

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE UN CONCRETO
RODILLADO DE $f'c = 250\text{KG}/\text{CM}^2$ CON AGREGADOS DE LA
CANTERA DEL RÍO CHONTA - CAJAMARCA”**

TESIS

Para optar el Título Profesional de;

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

BACH. ARTURO JOSUÉ SALAZAR RONCAL

ASESOR:

M. en I. HÉCTOR PÉREZ LOAYZA

CAJAMARCA - PERÚ 2017

Agradecimiento:

A Dios, por guiarme a lo largo de mi carrera profesional, por darme fuerza suficiente para seguir adelante a pesar de los problemas.

A mis padres, Elvira y Alfonso, por ser los pilares en mi educación y por impulsarme cada día a ser mejor persona para la sociedad y para mi desarrollo personal.

A mi asesor, el Ingeniero Héctor Pérez, por su apoyo constante a lo largo del desarrollo de esta investigación y por compartir sus conocimientos adquiridos en su larga trayectoria.

A mi familia, a Fresia, Maelí, Ruth, por las muestras constantes de cariño y preocupación a pesar de la distancia. A Claudio por el apoyo durante este proyecto.

A los docentes de la facultad de Ingeniería, especialmente a los Ingenieros Raúl Valera, José Lezama y Marco Hoyos, pues lo enseñado en las aulas se plasma en este trabajo.

Dedicatoria:

A Elvira Roncal: Porque eres mi soporte, por la fuerza constante que me has brindado a lo largo de mi vida, por el temple, la constancia, el gran corazón que tienes y tus infinitas virtudes; este trabajo es tuyo.

A Alfonso Salazar: Porque me enseñaste que para ser el primero hay que ser el último, eres un ejemplo a seguir y porque haces de mí alguien mejor.

A las mujeres de mi vida: Ruth, Maelí y Fresia; porque cada una es parte fundamental en mi vida, por las experiencias vividas juntos y por ayudarme a crecer para bien.

A Gabriel Sulca: Eres un hermano y gran amigo; tu bondad y tu carácter me hace creer en un mundo mejor.

A Angel, Matías, Sebastian y Adriano porque son el futuro del país.

CONTENIDOS

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	01
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	05
2.1 Antecedentes teóricos.....	05
2.2 Bases Teóricas.....	08
2.2.1 El concreto rodillado.....	08
2.2.1.1 Concepto.....	08
2.2.1.2 Aplicaciones.....	08
2.2.1.3 Ventajas del concreto rodillado.....	09
2.2.1.4 Filosofías de diseño.....	09
2.2.2 Energía de compactación.....	11
2.2.2.1 Energía de compactación mecánica.....	11
2.2.2.2 Energía de compactación en laboratorio.....	14
2.2.2.3 Energía de compactación en campo.....	18
2.2.3 Materiales para mezclas de concreto rodillado.....	20
2.2.3.1 Materiales cementantes.....	20
2.2.3.2 Agregados.....	21
2.2.3.3 Agua.....	22
2.2.4 Proporción de mezclas.....	22
2.2.4.1 Método de proporción de mezclas con aproximación a concreto.....	23
2.2.4.2 Método de proporción de mezclas con aproximación a suelos.....	25
2.2.5 Propiedades del concreto.....	29
2.2.5.1 Propiedades del concreto fresco.....	29
2.2.5.2 Propiedades del concreto endurecido.....	30
2.3 Definición de términos básicos.....	30
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 Generalidades.....	34
3.2 Procedimientos de diseño de la mezcla del concreto rodillado.....	34
3.2.1 Propiedades Físico – Mecánicas de los agregados seleccionados.....	36
3.2.2 Características del cemento.....	37
3.2.3 Determinación de las cantidades de materiales de mezcla.....	37
3.2.4 Determinación de número de capas y número de golpes.....	38
3.2.5 Preparación de moldes de cilindros de resistencia a la compresión.....	41
3.2.6 Preparación de moldes de resistencia a la flexión.....	43
3.3 Tratamiento de datos y presentación de resultados.....	43

3.3.1	Concreto rodillado a la compresión a los 7 días.....	44
3.3.2	Concreto rodillado a la compresión a los 14 días.....	45
3.3.3	Concreto rodillado a la compresión a los 28 días.....	46
3.3.4	Concreto rodillado a la compresión a los 56 días.....	47
3.3.5	Concreto rodillado a la flexión a los 28 días.....	48
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		49
4.1	Propiedades del concreto rodillado.....	50
4.2	Análisis de la resistencia a la compresión del concreto rodillado.....	53
4.2.1	Comparación de resistencias del concreto rodillado con concreto normal..	53
4.2.2	Resistencia promedio por el número de capas.....	54
4.3	Análisis de la resistencia a la flexión del concreto rodillado.....	57
4.2.1	Comparación de resistencias del concreto rodillado con concreto normal..	57
4.2.2	Comparación por número de capas.....	58
4.3	Análisis del módulo de elasticidad.....	59
4.4	Análisis estadístico.....	65
4.5	Equivalencia entre rodillos en campo y la compactación en laboratorio.....	74
4.5	Discusión de los resultados.....	75
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		77
5.1	Conclusiones.....	78
5.2	Recomendaciones.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		80
ANEXOS.....		81

RESUMEN

En la ciudad de Cajamarca se tiene un problema severo por las fuertes precipitaciones que afectan al concreto en pavimentos y losas donde se utiliza concreto en forma masiva. Por lo tanto se debe lograr determinar las propiedades físico – mecánicas de un concreto rodillado que posea características de durabilidad deseadas para las sollicitaciones antes mencionadas; para ello se realizó el diseño de un concreto con asentamiento nulo, para que pueda ser rodillado en campo. Se realizó el cálculo de la energía de compactación dada por diferentes rodillos, con lo cual se decidió realizar los ensayos en laboratorio con energía por impacto con 600 KN-m/m³. Se realizaron 120 probetas de las cuales 30 fueron ensayadas a los 7 días, 30 a los 14 días, 30 a los 28 días y 30 a los 56 días; ensayando cada tanda en 3, 5 y 7 capas; adicionalmente se ensayaron 9 probetas a flexión en 3, 5 y 7 capas respectivamente. La resistencia de diseño fue de 250Kg/cm²; los resultados obtenidos con respecto a la resistencia a la compresión fue que a los 7 días llega al 100.07% de su resistencia de diseño, a los 14 días al 117.90%, a los 28 días al 153.06% y a los 56 días al 171.26%, sin embargo a flexión no muestra cambios significativos; el peso unitario del concreto aumenta en 3.40% debido a la compactación. Se concluye finalmente que al realizar un concreto rodillado en la ciudad de Cajamarca brinda una gran performance respecto a su resistencia a la compresión.

Palabras clave: Concreto, Concreto rodillado, Energía de compactación, Compactación mecánica, Agregado del río Chonta.

ABSTRACT

In the City of Cajamarca there is a several issue due to the strong rainfall that affect to the concrete in pavements and slabs where it is used in masive form. Thus it must be determinated the phisical – mechanics properties of a rolled concret that possesses desired features of durability due to the above mentioned solicitations; for that It has been made a concrete with zero settlement so that it could be rolled in construction. I has ben made the calculation of the compaction energy given by the different rollers, with which it has been decided to make the laboratory test with impact energy with 600 KN-m/m³. It has been made 120 test pieces of which 30 were tested at 7 days, 30 ay 14 days, 30 at 28 days and 30 at 56 days, testing each batch in 3, 5 and 7 layers; also it has been tested 9 test pieces by flexion in 3,5, and 7 layers respectibily. The results obtained respect to compressive strength were that at 7 days tha concrete comes to 100.07% of its design strength, at 14 days comes to 117.90%, at 28 comes to 153.06% and at 56 days comes to 171.26%. However the flexion strength does not show significant changes; the unit weight of teh concrete increases by 3.40% due to the compaction. It concludes finally that making a rolled concrete in the City of Cajamarca provides a huge performance repect to its compresión strength.

Key words: Concrete, Rolled Concrete, Compaction energy, Mechanical Compaction, Agregate of Chonta river.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La implementación de nuevas tecnologías para la construcción de carreteras, presas, aeropuertos y todas aquellas obras que requieran de concretos masivos son cada vez más necesarias para dar respuesta a las exigencias de diversa índole en el sector de la construcción, esto por la importancia que representa para el desarrollo del país ya que actualmente la tecnología del Concreto Compactado con Rodillo es una alternativa que se está empleando en alrededor del mundo obteniendo muy buenos resultados. En nuestro entorno se hace difícil la utilización de estas nuevas técnicas de compactación debido a la falta de exploración de estos campos con nuestros propios materiales que evidentemente tienen propiedades distintas a las de otros lugares.

El avance de las investigaciones y la tendencia de las obras de ingeniería hace direccionar el enfoque del concreto hacia el concepto de durabilidad, que al mismo tiempo ofrezca una resistencia superior a lo que actualmente nos brinda el concreto convencional como lo es para pavimentos; dado esto en el enfoque local es evidente que Cajamarca tiene un problema severo por las fuertes precipitaciones que se dan a lo largo del año, por consiguiente deteriora rápidamente al concreto y el tiempo de vida es más corto del que ha sido diseñado.

En el caso de las presas con concreto convencional, los costos de producción de dicho concreto debido a las enormes cantidades usadas de conglomerante para lograr la resistencia deseada vuelven al proyecto muy costoso, además que el tiempo de construcción tiende a ser muy prolongado.

En consecuencia, es de suma importancia iniciar el desarrollo de una investigación dirigida a un concreto rodillado aplicado a la realidad de Cajamarca, considerando que una cantera de calidad promedio dentro de la ciudad es la del Chonta y teniendo en cuenta que la resistencia promedio de concretos expansivos importantes es de 250kg/cm^2 , deriva la pregunta:

¿Cuáles son las propiedades físico – mecánicas de un concreto rodillado de $f'c=250\text{kg/cm}^2$ con agregados de la cantera del río Chonta?, para lo cual se planteó la siguiente hipótesis: “El concreto rodillado con agregados del río

Chonta, diseñado para $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$ alcanza una resistencia a la compresión mínima de 500Kg/cm^2 ”

En Cajamarca no existe un estudio anterior a esta investigación sobre un concreto rodillado con agregados del río Chonta, se desconoce cómo variarían la resistencia a la compresión de dicho concreto respecto del tiempo, cuáles son sus propiedades y si finalmente es conveniente o no usarlas en nuestro medio.

Por consiguiente es necesario conocer las propiedades físico-mecánicas de un concreto rodillado $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$ con agregados del río Chonta, y enfocando la variación de la resistencia a la compresión dado que es un parámetro esencial para medir la calidad del concreto rodillado.

La presente investigación será de utilidad como referencia para futuras investigaciones relacionadas con el concreto rodillado y para abrir la puerta a nuevas alternativas de compactación mecánica del concreto, pues utiliza la tecnología del concreto como medio de estudio para alcanzar las resistencias de diseño deseadas, los conceptos que se deben tener en cuenta y sus características, además desde el punto de vista económico, cómo puede mejorar la resistencia de un concreto con dosificación que permita menor uso de material cementante.

Las limitaciones se presentan en la mala gradación que ofrece los agregados de la canteras locales, el incontrolado contenido de finos y elementos contraproducentes como es la presencia de sulfatos, cloruros y materia orgánica que perjudican la calidad del concreto; el dispositivo que se utiliza para la energía de compactación de tal manera que logre compactar uniformemente a lo largo de las probetas a ensayar.

El objetivo de la investigación es lograr determinar las propiedades físico-mecánicas de un concreto rodillado con agregados del río Chonta, con condiciones que permitan la operación del equipo para que pueda compactar uniformemente el concreto, de tal forma que no se hunda o cause demasiada exudación; por lo que se considera un asentamiento igual a cero pulgadas (0”); todo esto a distintas edades del concreto: 7, 14, 28 y 56 días, compactado con una energía de compactación de 600 KN-m/m^3 en 3, 5 y 7 capas; de tal forma que se pueda obtener resultados representativos de este tipo de concreto.

El contenido se desarrollará de la siguiente manera: En el capítulo II se verá el Marco teórico, empezando por los antecedentes previos de investigaciones acerca del Concreto rodillado, las bases teóricas, diseño de mezclas y la definición de los términos básicos; en el capítulo III se desarrollará lo concerniente a Materiales y Métodos, en este capítulo se desarrollará las propiedades de los agregados, el procedimiento que se llevó a cabo para la compactación, y el análisis de datos; en el capítulo IV se tratará el análisis y discusión de resultados; y finalmente en el capítulo V se presentará las conclusiones y resultados del concreto rodillado con agregados de la cantera del Chonta.

CAPITULO II.

MARCO TEÓRICO

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos

2.1.1 A nivel Internacional

José Luis Alvarado Aguirre (2014) Universidad Militar Nueva Granada - Colombia. Realiza un estudio descriptivo de la tecnología del concreto compactado con rodillo y su aplicabilidad en pavimentos, concluye que la técnica de rodillado aumenta considerablemente la permeabilidad, densidad, propiedades que contribuyen a la durabilidad de las estructuras; en la construcción de pavimentos sería una buena alternativa para la gestión y administración de la red primaria, secundaria y terciaria de carreteras; y finalmente la alta capacidad de soporte inicial que se le permite al pavimento ser liberado al tráfico después de su terminación, su alto volumen de producción, alta resistencia y durabilidad, alta capacidad de carga y deformación mínima de la superficie lo convierten en un material bondadoso.

Merlin Olimpia Baños Sanchez, Tatiana Vanessa Flores Flamenco, Elder Iván Santos Fabián (2012) Universidad de El Salvador – El Salvador. Realizan una evaluación y comparación de la resistencia a la compresión de una mezcla de concreto compactado con rodillo, utilizando para la elaboración de especímenes la mesa vibratoria y el martillo vibrocompactador. Concluyendo que los agregados utilizados para elaborar las mezclas de concreto rodillado deben cumplir con la especificación de la ASTM C33; después de evaluar las propiedades en estado fresco y endurecido estudiadas al concreto rodillado, a la edad de 28 y 56 días, las variaciones existentes se encuentran en un rango de 1 al 10% entre ambos métodos de moldeo de especímenes de prueba cuando la mezcla presenta una consistencia seca; el martillo vibrocompactador, fue el método que presentó mejores resultados en el acabado superficial, acomodo de las partículas y resistencia.

Leydi Carolina Bonilla Rodriguez (2009) Universidad Industrial de Santander – Colombia. Realiza una investigación acerca de pavimentos en concreto compactado con rodillo en minas a cielo abierto, en esta investigación concluye que el concreto rodillado se considera una alternativa de construcción para

nuevos pavimentos, y la rehabilitación de los existentes; los bajos contenidos de cemento en la mezcla de concreto rodillado proporcionan una disminución en el costo del pavimento; y finalmente presenta la técnica del rodillado para el aprovechamiento de residuos mineros que logran minimizar la afección ambiental.

2.1.2 A nivel Nacional

Escalaya Advíncula, Miriam Rosanna (2006) Universidad Nacional de Ingeniería – Perú. Realiza una investigación acerca de diseño de mezclas de concreto compactado con rodillo utilizando conceptos de compactación de suelos, en el que concluye que el diseño de un concreto rodillado resulta que la resistencia a compresión suele llegar al doble de lo que ha sido diseñada; además que los agregados y el tamaño máximo nominal influyen directamente en la energía de compactación necesaria.

2.1.3 A nivel Local

Puentes Tuesta, Jhimmy (2016) Universidad Nacional de Cajamarca – Perú. Realiza una investigación acerca de la determinación de las características físico – mecánicas del concreto rodillado, en el cual utiliza energía de compactación por vibración. Concluye que al aplicar esta energía de compactación la resistencia a la compresión aumenta en 30% de la resistencia de diseño.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 El concreto rodillado

2.2.1.1 Concepto

El concreto rodillado se define como una mezcla de cemento y agregados seleccionados, con un contenido de agua suficientemente reducido para permitir su compactación con rodillo.

El concreto rodillado se diferencia del concreto convencional en la consistencia necesaria, para la consolidación efectiva la mezcla del concreto rodillado debe ser lo suficientemente seca (asentamiento nulo) para que el equipo de rodillo vibratorio no se hunda, pero lo suficientemente húmeda para permitir la hidratación del cemento, la adecuada distribución del mortero conglomerante en el concreto en estado fresco. (Escalaya, 2006, p03)

2.2.1.2 Aplicaciones

El concreto rodillado puede ser considerado en lugares donde el concreto con asentamiento nulo pueda ser transportado, colocado y compactado usando equipos de construcción para tierras y enrocados. En general la obra ideal donde se utiliza el concreto rodillado es aquel que involucra la colocación de grandes áreas de material con poco o ningún reforzamiento incluido. Puede ser considerado para trabajos en grandes rellenos, pavimentos, fundaciones masivas, bases de losas, protección superficial para presas, construcción de aeropuertos y terraplenes.

En los últimos alrededor del mundo el mayor uso se le está dando en presas, en lugar del concreto colocado convencionalmente; el interés por este tipo de presas ha incrementado debido a la creciente aceptación de su empleo como concreto masivo en la construcción de presas, los tiempos de ejecución, el bajo contenido de material cementante y a su condición de asentamiento nulo.

2.2.1.3 Ventajas del concreto rodillado

La tecnología del concreto rodillado muestran evidencias que resultan beneficiosas para la construcción, muestra ser una alternativa económica y competitiva frente a concretos convencionales, debido principalmente a los siguientes factores.

Costo: Costos históricos de elaboración de concreto rodillado y concreto convencional muestran que el costo por metro cúbico del concreto rodillado es considerablemente en el rango de 25 a 50 por ciento menos. La diferencia en el porcentaje ahorrado depende usualmente del costo de los agregados y del material cementante, la complejidad de colocación y la cantidad total del concreto colocado, ya que si bien el concreto rodillado necesita del uso de equipo pesado, la mano de obra disminuye. Los ahorros asociados al concreto rodillado son debidos además a la reducción de tiempos de construcción.

Construcción rápida: La rápida técnica de construcción del concreto rodillado comparada con el concreto convencional ocasionan mayores ahorros en los costos en cuanto al uso del concreto rodillado; el proceso de construcción fomenta una colocación continua de material en un lugar cercano, provocando que sean posibles altas velocidades de producción.

2.2.1.4 Filosofías de diseño

En el desarrollo de la tecnología del Concreto Rodillado, han surgido dos filosofías o aproximaciones con respecto a los métodos de diseño de mezclas del concreto rodillado. Ellas pueden ser calificadas como la Filosofía de Suelos o Geotecnia y la Filosofía de Concreto. Las aproximaciones de dosificación de mezclas se diferencian significativamente dependiendo de la filosofía del tratamiento del agregado, ya sea como agregado de concreto convencional o como agregado utilizado en el vaciado de terraplenes estabilizados.

Las mezclas de concreto rodillado producidas usando métodos de diseño de concreto tienen una consistencia más fluida que las mezclas con aproximación a suelos debido a que hay más pasta en la mezcla que áridos. (Hansen y Reinhardt, 1991).

A) Filosofía de suelos

La filosofía de suelos considera al concreto rodillado como un suelo procesado o agregado enriquecido con cemento, cuyo diseño de mezcla está basado en la relación humedad-densidad. Para un agregado específico y un contenido de material cementante, el objetivo es determinar un contenido óptimo de humedad para un esfuerzo de compactación de laboratorio que corresponde al esfuerzo o densidad aplicable por los rodillos en el campo. En la aproximación a suelos, la pasta (cemento, puzolana, agua) no rellena generalmente todos los vacíos en los agregados después de la compactación.

Los principios de compactación desarrollados por Proctor en los inicios de 1930, son aplicados a las proporciones de mezclas de concreto rodillado con aproximación a suelos. Proctor determinó que para un esfuerzo de compactación dado existe un “óptimo contenido de humedad” que produce una máxima densidad seca. Incrementando el esfuerzo de compactación resulta una mayor máxima densidad seca y un menor óptimo contenido de humedad.

En base a principios de compactación, la densidad seca es usada como el índice de diseño en la aproximación a suelos. La densidad seca es definida como el peso seco de sólidos por unidad de volumen del material, independientemente del contenido de agua. Estos pueden calcularse de la densidad húmeda y viceversa por la fórmula:

$$P_d = \frac{P_w}{1 + w}$$

donde:

P_d = densidad seca (Kg/m³)

P_w = densidad húmeda (kg/m³)

w = contenido de humedad de la mezcla total (decimal)

B) Filosofía del concreto

Para la filosofía del concreto se considera que la mezcla de concreto rodillado es un verdadero concreto cuya resistencia y otras propiedades siguen la relación agua-cemento establecida por Abrams en 1918. Es decir, suponiendo

agregados resistentes y limpios, la resistencia del concreto completamente consolidado es inversamente proporcional a la proporción agua – cemento. Usando menos agua con una constante cantidad de cemento se produce un concreto con mayor resistencia a la compresión y propiedades relacionadas.

El enfoque de concreto está basado en el concepto que existe suficiente pasta en la mezcla del concreto rodillado que rellena todos los vacíos en el agregado, haciendo que la mezcla se compacte completamente produciéndose un concreto con asentamiento nulo. Sin embargo, la mezcla del concreto rodillado no debe contener un exceso de pasta que sea llevado a la superficie con sólo unas pocas pasadas del rodillo vibratorio.

2.2.2 Energía de compactación

2.2.2.1 Energía de compactación mecánica

La energía de compactación mecánica es la resultante de todas las fuerzas que influyen sobre cierto sólido, en el caso de concreto rodillado influye la energía debida a la traslación del rodillo, la energía debida a la rotación del rodillo, la energía debida a la vibración del rodillo, todas estas dependen fundamentalmente de la masa, de la velocidad angular o tangencial según sea el caso. En general se puede definir la energía de compactación mecánica de la siguiente manera:

$$E_m = E_t + E_r + E_v$$

Donde:

E_m = Energía mecánica total

E_t = Energía debida a la traslación

E_r = Energía debida a la rotación

E_v = Energía debida a la vibración

A) Energía debida a la traslación

Un cuerpo tiene energía cinética traslacional cuando todas sus partes siguen una misma dirección, un cuerpo suspendido a cierta altura al ser soltado transforma su energía potencial en energía cinética traslacional.

En física la energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada. Una vez conseguida esta energía durante la aceleración, el cuerpo mantiene su energía cinética salvo cambien su velocidad. Para que el cuerpo regrese a su estado de reposo se requiere un trabajo negativo de la misma magnitud que su energía cinética. La energía cinética se puede definir como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada.

En general la energía cinética debida a la traslación se puede definir por la siguiente fórmula:

$$E_t = \frac{mv^2}{2}$$

Donde:

E_t = Energía debida a la traslación

m = Masa del sólido

v = Velocidad en la dirección de la traslación

B) Energía debida a la rotación

Para estudiar el movimiento de un cuerpo, se debe fijar un sistema de referencia, puesto que un cuerpo sólido a diferencia de una partícula tiene dimensiones, se va a estudiar el movimiento con la ayuda de dos sistemas de referencia. Un primer sistema de referencia (inercial), en el que se representa el movimiento del centro de masas del sólido, y un segundo sistema de referencia cuyo origen sea el centro de masas del cuerpo, que informa el movimiento de rotación del sólido.

En general la energía cinética debida a la rotación se puede definir por la siguiente fórmula:

$$E_r = \frac{Iw^2}{2}$$

Donde:

E_r = Energía debida a la rotación

I = Momento de inercia

w = Velocidad angular de la rotación

C) Energía debida a la vibración

Durante la vibración del rodillo compactador se genera dos tipos de energía, una energía cinética que sigue la dirección de la onda vibratoria, con la velocidad y masa del rodillo compactador, y otra la energía potencial que incluye la misma masa, la gravedad y la amplitud de vibración.

En general la energía debida a la vibración se puede definir por la siguiente fórmula:

$$E_v = \frac{mv^2}{2} + mgh$$

Donde:

E_v = Energía debida a la vibración

m = Masa del sólido

v = Velocidad en la dirección de la onda de vibración

g = Gravedad

h = Amplitud de la vibración

2.2.2.2 Energía de compactación en Laboratorio

Diferentes métodos pueden ser usados para compactar especímenes de concreto rodillado en el laboratorio. El procedimiento escogido debe ser apropiado para el rango y tipos de mezcla del concreto rodillado que serán incluidos en el diseño de la mezcla, usado para determinar la mejor alternativa para el proyecto.

