 13. Determinación del peso del material, para determinar el peso volumétrico.

Preparación del Odómetro



Figura 14. Preparación de los materiales a colocar en el odómetro, distribuidos en tres bandejas con la misma cantidad de material.



Figura 15. Colocación del material dentro del odómetro en tres capas iguales de material.



Figura 16. Llenado del Odómetro y su respectivo enrasado, con los materiales en estudio.



Figura 17. Colocación de la Placa Cabezal.



Figura 20. Detalle de la Placa Superior y del Anillo de Rigidez colocados.



Figura 18. Colocación de la Gata Hidráulica y de los pernos de soporte de la Placa Superior.



Figura 21. Detalle de los deformímetros colocados en la Placa Cabezal para determinar la deformación de los materiales.



Figura 19. Armado del equipo bajo el cual se ejecuta la prueba de odómetro.



Figura 22. Asentamiento registrado de los materiales dentro del odómetro.



Figura 23. Asentamiento registrado de los materiales dentro del odómetro, una vez terminada la prueba.



Figura 24. Extracción de los materiales del odómetro para su posterior secado al horno y determinación de su granulometría final.



Figura 25. Determinación de la granulometría final de los materiales ensayados.

Rotura de Granos



Figura 26. Ejemplo de la rotura de los granos posterior a la ejecución del ensayo de odómetro.



Figura 27. Ejemplo de la rotura de los granos posterior a la ejecución del ensayo de odómetro.



Figura 28. Ejemplos de la rotura de los granos posterior a la ejecución del ensayo de odómetro.

Abrasión



Figura 29. Máquina de Los Ángeles donde se realizó la abrasión de los materiales.



Figura 30. Colocación del material dentro de la máquina con los 12 balines de acero.



Figura 31. Sellado de la máquina para la ejecución de la prueba.

Gravedad Específica y Absorción



Figura 32. Saturación previo de los materiales gruesos y finos para la realización del ensayo.



Figura 33. Colocación de los materiales dentro de la canasta para la determinación del peso sumergido de los materiales gruesos.



Figura 34. Determinación del peso sumergido de los materiales gruesos.



Figura 35. Determinación del punto saturado superficie seca de los materiales finos para la obtención de la gravedad específica y absorción.



Figura 36. Determinación del punto saturado superficie seca de los materiales.



Figura 37. Obtención del cono truncado con los materiales para determinar el punto saturado superficie seca de los materiales.



Figura 38. Introducción de los materiales finos dentro del picnómetro, para determinar la gravedad específica y absorción de los materiales.



Figura 39. Llenado del picnómetro hasta la marca establecida, para su posterior pesado.

Sanidad de los Materiales



Figura 40. Colocación de los materiales gruesos en las respectivas mallas para iniciar la prueba.

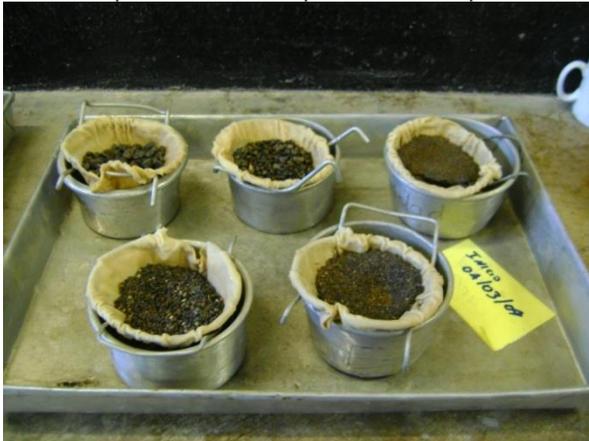


Figura 41. Colocación de los materiales finos en las respectivas mallas para iniciar la prueba.



Figura 42. Colocación de los materiales en el horno para su ciclo de secado.

Ruptura de Granos



Figura 43. Muestras de 2 pulgadas para ensayar en la máquina universal, estado seco.



Figura 44. Muestras de 1 ½ pulgadas para ensayar en la máquina universal, estado seco.



Figura 45. Muestras de 1 pulgada para ensayar en la máquina universal, estado seco.



