



ISSN 0188-7297



EFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO BAJO CARGA REPETIDA

Paul Garnica Anguas
José Antonio Gómez López
Luis Enrique Suárez y Araujo

**Publicación Técnica No. 91
Sanfandila, Qro, 1997**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Efecto de rotura de granos
en material de balasto
bajo carga repetida**

**Publicación Técnica No. 91
Sanfandila, Qro, 1997**

Este trabajo ha sido realizado en el Instituto Mexicano del Transporte por Paul Garnica Anguas, Jefe de la División de Laboratorios de Infraestructura y por los investigadores José Antonio Gómez López y Luis Enrique Suárez y Araujo. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias de Alfonso Rico Rodríguez, Coordinador Operativo y Alberto Mendoza Díaz, Coordinador de Infraestructura, así como la asesoría del Ing. Jesús Alberro, investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Indice

Resumen	III
Introducción	1
1.- Estado del arte	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 La rotura de granos en problemas de ingeniería	6
1.3 Factores que controlan la rotura de granos	7
1.4 Capacidad de retención y drenaje de los filtros	14
1.5 Normas actuales para balasto	16
1.6 Comportamiento del material para balastado en vías férreas	18
2.- Descripción del material utilizado para balastado.	34
2.1 Localización y muestreo	34
2.2 Tipos de material para balasto	35
2.2.1 Balasto	35
2.2.1.1 Piedra triturada	36
2.2.1.2 Grava	36
2.2.1.3 Grasa de fundición	36
2.2.1.4 Misceláneo	37
2.2.1.5 Limpieza del balasto	37
2.2.1.6 Fuentes de aprovisionamiento	37
2.3 Calidad del material según normas de SCT	37
2.4 Ensaye de carga puntual	39
3.- Método de prueba	41
3.1 Descripción de la prueba	41
3.2 Marco de carga	42

3.3	Montaje de la muestra	43
3.4	Programa de ensayos	45
3.5	Definición del coeficiente de rotura de granos	48
4.- Resultados de laboratorio		50
4.1	Fenómeno de arqueo	50
4.1.1	Descripción del fenómeno	51
4.1.2	Uso de un recubrimiento de teflón	56
4.1.3	Medición de la fricción entre el molde y la probeta	56
4.2	Efecto de la duración de la prueba en la rotura de granos	58
4.3	Efecto del peso volumétrico inicial	58
4.4	Efecto de la granulometría en la rotura de granos	59
4.5	Efecto de la forma de la partícula	59
5.- Discusión de los resultados de laboratorio		60
Conclusión		74
Referencias		75
Anexo 1		79
Anexo 2		82

RESUMEN: Se presenta una serie de ensayos de compresión confinada y bajo carga repetida, en material basáltico triturado utilizado para construir las capas de subbalasto y balasto de una vía férrea. Se pone en evidencia la rotura de granos por medio de una comparación de las curvas granulométricas antes y después del ensaye, y se cuantifica dicha rotura por medio del coeficiente de rotura de granos definido por Marsal, 1965. Se muestra que un material con una granulometría uniforme sufre una rotura de granos mucho mayor que un material bien graduado, lo que permite sugerir el uso de granulometrías bien graduadas en las especificaciones para balasto, contrariamente al material sumamente uniforme recomendado actualmente a nivel mundial.

ABSTRACT: This work presents the results of confined compression tests on large samples of coarse aggregates used for the construction of ballast layers in railways. The tests were performed under repeated loading and crushing of particles was estimated using the concepts defined by Marsal, 1965. The results show that the granulometrical distribution, have a fundamental influence on crushing of ballast materials. The behavior of well graded materials seems to be more appropriated for their use as ballast in railroads.

Introducción.

La gran mayoría de la red ferroviaria del país fue construida desde principios de siglo. Los volúmenes de tránsito y la magnitud de las cargas que se transmitían en ese entonces a las estructuras de las vías férreas, han sido superadas con mucho en la actualidad.

La creciente demanda de servicios de transporte de carga ha obligado a que el ferrocarril transporte grandes volúmenes de carga, ocasionando con esto concentraciones elevadas de esfuerzos en las capas superiores de la estructura ferroviaria, principalmente en la capa de balasto, produciéndose así el rompimiento de partículas. La capa de balasto juega el papel más importante de entre todas las capas que constituyen a la estructura. Con el rompimiento de partículas las características y propiedades del balasto van cambiando con el tiempo, perdiendo gradualmente la función para la cual fueron diseñadas. Primeramente, comienza a perder capacidad de soporte además de sufrir deformaciones permanentes debido al reacomodo que sufren las partículas. Dichas deformaciones, además, originan la pérdida del nivel de rasante elevando el riesgo de accidentes e incrementando los gastos de mantenimiento y conservación de las vías. Por lo anterior, es necesario llevar a cabo investigaciones en la infraestructura del transporte ferroviario con el fin de desarrollar nuevas tecnologías para garantizar la seguridad de las personas y de los productos que se transportan por ferrocarril.

Por otro lado, las Normas de Calidad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, las cuales fueron hechas desde hace aproximadamente 40 años, rigen actualmente para el diseño y construcción de estas obras. Si bien es cierto que dichas normas siguen siendo una herramienta útil para el diseño y construcción de tales obras de infraestructura, se debe reconocer que en algunos aspectos han de considerarse obsoletas y discordantes con los requerimientos actuales.

Particular atención se ha dado al problema del balasto, considerando que hasta la fecha no se han hecho modificaciones a las especificaciones de este material. Por otro lado, la mayoría de los balastos que se recomiendan en el mundo, consideran un material con granulometría sumamente uniforme, el cual normalmente está comprendido entre las mallas de 64 mm (2 1/2") y la de 4.76 mm (No. 4); a este material se le encuentran algunos defectos básicos:

1.- La extrema uniformidad de los granos hace que el contacto entre ellos ocurra a través de pocos puntos con lo que las cargas de los ferrocarriles modernos y los efectos dinámicos correspondientes producen muy altos esfuerzos en esos contactos que propician la rotura de granos en el material de estudio.

2.-Además, la uniformidad de las partículas es inconveniente desde el punto de vista de la incrustación del balasto en capas subyacentes.

A partir de esas observaciones, Rico A. y Orozco J. (1987) han recomendado el uso de granulometrías bien graduadas para material de balasto. Dicha recomendación aparece plasmada en el Manual de calidad para materiales en la sección estructural de vías férreas editado por el Instituto Mexicano del Transporte (Rico et al 1991).

Por todo lo anterior, con este estudio se pretende conocer cuáles son las variables más significativas que producen rotura de granos en el balasto e introducir este conocimiento en las Normas de Calidad de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con el fin de eliminar o disminuir este fenómeno.

Objetivos.

Estudiar el comportamiento mecánico de los materiales que constituyen las capas de balasto de las vías férreas, cuando son sometidas a cargas cíclicas de diferente magnitud y larga duración.

Proponer distribuciones granulométricas para capas de balasto con el fin de solucionar o aminorar notablemente la rotura de partículas.

Alcances y metas.

Conocer y entender cuáles son las variables más significativas que hacen que la rotura de granos sea más susceptible a presentarse en material de balasto bajo ciertas condiciones de trabajo.

Proponer en las actuales normas de los materiales nuevas especificaciones para material de balasto con el fin de eliminar o disminuir el fenómeno estudiado.

1. Estado del arte.

1.1 Antecedentes.

Los suelos granulares son moderadamente compresibles bajo altas presiones, y la compresión y deformación que sufren son acompañadas por el rompimiento de las partículas del suelo. El campo de la ingeniería civil donde más se ha estudiado este fenómeno es, sin duda, el campo de las presas. La tendencia a construir presas de tierra de mayor altura produce el correspondiente aumento de presiones en los elementos de suelo cercanos a la base de la presa. Las características de compresibilidad y de deformación de los suelos sujetos a altas presiones es importante en el diseño y construcción de las presas. El rompimiento de las partículas es frecuentemente observado y reportado en conexión con las investigaciones relacionadas con la resistencia a altas presiones y a su deformación.

Los drenes de gravas y los filtros de suelos son componentes esenciales de muchas presas de tierra. Estos frecuentemente se localizan cerca de la base de la presa, donde las presiones aplicadas y el correspondiente rompimiento de partículas podría ser más grande. Los filtros son diseñados casi totalmente por consideraciones granulométricas. Si las granulometrías son alteradas significativamente por la rotura de partículas después de que los filtros han sido colocados, la efectividad del filtro podría ser alterada notablemente. Podría entonces pensarse que un aspecto práctico del rompimiento de partículas y la degradación de los suelos a altas presiones se relaciona con el diseño de drenes de grava y filtros de suelo en altas presas de tierra.

El problema es aún mayor en los respaldos de los enrocamientos de las grandes presas ya que debido a la uniformidad que tienen, éstos presentan pocos contactos entre sus partículas por lo que la rotura de granos en los enrocamientos puede ser de consideración pues incluso podría existir la posibilidad de flujo plástico del material para el caso en que se presenten esfuerzos muy elevados.

Trabajos previos.

Los primeros estudios relacionados con la compresibilidad de las arenas fueron hechos por Terzaghi (1925; citado por Lee y Farhoomand, 1967). El realizó pruebas de compresión confinada en suelos arcillosos y arenosos y observó que la compresibilidad en ambos suelos era similar. Aunque los cambios de volumen en la arena no fueron tan grandes como los que ocurren en la arcilla cuando son ensayados a la misma magnitud de carga.

Terzaghi y Peck (1948; citados por Lee y Farhoomand, 1967) ensayaron arenas sujetas a pruebas de consolidación unidimensional y observaron que los asentamientos presentados eran similares a los observados en algunas arcillas. El rompimiento de partículas fue observado y fue sugerido como una causa de la compresibilidad de las arenas a altas presiones. También observaron que la deformación no fue instantánea, sino que continuaba sobre un considerable periodo de tiempo y parece ser al menos burdamente parecida al fenómeno de consolidación secundaria observado en suelos arcillosos.

Roberts y de Souza (1958; citados por Lee y Farhoomand, 1967) probaron diferentes arenas y observaron que a presiones moderadamente bajas, las arenas angulosas se rompían y comprimían más que las arenas redondeadas. Sin embargo, a presiones muy elevadas se observaron pequeñas diferencias entre el comportamiento de suelos angulares y redondeados; además, observaron que un suelo graduado uniformemente se rompía más que un suelo bien graduado.

Vésic y Barksdale (1963; citados por Lee y Farhoomand, 1967) realizaron pruebas triaxiales drenadas en arenas de grano medio en un amplio rango de presiones de confinamiento hasta un máximo de 700 kg/cm^2 y observaron que la rotura de partículas se incrementa con el aumento de la presión de confinamiento.

Hall y Gordon (1963; citados por Lee y Farhoomand, 1967) realizaron pruebas triaxiales drenadas en suelos con material granular con tamaños de partícula hasta de 3" y presiones de confinamiento hasta de 45 kg/cm^2 . Una cantidad considerable de rotura de partículas ocurrió durante los ensayos, especialmente durante la etapa de corte, presentándose mayor rompimiento de partículas en suelos con granulometría uniforme.

Marsal (1966) reportó los resultados de pruebas triaxiales drenadas en gravas gruesas y en fragmentos de rocas hasta de 20 cm de diámetro, usando una cámara triaxial de 1.13 m de

diámetro y una altura de 2.5 m, y presiones de confinamiento hasta de 25 kg/cm^2 . Estos datos muestran que la compresibilidad y el rompimiento de las partículas parecen estar relacionadas de la misma manera con la naturaleza del suelo. El material grueso se comprime y se rompe mas que el material fino, y el material con partículas frágiles muestra mayor cantidad de compresión y rompimiento de partículas. Ensayes del tipo triaxial realizados a arena de Ottawa (muy redondeada) indican que es mucho menos compresible y mas resistente al rompimiento que las arenas finas subangulares a subredondeadas.

En resumen, los resultados de investigaciones previas sobre las propiedades de deformación de suelos granulares a altas presiones demuestran que se comprimen y que las partículas se pueden romper con el incremento de los esfuerzos en los suelos. La compresión no es instantánea pero continúa con el tiempo de manera similar al fenómeno de consolidación secundaria observado en suelos arcillosos. La cantidad del rompimiento de partículas y de deformación del suelo o compresión parece ser, al menos parcialmente, gobernada por los mismos factores. Los datos obtenidos de las investigaciones previas indican que la compresión y el rompimiento de partículas parecen estar gobernadas por la adición de agua y por los factores siguientes:

- a) Por incremento en la variabilidad de la granulometría de un suelo uniforme.
- b) Por incremento en la uniformidad de una muestra de suelo.
- c) Por incremento de la angularidad de las partículas.
- d) Por la reducción de la resistencia individual de las partículas.
- e) Por el incremento de la presión de confinamiento.
- f) Por el incremento del esfuerzo cortante a una presión de confinamiento.

De los ensayes realizados Lee y Farhoomand (1967) observaron un gran cambio de volumen que se presentó simultáneamente con la adición de cada incremento de carga. Para los suelos mas gruesos y las presiones mas elevadas, la compresión fue acompañada por pequeños ruidos debidos a la rotura de partículas provenientes de la celda, los cuales eran audibles claramente a algunos metros de distancia. Durante diferentes intervalos de tiempo se escuchaban ligeros ruidos, que indican que el rompimiento de partículas, como la compresión, es un fenómeno dependiente del tiempo. Además, observaron que los suelos angulares son considerablemente más compresibles que los suelos subredondeados, y que los suelos uniformes gruesos son también más compresibles que los suelos bien graduados con el mismo tamaño máximo de partícula.

1.2 La rotura de granos en problemas de ingeniería.

La necesidad de construir presas de tierra y enrocamiento de gran altura, con objeto de generar energía eléctrica ha propiciado, por razones económicas, secciones formadas por grandes masas granulares y un corazón de suelo compactado, vertical o inclinado, aproximadamente en la zona central. Por otra parte, en vías terrestres de alta especificación se han requerido cortes de ladera y pedraplenes de gran altura; estos últimos se realizan usualmente con enrocamiento procedente de las mismas excavaciones o de canteras seleccionadas.

La investigación de las propiedades mecánicas de enrocamientos y gravas acusa un desarrollo semejante al de las obras construidas con dichos materiales. Las primeras pruebas con muestras de grava se efectuaron en la Universidad de Harvard en 1944, usando una cámara triaxial para especímenes de 4 pulgadas de diámetro, ensayados a presión confinante menor de 1 kg/cm^2 , habiendo otros estudios posteriormente. Al proyectarse la construcción de la presa de "El Infiernillo" en Michoacán, presa de tierra y enrocamiento de 145 m de altura, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), asesorada por el Profesor A. Casagrande, desarrolló en 1961 un equipo triaxial para probar especímenes de 1.0 m^2 de sección transversal para tamaño máximo de partículas de 20 cm, a presiones confinantes máximas de 25 kg/cm^2 (Marsal, et al, 1965). Además, fue necesario realizar aparatos para ensayar los materiales de enrocamientos y gravas que se iban a utilizar en la presa de "El Infiernillo", tales como triaxiales, odómetros, corte directo y equipo adicional.

Las pruebas de compresión triaxial efectuadas con muestras de gravas o de enrocamientos acusaron rotura de granos, particularmente bajo la acción de esfuerzos cortantes. Con el fin de estudiar este fenómeno, que puede afectar tanto a la resistencia como a la compresibilidad de los materiales, se han realizado pruebas de compresión confinada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Marsal, 1965).

Para estimar la rotura de partículas se realizaron dos series de pruebas de compresión confinada a los materiales a utilizar en la presa de " El Infiernillo", una para estudiar el efecto de los esfuerzos actuantes en la rotura de granos y la otra para investigar las curvas de deformación con el tiempo con diferentes presiones axiales (Marsal, 1965).

La primera serie sólo se ejecutó con gravas mientras la segunda fue con enrocamientos; los especímenes se prepararon en estado suelto y compacto. Las pruebas se realizaron

incrementando la presión axial de cero a la especificada en un lapso de 5 minutos aproximadamente y se registraron después los asentamientos en función del tiempo. En un principio la duración del ensaye se limitó a 2 horas, pero en vista de que las deformaciones continuaban, se decidió ampliar la observación a 24 horas. Una vez terminado el ensaye, la probeta se descargaba y se realizaba la determinación granulométrica final con el fin de calcular la rotura de granos correspondiente.

Definición del coeficiente de rotura de granos "B".- Como medida de rotura de granos se tomará la suma de las diferencias de un mismo signo, entre los porcentajes retenidos de la muestra original y los del espécimen después de ser ensayado. La suma de las diferencias positivas y la de las negativas son en valor absoluto iguales; por lo tanto, ambas representan al parámetro B. Se atribuye a B el signo positivo cuando ocurre rotura de granos y el negativo para el caso poco común, de aglutinarse los granos (Marsal, 1965).

Las deformaciones totales sufridas por el material ensayado son el resultado de acomodados en la estructura granular y por la rotura de partículas. En los ensayes con material suelto la deformación total es del orden de dos veces el valor registrado en los especímenes mas compactos, pero la relación en rotura de granos es de 1.3 aproximadamente.

1.3 Factores que controlan la rotura de granos.

De los estudios realizados (Marsal, 1965) se concluye que la rotura de granos depende fundamentalmente de la naturaleza y tamaño de las partículas, de su distribución granulométrica y de la relación de vacíos en menor grado. Esto conduce a pensar en la intensidad de las fuerzas intergranulares como factor determinante de la rotura de granos. La magnitud de dichas fuerzas está ligada al número de contactos por unidad de superficie (N_s), la cual está en función de la granulometría del material y de la relación de vacíos.

Además, la rotura de granos debe estar relacionada con la resistencia individual de los granos, por ejemplo, en compresión simple. Sería difícil determinar un valor medio de esa resistencia en materiales que tienen una composición mineralógica muy variada y aún en los de un mismo origen, por la presencia de defectos y fisuras. Pero se sabe que esa resistencia, en cierto grado, depende del peso específico de las rocas que intervienen en la composición de un suelo. Atendiendo a estas razones y al hecho de que la rotura de granos

depende de la relación de vacíos es conveniente representar los valores que se obtengan en los ensayos de rotura de granos con el peso volumétrico, ya que la correlación que se obtiene es significativa.

Los diámetros efectivos y los coeficientes de uniformidad obtenidos después de los ensayos demuestran que también existe una relación estrecha entre esos parámetros y la rotura de granos. Si se calculan las diferencias de diámetros efectivos (D_{10i} y D_{10f}) y de los coeficientes de uniformidad (Cu_i y Cu_f) correspondientes a las granulometrías inicial y final y se grafican con los valores obtenidos en rotura de granos, se pueden obtener resultados de interés con el fin de estudiar los asentamientos de masas granulares, considerando las deformaciones correspondientes al final de los respectivos ensayos.

Otro aspecto importante en la investigación de medios granulares es el relativo a la ocurrencia de las deformaciones en el tiempo. Al inicio de las pruebas se estimaba que la duración necesaria para alcanzar el equilibrio en cada incremento de carga, sería del orden de minutos. Los resultados indicaron que era recomendable extender las observaciones hasta periodos de 24 horas.

Como conclusión y considerando los resultados obtenidos en las pruebas de compresión confinada (Marsal, 1965), es posible anticipar que la rotura de granos es función de la intensidad promedio de las fuerzas de contacto desarrolladas durante el ensayo y de la resistencia media de las partículas a la compresión.

Índice de solidez de los granos.

Las propiedades físicas de las partículas o fragmentos de roca varían notablemente no sólo en las gravas y arenas que contienen los granos más competentes arrastrados por el agua dentro de cuencas con geología diversa, sino también en los enrocamientos explotados de una misma fuente, por causa del intemperismo y los defectos naturales (diaclasas, inyecciones hidrotermales, cavidades, etc.) y los inducidos por el explosivo y el manejo de la roca durante su extracción, transporte y colocación.

Con objeto de conocer en forma preliminar la solidez del enrocamiento o de la grava y arena, se realizan pruebas índice. Las pruebas de referencia son:

- a) Absorción de agua.
- b) Desgaste o abrasión de Los Angeles.
- c) Intemperismo acelerado.

Las pruebas anteriores muestran resultados que de alguna manera indican la calidad de los materiales que se estudian. Por ejemplo, un agregado con porcentajes de desgaste bajos en la prueba de Los Angeles y en la de intemperismo, seguramente indicará que el material en cuestión tendrá un buen comportamiento mecánico; es decir, buena resistencia y baja compresibilidad.

Granulometría.

Las propiedades mecánicas de un material granular dependen de la forma y rugosidad de los granos y de la composición granulométrica, además de otros parámetros.

En los correspondientes ensayos a materiales de varios enrocamientos y gravas de la presa "El Infiernillo" se modificó la granulometría con el fin de investigar la influencia de la granulometría en la resistencia al corte, rotura de granos y compresibilidad.

Es usual describir las curvas granulométricas mediante el diámetro efectivo (D_{10}), el coeficiente de uniformidad (Cu), y el coeficiente de curvatura (Cc); esto con fines de clasificación del material.

Rotura de granos.

El índice de solidez de los granos y la granulometría no son suficientes para evaluar el producto obtenido en cantera con explosivos. Los ensayos de compresión triaxial, deformación plana y compresión unidimensional, indican que los granos de un enrocamiento experimentan rotura de granos, aún cuando se opere a niveles de esfuerzo relativamente bajos. Las pruebas índice y la inspección visual de los fragmentos de roca proporcionan una idea de la importancia que puede tener dicha rotura en cada caso, pero no es posible con esta información, valorar su magnitud e influencia en otras características como la compresibilidad. Debido a esto se ha diseñado una prueba que somete a los fragmentos de roca a estados de esfuerzo (fuerzas concentradas en los contactos y

condiciones de apoyo diversas) similares a las que se presentan dentro de una masa granular. Dicha prueba consiste en aplicar a tres granos de aproximadamente igual tamaño, d_m , fuerzas transmitidas mediante una placa de acero; se miden el número de contactos, N_c , y la carga, P , que produce la rotura del primer grano. La relación P/N_c es el valor P_a denominado carga de ruptura de la roca, para la dimensión del diámetro medio (d_m).

Las cargas P_a varían debido a que la prueba de ruptura no solo involucra condiciones de apoyo muy diversas en las partículas, sino también la presencia de defectos naturales en la roca (fisuras, poros, relleno de grietas, alteración, etc.). Con los estudios de ruptura se define la relación empírica:

$$P_a = n d_m^\lambda$$

La expresión de P_a en términos de d_m puede justificarse mediante los estudios realizados por Joisel (1962; citado por Marsal, 1969) y la teoría de Griffith (1921; citado por Marsal, 1969) sobre la propagación de grietas en una masa afectada por huecos. Combinando dichas proposiciones Marsal (1969) concluye que la ruptura P_a es proporcional a la dimensión del grano elevado a la potencia $3/2$, en donde n y λ son constantes para cada material. De los estudios realizados por Marsal el exponente varía entre 1.2 y 2.2 para las rocas ensayadas.

Tanto en las pruebas triaxiales como en las de compresión unidimensional y deformación plana, se estudió la rotura de granos producida por los esfuerzos a que estuvo sometido el espécimen, a partir de las granulometrías inicial y final. Dadas las curvas granulométricas inicial y final se encuentran las diferencias entre los pesos retenidos inicial y final a las fracciones de cierto diámetro nominal. Se ha definido como rotura de granos, B , a la suma de los valores positivos de las diferencias en los pesos, que representa el porcentaje en peso de los granos que han sufrido fragmentación (Marsal 1965).

Fuerzas de contacto en suelos y enrocamientos.

Las teorías de esfuerzos que prevalecen en la mecánica de suelos se desarrollaron para medios continuos (Marsal, 1963). Sin embargo, los suelos se componen esencialmente de cuerpos discretos y, cuando se manejan materiales tales como gravas y enrocamientos, surgen dudas respecto a la validez de esas teorías.

Propiedades físicas de las gravas.