El equipo utilizado para la compactación de especímenes de concreto rodillado en el laboratorio debe lograr la misma densidad y el contenido de vacíos alcanzados en el campo con el equipo adecuado.

La humedad óptima para obtener la resistencia máxima a la compresión resulta de una mezcla muy seca, la resistencia en las capas superiores es muy probable que se reduzca pues la compactación provocará que la pasta suba hacia la parte superior de las probetas. Esta humedad deberá ser tal que permita pasar el equipo de rodillo sin tener el problema de hundimiento y por lo tanto pueda circular sobre el concreto fresco con facilidad; pero además deberá tener el suficiente contenido de agua para la completa hidratación del material cementante.

Para la preparación de especímenes se pueden utilizar varios métodos, con el objeto de determinar las propiedades de mezclas del concreto rodillado, el problema radica en la preparación de probetas de laboratorio que produzcan propiedades parecidas a las del concreto rodillado colocado en campo, donde camiones, topadoras y rodillos vibratorios compactan y consolidan la mezcla; por lo tanto el objetivo de los ensayos en laboratorio es conseguir la misma densidad que ha sido producida en el campo.

Para mezclas de concreto rodillado que usan agregado de tamaño máximo mayores, los agregados mayores a 2 pulg (50 mm) pueden ser tamizados o pueden utilizarse moldes más grandes, por lo general se usan moldes cilíndricos de metal con hendidura para permitir la extracción de las mezclas endurecidas.

A) Especímenes compactados por impacto

Los métodos de compactación por impacto para la preparación de probetas se han limitado a las mezclas de consistencia nula (asentamiento = 0 pulg) con una aproximación a suelos. El número de capas usado en la preparación de los cilindros de prueba dependerá de la energía de compactación, el peso del martillo apisonador usado, el número de golpes, la altura soltada, que en conjunto significan la energía de compactación.

La mayoría de los procedimientos para la preparación de especímenes compactados por impacto han sido hechos con el mismo tipo de equipo que se utiliza en el ensayo Proctor Modificado para suelos (ASTM D1557).

Reeves y Yates (1985), determinaron que los especímenes de laboratorio compactados con el esfuerzo de compactación del Proctor Modificado tenían muy buena coorelación con las densidades secas medidas para la presa de detención North Loop en Austin, Texas, para un CCR hecho con un agregado de caliza de tamaño máximo de 1.5 pulg. Los especímenes de concreto rodillado fueron preparados en 6 capas de 2 pulg y recibieron 122 golpes por capa.

Ensayos más recientes realizados por Casias, Goldsmith y Benavides (1988), del U.S. Boureau of Reclamation, indican que un menor esfuerzo de compactación puede ser más apropiado que el procedimiento del ensayo Proctor Modificado. Ellos encontraron que el esfuerzo de compactación usando el martillo estándar del Proctor Modificado, causaba mucho fracturamiento en el agregado grueso. La cantidad de agregado fracturado o el cambio de granulometría durante el impacto del ensayo de compactación está en función del agregado en particular. El agregado sólido y duro debe ser capaz de absorber más energía sin fallas. Ellos concluyeron que un esfuerzo de compactación por impacto de 13,3 ft-lb/pulg³ (1100 kJ/m³) provee mejores especímenes de ensayo. Este grado de compactación fue obtenido colocando el concreto rodillado en seis capas de 2 pulg (50mm) y dando 50 golpes a cada capa.

La energía de compactación por impacto se debe al ingeniero, Ralph R. Proctor (1933), el ensayo consiste en compactar una porción de material en un cilindro con volumen conocido.

La energía de compactación viene dada por la ecuación:

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

Donde:

Y: energía a aplicar en la muestra de suelo;

n: número de capas a ser compactadas en el cilindro de moldeado;

N: número de golpes aplicados por capa;

P: peso del pisón;

H: altura de caída del pisón

V: volumen del cilindro.

B) Especímenes vibrados

Los especímenes vibrados son usados principalmente para mezclas con aproximación a concreto, diseñadas para tener más pasta que vacíos en los agregados. Un cilindro de acero de 6 pulg por 16 pulg (152 por 304 mm) es sujetado rígidamente a una mesa vibratoria y llenado en 3 capas iguales. Generalmente, la mesa vibratoria es la misma que se usa en el ensayo VeBe, para determinar la consistencia en las mezclas de concreto rodillado. En la parte superior de la capa se coloca un peso de 20 lb (9,1 Kg) y el cilindro es vibrado hasta que la pasta se forme alrededor del borde de la sobrecarga. Después de la tercera repetición, el exceso de concreto es enrasado y el cilindro es cubierto

para su posterior ensayo. Este método es descrito en la Norma ASTM C 1176 y en el US Bureau of Reclamation Estándar 4906-86. Un método similar es usado para el método RCD en Japón excepto por el tamaño del espécimen que es aproximadamente de 9 pulg (240 mm) de diámetro con una altura de 8 pulg (200 mm).

C) Especímenes apisonados con martillos neumáticos

Otro método para producir cilindros de concreto rodillado involucra apisonamiento, el cual puede ser conseguido por dos distintos métodos: (1) El uso de un martillo pole neumático (2) El uso de un pisón vibratorio impulsado eléctricamente. El último aparato es conocido como martillo Kango en Europa y otros lugares, y pistola Hilti en los Estados Unidos. Para la preparación de cilindros de concreto rodillado, ambos usan una superficie llana de 5 a 5 ¾ pulg (127-146 mm) de diámetro para el martillo. Existe una marcada diferencia entre la amplitud o golpe y la frecuencia de los dos apisonadores. El martillo pole tiene un golpe de aproximadamente 6 pulg (150 mm), mientras que el pisón vibratorio tiene una amplitud muy baja que es imperceptible a simple vista. La frecuencia de los pisones varían desde 2000 a 2400 impactos por minuto, mientras la frecuencia o golpes del martillo neumático es menor que 600 impactos por minuto. La frecuencia real depende en parte de la eficiencia de la unidad compresora de aire.

Ambos, el martillo pole neumático y el pisón vibratorio, han sido usados intensamente para la preparación de cilindros de mezclas de concreto rodillado que conforman la aproximación a suelos. El pisón eléctrico Hilti es apropiado para mezclas de consistencia intermedia. El martillo neumático es usado para mezclas de consistencia seca. La principal ventaja de su uso es que compactará con seguridad mezclas de concreto rodillado de cualquier consistencia, excepto las mezclas muy húmedas con bajos tiempos VeBe. Sin embargo requiere mayor esfuerzo de los técnicos de laboratorio que otros métodos. La frecuencia de golpe de este martillo es similar a la frecuencia de un rodillo vibratorio de 10 Ton en el campo durante la compactación del concreto rodillado producido.

La duración de la compactación dependerá de la mezcla en particular, usualmente se usa alrededor de 15 segundos, para mezclas más secas se requiere más de 20 segundos por capa y para mezclas más húmedas el apisonamiento se tendrá que detener a los 10 segundos. La duración del tiempo de compactación debe ser el necesario para alcanzar una compactación completa. Esto puede ser determinado usualmente por un operador entrenado, escuchando el sonido del martillo y observando cuando las partículas de arena

salen del molde en mezclas secas o cuando el pie del martillo se hunde en mezclas húmedas.

En la mayoría de los casos los cilindros tradicionales de 6 por 12 pulg (152 por 304 mm) han sido usados con el apisonador de pole o el pisón vibrador. Para cualquier de los dos métodos el agregado grande por encima de las 2 pulg (50 mm) es removido de la mezcla mediante tamizado antes de colocarse en el cilindro. Usualmente, el uso de cualquier aparato requiere una extensión de cilindro para compactar apropiadamente la parte superior.

2.2.2.3 Energía de compactación en campo

La compactación en campo va a depender de la energía de compactación del rodillo, esto a su vez de la velocidad de trabajo del rodillo, del diámetro del tambor, del espesor de las capas a compactar, de la amplitud de vibración, la frecuencia, el peso efectivo de trabajo del tambor, el número de ciclos que pasará el rodillo, y variables propias del equipo.

Para saber mejor el tipo de compactación, la energía que proporciona se dará a conocer las principales características de algunos rodillos importantes.

CARACTERÍSTICAS	Rodillo Compactador CAT CB44B	Rodillo Compactador CAT CB53D XW	Rodillo Compactador CAT CB54B	Rodillo Compactador CAT CP54B	Rodillo Compactador CAT CP56B	Rodillo Compactador CAT CP68B
Peso en orden de trabajo	8300.00 kg	11740.00 kg	9550.00 kg	11135.00 kg	11665.00 kg	14685.00 kg
Ancho de compactación estándar	1500 mm	2000 mm	1700 mm	2134 mm	2134 mm	2134 mm
Potencia bruta motor	82 Kw	97 Kw	97 Kw	98 Kw	117 Kw	117 Kw
Diámetro del tambor	1500 mm	1300 mm	1198 mm	1549 mm	1295 mm	1549 mm
Longitud total	4565 mm	4940 mm	4565 mm	5850 mm	5860 mm	6050 mm
Velocidad Máxima	12 Km/h	13 Km/h	12 Km/h	11 Km/h	11 Km/h	11 Km/h
Frecuencia de vibración	53 Hz	63.3/42 Hz	45 Hz	23.3/30.5 Hz	23.3/30.5 Hz	23.3/30.5 Hz
Amplitud	0.65 mm	0.86 mm	1.06 mm	1.90 mm	2.10 mm	2.10 mm

CARACTERÍSTICAS	Rodillo Compactador CAT CP74B	Rodillo Compactador CAT CS423E	Rodillo Compactador CAT CS44	Rodillo Compactador CAT CS533E	Rodillo Compactador CAT CS533E XT	Rodillo Compactador CAT CS54B
Peso en orden de trabajo	16355.00 kg	6900.00 kg	7240.00 kg	10840.00 kg	12360 kg	10555.00 kg
Ancho de compactación estándar	2134 mm	1676 mm	1676 mm	2134 mm	2134 mm	2134 mm
Potencia bruta motor	130 Kw	62 Kw	75 Kw	97 Kw	97 Kw	98 Kw
Diámetro del tambor	1295 mm	1225 mm	121 mm	1534 mm	1534 mm	1534 mm
Longitud total	6050 mm	4960 mm	5080 mm	5510 mm	5510 mm	5850 mm
Velocidad Máxima	11 Km/h	12 Km/h	12 Km/h	12 Km/h	12 Km/h	11 Km/h
Frecuencia de vibración	23.3/28 Hz	23.3/31.9 Hz	23.3/31.9 Hz	31/34 Hz	31/34 Hz	32.3/30.5 Hz
Amplitud	2.10 mm	1.67 mm	1.67 mm	1.80 mm	1.80 mm	1.90 mm

CARACTERÍSTICAS	Rodillo Compactador CAT CS56B	Rodillo Compactador CAT CS68B	Rodillo Compactador CAT CS74B	Rodillo Compactador CAT CS78B	Rodillo Compactador CAT CS79B
Peso en orden de trabajo	11555.00 kg	14325.00 kg	16000.00 kg	18700.00 kg	20220.00 kg
Ancho de compactación estándar	2134 mm				
Potencia bruta motor	117 Kw	117 Kw	130 Kw	130 Kw	130 Kw
Diámetro del tambor	1534 mm				
Longitud total	5850 mm	6050 mm	6050 mm	6130 mm	6130 mm
Velocidad Máxima	11 Km/h				
Frecuencia de vibración	23.3/30.5 Hz	23.3/30.5 Hz	23.3/28 Hz	23.3/28 Hz	23.3/28 Hz
Amplitud	2.10 mm				

2.2.3 Materiales para mezclas de Concreto Rodillado

Un amplio rango de materiales ha sido usado satisfactoriamente para producir mezclas de concreto rodillado, dentro de los materiales usados incluye materiales cementantes (cemento portland, puzolana, así como la ceniza volátil), agregados, agua y algunos casos aditivos.

2.2.3.1 Materiales cementantes

El tipo y la cantidad de cemento requerido en las mezclas de concreto rodillado dependen del volumen de la estructura, las propiedades requeridas por ésta y las condiciones de exposición. La mayoría de presas de concreto rodillado son suficientemente grandes para requerir consideraciones acerca del calor de hidratación del material cementante

El concreto rodillado puede ser elaborado de cualquiera de los tipos básicos de cemento Portland. Para las aplicaciones en masa, son útiles los cementos que tienen como característica la baja generación de calor de hidratación, comparado con el tipo I de ASTM C 150. Estos incluyen el tipo II (moderado calor de hidratación) y el tipo V (resistencia a los sulfatos) de ASTM C 150, el tipo IP (cemento Portland más puzolana) y el tipo IS (cemento Portland – con escoria de alto horno) de ASM C 595. El desarrollo de la resistencia para estos cementos generalmente es más bajo que para el tipo I a edades tempranas, pero producen finalmente resistencias más altas. (

La generación de calor debido a la hidratación del cemento es típicamente controlada por el uso de cementos con bajo calor de hidratación, el uso de menos cemento, o reemplazando una porción de cemento por puzolana o por una combinación de estas.

La selección del tipo de cemento debe considerar la economía en la obtención de éste. Para proyectos de pequeño y mediano tamaño, puede no ser de eficaz costo especificar un especial cemento de bajo calor. Debido a la alta capacidad de producción del concreto rodillado, puede ser requerida una especial atención para asegurar un suministro continuo de cemento al proyecto.

2.2.3.2 Agregados

La calidad del agregado y la granulometría son factores que influyen en el producto final del concreto rodillado. Entre los diseñadores de mezclas de concreto rodillado, han surgido ligeras diferencias en la selección del tamaño máximo del agregado, la proporción de arena en la mezcla y el porcentaje de finos que pasa la malla N° 200. La segregación del agregado grueso en el fondo de las capas del concreto rodillado ha llevado a decidir la reducción del tamaño máximo del agregado en algunos casos o el incremento de la proporción de arena en la mezcla en otros. La mayoría de las mezclas con aproximación a suelos tienen un mayor porcentaje de finos, comparado con el contenido en las mezclas convencionales de concreto. Si los finos son no plásticos, rellenan los vacíos en el agregado, conducen a un decrecimiento de la demanda de agua y mejoran la compactación.

La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del concreto rodillado, principalmente de su resistencia, para un concreto rodillado de alta resistencia, es necesario un agregado de alta calidad y características de los agregados según las normas ASTM para granulometría, resistencia a la abrasión, peso específico, absorción, peso unitario.

La granulometría y las proporciones usadas de agregado grueso y fino (menor que 4,75 mm) tienen un importante efecto en las propiedades del concreto rodillado. Las diferencias entre las filosofías de diseño de mezclas han producido diferentes tendencias con respecto a los agregados especificados para el concreto rodillado. Esto se da principalmente en el tamaño máximo del agregado, el porcentaje deseado de arena y finos separados y procesados en un número de tamices, y entonces combinados para producir la granulometría deseada.

Para mezclas de concreto rodillado con aproximación a concreto, los requerimientos para los agregados son muy similares a los exigidos para masas convencionales de concreto.

El tamaño máximo de agregado comúnmente usado es de 3 pulg (75 a 80 mm), aunque se han usado tamaños máximos de 6 pulg y 2 pulg. Los porcentajes de arena han variado generalmente entre 30 a 35 % del agregado total. El porcentaje de finos que pasa el tamiz N° 200 ha sido usualmente

limitado al 3 % del total del peso del agregado, especialmente si un alto porcentaje de puzolana es usado en la mezcla.

Muchas mezclas con aproximación a suelos han usado una sola combinación de granulometría de agregados, desde el tamaño máximo del agregado al menor que pasa el tamiz N° 200.

La cantidad y tipo de finos menores del tamiz N° 200 permitidos han variado considerablemente. Este ha fluctuado desde 0 a 3% del total de agregado para algunas mezclas con aproximación a concreto, y de 8 a 16 % para mezclas con aproximación a suelos. En muchos casos el agregado no lavado es apropiado para concreto rodillado.

2.2.3.3 Agua

El único requerimiento para el agua en mezclas de concreto rodillado es que ésta debe estar libre de una excesiva cantidad de álcalis, ácidos o material orgánico que pueden inhibir la adecuada ganancia de resistencia. La cantidad por metro cúbico de agua depende de la filosofía de diseño, sea por la filosofía de suelos se debe obtener el óptimo contenido de humedad, o por la filosofía del concreto, la relación agua cemento con asentamiento nulo.

2.2.4 Proporción de mezclas

El objetivo básico de la proporción de mezclas de concreto rodillado es producir un material que satisfaga el desarrollo de requerimientos, usando la combinación más económica de materiales disponibles rápidamente que puedan ser colocados por métodos de compactación con rodillo. Las propiedades físicas deseadas de la mezcla dependen de la función, localización y el diseño escogido para la estructura.

Para presas de concreto rodillado pobre, diseñadas con la cara aguas arriba relativamente impermeable, el principal requerimiento del diseño de la mezcla es la resistencia a la compresión o la resistencia al corte. La resistencia está regida por mínimos requerimientos estructurales de seguridad con algunos factores de cálculo de sobre diseño a causa de la variabilidad de la mezcla, junto con apropiados factores de seguridad.

En el diseño de presas de concreto rodillado de alta pasta, donde la sección entera es considerada como la barrera de agua, la cohesión entre las capas sucesivas del concreto rodillado y la permeabilidad del concreto son los requerimientos de diseño que controlan la mezcla. El concreto rodillado que será expuesto y sujeto a severas condiciones climáticas y a altas velocidades sísmicas debe ser diseñado por durabilidad, pudiendo requerir resistencias a la compresión altas.

Todos los diseños de mezcla se deben iniciar con los mismos dos pasos: seleccionar las propiedades deseadas del concreto rodillado y luego determinar las propiedades de los materiales a ser usados.

Basados en el tipo de estructura, la disponibilidad de los materiales y su costo, se deberá tomar en cuenta las consideraciones iniciales de calidad y tamaño máximo del agregado, el tipo de cemento y si se usará puzolana y hasta qué punto. Todos los métodos deben incluir la preparación de mezclas de prueba para confirmar que la consistencia es adecuada para la compactación con rodillo; esto usualmente se confirmará en una sección de prueba, usando los métodos de colocación y equipos que se planean utilizar en la presa. Si la mezcla determinada en el laboratorio demuestra ser inadecuada para la construcción, deberá ser ajustada adecuadamente.

2.2.4.1 Método de proporción de mezclas con aproximación a concreto

Este método de proporción de mezclas está basado en la relación agua-cemento y resistencia. Se calcula una determinada cantidad de volumen de sólidos, tal como se usa en el proporcionamiento convencional del concreto. La relación agua/cemento y el contenido equivalente de cemento son establecidos de figuras basadas en los criterios de resistencia. La demanda aproximada de agua está basada en el tamaño máximo nominal del agregado y modificada por el asentamiento medido en el cono de Abrams dado que para el concreto rodillado debe ser un asentamiento nulo. El contenido del agregado fino es recomendado como un porcentaje del volumen total del agregado y está basado en el tamaño máximo nominal y en la naturaleza del agregado grueso. Una vez que el volumen de cada ingrediente es calculado, se puede realizar una comparación del contenido de mortero para valores recomendados con la

finalidad de verificar proporciones. Este método también provee varios aspectos peculiares, incluyendo una combinación ideal de la granulometría de agregado grueso y fino, incorporando límites con un mayor porcentaje de finos que los permitidos por la normal ASTM C 33.

A) Información requerida para el diseño de mezclas

- Análisis granulométrico de los agregados
- Peso unitarios compactado de los agregados (fino y grueso)
- Peso específico de los agregados (fino y grueso)
- Contenido de humedad y porcentaje de absorción de los agregados (fino y grueso)
- Perfil y textura de los agregados
- Tipo y marca del cemento
- Peso específico del cemento
- Relaciones entre resistencia y la relación agua/cemento, para combinaciones posibles de cemento y agregados

B) Pasos para el proporcionamiento

Se puede resumir la secuencia del diseño de mezclas de la siguiente manera:

- Elección de la resistencia promedio (f'_{cr})
- Elección del asentamiento (Slump)
- Selección del tamaño máximo del agregado grueso
- Estimación del agua de mezclado y contenido de aire
- Selección de la relación agua/cemento (a/c)
- Cálculo del contenido de cemento
- Estimación del contenido de agregado grueso y agregado fino
- Ajustes por humedad y absorción
- Cálculo de proporciones en peso
- Cálculo de proporciones en volumen
- Cálculo de cantidades por tanda

2.2.4.2 Método de proporción de mezclas con aproximación a suelos

Dentro de esta aproximación encontramos dos métodos. Estos métodos inician el diseño con la granulometría deseada de agregados y conlleva la preparación de cilindros con varios contenidos de cemento para determinar la resistencia u otras propiedades. Las diferencias entre los dos métodos se centran en cómo la humedad o contenido de agua para la mezcla es determinada y el método de preparación de especímenes en las pruebas de laboratorio.

A) El método de concreto rodillado pobre

Este método se inicial con una granulometría de agregados fija, varios contenidos de cemento y la comparación de resultados, principalmente de la resistencia a la compresión, con los requerimientos del proyecto.

La cantidad de agua usada para las mezclas de prueba en laboratorio es determinada por la observación de la consistencia de las mezclas con diversos contenidos de agua. Teniendo en cuenta las experiencias del pasado. El contenido de agua es establecido entre un punto de lado seco, donde los vacíos no son muy visibles en los lados del cilindro de laboratorio y en un lado húmedo, antes que la mezcla tenga un aspecto pegajoso.

Con la granulometría del agregado y el contenido de agua fijos, se preparan cilindros en el laboratorio con contenidos variables de cemento, utilizando un apisonador de pole neumático. La mayoría de las mezclas que se han obtenido con este método han variado desde 60 a 104 Kg/m³.

Si se desea usar puzolana, se preparará otro conjunto de especímenes usando un porcentaje establecido de puzolana con respecto al total del contenido de material cementante, este porcentaje usualmente varía de 25 a 50%. Típicamente, el programa de diseño de mezclas de laboratorio consiste de dos cilindros preparados para ensayar en 3, 7, 14, 28, 90, 180 y 365 días. Si no se cuenta con el tiempo suficiente para obtener resultados en las edades más tardías la resistencia a la compresión puede ser estimada basada en la forma de la curva de las edades tempranas, en los resultados de los ensayos de proyectos anteriores usando el mismo método o por métodos de los ensayos de proyectos anteriores usando el mismo método o por métodos de ensayo

acelerados. De esta manera, el programa de diseño de mezclas proporciona una familia de curvas que indican los efectos de varios contenidos de material cementante en la resistencia a la compresión a varias edades.

El contenido de cemento puede ser seleccionado para satisfacer los requerimientos del proyecto teniendo en consideración los factores de seguridad y coeficientes de variación. Una vez que el contenido de cemento es seleccionado, pueden realizarse ensayos adicionales variando el tipo de agregado o la granulometría, especialmente el porcentaje de finos que pasa el tamiz N° 200.

B) El método de Suelos simplificado o utilizando concepto de compactación de suelos

Las mezclas de concreto rodillado han sido proporcionadas desde 1960 usando los principios de compactación de suelos. Los mismos fundamentos han sido la base para determinar el contenido de cemento para mezclas de suelo-cemento por más de 50 años.

El método básico es bastante similar al método concreto rodillado pobre. Se inicia con una granulometría de agregados fija que involucra un programa de ensayos de variación de contenidos de material cementante y la comparación de resultados, una vez que el contenido de agua es determinado.

En lugar de determinar el agua de manera visual, el óptimo contenido de humedad es determinado por los principios de humedad-densidad, usando la compactación por impacto con un martillo estándar o dejando caer el apisonador un número prescrito de veces. El esfuerzo de compactación del Proctor Modificado ha sido usado para la mayoría de los proyectos actuales, aunque algunos investigadores han sugerido esfuerzos de compactación menores. El número de golpes de un martillo de 10 lb (4.5 Kg) que se deja caer de 18 pulg (450 mm) por unidad de volumen define el esfuerzo de compactación.