Figura 46. Muestras de 2 pulgadas para ensayar en la máquina universal, estado saturado superficie seca.



Figura 47. Muestras de 1 ½ pulgadas para ensayar en la máquina universal, estado saturado superficie seca.



Figura 48. Muestras de 1 pulgada para ensayar en la máquina universal, estado saturado superficie seca.



Figura 49. Colocación de la hoja inferior y las tres rocas de igual tamaño antes de ensayar.



Figura 50. Colocación de la hoja superior sobre las tres rocas de igual tamaño antes de ensayar.



Figura 51. Colocación de la placa superior distribuidora de los esfuerzos transmitidos sobre las tres rocas a ensayar.

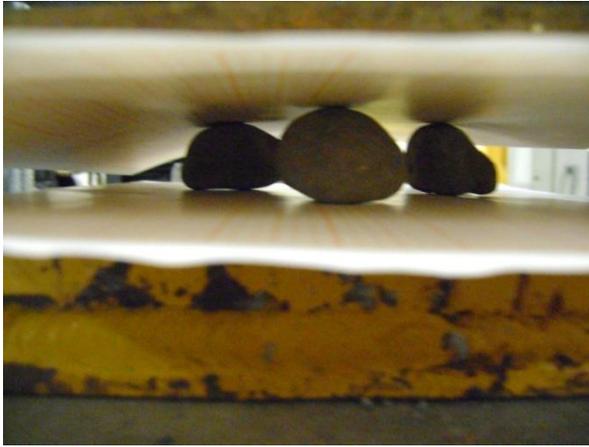


Figura 52. Sometimiento de los esfuerzos sobre los materiales rocosos de igual tamaño nominal.



Figura 53. Muestras posteriores a la ejecución del ensayo.



Figura 54. Ejemplo de muestras de 2 pulgadas después de alcanzar la falla de una de las rocas.



Figura 55. Ejemplo de muestras de 1 ½ pulgadas después de alcanzar la falla de una de las rocas.



Figura 56. Ejemplo de muestras de 1 pulgada después de alcanzar la falla de una de las rocas.

Secciones Delgadas



Figura 57. Ejemplo de muestra a ensayar para obtener la clasificación mineralógica de la roca.



Figura 58. Ejemplo de muestra a ensayar para obtener la clasificación mineralógica de la roca.



Figura 59. Ejemplo de muestra a ensayar para obtener la clasificación mineralógica de la roca.



Figura 60. Ejemplo de muestra después de ensayar y obtener la clasificación mineralógica.



Figura 61. Ejemplo de muestra después de ensayar y obtener la clasificación mineralógica.

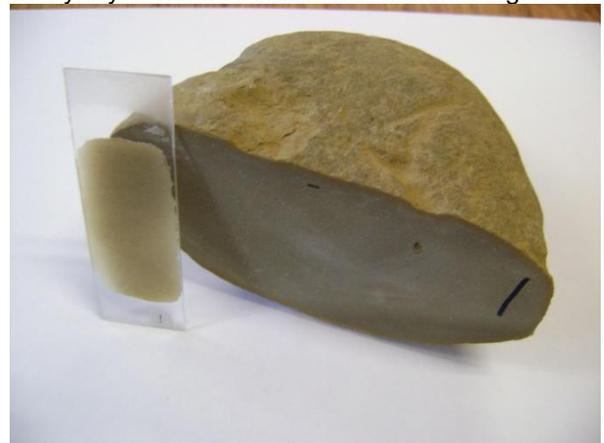


Figura 62. Ejemplo de muestra después de ensayar y obtener la clasificación mineralógica.

Carga Puntual



Figura 63. Muestra de roca de 2 pulgadas antes de realizar el ensayo de Carga Puntual.



Figura 64. Muestra de roca de 2 pulgadas después de realizar el ensayo de Carga Puntual.



Figura 65. Muestra de roca de 1 ½ pulgadas antes de realizar el ensayo de Carga Puntual.



Figura 66. Muestra de roca de 1 ½ pulgadas después de realizar el ensayo de Carga Puntual.