Distribución granulométrica.- Las dimensiones de las partículas en suelos granulares usualmente se obtienen por medio de un análisis granulométrico por mallas. De esta manera el material se divide en fracciones, a cada una de las cuales le corresponde un diámetro nominal y un peso expresado como porcentaje del total. En casos especiales, cada fracción contiene partículas de diferentes tamaños y el diámetro nominal puede desviarse del valor promedio; es necesario señalar que las determinaciones de la dimensión promedio de los granos y el diámetro nominal dan una relación cercana a la unidad. Cuando se hace un análisis extensivo a las relaciones de superficie y de volumen, las discrepancias entre los valores calculados con el diámetro nominal y los evaluados utilizando la dimensión promedio, se hacen notables. Para corregir estas discrepancias se utiliza una relación volumétrica definida como factor de forma.

Concentración de granos.- Es el número promedio de granos contenidos en un cuerpo discreto (suelo, enrocamiento, etc.), por unidad de dimensión tomada como referencia. Por lo tanto, hay tres clases de concentraciones de granos, que se definen como sigue:

- 1.- Concentración volumétrica, n_v , o sea, el número de partículas incluidas en un elemento cúbico de volumen unitario.
- 2.- Concentración superficial, n_s , o sea, el número de granos cortados por un plano dado, por unidad de área.
- 3.- Concentración lineal, n_L , o sea, el número de partículas por unidad de longitud.

Conociendo las dimensiones promedio de las partículas d_m , y el factor de forma r_v , el número de granos por unidad de volumen se puede calcular partiendo de la relación de vacíos de las muestras aplicando la siguiente expresión:

$$n_v = 6 / [\pi r_v (1 + e) d_m^3] \quad (\text{ec. 1})$$

Basándose en análisis adimensionales y en resultados experimentales se encontró que las concentraciones de granos superficial y lineal se pueden calcular aproximadamente partiendo de los valores de n_v .

$$n_s = n_v^{2/3} = \{6 / [\pi r_v (1 + e)]\}^{2/3} (1 / d_m^2) \quad (\text{ec. 2})$$

$$n_L = n_v^{1/3} = \{6 / [\pi r_v (1 + e)]\}^{1/3} (1 / d_m) \quad (\text{ec. 3})$$

Forma de la partícula.- La ecuación 1 permite calcular valores promedio de los factores de forma, siempre que se conozca la concentración volumétrica de granos. Las pruebas de este tipo consisten en medir tanto la relación de vacíos de la muestra como las dimensiones promedio de las partículas y contar el número de granos por unidad del volumen total. Esta operación es laboriosa pero el trabajo se puede simplificar grandemente, utilizando porciones representativas de la muestra en cuestión. Estas porciones se pesan, se cuenta el número de partículas y se calcula entonces el valor de n_v a partir del peso volumétrico seco de la muestra.

Con el procedimiento anterior se determinaron los factores de forma para varios tipos de partículas, a saber: municiones, tres gravas naturales, tres muestras de piedra triturada, discos de vidrio y mortero y cilindros de alambre de acero. Además, fueron graficados valores de r_v en función de la relación d_3/d_m , en donde d_3 es la dimensión más pequeña medida en las partículas. Para fines de referencia se graficaron curvas que corresponden a placas cuadradas, cilindros y elipsoides de revolución (Marsal, 1963).

Contacto de los granos.- Para evaluar las fuerzas de contacto en los suelos es necesario conocer el número promedio de contactos por grano, N_c , de las fracciones componentes. Estos números N_c , junto con los valores de las concentraciones de granos, permiten calcular el número de contactos por unidad de superficie total.

Las determinaciones del número de contactos de granos por partícula en muestras de grava de granulometría uniforme y en mezclas compuestas de dos tamaños correspondientes a gravas, indican que el número promedio de contactos por grano, N_c , es 6 en las muestras de grava con granulometría uniforme en estado suelto y que aumenta a 7 u 8 para las mismas colocadas en estado denso. Las mezclas de grava son menos susceptibles a las condiciones de colocación, variando los valores de N_c entre 5.7 y 6.8. Los resultados de las pruebas ayudaron a desarrollar un método para calcular el número de contactos de granos en los suelos. Este método se basa en la suposición de que los contactos en el espacio están

uniformemente distribuidos y que el valor más pequeño de N_c es 6. Por lo que conocida la concentración volumétrica de granos, ya sea medida o calculada a partir del diámetro nominal, se puede estimar la concentración superficial, y con ésta, determinar el número promedio de contactos por unidad de área. El producto de este valor por el área superficial de partículas contenidas en cada fracción del suelo proporciona el número de contactos por fracción. Por medio de sumatorias, se obtiene el número total de contactos por unidad de volumen, n_v . La potencia $2/3$ de n_v es el número promedio de contactos por unidad de área, n_s . El método es sólo una aproximación burda de las condiciones reales, pues supone que todos los granos transmiten fuerzas intergranulares.

Rotura de granos.- En cuanto a la rotura de granos parece ser que el factor más importante que afecta tanto a la resistencia al esfuerzo cortante como a la compresibilidad, es el fenómeno de fragmentación que sufre un cuerpo granular cuando se le somete a cambios en su estado de esfuerzos, tanto durante la etapa de compresión uniforme, como durante la aplicación del esfuerzo desviador.

Aplicando un criterio simplificado, se supone que la rotura de partículas, B , depende del valor promedio de las fuerzas de contacto, P , y de la resistencia de los contactos entre las partículas, P_a . La hipótesis práctica es la siguiente:

$$B = \alpha P / P_a$$

donde α es una constante del material. Por lo que es necesario calcular valores de P en función de los esfuerzos actuantes y de las características del medio granular, como por ejemplo, la distribución granulométrica, el tamaño promedio y la forma de los granos, la relación de vacíos y el número de contactos por partícula (Marsal; 1965, 1967).

Los enrocamientos gravas y arenas son medios discretos, bi o trifásicos, formados por fragmentos de roca y el aire y agua que llenan los vacíos, los cuales, a niveles de esfuerzos moderados, generalmente se dilatan. Las relaciones esfuerzo-deformación en compresión triaxial no son lineales; el módulo tangente de deformación varía durante procesos de carga y descarga y tiende a cero en la falla. Los materiales en estado denso, ensayados con niveles de esfuerzo más bien bajos, exhiben un máximo de resistencia a deformación relativamente pequeña; al incrementarse ésta, la resistencia al corte disminuye hasta que alcanza un valor último o residual. El mismo material formado con un grado de

compactación bajo, no presenta el máximo de resistencia antes citado. Lo mismo ocurre con suelos granulares densos cuando se ensayan a niveles elevados de esfuerzo. Las gravas y los enrocamientos ensayados bajo presiones confinantes mayores de 5 kg/cm^2 , acusan rotura de granos, un fenómeno que depende principalmente de la composición granulométrica y de la resistencia a la ruptura de partículas.

Conclusiones.

- 1.- Los suelos granulares son bastante compresibles bajo la aplicación de niveles altos de esfuerzos.
- 2.- La compresión es comúnmente acompañada por cierta cantidad de rotura de granos.
- 3.- Los suelos gruesos se comprimen más y muestran más rotura de granos que los suelos finos.
- 4.- Los suelos con partículas angulosas se comprimen más y muestran mas rotura de granos que los suelos con partículas redondeadas.
- 5.- Los suelos uniformes se comprimen y rompen más que los suelos bien graduados con el mismo tamaño máximo en su granulometría.
- 6.- Bajo alguna carga en particular, la compresión y la rotura de granos continúa incrementándose por un periodo indefinido de tiempo.
- 7.- Los suelos que sufren rotura llegan a ser más finos después de aplicada la carga. Un suelo puede sufrir modificaciones en cuanto a su granulometría después de estar sujeto a compresión.

1.4 Capacidad de retención y drenaje de los filtros.

Para ser eficiente, la permeabilidad de cualquier filtro debe ser mucho mayor que la del suelo que protege. Es aceptable un filtro con permeabilidad mínima 50 veces mayor que la

del suelo que protege, pero usualmente se pretende que la permeabilidad del filtro sea 100 o más veces mayor. Además, los poros del filtro deben ser suficientemente finos para impedir el paso de partículas del material protegido.

Para cumplir la primera condición ($k_{\text{filtro}} \geq 100 k_{\text{suelo}}$) es necesario que las partículas más finas del filtro sean cierto número de veces mayores que las más finas del suelo protegido. Experimentalmente se sabe que esa condición se cumple si $D_{15 \text{ filtro}} \geq 5 D_{15 \text{ suelo}}$, en donde el D_{15} es un diámetro tal que sólo quince por ciento en peso de las partículas son menores que él.

También es un hecho experimental que si un filtro es capaz de retener las partículas gruesas del suelo, éstas forman una malla que, a su vez, retiene al resto. Ya que las partículas finas serían, en cualquier caso, las encargadas de retener a las partículas gruesas del suelo protegido, se ha investigado la relación entre D_{15} del filtro y D_{85} del suelo necesaria para cumplir la segunda condición mencionada y se ha concluido que esa relación es aproximadamente $D_{15 \text{ filtro}} \leq 5 D_{85 \text{ suelo}}$ (Bertram, 1940; citado por Marsal et al 1975).

Por lo tanto, las dos condiciones (permeabilidad y capacidad de retención) que debe cumplir un filtro, se satisfacen si sus características granulométricas se eligen atendiendo a las del suelo por proteger, de modo que:

$$(D_{15 \text{ filtro}} / D_{85 \text{ suelo}}) \leq 5 \leq (D_{15 \text{ filtro}} / D_{15 \text{ suelo}})$$

Los datos obtenidos de estudios en el diseño de filtros han mostrado que suelos uniformes son susceptibles a una apreciable cantidad de rompimiento de partículas y el 15 % llega a ser considerablemente más fino durante la compresión. Es concebible que la granulometría de un filtro bien diseñado podría cambiar bastante como un resultado del rompimiento de partículas bajo el peso del material al terminarse la construcción de la presa y que el material de filtro pudiera no cumplir con los requerimientos de diseño. Esto puede resultar de dos consideraciones. Primero, la granulometría del filtro podría llegar a ser fina y entonces sería hasta cierto punto impermeable y por esto no cumpliría con los requerimientos de permeabilidad. La segunda posibilidad es que los finos de la rotura del material del filtro podría desgastar el dren de grava, lo cual podría llevar a serios problemas de erosión interna.

1.5 Normas actuales para balasto.

Actualmente, la gran mayoría de los balastos que se recomiendan en el mundo consideran materiales con granulometrías sumamente uniformes, generalmente entre las mallas de 64 mm (2 1/2") y de 4.76 mm (No. 4). Suele fijarse un tamaño máximo que puede ser de 3" y que además el porcentaje de material que pase la malla No. 4 no exceda de un 10% el cual es controlado con la prueba de equivalente de arena (80 % mínimo).

Calidad del material según normas de los Ferrocarriles del Pacífico Canadiense.

Un resumen de las pruebas físicas usadas por los Ferrocarriles Canadienses (Canadian Pacific Railway) para asegurar la calidad del balasto se muestra a continuación:

a) Granulometría.- Deberán cumplir con alguna composición granulométrica de las mostradas en la Tabla 1.1. De acuerdo con el procedimiento de prueba descrito en las normas ASTM C 136 y C 117.

b) Densidad relativa.- Mayor de 2.60 de acuerdo con el procedimiento descrito en la prueba ASTM C 127.

c) Intemperismo acelerado.- Máximo 1.0 % para vías principales (vía continua), 1.5 % para líneas principales (vía no soldada) y 3.0 % en las demás; de acuerdo con lo indicado en la prueba ASTM C 88, con cinco ciclos en balasto tipo 3.

d) Absorción.- Máximo 0.5 % para vías principales (vía continua), 0.75 % para líneas principales (vía no soldada) y 1 % en todas las demás; de acuerdo con la prueba ASTM C 127 en balasto tipo 3.

e) Pruebas de abrasión.- En desgaste de Los Angeles, máximo 45 % de acuerdo con la prueba ASTM 535, balasto tipo 3; Abrasión de Mill máximo 9% en pérdida y Número de Abrasión menor que 65 o el requerido para el tráfico acumulado para un periodo de 20 años.

f) **Análisis petrográfico.**- Juicio de un profesional para identificar flujos potenciales de falla.

TABLA 1.1 GRANULOMETRIAS PARA BALASTO SEGUN LOS FERROCARRILES DEL PACIFICO CANADIENSE.

DENOMINACION	POR CIENTO EN PESO QUE PASA LA MALLA DE				
	64 mm	50.8 mm	38.1 mm	25.4 mm	19.0 mm
	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"
1	100	100	100	90 - 100	70 - 90
2	100	100	90 - 100	70 - 90	50 - 70
3	100	100	90 - 100	70 - 90	30 - 50
4	100	100	90 - 100	20 - 55	0 - 5
5	100	90 - 100	35 - 70	0 - 5	

Continuación de la Tabla 1.1

DENOMINACION	POR CIENTO EN PESO QUE PASA LA MALLA DE			
	12.7 mm	9.51 mm	4.76 mm	0.075 mm
	1/2"	3/8"	No. 4	No. 200
1	40 - 60	20 - 40	0 - 3	0 - 2
2	25 - 45	10 - 25	0 - 3	0 - 2
3	0 - 20	0 - 5	0 - 3	0 - 2
4			0 - 3	0 - 2
5			0 - 3	0 - 2

La mayoría de los métodos de prueba utilizados son los especificados por la American Railway Engineering Association (AREA).

Comparando las especificaciones para balastos entre las normas Canadienses (CPR) y las Mexicanas (SCT) se observa que están hechas bajo los mismos principios; es decir, granulometrías uniformes, pesos específicos altos y desgaste en la prueba de los Angeles no mayor de 40% (SCT).

Lo referente a las normas para balastos según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (México, SCT) será tratado en el capítulo 2.

1.6 Comportamiento del material para balastado en vías férreas.

Como es sabido, bajo los rieles y durmientes de una vía férrea se dispone una capa de material triturado sano a la cual se da el nombre de capa de balasto. Los espesores usuales de balasto están en función del tonelaje movido anualmente sobre la vía férrea, pero normalmente se considera un espesor de 30 cm o más como aceptable.

Suele fijarse un tamaño máximo para el balasto de 3", pero probablemente convenga que sea algo menor, por ejemplo, del orden de 2" o 2 1/2". Por lo general se procura que el balasto tenga menos del 10% de material menor que la malla No. 4 y el material que pase dicha malla es controlado a través de su equivalente de arena (mínimo 80%). Suele controlarse el peso volumétrico mínimo siendo deseable material pesado, así como una serie de propiedades mecánicas que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la abrasión, etc.

Durante muchos años fue práctica común la colocación del balasto directamente sobre las terracerías de las vías férreas, lo cual ocasionaba frecuentemente la incrustación del balasto en las terracerías, la contaminación del balasto por ascensión de material fino o ambas cosas, cuando el material constituyente de las terracerías era fino (limos o arcillas). La práctica anterior unida a la compactación insuficiente que era común en las terracerías de las vías férreas producía muchas veces problemas de estabilidad a la vía, sobre todo si se piensa que el balasto, por su naturaleza muy permeable permitía el paso del agua hacia las terracerías, con las consecuencias de prever.

Lo anterior condujo a mejorar en lo posible la calidad de la parte superior de las terracerías, al principio simplemente compactándola algo más y, posteriormente, construyendo una capa subrasante con la misma idea, funciones y calidades de las subrasantes de los pavimentos de las carreteras. Es obvio que sobre todo la construcción de una subrasante apropiada condujo a una mejoría substancial en el comportamiento de las vías férreas, pero cuando los materiales de ésta son finos, lo que es caso frecuente, los problemas de incrustación mutua y de pérdida de propiedades por humedecimiento incontrolado subsisten.

Desde hace varios años es práctica usual en las vías férreas construir entre la capa subrasante de la terracería y el balasto, otra capa denominada subbalasto, cuyas principales funciones son las siguientes:

- Propiciar la disminución del espesor de balasto, al dar resistencia estructural adicional con una capa de material más económico.
- Proporcionar al balasto una capa de apoyo más resistente que la subrasante, mejorando la resistencia estructural del conjunto.
- Impedir la interpenetración del balasto y la capa subrasante.
- Cubrir una importante función drenante, que sirva tanto para proteger a la subrasante del agua que le llegaría directamente del balasto como para restringir, a modo de filtro, el ascenso de los materiales muy finos, que contaminarían el balasto.

Por lo anterior se deduce que las funciones de la capa de subbalasto son análogas a las de la capa de subbase de una carretera y también que cuando una subrasante esté construida por materiales de razonable resistencia y estables ante el agua, la capa de subbalasto no será necesaria, por lo que sólo se justifica pensar en ella cuando la subrasante está formada por materiales finos.

Pruebas de abrasión a balastos para ferrocarril.

Un balasto para ferrocarril típicamente es un agregado grueso, de roca triturada con tamaños desde 2 1/2" hasta 1/4". Un material se degradará en servicio tanto por rompimiento de partículas como por la abrasión que sufre. Por lo tanto, es necesario evaluar la resistencia a la abrasión de un material para saber si conviene utilizarlo como balasto. Comúnmente, se usan tres pruebas, que son la prueba de abrasión de Los Angeles, la Abrasión de Mill y la prueba de Deval.

La prueba de Los Angeles ha sido usada como la principal prueba de abrasión para balasto en Norte América y la prueba de Deval en Inglaterra. La abrasión de Mill en complemento

con la de Los Angeles ha sido propuesta como una prueba de abrasión a los balastos usados en Norte América.

Descripción de las pruebas.- La prueba de Los Angeles es una prueba en seco que mide la resistencia de un material o la tendencia a su rompimiento. Consiste en colocar material con una cierta graduación y con un número de esferas de acero especificadas dentro de un cilindro para darle un cierto número de revoluciones. El impacto en las partículas de balasto causa rompimiento (abrasión). El material se remueve y la muestra se criba en la malla Núm. 12. El valor de la prueba de Los Angeles es la cantidad de material menor que dicha malla que se ha generado durante el ensaye, como porcentaje del peso de la muestra original.

La prueba de Mill es de abrasión en húmedo; involucra mezclar con agua 3 kg de material con una graduación especificada en un jarro de porcelana para darle 10000 revoluciones con una velocidad de 33 rpm. El valor obtenido es la cantidad de material más fino que la malla Núm. 200 generado en la prueba y expresado como un porcentaje del peso de la muestra original.

La prueba de Deval es similar a la anterior. Una masa de suelo de 5 kg, mas agua, es rotada en un cilindro montado sobre una flecha con el eje inclinado 30° al eje de rotación de la flecha. El valor de desgaste por saturación es el material generado más fino que 2.36 mm, expresado como porcentaje del peso inicial.

Efectos de las características de la partícula sobre el comportamiento en material granular.

Las características de resistencia y esfuerzo deformación del balasto de ferrocarril se conocen en función de factores como la forma de la partícula y su tamaño y granulometría. La naturaleza y alcance de estos factores sólo son parcialmente entendidos y las opiniones son algunas veces contradictorias.

Cualquier proporción de partículas deleznales añadidas al espécimen o al material granular triturado, colocado aleatoriamente u orientado en pruebas triaxiales, incrementa la resistencia al corte excepto cuando las partículas tienen una orientación generalmente

paralela al plano de falla. Aunque, la presencia de materiales deleznable da como resultado desgaste y rompimiento de partículas elevado, deformación permanente prolongada bajo carga repetida y baja dureza. Incrementando la angularidad de la partícula se provoca un incremento en la resistencia al corte, pero en contraparte el rompimiento de la partícula es mayor, análogamente cuando se incrementa la rugosidad de la superficie de la partícula se obtiene un aumento en la resistencia al corte. Ampliando la graduación del material se incrementa la resistencia al corte aunque este efecto quizá se deba a que la relación de vacíos decrece como el rango del tamaño de partículas se incrementa.

Las especificaciones de la industria para el balasto de ferrocarril contienen algunos criterios relacionados a tamaño de partícula, forma, angularidad y graduación; sin embargo, las funciones del balasto imponen requisitos conflictivos acerca de estos parámetros.

Forma de la partícula.

Los parámetros que han sido utilizados para definir la forma de la partícula incluyen lo deleznable y forma aplanada de éstas, alargamiento, esfericidad, redondez y angularidad. Lo aplanado se refiere a la relación del espesor de la partícula respecto a su ancho (dimensión intermedia) y lo alargado se refiere a la relación largo-ancho, la esfericidad es la medición que se refiere a que tanto la forma de una partícula se parece a una esfera, finalmente, la redondez o su inverso, la angularidad, es una medición de lo puntiagudo de sus filos o esquinas de una partícula individual.

Dunn y Bora (1972; citados por Selig y Roner, 1987) probaron un agregado de caliza triturado en un dispositivo triaxial especial y utilizaron rangos de partícula de 38 mm a 4.8 mm; el porcentaje de partículas planas varió del 0 % al 100 % en el espécimen. Cualquier porcentaje de partículas planas incrementó la resistencia al corte, pero los resultados sugieren que el rango de 25 % al 75 % de partículas planas es mejor que el 100 %.

Gur et al. (1967; citados por Selig y Roner, 1987) realizaron varios ensayos diferentes para evaluar el efecto de aplanamiento sobre material triturado utilizando rangos en tamaño de 19 mm a 63 mm. El valor de trituración del agregado se incrementó 2.5 veces cuando la cantidad de partículas planas aumentó del 0 % al 100 %; en el mismo rango la resistencia al desgaste de Los Angeles vio aumentado su valor en 4 veces. El incremento en el porcentaje de partículas planas origina que también aumente el rompimiento durante la compactación;

la resistencia al corte de las pruebas triaxiales fue más grande con el material plano que con el que no lo era. Como ensaye final el agregado se compactó en una caja y fue sujeto en su superficie a 9000 pasadas con una rueda de goma. La rodera del material plano fue rigurosamente el doble que la del material no plano; el incremento en este efecto se atribuye al alineamiento del material plano.

Siller (1980; citado por Selig y Roner, 1987) advirtió que la cohesión aparente de las pruebas triaxiales en los especímenes de balasto se incrementa con el aplanamiento de las partículas; él le atribuye este incremento a la trabazón entre partículas.

Eerola y Ylojoski (1970; citados por Selig y Roner, 1987) encontraron que la resistencia al corte en prueba triaxial de los especímenes de agregado, se incrementó en proporción a la relación del largo de la partícula con su espesor.

En un estudio europeo (1970; citado por Selig y Roner, 1987) el módulo de elasticidad se calculó de las pruebas de carga sobre especímenes de balasto confinados por anillos de acero. El balasto con partículas planas generalmente dio un módulo de elasticidad menor que el balasto con partículas equidimensionales.

Chen (1948; citado por Selig y Roner, 1987) realizó pruebas triaxiales sobre varias arenas y gravas con densidades en rangos de suelto a compacto; el módulo fue determinado en el vigésimo quinto ciclo, con una carga al 30 % de la resistencia estimada; la resistencia fue subsecuentemente medida por la carga a la falla. El módulo decrece con el incremento de angularidad, pero la resistencia aumenta.

Holtz y Gibbs (1956; citados por Selig y Roner, 1987) llevaron a cabo pruebas triaxiales sobre gravas de formas subangulares y subredondeadas y en cuarzo triturado de formas puntiagudas y angulosas con curvas granulométricas similares; como se esperaba, el material angular tuvo una resistencia alta.

Vallerga et al. (1956; citados por Selig y Roner, 1987) realizaron pruebas triaxiales en areniscas angulares y subredondeadas con diferentes relaciones de vacíos. La resistencia del agregado angular fue significativamente más alta que la del subredondeado. Con el incremento en la rugosidad de la superficie, la resistencia medida por medio del ángulo de fricción interna, se incrementó en cerca de 8 grados.

Pike (1973; citado por Selig y Roner, 1987) realizó pruebas de corte directo sobre 17 agregados en tamaños de partículas que iban desde gravas gruesas hasta arenas finas. El incremento en la angularidad o en la rugosidad de la superficie, generalmente produce un peso específico seco bajo para la misma energía de compactación, pero la resistencia aún así aumenta.

Holubec y D'Appolonia (1973; citados por Selig y Roner, 1987) encontraron que el incremento en la angularidad de las arenas contribuye significativamente al aumento de la resistencia al corte.