Para resolver el problema de la rotura del agregado con el apisonador normalizado del Proctor Modificado, encontrado por algunos investigadores, se puede usar un disco plano más grande de 5.5 pulg de diámetro con bordes

redondeados. Los pasos restantes en el método de diseño de mezcla son idénticos a los descritos en el concreto rodillado pobre.

El método de diseño por concepto de compactación de suelos ha sido usado con un contenido de material cementante conservador fijo para algunos volúmenes de presa relativamente pequeños, donde la generación de calor no ha sido una preocupación y donde el tiempo para un largo y extenso programa de diseño de mezclas no fue disponible.

Este método de diseño de mezcla también ha sido usado extensamente para la modificación o rehabilitación de presas existentes, donde la principal consideración de diseño para el concreto rodillado expuesto ha sido la durabilidad y/o la resistencia a la erosión del material. En estos casos, la investigación de laboratorio puede involucrar varios contenidos de cemento para alcanzar un nivel deseado de durabilidad, cuando es medida por la pérdida de peso después de 12 o más ciclos de congelamiento y deshielo, similar al desarrollado para suelo-cemento. La durabilidad del diseño de mezcla puede estar también basada en la pérdida de peso de especímenes sujetos a chorros de agua a alta velocidad o en una mínima fuerza compresiva. Para muchos de los diseños de mezclas por concepto de compactación de suelos, los contenidos de cemento y puzolana son expresados como un porcentaje del peso seco del agregado. Los porcentajes son útiles en el proporcionamiento volumétrico del concreto rodillado asociado con la mayoría de operaciones de mezclas con amasadora.

2.2.5 Propiedades del concreto

2.2.5.1 Propiedades del concreto fresco

A) Trabajabilidad

Está definida por la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto. Su evaluación es relativa, por cuanto depende realmente de las facilidades manuales o mecánicas de que se disponga durante las etapas del proceso, ya que un concreto que puede ser trabajable bajo ciertas condiciones de colocación y compactación, no necesariamente resulta tal si dichas condiciones cambian.

Está influenciada principalmente por la pasta, el contenido de agua y equilibrio adecuado entre gruesos y finos, que produce en el caso óptimo una suerte de continuidad en el desplazamiento natural y/o inducido de la masa.

Por lo general un concreto es trabajable en la mayoría de circunstancias, cuando durante su desplazamiento mantiene siempre una película de mortero de al menos 1/4" sobre el agregado grueso.

El método tradicional de medir la trabajabilidad ha sido desde hace muchos años el "Slump" o asentamiento con el cono de Abrams, ya que permite una aproximación numérica a esta propiedad del concreto, sin embargo debe tenerse clara la idea que es más una prueba de uniformidad que de trabajabilidad, pues es fácilmente demostrable que se pueden obtener concretos con igual Slump pero trabajabilidades notablemente diferentes para las mismas condiciones de trabajo.

B) Exudación

Propiedad por la cual una parte del agua de mezcla se separa de la masa y sube hacia la superficie del concreto.

En un caso típico de sedimentación en que los sólidos se asientan dentro de la masa plástica. El fenómeno está gobernado por las leyes físicas del flujo de un líquido en un sistema capilar, antes que el efecto de la viscosidad y la diferencia de densidades.

Está influenciada por la cantidad de finos en los agregados y la finura del cemento, por lo que cuanto más fina es la molienda de este y mayor es el porcentaje de material menor que la malla N° 100, la exudación será menor pues se retiene el agua de mezcla.

La exudación se produce inevitablemente en el concreto, pues es una propiedad inherente a su estructura, luego lo importante es evaluarla y controlarla en cuanto a los efectos negativos que pudiera tener.

No debe caerse en el error de considerar que la exudación es una condición anormal del concreto, ni en la práctica usual de “secar” el concreto espolvoreando cemento en la superficie ya que si esto se ejecuta mientras aún hay exudación, se crea una capa superficial muy delgada de pasta que en la parte inferior tiene una interfase de agua que la aísla de la masa original. En estas condiciones, al producirse la contracción por secado o cambios volumétricos por temperatura esta película delgada de pasta se agrieta, produciéndose el patrón de fisuración tipo panal de abeja, que los norteamericanos denominan “crazing”.

2.2.5.2 Propiedades principales del concreto endurecido

A) Elasticidad

En general, es la capacidad del concreto de deformarse bajo carga sin tener deformación permanente.

El concreto no es un material eminentemente elástico, esto se puede observar fácilmente si se somete a un espécimen a esfuerzos de compresión crecientes hasta llevarlo a la falla, si para cada nivel de esfuerzo se registra la deformación unitaria del material.

El módulo de elasticidad es un parámetro muy importante en el análisis de las estructuras ya que se emplea en el cálculo de la rigidez de los elementos estructurales, por lo tanto ahora, además de la resistencia a la compresión se debe garantizar el módulo de elasticidad.

B) Resistencia a la compresión

Esta propiedad se determina de acuerdo a la norma NTP 339.034.2013. Hormigón. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos, siendo su mejor comportamiento en compresión en comparación con la tracción, debido a las propiedades adherentes de la pasta de cemento.

Depende principalmente de la concentración de la pasta de cemento, que se acostumbra a expresar en términos de la relación Agua/Cemento en peso.

La afectan además los mismo factores que influyen en las características resistentes de la pasta, como son la temperatura y el tiempo, aunados a otros elementos adicionales constituidos por el tipo y características resistentes del cemento en particular que se use y de la calidad de los agregados, que complementan la estructura del concreto.

Un factor indirecto pero no por eso menos importante en la resistencia, lo constituye el curado ya que es el complemento del proceso de hidratación sin el cual no se llegan a desarrollar completamente las características resistentes del concreto. Los concretos normales usualmente tienen resistencias en compresión del orden de 100 a 400 Kg/cm², habiéndose logrado optimizaciones de diseños sin aditivos que han permitid obtener resistencia sobre 700 Kg/cm².

2.3 Definición de términos básicos

ACI: American Concrete Institute; Insituto Americano del Concreto dedicado a la investigación en temas relacionados con el concreto.

Agua: Componente dl concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas para producir una pasta eficientemente hidratada, que le otorgan la propiedad de fraguar y endurecer con el tiempo.

Agregado: Conjunto de partículas de origen natural o artificial, que pueden ser tratadas o elaboradas; forman parte de la mayoría del volumen del concreto.

Agregado fino: Agregado proveniente de la desintegración natural o artificial que pasa el tamiz 3/8" (4.75 mm). Cumple con los límites establecidos en la NTP 400.037

Agregado grueso: Agregado retenido en el tamiz N° 4 (4.75mm) proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas y que cumple con los límites establecidos en la NTP 400.037

Cemento: Material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta aglomerante capaz de endurecer, tanto bajo el agua como en el aire. Quedan excluidas las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.

Compresión: Es el esfuerzo axial que un cuerpo opone en dirección directa de la fuerza, deriva de la fuerza aplicada sobre el área de contacto. Generalmente se expresa en Kg/cm².

Concreto: Es la mezcla constituida por cemento, agregados, agua, aire, eventualmente aditivos, en proporciones adecuadas para obtener propiedades físicas y mecánicas acuerdo a las solicitaciones.

Concreto rodillado: Es el concreto con asentamiento nulo, baja cantidad de agua, el cual será compactado mecánicamente a través de equipos pesados denominados rodillos, que pasan sobre el concreto en estado fresco una cierta cantidad de ciclos, dependiendo de la energía necesaria de compactación.

Densidad: Relación entre la masa de un cuerpo y la del agua o del aire que ocupa el mismo volumen, en general se expresa en Kg/m³.

Dosificación: Dosis, cantidad de cada componente del concreto para lograr una unidad de volumen o peso.

Equipo: Elementos de ayuda para la realización final de un trabajo.

Flexión: Es la resistencia de un cuerpo ante la presencia de fuerzas al corte.

Fraguado: Endurecimiento del concreto fresco.

Mezcla: Es la combinación de los materiales en estado fresco de acuerdo a la dosificación correspondiente, tiene cubiertas todas las partículas del agregado con la pasta de cemento, logra una masa uniforme.

NTP: Norma Técnica Peruana

Slump: Es el revenimiento de una mezcla, mide la consistencia, trabajabilidad de cierto concreto en estado fresco, a mayor Slump mayor contenido de agua y mayor trabajabilidad.

CAPITULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Generalidades

El diseño de mezclas de Concreto rodillado ha estado familiarizado con la compactación de suelos y con los equipos empleados en el ensayo de probetas de concreto.

Reconociendo la versatilidad potencial y económica del concreto rodillado como material de construcción, es importante que el diseño, los ensayos y el proceso constructivo sea lo más simples posibles.

3.1.1 Tipo de investigación

Tipo	: Aplicada
Nivel	: Descriptivo
Diseño	: Cuantitativo y cuantitativo
Método de la investigación	: Análisis, síntesis, deductivo y estadístico

3.1.2 Ubicación

La investigación se desarrolló completamente en el laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca, Distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca, con las siguientes coordenadas UTM:

E 776624.58

N 9266987.71

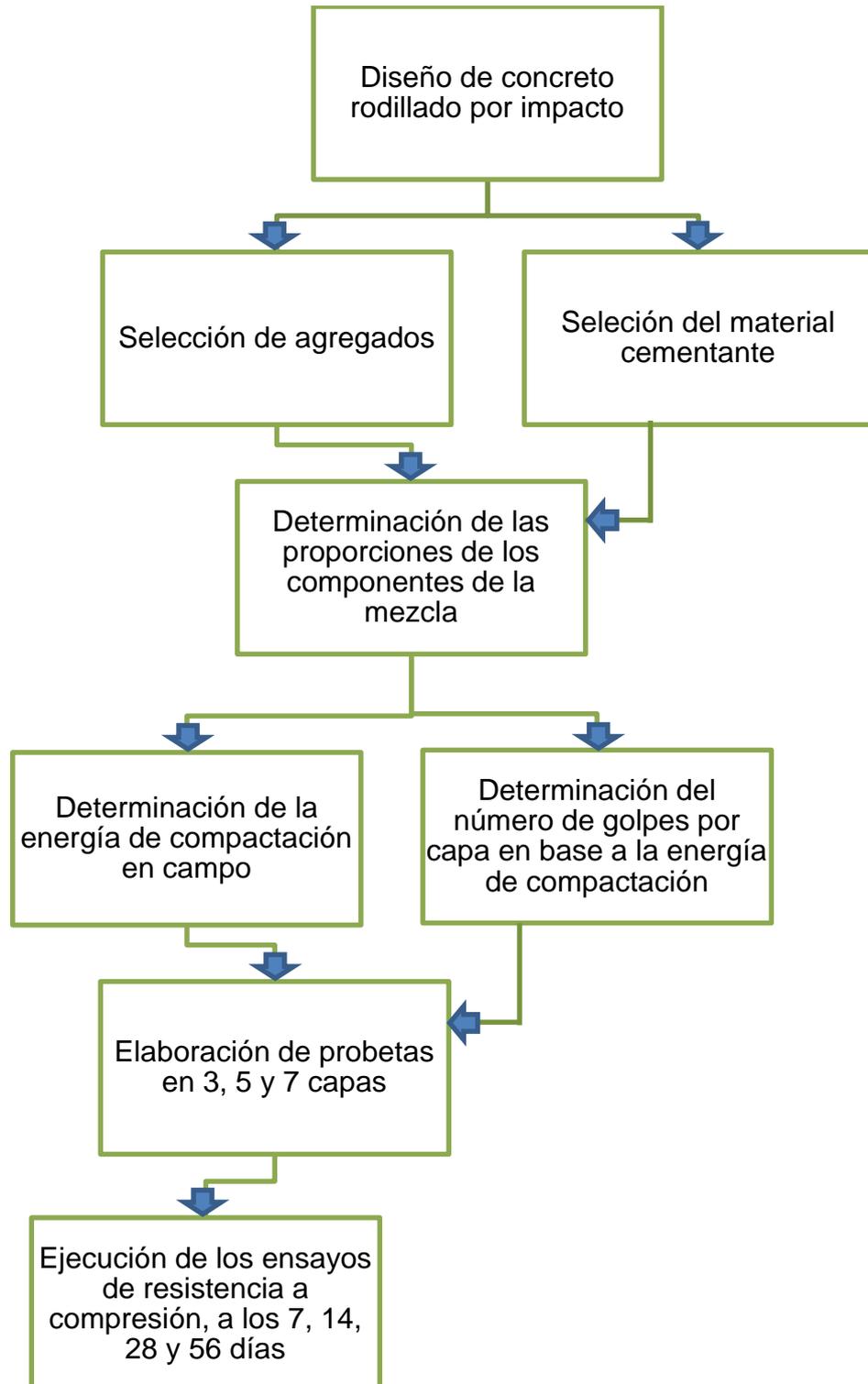
3.1.3 Época de la investigación

La investigación se desarrolla desde el mes de noviembre del 2015 y se finalizó el mes de junio del 2016.

3.2 Procedimientos de diseño de la mezcla del concreto rodillado

En base a los principios mencionados, se procedió al diseño de un concreto con asentamiento nulo, para lo cual se determinará la energía de compactación que sea el equivalente a la compactación en campo. El desarrollo del procedimiento se ve mostrado en el siguiente esquema:

Flujograma de la Investigación



3.2.1 Propiedades Físico – Mecánicas de los agregados seleccionados.

La selección y el control de los agregados son factores de vital importancia en la calidad y las propiedades que ofrezca el concreto rodillado. Para la presente investigación se ha utilizado agregados de la cantera del río Chonta, ubicada en el distrito de Los Baños del Inca, provincia y departamento de Cajamarca, de origen aluvial. Después de los ensayos se obtuvo las siguientes propiedades de los agregados:

PROPIEDAD	Agregado Fino	Agregado grueso
Forma	-	Angular
Textura	-	Rugosa
Peso específico de masa (gr/cm ³)	2.58 gr/cm ³	2.57 gr/cm ³
Peso específico de masa s.s.s (gr/cm ³)	2.61 gr/cm ³	2.59 gr/cm ³
Peso específico aparente (gr/cm ³)	2.65 gr/cm ³	2.63 gr/cm ³
Peso suelto unitario suelto (gr/cm ³)	1.46 gr/cm ³	1.45 gr/cm ³
Peso unitario compactado seco (gr/cm ³)	1.62 gr/cm ³	1.60 gr/cm ³
Contenido de humedad (%)	5.55 %	1.36 %
Absorción	0.94 %	0.83 %
Módulo de finura	2.97	7.39
Tamaño máximo nominal	-	1"

Tabla 3.1 Propiedades de los agregados fino y grueso (Fuente: Elaboración propia) (Ensayos estandarizados de acuerdo a NTP, ver Anexos 01)

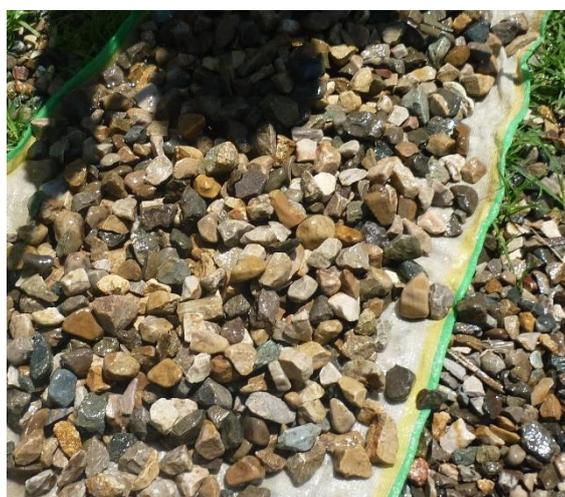


Fig. 3.1 Muestra del agregado grueso a utilizar

3.2.2 Características del Cemento

El tipo de cemento empleado en esta investigación fue el cemento Portland Tipo I (Pacasmayo), con la finalidad de evaluar el comportamiento físico y mecánico del concreto rodillado que produce a diferentes edades. Las especificaciones para el diseño son las siguientes:

Cumple con las normas técnicas NTP 334.009 y ASTM C 150

Propiedades físicas	Cemento Pacasmayo Tipo I	Requisito NTP 334.009 / ASTM C 150
Contenido de aire	7%	Máximo 12%
Expansión en autoclave	0.16%	Máximo 0.80%
Superficie específica	3940 cm ² /g	Mínimo 2800 cm ² /g
Densidad	3.12 g/ml	No especifica

Tabla 3.2 Propiedades del cemento Pacasmayo Tipo I (Fuente: Ficha técnica del cemento)

3.2.3 Determinación de la cantidad de materiales de mezcla

Para la determinación de la proporción de los componentes de mezcla, se realizó el diseño por el método del módulo de finura de la combinación de los agregados, adoptando para una primera estimación una consistencia seca, con un slump = 1", para de esta forma utilizar las tablas de contenido de agua por metro cúbico, se realizó el ajuste por humedad y absorción, posteriormente en el ajuste de mezcla se aprecia un asentamiento de 0" por lo que se adopta como diseño definitivo obteniéndose y verificándose por el cono de Abrams el slump = 0", de tal forma de asegurar que el rodillado sea eficiente. Cabe mencionar que la compactación de las probetas de prueba fue igual a la de un concreto convencional, es decir 25 golpes en 3 capas tal como exige la Norma Técnica Peruana, el mezclado fue manual utilizando equipos y herramientas manuales. Luego de haber diseñado, se procedió al desencofrado y al curado de las probetas de concreto normal para confirmar la resistencia de diseño.



Fig 3.2 Asentamiento nulo para el concreto de diseño

Dosificación por metro cúbico Slump = 0", f'c = 250 Kg/cm2	
Cemento	352.80 Kg/m3
Agregado fino	844.69 Kg/m3
Agregado grueso	1008.13 Kg/m3
Agua efectiva	134.24 Litros/m3
Resistencia a la compresión pronostico	261.32 Kg/cm2

Tabla 3.3 Componentes por m3 concreto 250 Kg/cm2 (Fuente: Elaboración propia) (Diseño y ajustes, ver Anexos 02)

3.2.4 Determinación de número de capas y número de golpes

Para la determinación del número de capas y el número de golpes necesarios para la compactación, se deberá determinar la energía de compactación con la que se compactará; por lo que lo más adecuado es hacerla de acuerdo a la energía de compactación en campo debida al rodillado, a ciertos parámetros como el ciclo de pasadas del rodillo, el espesor de la capa, el peso del rodillo, la velocidad del equipo, entre otros.

En consecuencia, en base a la energía de compactación que se obtiene de resultados, se tomará una energía de compactación tal que garantice que los rodillos antes mencionados satisfagan mínimamente la compactación de

laboratorio. Por otra parte basándonos en el ensayo de compactación Proctor estándar (ASTM D698) sugiere una energía de compactación de 600 KN-m/m³ tomamos esta como válida.

Ahora se calcula el número de golpes de acuerdo a la energía por impacto; para la investigación se ha considerado la compactación en diferentes números de capas para poder de este modo sostener el concepto de compactación para mejor acomodo de las partículas entonces se procedió al cálculo con la energía de compactación constante para 3, 5 y 7 capas; el martillo compactador es de masa igual a 3.5 Kg que también se mantuvo constante para todas las capas; la altura de compactación es de 50 cm de igual forma constante, y los moldes donde se compactará, serán de acero de 6" de diámetro y 12" de altura para que puedan ser ensayados posteriormente cumpliendo las normas técnicas para la ruptura de probetas.



Fig 3.3 Martillo compactador con guía de PVC y base de acero

Para 3 capas:

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

Y: energía a aplicar en la muestra de suelo;

n: número de capas a ser compactadas en el cilindro de moldeado;

N: número de golpes aplicados por capa;

P: peso del pisón;

H: altura de caída del pisón

V: volumen del cilindro.

Para 3 capas:

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

$$600,000 \frac{N - m}{m^3} = \frac{n * 3 * 3.5 * 9.81N * 0.50m}{0.00556m^3}$$

$$n = 64.77 \text{ golpes}$$

$$n = 65 \text{ golpes}$$

Para 5 capas:

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

$$600,000 \frac{N - m}{m^3} = \frac{n * 5 * 3.5 * 9.81N * 0.50m}{0.00556m^3}$$

$$n = 38.86 \text{ golpes}$$

$$n = 39 \text{ golpes}$$

Para 7 capas:

$$Y = \frac{n \cdot N \cdot P \cdot H}{V}$$

$$600,000 \frac{N - m}{m^3} = \frac{n * 5 * 3.5 * 9.81N * 0.50m}{0.00556m^3}$$

$$n = 27.76 \text{ golpes}$$

$$n = 28 \text{ golpes}$$

Probeta	Nº Golpes
3 Capas	65
5 Capas	39
7 Capas	28

Tabla 3.21 Número de golpes de compactación según número de capas

3.2.5 Preparación de moldes de cilindros de resistencia a la compresión

Luego de obtener satisfactoriamente los parámetros con los que se realizará a cabo la investigación, incluyendo la dosificación, los materiales, el equipo, la energía de compactación y teniendo en cuenta los demás criterios para una mezcla de concreto rodillado se realizaron especímenes de concreto con el objetivo de medir la resistencia a la compresión de dichas muestras.

Las dimensiones de los especímenes usados fueron de 6" de diámetro y 12" de altura, para lo cual se preparó especímenes para ser probadas a diferentes edades del concreto, esto es a 7 días, 14 días, 28 días y 56 días. Para cada edad del concreto se compactaron en 3 capas, 5 capas y 7 capas cada una con diferente número de golpes. De tal manera que se tuvo 30 especímenes ensayados a los 7 días (10 de los cuales en 3 capas, 10 en 5 capas y 10 en 7 capas); 30 especímenes ensayados a los 14 días (10 de los cuales en 3 capas, 10 en 5 capas y 10 en 7 capas); 30 especímenes ensayados a los 28 días (10 de los cuales en 3 capas, 10 en 5 capas y 10 en 7 capas); 30 especímenes ensayados a los 56 días (10 de los cuales en 3 capas, 10 en 5 capas y 10 en 7 capas). Haciendo un total de 120 especímenes de tal forma que se obtenga resultados representativos para cada edad, y según el número de capas de compactación que significan una misma energía de compactación.

El proceso de preparación fue el siguiente: Se preparó los equipos a utilizar tanto en la preparación de la mezcla, como en la compactación por impacto que tendrá; luego se prepararon los materiales a utilizar por la tanda que se realizó, de tal forma que se pesó el agregado grueso, el agregado fino, el cemento y se midió el volumen del agua. Una vez preparados los materiales se procedió al mezclado con herramientas manuales del agregado grueso con el agregado fino y el cemento, esto hasta que sea un material uniforme; luego se le agregó agua a la mezcla de forma constante a lo largo del material cementado, es en este momento que se debe mezclar todo con rapidez, ya que la mezcla tiene consistencia seca y podría endurecer rápidamente.

Luego de tener preparada la mezcla se realizó la preparación de los especímenes de tres capas, de tal forma que para la primera capa se llena aproximadamente la mitad de la altura del espécimen pues al compactar baja el

nivel considerablemente hasta una tercia parte de la altura. Se procedió a realizar 65 golpes a una altura de 50 cm. Para la segunda capa se debe llenar hasta aproximadamente las tres cuartas partes de la altura del espécimen para luego proceder con los 65 golpes. Para la tercera capa se debe llenar completamente el espécimen, se procede a dar 50 golpes, pues por obvias razones el nivel del concreto desciende a medida que se compacta, los últimos 15 golpes restantes se darán llenando el espécimen. Una vez terminada la compactación, se procedió al enrazado con el badilejo para que tenga una superficie plana en la parte superior de la probeta.

Para las muestras de cinco capas se procedió del siguiente modo: para la primera capa se llenó el espécimen hasta una cuarta parte de la altura y se procedió a dar 39 golpes desde una altura de 50 cm. Para la segunda capa se llenó hasta la mitad, el mismo número de golpes y altura; para la tercera capa se llenó hasta las partes de la altura del cilindro, el mismo número de golpes y altura; para la cuarta capa se llenó un poco más de las cuatro quintas partes de la altura del cilindro, el mismo número de golpes y altura; la última capa se llenó completamente y se realizó 25 golpes, los 14 restantes se los dio a medida que se llenaba nuevamente el espécimen. Una vez terminada la compactación, se procedió al enrazado con el badilejo para que tenga una superficie plana en la parte superior de la probeta.