Figura 67. Muestra de roca de 1 pulgada antes de realizar el ensayo de Carga Puntual.



Figura 68. Muestra de roca de 1 pulgada después de realizar el ensayo de Carga Puntual.

Referencias

- Avilés, E. 2009. **APLICACIÓN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS O TEORÍAS A LOS ENSAYOS REALIZADOS Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS**. San José. Comunicación personal.
- Barton, N y Kjaernsli, B. 1981. *Shear strength of Rockfill*. **JOURNAL OF THE GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION**. A.S.C.E. Volumen 107. 873-891.
- Braja, D. 2006. **PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES**. México; Editorial THOMSON 5:9; 45:47 p.
- Bermúdez, L. 2009. **APLICACIÓN DE DIFERENTES PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN A LOS MATERIALES DE LOS SITIOS DE PRÉSTAMO**. San José. Comunicación personal.
- Bermúdez, L. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A RESULTADOS OBTENIDOS**. San José. Comunicación personal.
- Bravo, J. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A LAS DIFERENTES PRUEBAS DE LABORATORIO PRACTICADAS A LOS MATERIALES**. San José. Comunicación Personal.
- Delgado, J. 1983. **RESISTENCIA Y COMPRESIBILIDAD DE ENROCAMIENTOS APLICACIÓN A LA REPRESA SAN MIGUEL**. Informe proyecto final de graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 17:34 p.
- Douglas. 2003. *The Shear Strength of Rockfill*. **GEOTECHNIQUE**. 1-64.
- Delgado, J. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A RESULTADOS OBTENIDOS**. San José. Comunicación personal.
- Fannin, R; Eliadorani, A y Wilkinson, J. 2005. *Shear Strength of Cohesionless Soils at Low Stress*. **GEOTECHNIQUE**. Vol 55. 467-478.
- Fell, R; MacGregor, P; Stapledon, D y Bell, G. 2005. **GEOTECHNICAL ENGINEERING OF DAMS**. Gran Bretaña; Editorial Balkema Publishers Leiden. 590-662 p.
- Fitzpatrick, M; Cole, B; Kinstler, F; y Knoop, B. 1985. *Design of concrete faced Rockfill dams, in Concrete Face Rockfill Dams, Design, Construction and Performance*. **GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION**. ASCE, 410-434 p.
- Fumagalli, E. 1969. *Test on Cohesionless Material for Rockfill Dam*. **JOURNAL SOIL MECHANICS AND FOUNDATION DIVISION**. ASCE. Vol 95. N° SM1. 313-330 p.
- Leps, T. 1970. *Review of Shearing Strength of Rockfill*. **JOURNAL OF THE SOIL MECHANICS ON FOUNDATIONS DIVISION**. SM-4. 1159-1170 p.
- Marsal, R y Resendiz, D. 1975. **PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO**. México; Editorial LIMUSA 221:267 p.
- Materon, B. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DE LOS**

MATERIALES. San José. Comunicación personal.

Monge, R. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A LA EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS DE SECCIÓN DELGADAS PRACTICADOS A DIFERENTES MUESTRAS DE LOS DIFERENTES SITIOS DE PRÉSTAMO.** San José. Comunicación personal.

Sherard, J y Cooke, J.1987. *Concrete Face of Dams: 1.Assessment.* **GEOTECHNIQUE** ASCE. Vol. 113 No. 10, 1096-1112.

Tapia, M. 2009. **CONSULTAS VARIAS RESPECTO A LOS DIFERENTES RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO.** San José. Comunicación personal.

Torres, A. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A LAS DIFERENTES PRUEBAS DE LABORATORIO PRACTICADAS A LOS MATERIALES.** San José. Comunicación Personal.

Valverde, M. 1988. *Resistencia al corte del material limpio de la presa San Miguel.* **IV SEMINARIO NACIONAL DE GEOTECNIA.** San José, Costa Rica. 1-7.

Venegas, F. 2009. **CONSULTAS TÉCNICAS REFERENTES A LAS DIFERENTES PRUEBAS DE LABORATORIO PRACTICADAS A LOS MATERIALES.** San José. Comunicación Personal.