Edil y Luh (1978; citados por Selig y Roner, 1987) mostraron que el módulo de corte de las arenas, determinado en una prueba de columna resonante se ve incrementado con el aumento de la redondez (menor angularidad).

Norris (1977; citado por Selig y Roner, 1987) demostró que la resistencia al corte disminuye de manera importante con el incremento de la redondez; el mismo concepto fue demostrado por Frossard (Selig y Roner, 1987).

Koerner (1970; citado por Selig y Roner, 1987) realizó pruebas triaxiales sobre arenas con la misma graduación, pero con distinta angularidad y esfericidad en la partícula. Separó la medida del ángulo efectivo de fricción interna en componentes friccionales y dilatacionales. La componente dilatacional fue aproximadamente independiente de la angularidad, pero la componente friccional se incrementa significativamente con el incremento de la angularidad o con la disminución de la esfericidad para densidades relativas comunes. Los mismos conceptos fueron previamente demostrados por Kolbuszewski y Frederick (1963; citados por Selig y Roner, 1987).

George y Shah (1974; citados por Selig y Roner, 1987) compararon los resultados de pruebas triaxiales en gravas redondeadas con los resultados de las mismas gravas después de cubrir con parafina las partículas. Las partículas parafinadas produjeron resistencias sustancialmente más bajas. Estos investigadores también compararon resultados de pruebas triaxiales en calizas trituradas de forma laminar con los resultados para calizas trituradas gruesas. Aunque fue obtenida la misma resistencia, la dureza fue menor para los especímenes laminares.

Granulometría y tamaño de la partícula.

Roenfeld (1980; citado por Selig y Roner, 1987) llevó a cabo pruebas de carga repetida en balasto de origen calizo. Utilizó dos tipos de especímenes; uno de ellos con un rango estrecho de tamaño de partículas ($C_u = 1.14$); el otro con una granulometría amplia ($C_u = 4.1$) pero con un tamaño medio ligeramente más pequeño. La deformación plástica acumulativa para el balasto uniforme fue casi del doble que la del balasto con granulometría más amplia. Además, la degradación para el balasto uniforme fue 4 o 5 veces más grande que para la del balasto bien graduado.

Klugar (1978; citado por Selig y Roner, 1987) reportó que reemplazando una pequeña cantidad (menor que el 15 %) de partículas alargadas en un espécimen de balasto por partículas pequeñas, se incrementa el ángulo de fricción en las pruebas de corte directo, y que reemplazando una cantidad más grande (mayor que 20 %) se provoca una reducción importante en el ángulo de fricción interna, variando éste a un desplazamiento dado.

Rico et al.(1977; citados por Selig y Roner, 1987) ensayaron 3 granulometrías diferentes de basalto triturado en una celda triaxial de Texas, las comparaciones se hicieron con la misma energía de compactación. Así las relaciones de vacíos y el peso unitario no fueron idénticos. El espécimen de grava de tamaño relativamente uniforme dio una resistencia mucho más alta que el de arena de tamaño uniforme; para el mismo tamaño máximo de partícula (38 mm). El espécimen de granulometría más amplia dio una resistencia mayor que el espécimen de granulometría uniforme.

Marsal (1965) ensayó materiales de enrocamiento de presas con un tamaño máximo de partícula de 20 cm utilizando una gran celda triaxial de alta presión. Obtuvo que la resistencia al corte se incrementa cuando la granulometría se amplía, para el mismo tamaño máximo, aunque la media del tamaño decrece. Marachi et al. (1972; citados por Selig y Roner, 1987) llegó a la misma conclusión después de hacer ensayos con energías de compactación similares, aunque la composición mineralógica y la relación de vacíos no fue la misma para todos los especímenes.

Chen (1948, citado por Selig y Roner, 1987) en pruebas triaxiales encontró que el incremento en el coeficiente de uniformidad aumenta la resistencia al corte, aunque ello no afecta la dureza.

Kirkpatrick (1965; citado por Selig y Roner, 1987) llevó a cabo pruebas triaxiales sobre una arena, con tres diferentes granulometrías, en las que los tamaños máximos y mínimos se mantuvieron constantes mientras que el tamaño medio fue variado. En general, la resistencia al corte se vio aumentada cuando el tamaño medio disminuyó.

Leslie (1963; citado por Selig y Roner, 1987) realizó pruebas triaxiales en suelos granulares en los cuales el tamaño de partícula se mantenía constante mientras que el tamaño máximo era aumentado, lo que incrementaba el tamaño medio y ampliaba la granulometría. Para una energía de compactación comparable, cuando el tamaño medio aumenta la resistencia al corte disminuye.

Ensayes triaxiales en arenas hechos por Koerner (1970, citado por Selig y Roner, 1987) demostraron el pequeño efecto sobre la resistencia al corte de los cambios en los coeficientes de uniformidad para relaciones de vacíos similares. En algunos casos el aumento del coeficiente de uniformidad, a densidades relativas similares, incrementó la resistencia al corte; sin embargo, la resistencia aumentó cuando el tamaño de la partícula disminuyó.

Ensayes triaxiales realizados por Marachi et al. (1972; citados por Selig y Roner, 1987) mostraron que la resistencia se incrementa proporcionalmente a la disminución del tamaño de la partícula. Sin embargo, Dunn y Bora (1972; citados por Selig y Roner, 1987) en ensayos triaxiales previamente descritos, encontraron que la resistencia al corte se incrementa con el aumento del tamaño de la partícula. Finalmente, ensayos triaxiales realizados por Vallerga et al. y Holtz y Gibbs [1956; 1956; citados por Selig y Roner, 1987] muestran el poco efecto de la granulometría sobre la resistencia, por lo que el efecto en la granulometría no es muy clara. La misma conclusión fue indicada por los resultados de corte directo mostrados por Roner (1985; citado por Selig y Roner, 1987).

Aplicación a balasto.

Sobre la base de consideraciones de resistencia, los balastos bien graduados son mejores que los de granulometría uniforme. Sin embargo, en la selección de tamaños otros factores tales como la durabilidad y segregación de tamaños deberán considerarse. Es necesario investigación sobre estos factores antes de poder establecer una granulometría óptima. La literatura actual no provee bases para seleccionar un tamaño óptimo para balasto. Las

características de resistencia y esfuerzo-deformación de los materiales pueden gobernar la selección del tamaño.

Hasta 1986 las especificaciones para balasto de la American Railway Engineering Association (AREA) limitaban la cantidad de partículas aplanadas o alargadas a un 5 % en peso. Por esta especificación deberán ser eliminadas sólo formas extremadamente distorsionadas. En 1986, la AREA adoptó las especificaciones del Cuerpo de Ingenieros, según las cuales las relaciones ancho-espesor (partícula plana) y la relación de largo-ancho (partícula alargada) no deberán ser mayores de 3. En porcentaje de tales partículas se permite hasta un 5 % en peso. Es necesaria investigación adicional para determinar las razones importantes para limitar el uso de balastos con partículas planas en la vía.

Aplicación de análisis petrográficos y la evaluación del funcionamiento del balasto.

La experiencia con análisis petrográficos para evaluación de agregados sugiere que el conocimiento previo de la composición mineral y la textura de la roca, así como de las propiedades físicas tales como planos de estratificación, foliación y porosidad, son útiles en el entendimiento del comportamiento del balasto.

La evaluación petrográfica como medio para predecir el comportamiento de un agregado ha sido reconocida ampliamente por la industria del concreto. Los propósitos del análisis petrográfico son para:

- Determinar las propiedades físicas y químicas del material.
- Describir y clasificar los constituyentes de la muestra.
- Determinar las cantidades relativas de los constituyentes de la muestra, lo cual es esencial para la propia evaluación de la muestra, especialmente cuando las propiedades de los constituyentes varían significativamente.

Un método de evaluación numérica de la calidad de los agregados usado para concretos sobre la base de análisis petrográficos fue desarrollado por la Sección de Investigación y Materiales del Departamento de Carreteras (DOH) de Ontario. Este método está basado en estudios extensivos del rendimiento en campo de agregados usados en concreto y

pavimentos bituminosos. Así, una muestra de agregado es primero examinada por su composición (ejemplo, tipo de roca) y entonces se le asigna un factor basado en la experiencia, considerando el rendimiento de similares tipos de roca. Los tipos de rocas a ser considerados excelentes dan valores cercanos a 1 y los considerados como pobres, aproximadamente 6 (Boucher y Selig, 1987). Este número es entonces multiplicado por el porcentaje de cada tipo de roca en la muestra arrojando un valor total. El número petrográfico (NP) es la suma de todos los componentes de la muestra; este número se usa como una indicación de la calidad para la muestra. Después de varios años de usar este método el Departamento de Carreteras de Ontario da varias conclusiones:

- El análisis petrográfico es la más significativa de todas las pruebas de calidad. La evaluación está basada en el comportamiento en campo y considera las propiedades físicas y químicas del agregado.
- El análisis petrográfico es el método más rápido.
- Sus resultados son más seguros para prever un mejor rendimiento que los de abrasión o absorción.
- La técnica es adaptable tanto a laboratorio como a campo.
- El método puede usarse para asegurar y mantener la calidad de un agregado tomando en cuenta ensayos previos de materiales conocidos.

Raymond (1985; citado por Boucher y Selig, 1987) indica que el análisis petrográfico es el mejor índice en la selección de una cantera adecuada para balasto y también puede ser usado para predecir la forma y la permeabilidad de los componentes del futuro balasto.

Los ferrocarriles del Pacífico Canadiense (CPR) han incluido análisis petrográficos en sus especificaciones para balasto. Los requerimientos de la **CPR** para el análisis petrográfico de un balasto incluyen:

- Descripción del tipo de roca, incluyendo mineralogía, textura y estructura.
- Descripción de las propiedades mecánicas incluyendo, dureza, forma y tipo de fractura.

- Descripción de las propiedades químicas, incluyendo presencia y potencial de alteración química.
- Características del material fino, incluyendo forma y potencial de su intemperismo.
- Estimación de resultados de pruebas índice.
- Recomendación para ensayos especiales si es necesario.

La descripción de un análisis petrográfico completo incluye:

- 1.- Identificación del tipo de roca.
- 2.- Mineralogía de la roca incluyendo proporciones de los minerales presentes.
- 3.- Textura, incluyendo tamaño del grano, forma, orientación, relaciones mutuas y materiales de la matriz.
- 4.- Estructura, estratificación, fractura, crucero y planos de foliación.
- 5.- Estimación de propiedades mecánicas incluyendo dureza, resistencia, brillo y características de fractura.
- 6.- Propiedades químicas que puedan afectar la alteración y potencial de intemperización por medios químicos.
- 7.- Propiedades de los finos producidos incluyendo graduación, permeabilidad y susceptibilidad a solución o cementación.
- 8.- Interpretación o predicción de resultados de pruebas físicas e identificación de pruebas especiales que sean requeridas.

Identificación del balasto.

Las rocas pueden consistir de un solo mineral, pero generalmente están constituidas por un arreglo de minerales. Un mineral es un sólido homogéneo con una definida composición química y una colocación atómica ordenada. Por ejemplo, la calvita y la aragonita ambos están compuestos de carbonato de calcio, pero tienen diferentes arreglos atómicos, lo cual produce dos minerales que tienen diferentes propiedades físicas, de crucero, dureza y gravedad específica.

Las rocas se clasifican generalmente por su textura y su composición mineralógica. La textura de una roca es la relación entre los cristales minerales que la forman; una descripción de una textura de una roca generalmente incluye tamaño del grano (cristal), forma del grano, grado de cristalinidad (relación de vidrio a cristal) y la relación de contacto de los granos. La presencia de vacíos o fracturas se incluye en la descripción de la estructura de la roca, pero generalmente no se considera cuando se nombra o clasifica una roca. Dos rocas con similar composición mineral pero con diferentes texturas podrían tener diferentes nombres. Inicialmente, según su modo de formación, las rocas pueden ser agrupadas en tres principales grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Cada tipo es dividido en otras clasificaciones, de acuerdo con su textura y composición.

Los análisis petrográficos basan el estudio de una roca en especímenes de "mano" y de "sección delgada". Los análisis de una muestra de mano dan una indicación aproximada de la composición y de la textura de la roca. El análisis de la sección delgada permite una mejor precisión de los constituyentes y de la textura de la roca.

Una sección delgada es una sección representativa de una roca que ha sido cortada, montada en un vidrio deslizante y con espesor estándar de 0.03 mm; a este espesor muchos minerales transmitirán luz. La sección delgada puede ser examinada usando un transmisor de luz, microscopio polarizado. La roca es identificada en parte por su composición mineral la cual puede ser determinada de una sección por tipo de cristal o forma de grano, tamaño del grano, crucero, color en luz plana, pleocroísmo, birrefringencia, ángulo de extinción, índice refractivo. Una sección delgada puede también teñirse para distinguir los minerales de carbonato y feldespato.

También en la identificación de una roca son importantes la estratificación, foliación, textura, porosidad y la presencia de fósiles o fragmentos fósiles y peloides.

Aspectos básicos del balasto.

El balasto es un elemento esencial en la vía y su comportamiento está influenciado por condiciones de campo que incluyen:

- Magnitud de cargas por eje y número de repeticiones.
- Características de la vía.
- Propiedades de la subrasante.
- Factores ambientales.
- Condiciones de la vía incluyendo drenaje.

y por las características de su naturaleza, como son:

- Tipo de roca y características físicas.
- Tamaño y forma de la partícula.
- Granulometría.
- Relación de vacíos.

El comportamiento del balasto será diferente para las mismas características del mismo si las condiciones de campo cambian, aunque los tipos de roca pueden variar con las condiciones del lugar.

Los análisis petrográficos sólo dan información del tipo y características físicas de la roca. Además el tipo de roca no es un factor crítico en todos los aspectos del funcionamiento del balasto. Por esto los análisis petrográficos solos no pueden proveer suficiente información para predecir el funcionamiento del balasto. Lo mismo sucede con las pruebas usadas comúnmente, como la abrasión de Los Angeles y la de Mill; no obstante, los análisis petrográficos y las pruebas índice desempeñan roles potencialmente importantes en la predicción de su comportamiento.

Evaluación de materiales de balasto.

El funcionamiento del balasto cuando está sujeto a esfuerzos físicos de carga y a efectos físicos y químicos del medio ambiente, depende en gran medida de sus propiedades mineralógicas, químicas, texturales y estructurales, las cuales pueden ser determinadas

fácilmente con análisis petrográficos; un petrógrafo experimentado podría ser capaz de prever al menos cualitativamente el comportamiento potencial del balasto y una razonable explicación de la falla o durabilidad del mismo en secciones de vía. Otras propiedades que son importantes como la distribución y tamaño de la partícula, su forma y su densidad relativa pueden ser cuantitativamente determinadas e incorporadas en una evaluación más completa.

La mineralogía es un factor importante en la determinación de la dureza de la roca y de su durabilidad física, potencial al intemperismo físico, composición y cantidad de finos derivados y grado de susceptibilidad a humedecimiento y secado. La textura de la roca también afecta la dureza y es importante en la influencia de la resistencia, susceptibilidad a la degradación por congelamiento o deshielo, y la estabilidad mecánica en la vía. Muchas de las pruebas estándar comúnmente aplicadas a materiales de balasto esencialmente incluyen una medición de una combinación de propiedades petrográficas; consecuentemente, los resultados de las pruebas pueden ser predichos dentro de ciertos límites. Numerosas técnicas, incluyendo el uso de microscopios y equipo de difracción de rayos X, pueden ser aplicadas en el estudio de la fracción de finos de muestras de la vía para determinar el origen del material.

La petrografía es la rama de la geología que trata de la descripción sistemática de los materiales de roca y especímenes de mano. En algunos casos, un estudio petrográfico puede tener una amplia extensión e incluir sofisticadas técnicas de examen como difracción por rayos X y análisis químicos. La petrografía es calificada por Watters (1987) como uno de los más importantes aspectos para la evaluación de los materiales de balasto, tanto para el balasto probable como para el que se encuentra en operación.

Los resultados de muchas de las pruebas físicas y químicas comúnmente aplicadas a materiales de balasto (abrasión de Mill y de Los Angeles, sulfato de magnesio, absorción) se relacionan con valores cuantitativos de las propiedades petrográficas, por lo que es posible predecir dentro de ciertos límites los resultados de estas pruebas. Se puede decir que un análisis petrográfico puede ser la primera etapa en la evaluación de materiales de balasto y constituir la base para realizar pruebas adicionales.

Producción y ensayos a balastos.

El método tradicional para seleccionar balasto está basado en ensayos físicos de especímenes representativos que aseguren que los materiales tienen una adecuada resistencia al desgaste, resistencia y estabilidad física, en consonancia con un criterio predeterminado. Pruebas como intemperismo acelerado o resistencia a la abrasión proporcionan evidencia indirecta de como debe esperarse que cambien en la estructura de la vía las propiedades del balasto. Ninguna de estas pruebas es comúnmente empleada, exceptuando a la de granulometría, que da una información directa que explica el comportamiento físico y la estabilidad química de un banco de balasto, aunque ello no es ninguna guía que el ingeniero pueda utilizar en la selección de la granulometría más económica o el método de trituración para el banco.

Muchas de las propiedades fundamentales de la roca son gobernadas por el origen, alteración y condición actual de la masa. Estas características, sumándoles el conocimiento de la petrografía, dan una idea de las propiedades mecánicas y ayudan en el establecimiento de juicios que se hagan sobre un banco en particular de balasto a ser explotado. Esto incluye las operaciones de planeación de la explotación, el diseño de la trituración, la selección de las granulometrías y las especificaciones. Todas las propiedades del balasto se controlan por estos orígenes geológicos y ambiente físico en el cual se coloca; así, el conocimiento de la geología es esencial en la localización de un banco de balasto, sus métodos de producción, las especificaciones de colocación y la interpretación de los resultados de las pruebas de control de calidad.

Características deseables en un balasto.

- 1.- Duro, resistente a la abrasión; que la partícula soporte el impacto.
- 2.- Una masa intacta sin poros o defectos intercrystalinos, que resista los efectos del congelamiento y deshielo.
- 3.- Que sea químicamente estable.
- 4.- Que sea físicamente estable, que resista soluciones, fractura y otras formas de rompimiento de la partícula.

- 5.- Que sea denso y rugoso para que proporcione una estabilidad adecuada.
- 6.- Que se componga de material que no contenga exceso de partículas alargadas o aplanadas.
- 7.- Resistente al pulimento de la superficie.
- 8.- Permeable, capaz de drenar rápidamente.
- 9.- Que posea una graduación adecuada, que deje pasar los finos y el agua, pero que sea suficientemente uniforme y fácil en su manejo.
- 10.- Consistente; que tenga las mismas cualidades en todo el balasto.
- 11.- Que no sea reactivo y que tenga baja conductividad eléctrica, para prevenir el daño a los rieles, durmientes y sistemas eléctricos.
- 12.- Resistente a la abrasión, pero que su rompimiento preferiblemente produzca finos inertes.

Klassen et al. (1987) reportaron un gran número de observaciones en excavaciones en zanja hechas en balasto, subbalasto y subrasantes, en un amplio tipo de suelos y contenidos de agua. No verificaron los casos de la incrustación del subbalasto en la subrasante o de la incrustación del balasto en el subbalasto. El modo de falla comúnmente observado fue el de la abrasión de la partícula y la fractura relacionada con los vacíos, y con los finos cementantes causados por la degradación del balasto. Así, se juzgaron cualidades relacionadas con la resistencia al desgaste, resistencia a la fractura y la naturaleza de los finos para garantizar una extensión en la vida del balasto.

2. Descripción del material utilizado para balastado.

2.1 Localización y muestreo.

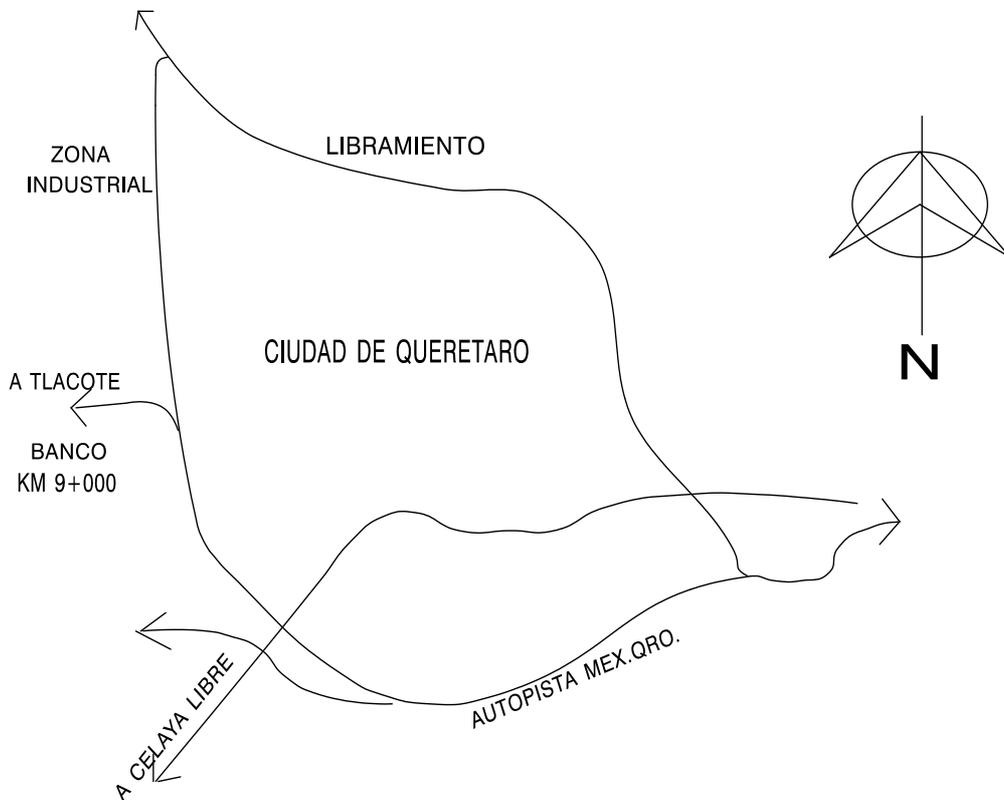
Para la localización y selección de bancos de materiales para muestreo de material para balasto se consultó el “Catálogo de Bancos de Materiales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes”, con el fin de tomar en cuenta los bancos que producen este tipo de material. Además se consideraron algunos bancos de materiales en el Estado de Querétaro que actualmente se encuentran en explotación produciendo material de balasto para ferrocarril.

Fue seleccionado el banco "Tlacote", debido a que en él actualmente se está explotando y triturando material para balasto. Se muestreó material de dicho banco y se realizaron las correspondientes pruebas de calidad según Normas de la SCT, con buenos resultados el banco "Tlacote" por lo que fue seleccionado para posteriores muestreos.

El muestreo del material se realizó de tal manera que se incluyera predominantemente material de tamaño menor que dos pulgadas (2"). A dicho material se le realizó un cribado a través de la malla Núm. 4 (4.76 mm), separando la fracción que pasó dicha malla y al retenido se le realizó un lavado, con el fin de quitarle las partículas finas adheridas al mismo; después fue extendido y secado al aire para continuar con la separación por tamaños. Posteriormente, haciendo uso de un juego de mallas, se efectuó el cribado correspondiente a partir de la malla de dos pulgadas (2") y se separó por tamaños en diferentes charolas, para así realizar la dosificación de la granulometría a utilizar en el programa de ensayos. De manera similar, al material que pasó la malla Núm. 4 se le clasificó por tamaños y se almacenó en charolas para su posterior utilización en la dosificación de granulometrías de balasto, las cuales fueron probadas de acuerdo con el programa de ensayos.

El material que pasó la malla Núm. 200 (0.074mm), fue desechado, debido a que es perjudicial en el comportamiento de un balasto.

A continuación se muestra un croquis de localización del "Banco Tlacote".