Para las muestras de siete capas se procedió del siguiente modo: para la primera capa se llenó el espécimen hasta una quinta parte de la altura del cilindro y se procedió a dar 28 golpes a una altura de 50 cm. Para la segunda capa se llenó hasta las dos quintas partes de la altura del cilindro, el mismo número de golpes y altura; para la tercera capa se llenó hasta la mitad de la altura del espécimen, el mismo número de golpes y altura; para la cuarta capa se llenó hasta las tres quintas partes del espécimen, el mismo número de golpes y altura; para la quinta capa se llenó hasta las tres cuartas partes de la altura del espécimen, el mismo número de golpes y la misma altura; para la sexta capa se llenó hasta las nueve décimas partes de la altura del cilindro, a la misma altura y mismo número de golpes; para la última capa se llenó completamente el espécimen y se realizó 20 golpes, los 8 restantes se los dio a medida que se llenaba de nuevo el espécimen. Una vez terminada la

compactación, se procedió al enrazado con el badilejo para que tenga una superficie plana en la parte superior de la probeta.

3.2.6 Preparación de moldes de resistencia a la flexión

Para las muestras a flexión se prepararon en moldes prismáticos de dimensiones de 6 pulg de ancho, 6 pulg de alto y 20 pug de longitud, se realizó la preparación de los especímenes en tres, cinco y siete capas, de tal forma que sea acomode de acuerdo al número de capas el concreto en un espacio razonable. Se procedió a realizar los golpes de acuerdo al número de capas a una altura de 50 cm. Una vez terminada la compactación, se procedió al enrazado con el badilejo para que tenga una superficie plana en la parte superior de la probeta.

3.3 Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados

Para el tratamiento de los datos y la presentación de los resultados se presentará a continuación según la edad del concreto la carga con la que falló cada muestra, de tal manera que se halla la resistencia a cada edad.

De los ensayos realizados se separan en los que fueron sometidos a la compresión y los que fueron sometidos a la flexión.

3.3.1 Concreto rodillado a la compresión a los 7 días

NTP 339.034

MUESTRA	N° CAPAS	P.E. FRAGUADO (Kg/m ³)	CARGA (Tn)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (Kg/cm ²)
1	3	2389.89	44	182.41	241.21Kg/cm ²
2	3	2381.80	43	182.41	235.73 Kg/cm ²
3	3	2383.60	43	182.41	235.73 Kg/cm ²
4	3	2378.29	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
5	3	2380.52	44	182.41	241.21 Kg/cm ²
6	3	2385.39	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
7	3	2379.62	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
8	3	2380.39	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
9	3	2378.93	44	182.41	241.21 Kg/cm ²
10	3	2379.40	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
11	5	2382.72	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
12	5	2381.26	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
13	5	2381.81	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
14	5	2380.32	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
15	5	2379.62	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
16	5	2384.50	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
17	5	2382.85	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
18	5	2381.96	44	182.41	241.21 Kg/cm ²
19	5	2383.38	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
20	5	2384.23	45	182.41	246.70 Kg/cm ²
21	7	2383.55	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
22	7	2382.40	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
23	7	2382.71	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
24	7	2384.65	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
25	7	2385.80	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
26	7	2387.47	48	182.41	263.14 Kg/cm ²
27	7	2383.74	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
28	7	2386.01	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
29	7	2384.81	47	182.41	257.66 Kg/cm ²
30	7	2387.70	46	182.41	252.18 Kg/cm ²
PROMEDIO					250.17 Kg/cm²
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					7.12 Kg/cm ²
Coeficiente de variación					2.85 %

3.3.2 Concreto rodillado a la compresión a los 14 días

NTP 339.034

MUESTRA	N° CAPAS	P.E. FRAGUADO (Kg/m3)	CARGA (Tn)	ÁREA (cm2)	RESISTENCIA (Kg/cm2)
1	3	2389.89	54	182.41	296.04 Kg/cm2
2	3	2381.80	53	182.41	290.55 Kg/cm2
3	3	2383.60	51	182.41	279.59 Kg/cm2
4	3	2377.24	52	182.41	285.07 Kg/cm2
5	3	2381.58	52	182.41	285.07 Kg/cm2
6	3	2386.45	53	182.41	290.55 Kg/cm2
7	3	2380.68	51	182.41	279.59 Kg/cm2
8	3	2381.45	53	182.41	290.55 Kg/cm2
9	3	2379.99	52	182.41	285.07 Kg/cm2
10	3	2380.46	54	182.41	296.04 Kg/cm2
11	5	2381.67	52	182.41	285.07 Kg/cm2
12	5	2380.21	54	182.41	296.04 Kg/cm2
13	5	2380.76	55	182.41	301.52 Kg/cm2
14	5	2379.27	53	182.41	290.55 Kg/cm2
15	5	2378.57	54	182.41	296.04 Kg/cm2
16	5	2383.45	54	182.41	296.04 Kg/cm2
17	5	2381.80	54	182.41	296.04 Kg/cm2
18	5	2380.91	55	182.41	301.52 Kg/cm2
19	5	2384.44	54	182.41	296.04 Kg/cm2
20	5	2385.29	52	182.41	285.07 Kg/cm2
21	7	2384.61	55	182.41	301.52 Kg/cm2
22	7	2383.46	56	182.41	307.00 Kg/cm2
23	7	2383.77	55	182.41	301.52 Kg/cm2
24	7	2385.71	54	182.41	296.04 Kg/cm2
25	7	2386.86	56	182.41	307.00 Kg/cm2
26	7	2388.53	55	182.41	301.52 Kg/cm2
27	7	2382.69	55	182.41	301.52 Kg/cm2
28	7	2384.96	54	182.41	296.04 Kg/cm2
29	7	2383.76	56	182.41	307.00 Kg/cm2
30	7	2386.65	55	182.41	301.52 Kg/cm2
PROMEDIO					294.52 Kg/cm2
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					7.88 Kg/cm2
Coeficiente de variación					2.71%

3.3.3 Concreto rodillado a la compresión a los 28 días

NTP 339.034

MUESTRA	N° CAPAS	P.E. FRAGUADO (Kg/m ³)	CARGA (Tn)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (Kg/cm ²)
1	3	2392.28	70	182.41	383.75 Kg/cm ²
2	3	2384.19	68	182.41	372.79 Kg/cm ²
3	3	2385.99	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
4	3	2379.63	67	182.41	367.30 Kg/cm ²
5	3	2383.97	70	182.41	383.75 Kg/cm ²
6	3	2388.85	70	182.41	383.75 Kg/cm ²
7	3	2383.07	71	182.41	389.23 Kg/cm ²
8	3	2383.84	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
9	3	2382.38	68	182.41	372.79 Kg/cm ²
10	3	2382.85	70	182.41	383.75 Kg/cm ²
11	5	2384.06	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
12	5	2382.60	71	182.41	389.23 Kg/cm ²
13	5	2383.15	68	182.41	372.79 Kg/cm ²
14	5	2381.66	72	182.41	394.72 Kg/cm ²
15	5	2380.96	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
16	5	2385.84	66	182.41	361.82 Kg/cm ²
17	5	2384.19	72	182.41	394.72 Kg/cm ²
18	5	2383.30	71	182.41	389.23 Kg/cm ²
19	5	2386.83	68	182.41	372.79 Kg/cm ²
20	5	2387.68	72	182.41	394.72 Kg/cm ²
21	7	2387.00	71	182.41	389.23 Kg/cm ²
22	7	2385.85	68	182.41	372.79 Kg/cm ²
23	7	2386.16	71	182.41	389.23 Kg/cm ²
24	7	2388.10	70	182.41	383.75 Kg/cm ²
25	7	2389.26	72	182.41	394.72 Kg/cm ²
26	7	2390.93	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
27	7	2385.08	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
28	7	2387.35	73	182.41	400.20 Kg/cm ²
29	7	2386.15	69	182.41	378.27 Kg/cm ²
30	7	2389.05	72	182.41	394.72 Kg/cm ²
PROMEDIO					382.24 Kg/cm²
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					9.25 Kg/cm ²
Coeficiente de variación					2.42%

3.3.4 Concreto rodillado a la compresión a los 56 días

NTP 339.034

MUESTRA	N° CAPAS	P.E. FRAGUADO (Kg/m ³)	CARGA (Tn)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)
1	3	2394.66	76	182.41	416.64 Kg/cm ²
2	3	2386.56	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
3	3	2388.37	80	182.41	438.57 Kg/cm ²
4	3	2381.99	78	182.41	427.61 Kg/cm ²
5	3	2386.34	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
6	3	2391.22	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
7	3	2385.44	76	182.41	416.64 Kg/cm ²
8	3	2386.21	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
9	3	2384.75	78	182.41	427.61 Kg/cm ²
10	3	2385.22	79	182.41	433.09 Kg/cm ²
11	5	2386.43	80	182.41	438.57 Kg/cm ²
12	5	2384.97	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
13	5	2385.52	78	182.41	427.61 Kg/cm ²
14	5	2384.03	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
15	5	2383.33	79	182.41	433.09 Kg/cm ²
16	5	2388.22	78	182.41	427.61 Kg/cm ²
17	5	2386.56	78	182.41	427.61 Kg/cm ²
18	5	2385.67	79	182.41	433.09 Kg/cm ²
19	5	2389.21	79	182.41	433.09 Kg/cm ²
20	5	2390.06	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
21	7	2389.38	79	182.41	433.09 Kg/cm ²
22	7	2388.23	80	182.41	438.57 Kg/cm ²
23	7	2388.54	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
24	7	2390.48	80	182.41	438.57 Kg/cm ²
25	7	2391.63	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
26	7	2393.31	80	182.41	438.57 Kg/cm ²
27	7	2387.45	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
28	7	2389.73	77	182.41	422.13 Kg/cm ²
29	7	2388.53	79	182.41	433.09 Kg/cm ²
30	7	2391.42	80	182.41	438.57 Kg/cm ²
PROMEDIO					427.80 Kg/cm²
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					6.95 Kg/cm ²
Coeficiente de variación					1.62 %

3.3.5 Concreto rodillado a la flexión a los 28 días

NTP 339.079

MUESTRA	N° CAPAS	CARGA (Kg)	Longitud Prisma (cm)	Lado de prisma (cm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (kg/cm ²)
1	3	1750	50.00	15.00	38.89 Kg/cm ²
2	3	1800	50.00	15.00	40.00 Kg/cm ²
3	3	1700	50.00	15.00	37.78 Kg/cm ²
4	5	1750	50.00	15.00	38.89 Kg/cm ²
5	5	1850	50.00	15.00	41.11 Kg/cm ²
6	5	1750	50.00	15.00	38.89 Kg/cm ²
7	7	1700	50.00	15.00	37.78 Kg/cm ²
8	7	1750	50.00	15.00	38.89 Kg/cm ²
9	7	1850	50.00	15.00	41.11 Kg/cm ²
PROMEDIO					39.26 Kg/cm²
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					1.24
Coeficiente de variación					3.16 %

CAPITULO IV:
ANALISIS Y DISCUSIÓN DE
RESULTADOS

CAPITULO IV: ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Propiedades del concreto rodillado

a. Trabajabilidad

El concreto rodillado tiene muy baja trabajabilidad

b. Consistencia

Seca

Slump = 0"

c. Homogeneidad

El concreto rodillado a inspección visual comprende buena homogeneidad.

d. Exudación

NTP 339.077

PROBETA	CAPAS	Agua de Mezcla (ml)	Agua Exudada (ml)	Porcentaje
1	3	1043.30	9.50	0.91%
2	3	1043.30	8.90	0.85%
3	3	1043.30	9.80	0.94%
4	5	1043.30	10.10	0.97%
5	5	1043.30	9.70	0.93%
6	5	1043.30	9.50	0.91%
7	7	1043.30	10.40	1.00%
8	7	1043.30	10.00	0.96%
9	7	1043.30	9.60	0.92%
			PROMEDIO	0.93%

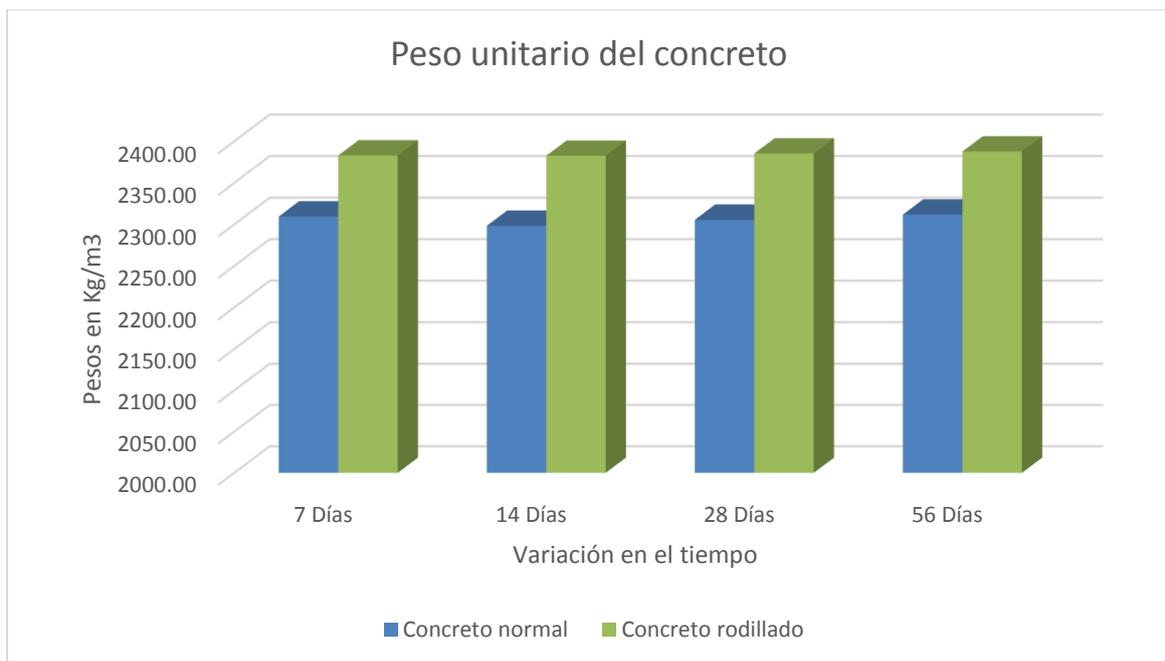
e. Peso Unitario

1. Promedio del peso unitario del concreto rodillado.

MUESTRA	N° CAPAS	7 DÍAS (Kg/m3)	14 DÍAS (kg/m3)	28 DÍAS (kg/m3)	56 DÍAS (kg/m3)	PROMEDIO
1	3	2389.89	2378.65	2392.28	2394.66	2383.68 Kg/m3
2	3	2381.80	2379.31	2384.19	2386.56	
3	3	2383.60	2385.70	2385.99	2388.37	
4	3	2378.29	2377.24	2379.63	2381.99	
5	3	2380.52	2381.58	2383.97	2386.34	
6	3	2385.39	2386.45	2388.85	2391.22	
7	3	2379.62	2380.68	2383.07	2385.44	
8	3	2380.39	2381.45	2383.84	2386.21	
9	3	2378.93	2379.99	2382.38	2384.75	
10	3	2379.40	2380.46	2382.85	2385.22	
11	5	2382.72	2381.67	2384.06	2386.43	2383.58 Kg/m3
12	5	2381.26	2380.21	2382.60	2384.97	
13	5	2381.81	2380.76	2383.15	2385.52	
14	5	2380.32	2379.27	2381.66	2384.03	
15	5	2379.62	2378.57	2380.96	2383.33	
16	5	2384.50	2383.45	2385.84	2388.22	
17	5	2382.85	2381.80	2384.19	2386.56	
18	5	2381.96	2380.91	2383.30	2385.67	
19	5	2383.38	2384.44	2386.83	2389.21	
20	5	2384.23	2385.29	2387.68	2390.06	
21	7	2383.55	2384.61	2387.00	2389.38	2386.84 Kg/m3
22	7	2382.40	2383.46	2385.85	2388.23	
23	7	2382.71	2383.77	2386.16	2388.54	
24	7	2384.65	2385.71	2388.10	2390.48	
25	7	2385.80	2386.86	2389.26	2391.63	
26	7	2387.47	2388.53	2390.93	2393.31	
27	7	2383.74	2382.69	2385.08	2387.45	
28	7	2386.01	2384.96	2387.35	2389.73	
29	7	2384.81	2383.76	2386.15	2388.53	
30	7	2387.70	2386.65	2389.05	2391.42	
PROMEDIO		2382.98	2382.63	2385.41	2387.78	2384.70 Kg/m3

2. Comparación del peso unitario del concreto rodillado con la del concreto normal

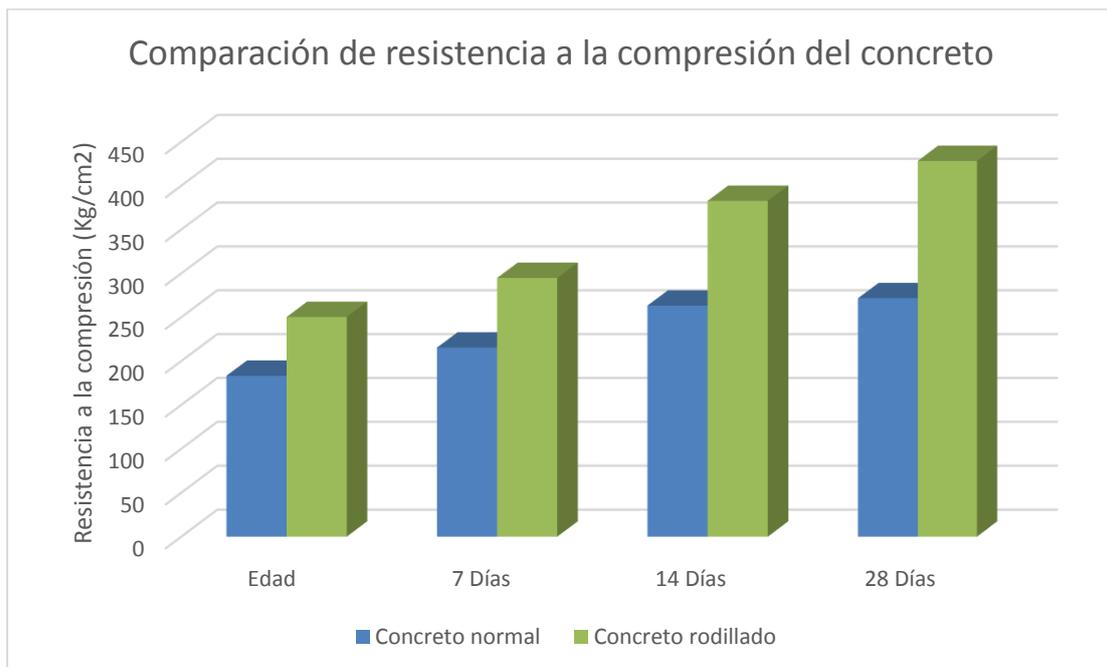
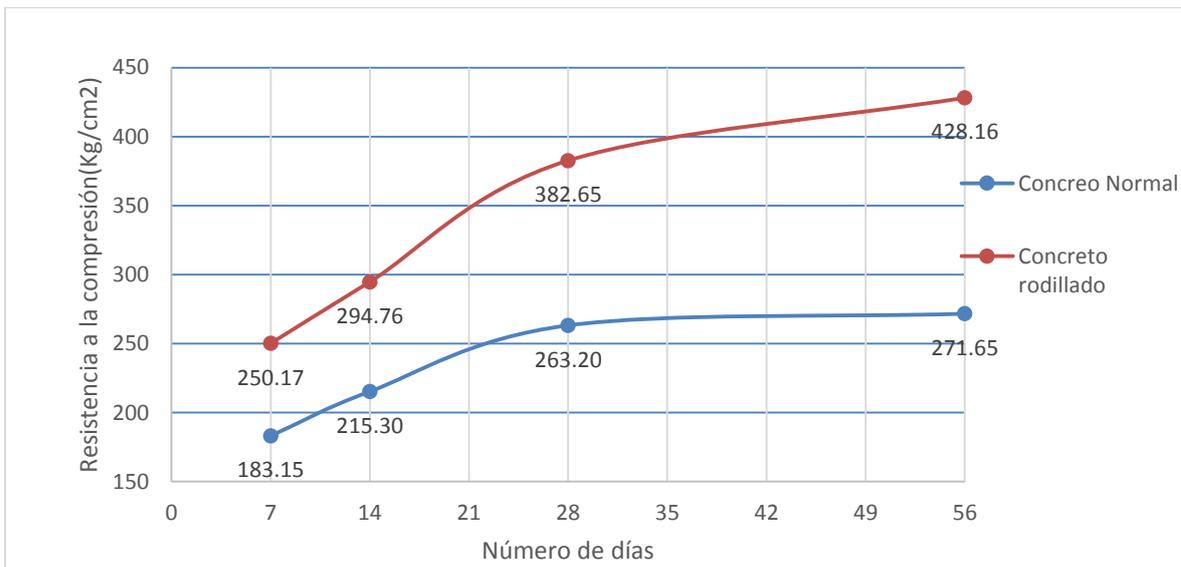
Edad	C° Normal	C° rodillado	% Aumento	Desviación estándar
7 Días	2309.54	2382.98	3.18%	2.79
14 Días	2298.35	2382.63	3.67%	2.89
28 Días	2305.60	2385.41	3.46%	2.97
56 Días	2311.84	2387.78	3.28%	2.97
		PROMEDIO	3.40%	2.90



4.2 Análisis de la resistencia a la compresión del concreto rodillado

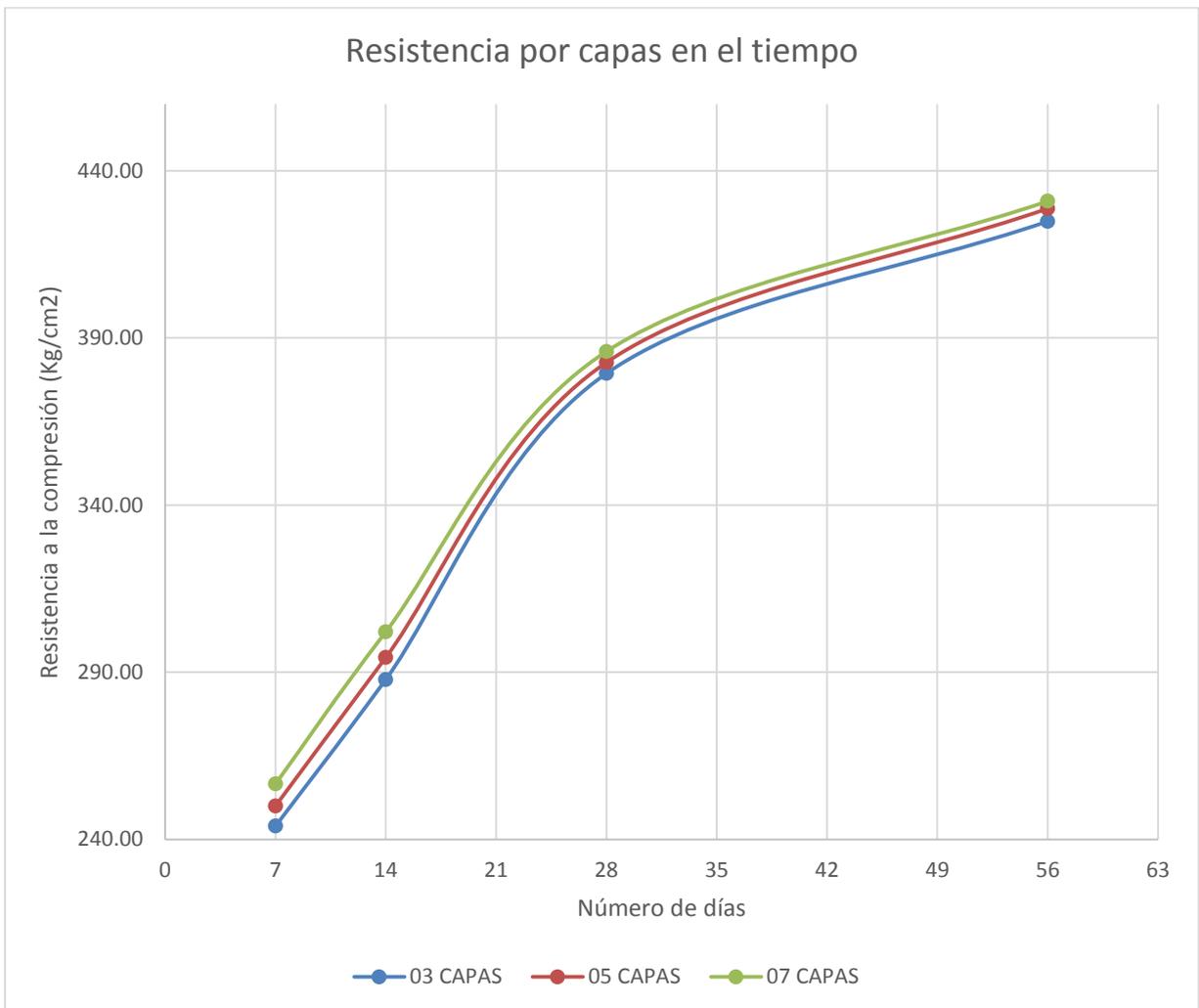
4.2.1 Comparación de resistencias del concreto rodillado con concreto normal

Edad	C° Normal		C° rodillado	
	Resistencia	% Resist. Diseño	Resistencia	% Resist. Diseño
7 días	183.15 Kg/cm ²	73.26%	250.17 Kg/cm ²	100.07%
14 días	215.30 Kg/cm ²	86.12%	294.76 Kg/cm ²	117.90%
28 días	263.20 Kg/cm ²	105.28%	382.65 Kg/cm ²	153.06%
56 días	271.65 Kg/cm ²	108.66%	428.16 Kg/cm ²	171.26%

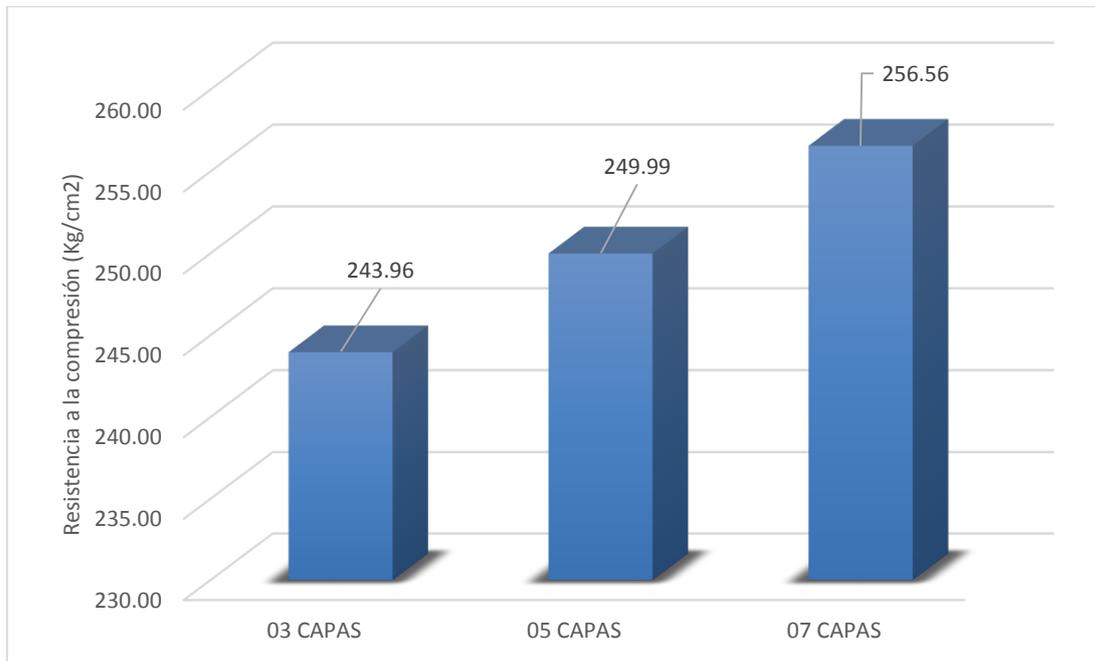


4.2.2 Resistencia promedio por el número de capas

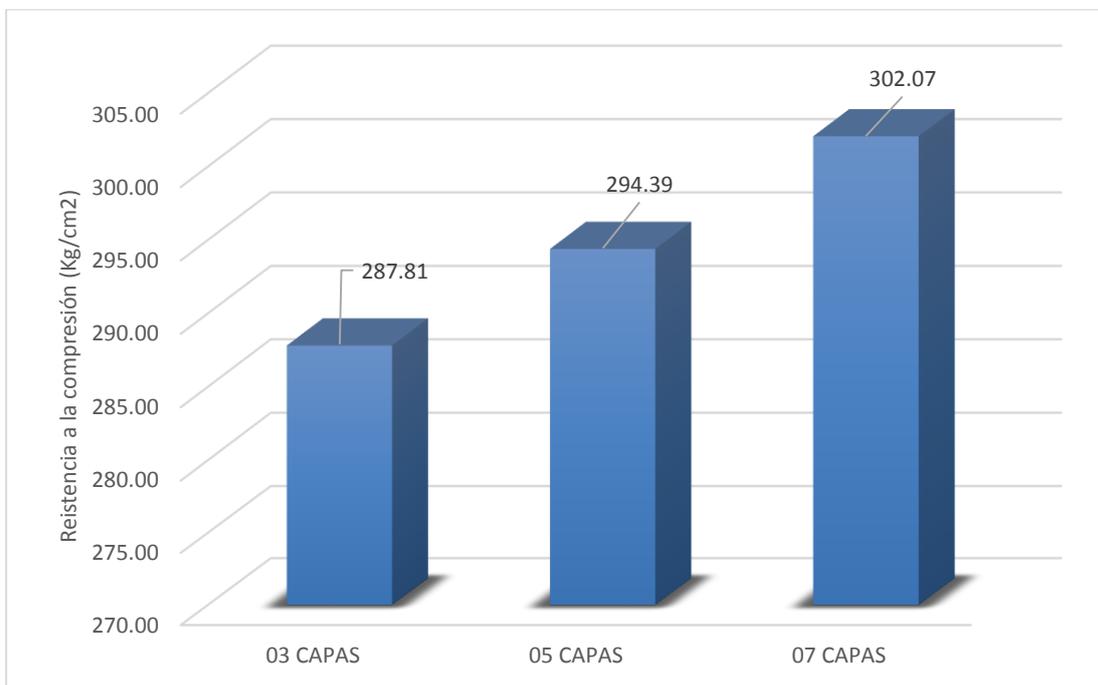
N° CAPAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
3	243.96 Kg/m ²	287.81 Kg/m ²	379.37 Kg/m ²	424.87 Kg/m ²
5	249.99 Kg/m ²	294.39 Kg/m ²	382.65 Kg/m ²	428.70 Kg/m ²
7	256.56 Kg/m ²	302.07 Kg/m ²	385.94 Kg/m ²	430.90 Kg/m ²



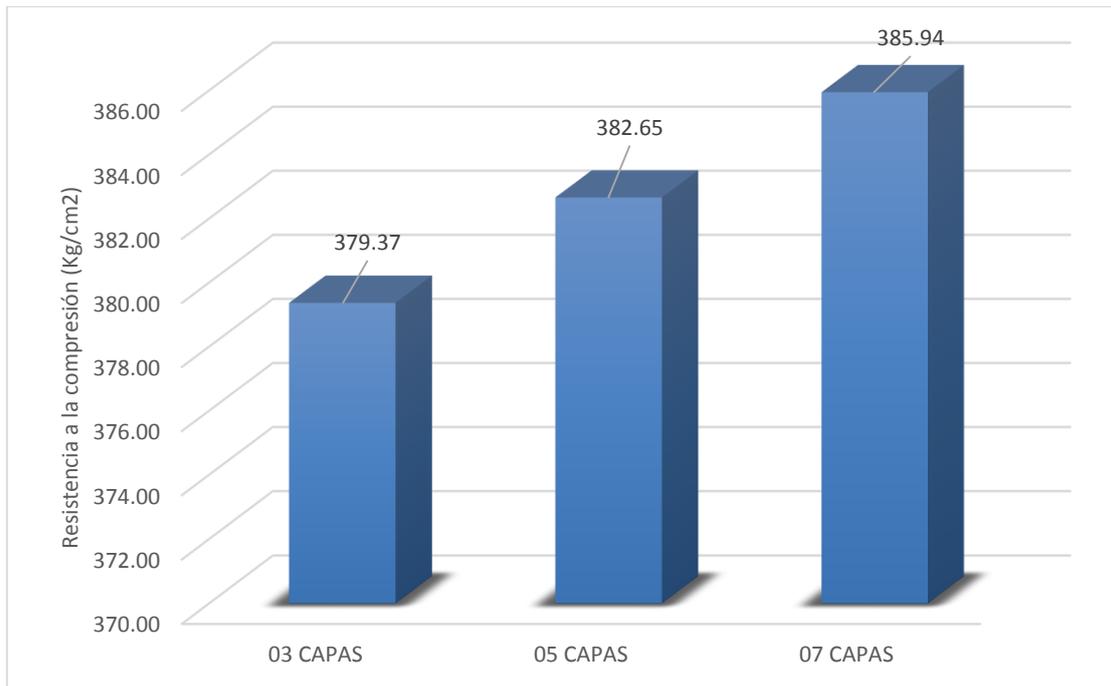
07 DÍAS



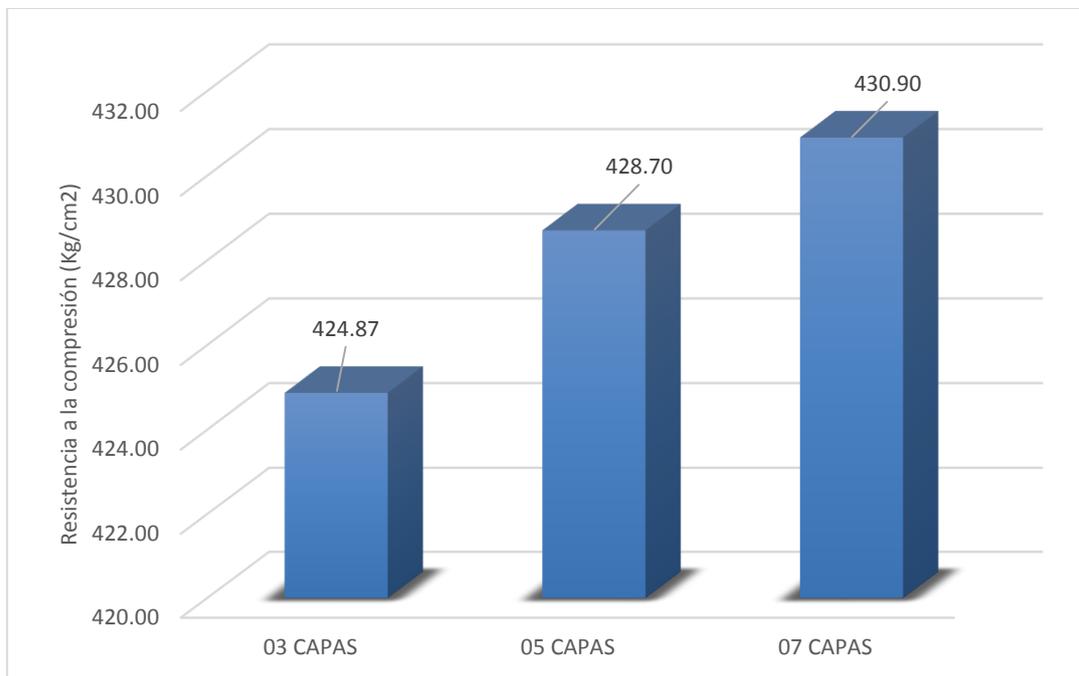
14 DÍAS



28 DÍAS



56 DÍAS

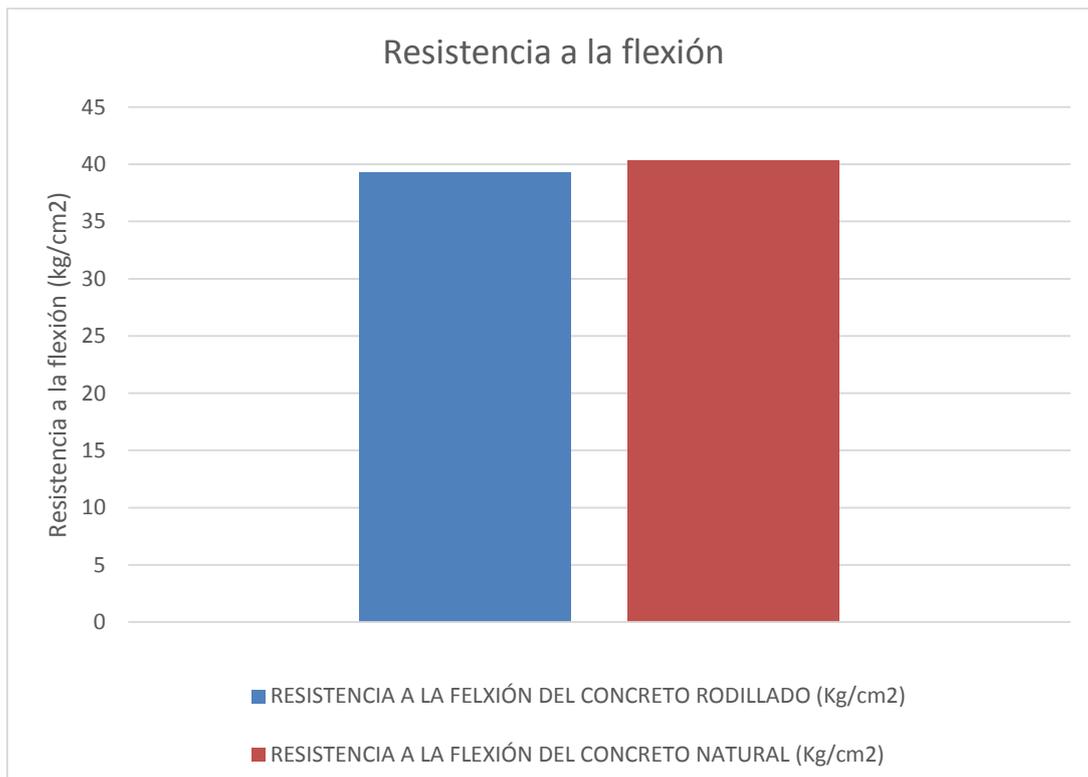


4.3 Análisis de la resistencia a la flexión del concreto rodillado

4.3.1 Comparación de resistencias del concreto rodillado con concreto normal

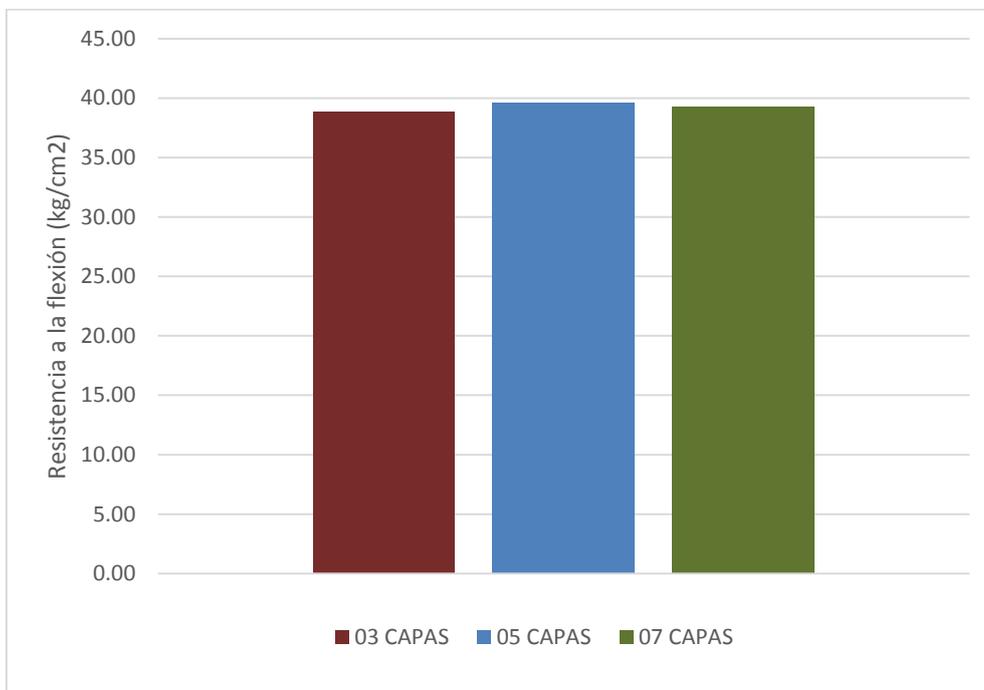
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO RODILLADO (Kg/cm ²)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO NORMAL (Kg/cm ²)
39.26 Kg/cm ²	40.3 Kg/cm ²

No hay variación significativa a flexión.



4.2.2 Comparación por número de capas

N° CAPAS	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN C° RODILLADO (kg/cm ²)
03 CAPAS	38.89 Kg/cm²
05 CAPAS	39.63 Kg/cm²
07 CAPAS	39.26 Kg/cm²

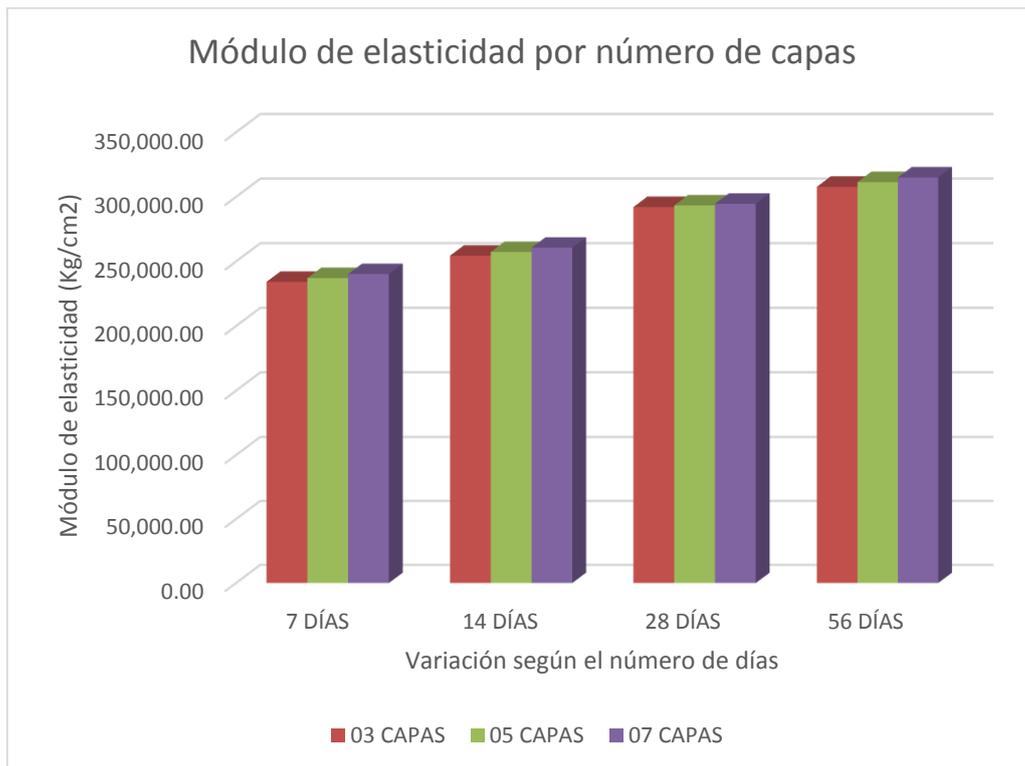


4.3 Análisis del módulo de elasticidad

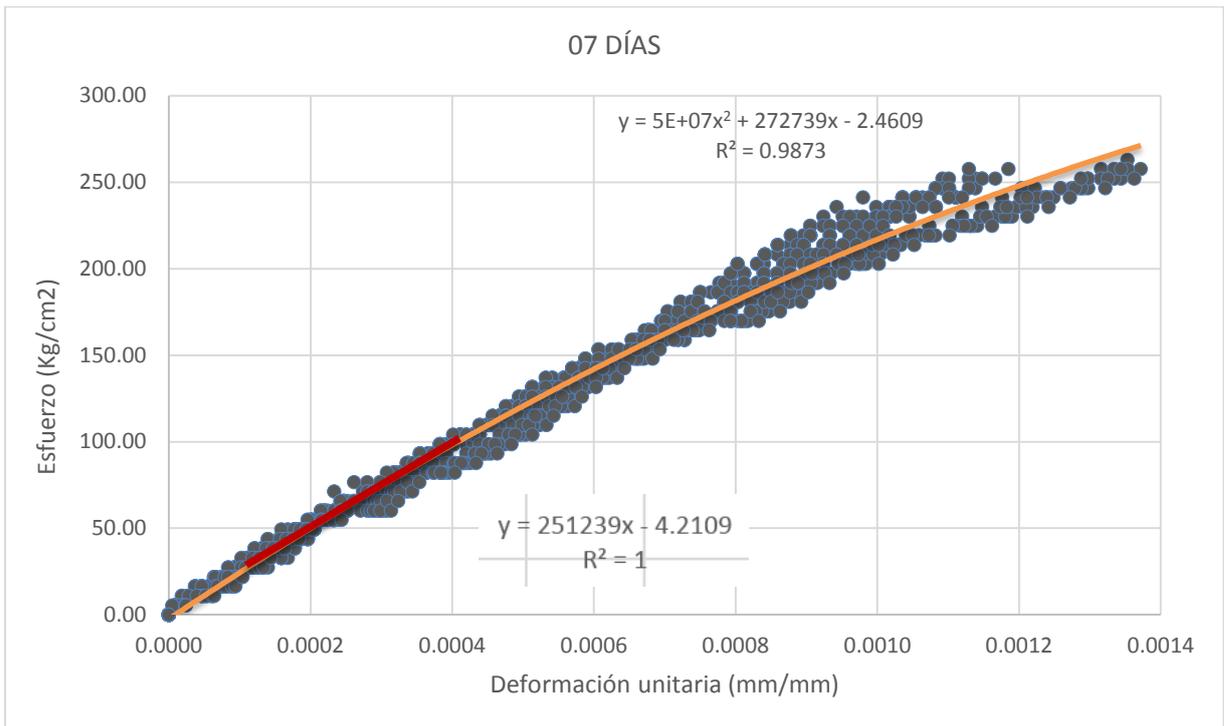
PROBETA	CAPAS	7 Días (Kg/cm ²)	14 Días (Kg/cm ²)	28 Días (kg/cm ²)	56 días (Kg/cm ²)
1	3	232,966.39	258,085.63	293,843.41	306,177.82
2	3	230,303.83	255,684.78	289,615.23	306,545.04
3	3	230,303.83	250,814.14	291,736.98	306,911.81
4	3	238,202.25	253,261.17	287,477.82	307,278.15
5	3	232,966.39	253,261.17	293,843.41	307,644.05
6	3	235,598.87	255,684.78	293,843.41	308,009.51
7	3	235,598.87	250,814.14	295,934.85	308,374.55
8	3	238,202.25	255,684.78	291,736.98	308,739.15
9	3	232,966.39	253,261.17	289,615.23	309,103.32
10	3	235,598.87	258,085.63	293,843.41	309,467.06
11	5	238,202.25	253,261.17	291,736.98	309,830.37
12	5	238,202.25	258,085.63	295,934.85	310,193.26
13	5	240,777.48	260,464.35	289,615.23	310,555.73
14	5	238,202.25	255,684.78	298,011.61	310,917.77
15	5	235,598.87	258,085.63	291,736.98	311,279.39
16	5	240,777.48	258,085.63	285,324.40	311,640.60
17	5	235,598.87	258,085.63	298,011.61	312,001.38
18	5	232,966.39	260,464.35	295,934.85	312,361.75
19	5	235,598.87	258,085.63	289,615.23	312,721.70
20	5	235,598.87	253,261.17	298,011.61	313,081.24
21	7	238,202.25	260,464.35	295,934.85	313,440.36
22	7	240,777.48	262,821.54	289,615.23	313,799.08
23	7	240,777.48	260,464.35	295,934.85	314,157.38
24	7	238,202.25	258,085.63	293,843.41	314,515.28
25	7	240,777.48	262,821.54	298,011.61	314,872.77
26	7	243,325.46	260,464.35	291,736.98	315,229.85
27	7	240,777.48	260,464.35	291,736.98	315,586.53
28	7	240,777.48	258,085.63	300,074.00	315,942.81
29	7	240,777.48	262,821.54	291,736.98	316,298.69
30	7	238,202.25	260,464.35	298,011.61	316,654.17
PROMEDIO		237,227.62 Kg/cm ²	257,505.30 Kg/cm ²	293,402.02 Kg/cm ²	311,444.35 Kg/cm ²
DEVIACIÓN ESTÁNDAR		3,386.97	3,433.97	3,597.21	3,180.13
Coeficiente de var.		1.43%	1.33%	1.23%	1.02%