2.2 Tipos de material para balasto.

2.2.1 Balasto.

El material del que están construidas las terracerías (cortes y terraplenes) no es lo suficientemente firme para sostener los durmientes directamente, y como además no se drena rápidamente, puede ser aflojado por las lluvias. Por esta razón el subbalasto o cama de la vía se cubre con una capa de material suelto llamado balasto. El balasto es un material selecto que está compuesto de partículas duras, fuertes y durables y libre de cantidades excesivas de materias extrañas perjudiciales. Las funciones principales del balasto son:

- Distribuir las cargas de los trenes adecuadamente sobre las terracerías.
- Mantener el alineamiento y elevación de la vía.
- Drenar eficientemente el agua de la vía.

Descripción del material utilizado para balastado

El balasto forma la base que sostiene la estructura de la vía, la que a su vez recibe el peso del tráfico de trenes. Dependiendo de la intensidad del tráfico, del peso de los trenes y de la velocidad de los mismos se pueden usar diferentes tipos de balasto. Los principales materiales usados como balasto en orden de su valor son piedra triturada, grava lavada, grava de fundición y grava simple.

2.2.1.1 Piedra triturada.

Para una vía de primera clase en la que los trenes de carga y de pasajeros son frecuentes y circulan a altas velocidades, el balasto de piedra triturada es indispensable, aunque es el más caro. Este balasto mantiene la vía nivelada y alineada mejor que cualquier otro material y no tiene prácticamente finos. Generalmente se usa una calidad de piedra dura, en tamaños normalmente de 2 1/2" a 3/4". Este balasto permanecerá dando buen servicio por varios años. Como la tierra, yerbas, etc. se acumulan con el tiempo, evitando un buen drenaje del agua de lluvia, el balasto de la vía deberá limpiarse y se colocará el que sea necesario para dar los niveles requeridos.

2.2.1.2 Grava.

La grava lavada y con una buena graduación de tamaños es casi tan buena como la piedra triturada. Se acomoda perfectamente en la vía con equipo mecánico y mantiene un buen alineamiento y nivel. La grava simple tal y como sale del banco de explotación generalmente tiene un alto porcentaje de arena y tierra; este material no drena bien y sufre acomodamientos que generalmente desnivelan la vía. Por estas razones este balasto requiere más trabajo de conservación. Puede usarse también grava de río, siempre que no contenga limo, arcilla o materias vegetales. Deberá tener un tamaño máximo de 3 pulgadas y contener arena de preferencia gruesa, hasta en un 40%; este balasto se calza bien y da muy buen resultado.

2.2.1.3 Grava de fundición.

En zonas donde hay grandes fundiciones se puede obtener este balasto pero deberá ser seleccionado cuidadosamente. La grava triturada mantiene la vía en su lugar, drena

perfectamente y es un material duro y con poco polvo. Sin embargo, hay cierto tipo de grasa que se desintegra rápidamente, razón por la cual la selección deberá ser cuidadosa.

2.2.1.4 Misceláneo.

Los demás materiales usados para balastar, como arena, desperdicios de fundición, etc., sólo se usan como balasto en ramales no importantes. Son usados como subbalasto en aquellos lugares en donde existe terracería arcillosa, donde se forman bolsas de agua o donde el material de la subrasante se reblandece incrustándose en él el balasto de piedra triturada.

2.2.1.5 Limpieza del balasto.

La limpieza periódica del balasto en la vía es esencial y se considera de tal importancia que muchas empresas ferrocarrileras tienen reglas definidas que indican la manera de hacer el trabajo y el espesor al que se debe llevar la limpieza. El método acostumbrado para limpiar el balasto de piedra triturada es por medio de bieldos, usándose algunas veces cribas. En la actualidad se hace la limpieza con máquinas adecuadas y la profundidad a que se realiza la limpieza es variable, pero por regla general debe ser hasta la cara inferior del durmiente en los espacios entre durmientes.

2.2.1.6 Fuentes de aprovisionamiento.

El balasto deberá cumplir con las especificaciones estándar. Es indispensable tener un aprovisionamiento continuo, uniforme y suficiente de balasto en la temporada de cambios de este material, de tal modo que las necesidades queden ampliamente cubiertas.

2.3 Calidad del material según normas de la SCT.

Materiales para balastado. Las especificaciones actuales (SCT, 1981) indican que los materiales que se utilicen como balasto deberán cumplir con los siguientes requisitos:

Descripción del material utilizado para balastado

a) **De granulometría.** De acuerdo con el tamaño máximo, el material deberá ajustarse con alguna composición granulométrica de las que se citan en la Tabla 2.1.

Las partículas que pasen la malla Núm. 4 deberán tener un equivalente de arena no menor de ochenta por ciento (80 %).

TABLA 2.1 GRANULOMETRIAS PARA BALASTO SEGUN NORMAS S.C.T.

DENOMINACION	POR CIENTO EN PESO QUE PASA LA MALLA DE				
	76.1 mm	64 mm	50.8 mm	38.1 mm	25.4 mm
	3"	2 ½"	2"	1 ½"	1"
1	100	90 - 100	---	25 - 60	
2		100	95 - 100	35 - 70	0 - 15
3			100	90 - 100	20 - 55
4				100	90 - 100
5				100	95 - 100

Continuación de la Tabla 2.1

DENOMINACION	POR CIENTO EN PESO QUE PASA LA MALLA DE				
	19.0 mm	12.7 mm	9.51 mm	4.76 mm	2.38 mm
	¾"	½"	⅜"	No. 4	No. 8
1	0 - 10	0 - 5	---	---	---
2	---	0 - 5	---	---	---
3	0 - 15	---	0 - 5	---	---
4	40 - 75	15 - 35	0 - 15	0 - 5	---
5	---	25 - 60	---	0 - 10	0 - 5

b) **De peso.** El material pétreo ligero o el material de alto horno que se emplee para balasto, deberá tener un peso volumétrico cuando menos de mil cien kilogramos por metro cúbico (1100 kg/m³), determinado por el método de prueba de peso en estado compacto.

c) De desgaste. Máximo cuarenta por ciento (40%), determinado por la prueba de Los Angeles.

d) De índice de durabilidad. Mínimo treinta y cinco por ciento (35%).

e) De intemperismo acelerado. Máximo diez por ciento (10%).

f) De forma de la partícula. El material deberá contener como mínimo el sesenta por ciento (60%), en peso, de partículas angulosas o trituradas, con objeto de que sea altamente friccionante.

A los materiales utilizados como balastos se les determinarán, además de las pruebas de calidad señaladas anteriormente, las pruebas de equivalente de arena y pesos específicos relativos y absorción; las cuales serán realizadas tomando en cuenta los procedimientos indicados en las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes

2.4 Ensaye de carga puntual.

En la ingeniería práctica la resistencia de la roca es considerada como una propiedad importante y un adecuado índice para la clasificación de las rocas (ver Figura 5.2, pág. 65).

La prueba de carga puntual es un intento para medir la resistencia de especímenes de roca. En ella éstos se sujetan a cargas concentradas a través de dos piezas cónicas. Las muestras pueden ser cilíndricas (corazones) o fragmentos de forma irregular.

El índice de resistencia por carga puntual es una medida para la determinación de la resistencia de la roca y además sirve para estimar la resistencia de la misma en la prueba de compresión sin confinar. La prueba consiste en colocar especímenes en el aparato de carga puntual, aplicándoles carga por medio de un gato hidráulico hasta llevarlos a la falla; dicha carga es registrada en el manómetro que tiene acoplado el aparato. Previamente se le determinan a los especímenes sus dimensiones, sección transversal promedio y espesor, con el fin de estimar el área y corregirla, según lo indica el procedimiento de prueba (Broch y Franklin, 1972). Con los datos anteriores, se puede calcular el índice de resistencia por carga puntual haciendo uso de la fórmula:

$$I_s = P / D_c^2$$

Descripción del material utilizado para balastado

donde: I_s = Índice de resistencia por carga puntual.
 P = Carga aplicada en la rotura.
 D_e = Diámetro equivalente.

Para obtener el diámetro equivalente se utiliza la siguiente expresión, $D_e^2 = 4 A / \pi$, siendo A , el área de la sección transversal mínima.

3. Método de prueba.

3.1 Descripción de la prueba.

Después del muestreo correspondiente se procedió con el cribado para separar por tamaños el material, además de realizar las pruebas de laboratorio recomendadas para conocer su calidad, antes de los ensayos de rotura de granos. Ya cribado el material se procedió a la dosificación de la granulometría de balasto, la cual corresponde a la denominación **D4** de las normas de la **SCT**. El balasto de denominación D4 está ubicado en una zona granulométrica, establecida por especificaciones; el balasto en estudio presenta la curva granulométrica que se desarrolla en la parte media de la zona en cuestión. En la Figura 3.1 se muestra la gráfica correspondiente a la granulometría D4-SCT.

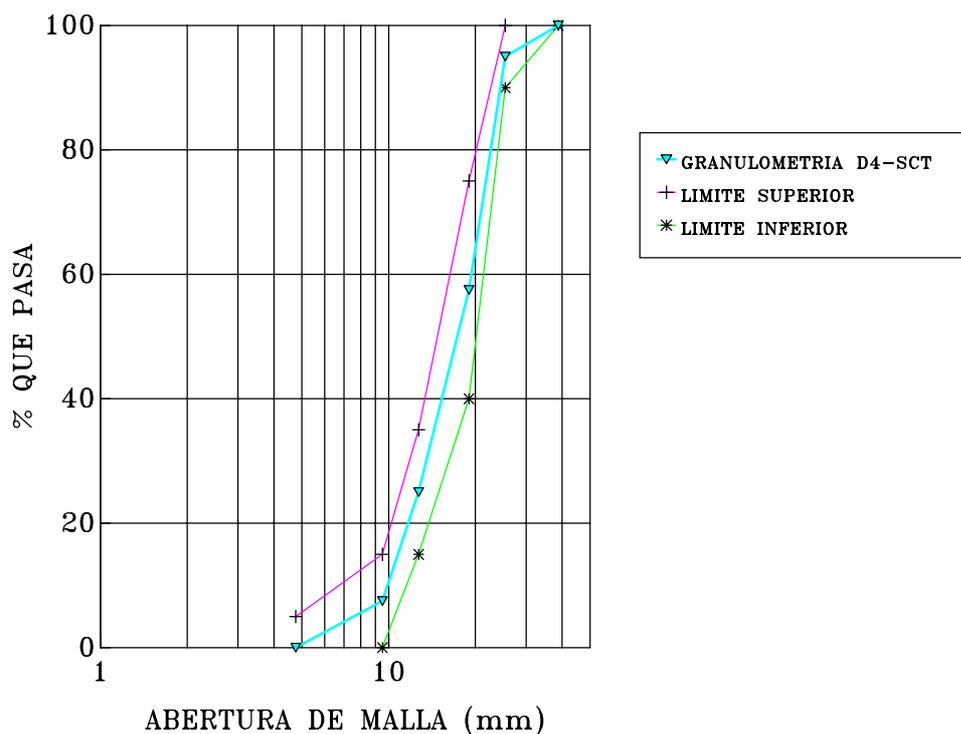


Figura 3.1 Granulometría de diseño (D4-SCT)

Con la dosificación de la granulometría se elaboraron las probetas para realizar los ensayos bajo carga repetida.

3.2 Marco de carga.

El Sistema Dinámico de Ensaye a Materiales, INSTRON Modelo 8503, es una consola de control avanzado mediante un multiprocesador, el cual proporciona un completo control digital del sistema de ensayes.

Los dos principales componentes son el panel frontal (para la interacción con el operador) y la torre de consola.



Figura 3.2 Marco de carga y muestra a ser ensayada en prueba de rotura de granos.

3.3 Montaje de la muestra.

Una vez lograda la granulometría correspondiente a la denominación del ensaye, se procedió a obtener el peso volumétrico seco suelto y compacto (PVSS y PVSC) para compararlos con los que se obtengan después de realizar el ensaye de rotura de partículas. Después se coloca en el molde de prueba la placa inferior, la cual se apoya en tres varillas que evitan su caída, posteriormente, dentro del molde se coloca el material en estado suelto y se procede a enrasarlo manualmente para colocar la placa superior y la placa guía. Con la ayuda de una grúa se sujeta al molde con la muestra y se procede a colocarlo en el marco de carga. Para los ensayos con placa antifriccionante (teflón) el molde se engrasa en su pared interior y se cubre con placas de teflón la superficie del mismo. Hecho esto, se enciende la bomba hidráulica, el sistema electrónico y el actuador. Se definen los parámetros de prueba: frecuencia, carga, límites de posición y de carga, duración y se calibra la celda automáticamente. Posteriormente, se eleva el pistón a la posición adecuada y se inicia el ensaye.



Figura 3.3 Detalle del material de balasto utilizado (D4-SCT) con placa antifriccionante.

Los ensayos de ambas series, con y sin teflón, comprenden tiempos de duración de 2, 4, 8, 16 y 24 horas. Terminado el proceso de ensaye en el marco de carga, se procede a desmontar el conjunto de molde y muestra, haciendo uso de la grúa. Se extrae el material del interior del molde y enseguida se obtiene su granulometría, para posteriormente comparar ésta con la granulometría inicial. La diferencia en las granulometrías es expresada en términos de rotura de granos, B, que es el resultado de la suma de las diferencias positivas entre los porcentajes retenidos de la muestra original y los de la muestra después de ser ensayada.

Efectos de escala.

Holtz y Gibbs (1956; citados por Marsal, 1972) realizaron investigaciones sobre el efecto de la relación del diámetro de la probeta (dp) y el tamaño máximo de los agregados (dg) en los resultados de pruebas triaxiales, concluyendo que la dimensión de la probeta no influye, siempre que sea suficientemente grande comparada con el diámetro nominal de la fracción gruesa (FG). Pero si la relación dp/dg es menor de 5 y el suelo tiene altos porcentajes de partículas grandes ($FG > 30\%$), la influencia da por resultado que la resistencia al corte aumenta en forma significativa.

Tomando en cuenta los estudios experimentales realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Marsal, 1972) sobre los efectos de escala, tanto en compresión unidimensional como del tipo triaxial, los resultados indican como adecuada la relación de diámetro de la probeta entre tamaño máximo del agregado de 8 a 10 veces [$(dp/dg) \geq 8$].

Dimensión de la probeta.

Considerando que tanto el balasto bien graduado, propuesto por el Instituto Mexicano del Transporte, como el balasto de denominación D4 de la SCT, tienen tamaño máximo de agregado de $1\frac{1}{2}$ ", dicho tamaño se consideró para la realización del molde de prueba en el cual se contemplaron los efectos de escala

Por lo anterior, se construyó un molde cilíndrico de acero con un diámetro que cumpliera con una relación de aproximadamente 8 veces el tamaño de la partícula. Las dimensiones del molde de prueba son:

- Altura 50 cm.
- Diámetro 30 cm.
- Tamaño máximo de la partícula 3.75 cm.

3.4 Programa de ensayos.

Considerando que en la rotura de partículas intervienen diferentes variables, las cuales influyen en mayor o menor grado para que se presente el fenómeno, en la elaboración del programa de ensayos por realizar se han elegido como constantes la magnitud de la carga aplicada y la distribución granulométrica del material, ya que son los que mayor influencia tienen en esta prueba. Para esto, sólo se utilizará material del mismo banco, el cual tendrá en condiciones iniciales la misma granulometría (balasto denominación D4-SCT), y la magnitud de la carga aplicada será de 12.0 toneladas, la cual transmite al material un esfuerzo de 16.45 kg/cm^2 .

Determinación del esfuerzo en la base del durmiente (balasto).

PRIMER METODO (Togno, 1982). Usando la fórmula de DRESSEN.

Se conoce el tipo de locomotora más pesada y su velocidad máxima así como la clase de durmiente y el espaciamiento entre ellos.

Peso de la locomotora No. NM 11001 = 168.8 ton con base rígida con 6 ejes de 275 cm y operando a 110 km/hr.

El esfuerzo es soportado por $2/3$ del área del durmiente (20cm x 20cm x 240 cm) con espaciamiento entre ellos de 50 cm.

Datos:

$$P_{\text{máx.}} = W \times K / n$$

$$K = 1 + V^2 / 30000$$

$$n = d / e$$

donde;

Método de prueba

P_{máx.} es la carga máxima aplicada, kg.

W es el peso por eje en kg (28,130 kg)

K es el factor de impacto

V velocidad de operación en km/hr

d distancia de los ejes, (275 cm)

e es el espaciamiento entre durmientes, (50 cm)

Solución:

$$\text{Area de apoyo} = (20\text{cm} \times 240\text{cm}) \times 2/3 = 3200 \text{ cm}^2$$

$$K = 1 + 110^2 / 30000 = 1.403$$

$$n = d/e = 275/ 50 = 5.5$$

$$P_{\text{máx.}} = 28130 \times 1.403 / 5.5 = 7175.71 \text{ kg}$$

$$\text{Esf. máx.} = 7175.71\text{kg}/3200\text{cm}^2 = 2.25 \text{ kg/cm}^2$$

$$\textbf{\underline{Esfuerzo máximo en el balasto = 2.25 kg/cm}^2}$$

SEGUNDO METODO (Crespo, 1986). Consideraciones: La carga por eje es afectada por un factor, incrementándose ésta en 20 % y el área del durmiente que soporta la carga es la que corresponde a los tercios extremos del mismo (2/3 del área total). Se considera también que el durmiente bajo el eje cargado soporta 0.4 de la carga y hacia los durmientes externos va disminuyendo cargando 0.2 y 0.1 respectivamente.

Con los datos utilizados en el primer método se tiene:

$$\text{Carga máxima por eje} = 28130 \text{ kg} \times 1.20 = 33756 \text{ kg}$$

$$\text{Esf. máx en la base del durmiente} = 33756 \times 0.4 / 3200\text{cm}^2 = 4.22 \text{ kg/cm}^2$$

$$\textbf{\underline{Esf. máx en la base del durmiente = 4.22 kg/cm}^2}$$

Tomando en cuenta que el balasto utilizado es de buena calidad y para que se garantice la rotura de partículas durante el experimento, se utiliza un esfuerzo mayor que el obtenido con los cálculos anteriores. Con la máquina Instron se aplicó entonces, en todos los ensayos, la carga seleccionada que corresponde a 12 toneladas, la cual le transmite al espécimen un esfuerzo de 16.45 kg/cm².

Se efectuaron dos series de pruebas considerando ensayos con tiempos de 2, 4, 8, 16, y 24 horas de duración; una serie usando teflón como placa antifriccionante y la otra sin él. Lo anterior, es para estimar si existe un fenómeno de arqueo en las probetas debido a la fricción que se genera entre las partículas (balasto) y la pared del molde.

Una tercera serie de pruebas con los mismos tiempos de duración y parámetros de prueba ya señalados y haciendo uso del teflón como placa antifriccionante, se efectuaron en el material de balasto bien graduado propuesto por el Instituto Mexicano del Transporte.

Los resultados de rotura de granos de las series de pruebas a material de balasto D4-SCT son comparados con los obtenidos en el balasto bien graduado propuesto por el Instituto Mexicano del Transporte, para comprobar si la uniformidad del material es perjudicial en el comportamiento del balasto. La buena graduación del material le produce un mayor número de contactos entre sus partículas, lo cual reduce significativamente la rotura de granos debido a que hay una menor concentración de esfuerzos en el balasto bien graduado.

En la realización de los ensayos de rotura de granos, la carga aplicada es generada con la máquina Instron utilizando ondas de tipo trapecial, las cuales de alguna manera reflejan el fenómeno de la carga del ferrocarril sobre la estructura ferroviaria. La frecuencia de aplicación de la carga está en función de la velocidad de operación del ferrocarril y en este caso corresponde aproximadamente a 0.84 ciclos/seg.

Para aplicar la carga de 12.0 toneladas se utilizó la del tipo de rampa, la cual se aplica con una velocidad constante hasta lograr las 12.0 ton, después es sostenida la carga por un espacio de tiempo para nuevamente volver a descargarse con la misma velocidad. Lo anterior, genera cargas del tipo trapecial las cuales tienen las siguientes características:

- Primera rampa, aplicación de la carga con una velocidad de 24 ton/seg hasta alcanzar la carga de 12.0 ton.
- Se mantiene la carga de 12.0 ton por espacio de 0.1 seg.
- Segunda rampa (descarga), disminución de la carga con la misma velocidad de aplicación hasta una carga de 0.0 ton.

Los parámetros para la aplicación de la carga pueden observarse en la Figura 3.2.

Se consideraron también dos series de pruebas de carga puntual, con el fin de observar cual es la carga que genera la ruptura del material. Un aspecto importante que se puede obtener con el índice de carga puntual es el relacionado con la calidad de la roca, así como la estimación de la resistencia de la roca si se le sometiera a una prueba de compresión sin confinar.

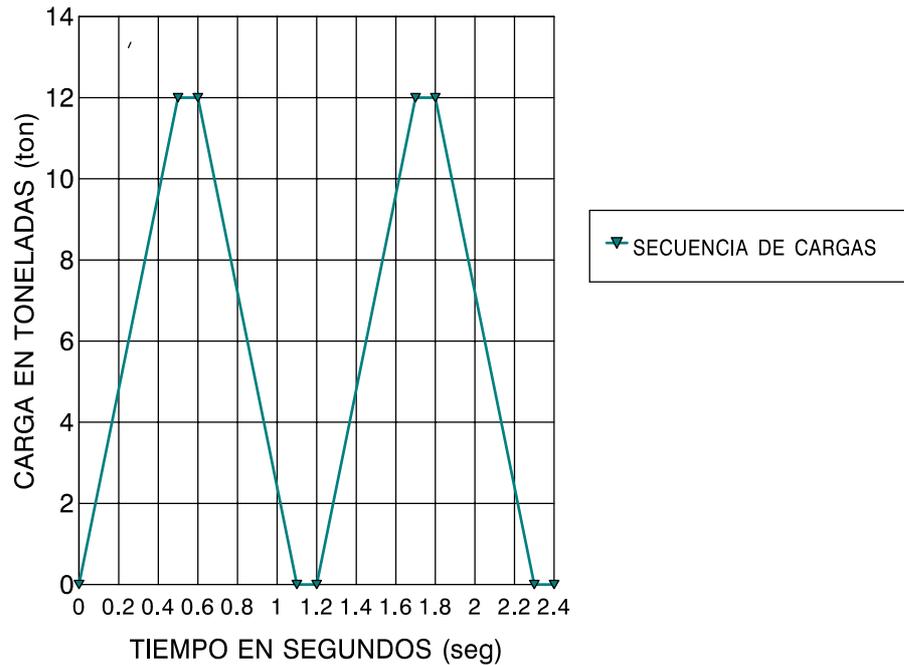


Figura 3.2 Diagrama de la secuencia de cargas.

3.5 Definición del coeficiente de rotura de granos.

Coefficiente de rotura de granos "B".

Como medida de rotura de granos se toma la suma de las diferencias de un mismo signo, entre los porcentajes retenidos de la muestra original y los del espécimen después de ser ensayado. Según puede observarse en el ejemplo de la Tabla No. 3.1, la suma de las diferencias positivas y la de las negativas son en valor absoluto iguales; por lo tanto, ambas representan al parámetro B. Se atribuye a B el signo positivo cuando ocurre fragmentación de partículas (rotura de granos) y el negativo para el caso poco común de aglutinarse los granos (Marsal, 1965).

**TABLA 3.1 DETERMINACION DE LA ROTURA DE GRANOS
EN MATERIAL DE BALASTO.**

MALLA No. 4	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.744	0.256	95.26
3/4"	37.0	37.616	-0.616	57.65
1/2"	33.0	28.525	4.475	29.13
3/8"	17.5	16.535	0.965	12.60
No. 4	7.5	10.039	-2.539	2.57
PASA No. 4	0.0	2.538	-2.538	---

ROTURA DE GRANOS B = 5.69 %

4. Resultados de laboratorio.

4.1. Fenómeno de arqueo.

En la naturaleza las rocas están sujetas a su propio peso y al peso de las masas sobreyacentes; como consecuencia, en su interior se desarrollan esfuerzos y deformaciones entre las partículas individuales constituyentes. Mientras la roca o un suelo duro estén confinados, no podrán producirse los desplazamientos interparticulares necesarios para que se desarrollen los estados de deformación correspondientes a los esfuerzos actuantes, por lo que estos se acumulan o almacenan en el material, pudiendo llegar a valores muy elevados, muy por encima de los límites de fluencia. Tan pronto como este material se libera, ocurrirán en desplazamientos en forma de flujos plásticos o, inclusive, de explosiones, en las que fragmentos de la roca o del suelo duro pueden ser proyectados violentamente; sólo si los esfuerzos residuales no han sobrepasado el límite elástico del material, ocurrirán desplazamientos en el rango elástico.