Módulo de elasticidad en promedio de acuerdo al número de capas

CAPAS	7 días (kg/cm ²)	14 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)	56 días (kg/cm ²)
3	235,832.60	256,160.16	294,096.73	311,236.44
5	238,733.37	259,072.10	295,349.29	312,642.12
7	241,861.44	262,433.73	296,628.07	313,435.15



Método gráfico



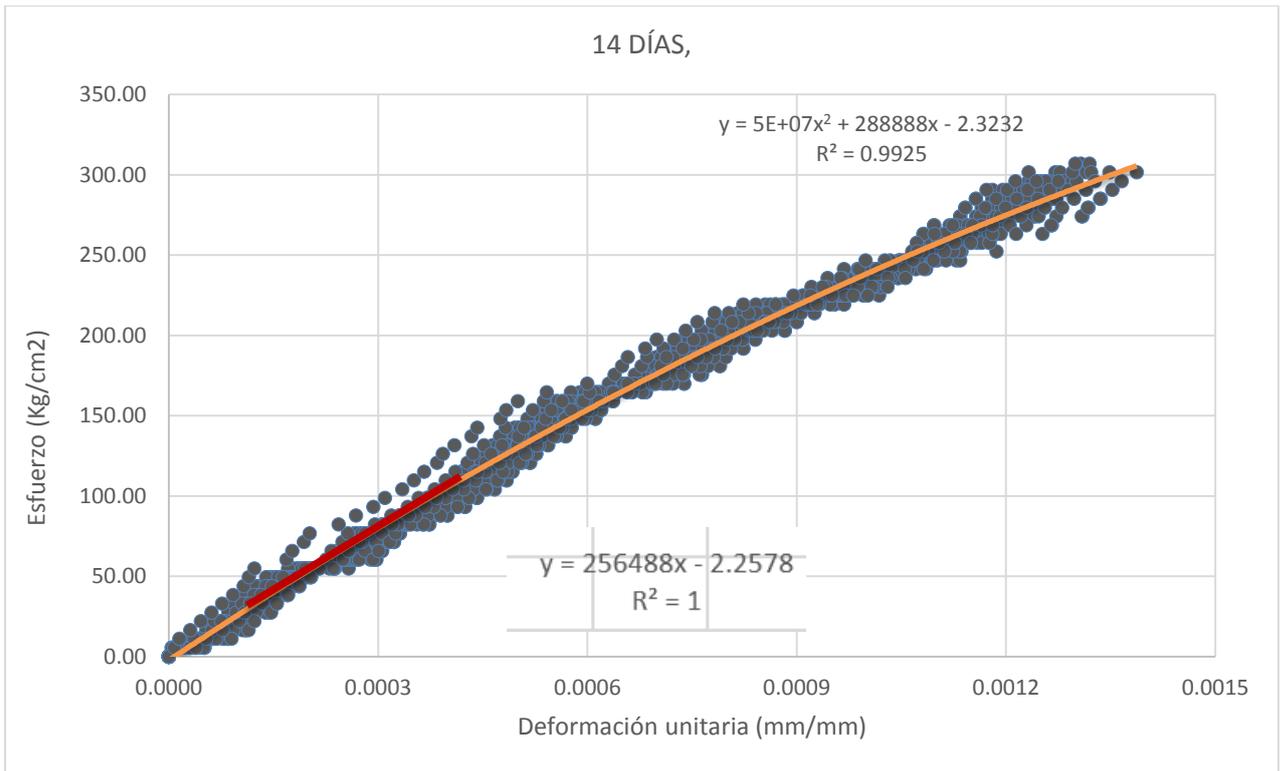
De la curva entre el 10% y el 40% de la resistencia:

$$y = 251239x - 4.2109$$

La pendiente de la recta es: 251,239

Por lo tanto el Módulo de Elasticidad es igual a $Tg \alpha$

Módulo de Elasticidad = **251,239 Kg/cm²**



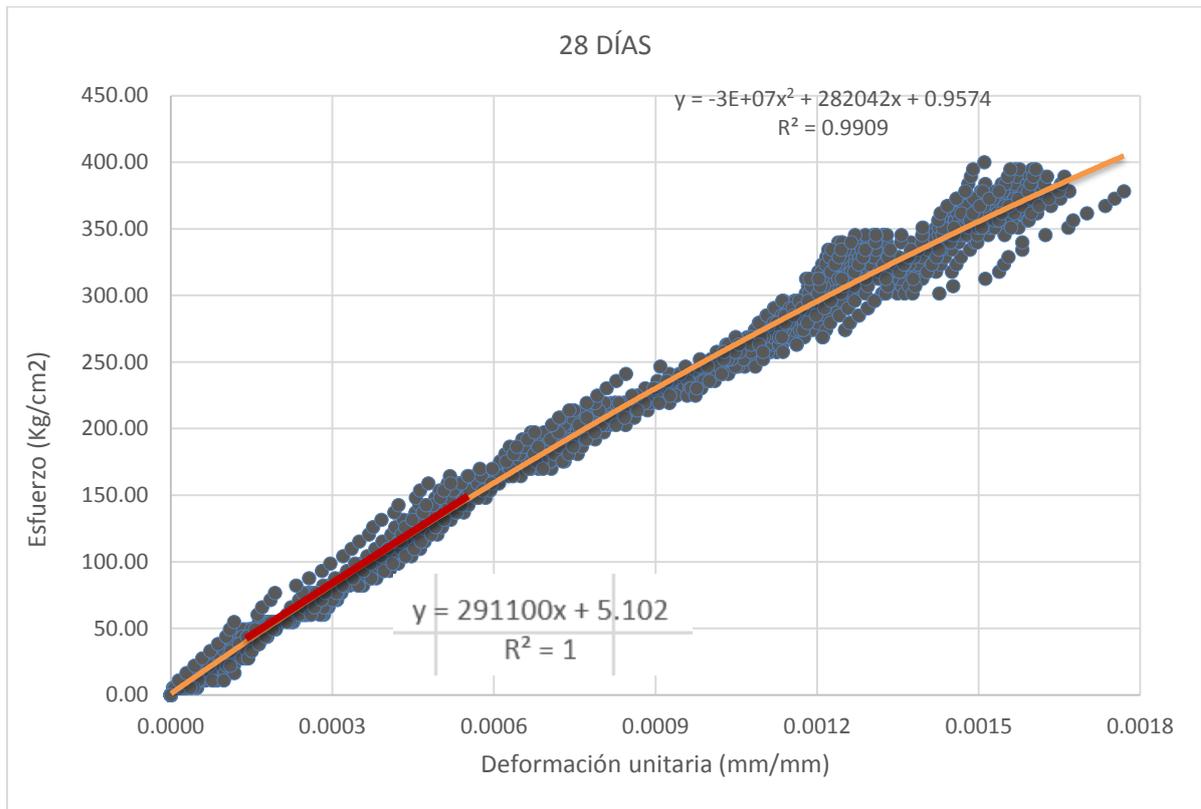
De la curva entre el 10% y el 40% de la resistencia:

$$y = 256488 - 2.2578$$

La pendiente de la recta es: 256488

Por lo tanto el Módulo de Elasticidad es igual a $Tg \alpha$

Módulo de Elasticidad = **256,488 Kg/cm²**



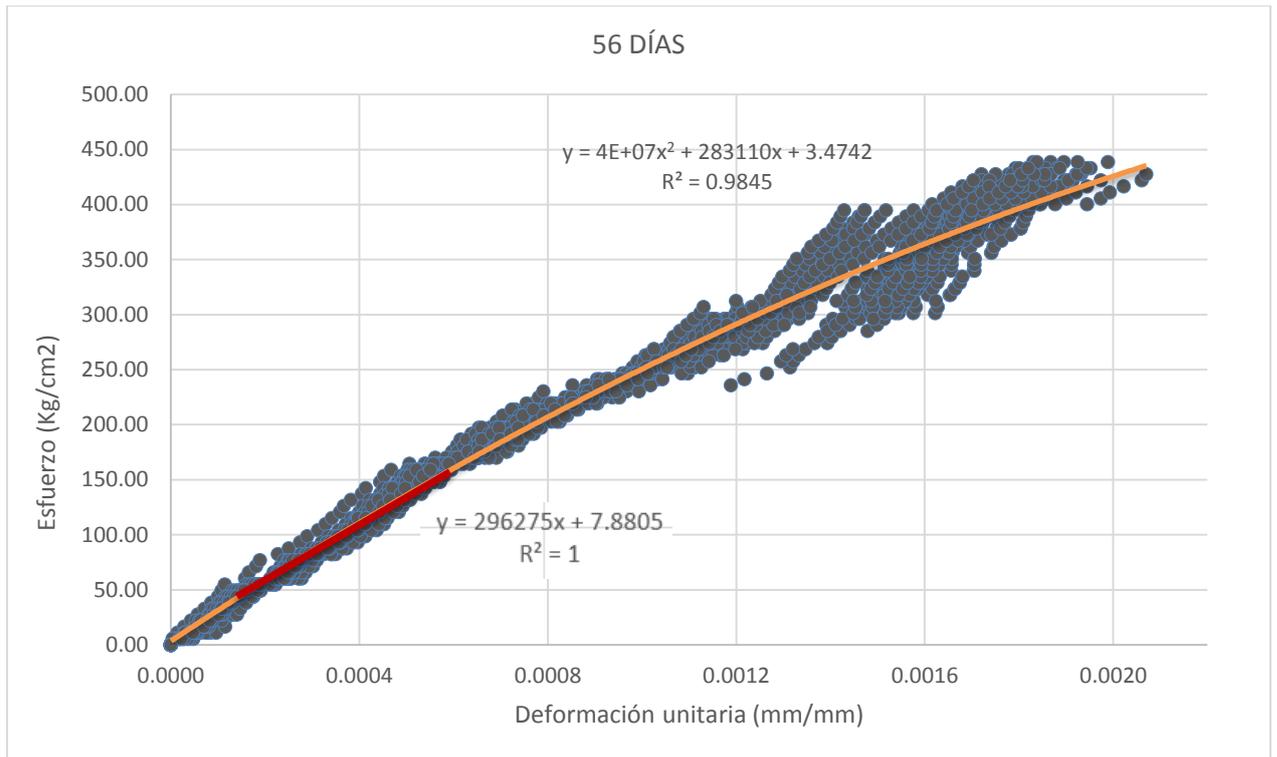
De la curva ajustada entre el 10% y el 40% de la curva:

$$y = 291,100X + 5.102$$

La pendiente de la recta es: 291,100

Por lo tanto el Módulo de Elasticidad es igual a $Tg \alpha$

Módulo de Elasticidad = **291,100 Kg/cm²**



De la curva ajustada la resistencia entre el 10% y el 40%:

$$y = 296275X + 7.8805$$

La pendiente de la recta es: 296,275

Por lo tanto el Módulo de Elasticidad es igual a $Tg \alpha$

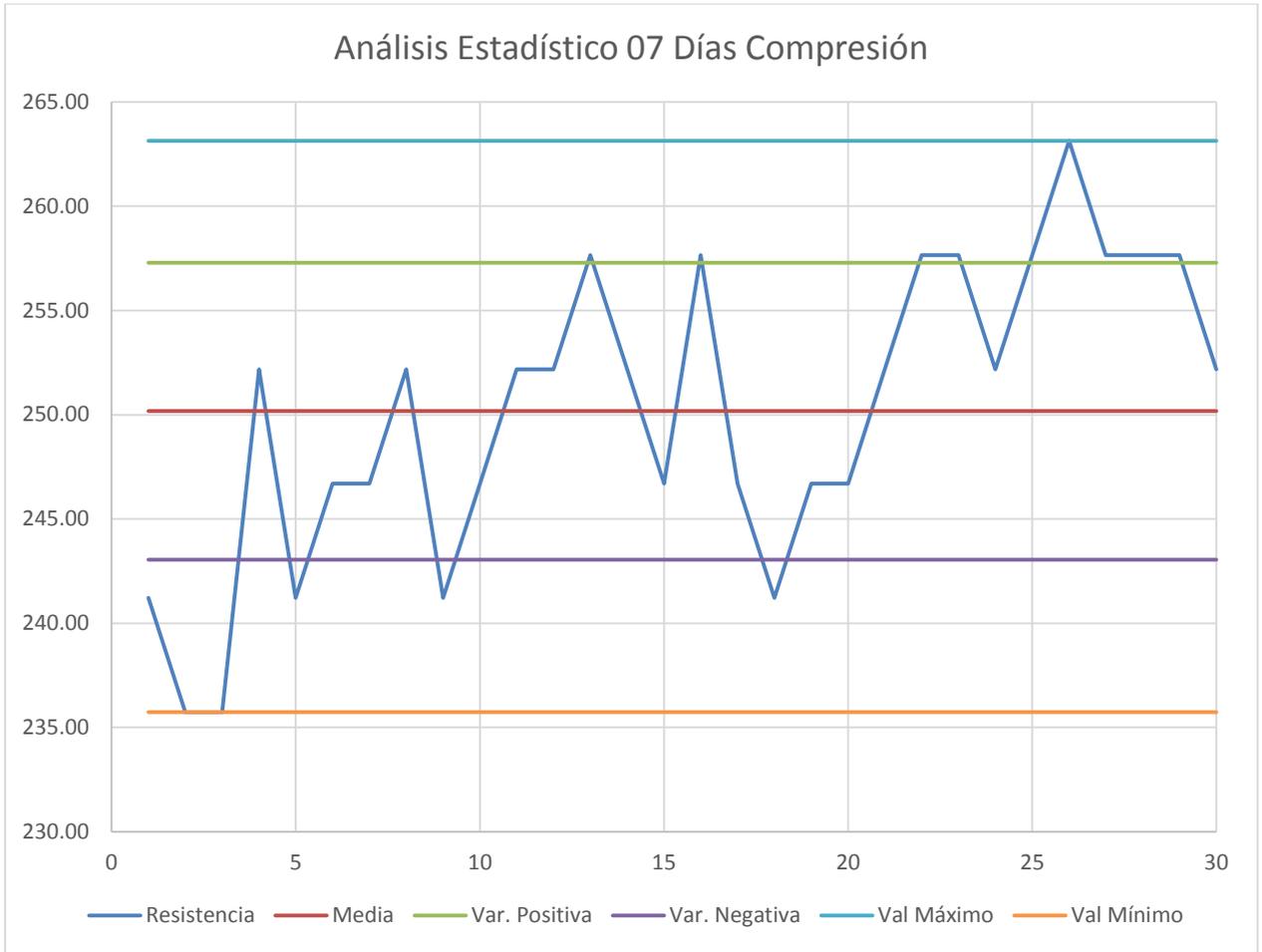
Módulo de Elasticidad = **296,275 Kg/cm²**

4.4 Análisis Estadístico

4.4.1 Análisis Estadístico de la Resistencia a la Compresión

07 DÍAS A LA COMPRESIÓN

Muestra	Resistencia	Media	Var. Posit.	Var. Negat.	Max	Min
1	241.21	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
2	235.73	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
3	235.73	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
4	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
5	241.21	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
6	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
7	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
8	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
9	241.21	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
10	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
11	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
12	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
13	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
14	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
15	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
16	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
17	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
18	241.21	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
19	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
20	246.70	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
21	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
22	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
23	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
24	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
25	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
26	263.14	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
27	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
28	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
29	257.66	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73
30	252.18	250.17	257.29	243.05	263.14	235.73

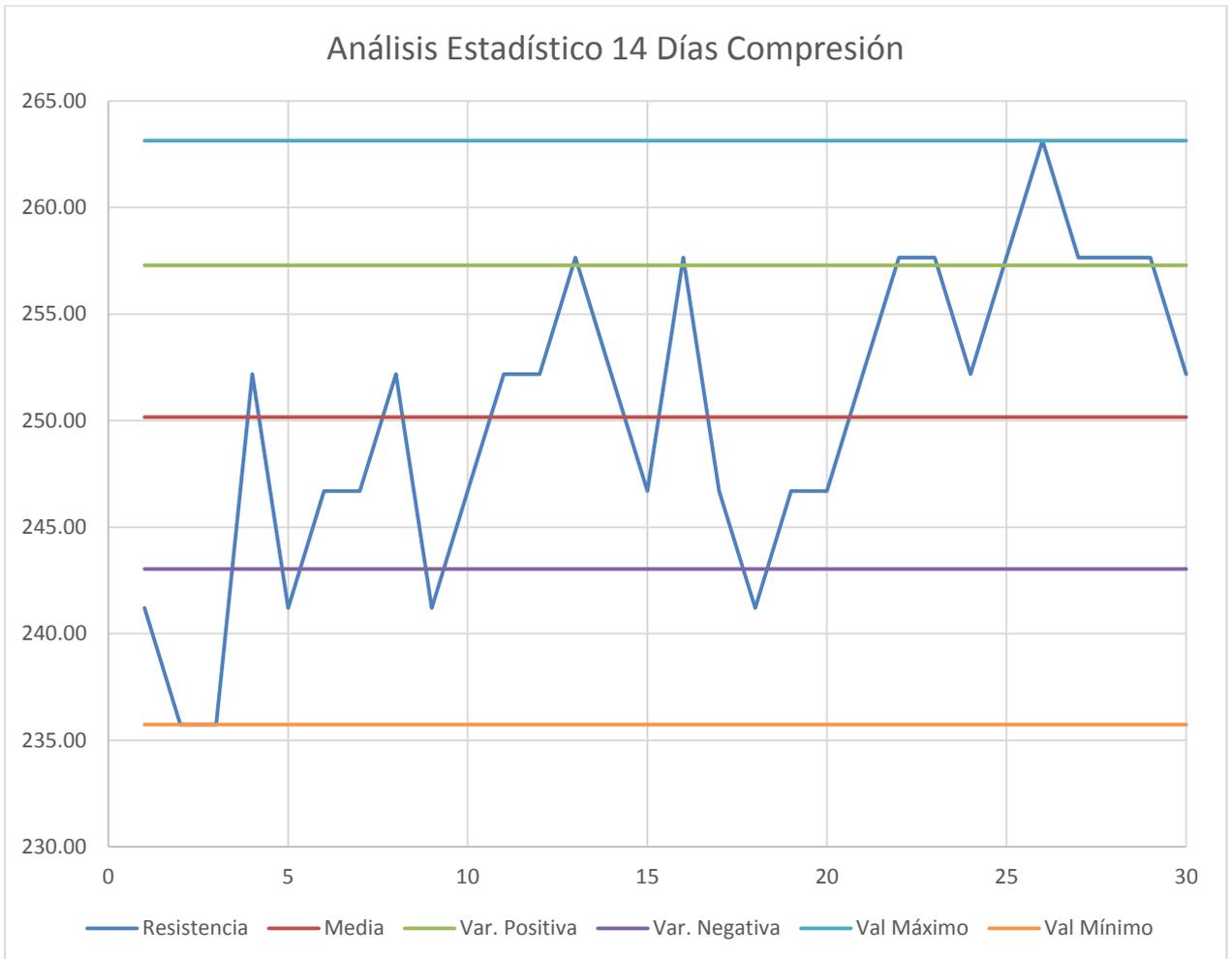


Media	250.17
Mediana	252.18
Moda	252.18
Desviación estándar	7.12
Coef. de variación	2.82%
Varianza de la muestra	50.75
Rango	27.41
Mínimo	235.73
Máximo	263.14
Suma	7505.07
Cuenta	30.00
Nivel de confianza	95%

Con un nivel de confianza del 95%, se puede esperar una resistencia a la compresión a los 7 días entre 259.30 Kg/cm² y 245.06 Kg/cm².

14 DÍAS A LA COMPRESIÓN

Muestra	Resistencia	Media	Var. Posit.	Var. Negat.	Max	Min
1	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
2	290.55	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
3	279.59	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
4	285.07	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
5	285.07	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
6	290.55	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
7	279.59	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
8	290.55	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
9	285.07	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
10	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
11	285.07	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
12	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
13	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
14	290.55	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
15	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
16	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
17	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
18	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
19	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
20	285.07	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
21	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
22	307.00	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
23	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
24	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
25	307.00	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
26	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
27	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
28	296.04	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
29	307.00	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59
30	301.52	294.76	302.60	286.91	307.00	279.59

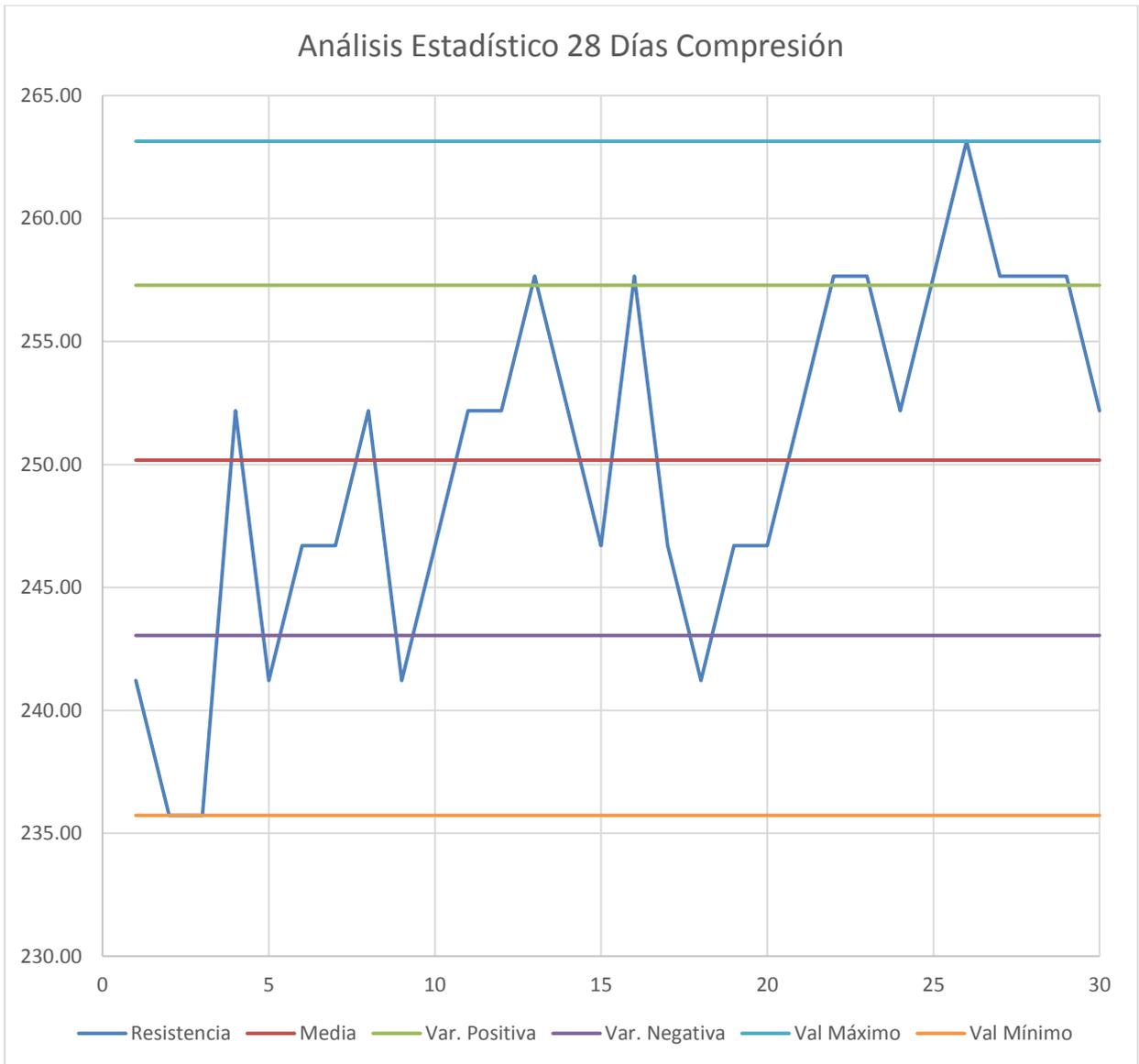


Media	294.757232
Mediana	296.036402
Moda	296.036402
Desviación estándar	7.84374904
Coef. de variación	2.66%
Varianza de la muestra	61.524399
Rango	27.4107779
Mínimo	279.589935
Máximo	307.000713
Suma	8842.71696
Cuenta	30
Nivel de confianza(95.0%)	2.92890403

Con un nivel de confianza del 95%, se puede esperar una resistencia a la compresión a los 14 días entre 302.60 Kg/cm² y 286.92 Kg/cm².

28 DÍAS A LA COMPRESIÓN

Muestra	Resistencia	Media	Var. Posit.	Var. Negat.	Max	Min
1	383.75	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
2	372.79	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
3	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
4	367.30	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
5	383.75	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
6	383.75	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
7	389.23	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
8	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
9	372.79	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
10	383.75	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
11	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
12	389.23	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
13	372.79	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
14	394.72	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
15	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
16	361.82	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
17	394.72	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
18	389.23	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
19	372.79	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
20	394.72	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
21	389.23	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
22	372.79	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
23	389.23	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
24	383.75	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
25	394.72	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
26	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
27	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
28	400.20	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
29	378.27	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82
30	394.72	382.65	392.03	373.28	400.20	361.82

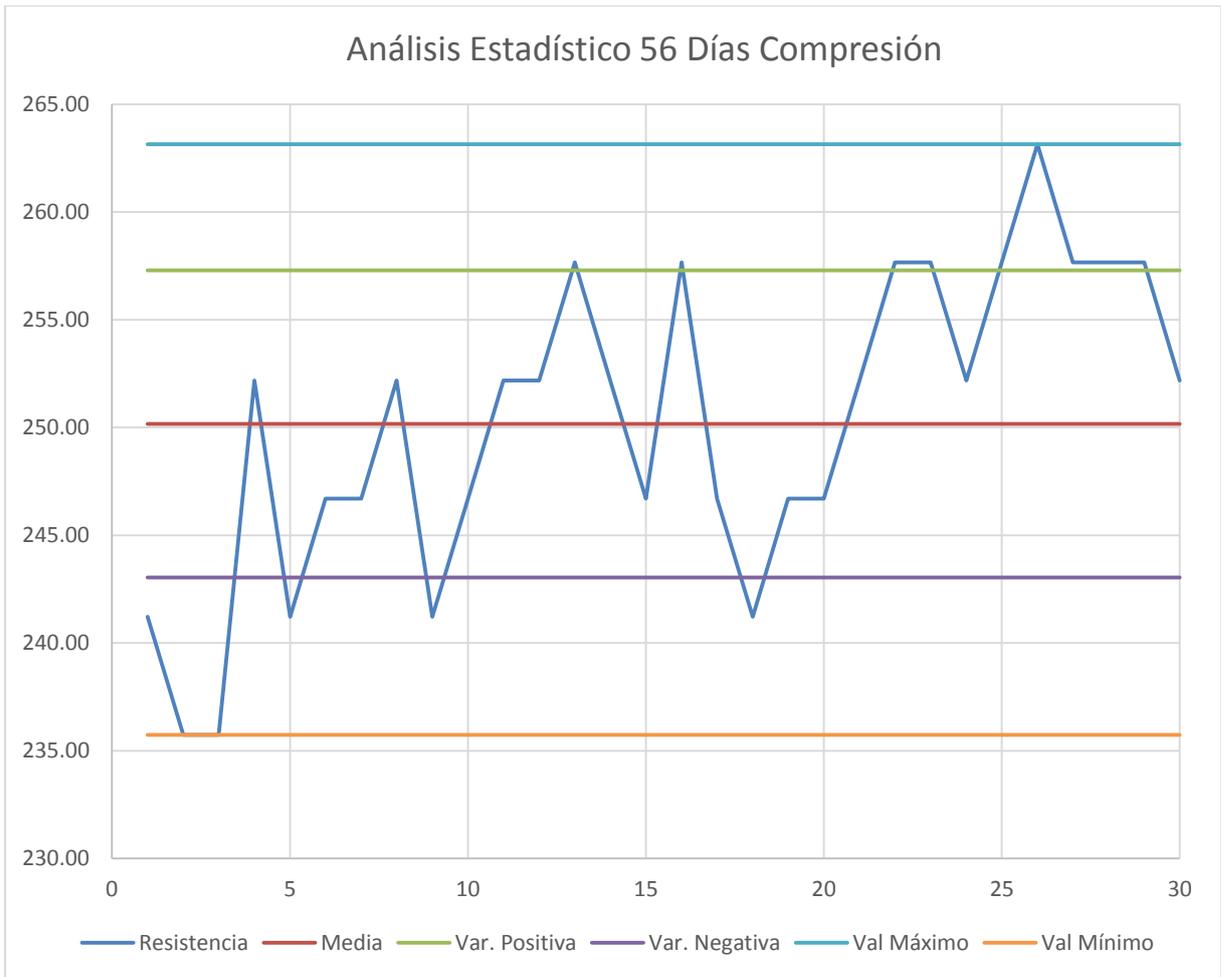


Media	382.65446
Mediana	383.750891
Moda	378.268735
Desviación estándar	9.37454685
Coef. de variación	2.45%
Varianza de la muestra	87.8821286
Rango	38.3750891
Mínimo	361.822269
Máximo	400.197358
Suma	11479.6338
Cuenta	30
Nivel de confianza(95.0%)	3.50051332

Con un nivel de confianza del 95%, se puede esperar una resistencia a la compresión a los 14 días entre 392.02 Kg/cm² y 373.28 Kg/cm².

56 DÍAS A LA COMPRESIÓN

Muestra	Resistencia	Media	Var. Posit.	Var. Negat.	Max	Min
1	416.64	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
2	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
3	438.57	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
4	427.61	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
5	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
6	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
7	416.64	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
8	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
9	427.61	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
10	433.09	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
11	438.57	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
12	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
13	427.61	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
14	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
15	433.09	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
16	427.61	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
17	427.61	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
18	433.09	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
19	433.09	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
20	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
21	433.09	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
22	438.57	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
23	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
24	438.57	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
25	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
26	438.57	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
27	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
28	422.13	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
29	433.09	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64
30	438.57	428.16	435.26	421.05	438.57	416.64

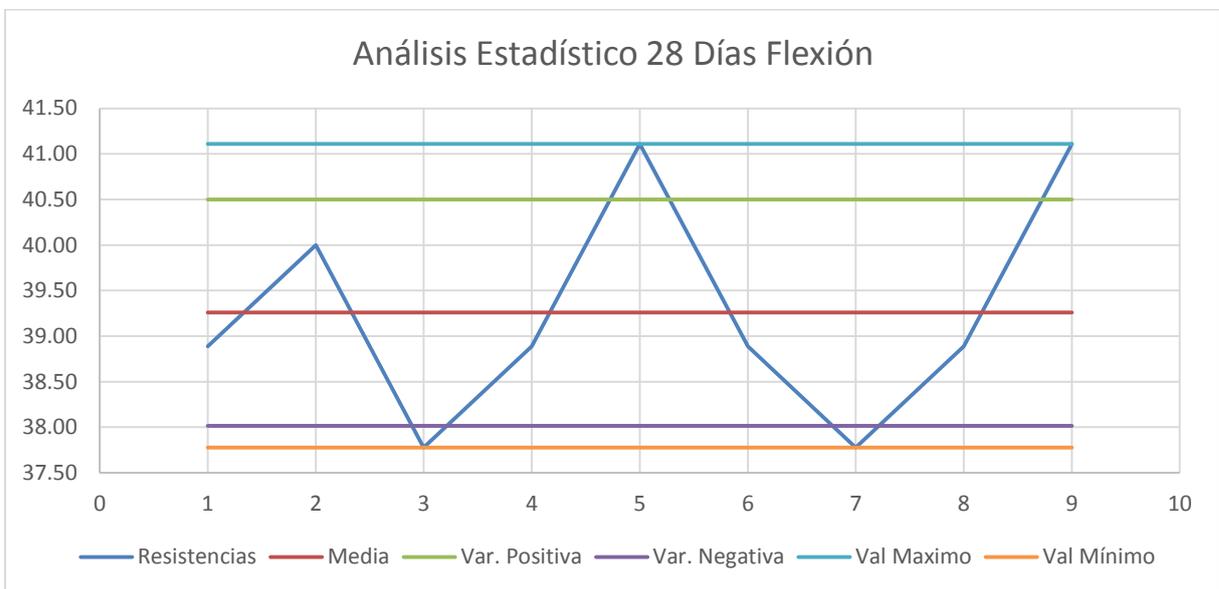


Media	428.156351
Mediana	427.608136
Moda	422.12598
Desviación estándar	7.10422714
Coef. de variación	1.66
Varianza de la muestra	50.4700432
Rango	21.9286223
Mínimo	416.643824
Máximo	438.572447
Suma	12844.6905
Cuenta	30
Nivel de confianza(95.0%)	2.65276201

Con un nivel de confianza del 95%, se puede esperar una resistencia a la compresión a los 14 días entre 435.26 Kg/cm² y 421.06 Kg/cm².

4.4.2 Análisis Estadístico a la Flexión

Muestra	Resistencia	Media	Var. Posit.	Var. Negat.	Max	Min
1	38.89	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
2	40.00	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
3	37.78	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
4	38.89	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
5	41.11	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
6	38.89	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
7	37.78	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
8	38.89	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78
9	41.11	39.26	40.50	38.02	41.11	37.78



Media	39.2592593
Mediana	38.8888889
Moda	38.8888889
Desviación estándar	1.24225999
Varianza de la muestra	1.54320988
Rango	3.33333333
Mínimo	37.7777778
Máximo	41.1111111
Suma	353.333333
Cuenta	9
Nivel de confianza(95.0%)	0.95488556

Con un nivel de confianza del 95%, se puede esperar una resistencia a la flexión a los 28 días entre 40.5 Kg/cm² y 38.02 Kg/cm².

4.5 Equivalencia entre los rodillos en campo y la compactación en laboratorio

De acuerdo con los cálculos realizados para diferentes tipos de rodillo, se compara con los valores más cercanos a la energía de compactación en laboratorio, lo cual se muestra en el siguiente cuadro.

RODILLO	VELOCIDAD (Km/h)	N° PASADAS	ESPESOR DE CAPA (cm.)	Energía de compactación (N-m/m ³)	Energía de compactación en laboratorio	Porcentaje de variación (%)
CAT CB44B	6 Km/h	10	0.25 cm	673,776.71	600,000.00	12.30%
CAT CB53D XW	6 Km/h	6	0.25 cm	651,319.49	600,000.00	8.55%
CAT CB54B	6 Km/h	6	0.25 cm	788,729.05	600,000.00	31.45%
CAT CP54B	8 Km/h	6	0.25 cm	609,668.88	600,000.00	1.61%
CAT CP54B	6 Km/h	8	0.25 cm	607,158.69	600,000.00	1.19%
CAT CP54B	4 Km/h	10	0.25 cm	679,440.53	600,000.00	13.24%
CAT CP56B	4 Km/h	8	0.25 cm	649,308.00	600,000.00	8.22%
CAT CP68B	4 Km/h	6	0.25 cm	613,057.52	600,000.00	2.18%
CAT CP74B	6 Km/h	6	0.25 cm	657,539.00	600,000.00	9.59%
CAT CS423E	8 Km/h	8	0.25 cm	624,752.16	600,000.00	4.13%
CAT CS44	2 Km/h	8	0.25 cm	606,237.29	600,000.00	1.04%
CAT CS533E	8 Km/h	6	0.25 cm	622,224.26	600,000.00	3.70%
CAT CS533E XT	8 Km/h	6	0.25 cm	709,473.42	600,000.00	18.25%
CAT CS54B	6 Km/h	10	0.25 cm	719,416.25	600,000.00	19.90%
CAT CS56B	8 Km/h	6	0.25 cm	605,018.30	600,000.00	0.84%
CAT CS68B	6 Km/h	6	0.25 cm	634,874.90	600,000.00	5.81%
CAT CS74B	6 Km/h	6	0.25 cm	643,266.53	600,000.00	7.21%
CAT CS78B	4 Km/h	6	0.25 cm	665,240.95	600,000.00	10.87%
CAT CS79B	6 Km/h	6	0.25 cm	812,928.07	600,001.00	35.49%

4.6 Discusión de los resultados

1. La trabajabilidad en el concreto rodillado se ve muy reducida debido al bajo contenido de agua, lo que evidentemente proporciona una mezcla seca.
2. La consistencia, de igual forma que la trabajabilidad es seca, para el uso de este concreto rodillado se considera y se establece un asentamiento de 0" para de esta manera este concreto pueda ser rodillado.
3. La exudación del concreto rodillado se encuentra entre los límites normales, en promedio para la presente investigación se calculó en promedio el 0.93%, valor que se mantiene parecido al de un concreto normal.
4. El peso unitario del concreto rodillado si aumentó considerablemente con respecto de un concreto normal (3.40%); esto debido a que la compactación dada al concreto permite un mejor acomodo en las partículas del concreto, por lo tanto este llegó a un valor promedio de 2384.70 Kg/m³. Se puede apreciar además que el número de capas no influye considerablemente en el peso unitario, pues se encontraron valores similares en las 3 capas.
5. El concreto rodillado alcanza el 100.07% de resistencia de diseño a los 7 días, esto da una idea de su alta resistencia inicial, pues normalmente se puede llegar al 70% de la resistencia de diseño. Para la presente investigación se utilizó los mismo materiales y proporciones con compactación normal y se obtuvo el 73.26%.
6. El concreto rodillado alcanza el 117.90% de resistencia de diseño a los 14 días. Para la presente investigación se utilizó los mismo materiales y proporciones con compactación normal y se obtuvo el 86.12% de la resistencia de diseño.
7. El concreto rodillado alcanza el 153.06 % de resistencia de diseño a los 28 días. Para la presente investigación se utilizó los mismo materiales y proporciones con compactación normal y se obtuvo el 105.28% de la resistencia de diseño.
8. El concreto rodillado alcanza el 171.26 % de resistencia de diseño a los 56 días. Para la presente investigación se utilizó los mismo materiales y proporciones con compactación normal y se obtuvo el 108.66% de la resistencia de diseño.

9. La resistencia a la compresión del concreto rodillado varía en un porcentaje de acuerdo al número de capas de compactación, a pesar que la variación no es considerable, se puede evidenciar que a mayor número de capas, mejor acomodo de las partículas y por ende mayor resistencia a la compresión.

10. La resistencia a la flexión del concreto rodillado a los 28 días llega a ser 39.26 Kg/cm² mientras que la de un concreto normal con los mismos materiales y misma dosificación alcanza a ser 40.30 Kg/cm² lo que da la conclusión que el concreto rodillado no brinda aporte a la flexión; del mismo modo no influye en el número de capas, pues los resultados no tienen considerable variación; sin embargo no se debe descartar otro método de compactación distinto al de impacto que podría generar mayor resistencia a este esfuerzo.

11. Respecto a la energía de compactación con rodillos, el que más se adecua es el CAT CS56B a una velocidad de 8Km/h, con una capa de 25 centímetros y con 6 pasadas; adicionalmente se debe evaluar para cada condición de obra el rodillo que más se adecue.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La resistencia a la compresión del concreto rodillado a los 28 días alcanza el 153.60% de resistencia respecto a la de diseño (250Kg/cm²), es decir 382.65 Kg/cm².
- La resistencia a la flexión del concreto rodillado no se ve afectada por la compactación.
- En función del tiempo, la resistencia a la compresión continúa en aumento, logrando a los 56 días una resistencia del 171.26% de la resistencia de diseño (250kg/cm²), es decir 428.16 Kg/cm².
- En función de las propiedades del concreto rodillado, la trabajabilidad baja considerablemente, la consistencia logra tener un asentamiento de 0", la exudación se mantiene similar a la de un concreto normal y el peso unitario aumenta un 3.40% respecto a uno normal.
- No se alcanzó el valor esperado según la hipótesis de la investigación en la que se esperaba llegar al 200% de la resistencia de diseño, es decir 500Kg/cm². Sin embargo resulta muy conveniente el uso de este concreto para solicitaciones de la localidad como pavimentaciones y losas, pues se evidencia una performance mejorada y con prospectos de ser duradera.
- La energía de compactación con la que se realizó los ensayos en esta investigación (600KN-m/m³) llega a ser representativa a los rodillos usualmente utilizados con una velocidad, espesor y número de pasadas adecuado.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda continuar con la ejecución de investigaciones de este tipo de concretos masivos, pues es una necesidad para la localidad de Cajamarca tener alternativas para mejorar la calidad de los pavimentos y losas que con el paso del tiempo se ven deterioradas por la baja calidad del concreto.
- Se debería considerar la adición de aditivos al concreto rodillado para disminuir el calor de hidratación, la reducción de agua y otros que afecten el comportamiento del material.
- Se recomienda continuar con una investigación que contemple el uso de la maquinaria sobre el concreto in situ, y de este modo identificar las consideraciones necesarias para el uso de este concreto en la comunidad local.
- Se recomienda utilizar formas alternativas de compactación, curado, medición del revenimiento a fin de tener más conocimiento del concreto rodillado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) Flabio Abanto Castillo (1996). Tecnología del concreto. Editorial San Marcos. Lima – Perú.
- 2) Adam Neville. (1999). Tecnología avanzada del concreto y nuevos materiales. Editorial IMCYC. México – México.
- 3) Diego Sánchez de Guzmán (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Editorial Bhandar. Bogotá - Colombia
- 4) Colegio de Ingenieros del Perú (1993). Tópicos de tecnología del concreto en el Perú. Editorial Carbajal, E.P. Lima – Perú.
- 5) Escalaya Advíncula, Miriam Rosanna (2006). Diseño de mezclas de concreto compactado con rodillo utilizando conceptos de compactación de suelos. Tesis para obtener grado de Maestro en Ciencias. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú.
- 6) José Lázaro Lezama Leiva (1996). Tecnología del concreto. Cajamarca – Perú.
- 7) Hansen, K.D. y Reinhardt, W.G. (1991), “Roller-Compacted Concrete Dams”, McGraw-Hill, New York.
- 8) American Concrete Institute (2007), “Report on Roller-Compacted Mass Concrete”. ACI 207.5r-11

ANEXOS

1. PANEL FOTOGRÁFICO



Fotografía 1: Agregados de la cantera del Río Chonta en el laboratorio de ensayo de materiales de la UNC



Fotografía2: Inicio de los ensayos de los agregados



Fotografía 3: Ensayo para obtener el peso compactado suelto del agregado grueso.



Fotografía 4: Ensayo para peso específico del agregado grueso.



Fotografía 5: Inicio del diseño de mezcla para un Slum = 0''



Fotografía 6: Medición de Slump del concreto rodillado



Fotografía 7: Medición de la consistencia del concreto



Fotografía 08: Mezclado manual del concreto



Fotografía 09: Compactación manual para realización de probetas patrón (Concreto normal)



Fotografía 10: Desencofrado de probeta patrón (Concreto normal)



Fotografía 11: Curado de las probetas patrón de concreto (Concreto normal)



Fotografía 12: Inicio de las probetas de concreto rodillado, utilizando la energía de compactación de rodillado.



Fotografía 13: Compactación con dispositivo compactador según número de golpes y altura especificada



Fotografía 14: Ruptura de las probetas patrón de concreto



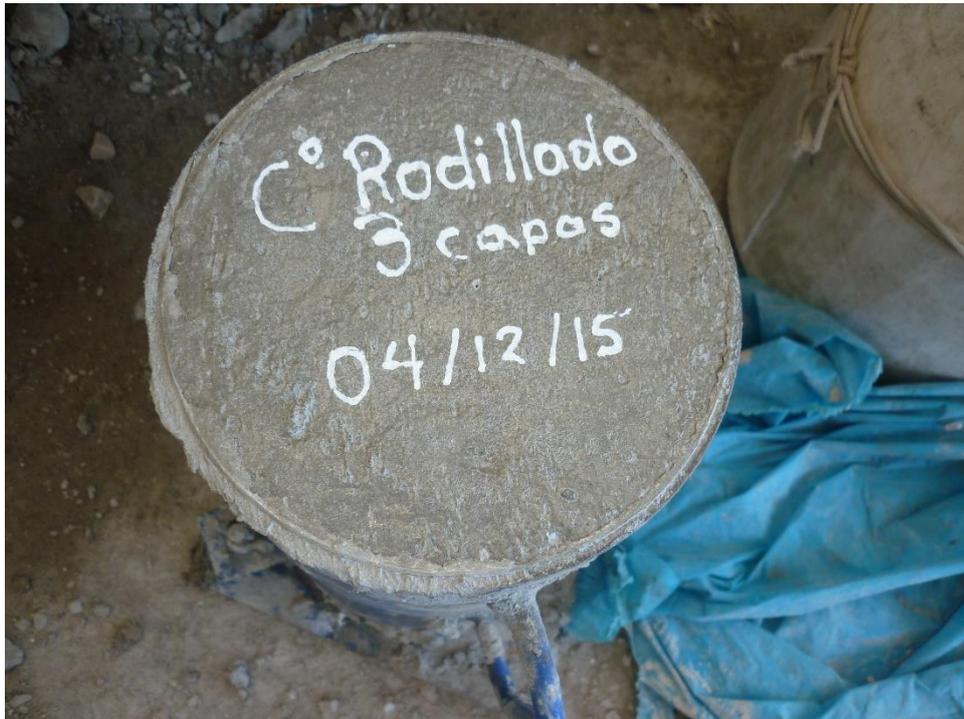
Fotografía 15: Preparación de probetas prismáticas para pruebas a flexión



Fotografía 16: Enrasado de las probetas prismáticas para pruebas a flexión.