Las excavaciones que se efectúan en el interior de la masa crean siempre un espacio vacío hacia el que se posibilitan los desplazamientos; a la vez, los pesos de los materiales suprayacentes actúan como una carga repartida sobre el techo de la excavación producida. La resistencia del suelo o de la roca proporciona los elementos resistentes casi en nada movilizadas antes de la excavación como consecuencia de la situación prevaleciente de deformación impedida. Para mantener el orificio practicado, por ejemplo un túnel, el cual tratará de cerrarse por sí mismo, suele ser necesario emplear elementos de retención. Las presiones de roca o suelo que se ejercen sobre los ademes después de excavar un túnel (Terzaghi, 1942, citado por Juárez y Rico, 1987) se expresan como el peso de una masa de una cierta altura sobre el túnel; se considera que esta es la masa que se caería en primera instancia si no se colocara ningún ademe. Las deformaciones del sistema de soporte producen arqueo posterior de la masa sobre el techo y alivio de la presión.

4.1.1. Descripción del fenómeno.

Cuando se afloja una masa de roca o suelo firme sobre el techo de un túnel, por efecto de la excavación y del peso de la carga sobreyacente, el comportamiento de esa masa puede asimilarse al de una masa de suelo granular colocada en un silo, cuando en el fondo de éste se produce una abertura.

Esta es la condición que consideró Terzaghi en sus análisis sobre empujes en túneles (citado por Juárez y Rico, 1987) de manera que la presión por aflojamiento de la roca se considera hoy básicamente representada por los mecanismos propuestos por él.

La concepción de Terzaghi del mecanismo de acción de estas presiones incluye predominantemente efectos de arqueado en suelos. Este efecto puede visualizarse como sigue: supóngase una masa de suelo de gran extensión que descansa apoyada en una superficie horizontal rígida; supóngase que por alguna razón, una parte de la superficie horizontal cede un poco hacia abajo, de modo que el suelo que haya quedado sobre esa parte tienda también a descender. Al movimiento de esa parte del suelo, relativo al resto, que ha permanecido inmóvil por estar firmemente apoyado, se opondrá la resistencia al esfuerzo cortante que pueda desarrollarse entre la masa móvil y el resto del suelo estacionario. Esta resistencia tiende a mantener a la masa móvil en su posición original y por lo tanto, a reducir la presión del suelo sobre la parte del suelo que haya cedido en la superficie de soporte. Como efecto consecuente aumentará, por el contrario, la presión que las masas estacionarias ejercen sobre las partes fijas de dicha superficie de soporte.

Tiene lugar, por lo tanto, una transferencia de presiones, de la parte de la superficie cedida a los apoyos estacionarios. Este efecto recuerda el modo de trabajar de un arco estructural y de ahí recibe el nombre de efecto de arqueado.

La consecuencia práctica del efecto anterior en elementos de soporte en que haya puntos de deformación restringida y zonas de cedencia más fácil, es una disminución de la presión en esas zonas y una concentración en aquellos puntos, de modo que resulta modificado el diagrama de presiones.

El experimento que se describe a continuación permite visualizar el efecto de arqueado muy claramente (Juárez y Rico, 1987). La interpretación posterior de tal experimento permite llegar a la formulación clásica del fenómeno hecha por Terzaghi.

Considérese una balanza sobre una mesa, sobre uno de los platillos de la balanza está situado un cilindro vertical de vidrio o lucita, de modo que el cilindro no toque el platillo, por estar provisto de un apoyo independiente situado sobre la mesa. En el otro platillo se ha colocado un recipiente con agua, provisto de una llave de purga; el agua extraída se recogerá en una probeta graduada. En el platillo situado bajo el cilindro de vidrio se coloca un contrapeso que equilibre al peso del recipiente colocado en el otro platillo cuando esté vacío de agua; en la Figura 4.1 se muestra la disposición de los elementos citados.

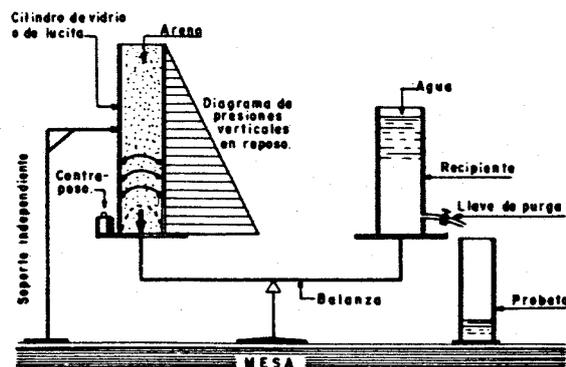


Figura. 4.1 Experimento que ilustra el efecto de arqueado en suelos granulares.

Una vez colocado el cilindro muy cerca del platillo, pero sin tocarle con la balanza fija (sin movimiento en los platillos), se llena de arena, dejándola caer por la parte superior. La arena descansa así directamente sobre el platillo. Al mismo tiempo, en el otro platillo se coloca agua en el recipiente contrapesado de manera que el peso del agua sea igual al de la arena del primer platillo. En estas condiciones se dejan en libertad los platillos, observándose, como es natural, que quedan equilibrados. Si ahora se abre la llave de purga del recipiente que contiene el agua, permitiendo que ésta fluya hacia la probeta, se observará que la balanza no se desnivela, aún cuando el peso que se pierda de agua sea importante.

Cuando sólo una fracción del agua original quede en el recipiente, se notará que la balanza llega a desnivelarse, derramándose la arena del cilindro a través del espacio producido bajo él por el movimiento de la balanza.

Una interpretación sugestiva del experimento descrito consiste en suponer que lo que sucede en el cilindro es que cuando el platillo tiende a bajar y a ceder bajo la arena, ésta empieza a trabajar por arqueado transmitiendo su peso, por fricción, a las paredes del cilindro.

Este efecto disminuye el peso de la arena que gravita sobre el platillo. A medida que sigue drenándose el agua del recipiente del otro platillo, el primer platillo bajo la arena seguirá bajando una magnitud imperceptible, pero suficiente para dar lugar a mayor desarrollo del efecto de arqueado en la zona inferior de la arena. La zona superior gravitará sobre los arcos, o mejor dicho para este caso, bóvedas formadas en la masa granular inferior. El desequilibrio de la balanza se presenta cuando el peso del agua es igual prácticamente al peso de la arena contenida en el semi-elipsoide de revolución indicado en la figura por trazo discontinuo, pues esta masa de arena no tiene ninguna otra forma de sustentación posible. Una vez roto el equilibrio, este volumen de arena cede, permitiendo el desplome de los arcos o bóvedas con la consecuencia del derrame de toda la arena observado en el experimento.

A este efecto de arqueado suele también llamarse acción de silo, por presentarse en los silos para el almacenaje de granos.

Las teorías de arqueado más estudiadas se refieren por lo general a dos problemas específicos; el primero considera un estrato de arena de extensión infinita, pero espesor finito, descansando sobre una base infinita de la cual cede una sección angosta de longitud infinita; es decir, se analiza un problema de deformación plana. El segundo problema considera el caso de un elemento vertical de soporte que gira en torno a su extremo superior, provocando el arqueado de la masa del relleno. En la Figura 4.2 se esquematizan los problemas mencionados.

Terzaghi distingue tres tipos de teorías de arqueado, en referencia al tratamiento del primero de los dos problemas mencionados.

- 1.- Teorías en las que se consideran las condiciones para el equilibrio de la arena localizada inmediatamente arriba de la zona de cedencia, sin investigar si los resultados obtenidos son compatibles con las condiciones de equilibrio de la arena situada más lejos de dicha zona.
- 2.- Teorías basadas en la hipótesis de que la masa completa de arena colocada sobre la frontera que cede está en condiciones de equilibrio crítico. Esta hipótesis no es compatible con los datos experimentales de que se dispone.

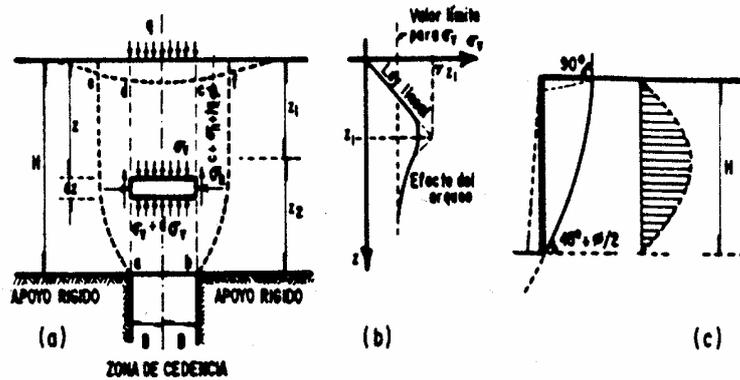


Figura 4.2 Los dos problemas más preferentemente tratados por las teorías de arqueo.

3.- Teorías en que se supone que las secciones verticales ad y bc (Figura 4.2) que pasan por los extremos de la faja de cedencia son superficies de deslizamiento y que la presión sobre la frontera cedente es igual a la diferencia entre el peso total de la masa de arena colocada sobre esa frontera y la resistencia friccionante desarrollada a lo largo de las superficies de fluencia. Las superficies reales de deslizamiento son las curvas ae y bf de la Figura 4.2, según indican los datos experimentales con una separación mayor en la superficie que el ancho de la zona de cedencia; por lo tanto la fricción a lo largo de las superficies verticales supuestas no puede estar totalmente desarrollada, pues esas superficies no son, estrictamente hablando, superficies de fluencia. Este hecho produce un error del lado de la inseguridad.

Las teorías de los tres grupos conducen a resultados diferentes entre sí y puede decirse que el fenómeno de arqueo no ha sido estudiado en la realidad lo suficiente como para poder juzgar el valor relativo de cada una de ellas.

Los efectos de arqueo propuestos por Terzaghi se desarrollan más cuanto más friccionante y menos cohesivo sea el suelo o la roca fisurada o fragmentada; ello no quiere decir que estos efectos no ocurran en cierta escala en suelos cohesivos; en éstos el aumento de presión posterior y la llegada al equilibrio final ocurre más lentamente y la disminución de presión por arqueo será más grande cuanto mayor sea la cohesión.

En la construcción de túneles en roca alterada entran una gran variedad de formaciones, desde roca muy fragmentada, hasta roca a tal grado triturada que su comportamiento sea realmente el de una arena.

En estas rocas es típico el fenómeno de arqueado, que indica la capacidad de la roca situada sobre el techo de un túnel para transmitir la presión debida a su peso a las masas colocadas a los lados del mismo. Este efecto es en todo similar al del arqueado de arenas, y se produce como una consecuencia de la relajación de esfuerzos causada en el techo de la perforación. En la Figura 4.3 se muestra esquemáticamente la masa de roca afectada por el fenómeno.

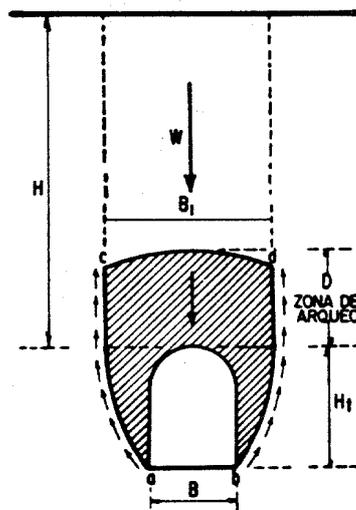


Figura 4.3 Arqueo sobre un túnel.

Para determinar la carga que actúa sobre el techo del túnel tomando en cuenta el efecto de arqueado puede analizarse alguna de las teorías de arqueado, o resultados de pruebas de laboratorio realizadas sobre arenas. Estas pruebas bastante representativas del comportamiento de arenas o rocas trituradas situadas sobre el nivel freático, permiten llegar a algunas conclusiones de interés práctico. La Figura 4.3 muestra la masa de roca afectada por el arqueado, el peso de esa masa, que tiende a penetrar en el túnel mientras no se construya el ademe apropiado, se transfiere en su mayor parte a las masas laterales de roca y es resistido por la fricción que se desarrolla en las superficies ac y bd . Nótese que el ancho de la zona de arqueado, B_1 , es mayor que el ancho del túnel. También se observa que el espesor D de la zona de arqueado es aproximadamente igual a $1.5 B$; por encima de esa altura, los esfuerzos en la masa de roca permanecen prácticamente inalterados, cuando se efectúa la excavación. Basta que la roca ceda un poco en el techo del túnel, para que la carga sobre el ademe llegue a valores inclusive mucho menores que el espesor de la zona de arqueado, D .

4.1.2 Uso de un recubrimiento de teflón.

Para garantizar que los esfuerzos aplicados al material de balasto sean distribuidos de una manera uniforme fue necesario hacer uso de placas antifriccionantes a base de teflón y grasa. En las paredes del molde de prueba se colocó una película de grasa en la cual se pegaban las placas de teflón las cuales tienen dimensiones de aproximadamente 5 x 5 cm.

Se realizaron dos series de pruebas de rotura de granos a material uniforme (balasto D4 - SCT), con tiempos de duración de 2, 4, 8, 16 y 24 horas; en una simplemente colocando el material dentro del molde para posteriormente ensayarlo y en la otra haciendo uso de la placa antifriccionante, con el fin de evaluar la rotura de granos correspondiente y observar el comportamiento presentado. Se suponía desde un principio que al colocar las placas de teflón habría una mejor distribución de los esfuerzos aplicados, de tal manera que la rotura de granos correspondiente disminuiría notablemente.

Con el balasto bien graduado (propuesta IMT) se propuso una serie de pruebas con tiempos de 2, 4, 8, 16 y 24 horas, haciendo uso del teflón como placa antifriccionante; esto fue debido a que los resultados serían más representativos, ya que en cierto modo se disminuye el fenómeno de arqueado.

4.1.3 Medición de la fricción entre el molde y la probeta.

Con el propósito de evaluar el fenómeno de arqueado en las pruebas de rotura de granos se realizaron dos pruebas con el mismo material (balasto D4 SCT), misma granulometría inicial y mismas condiciones de carga, para el caso en que las partículas estén directamente en contacto con las paredes del molde metálico y para el caso en que se use un recubrimiento antifriccionante a base de teflón y grasa entre las partículas y el molde. El material fue ensayado con los mismos parámetros de prueba; es decir, con 12 toneladas de carga, una frecuencia de 0.84 hz y un tiempo de duración de 24 hr. Al final de cada prueba se evaluó el coeficiente de rotura de granos B de Marsal, para todo el material y dividiéndolo en tres capas como se muestra en la Figura 4.4. La importancia de obtener el coeficiente B en capas es que da una idea de la homogeneidad de la distribución de los esfuerzos dentro de la muestra, ya que a una mayor uniformidad en la distribución de los esfuerzos corresponde una mayor uniformidad en la rotura de partículas. Como puede observarse en las Figuras 4.4.a. y 4.4.b., los valores de B indicados muestran que el usar el

recubrimiento de teflón reduce la fricción entre las partículas y el molde, lo cual conduce a una mejor distribución de los esfuerzos dentro de la muestra.

Se trató de evaluar la fricción generada entre las paredes del molde y las partículas como se muestra en c y d de la Figura 4.4 y puede observarse claramente que la fuerza requerida en el caso de la muestra con teflón es pequeña en comparación con la que no tiene placa antifriccionante.

Con esto se concluye que el uso del teflón es adecuado y los ensayos subsecuentes fueron realizados usándolo.

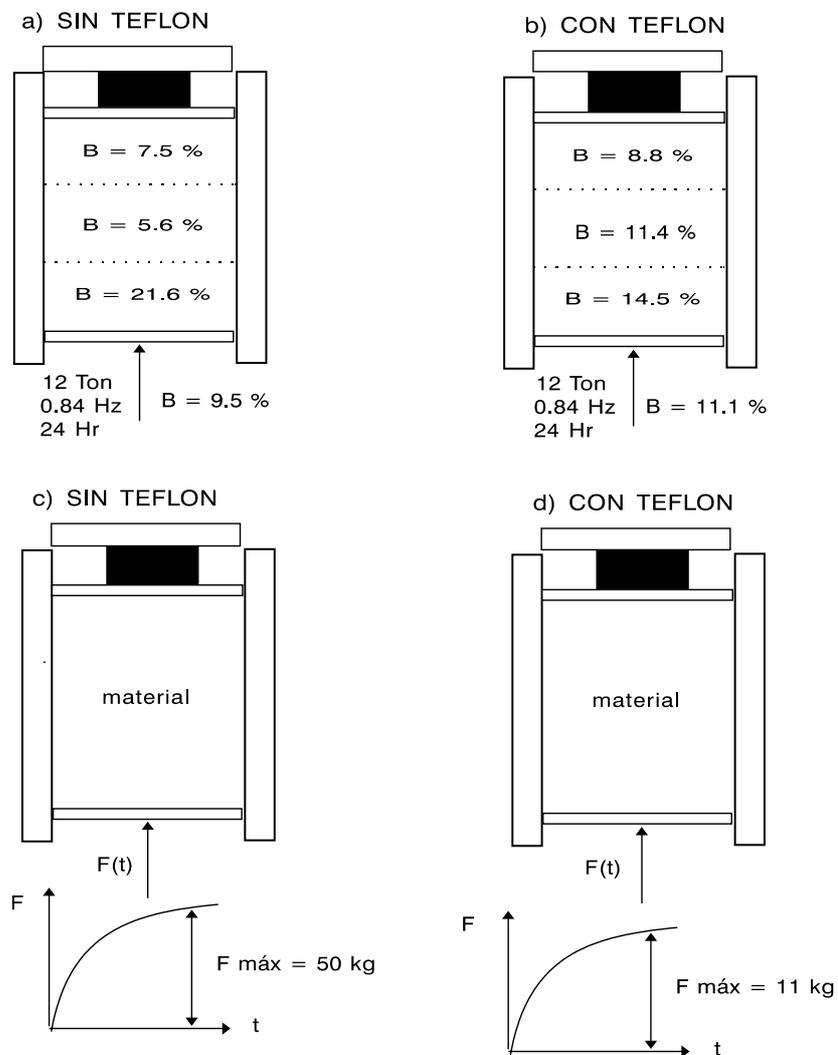


Figura 4.4 Influencia del recubrimiento de teflón en la rotura de granos.

4.2 Efecto de la duración de la prueba en la rotura de granos.

Para la realización de los ensayos de rotura de granos en material de balasto (denominación D4-SCT), fue necesario implementar una serie de pruebas que contemplaran diferentes tiempos de duración con el fin de evaluar el parámetro de rotura de granos considerando el factor tiempo. Tomando en cuenta los parámetros de prueba correspondientes a la aplicación de 12 toneladas y frecuencia de 0.84 ciclos/seg se consideraron tiempos de duración de 2, 4, 8, 16 y 24 horas.

Después de ser ensayado el material se procedió al desmontaje del molde para la determinación de la granulometría, y a determinar el coeficiente de rotura de granos. En el paso anterior se observó que en el molde existía fricción muy marcada entre su pared y el balasto, como consecuencia de que la carga no se distribuía uniformemente a lo largo de toda la muestra.

Para verificar si la rotura de granos era la representativa de los ensayos realizados se implementó otra serie de pruebas con los mismos tiempos de duración de 2, 4, 8, 16, y 24 horas en la cual se utilizó una placa antifricción a base de teflón y grasa con el fin de disminuir significativamente la fricción.

Los valores de rotura de granos de las series con y sin teflón se graficaron contra los tiempos de duración de la prueba para interpretar los resultados obtenidos, y se observó que sí existe variación significativa usando el teflón como placa antifricción. Además, se observó en la gráfica de tiempo contra rotura de granos que los tiempos elegidos son los adecuados, pues la rotura de granos tiende a estabilizarse después de un tiempo de 24 horas.

4.3 Efecto del peso volumétrico inicial.

En los correspondientes ensayos de rotura de granos el peso volumétrico inicial utilizado es el que corresponde a la condición suelta. Un material uniforme (balasto D4-SCT) de un peso volumétrico seco suelto menor que el de un balasto bien graduado (balasto IMT), después de ser ensayado bajo los mismos parámetros de prueba, seguramente presentará mayor rotura de granos que un material bien graduado, correspondiendo a la relación de vacíos inicial de las granulometrías en estudio.

A pesar de que la diferencia en rotura de granos no fuera muy significativa para los balastos ensayados, es necesario señalar que el balasto bien graduado, al presentar pesos volumétricos mayores proporcionará mayor estabilidad a la vía y además disminuirá la posible incrustación del balasto hacia capas inferiores, cuando se encuentre en operación.

4.4 Efecto de la granulometría en la rotura de granos.

Existen varios factores que influyen de manera importante en los materiales para que se presente mayor o menor rotura de granos cuando están expuestos a cargas de trabajo. Uno de ellos es sin duda la granulometría del material, además del origen, resistencia intrínseca, etc.

En este estudio se considera inicialmente un balasto según las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (D4-SCT) con una granulometría muy uniforme ($C_u = 1.95$), por lo que presenta pocos contactos entre sus partículas. Al estar sometidos a condiciones de carga dichos contactos soportarán esfuerzos muy elevados y como consecuencia presentarán rotura de granos significativa. Por el contrario, si se considera una granulometría con una gran gama de tamaños; es decir, un balasto bien graduado (BALASTO IMT), habrá un gran número de contactos entre sus partículas, por lo que se presentarán esfuerzos relativamente bajos entre dichos contactos, debido a una mejor distribución de las cargas. Se intuye que un material de balasto bien graduado deba presentar menor rotura de granos bajo la carga que le imponen los ferrocarriles y además se disminuirá la incrustación de partículas en las capas subyacentes.

4.5 Efecto de la forma de la partícula.

La forma de las partículas del material que vaya a ser utilizado como balasto es importante, puesto que porcentajes elevados de partículas planas y con aristas muy pronunciadas arrojarán una rotura de granos muy significativa bajo las cargas aplicadas. Este resultado disminuye si un material natural presenta una amplia gama de tamaños (bien graduado) y sus partículas tienen formas subredondeadas o redondeadas.

5. Discusión de los resultados de laboratorio.

Las pruebas de rotura de granos realizadas al material de balasto arrojaron los resultados que se presentan en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 que corresponden a ensayos en los que el material está en contacto directo con el molde de prueba y a ensayos en los cuales se colocó una placa antifricción a base de teflón y grasa entre las partículas y la pared del molde.

En las tablas mencionadas se pueden observar los valores obtenidos referentes a rotura de granos, los pesos volumétricos del material (antes y después del ensayo), los coeficientes de uniformidad y de curvatura (C_u y C_c), la diferencia en la relación de vacíos y la deformación que sufre el espécimen. Lo anterior, para los tiempos de duración de los ensayos de 2, 4, 8, 16 y 24 hr; además, según se ha señalado, el esfuerzo aplicado en todos los ensayos es de 16.45 kg/cm^2 , el cual corresponde a la aplicación de una carga de 12 toneladas con una frecuencia de 0.84 ciclos/seg. Al iniciar los ensayos de rotura de partículas el material es colocado en la condición suelta con el fin de que todas las pruebas puedan ser reproducidas de manera similar, aún y cuando se varíe la granulometría del mismo. La rotura de granos presentada es debida al efecto de la acción sobre el material de la carga repetida, que hace variar los coeficientes de uniformidad y de curvatura iniciales.