Fotografía 17: Inicio de desencofrado de probetas de concreto rodillado



Fotografía 18: Desencofrado y clasificación de probetas de concreto rodillado



Fotografía 19: Compactación de probetas para el concreto rodillado



Fotografía 20: Compactación de concreto en las últimas capas



Fotografía 21: Enrazado de las probetas de las concreto rodillado



Fotografía 22: Enrazado de la última capa del concreto rodillado



Fotografía 23: Dispositivo de compactación graduado



Fotografía 24: Curado de las probetas de concreto rodillado



Fotografía 25: Preparación de las probetas para iniciar la ruptura



Fotografía 26: Inicio de la ruptura de las probetas de concreto



Fotografía 27: Ruptura de las probetas a compresión



Fotografía 28: Falla en la probeta



Fotografía 29: Falla en la probeta al momento de la ruptura



Fotografía 30: Falla en la probeta en la ruptura



Fotografía 31: Preparación de probetas para ruptura



Fotografía 32: Preparación de probetas para ruptura



Fotografía 33: Preparación de probetas para ruptura



Fotografía 34: Consistencia del Concreto Rodillado con supervisión del Ingeniero José Lezama



Fotografía 35: Control de deformaciones con deformímetro



Fotografía 36: Control de deformaciones y resistencia



Fotografía 37: Compactación con la supervisión del Ingeniero José Lezama



Fotografía 38: Cálculo in situ de resistencia del concreto



Fotografía 39: Fractura de una probeta de concreto rodillado



Fotografía 40: Asesoramiento del Ingeniero Héctor Pérez

CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN DE LOS DIFERENTES RODILLOS

RODILLO COMPACTADOR CAT CB44B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
8300	1.5	8	163,950.62	327,901.23	20,310.48	75,389.04	0.25	6	587,551.37
8300	1.5	6	92,222.22	184,444.44	27,080.64	100,518.72	0.25	6	404,266.03
8300	1.5	4	40,987.65	81,975.31	40,620.96	150,778.08	0.25	6	314,362.00
8300	1.5	2	10,246.91	20,493.83	81,241.92	301,556.17	0.25	6	413,538.82
8300	1.5	8	218,600.82	437,201.65	27,080.64	100,518.72	0.25	8	783,401.83
8300	1.5	6	122,962.96	245,925.93	36,107.52	134,024.96	0.25	8	539,021.37
8300	1.5	4	54,650.21	109,300.41	54,161.28	201,037.44	0.25	8	419,149.34
8300	1.5	2	13,662.55	27,325.10	108,322.55	402,074.89	0.25	8	551,385.10
8300	1.5	8	273,251.03	546,502.06	33,850.80	125,648.40	0.25	10	979,252.29
8300	1.5	6	153,703.70	307,407.41	45,134.40	167,531.20	0.25	10	673,776.71
8300	1.5	4	68,312.76	136,625.51	67,701.60	251,296.80	0.25	10	523,936.67
8300	1.5	2	17,078.19	34,156.38	135,403.19	502,593.61	0.25	10	689,231.37

Tabla 3.4 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes número de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CB53D XW

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
11740	2	8	173,925.93	347,851.85	33,855.80	234,508.82	0.25	6	790,142.39
11740	2	6	97,833.33	195,666.67	45,141.06	312,678.43	0.25	6	651,319.49
11740	2	4	43,481.48	86,962.96	67,711.59	469,017.64	0.25	6	667,173.68
11740	2	2	10,870.37	21,740.74	135,423.18	938,035.28	0.25	6	1,106,069.57
11740	2	8	231,901.23	463,802.47	45,141.06	312,678.43	0.25	8	1,053,523.19
11740	2	6	130,444.44	260,888.89	60,188.08	416,904.57	0.25	8	868,425.98
11740	2	4	57,975.31	115,950.62	90,282.12	625,356.85	0.25	8	889,564.90
11740	2	2	14,493.83	28,987.65	180,564.24	1,250,713.71	0.25	8	1,474,759.43
11740	2	8	289,876.54	579,753.09	56,426.33	390,848.03	0.25	10	1,316,903.99
11740	2	6	163,055.56	326,111.11	75,235.10	521,130.71	0.25	10	1,085,532.48
11740	2	4	72,469.14	144,938.27	112,852.65	781,696.07	0.25	10	1,111,956.13
11740	2	2	18,117.28	36,234.57	225,705.30	1,563,392.13	0.25	10	1,843,449.29

Tabla 3.5 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CB54B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m ³ (N-m/m ³)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
9550	1.7	8	166,448.80	332,897.60	39,935.29	340,949.74	0.25	6	880,231.43
9550	1.7	6	93,627.45	187,254.90	53,247.05	454,599.65	0.25	6	788,729.05
9550	1.7	4	41,612.20	83,224.40	79,870.57	681,899.47	0.25	6	886,606.64
9550	1.7	2	10,403.05	20,806.10	159,741.14	1,363,798.94	0.25	6	1,554,749.23
9550	1.7	8	221,931.74	443,863.47	53,247.05	454,599.65	0.25	8	1,173,641.90
9550	1.7	6	124,836.60	249,673.20	70,996.06	606,132.86	0.25	8	1,051,638.73
9550	1.7	4	55,482.93	110,965.87	106,494.09	909,199.30	0.25	8	1,182,142.19
9550	1.7	2	13,870.73	27,741.47	212,988.19	1,818,398.59	0.25	8	2,072,998.98
9550	1.7	8	277,414.67	554,829.34	66,558.81	568,249.56	0.25	10	1,467,052.38
9550	1.7	6	156,045.75	312,091.50	88,745.08	757,666.08	0.25	10	1,314,548.41
9550	1.7	4	69,353.67	138,707.33	133,117.62	1,136,499.12	0.25	10	1,477,677.74
9550	1.7	2	17,338.42	34,676.83	266,235.23	2,272,998.24	0.25	10	2,591,248.72

Tabla 3.6 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CP54B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m ³ (N-m/m ³)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
11135	2.134	8	154,604.46	309,208.93	32,036.27	113,819.21	0.25	6	609,668.88
11135	2.134	6	86,965.01	173,930.02	42,715.03	151,758.95	0.25	6	455,369.01
11135	2.134	4	38,651.12	77,302.23	64,072.55	227,638.42	0.25	6	407,664.32
11135	2.134	2	9,662.78	19,325.56	128,145.10	455,276.85	0.25	6	612,410.28
11135	2.134	8	206,139.29	412,278.57	42,715.03	151,758.95	0.25	8	812,891.84
11135	2.134	6	115,953.35	231,906.70	56,953.38	202,345.27	0.25	8	607,158.69
11135	2.134	4	51,534.82	103,069.64	85,430.07	303,517.90	0.25	8	543,552.43
11135	2.134	2	12,883.71	25,767.41	170,860.13	607,035.80	0.25	8	816,547.04
11135	2.134	8	257,674.11	515,348.21	53,393.79	189,698.69	0.25	10	1,016,114.80
11135	2.134	6	144,941.68	289,883.37	71,191.72	252,931.58	0.25	10	758,948.36
11135	2.134	4	64,418.53	128,837.05	106,787.58	379,397.37	0.25	10	679,440.53
11135	2.134	2	16,104.63	32,209.26	213,575.16	758,794.74	0.25	10	1,020,683.80

Tabla 3.7 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CP56B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m ³ (N-m/m ³)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
11665	2.134	8	161,963.28	323,926.55	37,093.88	145,660.39	0.25	6	668,644.10
11665	2.134	6	91,104.34	182,208.68	49,458.50	194,213.86	0.25	6	516,985.39
11665	2.134	4	40,490.82	80,981.64	74,187.75	291,320.79	0.25	6	486,981.00
11665	2.134	2	10,122.70	20,245.41	148,375.51	582,641.58	0.25	6	761,385.20
11665	2.134	8	215,951.03	431,902.07	49,458.50	194,213.86	0.25	8	891,525.46
11665	2.134	6	121,472.46	242,944.91	65,944.67	258,951.81	0.25	8	689,313.85
11665	2.134	4	53,987.76	107,975.52	98,917.00	388,427.72	0.25	8	649,308.00
11665	2.134	2	13,496.94	26,993.88	197,834.01	776,855.44	0.25	8	1,015,180.27
11665	2.134	8	269,938.79	539,877.58	61,823.13	242,767.32	0.25	10	1,114,406.83
11665	2.134	6	151,840.57	303,681.14	82,430.84	323,689.77	0.25	10	861,642.32
11665	2.134	4	67,484.70	134,969.40	123,646.26	485,534.65	0.25	10	811,635.00
11665	2.134	2	16,871.17	33,742.35	247,292.51	971,069.30	0.25	10	1,268,975.33

Tabla 3.8 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas

RODILLO COMPACTADOR CAT CP68B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m ³ (N-m/m ³)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
14685	2.134	8	203,894.62	407,789.23	46,697.26	183,371.02	0.25	6	841,752.13
14685	2.134	6	114,690.72	229,381.44	62,263.02	244,494.69	0.25	6	650,829.87
14685	2.134	4	50,973.65	101,947.31	93,394.53	366,742.03	0.25	6	613,057.52
14685	2.134	2	12,743.41	25,486.83	186,789.05	733,484.06	0.25	6	958,503.36
14685	2.134	8	271,859.49	543,718.98	62,263.02	244,494.69	0.25	8	1,122,336.17
14685	2.134	6	152,920.96	305,841.92	83,017.36	325,992.92	0.25	8	867,773.16
14685	2.134	4	67,964.87	135,929.74	124,526.04	488,989.38	0.25	8	817,410.03
14685	2.134	2	16,991.22	33,982.44	249,052.07	977,978.75	0.25	8	1,278,004.48
14685	2.134	8	339,824.36	679,648.72	77,828.77	305,618.36	0.25	10	1,402,920.21
14685	2.134	6	191,151.20	382,302.41	103,771.70	407,491.15	0.25	10	1,084,716.45
14685	2.134	4	84,956.09	169,912.18	155,657.55	611,236.72	0.25	10	1,021,762.53
14685	2.134	2	21,239.02	42,478.05	311,315.09	1,222,473.44	0.25	10	1,597,505.60

Tabla 3.9 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas

RODILLO COMPACTADOR CAT CP74B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m ³ (N-m/m ³)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
16355	2.134	8	227,081.81	454,163.63	47,744.82	158,009.01	0.25	6	886,999.27
16355	2.134	6	127,733.52	255,467.04	63,659.75	210,678.69	0.25	6	657,539.00
16355	2.134	4	56,770.45	113,540.91	95,489.63	316,018.03	0.25	6	581,819.02
16355	2.134	2	14,192.61	28,385.23	190,979.26	632,036.06	0.25	6	865,593.16
16355	2.134	8	302,775.75	605,551.51	63,659.75	210,678.69	0.25	8	1,182,665.70
16355	2.134	6	170,311.36	340,622.72	84,879.67	280,904.91	0.25	8	876,718.67
16355	2.134	4	75,693.94	151,387.88	127,319.51	421,357.37	0.25	8	775,758.70
16355	2.134	2	18,923.48	37,846.97	254,639.02	842,714.74	0.25	8	1,154,124.21
16355	2.134	8	378,469.69	756,939.38	79,574.69	263,348.36	0.25	10	1,478,332.12
16355	2.134	6	212,889.20	425,778.40	106,099.59	351,131.14	0.25	10	1,095,898.34
16355	2.134	4	94,617.42	189,234.85	159,149.39	526,696.71	0.25	10	969,698.37
16355	2.134	2	23,654.36	47,308.71	318,298.77	1,053,393.43	0.25	10	1,442,655.27

Tabla 3.10 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS423E

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m ³ (N-m/m ³)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
6900	1.676	8	121,983.56	243,967.12	23,236.73	79,376.71	0.25	6	468,564.12
6900	1.676	6	68,615.75	137,231.50	30,982.31	105,835.62	0.25	6	342,665.18
6900	1.676	4	30,495.89	60,991.78	46,473.46	158,753.43	0.25	6	296,714.55
6900	1.676	2	7,623.97	15,247.94	92,946.92	317,506.86	0.25	6	433,325.69
6900	1.676	8	162,644.74	325,289.49	30,982.31	105,835.62	0.25	8	624,752.16
6900	1.676	6	91,487.67	182,975.34	41,309.74	141,114.16	0.25	8	456,886.91
6900	1.676	4	40,661.19	81,322.37	61,964.61	211,671.24	0.25	8	395,619.41
6900	1.676	2	10,165.30	20,330.59	123,929.22	423,342.47	0.25	8	577,767.58
6900	1.676	8	203,305.93	406,611.86	38,727.88	132,294.52	0.25	10	780,940.20
6900	1.676	6	114,359.59	228,719.17	51,637.18	176,392.70	0.25	10	571,108.63
6900	1.676	4	50,826.48	101,652.97	77,455.76	264,589.05	0.25	10	494,524.26
6900	1.676	2	12,706.62	25,413.24	154,911.53	529,178.09	0.25	10	722,209.48

Tabla 3.11 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS44

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
7240	1.676	8	127,994.34	255,988.69	24,381.73	83,288.03	0.25	6	491,652.79
7240	1.676	6	71,996.82	143,993.64	32,508.97	111,050.71	0.25	6	359,550.13
7240	1.676	4	31,998.59	63,997.17	48,763.45	166,576.06	0.25	6	311,335.27
7240	1.676	2	7,999.65	15,999.29	97,526.91	333,152.12	0.25	6	454,677.97
7240	1.676	8	170,659.12	341,318.25	32,508.97	111,050.71	0.25	8	655,537.05
7240	1.676	6	95,995.76	191,991.51	43,345.29	148,067.61	0.25	8	479,400.17
7240	1.676	4	42,664.78	85,329.56	65,017.94	222,101.41	0.25	8	415,113.70
7240	1.676	2	10,666.20	21,332.39	130,035.88	444,202.83	0.25	8	606,237.29
7240	1.676	8	213,323.90	426,647.81	40,636.21	138,813.38	0.25	10	819,421.31
7240	1.676	6	119,994.70	239,989.39	54,181.62	185,084.51	0.25	10	599,250.22
7240	1.676	4	53,330.98	106,661.95	81,272.42	277,626.77	0.25	10	518,892.12
7240	1.676	2	13,332.74	26,665.49	162,544.85	555,253.53	0.25	10	757,796.61

Tabla 3.12 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS533E

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
10840	2.134	8	150,508.52	301,017.04	32,936.62	137,762.08	0.25	6	622,224.26
10840	2.134	6	84,661.04	169,322.09	43,915.50	183,682.77	0.25	6	481,581.39
10840	2.134	4	37,627.13	75,254.26	65,873.24	275,524.15	0.25	6	454,278.78
10840	2.134	2	9,406.78	18,813.57	131,746.49	551,048.30	0.25	6	711,015.13
10840	2.134	8	200,678.03	401,356.06	43,915.50	183,682.77	0.25	8	829,632.35
10840	2.134	6	112,881.39	225,762.78	58,553.99	244,910.36	0.25	8	642,108.52
10840	2.134	4	50,169.51	100,339.01	87,830.99	367,365.53	0.25	8	605,705.05
10840	2.134	2	12,542.38	25,084.75	175,661.98	734,731.07	0.25	8	948,020.18
10840	2.134	8	250,847.54	501,695.07	54,894.37	229,603.46	0.25	10	1,037,040.44
10840	2.134	6	141,101.74	282,203.48	73,192.49	306,137.94	0.25	10	802,635.65
10840	2.134	4	62,711.88	125,423.77	109,788.74	459,206.92	0.25	10	757,131.31
10840	2.134	2	15,677.97	31,355.94	219,577.48	918,413.83	0.25	10	1,185,025.22

Tabla 3.13 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS533E XT

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
12360	2.134	8	171,613.04	343,226.08	37,555.04	157,079.27	0.25	6	709,473.42
12360	2.134	6	96,532.33	193,064.67	50,073.39	209,439.02	0.25	6	549,109.41
12360	2.134	4	42,903.26	85,806.52	75,110.08	314,158.53	0.25	6	517,978.39
12360	2.134	2	10,725.81	21,451.63	150,220.16	628,317.07	0.25	6	810,714.67
12360	2.134	8	228,817.38	457,634.77	50,073.39	209,439.02	0.25	8	945,964.56
12360	2.134	6	128,709.78	257,419.56	66,764.52	279,252.03	0.25	8	732,145.88
12360	2.134	4	57,204.35	114,408.69	100,146.78	418,878.04	0.25	8	690,637.86
12360	2.134	2	14,301.09	28,602.17	200,293.55	837,756.09	0.25	8	1,080,952.90
12360	2.134	8	286,021.73	572,043.46	62,591.74	261,798.78	0.25	10	1,182,455.70
12360	2.134	6	160,887.22	321,774.45	83,455.65	349,065.04	0.25	10	915,182.35
12360	2.134	4	71,505.43	143,010.86	125,183.47	523,597.55	0.25	10	863,297.32
12360	2.134	2	17,876.36	35,752.72	250,366.94	1,047,195.11	0.25	10	1,351,191.12

Tabla 3.14 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS54B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
10555	2.134	8	146,551.42	293,102.85	30,367.57	107,890.60	0.25	6	577,912.44
10555	2.134	6	82,435.18	164,870.35	40,490.09	143,854.13	0.25	6	431,649.75
10555	2.134	4	36,637.86	73,275.71	60,735.14	215,781.19	0.25	6	386,429.90
10555	2.134	2	9,159.46	18,318.93	121,470.28	431,562.38	0.25	6	580,511.05
10555	2.134	8	195,401.90	390,803.80	40,490.09	143,854.13	0.25	8	770,549.92
10555	2.134	6	109,913.57	219,827.14	53,986.79	191,805.50	0.25	8	575,533.00
10555	2.134	4	48,850.47	97,700.95	80,980.18	287,708.25	0.25	8	515,239.86
10555	2.134	2	12,212.62	24,425.24	161,960.37	575,416.51	0.25	8	774,014.73
10555	2.134	8	244,252.37	488,504.75	50,612.61	179,817.66	0.25	10	963,187.40
10555	2.134	6	137,391.96	274,783.92	67,483.49	239,756.88	0.25	10	719,416.25
10555	2.134	4	61,063.09	122,126.19	101,225.23	359,635.32	0.25	10	644,049.83
10555	2.134	2	15,265.77	30,531.55	202,450.46	719,270.64	0.25	10	967,518.42

Tabla 3.15 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS56B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
10555	2.134	8	146,551.42	293,102.85	33,564.16	131,799.87	0.25	6	605,018.30
10555	2.134	6	82,435.18	164,870.35	44,752.21	175,733.16	0.25	6	467,790.89
10555	2.134	4	36,637.86	73,275.71	67,128.31	263,599.74	0.25	6	440,641.62
10555	2.134	2	9,159.46	18,318.93	134,256.62	527,199.47	0.25	6	688,934.49
10555	2.134	8	195,401.90	390,803.80	44,752.21	175,733.16	0.25	8	806,691.06
10555	2.134	6	109,913.57	219,827.14	59,669.61	234,310.88	0.25	8	623,721.19
10555	2.134	4	48,850.47	97,700.95	89,504.41	351,466.32	0.25	8	587,522.15
10555	2.134	2	12,212.62	24,425.24	179,008.83	702,932.63	0.25	8	918,579.32
10555	2.134	8	244,252.37	488,504.75	55,940.26	219,666.45	0.25	10	1,008,363.83
10555	2.134	6	137,391.96	274,783.92	74,587.01	292,888.60	0.25	10	779,651.49
10555	2.134	4	61,063.09	122,126.19	111,880.52	439,332.90	0.25	10	734,402.69
10555	2.134	2	15,265.77	30,531.55	223,761.03	878,665.79	0.25	10	1,148,224.15

Tabla 3.16 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS68B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
14325	2.134	8	198,896.18	397,792.36	45,552.49	178,875.71	0.25	6	821,116.73
14325	2.134	6	111,879.10	223,758.20	60,736.65	238,500.95	0.25	6	634,874.90
14325	2.134	4	49,724.04	99,448.09	91,104.98	357,751.42	0.25	6	598,028.53
14325	2.134	2	12,431.01	24,862.02	182,209.96	715,502.84	0.25	6	935,005.83
14325	2.134	8	265,194.90	530,389.81	60,736.65	238,500.95	0.25	8	1,094,822.31
14325	2.134	6	149,172.13	298,344.27	80,982.20	318,001.26	0.25	8	846,499.87
14325	2.134	4	66,298.73	132,597.45	121,473.30	477,001.89	0.25	8	797,371.38
14325	2.134	2	16,574.68	33,149.36	242,946.61	954,003.79	0.25	8	1,246,674.44
14325	2.134	8	331,493.63	662,987.26	75,920.82	298,126.18	0.25	10	1,368,527.89
14325	2.134	6	186,465.17	372,930.33	101,227.75	397,501.58	0.25	10	1,058,124.83
14325	2.134	4	82,873.41	165,746.82	151,841.63	596,252.37	0.25	10	996,714.22
14325	2.134	2	20,718.35	41,436.70	303,683.26	1,192,504.73	0.25	10	1,558,343.05

Tabla 3.17 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS74B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
16000	2.134	8	222,152.80	444,305.60	46,708.47	154,579.29	0.25	6	867,746.16
16000	2.134	6	124,960.95	249,921.90	62,277.96	206,105.72	0.25	6	643,266.53
16000	2.134	4	55,538.20	111,076.40	93,416.94	309,158.57	0.25	6	569,190.12
16000	2.134	2	13,884.55	27,769.10	186,833.89	618,317.15	0.25	6	846,804.68
16000	2.134	8	296,203.73	592,407.47	62,277.96	206,105.72	0.25	8	1,156,994.88
16000	2.134	6	166,614.60	333,229.20	83,037.28	274,807.62	0.25	8	857,688.70
16000	2.134	4	74,050.93	148,101.87	124,555.92	412,211.43	0.25	8	758,920.15
16000	2.134	2	18,512.73	37,025.47	249,111.85	824,422.86	0.25	8	1,129,072.91
16000	2.134	8	370,254.67	740,509.33	77,847.45	257,632.14	0.25	10	1,446,243.59
16000	2.134	6	208,268.25	416,536.50	103,796.60	343,509.53	0.25	10	1,072,110.88
16000	2.134	4	92,563.67	185,127.33	155,694.91	515,264.29	0.25	10	948,650.19
16000	2.134	2	23,140.92	46,281.83	311,389.81	1,030,528.58	0.25	10	1,411,341.14

Tabla 3.18 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS78B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
18700	2.134	8	259,641.08	519,282.17	54,590.53	180,664.54	0.25	6	1,014,178.32
18700	2.134	6	146,048.11	292,096.22	72,787.37	240,886.05	0.25	6	751,817.75
18700	2.134	4	64,910.27	129,820.54	109,181.05	361,329.08	0.25	6	665,240.95
18700	2.134	2	16,227.57	32,455.14	218,362.10	722,658.16	0.25	6	989,702.97
18700	2.134	8	346,188.11	692,376.23	72,787.37	240,886.05	0.25	8	1,352,237.76
18700	2.134	6	194,730.81	389,461.63	97,049.82	321,181.41	0.25	8	1,002,423.67
18700	2.134	4	86,547.03	173,094.06	145,574.74	481,772.11	0.25	8	886,987.93
18700	2.134	2	21,636.76	43,273.51	291,149.47	963,544.22	0.25	8	1,319,603.96
18700	2.134	8	432,735.14	865,470.28	90,984.21	301,107.57	0.25	10	1,690,297.20
18700	2.134	6	243,413.52	486,827.03	121,312.28	401,476.76	0.25	10	1,253,029.59
18700	2.134	4	108,183.79	216,367.57	181,968.42	602,215.14	0.25	10	1,108,734.91
18700	2.134	2	27,045.95	54,091.89	363,936.84	1,204,430.27	0.25	10	1,649,504.95

Tabla 3.19 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)

RODILLO COMPACTADOR CAT CS79B

Peso en orden de trabajo (kg)	Ancho rodillo (m)	Vel. Equipo (km/h)	Energía rotacional (N-m)	Energía traslacional (N-m)	Energía por vibración		Espesor capa (m)	Número de pasadas (Ciclos x2)	Energía/m3 (N-m/m3)
					Energía potencial (N-m)	Energía cinética (N-m)			
20220	2.134	8	280,745.60	561,491.20	59,027.83	195,349.57	0.25	6	1,096,614.21
20220	2.134	6	157,919.40	315,838.80	78,703.77	260,466.10	0.25	6	812,928.07
20220	2.134	4	70,186.40	140,372.80	118,055.66	390,699.15	0.25	6	719,314.01
20220	2.134	2	17,546.60	35,093.20	236,111.32	781,398.29	0.25	6	1,070,149.42
20220	2.134	8	374,327.47	748,654.93	78,703.77	260,466.10	0.25	8	1,462,152.27
20220	2.134	6	210,559.20	421,118.40	104,938.37	347,288.13	0.25	8	1,083,904.10
20220	2.134	4	93,581.87	187,163.73	157,407.55	520,932.20	0.25	8	959,085.35
20220	2.134	2	23,395.47	46,790.93	314,815.10	1,041,864.39	0.25	8	1,426,865.89
20220	2.134	8	467,909.33	935,818.67	98,379.72	325,582.62	0.25	10	1,827,690.34
20220	2.134	6	263,199.00	526,398.00	131,172.96	434,110.16	0.25	10	1,354,880.12
20220	2.134	4	116,977.33	233,954.67	196,759.44	651,165.24	0.25	10	1,198,856.68
20220	2.134	2	29,244.33	58,488.67	393,518.87	1,302,330.49	0.25	10	1,783,582.36

Tabla 3.20 Energía de compactación para diferentes velocidades del equipo, y diferentes números de pasadas (Fuente: Elaboración propia)