TABLA 5.1 VALORES OBTENIDOS EN PRUEBAS DE ROTURA DE GRANOS EFECTUADAS A MATERIAL DE BALASTO D4 - SCT

	TIEMPO t hr	PESO VOL. ANTES KG/M3	PESO VOL. DESPUES KG/M3	ROTURA DE GRANOS B%	Cu DESPUES ENSAYE	Cc DESPUES ENSAYE	DIF. REL. VACIOS ef - ei	DEFORMACION %
PRUEBA 1	2	1511.03	1652.8	5.69	2.29	1.05	-0.1535	8.59
PRUEBA 2	4	1511.03	1663.89	5.31	2.14	1.05	-0.1646	9.18
PRUEBA 3	8	1434.95	1621.68	7.10	2.47	1.13	-0.2235	11.54
PRUEBA 4	16	1464.20	1691.10	6.06	2.34	1.06	-0.2471	13.41
PRUEBA 5	24	1422.30	1710.30	11.10	2.70	1.20	-0.3200	16.84

Cu INICIAL = 1.95

Cc INICIAL = 0.91

ENSAYES REALIZADOS CON PLACA ANTIFRICCIONANTE A BASE DE TEFLON Y GRASA

TABLA 5.2 VALORES OBTENIDOS EN PRUEBAS DE ROTURA DE GRANOS EFECTUADAS A MATERIAL DE BALASTO D4 - SCT

	TIEMPO t hr	PESO VOL.	PESO VOL.	ROTURA DE GRANOS B%	Cu DESPUE S	Cc DESPUE S	DIF. REL. VACIOS ef - ei	DEFORMACION N %
		ANTES KG/M3	DESPUES KG/M3		ENSAYE	ENSAYE		
PRUEBA 1	2	1526.72	1644.86	6.96	2.45	1.11	-0.1252	7.19
PRUEBA 2	4	1476.86	1636.36	5.04	2.20	1.00	-0.1780	9.75
PRUEBA 3	8	1402.74	1646.54	12.70	2.48	1.22	-0.2860	14.79
PRUEBA 4	16	1412.43	1710.40	10.00	2.44	1.20	-0.3320	17.41
PRUEBA 5	24	1422.30	1691.73	9.50	2.53	1.23	-0.3020	15.91

Cu INICIAL = 1.95

Cc INICIAL = 0.91

ENSAYES REALIZADOS SIN TEFLON (ESTADO NATURAL)

TABLA 5.3 VALORES OBTENIDOS EN PRUEBAS DE ROTURA DE GRANOS EFECTUADAS A MATERIAL DE BALASTO BIEN GRADUADO

	TIEMPO t hr	PESO VOL. ANTES KG/M3	PESO VOL. DESPUES KG/M3	ROTURA DE GRANOS B%	Cu DESPUES ENSAYE	Cc DESPUES ENSAYE	DIF. REL. VACIOS ef - ei	DEFORMACION N %
PRUEBA 1	2							
PRUEBA 2	4	1805.25	1943.48	4.41	96.29	3.14	-0.1064	7.11
PRUEBA 3	8	1747.70	2000.16	8.52	82.14	3.00	-0.1950	12.62
PRUEBA 4	16	1786.41	2029.16	7.68	85.18	2.84	-0.1812	11.99
PRUEBA 5	24	1805.24	2054.23	7.53	85.71	3.14	-0.181	12.12

Cu INICIAL = 86.66

Cc INICIAL = 3.07

ENSAYES REALIZADOS CON PLACA ANTIFRICCIONANTE A BASE DE TEFLON Y GRASA

En la Figura 5.1 se muestran las curvas correspondientes al comportamiento del material de balasto, haciendo uso o no de la placa antifriccionante (teflón). La curvas para material de balasto con granulometría uniforme (D4-SCT) para las dos condiciones, con y sin teflón, indican que existe una rotura de granos muy marcada en las primeras horas de prueba y que posteriormente tiende a estabilizarse conforme el tiempo aumenta. La rotura de granos que se obtenga en un ensaye con duración de 24 hr podría tomarse como representativa para este tipo de material, ya que la curva en ese tiempo tiende a estabilizarse.

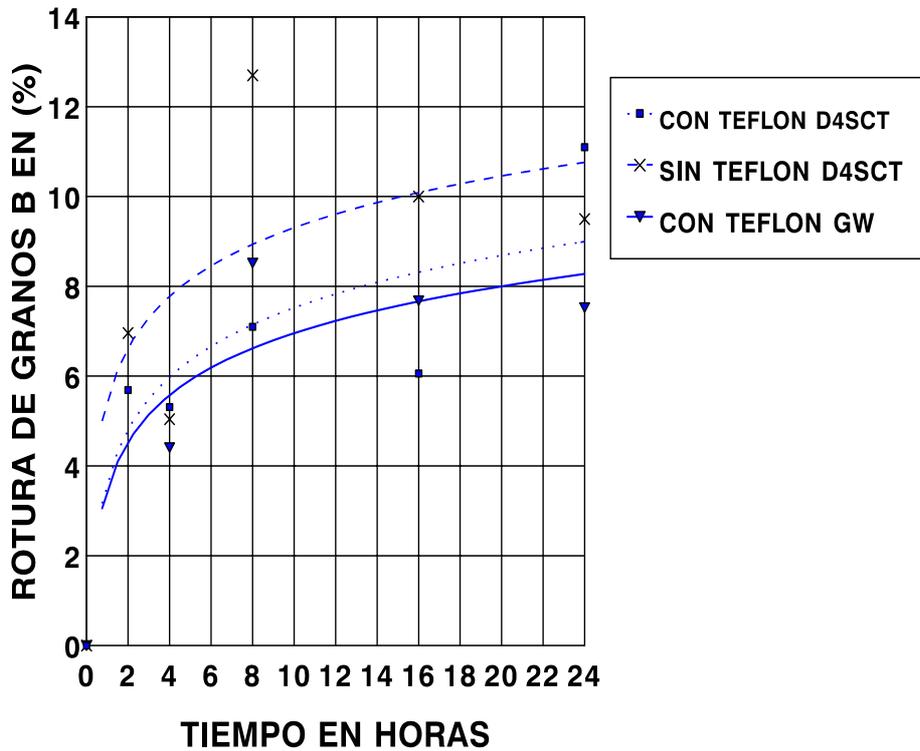


Figura 5.1 Rotura de granos en material de balasto.

La curva correspondiente al material bien graduado, muestra que si la rotura no disminuye significativamente en comparación con el material uniforme, sí se aprecia su buen comportamiento cuando es sometido a carga repetida. Sin embargo, el balasto bien graduado por tener mayor peso volumétrico seguramente tendrá un mejor comportamiento que el material uniforme cuando se encuentre colocado en la estructura ferroviaria.

TABLA 5.4 CALCULO DEL INDICE DE CARGA PUNTUAL A FRAGMENTOS IRREGULARES
MATERIAL DE BALASTO BANCO TLACOTE SERIE No. 1
CALCULANDO POR $De2 = 4 A / PI$, PARA FRAGMENTOS IRREGULARES

4 / PI = 1.27

De = DIAMETRO EQUIVALENTE

CTE. CARGA PUNTUAL =

14.43 CM2

ENSAYE No.	W PROMEDIO MM	DIST. ENTRE PLACAS "D" MM	AREA A MM2	De2 MM2	ESFUERZO APLICADO KG/CM2	CARGA APLICADA KG	Is KG/CM2	Is MPa
1	70.5	38.00	2679.00	3411.01	199.00	2870.77	84.16	8.41
2	49.00	45.00	2205.00	2807.49	214.00	3087.16	109.96	10.99
3	65.50	33.50	2194.25	2793.81	196.00	2827.5	101.21	10.12
4	55.50	42.00	2331.00	2967.92	110.00	1586.86	53.47	5.34
5	68.00	33.50	2278.00	2900.44	107.00	1543.58	53.22	5.32
6	53.00	36.00	1908.00	2429.34	126.00	1817.68	74.82	7.48
7	72.50	30.00	2175.00	2769.30	107.00	1543.58	55.74	5.57
8	72.50	27.50	1993.75	2538.52	78.00	1125.23	44.33	4.43
9	53.50	38.00	2033.00	2588.50	131.00	1889.81	73.01	7.30
10	51.00	30.00	1530.00	1948.06	145.00	2091.77	107.38	10.73
11	49.00	32.50	1592.50	2027.63	107.00	1543.58	76.13	7.61
12	59.00	36.00	2124.00	2704.36	83.00	1197.36	44.28	4.42
13	45.50	38.00	1729.00	2201.43	183.00	2639.96	119.92	11.99
14	76.00	31.50	2394.00	3048.14	140.00	2019.64	66.26	6.62
15	65.00	22.00	1430.00	1820.73	98.00	1413.75	77.65	7.76
16	57.50	30.00	1725.00	2196.34	65.00	937.69	42.69	4.26
17	45.00	26.00	1170.00	1489.69	100.00	1442.6	96.84	9.68
18	39.00	33.00	1287.00	1638.66	125.00	1803.25	110.04	11.00
19	55.00	35.30	1941.50	2471.99	140.00	2019.64	81.7	8.17
20	73.50	23.00	1690.50	2152.41	113.00	1630.14	75.74	7.57
21	55.00	27.00	1485.00	1890.76	134.00	1933.08	102.24	10.22
PROMEDIO	58.60	32.75	1899.79	2418.88	128.62	1855.46	78.61	7.86

En la Figura 5.3 se propone una zona granulométrica para material de balasto, y dentro de la misma se localiza (con trazo discontinuo) la curva granulométrica del material seleccionado. Este, tiene una mejor graduación que la especificada por las normas de la SCT; en la Figura 5.1 se muestra el resultado de la prueba de rotura de granos.

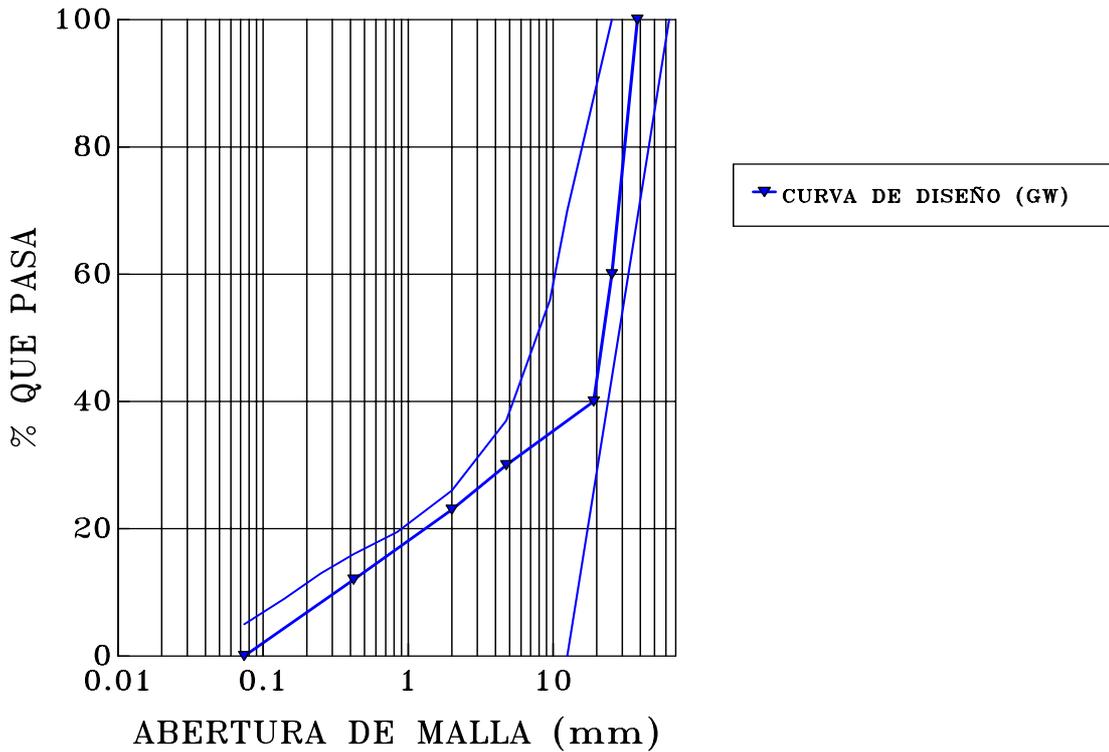


Figura 5.3 Zona granulométrica propuesta para material de balasto

Es necesario señalar que los parámetros de prueba utilizados fueron los mismos para las tres series de pruebas realizadas, tanto al material uniforme (balasto D4-SCT) como al bien graduado (balasto GW), pero colocando la placa de teflón entre la pared del molde y el material granular solamente en el material bien graduado. Por lo tanto, se puede decir que el material de balasto propuesto tiene un buen comportamiento cuando le es aplicada carga repetida, ya que la rotura de granos está por debajo de la que se obtuvo en el material de balasto según Normas de SCT.

En la Figura 5.4 se muestran los pesos volumétricos obtenidos antes y después de la realización de la prueba de rotura de granos bajo carga repetida; es necesario señalar que en

la gráfica los pesos volumétricos muestran una ligera tendencia a estabilizarse, independientemente de la rotura de granos arrojada al final de la prueba.

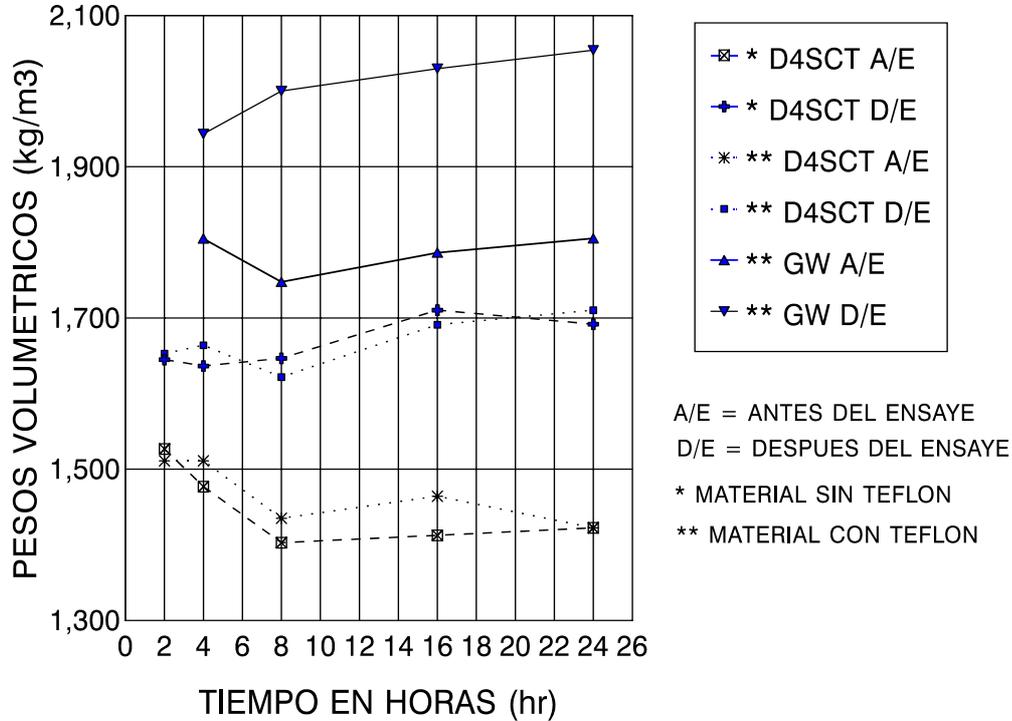


Figura 5.4 Pesos volumétricos obtenidos en ensayos de rotura de granos para pruebas con y sin teflón.

En la Figura 5.5 se puede observar la deformación que sufre la muestra de balasto para las condiciones de prueba ya señaladas. Además, la curva obtenida para el caso del balasto uniforme (normas SCT), sin el uso del teflón, indica que la distribución de los esfuerzos debidos a la aplicación de la carga, no fue bien realizada, pues presenta quiebres notorios, lo cual puede ser atribuido al fenómeno de arqueo que se refleja en la rotura de granos. Por el contrario, las curvas para el caso en que se usó teflón, muestran una tendencia más o menos lineal, de tal modo que hubo una mejor distribución de esfuerzos en la muestra. La diferencia entre las curvas con material uniforme (con y sin teflón) podría ser atribuida al fenómeno de arqueo. La rotura de granos en el balasto bien graduado también tiende a estabilizarse para un tiempo de 24 horas, lo cual puede observarse en la Figura 5.1 y además los pesos volumétricos mostrados en la Figura 5.4, indican que puede continuar la deformación de la muestra con el tiempo, aunque ya no sea significativa.

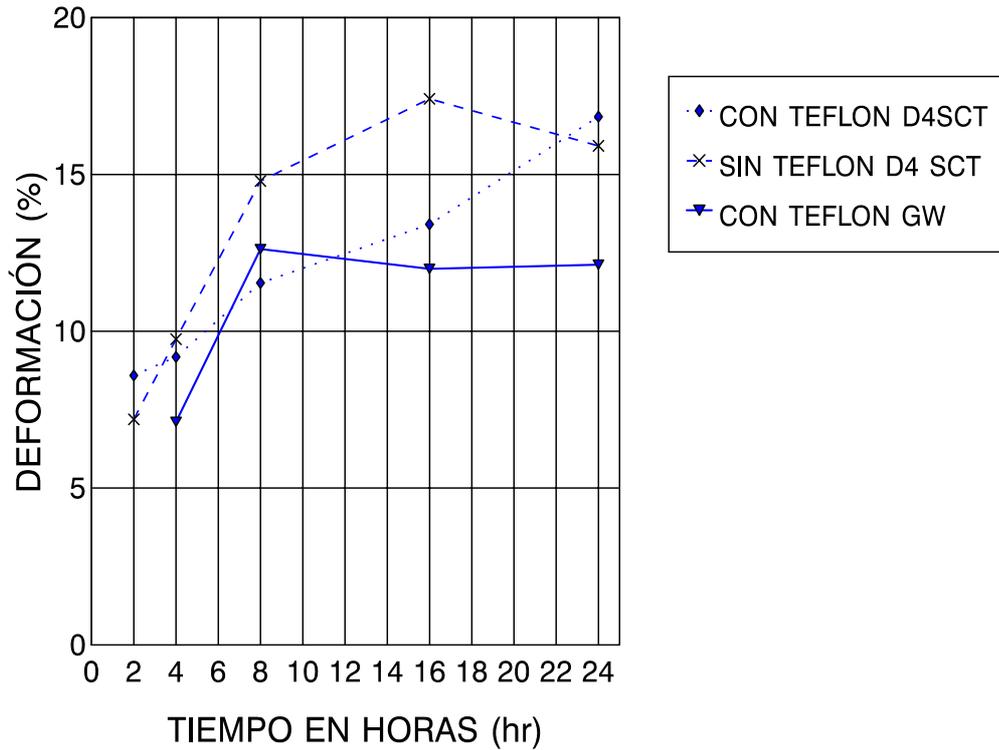


Figura 5.5 Deformación de la muestra en pruebas de rotura de granos.

En la Figura 5.6 se presentan las diferencias en la relación de vacíos para el caso inicial y final de los correspondientes ensayos. De aquí podría pensarse en estudiar la compresibilidad que sufre un medio granular bajo ciertas condiciones de carga y en cierto modo estimar los posibles asentamientos que podrían presentarse en el caso de que se estuvieran analizando y estudiando los enrocamientos de una presa, además, de la correspondiente rotura de granos.

En la Figura 5.7 se indican las curvas granulométricas obtenidas en un ensaye de rotura de granos para el material de balasto bien graduado, antes y después del ensaye correspondiente; puede observarse claramente el desplazamiento que sufrió la curva inicial después de ser ensayado el material. La parte entre las curvas refleja la rotura de granos que se presentó en dicho material. Es necesario señalar que el porcentaje de rotura fue mayor en el quiebre de la curva, el cual corresponde a un tamaño de aproximadamente 3/4", lo cual significa que podrían diseñarse curvas granulométricas evitando quiebres bruscos de tal manera que la curva sea más suave para así esperar una rotura todavía menor.

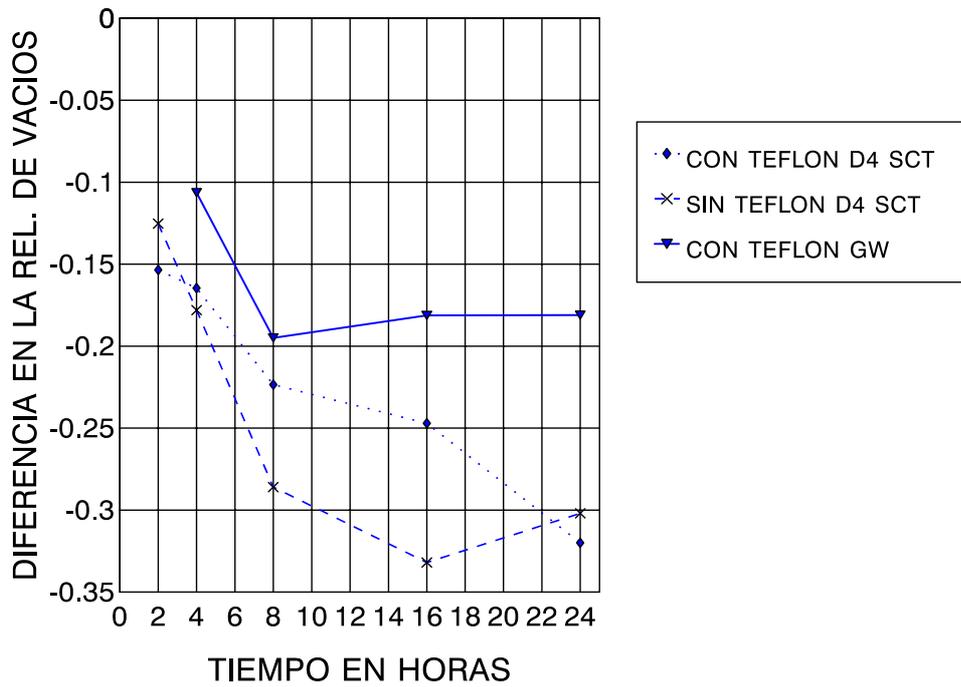


Figura 5.6 Diferencias en la relación de vacíos inicial y final.

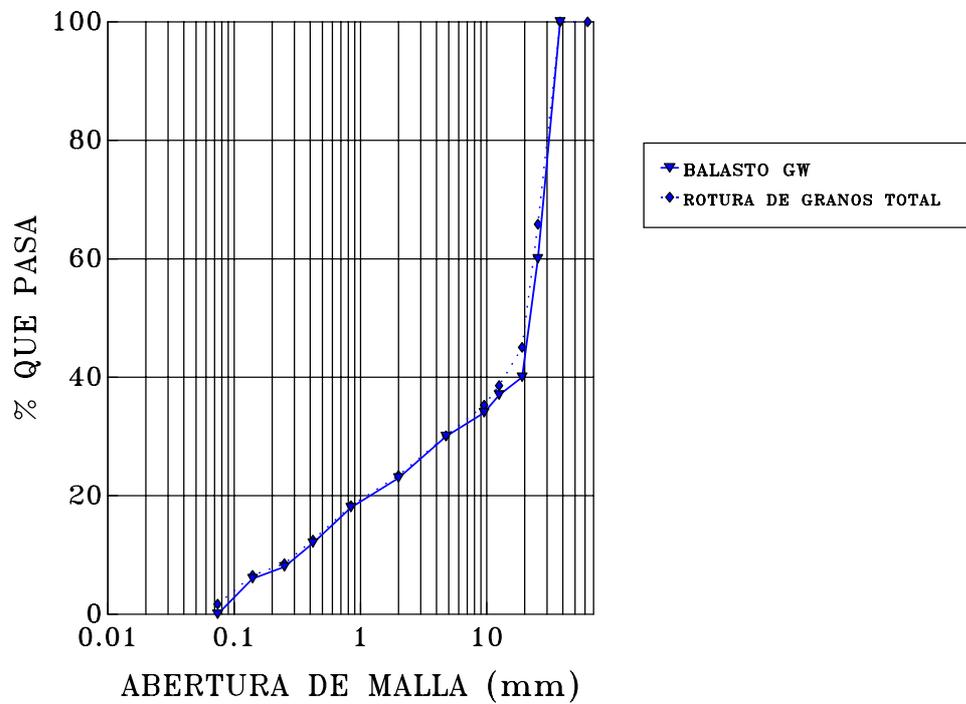


Figura 5.7 Granulometría en prueba de rotura de granos en balasto bien graduado.

Por último, en la Figura 5.8 se presentan las granulometrías obtenidas de las tres capas que se escogieron en el molde de prueba para verificar la distribución de los esfuerzos en la muestra de material bien graduado. Cabe mencionar que la rotura de granos por capas arrojó resultados diferentes, debido a que la carga repetida producía vibración al material y porque en el momento de retirar el material del molde en las respectivas capas, el material más pequeño, principalmente arenas, emigró hacia la capa inferior. Posteriormente se sumaron los pesos retenidos para los mismos tamaños obtenidos de las granulometrías por capas y se obtuvo la granulometría final con su respectiva rotura de granos, la cual se desplaza ligeramente si se compara con la curva granulométrica inicial.

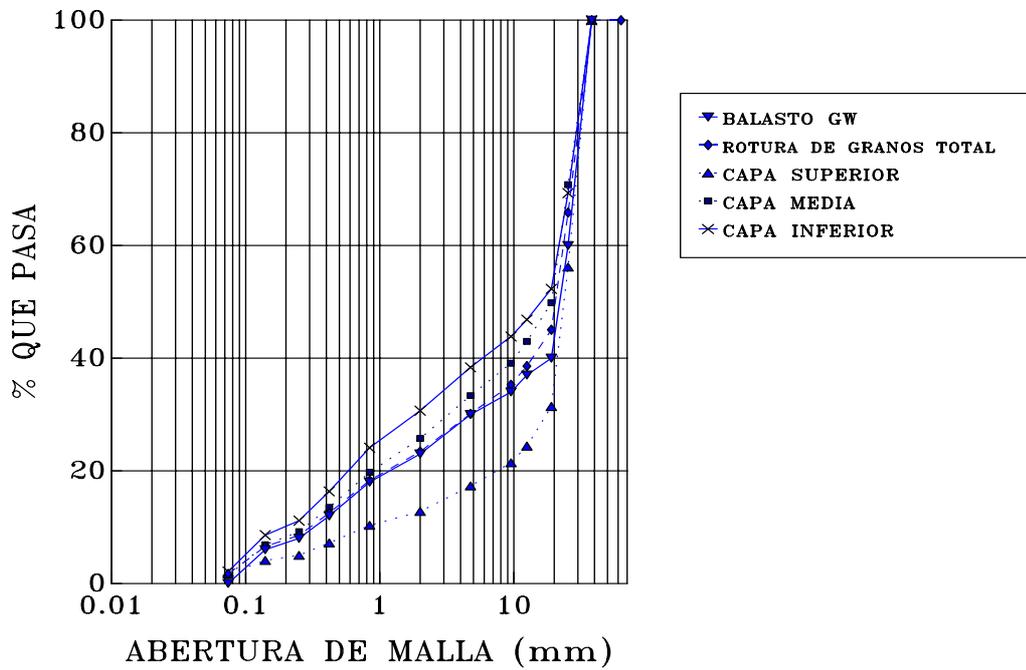


Figura 5.8 Rotura de granos y granulometrías obtenidas por capas en ensaye con material bien graduado

El material de balasto, atendiendo las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes es un material con granulometría uniforme con pocos contactos entre sus partículas, de tal modo que el paso del ferrocarril generará esfuerzos muy grandes en dichos contactos produciéndose una rotura de granos significativa. La rotura de granos tenderá a incrementarse notablemente si el material contiene porcentajes elevados de partículas planas y alargadas con aristas muy pronunciadas. Su origen geológico es

significativo, las rocas ígneas son más resistentes, que las rocas sedimentarias en términos generales.

Lo anterior, recomienda el empleo de un balasto mejor graduado con una amplia gama de tamaños (balasto propuesto por el IMT); adicionalmente este material presentará pesos volumétricos mayores debido a que las partículas pequeñas llenarán los espacios vacíos entre las partículas gruesas (haciéndolo más denso).

El balasto bien graduado soportará de mejor manera los esfuerzos que le transmite el ferrocarril y al mismo tiempo la rotura de partículas será baja, con lo cual el mantenimiento que se da a las vías férreas puede disminuir significativamente por varios factores; por ejemplo, disminuirá o no se presentará, en el mejor de los casos, la incrustación de material de balasto hacia las capas inferiores de la vía, con lo cual se conservará el alineamiento de la vía (sin ponerla en peligro) y el balasto tendrá una permeabilidad adecuada para drenar la vía.

Conclusión.

Este trabajo presenta resultados para conocer el fenómeno de la rotura de granos en el material granular (balasto) utilizado en la construcción y mantenimiento de las vías férreas. La experiencia actual indica que las especificaciones contemplan que el material de balasto esté formado principalmente por partículas de granulometría uniforme. Este hecho produce una alta concentración de esfuerzos entre los escasos puntos de contacto de las partículas, al actuar las cargas que le transmite el ferrocarril. Lo anterior produce el rompimiento de partículas del balasto que, en algunas ocasiones es excesivo, lo cual origina problemas de operación al presentarse desalineamiento y pérdida de la rasante.

El resultado más importante del presente trabajo estriba en el ahorro que se obtendría en el mantenimiento de la red ferroviaria debido a que la pérdida de la rasante sería menor haciendo uso de balastos bien graduados. Además, se haría más efectiva y útil la trituración de la roca, ya que actualmente no se utiliza el material fino producto de la trituración.

Las especificaciones de construcción de todo el mundo y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (las cuales fueron elaboradas hace aproximadamente 50 años), en el caso particular del material para balasto, recomiendan uniformidad en la granulometría, para las denominaciones en ellas consignadas. El presente estudio podría tomarse como apoyo para continuar trabajando sobre este asunto, lo que permitiría actualizar las especificaciones recomendando el uso de materiales mejor graduados.

Se recomienda continuar en esta línea de investigación, agregando en las pruebas de rotura de granos cambios en los parámetros de prueba tales como carga y frecuencia, y ampliando el rango del origen geológico de las muestras.

Referencias.

Ahlf Robert E. (1995), "Track structures: The basics", Railway Track and Structures, January 1995, pp.14-15.

American Railway Engineering Association, Construction and Maintenance Section, Association of American Railroads, Manual, 1954.

American Society for Testing Materials (1986), "Construction, 4.08 Soils and Rocks".

Boucher D. L., Selig E. T. (1987), "Application of petrographic analysis to ballast performance evaluation", Transportation Research Record, No. 1131.

Broch E. y Franklin, J. A. (1972), "The point load strength test", Int. J. Rock Mechanics in. Sci 9, pp 669-697.

Clifton A. W., Klassen M. J., Watters B. R. (1987), " Production and testing of ballast", Transportation Research Record, No. 1131.

Dirección General de Proyectos y Laboratorios, Departamento de Control Técnico (1954), "Especificaciones para construcción de ferrocarriles, primera parte", México.

Ghosh D. K. y Srivastava (1991), "Point load strength: an index for classification of rock material", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 44, París.

International Society of Rock Mechanics (1985), "Suggested method for determining point load strength", Int. J. Rock Mechanics, Vol. 22, No. 2, pp 51-60.

Juárez B. E., Rico R. A. (1984), "Mecánica de suelos, tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos", Editorial limusa, México.

Juárez B. E., Rico R. A. (1987), "Mecánica de suelos, tomo II. Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos", Editorial Limusa, México.

Referencias

Klassen M. J., Clifton A. W., Watters B. R. (1987), "Track evaluation and ballast performance specifications", Transportation Research Record, No. 1131.

Lambe T. W., Whitman R.V. (1994), "Mecánica de suelos", Editorial Limusa, Primera edición, México.

Lee K. L., Farhoomand I. (1967), "Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression", Canadian Geotechnical Journal, Volumen IV No. 1, Canada.

Marsal R. J. et al (1965), "Investigaciones sobre el comportamiento de suelos granulares y muestras de enrocamiento", Comisión Federal de Electricidad, México.

Marsal R. J., Reséndiz N. D. (1975), "Presas de tierra y enrocamiento", Editorial Limusa, Primera edición, México.

Marsal R. J. Selección de Trabajos (1980), "Contribuciones a la mecánica de medios granulares", Comisión Federal de Electricidad, Primera edición, México.

Marsal R.J. (1963), "Cámara triaxial para ensaye de enrocamientos", II Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vol. I Ib/15, Brasil.

Marsal R.J. (1963), "Fuerzas de contacto en suelos y enrocamientos", II Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Vol. II, Brasil.

Marsal R. J. (1967), "Ensayes de gran escala en enrocamientos", Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, ASCE Vol. 93, No SM2 Proc. P 5128.

Marsal R. J. (1969), "Rotura de partículas en suelos granulares gruesos", Presentado en el VII Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, México.

Marsal R. J. (1972), "Resistencia y compresibilidad de enrocamientos y gravas", Publicación No. 306 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

Morris H. C. (1959), "Effect of particle shape and texture on the strength of noncohesive aggregates", Philadelphia: American Society for Testing Materials, pp 363 STP 2S4.

Oliveros R. F., López P. A., Mejía P. M. (1977), "Tratado de ferrocarriles I", Editorial Rueda, Madrid.

Quinta Ferreira M. y Delgado Rodrigues J. (1990), "Evaluation of strength of irregular rock lumps for characterization of rockfills", Proceedings of the Sixth International Congress, International Association of Engineering Geology.

Rico R. A., Del Castillo M. H. (1989), "Ingeniería de suelos aplicada a las vías terrestres tomo I", Editorial Limusa, México.

Rico R. A., Del Castillo M. H. (1989), "Ingeniería de suelos aplicada a las vías terrestres tomo II", Editorial Limusa, México.

Rico R. A. et al (1991), "Manual de calidad para materiales en la sección estructural de vías férreas", Documento Técnico No. 2, Instituto Mexicano del Transporte, IMT, Querétaro, México.

Rico R. A. y Orozco O. J.(1987), "Uso de granulometrías bien graduadas como material de balasto". Comunicación privada.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Ferrocarriles en Operación (1967), "Conservación de vía, manual para trabajadores de vía", México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1981), "Instructivo para efectuar pruebas en suelos volumen 1", Dirección General de Servicios Técnicos, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1981), "Instructivo para efectuar pruebas en materiales de pavimentación volumen 2", Dirección General de Servicios Técnicos, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1981), "Instructivo para efectuar pruebas en agregados y concreto hidráulico volumen 3", Dirección General de Servicios Técnicos, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1981), "Normas de Construcción, Muestreo y pruebas de materiales", Parte primera libro IX, México.

Referencias

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1981), "Normas de materiales para construcción", Libro VIII, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1986), "Normas para muestreo y pruebas de materiales equipos y sistemas, Carreteras y aeropistas, Materiales para terracenas, Libro 6.01.01., México.

Selig E. T., Boucher D. L. (1990), "Abrasion tests for railroad ballast", Geotechnical testing journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 4 December 1990.

Selig E. T., Roner C. J., (1987), "Effects of particle characteristics on behavior of granular material", Transportation Research Record, No. 1131.

Sherard J. L., Dunnigan L. P. (1985), "Filters and leakage control in embankment dams", Proceedings symposium on seepage and leakage from dams and impoundments, American Society of Civil Engineers.

Togno F M. (1982), "Ferrocarriles", Representaciones y Servicios de Ingeniería S. A., Segunda Edición, México.

Turk N. y .Dear W. R. (1985), "Improvements in the determination of point load strength", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 31, París.

Watters B. R., Klassen M. J., Clifton A. W. (1987), " Evaluation of ballast materials using petrographic criteria", Transportation Research Record, No 1131.

Zepeda G. J. A., (1982) Estudio de las propiedades esfuerzo-deformación de una arena pómez", Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Tesis de Grado de Maestría", México.

A n e x o 1

TABLA I. VALORES PROPUESTOS PARA MATERIALES DE BALASTO

CARACTERISTICAS	CALIDAD	
	DESEABLE	ADECUADA
Granulometría	Según figura I	Según figura I (1)
Tamaño máximo (mm)	38	51
Finos (%) (Material < 0.074 mm)	0	5 máx. (2)
Equivalente de arena (%)	50 mín.	40 mín.
Desgaste Los Angeles (%)	30 máx.	40 max.
Índice Durabilidad (%)	50 mín.	40 mín.
Peso Volumétrico Seco Máximo (kg/m ³)	1800 mín.	1800 mín.
Partículas Angulosas (%)	90 mín.	60 mín.

(1) En tamaños menores de 4.76 mm excluir lo más posible material fino (tamaños inferiores a 0.074 mm)

(2) Con límite líquido de 25 % máximo

NOTA: Valores propuestos por el Instituto Mexicano del Transporte

GRANULOMETRIA PARA BALASTO

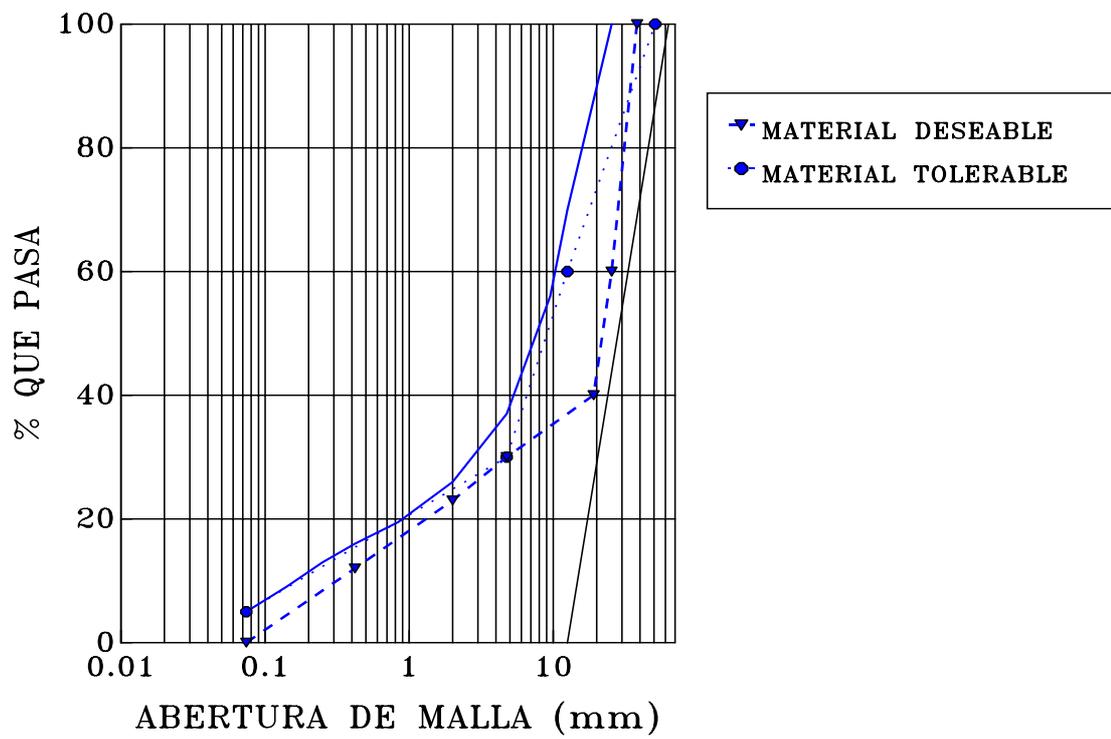


FIGURA I. ZONA GRANULOMETRICA PARA MATERIAL DE BALASTO

A n e x o 2

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO SIN TEFLON

PRUEBA No. 1 DURACION 2 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.47	-0.47	94.53
3/4"	37.0	35.04	1.96	59.49
1/2"	33.0	30.06	2.94	29.43
3/8"	17.5	15.44	2.06	13.99
No. 4	7.5	11.03	-3.53	2.96
PASA No. 4	0.0	2.93	-2.93	---

ROTURA DE GRANOS B= 6.96 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 2 HR

ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 50.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS INICIALES

D10 = 9.7 MM

D30= 13.0 MM

D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

FINALES

D10 = 7.7 MM

D30= 12.7MM

D60= 18.9 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.45$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.11$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	44.89 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03275 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1526.72 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01852 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01423 M3
$e = V_v / V_s =$	0.7684
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	43.45 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	41.66 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03039 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1644.86 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. AGUA) =$	0.01852 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01187 M3
$e = V_v / V_s =$	0.6432
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	39.05 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1505.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1652.5 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO SIN TEFLON

PRUEBA No. 2 DURACION 4 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	3.95	1.05	96.05
3/4"	37.0	35.7	1.3	60.35
1/2"	33.0	31.7	1.3	28.65
3/8"	17.5	16.11	1.39	12.54
No. 4	7.5	10.0	-2.5	2.54
PASA No. 4	0.0	2.52	-2.52	---

ROTURA DE GRANOS B = 5.04 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 4 HR

ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 45.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM

D30 = 13.0 MM

D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$
GP (GRAVAMALGRADUADA)

FINALES

D10 = 8.5 MM

D30 = 12.7MM

D60 = 18.8 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.2$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.0$
GP (GRAVA MAL GRADUADA)

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	41.76 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03047 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1476.86 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01381 M3
$e = V_v / V_s =$	0.829
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	45.32 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1487.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1622.0 KG/M3

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	37.69 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.0275 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1636.36 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01084 M3
$e = V_v / V_s =$	0.651
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	39.42 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1477.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1652.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO SIN TEFLON

PRUEBA No. 3 DURACION 8 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	3.53	1.47	96.47
3/4"	37.0	27.4	9.6	69.07
1/2"	33.0	36.87	-3.87	32.2
3/8"	17.5	15.87	1.63	16.33
No. 4	7.5	11.94	-4.44	4.39
PASA No. 4	0.0	4.32	-4.32	---

ROTURA DE GRANOS B=12.7 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 8 HR

ESFUERZO: 16.45 KG/CM²

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 45.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM²

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM

D30 = 13.0 MM

D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$$Cu = D60 / D10 = 1.95$$

$$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$$

GP (GRAVAMALGRADUADA)

FINALES

D10 = 6.9 MM

D30 = 12.0 MM

D60 = 17.1 MM

CLASIFICACION SUCS:

$$Cu = D60 / D10 = 2.48$$

$$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.22$$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	43.96 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03208 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1402.74 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01542 M3
$e = V_v / V_s =$	0.926
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	48.07%
PESO VOL. SECO SUELTO =	1387.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1552.5 KG/M3

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	37.46 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.02733 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1646.54 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01067 M3
$e = V_v / V_s =$	0.640
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	39.04%
PESO VOL. SECO SUELTO =	1382.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1575.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO SIN TEFLON

PRUEBA No. 4 DURACION 16 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No.4

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
TOTAL**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.4	0.6	95.6
3/4"	37.0	27.6	9.4	68.0
1/2"	33.0	33.7	-0.7	34.3
3/8"	17.5	17.9	-0.4	16.4
No. 4	7.5	12.3	-4.8	4.1
PASA No. 4	0.0	4.1	-4.1	---

ROTURA DE GRANOS B=10.0 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 16 HR

ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 45.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM

D30= 13.0 MM

D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$

GP (GRAVAMALGRADUADA)

FINALES

D10 = 7.0 MM

D30= 12.0 MM

D60= 17.1 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.44$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.22$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS PARTE SUPERIOR

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.4	-0.4	94.6
3/4"	37.0	30.6	6.4	64.0
1/2"	33.0	36.1	-3.1	27.9
3/8"	17.5	16.4	1.1	11.5
No. 4	7.5	9.4	-2.4	1.6
PASA No. 4	0.0	1.6	-1.6	---

ROTURA DE GRANOS B= 7.5 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS PARTE MEDIA

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.6	0.4	95.4
3/4"	37.0	30.6	6.4	64.8
1/2"	33.0	34.2	-1.2	30.6
3/8"	17.5	17.9	-0.4	12.7
No. 4	7.5	10.6	-3.1	2.1
PASA No. 4	0.0	2.1	-2.1	---

ROTURA DE GRANOS B= 6.8 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS PARTE INFERIOR

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	3.1	1.9	96.9
3/4"	37.0	21.0	16.0	75.9
1/2"	33.0	30.7	2.3	45.2
3/8"	17.5	19.6	-2.1	25.6
No. 4	7.5	16.7	-9.2	8.9
PASA No. 4	0.0	8.9	-8.9	---

ROTURA DE GRANOS B= 20.2 %

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	43.66 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03186 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1412.43 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V.AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01519 M3
$e = V_v / V_s =$	0.910
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	47.7 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1360.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1552.0 KG/M3

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	36.06 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.02631 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1710.40 KG / M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.00964 M3
$e = V_v / V_s =$	0.578
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	36.7 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1445.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1640.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO SIN TEFLON

PRUEBA No. 5 DURACION 24 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
TOTAL

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS %	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.7	0.3	95.3
3/4"	37.0	28.1	8.9	67.2
1/2"	33.0	33.7	-0.7	33.5
3/8"	17.5	17.2	0.3	16.3
No. 4	7.5	12.3	-4.8	4.0
PASA No. 4	0.0	4.0	-4.0	---

ROTURA DE GRANOS B=9.5 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 16 HR

ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 45.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM

D30 = 13.0 MM

D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$
GP (GRAVAMALGRADUADA)

FINALES

D10 = 6.4 MM

D30 = 11.5 MM

D60 = 17.2 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.53$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.23$
GP (GRAVA MAL GRADUADA)

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE SUPERIOR**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.1	-0.1	94.9
3/4"	37.0	30.3	6.7	64.6
1/2"	33.0	36.6	-3.6	28.0
3/8"	17.5	16.7	-0.8	11.3
No. 4	7.5	10.1	-2.6	1.20
PASA No. 4	0.0	1.2	-1.2	---

ROTURA DE GRANOS B=7.50 %

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE MEDIA**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.1	-0.1	94.9
3/4"	37.0	32.5	4.5	62.4
1/2"	33.0	32.6	0.4	29.8
3/8"	17.5	16.8	0.7	13.0
No. 4	7.5	10.8	-3.3	2.2
PASA No. 4	0.0	2.2	-2.2	---

ROTURA DE GRANOS B=5.6 %

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE INFERIOR**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	3.6	1.4	96.4
3/4"	37.0	20.2	16.8	76.2
1/2"	33.0	29.6	3.4	46.6
3/8"	17.5	18.8	-1.3	27.8
No. 4	7.5	17.5	-10.0	10.3
PASA No. 4	0.0	10.3	-10.3	---

ROTURA DE GRANOS B=21.6 %

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	43.36 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03164 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1422.30 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01497 M3
$e = V_v / V_s =$	0.898
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	47.30 %
PESO VOL. SECO SUELTO	1397.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1557.5 KG/M3

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	36.46 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.02660 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1691.73 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.00993 M3
$e = V_v / V_s =$	0.596
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	37.33 %
PESO VOL. SECO SUELTO	1452.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1652.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 1 DURACION 2 HORAS
BANCO: TLACOTE
MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.744	0.256	95.26
3/4"	37.0	37.616	-0.616	57.65
1/2"	33.0	28.525	4.475	29.13
3/8"	17.5	16.535	0.965	12.60
No. 4	7.5	10.039	-2.539	2.57
PASA No. 4	0.0	2.538	-2.538	---

ROTURA DE GRANOS B = 5.69 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG
 FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG
 DURACION DE LA PRUEBA: 2 HR
 ESFUERZO : 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws =50.0 KG
 Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2
 H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM
 D30= 13.0 MM
 D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 0.91$
GP (GRAVA MAL GRADUADA)

FINALES

D10 = 8.2 MM
 D30= 12.7MM
 D60= 18.8 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.29$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 1.05$
GP (GRAVA MAL GRADUADA)

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	43.355 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03309 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1511.03 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.0185 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01459 M3
$e = V_v / V_s =$	0.7886
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	44.10 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	41.46 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03025 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1652.80 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.0185 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01175 M3
$e = V_v / V_s =$	0.6351
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	38.84 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1510.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1697.5 KG/M3

EFEECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 2 DURACION 4 HORAS
BANCO: TLACOTE
MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.43	-0.43	94.57
3/4"	37.0	32.82	4.18	61.75
1/2"	33.0	32.47	0.53	29.28
3/8"	17.5	16.90	0.60	12.38
No. 4	7.5	10.0	-2.50	2.38
PASA No. 4	0.0	2.59	-2.59	---

ROTURA DE GRANOS B= 5.31 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG
 FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG
 DURACION DE LA PRUEBA: 4 HR
 ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 50.0 KG
 Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2
 H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM
 D30 = 13.0 MM
 D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$$Cu = D60 / D10 = 1.95$$

$$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

FINALES

D10 = 8.4 MM
 D30 = 12.6 MM
 D60 = 18.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$$Cu = D60 / D10 = 2.14$$

$$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.05$$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	43.355 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03309 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1511.03 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.0185 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01459 M3
$e = V_v / V_s =$	0.7886
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	44.09 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	41.19 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03005 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1663.89 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. AGUA) =$	0.0185 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01155 M3
$e = V_v / V_s =$	0.624
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	38.44 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1487.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1590.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 3 DURACION 8 HORAS
BANCO: TLACOTE
MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.75	0.25	95.25
3/4"	37.0	33.5	3.50	61.75
1/2"	33.0	31.18	1.82	30.57
3/8"	17.5	15.97	1.53	14.60
No. 4	7.5	11.13	-3.63	3.47
PASA No. 4	0.0	3.4	-3.40	---

ROTURA DE GRANOS B= 7.1 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG
 FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG
 DURACION DE LA PRUEBA: 8 HR
 ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws =45.0 KG
 Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2
 H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM
 D30= 13.0 MM
 D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 0.91$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

FINALES

D10 = 7.5 MM
 D30= 12.5 MM
 D60= 18.5 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.47$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 1.13$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	42.99 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03136 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1434.95 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.0166 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01476 M3
$e = V_v / V_s =$	0.8891
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	47.06 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	38.03 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.02775 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1621.68 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. AGUA) =$	0.01666 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01109 M3
$e = V_v / V_s =$	0.6656
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	39.96 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1462.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1625.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 4 DURACION 16 HORAS
BANCO: TLACOTE
MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	4.63	0.37	95.37
3/4"	37.0	36.77	0.23	58.60
1/2"	33.0	28.98	4.02	29.62
3/8"	17.5	16.06	1.44	13.56
No. 4	7.5	10.71	-3.21	2.85
PASA No. 4	0.0	2.82	-2.82	---

ROTURA DE GRANOS B= 6.06 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG
 FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG
 DURACION DE LA PRUEBA: 16 HR
 ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws =45.0 KG
 Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2
 H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM
 D30= 13.0 MM
 D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 1.95$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 0.91$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

FINALES

D10 = 8.0 MM
 D30= 12.6 MM
 D60= 18.7 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 2.34$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 1.06$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

Compilación de resultados de rotura de granos

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	42.12 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.030733 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1464.2 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01406 M3
$e = V_v / V_s =$	0.8434
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	45.75 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	36.47 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.02661 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1691.1 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.00994 M3
$e = V_v / V_s =$	0.5963
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	37.35 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1477.5 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1630.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 5 DURACION 24 HORAS
BANCO: TLACOTE
MATERIAL: BALASTO DENOMINACION No. 4

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
TOTAL**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.8	-0.8	94.2
3/4"	37.0	26.9	10.1	67.3
1/2"	33.0	33.4	-0.4	33.9
3/8"	17.5	16.5	1.0	17.4
No. 4	7.5	13.3	-5.8	4.1
PASA No. 4	0.0	4.1	-4.1	---

ROTURA DE GRANOS B= 11.1 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG
 FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG
 DURACION DE LA PRUEBA: 24 HR
 ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 45.0 KG
 Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2
 H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 9.7 MM
 D30 = 13.0 MM
 D60 = 19.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$$Cu = D60 / D10 = 1.95$$

$$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 0.91$$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

FINALES

D10 = 6.4 MM
 D30 = 11.5 MM
 D60 = 17.2 MM

CLASIFICACION SUCS:

$$Cu = D60 / D10 = 2.7$$

$$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 1.2$$

GP (GRAVA MAL GRADUADA)

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE SUPERIOR**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	6.7	-1.7	93.3
3/4"	37.0	30.1	6.9	63.2
1/2"	33.0	34.7	-1.7	28.5
3/8"	17.5	15.6	1.9	12.9
No. 4	7.5	11.2	-3.7	1.7
PASA No. 4	0.0	1.7	-1.7	---

ROTURA DE GRANOS B=8.8 %

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE MEDIA**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.2	-0.2	94.8
3/4"	37.0	25.6	11.4	69.2
1/2"	33.0	33.9	-0.9	35.3
3/8"	17.5	17.8	-0.3	17.5
No. 4	7.5	14.0	-6.5	3.5
PASA No. 4	0.0	3.5	-3.5	---

ROTURA DE GRANOS B= 11.4 %

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE INFERIOR**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	5.0	5.5	-0.5	94.5
3/4"	37.0	25.5	11.5	69.0
1/2"	33.0	31.7	1.3	37.3
3/8"	17.5	15.8	1.7	21.5
No. 4	7.5	14.6	-7.1	6.9
PASA No. 4	0.0	6.9	-6.9	---

ROTURA DE GRANOS B = 14.5 %

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	43.36 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.03164 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1422.3 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.01497 M3
$e = V_v / V_s =$	0.898
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	47.3 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1382.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1565.0 KG/M3

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	36.06 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.02631 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1710.3 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.01667 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.00964 M3
$e = V_v / V_s =$	0.578
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	36.6 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1472.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	1627.0 KG/M3

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 2 DURACION 4 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
TOTAL**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	38.72	1.28	61.28
3/4"	20.0	17.89	2.11	43.39
1/2"	3.0	4.76	-1.76	38.63
3/8"	3.0	3.42	-0.42	35.21
No. 4	4.0	4.94	-0.94	30.27
No.10	7.0	6.83	0.17	23.44
No. 20	5.0	5.04	-0.04	18.40
No. 40	6.0	5.81	0.19	12.59
No. 70	4.0	4.03	-0.03	8.56
No. 100	2.0	1.97	0.03	6.59
No. 200	6.0	5.37	0.63	1.22
PASA No. 200	0.0	1.22	-1.22	---

ROTURA DE GRANOS B= 4.41 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 4 HR

ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws =50.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 0.3 MM

D30= 4.9 MM

D60 = 26.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

$Cu = D60 / D10 = 86.66$

$Cc = (D30 x D30) / (D10 x D60) = 3.07$

GP (GRAVA BIEN GRADUADA)

FINALES

D10= 0.27 M M

$$C_u = D_{60} / D_{10} = 96.29$$

D30= 4.70 M M

D60= 26.0 M M

$$C_c = (D_{30} \times D_{30}) / (D_{10} \times D_{60}) = 3.14$$

CLASIFICACION SUCS:

GW (GRAVA BIEN GRADUADA)

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE SUPERIOR**

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	44.8	-4.80	55.20
3/4"	20	20.94	-0.94	34.26
1/2"	3.0	5.41	-2.41	28.85
3/8"	3.0	3.40	-0.40	25.45
No.4	4.0	4.47	-0.47	20.98
No.10	7.0	5.14	1.86	15.84
No.20	5.0	3.35	1.65	12.49
No.40	6.0	3.79	2.21	8.70
No.70	4.0	2.71	1.29	5.99
No.100	2.0	1.35	0.65	4.64
No.200	6.0	3.78	2.22	0.86
PASA No.200	0.0	0.86	-0.86	---

ROTURA DE GRANOS B = 9.88 %

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE MEDIA**

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	41.46	-1.46	58.54
3/4"	20	17.43	2.57	41.11
1/2"	3.0	4.63	-1.63	36.48
3/8"	3.0	3.46	-0.46	33.02
No.4	4.0	4.95	-0.95	28.07
No.10	7.0	6.67	0.33	21.4
No.20	5.0	4.71	0.29	16.69
No.40	6.0	5.25	0.75	11.44
No.70	4.0	3.63	0.37	7.81
No.100	2.0	1.76	0.24	6.05
No.200	6.0	4.88	1.12	1.17
PASA No.200	0.0	1.17	-1.17	--

ROTURA DE GRANOS B = 5.67 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE INFERIOR

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1	40	26.73	13.27	73.27
3/4"	20	14.52	5.48	58.75
1/2"	3.0	4.09	-1.09	54.66
3/8"	3.0	3.40	-0.40	51.26
No. 4	4.0	5.55	-1.55	45.71
No 10	7.0	9.29	-2.29	36.42
No 20	5.0	7.75	-2.75	28.67
No 40	6.0	9.27	-3.27	19.40
No 70	4.0	6.35	-2.35	13.05
No. 100	2.0	3.09	-1.09	9.96
No. 200	6.0	8.16	-2.16	1.8
PASA No. 200	0.0	1.80	-1.80	--

ROTURA DE GRANOS B = 18.75 %

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	37.96 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.027697 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1805.25 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. \text{ AGUA}) =$	0.018518 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.009179 M3
$e = V_v / V_s =$	0.4956
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	33.14 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1780.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	2015.0 KGG/M3
PARTICULAS PLANAS =	33.0 %
PARTICULAS ALARGADAS =	57.5 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	35.26 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.025727 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1943.48 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. \text{ AGUA}) =$	0.018518 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.007209 M3
$e = V_v / V_s =$	0.3892
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	28.02 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1837.50 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	2025.0 KGG/M3
PARTICULAS PLANAS =	34.88 %
PARTICULAS ALARGADAS =	56.59 %

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 3 DURACION 8 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
TOTAL**

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	4.0	33.16	6.84	66.84
3/4"	2.0	20.64	-0.64	46.20
1/2"	3.0	6.76	-3.76	39.44
3/8"	3.0	3.53	-0.53	35.91
No 4	4.0	5.23	-1.23	30.68
No. 10	7.0	7.14	-0.14	23.54
No 20	5.0	5.25	-0.25	18.29
No. 40	6.0	5.86	0.14	12.43
No 70	4.0	4.06	-0.06	8.37
No. 100	2.0	2.51	-0.51	5.86
No. 200	6.0	4.46	1.54	1.40
PASA No 200	0.0	1.40	-1.4	---

ROTURA DE GRANOS B = 8.52 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA : 8 HORAS

ESFUERZO: 16.45 KG / CM2

DATOS DEL MATERIAL

$W_s = 50.0 \text{ KG}$

$S_s = 2.70$

DATOS DEL CILINDRO

$A = 729.66 \text{ CM}^2$

$H = 50 \text{ CM (ALTURA DEL MOLDE)}$

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

$D_{10} = 0.3 \text{ MM}$

$D_{30} = 4.9 \text{ MM}$

$D_{60} = 26.0 \text{ MM}$

CLASIFICACION SUCS:

$C_u = D_{60} / D_{10} = 86.66$

$C_c = (D_{30} \times D_{30}) / (D_{10} \times D_{60}) = 3.07$

GW (GRAVA BIEN GRADUADA)

FINALES

D10 = 0.28 MM

$C_u = D_{60} / D_{10} = 82.14$

D30 = 4.40 MM

D60 = 23.0 MM

$C_c = (D_{30} \times D_{30}) / (D_{10} \times D_{60}) = 3.00$

CLASIFICACION SUCS:

GW (GRAVA BIEN GRADUADA)

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

PARTE SUPERIOR

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	37.93	2.07	62.07
*3/4"	20.0	23.42	-3.42	38.65
1/2"	3.0	7.10	-4.10	31.55
3/8"	3.0	3.48	-0.48	28.07
No. 4	4.0	4.69	-0.69	23.38
No 10	7.0	5.73	1.27	17.65
No.20	5.0	3.92	1.08	13.73
No 40	6.0	4.26	1.74	9.47
No 70	4.0	2.96	1.04	6.51
No. 100	2.0	1.69	0.31	4.82
No. 200	6.0	3.52	2.48	1.3
PASA No. 200	0.0	1.30	-1.30	---

ROTURA DE GRANOS B = 9.99 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

PARTE MEDIA

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	30.77	9.23	69.23
3/4"	20.0	23.59	-3.59	45.64
1/2"	3.0	6.68	-3.68	38.96
3/8"	3.0	3.44	-0.44	35.52
No. 4	4.0	5.05	-1.05	30.47
No 10	7.0	7.25	-0.25	23.22
No.20	5.0	5.22	-0.22	18.00
No 40	6.0	5.77	0.23	12.23
No 70	4.0	3.92	0.08	8.31
No. 100	2.0	2.50	-0.50	5.81
No. 200	6.0	4.36	1.64	1.45
PASA No. 200	0.0	1.45	-1.45	---

ROTURA DE GRANOS B = 11.18 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE INFERIOR

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1	40.0	24.47	15.53	75.53
3/4"	20.0	19.69	0.31	55.84
1/2"	3.0	6.72	-3.72	49.12
3/8"	3.0	3.50	-0.50	45.62
No 4	4.0	5.77	-1.77	39.85
No. 10	7.0	8.80	-1.80	31.05
No.20	5.0	6.92	-1.92	24.13
No 40	6.0	7.89	-1.89	16.24
No. 70	4.0	5.53	-1.53	10.71
No 100	2.0	3.54	-1.54	7.17
No. 200	6.0	5.69	0.31	1.48
PASA No.	0.0	1.48	-1.48	---

ROTURA DE GRANOS B = 16.15 %

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	39.21 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.028609 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1747.70 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.018518 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.010091 M3
$e = V_v / V_s =$	0.5449
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	35.27 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1777.50 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	2010.0 KGG/M3
PARTICULAS PLANAS =	30.65 %
PARTICULAS ALARGADAS =	52.93 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	34.26 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.024998 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	2000.16 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P. V. AGUA) =$	0.018518 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.00648 M3
$e = V_v / V_s =$	0.3499
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	25.92 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1815.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	2002.50 KGG/M3
PARTICULAS PLANAS =	30.64 %
PARTICULAS ALARGADAS =	60.51 %

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIAL DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE:

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 4 DURACION 16 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
TOTAL**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	34.28	5.72	65.72
3/4"	20.0	19.56	0.44	46.16
1/2"	3.0	6.69	-3.69	39.47
3/8"	3.0	3.60	-0.6	35.87
No. 4	4.0	5.09	-1.09	30.78
No 10	7.0	7.13	-0.13	23.65
No 20	5.0	5.18	-0.18	18.47
No. 40	6.0	5.80	0.20	12.67
No 70	4.0	4.02	-0.02	8.65
No 100	2.0	2.39	-0.39	6.26
No 200	6.0	4.68	1.32	1.58
PASA No.	0.0	1.58	-1.58	---

ROTURA DE GRANOS B= 7.68 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA: 16 HR

LA PRUEBA :

16 HORAS

ESFUERZO : 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL

Ws = 50.0 KG

Ss = 2.70

DATOS DEL CILINDRO

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 0.3 MM

D30 = 4.9 MM

D60 = 26.0 MM

$Cu = D60 / D10 = 86.66$

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 3.07$

CLASIFICACION SUCS:

GW (GRAVA BIEN GRADUADA)

FINALES

D10= 0.27 M M

$Cu = D60 / D10 = 85.18$

D30= 4.20 M M

D60= 23.0 M M

$Cc = (D30 \times D30) / (D10 \times D60) = 2.84$

CLASIFICACION SUCS:

GW (GRAVA BIEN GRADUADA)

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

PARTE SUPERIOR

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	40.42	-0.42	59.58
3/4"	20.0	19.94	0.06	39.64
1/2"	3.0	6.80	-3.80	32.84
3/8"	3.0	3.98	-0.98	28.86
No.4	4.0	4.71	-0.71	24.15
No.10	7.0	5.73	1.27	18.42
No.20	5.0	3.93	1.07	14.49
No.40	6.0	4.3	1.70	10.19
No.70	4.0	3.01	0.99	7.18
No.100	2.0	1.80	0.20	5.38
No.200	6.0	3.64	2.36	1.74
PASA No.200	0.0	1.74	-1.74	---

ROTURA DE GRANOS B = 7.65 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

PARTE MEDIA

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	33.62	6.38	66.38
3/4"	20.0	22.81	-2.81	43.57
1/2"	3.0	6.47	-3.47	37.10
3/8"	3.0	3.30	-0.30	33.80
No.4	4.0	5.01	-1.01	28.79
No.10	7.0	6.76	0.24	22.03
No.20	5.0	5.01	-0.01	17.02
No.40	6.0	5.31	0.69	11.71
No.70	4.0	3.81	0.19	7.90
No.100	2.0	2.18	-0.18	5.72
No.200	6.0	4.38	1.62	1.34
PASA No.200	0.0	1.34	-1.34	---

ROTURA DE GRANOS B = 9.12 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE INFERIOR

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	27.19	12.81	72.81
3/4"	20.0	15.59	4.41	57.22
1/2"	3.0	6.77	-3.77	50.45
3/8"	3.0	3.43	-0.43	47.02
No 4	4.0	5.67	-1.67	41.35
No. 10	7.0	9.31	-2.31	32.04
No 20	5.0	6.95	-1.95	25.09
No. 40	6.0	8.23	-2.23	16.86
No. 70	4.0	5.53	-1.53	11.33
No. 100	2.0	3.36	-1.36	7.97
No. 200	6.0	6.32	-0.32	1.65
PASA No 200	0.0	1.65	-1.65	---

ROTURA DE GRANOS B = 17.22 %

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL =	38.36 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.027989 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	1786.41 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. \text{ AGUA }) =$	0.018518 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.009471 M3
$e = V_v / V_s =$	0.5114
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	33.84 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1802.50 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	2002.50 KG/M3
PARTICULAS PLANAS =	37.14 %
PARTICULAS ALARGADAS =	60.56 %

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL =	33.76 CM
VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m =$	0.024633 M3
PESO VOLUMETRICO= $W_m / V_m =$	2029.79 KG/M3
$V_s = W_s / (S_s \times P.V. \text{ AGUA }) =$	0.018518 M3
$V_v = V_m - V_s =$	0.006115 M3
$e = V_v / V_s =$	0.3302
$n = (V_v / V_m) \times 100 =$	24.82 %
PESO VOL. SECO SUELTO =	1855.0 KG/M3
PESO VOL. SECO COMPACTO =	2050.0 KG/M3
PARTICULAS PLANAS =	29.46 %
PARTICULAS ALARGADAS =	60.64 %

EFFECTO DE ROTURA DE GRANOS EN MATERIA DE BALASTO

DATOS DEL ENSAYE

ENSAYE REALIZADO CON TEFLON

PRUEBA No. 5 DURACION 24 HORAS

BANCO: TLACOTE

MATERIAL: BALASTO GRANULOMETRIA BIEN GRADUADA

**TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANO
TOTAL**

MALLA No.	%RETENIDO INICIAL	%RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	34.16	5.84	65.84
3/4"	20.0	20.79	-0.79	45.05
1/2"	3.0	6.46	-3.46	38.59
3/8"	3.0	3.31	-0.31	35.28
No 4	4.0	5.16	-1.16	30.12
No. 10	7.0	6.71	0.29	23.41
No 20	5.0	5.11	-0.11	18.30
No. 40	6.0	5.79	0.21	12.51
NO 60	4.0	3.97	0.03	8.54
No 100	2.0	1.98	0.02	6.56
No 200	6.0	4.86	1.14	1.70
PASA No. 200	0.0	1.70	-1.70	---

ROTURA DE GRANOS B = 7.53 %

CONDICIONES DE PRUEBA

CARGA APLICADA: 12000 KG

FRECUENCIA: 0.84 CICLOS / SEG

DURACION DE LA PRUEBA : 24 HORAS

ESFUERZO: 16.45 KG/CM2

DATOS DEL MATERIAL DATOS DEL CILINDRO

Ws = 50.0 KG

Ss = 2.70

A = 729.66 CM2

H = 50 CM (ALTURA DEL MOLDE)

CONDICIONES GRANULOMETRICAS

INICIALES

D10 = 0.3 MM

D30 = 4.9 MM

D60= 26.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

Cu = D60 / D10 = 86.66

Cc= (D30 x30) / (D10 x D60) = 3.07

FINALES

D10= 0.28 MM

$$C_u = D_{60} / D_{10} = 85.71$$

D30= 4.60 MM

$$C_c = (D_{30} \times D_{30}) / (D_{10} \times D_{60}) = 3.14$$

D60= 24.0 MM

CLASIFICACION SUCS:

GW (GRAVA BIEN GRADUADA)

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

PARTE SUPERIOR

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	43.83	-3.83	56.17
3/4"	20.0	24.76	-4.76	31.41
1/2"	3.0	7.03	-4.03	24.38
3/8"	3.0	2.96	0.04	21.42
No.4	4.0	4.11	-0.11	17.31
No.10	7.0	4.52	2.48	12.79
No.20	5.0	2.48	2.52	10.31
No.40	6.0	3.11	2.89	7.20
NO.60	4.0	2.21	1.79	4.99
No.100	2.0	0.90	1.10	4.09
No.200	6.0	2.38	3.62	1.71
PASA No.200	0.0	1.71	-1.71	---

ROTURA DE GRANOS B = 14.44 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS

PARTE MEDIA

MALLA No.	% RETENIDO INICIAL	% RETENIDO FINAL	DIFERENCIAS (%)	% PASA DESP. DEL ENSAYE
1"	40.0	29.20	10.8	70.8
3/4"	20.0	20.97	-0.97	49.84
1/2"	3.0	6.88	-3.88	42.97
3/8"	3.0	3.88	-0.088	39.09
No.4	4.0	5.74	-1.74	33.35
No.10	7.0	7.63	-0.63	25.73
No.20	5.0	5.99	-0.99	19.74
No.40	6.0	6.24	-0.24	13.5
NO.60	4.0	4.31	-0.31	9.2
No.100	2.0	2.33	-0.33	6.88
No.200	6.0	5.48	0.52	1.4
PASA No.200	0.0	1.35	-1.35	---

ROTURA DE GRANOS B = 11.32 %

TABLA DE CALCULO DE ROTURA DE GRANOS
PARTE INFERIOR

MALLA	% RETENIDO	% RETENIDO	DIFERENCIAS	% PASA DESP.
No.	INICIAL	FINAL	(%)	DEL ENSAYE
1"	40.0	30.72	9.28	69.30
3/4"	20.0	16.99	3.01	52.30
1/2"	3.0	5.47	-2.47	46.84
3/8"	3.0	3.00	0.00	43.84
No.4	4.0	5.48	-1.48	38.37
No.10	7.0	7.71	-0.71	30.67
No.20	5.0	6.57	-1.57	24.10
No.40	6.0	7.75	-1.75	16.35
NO.60	4.0	5.19	-1.19	11.16
No.100	2.0	2.58	-0.58	8.58
No.200	6.0	6.45	-0.45	2.13
PASA No.200	0.0	2.07	-2.07	---

ROTURA DE GRANOS B = 12.29 %

CONDICIONES INICIALES

ALTURA DEL MATERIAL = 37.96 CM
 VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m = 0.02769 \text{ M}^3$
 PESO VOLUMETRICO = $W_m / V_m = 1805.24 \text{ KG/M}^3$
 $V_s = W_s / (S_s \times P.V. \text{ AGUA}) = 0.01851 \text{ M}^3$
 $V_v = V_m - V_s = 0.00918 \text{ M}^3$
 $e = V_v / V_s = 0.496$
 $n = (V_v / V_m) \times 100 = 33.15 \%$
 PESO VOL. SECO SUELTO = 1775.0 KG/M³
 PESO VOL. SECO COMPACTO = 1990.0 KG/M³

CONDICIONES FINALES

ALTURA DEL MATERIAL = 33.36 CM
 VOLUMEN DEL MATERIAL $V_m = 0.02434 \text{ M}^3$
 PESO VOLUMETRICO = $W_m / V_m = 2054.23 \text{ KG/M}^3$
 $V_s = W_s / (S_s \times P.V. \text{ AGUA}) = 0.01851 \text{ M}^3$
 $V_v = V_m - V_s = 0.00583 \text{ M}^3$
 $e = V_v / V_s = 0.315$
 $n = (V_v / V_m) \times 100 = 23.95 \%$
 PESO VOL. SECO SUELTO = 1847.50 KG/M³
 PESO VOL. SECO COMPACTO = 2007.50 KG/M³

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx