

1.1. ANTECEDENTES

Un pavimento de concreto o pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o subbase. La losa, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de rueda, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

Estudios previos han demostrado que la resistencia y el comportamiento dentro de un elemento de concreto bajo cargas dependen de la compatibilidad del mortero y agregados en términos del módulo de elasticidad del mortero y del agregado grueso. Además, que la forma, textura y angularidad de los agregados que son propiedades específicas de los materiales representan un efecto significativo en la calidad del concreto. Con respecto a los agregados finos se ha encontrado que la forma y la textura de las partículas de la arena podrían mejorar la resistencia del concreto ya que se logra una mejor interconexión entre partículas. Con respecto al agregado grueso, así mismo, se ha reportado que concretos preparados con agregados de tamaño promedio 5 mm presentan resistencias más altas que agregados de tamaño promedio 10 mm, para una misma relación agua/cemento, y que factores como la forma del agregado pueden llegar a afectar la trabajabilidad y la viscosidad de las mezclas.

Por tal razón, para la producción de concretos con propiedades especiales como concretos livianos o concretos de alto desempeño para pavimentos se deberán evaluar con la mejor aproximación el efecto en la estimación del E_c y el MR según los agregados a utilizar, la trabajabilidad de las mezclas y la durabilidad de las mismas, dentro de los aspectos relevantes.

El módulo de elasticidad del concreto (E_c) y el módulo de ruptura, han sido y son considerados como dos factores importantes en el diseño de pavimentos rígidos.

A continuación se describe algunos de los estudios que se han realizado hasta en la actualidad:

Estudios realizados en la Universidad de Minnesota en 1999 mostraron que los valores del módulo de elasticidad utilizando las ecuaciones del ACI 318 sobreestimaban las medidas experimentales del E_c de concretos preparados con áridos de la región.

Sin embargo, estudios en la Universidad de Texas en Austin demostraron que las mismas ecuaciones subestimaban la gran mayoría de los módulos de elasticidad que se midieron experimentalmente.

La Universidad Politécnica de El Salvador, en el año 1999, realizó estudios para determinar una relación más confiable entre el módulo de ruptura del concreto y la resistencia a la compresión del mismo, utilizando materiales locales. Donde se analizaron los resultados estadísticamente y se concluyó que los valores de la relación entre el módulo de ruptura y la resistencia a la compresión de los concretos elaborados en El Salvador están dentro de los rangos establecidos en investigaciones de diferentes regiones del mundo, con la ventaja de que con esta investigación se tienen ahora valores más confiables y más apegados a las características propias de los materiales locales.

Estudios realizados en la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga en el año 2009 Se presenta la metodología para evaluar la resistencia del concreto y estimar el módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia obtenida en las mezclas de diferentes fracciones de agregados locales, el cual estos valores pueden ser utilizados para recomendar una ecuación que pueda ser utilizada por los calculistas diseñadores de pavimentos.

En el año 2010 en la universidad pontificia bolivariana determina de forma experimental, una constante matemática que relaciona de forma directa el módulo de ruptura y la resistencia a compresión del concreto preparado en la empresa PREVESA, dicha relación matemática obtenida experimentalmente para el caso particular de la planta PREVESA y expresada por la ecuación $MR = 2.39\sqrt{f'c}$ la cual esta valida por la relación planteada por el instituto del concreto ASOCRETO en el año 2000.

En la Universidad Central del Ecuador (Quito-Ecuador) en el año 2012 realizaron estudios para proporcionar un procedimiento adecuado de diseñar una mezcla del hormigón para usos en los proyectos de pavimentos en el país, El propósito del trabajo era tratar de encontrar y validar las relaciones entre Modulo de Rotura, Resistencia a la Tracción Diametral y Resistencia a la Compresión en cilindros estandarizados con los hormigones fabricados con agregados localmente.

La Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), San Pedro Sula, Honduras en el año 2012 determinaron una relación de la resistencia a la compresión y módulo de ruptura del concreto hidráulico se realizaron pruebas a compresión y flexión a los 3, 7 y 28 días, con esos datos identificaron que la calidad de las mezclas realizadas es alta y eso permite la optimización del diseño de losas simples para pavimentos rígidos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Uno de las causas por el cual un pavimento rígido presentan problemas estructurales, sufriendo desintegración, fracturamiento de la losa en grietas transversales, longitudinales, como de esquinas y de bloque, puede ser debido al diseño de la misma. Este problema se presenta ya que durante el diseño del pavimento no se toma mucho en cuenta el análisis de los factores que intervienen en el diseño del pavimento rígido, entre estos existen dos factores de suma importancia cuyo valor proviene de la calidad del concreto, estos factores son el Módulo de Ruptura y el Módulo de Elasticidad, cuyos valores representan la resistencia del concreto.

Estos módulos depende en su mayoría de la clase y calidad del tipo de agregado que conforma el concreto hidráulico, tanto como el agregado grueso y fino, para la obtención del módulo de elasticidad, para el caso de diseño se recomienda obtener este valor mediante el uso de correlaciones, existe correlaciones recomendadas por la ACI el cual permite estimar el E_c en función a la resistencia a compresión, con lo referente al área de pavimentos rígidos la ecuación más utilizada para obtener el este módulo (E_c) es aquella recomendad por la AASHTO que ha sido determinada 1993 que permite estimar el valor de E_c en función al Módulo de Ruptura,

Uno de los problemas que se presentaba al hacer el uso de estas ecuaciones se obtenían resultados que sobreestimaban a los experimentales obtenidos de concretos elaborados con agregados locales, debido a esta situación varias universidades de diferentes países empezaron a determinar sus propias correlación con concretos elaborados con agregados de la región para así poder contar con valore más confiables y más apegados a las características propias de los materiales locales.

La situación en la cual se encuentra el departamento de Tarija quizá al igual que los demás departamentos del país es que por no contar con correlación de este tipo en base a los agregados locales se utiliza las correlaciones recomendadas por normas vigentes, debido a que no existe este tipo de investigación en el área local no se sabe si los resultados obtenidos por estas correlaciones sean apropiadas a las condiciones de los agregados del departamento de Tarija, pudiendo decir de acuerdo a otros estudios quizá estos resultados sobreestimen a los experimentales, cuyos valores pueden afectar y presentarse a lo largo de la vida de un pavimento

1.2.2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El problema consiste en determinar la correlación de los módulos apuntados, con la utilización de material y mano de obra local, traduciéndose en la optimización de los recursos, para el caso de materiales pétreos, material cementante y mayor eficiencia en equipos y mano de obra. Una correlación con menos incertidumbre, razonable, acorde las especificaciones establecidas en las normas vigentes, y apropiada a las condiciones locales.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El tema de este proyecto de tesis tiene mucha importancia en el campo de la investigación del aspecto vial de nuestro medio, según informaciones recabadas de la ABC “Administradora Boliviana de carreteras”, SEDECA “Servicio Departamental de Caminos”, y del Gobierno Municipal se están ejecutando varias obras viales en el territorio, pero sobretodo existe un gran apoyo e interés de este gobierno por emprender obras relacionadas en pavimento rígido, por lo que se justifica investigar los factores o aspectos que intervienen en el diseño de los pavimentos rígidos. Específicamente el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura, y proporcionar una correlación entre estos módulos apropiada a las condiciones de los materiales pétreos locales de nuestro departamento la cual facilitara y proporcionar valores más precisos y garantizado para realizar el diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico

Es importante para el departamento de Tarija al igual que para el resto de los departamentos del país, contar con fórmulas propias para la determinación del módulo de elasticidad y módulo de ruptura del concreto hidráulico para pavimentos.

Debido a que el departamento de Tarija no cuenta con una correlación en base a los agregados locales que facilite en obtener el módulo de elasticidad a partir de otras resistencias del concreto en especial la correlación entre EC y MR, y además para determinar directamente estos módulos no se cuenta con los suficientes laboratorios que contengan los equipamientos necesarios para su determinación, y en el caso para el diseño de pavimento es más aconsejable la obtención de estos módulos a partir de correlaciones, se ve obligado a utilizar las correlaciones recomendadas por otras investigaciones, debido a que no se cuenta con este tipo de investigación en el área local no se sabe si los resultados son adecuados a nuestras condiciones.

De acuerdo a diferentes estudios se ha demostrado que los valores de estos módulos afectan en gran parte en el comportamiento y resistencia de un pavimento, cuyo valor

depende en su mayoría de la calidad y tipo de agregado con lo que está elaborada la mezcla de concreto, sabiendo que las formulas utilizadas sobreestiman a los módulos. ES NECESARIO que el Departamento de TARIJA cuente con este tipo de investigación, abarcando el estudio de los agregados locales, que se determine una correlación que facilite la estimación del E_c a partir de su MR, la cual sea determinada con concreto elaborada con agregados, materiales y mano de obra en condiciones locales.

Entonces mediante el presente trabajo se determinara una formula propia para determinar el módulo de elasticidad en relación al módulo de ruptura, cuya ecuación depende únicamente de los materiales locales de nuestro departamento, mediante el cual se podrá estimar el valor del Módulo de Elasticidad, que se utilizara especialmente en el diseño estructural de pavimento, en la fase del cálculo del espesor de la losa de concreto.

El estudio servirá como aporte a los sectores constructores, consultores y diseñadores dicho estudio presentando una alternativa específicamente para los diseñadores de pavimentos de concreto hidráulico, proporcionando dicho factor de diseño más preciso en condiciones de los materiales locales.

1.4. OBJETIVOS

A continuación se presentan los objetivos planteados para el desarrollo de la presente investigación.

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- ✓ Determinar la correlación entre el Módulo de Elasticidad (E_c) y el Módulo de Ruptura (MR) con materiales en condiciones locales en el departamento de Tarija para pavimentos de concreto hidráulico.

1.4.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Desarrollar las características y propiedades del hormigón para pavimentos rígidos.
- ✓ Investigar y analizar la importancia e influencia del módulo de elasticidad y el módulo de ruptura en pavimentos de concreto hidráulico.
- ✓ Determinar y analizar la calidad de los agregados de las canteras de estudio ubicados en San Blas, San Luis, Santa Ana y La Victoria los cuales pertenecen al departamento de Tarija
- ✓ Estudiar las características de los áridos y describir los ensayos realizados.
- ✓ Realizar ensayos de laboratorio de granulometría, módulo de finura, peso específico, porcentaje de absorción, pesos unitarios, tanto del agregado grueso como del agregado fino.
- ✓ Diseñar mezclas de hormigón de cemento hidráulico para pavimento rígido, de clase HF-4.5, HF-4.0 y HF-3.5 (MPa), con un asentamiento mediante el cono de Abrams entre 2-6cm.
- ✓ Elaborar especímenes (cilindros y vigas) de acuerdo al diseño de mezcla especificada, para ser ensayadas a los 28 días.

- ✓ Realizar ensayos de resistencia a flexión y módulo de elasticidad de los especímenes a los 28 días.
- ✓ Encontrar la correlación entre estas 2 propiedades mecánicas del hormigón y confrontarlas con las correlaciones existentes y establecer conclusiones.

1.5. HIPÓTESIS

La correlación entre el módulo de elasticidad y módulo de ruptura del concreto difiere de acuerdo a los agregados utilizados, por lo tanto los módulos de elasticidad y módulo de ruptura dependen de las características de los agregados teniendo una correlación propia y adecuada para el tipo de mezcla.

1.6. VARIABLES

Independientes:

- Carga de máxima a compresión C kgf.
- Carga máxima a flexión P kgf.

Dependientes:

- Módulo de Elasticidad E_c kg/cm².
- Módulo de Ruptura M_R kg/cm².

1.7. ALCANCE

Elaborar un documento que sirva como apoyo a los interesados en el área de pavimentos de concreto hidráulico, contemplando específicamente la influencia y la importancia de las propiedades del hormigón en pavimentos rígidos, como también el estudio de los agregados del departamento de Tarija, pudiendo ser también un documento de referencia para posteriores estudios.

Caracterizar los áridos locales (agregado grueso y agregado fino), mediante ensayos de laboratorios, obteniendo la calidad de estos áridos para la elaboración de concreto para pavimento rígido.

Elaborar 99 especímenes (54 cilindros y 45 vigas) y ser ensayadas a los 28 días, para determinar los valores experimentales de estos módulos y posteriormente su análisis.

Mediante análisis estadísticos obtener la correlación entre el módulo de elasticidad y módulo de ruptura, así mismo determinar una fórmula que permita calcular el módulo de elasticidad con relación al módulo de ruptura, cuya fórmula será propia y garantizada para la utilización en nuestro medio en especial con la finalidad de ser incluida para el diseño de espesores de pavimento de concreto hidráulico.

Finalmente de los estudios realizados formular recomendaciones y conclusiones que resuman los resultados obtenidos de la investigación.

2.1. PAVIMENTOS RÍGIDOS FABRICADOS CON HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO

2.1.1. Generalidades.

Un pavimento de concreto o pavimento rígido consiste básicamente en una losa de concreto simple o armado, separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales apoyada directamente sobre una base o subbase.



Fig. (a) pavimento rígido (Ref. Bibliográfica 3)

En un pavimento rígido, la losa de hormigón es el elemento estructural más importante, puesto que ésta es la que soporta las cargas vehiculares; La losa se apoya sobre una capa de áridos seleccionados y tratados, a los que llamamos subbase o base; la preparación de la subrasante para un pavimento de hormigón y los métodos constructivos empleados en la colocación de la losa de hormigón son importantes para conseguir el adecuado funcionamiento de la estructura para soportar las cargas producidas por el tráfico. Un diseño cuidadoso del espesor de losa, así como de las mezclas de hormigón puede no dar un servicio satisfactorio si hubo errores en el procedimiento de construcción, o si la subrasante no soporta la carga para la cual la losa fue diseñada.

Bajo las cargas de tráfico la losa, por su alta rigidez y su alto módulo elástico, tienen un comportamiento estructural tipo viga, por lo que su diseño estará enfocado en la resistencia a la tracción.

Es importante que la losa de hormigón tenga un apoyo suficiente, uniforme y estable, para garantizar que no pueda fallar localmente por falta de soporte; para conseguir este soporte es importante tomar en cuenta la calidad de los materiales que se utilizan, los niveles de compactación, las condiciones de clima y los drenajes empleados.

Los hormigones utilizados en las losas de pavimentos suelen tener resistencias medias a altas; generalmente comprendidas entre los 25 MPa y 40 MPa. Las losas pueden ser de hormigón simple, reforzado o pre esforzado. Cuando se utiliza hormigón simple o reforzado los espesores por lo general son similares.

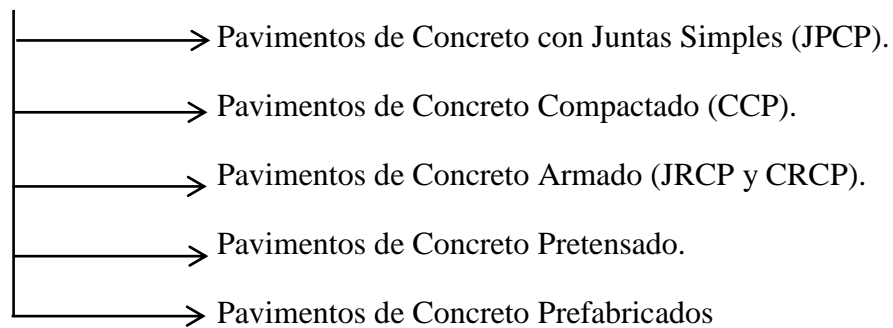
La parte más crítica en el diseño de pavimentos son las juntas. Estas juntas cumplen con la función de transferencia de cargas, así como para controlar los cambios de volumen que se produce en las losas de hormigón del pavimento, por efecto de la temperatura.

Las losas de hormigón está sometidas a un duro tratamiento (cargas, choques, acciones térmicas) y el coeficiente de seguridad por lo general es pequeño; esto hace necesario que el hormigón sea de muy buena calidad.

Debido a que la composición compleja del hormigón (granulometría de los áridos, dosificación de cemento y de agua) es objeto de estudio en un laboratorio, es en estos lugares donde se debe realizar un diseño de mezclas adecuado de hormigón que cumpla con los parámetros y especificaciones de diseño necesarios para la obra. Técnicamente los pavimentos de hormigón deben diseñarse y controlarse para una resistencia a flexión, puesto que el comportamiento estructural de las losas determina un trabajo a flexión; por lo tanto es recomendable que la especificación de resistencia del hormigón sea a flexión. Este parámetro es conocido como Módulo de Rotura (MR) y es normalmente especificado a los 28 días de edad del hormigón.

2.1.2. Tipos de pavimentos rígidos.

Los pavimentos Rígidos pueden agruparse en cinco categorías:



A continuación se describen las características de cada categoría de pavimento y los diferentes tipos que engloba.

2.1.2.1. Pavimentos de concreto con juntas simples (JPCP)

Los más empleados actualmente por su adaptabilidad técnica y económica a diferentes condiciones son los Pavimentos con Juntas Simples (JPCP). Estos pavimentos son, en general, de construcción más sencilla y de menor costo, por lo que los otros tipos de pavimentos sólo suelen emplearse en determinadas circunstancias, que luego se comentan. Se disponen en ellos juntas transversales de contracción y juntas longitudinales de alabeo entre carriles o cuando la anchura de construcción es superior a 5 m, resultan así, generalmente, losas rectangulares, preferiblemente casi cuadradas, salvo en intersección, ramales y otras superficies de ancho variable en que han de tener en cualquier caso forma relativamente regular, sin ángulos agudos. Ambos tipos de juntas, longitudinales y transversales, puede ser también de construcción.

En las juntas longitudinales se disponen con frecuencia barras de unión de acero corrugado para mantener unidas las losas contiguas. Permiten el alabeo debido al gradiente térmico, pero impiden la abertura de la junta entre carriles de circulación y el escalonamiento bajo tráfico. En cualquier caso, la incidencia de estos fenómenos suele ser poco frecuente en las juntas longitudinales.

Las juntas transversales suponen una solución de continuidad del pavimento, ya que los movimientos verticales, especialmente bajo la acción de los ejes de los vehículos pesados, son diferentes en las juntas que en el interior de la losa. El método más usual para mejorar la transmisión de cargas entre losas contiguas, consiste en la disposición de pasadores que son barras lisas de acero no adheridas al concreto, situadas a la mitad de espesor (h), paralelas entre ellas mismas y al eje de la vía.

Estos pasadores aseguran la continuidad de la rodadura a largo plazo bajo tráfico pesado, pues prácticamente imposibilitan el escalonamiento del pavimento en las juntas. (Fig. 1)

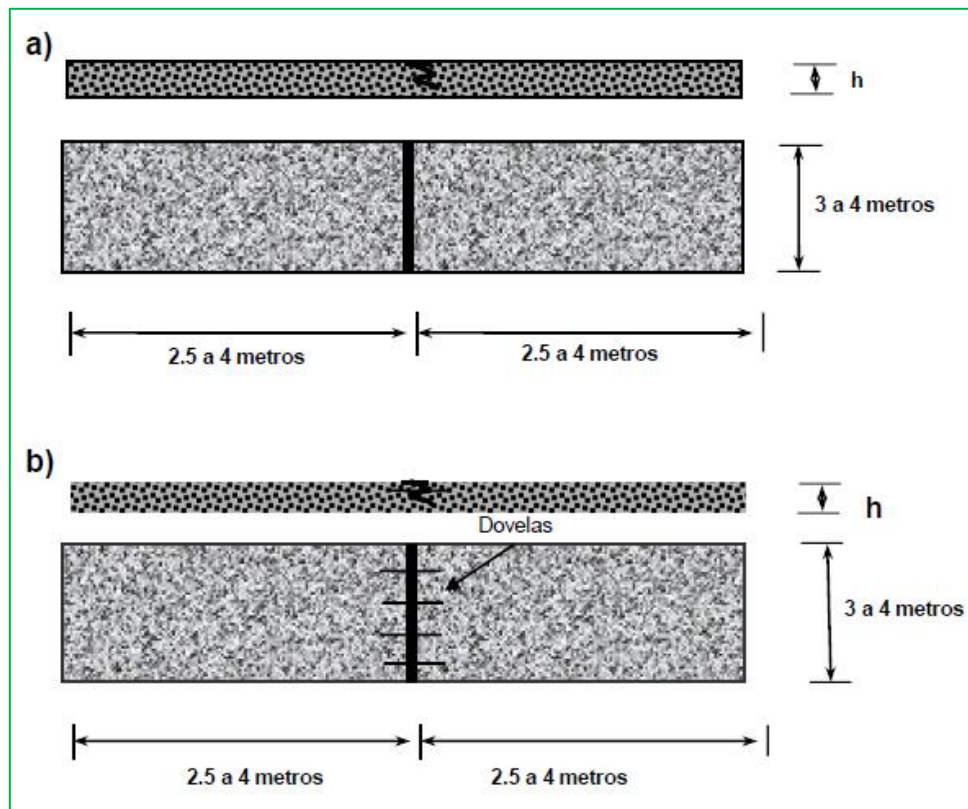


Fig. 1 a) Pavimento de concreto simple.
b) Pavimento de concreto simple con dovelas, llamadas también pasadores.
Fuente: Pavimentos de Concreto Hidráulico. (Ref. Bibliografía 8)

2.1.2.2. Pavimentos de Concreto compactado con Rodillo (CCP)

Entre los pavimentos de concreto en masa pueden incluirse los pavimentos de concreto compactado con rodillo. Se trata de un concreto con un bajo contenido de agua (la relación agua /cemento es de $0.35 - 0.40$) que ha de compactarse energicamente con rodillos vibratorios y neumáticos, de forma similar a como se hace con una grava cemento. El contenido de cemento es, sin embargo, análogo al de un concreto de pavimentos no inferior a 300 kg/m^3 , empleándose en general cementos mixtos del tipo V con elevado contenido de cenizas volantes (superior al 50%).

En este caso, la extensión del concreto se realiza con extendedora de mezcla bituminosa o moto niveladora, con lo que todas las fases de la puesta en obra pueden realizarse con la maquinaria más habitual en la construcción de carreteras. Una vez

compactado y protegido superficialmente con un riego (puede ser el mismo empleado para el curado), el concreto compactado puede habilitarse casi inmediatamente al tráfico, por lo que resulta adecuado para carreteras bajo tráfico.

En carreteras secundarias puede dejarse que se fisure libremente por retracción. En carreteras principales, se deben formar en fresco juntas transversales distanciadas 2.5 a 4 m para que las fisuras en superficie sean rectilíneas.

Su comportamiento es similar al de los pavimentos tradicionales de concreto vibrado. Necesitan en cambio, un tratamiento superficial o una capa de rodadura bituminosa para protegerlos de la acción directa del tráfico, por lo que pueden también considerarse como pavimentos mixtos, con una eventual reflexión de las juntas en superficie que conviene impedir o minimizar. (fig. 2)

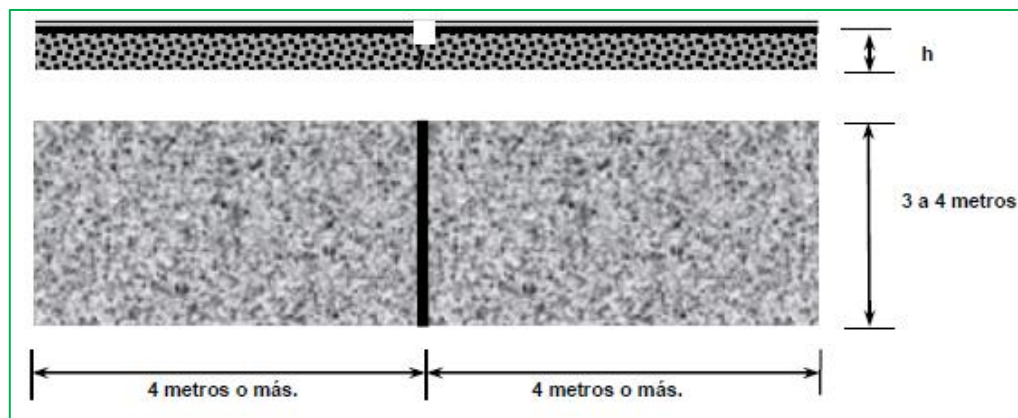


Fig. 2 Pavimento de concreto compactado. Fuente: Curso sobre Pavimentos de Concreto Hidráulico. (Ref. Bibliografía 8)

2.1.2.3. Pavimentos de Concreto Armado (JRCP y CRCP)

A este grupo pertenecen los pavimentos de concreto armado con juntas, los pavimentos continuos de concreto armado y los pavimentos armados con fibras de acero.

Pavimentos de concreto armado con juntas: fueron concebidos en una época en que las juntas constituían un punto débil y un problema de conservación, por lo que parecía conveniente reducir su número, aumentando la longitud de las losas. La misión de las armaduras no es estructural, pues sería antieconómico, sino es la de

mantener acopladas las fisuras transversales que inevitablemente aparecen en losas largas. De este modo se asegura la transmisión de cargas en las fisuras, se impide la intrusión de agua y finos y se evita la abertura en V de las grietas en superficie bajo la acción del tráfico; además, se emplean mallazos electrosoldados (alambres de unos 6mm de diámetro) o barras corrugadas, que se colocan de 5 – 7 cm de la superficie. (Fig. 3)

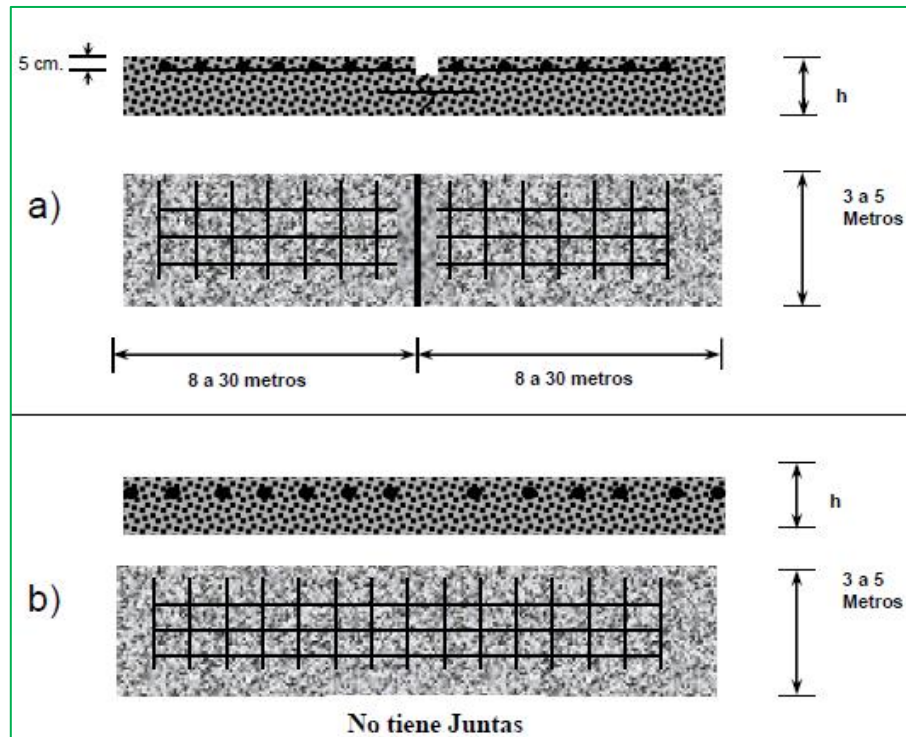


Fig. 3 a) Pavimento con refuerzo discontinuo distribuido no estructural. b) Pavimento con refuerzo continuo sin función estructural. (Ref. Bibliografía 8)

A veces suelen emplearse losas armadas en zonas que son susceptibles de asientos diferenciales, como en las losas de aproximación a los puentes. El concepto es en principio correcto, en el sentido que el mallazo aporta una cierta seguridad respecto a eventuales agrietamientos. Sin embargo debe ser sólo eso, un seguro ante un riesgo, debiéndose extremar además todas las medidas usuales para evitar los asientos (materiales adecuados, compactación, drenaje, etc).

Pavimentos continuos de concreto armado: constituyen en cambio una extrapolación feliz de la técnica antes mencionada, dado que llegan a suprimirse las juntas transversales a costa de aumentar la cuantía de la armadura de acero de alto límite elástico.

Pavimentos continuos de concreto armado con fibras de acero: tienen determinadas aplicaciones, en que el elevado costo de este tipo de concreto es compensado por sus características: aumento de la resistencia a tracción y a la fatiga, mejor comportamiento a flexo tracción, figuración controlada, resistencia al impacto, durabilidad, etc.

Con este material se puede reducir el espesor del pavimento del orden de un 30% y aumentar el espaciamiento de las juntas, por lo que en algunos casos puede resultar competitivo: recubrimientos o refuerzos adheridos de pavimentos existentes, pavimentos de puentes, pavimentos sometidos a cargas, muy pesadas, etc. (Fig. 3).

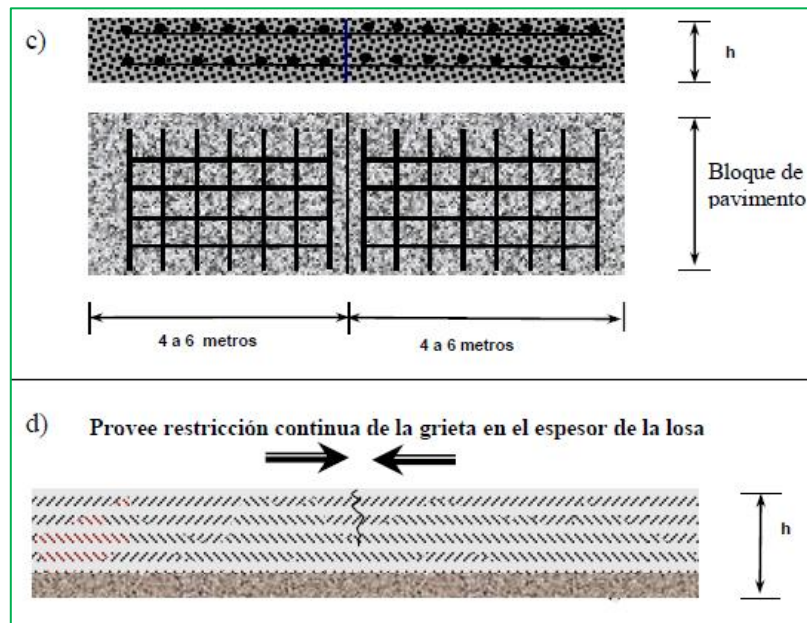


Fig. 3 c) Pavimento de concreto con refuerzo estructural. d) Sección transversal de un pavimento de concreto con fibras de acero. Fuente: Pavimentos de Concreto para carreteras. (Ref. Bibliográfica 5)

2.1.2.4. Pavimentos de Concreto Pretensado

Gracias a la compresión que se introduce, se pueden construir losas de gran longitud, y reducir el espesor de la losa en un 50% .Se han ensayado varios sistemas de pretensado interno, mediante cables o alambres, y de pretensado externo, mediante gatos planos hidráulicos y juntas neumáticas. Las juntas tienen un diseño especial para soportar las mayores variaciones de abertura y con algunos sistemas hay que disponer estribos para resistir los empujes horizontales. (Fig. 4)

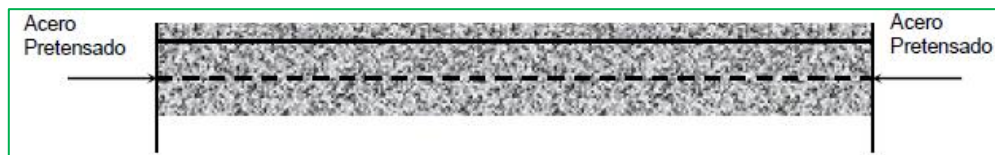


Fig. 4 Pavimento Pretensado. Fuente: Pavimentos de Concreto para carreteras. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.2.5. Pavimentos de Concreto Prefabricados.

Las placas de concreto armado de forma cuadrada o rectangular, desde (1.5 x 1.5) m a (3 x 3) m y (12 a 16) cm de espesor, son empleadas en algunos países para pavimentos industriales sometidos a cargas muy pesadas.

Los adoquines o bloques de concreto tienen unas dimensiones que permiten ser manejados con una sola mano (por ejemplo, 20 x 10 cm) y tienen formas muy variadas, según que haya o no cierto encaje entre bloques. Tienen un espesor de 6 – 12 cm y se apoyan en una capa de asiento de arena de 30 - 50 mm, con función drenante.

En las juntas entre bloques se introduce arena por vibración con la que se consigue una cierta imbricación incluso sin encaje. Aun así este tipo de pavimento de concreto no puede ya considerarse como un pavimento rígido.

Se emplea fundamentalmente en zonas urbanas, portuarias, industriales, etc., tanto para tráfico ligero como para el más pesado que pueda existir. Aparte de las posibilidades estéticas que ofrecen los bloques con sus formas y colores, la posibilidad de montar y desmontar el pavimento puede ser una ventaja cuando la

probabilidad es grande de que se produzcan asientos importantes, haya que abrir zanjas para instalar o reparar servicios, o bien se trate de un pavimento temporal. También encuentra aplicación en pavimentación de áreas reducidas, como en las gasolineras. En carreteras en cambio no suele tener interés, dado su costo y las exigencias del usuario actual en lo referente a la calidad de rodadura a alta velocidad. (Fig. 5)

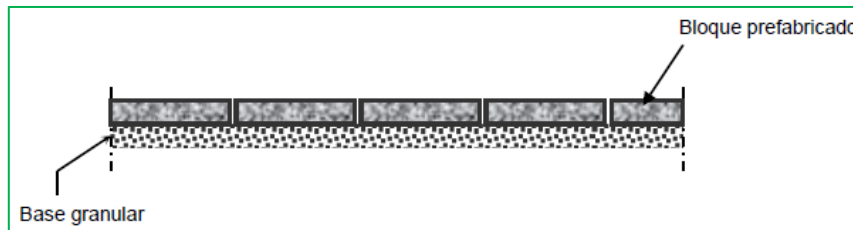


Fig. 5. Pavimento Prefabricado. Fuente: Pavimentos de Concreto para carreteras. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3. Juntas.

2.1.3.1. Juntas en los Pavimentos Rígidos.

Un pavimento de concreto sin juntas sería ideal, sin embargo las propiedades de los materiales y la acción meteorológica requiere del empleo de juntas para reducir los problemas de retracción del concreto, dilatación térmica, discontinuidad en la construcción de las losas y alabeo (ver Fig. 6a y 6b), que se convierten con frecuencia en las zonas más débiles de la estructura. Las juntas se utilizan para acomodar el movimiento restringido o para tener un punto de terminación.

Las principales condiciones que debe cumplir una junta son:

- a) Localización adecuada, de tal manera que controle eficazmente el agrietamiento potencial causado por los factores mencionados anteriormente.
- b) Transmisión adecuada de las cargas a la losa adyacente a fin de evitar fallas por deformación excesiva o pérdida en la calidad del rodamiento.
- c) Protección adecuada de la subrasante contra el agua. La Junta debe ser impermeable, de tal manera que el agua no pueda infiltrarse a través de ella.

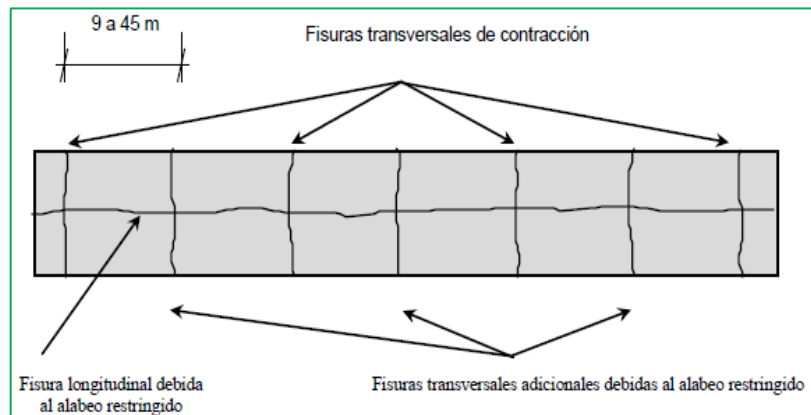


Fig. 6 a Vista en planta del Pavimento de Concreto sin Juntas. Fuente: Pavimentos de Concreto para carreteras. (Ref. Bibliografía 5)

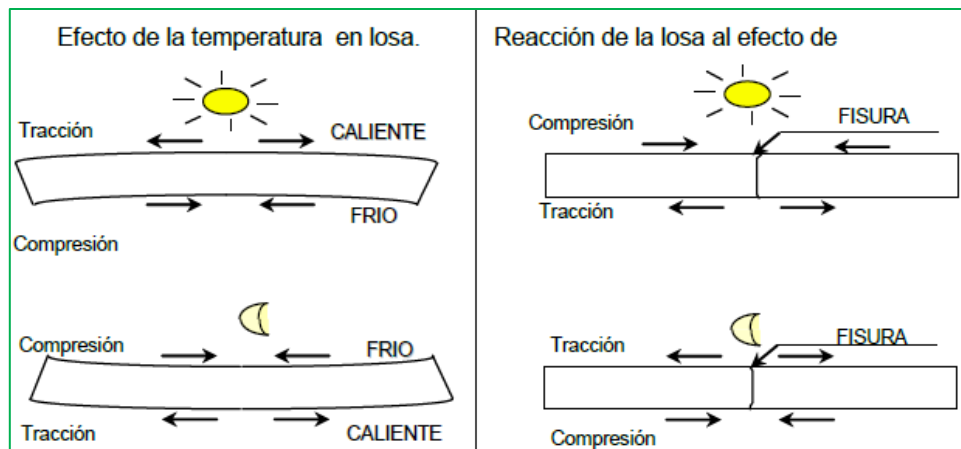


Fig. 6. B) Vista de sección de losa en comportamiento alabeo diurno y nocturno. Fuente: Pavimentos de Concreto para carreteras. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.2. Tipos de juntas.

2.1.3.2.1. Junta Longitudinal

El papel principal de la junta longitudinal es controlar el agrietamiento producido por el alabeo. Si el pavimento se construye en su ancho completo y en una sola operación, la junta debe ser hecha con una ranura que separe los carriles; la transmisión de cargas se hace por trabazón de agregados y es usual colocar barras de anclaje que mantengan unidas las caras de las juntas.

Estas barras de anclaje no se diseñan para transmitir cargas verticales ni momento flector, por lo que son de diámetros pequeños (No. 4 o No. 5); puede usarse acero liso, aunque es más recomendable el corrugado y no es necesario su uso cuando existe confinamiento lateral del pavimento (Fig. 7).

Si el pavimento se construye en un sentido a la vez (caso más frecuente), la junta longitudinal es también junta de construcción, del tipo "machihembrado", con barras de anclaje cuando no existe confinamiento lateral.

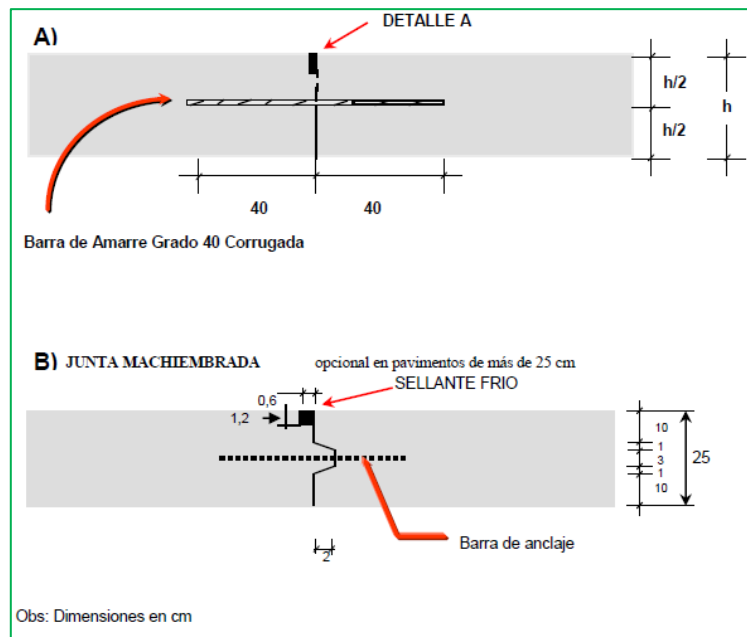


Fig. 7. A) Profundidad del Corte y Sellado de Juntas. (Sección transversal). B) Junta Machihembrada (Sección transversal del Pavimento). (Ref. Bibliografía 5)

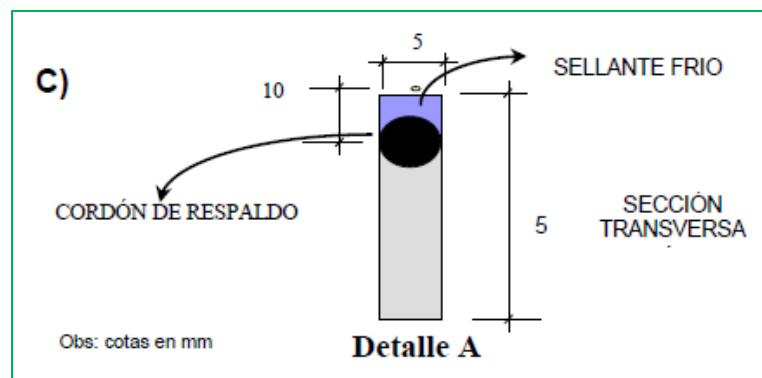


Fig. 7. C) Junta Longitudinal de Construcción. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.2.2. Juntas Transversales

Las juntas transversales pueden ser de contracción, expansión, alabeo o construcción. Las de contracción se programan para que coincidan con alguna de las anteriores.

2.1.3.2.2.1. Juntas de Contracción

Son también juntas de alabeo, o sea que controlan las grietas causadas por la retracción del fraguado del concreto y por el alabeo del pavimento. La separación entre las juntas y el tipo de transmisión de cargas deben proyectarse de acuerdo con las recomendaciones de la PCA. (Fig. 8)

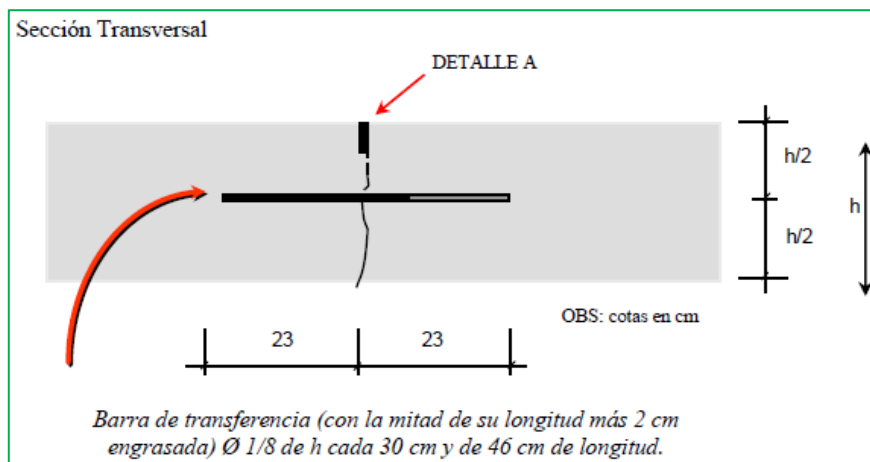


Fig. 8. Junta Transversal de Contracción. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.2.2.2. Juntas de Expansión

Su objeto es disminuir los esfuerzos de compresión, proporcionando un espacio entre losas que permita el movimiento del pavimento cuando se expande. Cuando el espaciamiento de las juntas de contracción es adecuado no se necesitan juntas de expansión, excepto en objetos fijos o intersecciones asimétricas. Cuando el pavimento empalma con otras estructuras viales existentes (cruces de ferrocarriles), se construye una junta en la cual se aumenta el espesor de la losa para absorber los esfuerzos de borde ocasionados por el tráfico.

Contra estructuras que confinen el pavimento se coloca una junta de expansión sin pasadores con ancho de 1.5 a 2.0 cm; alrededor de los pozos de visita y tragantes se coloca una junta sin pasadores de 0.5 a 0.6 cm. de ancho. (Fig. 9)

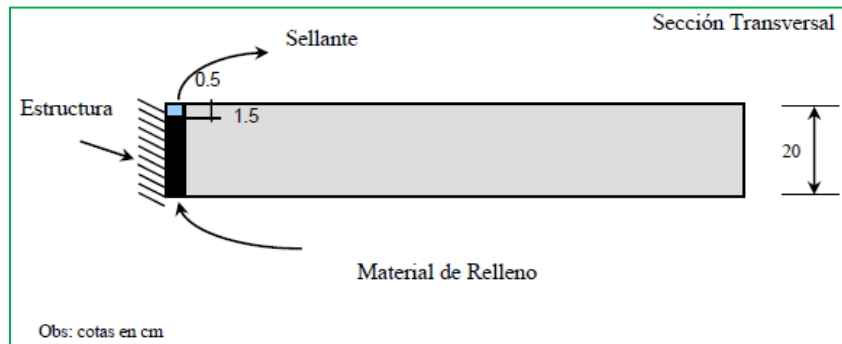


Fig. 9. Junta Transversal de Expansión. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.2.2.3. Juntas de Construcción

Las juntas longitudinales de construcción se dan cuando el equipo solamente permite la construcción del pavimento carril por carril y se hace coincidir con la longitudinal de alabeo. Las juntas transversales de construcción se proyectan para que coincidan con las juntas de contracción; la transferencia de carga se lleva a cabo por medio de pasadores de acero liso. Cuando la interrupción del colado es imprevista es necesario colocar una junta de construcción. (Fig. 10)

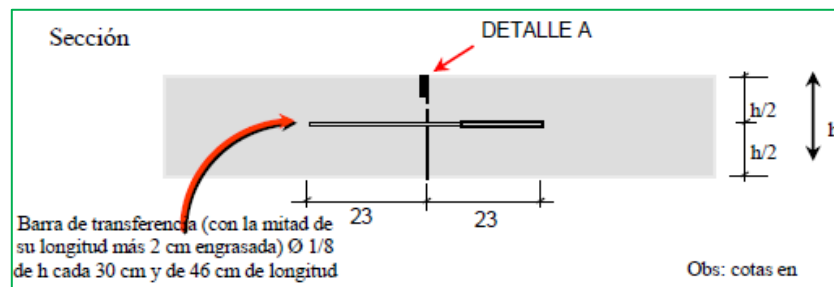


Fig. 10. Junta Transversal de Construcción. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.2.3. Juntas Especiales

Las juntas de aislamiento deben usarse donde se requiera libertad completa de movimiento vertical y horizontal entre la losa y los elementos contiguos. Las Juntas de aislamiento deben usarse en las uniones con los muros, columnas, bases de

equipos, zapatas u otros puntos de restricción como desagües, pozos de inspección, sumideros y escaleras. (fig. 11)

Las juntas de aislamiento se forman insertando un rellenedor premoldeado para la junta entre la losa y el elemento adyacente. El material de la junta deberá extenderse en toda la profundidad de la losa y no debe sobresalir encima de ella.

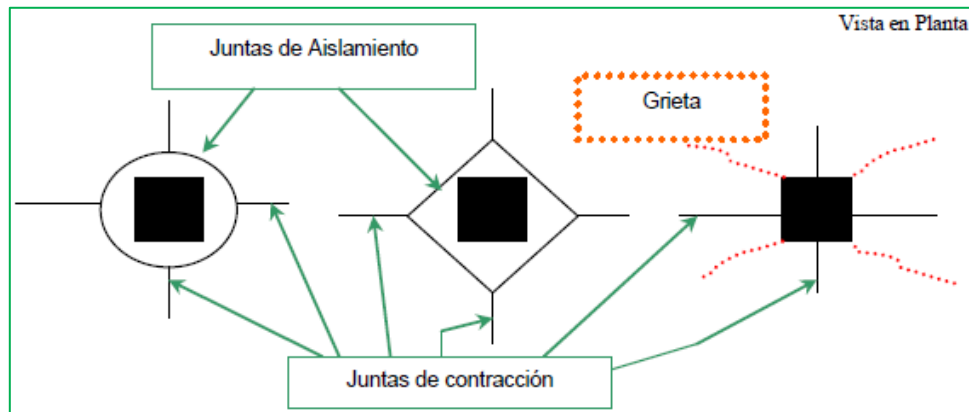


Fig. 11. Juntas Especiales. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.2.4. Relleno de juntas

Donde existan condiciones de humedad, requisitos de higiene o de control de polvo, o donde el piso está sujeto al tráfico de vehículos pequeños y ruedas de metal por ejemplo las de montacargas, se deben rellenar y proteger las juntas de contracción y construcción con un epóxico semirígido que le dé un soporte adecuado a los bordes de la junta de modo que tenga suficiente resistencia al desgaste. (Fig. 12)

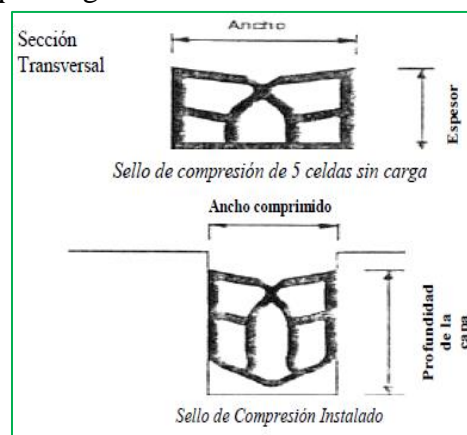


Fig. 12. Sellos de Compresión Preformados. (Ref. Bibliografía 5)

2.1.3.3. Mecanismos de Transmisión de Cargas

La transmisión de las cargas del tráfico de una losa a otra adyacente a través de las juntas, puede llevarse a cabo por los medios siguientes:

a) Trabazón de Agregados: El sistema consiste en efectuar una ranura en la superficie del concreto, de tal manera que la sección quede disminuida y permita el agrietamiento, extendiéndose a la parte cementante y dejando intactos los agregados cuya trabazón proporciona la resistencia al cortante necesaria para la transmisión de cargas. Funciona efectivamente cuando la abertura de la Junta es menor de 0.5 mm., utilizando una sub base de suelo cemento. (Fig. 13)

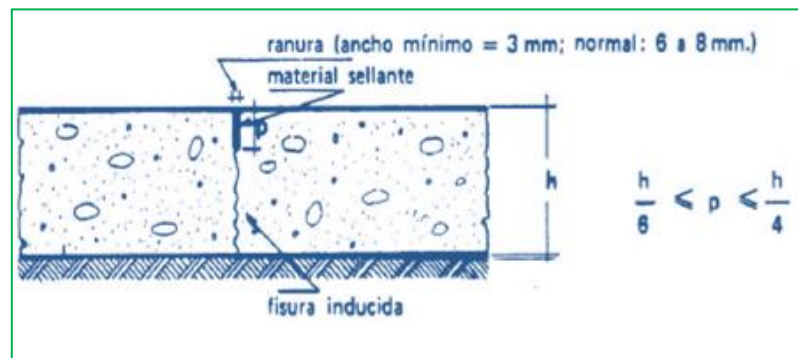


Fig. 13. Mecanismo de Transmisión de carga por medio de la trabazón de agregados.
(Ref. Bibliografía 8)

b) Pasadores: Para condiciones de tráfico pesado y/o clima severo, es necesario complementar la eficiencia de la trabazón de agregados mediante el empleo de barras de acero liso, denominadas pasadores, que conectan entre si las losas separadas por junta. Este tipo de mecanismos transmite tanto fuerzas de cizalladura como momento flector, pero debe permitir el libre movimiento-horizontal de las losas, por lo cual al menos una mitad del pasador debe engrasarse a fin de evitar su adherencia con el concreto que lo rodea. (Fig. 14)

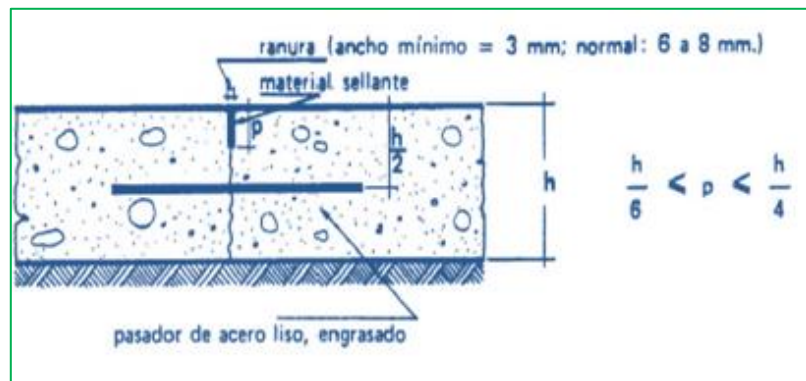


Fig. 14 Mecanismo de Transmisión de carga por medio de pasadores. (Ref. Bibliografía 8)

c) **Juntas Machi-Hembradas:** Este mecanismo transmite satisfactoriamente fuerzas de cizalladura, pero no momentos flectores, está indicado en las juntas longitudinales de construcción y alabeo y muy raramente en las juntas transversales. (Fig. 15)

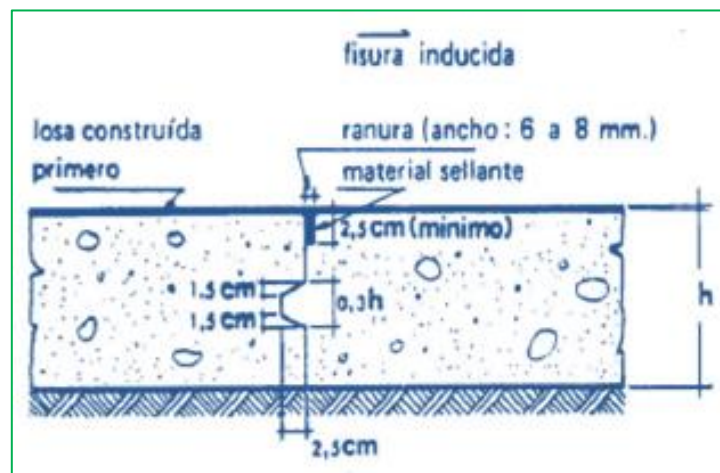


Fig. 15. Mecanismo de Transmisión de carga por medio de junta machihembrada. (Ref. Bibliografía 8)

Los sistemas de transferencia de carga disminuyen las tensiones de deformación en las losas de concreto, presiones de consolidación en el soporte y el mantenimiento, y a su vez aumentan la durabilidad, comodidad y seguridad del rodamiento.

2.2. CONCRETO

2.2.1. Generalidades

El concreto es un material que ha sido utilizado y estudiado por cientos de años, ya que tiene la propiedad de permitir ser moldeado en estado fresco y de adquirir dureza y resistencia en estado endurecido. Es un material de gran aplicación a nivel de la construcción y que puede proveer acabados estéticos a un precio relativamente económico.

El concreto, en los tiempos modernos conserva las propiedades mecánicas del pasado pero adicionalmente puede ser modificado, dependiendo su uso futuro, mediante aditivos y variaciones en sus elementos constitutivos.



Fig. (b) Hormigón para pavimento (Ref. 12)

El concreto es la mezcla íntima de cantidades predeterminadas de cemento, agua y agregados, éstos materiales que son básicos para la elaboración del concreto, se les conoce como ingredientes. El cemento es el producto de la pulverización de materiales calcinados que en presencia del agua o de la humedad, reaccionan proporcionándole poderes aglutinantes. Los agregados son materiales pétreos, que sirven como relleno, generalmente de resistencia en el concreto. Los agregados se dividen, según el tamaño de sus partículas, en: agregado grueso o grava; que son aquellos cuyas partículas son mayores de 4.76 mm (tamiz No 4) y, agregados finos o arenas, aquellos, cuyas partículas son menores de dicha cantidad. El agua que se emplea, es la común y corriente que cumple con ciertos requisitos de calidad, al igual que el resto de los ingredientes.

Además de los materiales básicos, se le pueden integrar otros, líquidos o en polvo, llamados aditivos, con el fin de modificar una o varias de las características del concreto, que se desean y que no es posible lograrlo con ajustes sencillos en la cantidades de los ingredientes o con la selección adecuada de los mismos.

Una vez obtenida la mezcla de concreto, ésta se lleva a un molde determinado y por la operación de compactación o consolidación, se le reduce la cantidad de vacíos a un mínimo, quedando únicamente pequeñas burbujas de aire atrapado, que no es conveniente extraer, debido a que cualquier práctica inadecuada provocaría disturbios en el producto final.

En la Fig. 16, se observa el concreto bien terminado, presentando una estructura interna muy peculiar, en la que los diversos tamaños de los agregados quedan distribuidos uniformemente dentro de la masa, lo más próximos entre sí y rodeados completamente por los granos de cemento, que van a asegurar su aglutinamiento perfecto, durante las reacciones con el agua.

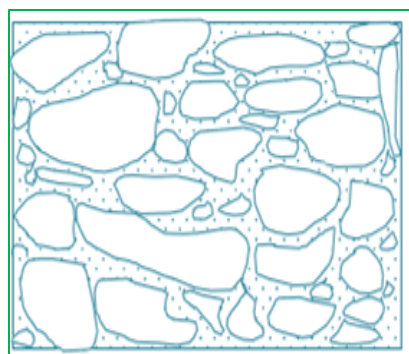


Fig. 16 Distribución adecuada de los ingredientes en la masa de concreto. Fuente: Fabricación del concreto. (Ingenieros Civiles Asociados) (Ref. Bibliografía 20)

Puesto que el cemento es el ingrediente más costoso y el agua es función inversa a las características positivas del concreto, estos materiales deben llevarse a un mínimo, de acuerdo a los requisitos para la calidad deseada en el producto final.

Cuando las mezclas son pobres, o bajas en cemento (Fig. 17 a) los agregados alcanzan más del 75% del volumen total del concreto, contra un volumen absoluto de 7% del cemento y 16% del agua. Cuando las mezclas son ricas o altas en contenido de cemento (Fig. 2.17 b), los agregados intervienen con más del 60% en volumen, contra 15% del cemento y 21% del agua. Estas situaciones, muestran el intervalo de las cantidades en volumen, que intervienen en el concreto común o concreto normal. Es importante observar que el aire atrapado, no es mayor del 3% en volumen y, dado a que los agregados representan la mayoría de todos los ingredientes, su selección

debe ser muy cuidadosa, porque de su calidad dependerá mucho el comportamiento futuro del concreto.

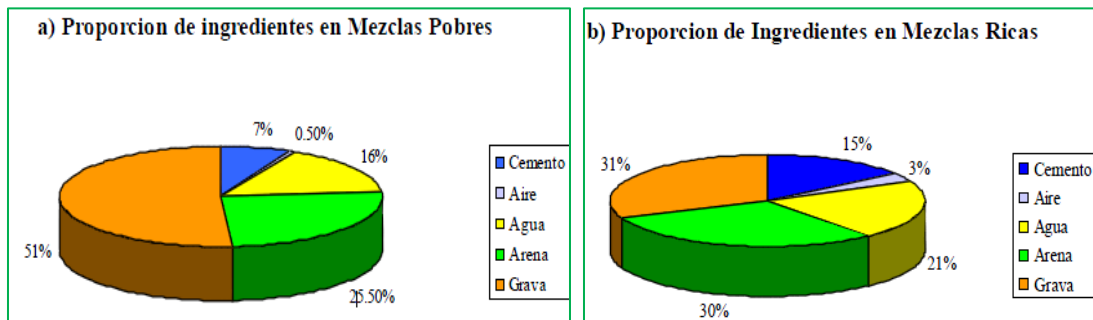


Fig. 17. Variación de las proporciones en volumen absoluto de los materiales usados en el concreto sin aire incluido. Fuente: Fabricación del concreto. (Ref. Bibliografía 20)

2.2.2. Evolución de los Cambios de Estado del Concreto

El concreto hidráulico convencional, recién elaborado, es un material que en pocas horas se transforma y cambia de estado, desde su condición inicial de masa blanda e informe hasta la de cuerpo rígido que toma la forma del molde en que se coloca, y después continúa evolucionando para adquirir con el tiempo sus propiedades definitivas como cuerpo duro y resistente.

Al concreto recién mezclado se le considera en estado fresco, mientras conserva suficiente blandura para ser moldeado, en tanto que al concreto ya colocado, se le considera como un material en curso de endurecimiento progresivo. Para dar el uso y tratamiento adecuados al concreto en ambos estados, es necesario reconocer sus respectivas características y propiedades, y los factores que las modifican, a fin de poder ajustarlas según convenga.

El proceso de solidificación y endurecimiento del concreto es el resultado de las reacciones químicas que se producen entre el cemento y el agua, reacciones que de manera global y de principio a fin corresponden al proceso de hidratación del cemento, el cual para fines prácticos se considera dividido en dos etapas, la del fraguado y la del endurecimiento propiamente dicho.

La etapa del fraguado, que normalmente dura pocas horas, corresponde al cambio de estado en que el concreto deja de ser un material blando para convertirse en un cuerpo rígido pero frágil, es decir, el concreto recién fraguado es un material solidificado que prácticamente no posee resistencia mecánica.

Se considera que la etapa del verdadero endurecimiento, o de adquisición de resistencia mecánica, se inicia cuando termina el fraguado y se prolonga durante un lapso que dura meses, e incluso años.

En la fig. 18 se muestra la curva de evolución del fraguado, que nos ilustra la forma en que se tipifica arbitrariamente cada etapa del proceso de cambio en la mezcla de concreto.

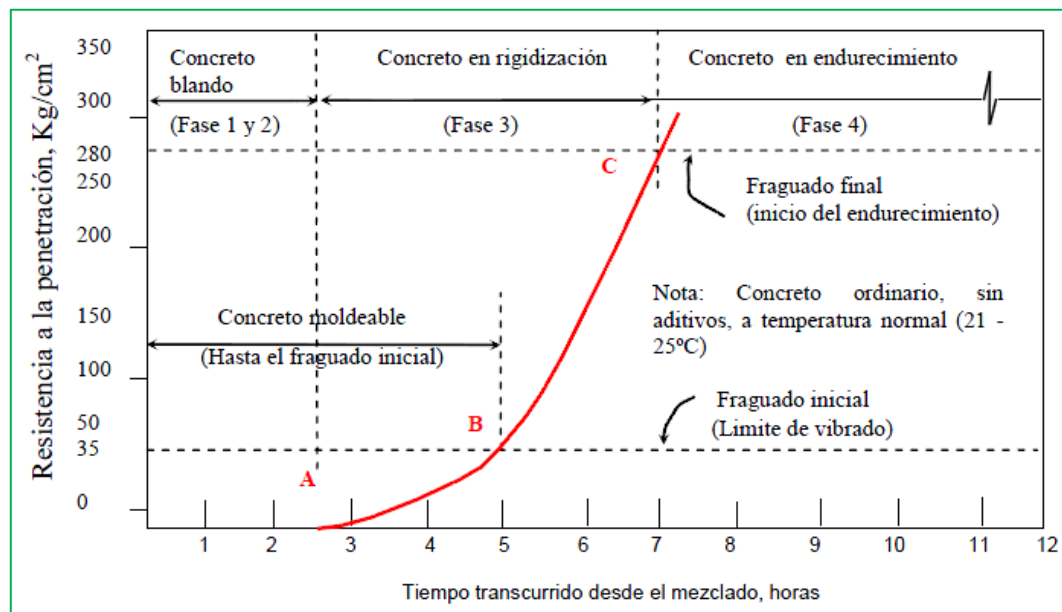


Fig. 18. Curva de evolución del fraguado del concreto. . Fuente: Manual de Tecnología del concreto. Sección I. (Ref. Bibliografía 18)

En esta figura se marcan tres puntos sobre la curva de evolución del fraguado. El punto A define el tiempo a partir del mezclado en que el concreto comienza a oponer resistencia a la penetración, es decir, empieza a adquirir rigidez.

El punto B corresponde al tiempo en que el concreto alcanza una resistencia a la penetración igual a 35 kg/cm^2 (500 lb/pulg^2), valor representativo de rigidez que por definición (ASTM C 403) se designa como "fraguado inicial".

Finalmente, el punto C marca el tiempo en que el concreto manifiesta una resistencia a la penetración igual a 280 kg/cm² (4000 lb/pulg²), que a su vez representa un estado de rigidez identificado como "fraguado final".

De acuerdo con lo anterior, puede considerarse que el estado fresco del concreto persiste hasta que se produce el fraguado inicial, y que el lapso previo a éste, es el tiempo máximo de que se dispone para realizar todas las operaciones correspondientes al mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto en los moldes. Es por tanto necesario, al referirse al concreto fresco, examinar los cambios de comportamiento que manifiesta en ese lapso y los efectos que dichos cambios pueden tener en la realización de esas operaciones.

2.2.3. Propiedades del Concreto

El hormigón presenta dos estados fundamentales desde los puntos de vista prácticos. El estado fresco o plástico en el que admite ser manipulado para su adaptación a los encofrados previstos y el estado endurecido en el que ha adquirido una rigidez tal que impide su manipulación sin producir fracturas visibles o no irreversibles. Estos estados son sinónimos de la fase de colocación en obra y de uso.

2.2.3.1. Propiedades del concreto fresco

Esta es la etapa en la cual se puede manipular el concreto, en ella se realizan actividades tales como mezclado de los materiales para la conformación del mismo, transporte, colocación de la mezcla dentro de la formaleta adecuada y vibrado de la misma, a fin de evitar hormigueros y de eliminar el aire atrapado por las partículas durante el proceso.

Consistencia: Es la habilidad relativa para fluir que tiene el concreto fresco, es decir, es el comportamiento de la masa en diferentes condiciones de humedad. Cuando la masa es muy fluida, se dice que tiene una "consistencia aguada"; cuando es de fluidez media, se le conoce como "consistencia plástica" y, cuando es poco fluida (rígida), tiene una "consistencia seca".

Docilidad: Es sinónimo de trabajabilidad del hormigón fresco. Es su capacidad de ser puesto en su lugar de destino con los medios de compactación de que se dispone. Principalmente se mide mediante el descenso en centímetros en el ensayo del cono de Abrams.

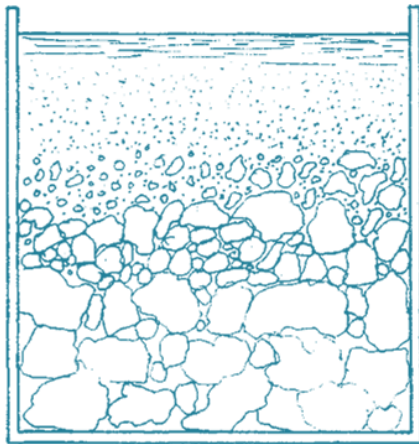
Homogeneidad: Es la cualidad de distribución por toda la masa de todos los componentes del hormigón en las mismas proporciones. A la cualidad de homogeneidad se opone el defecto de la segregación o decantación. Se mide por la masa específica de porciones de hormigón fresco separadas entre sí.

Masa específica: Es la relación entre la masa del hormigón fresco y el volumen ocupado. Puede medirse con el hormigón compactado o sin compactar. La densidad del hormigón fresco compactado es una medida del grado de eficacia del método de compactación empleado. Se mide en kg/m^3

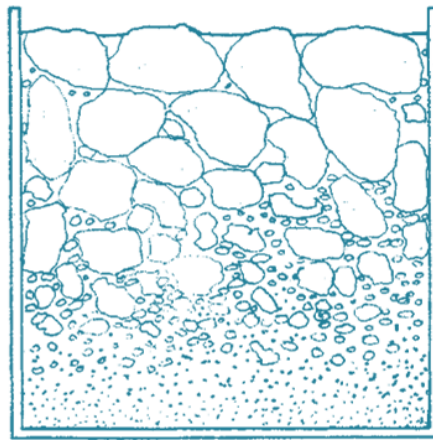
Fraguado: Debido a las pérdidas del agua libre de la mezcla principalmente por la avidez de agua del cemento, en sus primeras reacciones y ayudada en mayor o menor grado por la evaporación y por el desecamiento, la masa pierde gradualmente su fluidez y su plasticidad, transformándose en una masa rígida y resistente a la penetración, el fraguado del concreto, medido como la resistencia a la penetración, se divide en dos etapas, arbitrariamente definidas como “fraguado inicial” y “fraguado final”. Algunos cementos pueden presentar un “fraguado falso” (ASTM C 451). Se produce en un tiempo entre 1 y 5 minutos, comprobándose su aparición por la considerable pérdida de plasticidad sin que se desarrolle calor de hidratación en gran abundancia poco tiempo después del mezclado, pudiéndose eliminar fácilmente con un remezclado. Los tiempos del fraguado inicial y del final, son del orden de horas y dependen del tipo de cemento y aditivos que se estén empleando.

Es muy importante advertir que durante las operaciones de mezclado, transportación, colocación y acabados, el concreto está sujeto a dos fenómenos nocivos; a saber: debido a una dosificación deficiente de los ingredientes o al descuido de las operaciones a las que se somete el concreto, los ingredientes se pueden separar en tamaños o en pesos específicos perdiéndose la uniformidad y la calidad del concreto,

a este fenómeno se le conoce como “segregación” (Fig. 19) y, poco después de la colocación y durante los acabados, se puede presentar el “sangrado”, que consiste en una forma de segregación del agua, en la que tiende a subir a la superficie de la masa debido al fenómeno de capilaridad y a la incapacidad de retención de los sólidos; gran parte de esta agua, logra llegar a la superficie y otra parte queda atrapada pero segregada debajo de los agregados gruesos.



Segregación Normal: Los agregados de mayor tamaño o peso específico se separan y se depositan en el fondo.



Segregación Inversa: Los agregados de mayor tamaño o peso específico se separan y ascienden hacia la superficie.

Fig. 19. Tipos de segregación que se pueden producir en el concreto.
(Ref. Bibliografía 18)

Este fenómeno, produce un concreto muy poroso, con una falta parcial del contacto directo de los agregados con la pasta y con una cantidad de agua mayor en la superficie de concreto, que causaría problemas futuros en el comportamiento del concreto.

Por lo tanto, se puede decir que un concreto fresco es manejable, cuando ofrece la facilidad necesaria para ser procesado, moldeado y acabado, en condiciones específicas, sin presentar segregación, ni sangrado.

2.2.3.2. Propiedades del concreto endurecido

Son seis las propiedades del concreto en su estado endurecido:

- a) Impermeabilidad.
- b) Durabilidad.
- c) Resistencias mecánicas: compresión, tensión, flexión, cortante, fatiga, Impacto, abrasión, cavitación.
- d) Cambios volumétricos: contracción, expansión, deformación elástica, Deformación plástica
- e) Resistencia al fuego y a la radiactividad.
- f) Propiedades térmicas, acústicas y eléctricas.

De todas estas propiedades, las que más interesan a este trabajo, debido a su participación medular en las áreas de pavimentos y concreto propiamente dicho, son las que se apuntan a continuación: resistencias a la compresión, flexión y abrasión, cambios volumétricos y, en agregado a éstas el peso unitario del concreto.

Resistencia a la compresión: Se puede definir como la máxima resistencia medida en un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a una edad de 28 días y se le designa con el símbolo $f'c$. Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas sobre especímenes de mortero o de concreto; a menos que se especifique de otra manera, los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de 5 cm, en tanto que los ensayos a compresión del concreto se efectúan sobre cilindros que miden 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (Fig. 20). La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puentes, de edificios y otras estructuras.

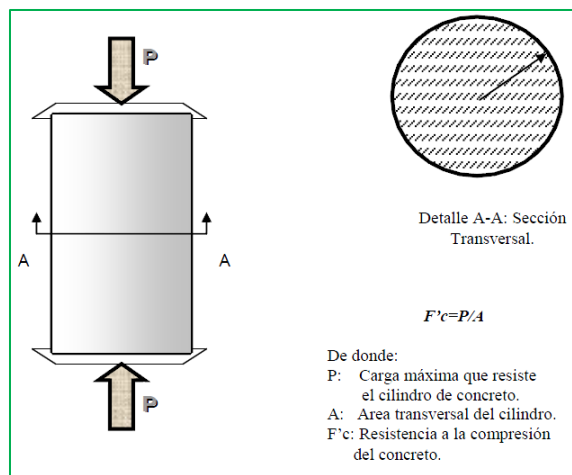


Fig. 20. Cilindro de concreto sometido a compresión. Fuente: Fabricación del concreto. (Ingenieros Civiles Asociados) (Ref. Bibliografía 20)

Resistencia a la flexión: Se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como un índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada Módulo de Ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 3.18 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

Resistencia al desgaste: Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste; por tanto, en estas aplicaciones el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión. Los resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión o desgaste está estrechamente relacionada con la resistencia a compresión del concreto. Un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja. Como la resistencia a la compresión depende de la relación agua-cemento y del curado, una relación agua-cemento baja, así como un curado adecuado son necesarios para obtener una buena resistencia al desgaste. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento utilizado también tienen fuerte influencia en la resistencia al desgaste. Un

agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando o esponjoso, y una superficie que ha sido tratada con llana de metal resiste más el desgaste que una que no lo ha sido.

Estabilidad Volumétrica: El concreto endurecido presenta ligeros cambios de volumen debido a variaciones en la temperatura, en la humedad y en los esfuerzos aplicados. Estos cambios de volumen o de longitud pueden variar desde aproximadamente 0.01% hasta 0.08%.

El concreto que se mantiene continuamente húmedo se dilatará ligeramente. Cuando se permite que seque, el concreto se contrae. El principal factor que influye en la magnitud de la contracción por secado, es el contenido de agua del concreto recién mezclado. La contracción por secado, aumenta directamente con los incrementos de este contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de otros factores, como las cantidades de agregado empleado, las propiedades del agregado, tamaño y forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación, y tiempo. El contenido de cemento tiene un efecto mínimo o nulo sobre la contracción por secado para contenidos de cemento entre 280 y 450 kg/m³.

Cuando el concreto se somete a esfuerzos, se deforma elásticamente; los esfuerzos sostenidos resultan en una deformación adicional llamada fluencia. La velocidad de la fluencia (deformación por unidad de tiempo) disminuye con el tiempo.

Peso Unitario: El concreto convencional, empleado normalmente en pavimentos, edificios y en otras estructuras tiene un peso unitario dentro del rango de 2,240 a 2,400 kg/m³. El peso unitario (densidad) del concreto varía, dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado, de la cantidad del aire atrapado o intencionalmente incluido, y de los contenidos de agua y de cemento, mismos que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado. En la Cuadro 1 se dan valores del peso unitario del concreto fresco. El peso del concreto seco iguala al peso del concreto recién mezclado menos el peso del agua evaporable. Una parte del agua de mezclado se combina químicamente con el cemento durante el proceso de

hidratación, transformando al cemento en gel de cemento. También un poco de agua permanece retenida herméticamente en poros capilares y no se evapora bajo condiciones normales.

La cantidad de agua que se evaporará al aire a una humedad relativa del 50% es aproximadamente de 2% a 3% del peso del concreto, dependiendo del contenido inicial de agua del concreto, de las características de absorción de los agregados, y del tamaño de la estructura.

Tamaño máximo del agregado, mm	Contenido de aire, por ciento	Agua (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)	Peso Unitario (kg/m ³)				
				Gravedad específica de agregados (Estado saturado superficialmente seco)				
				2.55	2.60	2.65	2.70	2.75
19	6.0	168	336	2,195	2,227	2,259	2,291	2,323
38	4.5	145	291	2,259	2,291	2,339	2,371	2,403
76	3.5	121	242	2,307	2,355	2,387	2,435	2,467
152	3.0	97	167	2,355	2,387	2,435	2,467	2,515

Cuadro 1. Peso promedio observado en concretos frescos. Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto. (Ref. Bibliográfica 22)

2.3. CEMENTO

2.3.1. Generalidades

En los primeros años del siglo diecinueve, el Británico Joseph Aspdin fue el primero en obtener una patente para fabricar un cemento a base del calentamiento de una mezcla de caliza finamente molida y arcilla, cuyo producto en polvo se endurecía al mezclarse con agua. Dicho producto fue nombrado “Cemento Pórtland” debido a su similitud con las rocas que se encuentran en la Isla de Pórtland.

Lo anterior fue el inicio de la industria de los cementos hidráulicos, la que ha ido perfeccionando sus procesos de producción y mejorando la selección de los materiales necesarios para su fabricación, de tal manera que el producto cementante

cumpla ciertas características químicas y físicas a partir de un cuidadoso control de calidad.

2.3.2. Cementos Hidráulicos

Son todos aquellos conglomerados que amasados con el agua, fraguan y endurecen, tanto expuestos al aire como sumergido en agua, presentando un proceso de reacción química que se conoce como hidratación.

El cemento Portland, se fabrica a partir de materiales minerales calcáreos tales como la caliza y materiales arcillosos con alto contenido de alúmina y sílice.

Con frecuencia es necesario adicionar productos como el óxido de hierro para mejorar la composición química de las materias primas principales. La mezcla de materias primas ha de hacerse de tal forma que cada uno de los componentes químicos básicos, se encuentren en proporciones previamente fijadas. El clínker que se obtiene calcinando la mezcla cruda, deberá poseer una cantidad correcta de los minerales fundamentales, es decir; de silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) y aluminoferrito tetracálcico (C4AF).

En términos prácticos, se concede que los silicatos de calcio son los componentes más deseables, porque al hidratarse son los responsables de la resistencia mecánica y otras propiedades del concreto. El aluminato tricálcico es el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, por lo que propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo del calor de hidratación en el concreto. El aluminoferrito tetracálcico es un compuesto relativamente inactivo, pues contribuye poco a la resistencia del concreto.

Otro aspecto importante relativo a la composición química del clínker, se refiere a los álcalis, óxidos de sodio y potasio, cuyo contenido suele limitarse para evitar reacciones dañinas con ciertos agregados en el concreto (esto ha dado motivo para el establecimiento de un requisito químico opcional, aplicable a todos los tipos de cemento Portland, que consiste en ajustar el contenido de álcalis totales, expresado como Na_2O , a un máximo de 0.60 % cuando se requiere emplear el cemento junto con agregados reactivos).

Al obtener el clínker, éste se enfría y se tritura hasta lograr un polvo fino, el cual es mezclado con yeso para tener como producto final el cemento Portland. En algunos casos, además del yeso, se suman otros materiales con características especiales como por ejemplo puzolanas, que son materiales eminentemente sílico-aluminosos, que carecen de toda actividad hidráulica y propiedades cementantes por sí solos, conteniendo constituyentes que a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, se combinan con el hidróxido de calcio para formar compuestos permanentemente insolubles en agua y estables, los que se comportan como conglomerantes hidráulicos

2.3.3. Principales características físicas de los cementos

A pesar de que el cemento representa solamente entre 6% y 15% en peso de la mezcla, sus propiedades influyen grandemente en el comportamiento del mismo en cuanto a trabajabilidad y resistencia.

Algunas de las propiedades físicas importantes de este material cementante son las presentadas a continuación:

Finura: Dicha propiedad influye en el calor de hidratación, en la ganancia de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla de concreto. Los materiales cementantes más finos reaccionan de forma más rápida al contacto con el agua, con un correspondiente incremento en la ganancia de resistencias tempranas. También influye en la trabajabilidad, ya que a mayor finura del cemento se incrementa el área superficial. La finura del cemento estará definida por el tamaño de la partícula del material; esta propiedad se expresa como: Retenido en tamiz No.325 (45 μm); Blaine: Superficie específica cm^2/g .

Hidratación: Es la reacción que se produce entre el agua y los componentes del cemento. Los factores determinantes en este proceso son el clínker, yeso, finura, temperatura y cantidad de agua.

Tiempo de Fraguado: Se refiere al cambio que sufre la pasta de cemento del estado fluido al estado rígido. Dicho valor es un índice del rango en el cual la reacción de hidratación está ocurriendo y se desarrolla la resistencia. Los productos formados por

la hidratación constituyen un gel formando inicialmente una pasta más o menos fluida o plástica. El fraguado se produce en dos fases:

Fraguado inicial: Se da cuando la masa empieza a perder plasticidad, aun cuando incluso se nota cierta consolidación.

Fraguado final: Cuando por si solo y sin que se someta la pasta a presiones o cargas, esta conserva su forma.

Resistencia Mecánica: La resistencia del mortero o el concreto endurecido, esta con relación a las características del cemento usado. Dicha propiedad se determina a través de la resistencia a la compresión en cubos de mortero preparados, usando una arena de graduación estandarizada.

2.3.4. Clasificación de los cementos en función del desarrollo de su resistencia

Alta resistencia inicial: en 72 horas alcanzan valores superiores a 4000 psi.

Endurecimiento rápido: son los que teniendo una resistencia considerable a 28 días, a la edad de 3 días han desarrollado al menos un 60% de su resistencia.

Endurecimiento lento: hasta los 7 días su crecimiento es lento, luego incrementa rápidamente pero de manera especial de los 28 a 90 días.

Algunas normas internacionales establecen ciertos requisitos que deben cumplir los cementos hidráulicos para garantizar su calidad. De acuerdo a lo establecido en la subsección 701.01 de Standar Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highways Projects, Edición 1996 (FP-96), el cemento hidráulico debe cumplir lo indicado en la especificación que le corresponde, según la tabla siguiente:

TIPO	ESPECIFICACIÓN
Cemento Pórtland	AASHTO M 85
Cemento Hidráulico Mezclado	AASHTO M 240
Cemento para Mampostería	ASTM C 91

Cuadro 2. Normas para los cementos hidráulicos.

Fuente: (Ref. Bibliografía 22)

Así también, las Especificaciones de la American Society for Testing and Materials (ASTM), establecen ciertos requisitos que deben cumplir los cementos hidráulicos para garantizar su calidad, las cuales se indican a continuación:

- a) ASTM C 91, Standar Specification for Masonry Cement.
- b) ASTM C 150, Standar Specification for Portland Cement.
- c) ASTM C 595, Standar Specification for Blended Hydraulic Cements.

Dichas normas, poseen dos tipos de especificación: las prescritas y las de comportamiento o desempeño. Las primeras, proporcionan límites en la composición química y restricciones en los ingredientes utilizados para la fabricación del cemento, que están indirectamente relacionados con el comportamiento. Mientras que las especificaciones por comportamiento o desempeño, únicamente limitan aspectos relacionados con las propiedades físicas, tales como tiempo de fraguado, resistencia y durabilidad, por lo que no restringen el uso de materiales o las proporciones de los mismos. Las normas ASTM C 150 y ASTM C 595 contienen ambos tipos de especificación. En cambio la norma ASTM C 1157, emitida en 1992, evalúa la calidad de los cementos combinados únicamente con base a su desempeño o comportamiento y en 1998 fue ampliada para evaluar los cementos Portland.

2.4. MATERIALES PÉTREOS UTILIZADOS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

En las mezclas de concreto hidráulico convencional, los agregados suelen representar entre 60 y 75 % aproximadamente del volumen absoluto de todos los componentes; de allí, la notable influencia que las características de los agregados ejercen en las del concreto.

Una característica importante del concreto es su peso unitario, porque es índice de propiedades que a su vez influyen decisivamente en el empleo que se le da. Como es evidente, dicha característica del concreto depende principalmente del peso específico de los agregados que lo integran.

De acuerdo a su tamaño, los agregados se clasifican en finos y gruesos. Los primeros comúnmente consisten en arena natural; la ASTM, los define como el material que pasa la malla #4 (4.76 mm) y se retiene en la malla # 200 (0.074 mm), las partículas entre 0.074 y 0.002 mm se clasifican como limos, y los más pequeños se denominan arcillas.

Los agregados gruesos, son una combinación de gravas naturales o rocas trituradas y de acuerdo a la ASTM son el material que se retiene en la malla # 4 (4.76 mm).

Los agregados deben cumplir con ciertas características antes de ser utilizados, sus partículas deben ser durables, limpias, resistentes y libres de productos químicos, recubrimiento de arcilla y de otros materiales finos que puedan afectar la adherencia con la pasta, las partículas desmenuzables o que tiendan a resquebrajarse deben evitarse.

2.4.1. Características de los Agregados

Las principales características a observar en los agregados para concreto son las siguientes:

2.4.1.1. Granulometría

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un árido, que se determina a través del análisis con los tamices (cedazos, cribas) (ASTM C 136, AASHTO T27).

El tamaño de las partículas del árido se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices normalizados para el árido fino tienen aberturas que varían de 150 μm a 9.5 mm (Tamiz No.100 a 3/8 pulg.) (INEN 872, ASTM C 33, AASHTO M6/M80).

Los números de tamaño (tamaño de granulometría) de los áridos gruesos se aplican a las cantidades de árido (en masa), en porcentaje que pasa a través de un conjunto de tamices (Fig. 5.1). En la construcción de autopistas, la ASTM D 448, AASHTO M 43, lista los mismos 13 números de tamaño de la INEN 872, ASTM C 33 o AASHTO M 6/M 80, más seis números adicionales de áridos gruesos. El árido fino o la arena

tiene solamente un rango de tamaño de partículas para la construcción en general y para la construcción de carreteras. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del hormigón de una mezcla otra.

Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad. En general, los áridos que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios.

La granulometría y los límites granulométricos se expresan generalmente en porcentaje de material que pasa a través de cada tamiz.

La producción de un hormigón satisfactorio y económico requiere áridos con baja cantidad de vacíos, pero no la más baja. Se pueden ensayar los vacíos de los áridos según INEN 858, ASTM C 29 o AASHTO T 19.

a) Granulometría del Árido Fino

Los requisitos de la granulometría de los áridos finos son los indicados en las normas INEN 872, ASTM C 33 o AASHTO M6/M80. La granulometría más deseable para el árido fino depende del tipo de obra, si la mezcla es rica y del tamaño máximo del árido grueso. En mezclas más pobres, o cuando se usan áridos gruesos de pequeñas dimensiones, es conveniente, para que se logre una buena trabajabilidad, que la granulometría se aproxime al porcentaje máximo recomendado que pasa por cada tamiz. En general, si se mantiene constante la relación agua-cemento y se elige correctamente la relación árido fino-árido grueso, se puede usar un amplio rango de granulometrías, sin efectos considerables sobre la resistencia.

Las especificaciones de la AASHTO, permiten que los porcentajes mínimos (por masa) de material que pasa en los tamices de 300 μm (No.50) y 150 μm (No.100) se reduzcan a 5% y 0%, respectivamente, siempre que:

1. Se use el árido en un hormigón con aire incluido (incorporado) que contenga más de 237 kg de cemento por m^3 de hormigón y más del 3% de contenido de aire (AASHTO).

2. Se use el árido en un hormigón que contenga más de 297 kg de cemento por m³ de hormigón, cuando el hormigón no tenga aire incluido (AASHTO).
3. Se use material cementante suplementario aprobado, a fin de suplir la deficiencia de material que pasa en los dos tamices.

b) Granulometría del Árido Grueso

Los requisitos de granulometría del árido grueso esta dado según las normas INEN 872, ASTM C 33 o AASHTO M 80. La granulometría del árido grueso con un determinado tamaño máximo puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, si las proporciones del árido fino, con relación a la cantidad total de áridos, producen un hormigón con buena trabajabilidad.

Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un hormigón trabajable si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del árido grueso. Como estas variaciones son difíciles de predecir, frecuentemente es más económico mantener la uniformidad de la producción y el manejo del árido grueso, para que se reduzcan las variaciones de la granulometría.

El tamaño máximo del árido grueso influye en la economía del hormigón. Normalmente, se requiere más agua y cemento en hormigones con áridos gruesos de tamaño máximo menor si es comparado con áridos de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial total del árido.

Algunas veces, hay una confusión entre el significado del tamaño máximo del árido. Las siguientes instituciones: ASTM C 125, Nch 163, NTC 385, NTE INEN 0694:83, NTP 400.037, UNIT-NM 2 y el ACI 116 definen este término como el menor tamiz por el cual toda la muestra de árido grueso debe pasar.

El tamaño máximo nominal se define por la ASTM C 125 y por el ACI 116 como el menor tamiz por el cual la mayor parte de la muestra de árido grueso debe pasar. El tamiz del tamaño máximo nominal puede retener del 5% a 15% de la masa, dependiendo del número de tamaño.

El tamaño máximo de árido que se puede utilizar depende del tamaño y de la forma del miembro de hormigón y de la cantidad y distribución del acero de refuerzo (armadura). Normalmente, el tamaño máximo del árido no puede exceder:

1. “Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de hormigón.”
2. “Tres cuartos del espacio libre entre las barras de acero del refuerzo y entre las varillas de refuerzo y las cimbras (encofrados).”
3. “Un tercio de la profundidad de las losas.”

2.4.1.2. Módulo de Finura

El módulo de finura (MF) tanto del árido fino como del grueso se calcula de acuerdo con la norma ASTM C 125 sumándose los porcentajes acumulados de la masa retenida en cada uno de los tamices de la serie especificada y dividiéndose esta suma por 100. La serie especificada de tamices para la determinación del MF es: 150 μm (No. 100), 300 μm (No. 50), 600 μm (No. 30), 1.18 mm (No. 16), 2.36 mm (No. 8), 4.75 mm (No. 4), 9.5 mm (3/8 pulg.), 19.0 mm (3/4 pulg.), 37.5 mm (1 1/2 pulg.), 75 mm (3 pulg.) y 150 mm (6 pulg.). El MF es un índice de finura del árido – cuanto mayor el MF, más grueso es el árido. Áridos con granulometrías diferentes pueden tener el mismo MF. El MF de los áridos finos es útil para estimar las proporciones de los áridos fino y grueso en el hormigón.

2.4.1.3. Forma y Textura Superficial de las Partículas

La forma y la textura superficial de las partículas de un árido influyen en las propiedades del hormigón fresco más que las del hormigón endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o elongadas requieren más agua para producir un hormigón trabajable, que con áridos lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de árido angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua/material cementante. Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los áridos triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente, producen hormigones con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de

cemento. Los áridos angulares o con granulometría pobre también pueden ser más difíciles de bombear.

La adherencia entre la pasta de cemento y un determinado árido generalmente aumenta con el cambio de partículas lisas y redondeadas por las ásperas y angulares.

Cuando la resistencia a flexión es importante o cuando se necesite alta resistencia a compresión, se debe considerar este aumento de la adherencia al elegirse el árido para el hormigón.

La cantidad de vacíos de los áridos fino y grueso compactados se puede usar como un índice de las diferencias en la forma y la textura de los áridos con la misma granulometría. La demanda de agua de mezcla y cemento normalmente aumentan con el aumento de la cantidad de vacíos. Los vacíos entre las partículas de áridos aumentan con la angulosidad del árido.

El árido debe ser relativamente libre de partículas planas y elongadas. Una partícula se considera plana y elongadas cuando la relación entre longitud y espesor supera un valor especificado. Consulte la ASTM D 4791 para la determinación de las partículas planas y/o alongadas.

La ASTM D 3398 suministra un método indirecto para establecer un índice como una medida general de la textura y forma de las partículas, mientras que la ASTM C 295, presenta procedimientos para el examen petrográfico del árido.

Las partículas planas y elongadas se deben evitar o, por lo menos, limitar a cerca del 15% de la masa total del árido. Este requisito es igualmente importante para el árido grueso y para el árido fino triturado, pues el árido fino obtenido por la trituración de la roca frecuentemente contiene partículas planas y elongadas.

Estas partículas de árido requieren un aumento del agua de mezcla y, por lo tanto, pueden afectar la resistencia del hormigón, principalmente a flexión, si no se ajusta la relación agua-cemento.

Están disponibles varias máquinas de ensayo para la determinación rápida de la distribución del tamaño de las partículas del árido. Diseñadas para dar una alternativa

más rápida al ensayo normalizado de análisis granulométrico, estas máquinas captan y analizan imágenes digitales de las partículas de árido para determinar la granulometría. Otras máquinas usan cámaras con escáner de matriz que captan fotos bi-dimensionales del árido que cae.

2.4.1.4. Masa Volumétrica (Masa Unitaria) y Vacíos

La masa volumétrica (masa unitaria) de un árido es la masa del árido necesario para llenar un recipiente con un volumen especificado. El volumen a que se refiere aquí es aquél ocupado por los áridos y por los vacíos entre las partículas de árido.

La masa volumétrica aproximada del árido comúnmente usado en el hormigón de masa normal varía de 1200 a 1750 kg/m³. La cantidad de vacíos entre las partículas afecta la demanda de pasta en el diseño de la mezcla. La cantidad de vacíos varía de cerca del 30% a 45% para el árido grueso y de cerca del 40% a 50% para el árido fino. La angulosidad aumenta la cantidad de vacíos.

Los métodos para la determinación de la masa volumétrica del árido y el contenido de vacíos se encuentran en las normas INEN 858, ASTM C 29 y AASHTO T 19.

En estas normas, se describen tres métodos para la consolidación del árido en el recipiente, dependiendo del tamaño máximo del árido: varillado, sacudido y vaciado con pala. La medición del contenido de vacíos suelto del árido fino se presenta en la ASTM C 1252.

2.4.1.5. Masa Específica Relativa (Densidad Relativa, Gravedad Específica)

La masa específica relativa (densidad relativa, gravedad específica) de un árido es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Se la usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el árido en el método del volumen absoluto de diseño de mezcla.

Normalmente no se la usa como una medida de la calidad del árido, aunque algunos áridos porosos que exhiben deterioro acelerado por congelación- deshielo presentan baja gravedad específica. La mayoría de los áridos naturales tiene masas específicas

relativas que varían de 2.4 a 2.9, con masa específica correspondiente de las partículas de 2400 a 2900 kg/m³.

Los métodos de ensayo para la determinación de la masa específica relativa de los áridos fino y grueso se describen en las normas INEN 857, ASTM C127, AASHTO T 85 e INEN 856, ASTM C 128, AASHTO T 84, respectivamente. La masa específica relativa de un árido se puede determinar en la condición seca al horno o saturada con superficie seca.

Ambas masas específicas se pueden utilizar en los cálculos del proporcionamiento del hormigón. Los áridos secados al horno no contienen ninguna agua absorbida ni tampoco agua libre. Se las seca en un horno hasta la constancia de masa. Los áridos saturados con superficie seca son aquéllos cuyos poros de cada partícula de árido están llenos de agua, pero no hay exceso de agua en la superficie de las partículas.

2.4.1.6. Masa Específica (Densidad)

La masa específica (densidad) de las partículas que se usa en los cálculos de proporcionamiento (no incluyen los vacíos entre las partículas) se determina por la multiplicación de la masa específica relativa de los áridos por la densidad del agua. Se usa un valor para la densidad del agua de aproximadamente 1000 kg/m³. La masa específica del árido, juntamente con valores más precisos de la densidad del agua, se presentan en las normas INEN 857, ASTM C 127, AASHTO T 85 y INEN 856, ASTM C 128 AASHTO T 84.

2.5. AGUA PARA CONCRETO

2.5.1. Consideraciones Generales

En relación con su empleo en el concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas.

Aunque en estas aplicaciones, las características del agua tienen efectos de diferente importancia sobre el concreto, es usual que se recomiende emplear agua de una sola calidad en ambos casos. Así normalmente, en las especificaciones para concreto se hace referencia en primer término a los requisitos que debe cumplir el agua para elaborar el concreto, porque sus efectos son más importantes, y después se indica que el agua que se utiliza para curarlo debe ser del mismo origen, o similar, para evitar que se subestime esta segunda aplicación y se emplee agua de curado con características inadecuadas.

En determinados casos se requiere, con objeto de disminuir la temperatura del concreto al ser elaborado, que una parte del agua de mezclado, se administre en forma de hielo molido. En tales casos, el agua que se utilice para fabricar el hielo debe satisfacer las mismas especificaciones de calidad que el agua de mezclado.

Como componentes del concreto convencional, el agua suele representar entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos significativos en el concreto.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico – químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto.

Cuando la obra se localiza en las inmediaciones de un centro de población, es pertinente distinguir entre el agua para uso doméstico y para uso industrial. La primera por lo general, reúne condiciones físico – químicas de potabilidad, salvo eventuales fallas en el aspecto bacteriológico, que pueden hacerla impropia para el consumo humano, pero no afectan al concreto. El agua para uso industrial por lo común no es potable, no sólo bacteriológicamente, sino también en el aspecto físico –

químico, pues frecuentemente proviene del tratamiento de aguas negras o es agua reciclada de procesos industriales, por lo cual puede contener sustancias dañinas al concreto. Por tal motivo, siempre es necesario verificar la calidad del agua de uso industrial, a menos que tenga antecedentes de uso con buen éxito en la fabricación de concreto.

En sitios alejados de los centros de población, podemos encontrar los pozos, manantiales, corrientes superficiales (arroyos y ríos), almacenamientos naturales (lagos y lagunas) y almacenamientos creados artificialmente (vasos de presas). Salvo que existan antecedentes de uso del agua en la fabricación de concreto con buenos resultados, debe verificarse invariablemente su calidad antes de emplearla.

En cuanto al agua de mar, su principal inconveniente al ser juzgada como agua de mezclado para concreto, consiste en su elevado contenido de cloruros (más de 20,000 ppm) que la convierten en un medio altamente corrosivo para el acero de refuerzo, y esto la hace inaceptable para su empleo en el concreto reforzado. Refiriéndose a las características físicas – químicas del agua para concreto, no parece haber consenso general en cuanto a las limitaciones que debe imponerse, sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo, es que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son francamente dañinas como: grasas, aceites, azúcares y ácidos, por ejemplo. La presencia de alguna de estas sustancias, que por lo demás no es común, debe tomarse como un síntoma de contaminación que requiere eliminarse antes de considerar la posibilidad de emplear el agua.

2.6. HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS

2.6.1. Características del hormigón para pavimentos

Los hormigones empleados en los pavimentos de hormigón se denominan como HF (Hormigón de Firme) y la resistencia característica a flexotracción a los 28 días expresada en megapascales (MPa), de esta forma se distinguen tres hormigones que son el Hf-4,5, HF-4,0 y HF-3,5.

En estos hormigones es normal el uso de fluidificantes para poder reducir el contenido de agua en el hormigón, también es común el uso de aireantes, que son obligatorios en zonas sometidas a nevadas o heladas.

2.6.2. Parámetros de durabilidad del concreto hidráulico para pavimentos

La durabilidad del concreto empleado para la construcción de pavimentos debe estudiarse en función de la influencia que en ella ejercen:

los materiales constituyentes del concreto, los procesos de construcción a los que se somete el concreto, las propiedades químicas y físicas del concreto, los tipos de carga y la naturaleza del ambiente al que es expuesto el pavimento. Asimismo debe analizarse la degradación que sufre al ser expuesto a: procesos de congelación y descongelación, efecto de elevados gradientes de temperatura y fuertes oscilaciones de la humedad relativa

En el caso de los pavimentos de concreto reforzado con pasajuntas o con pasajuntas y barras de amarre, debe además estudiarse: el efecto de la corrosión del acero de refuerzo en el deterioro de los pavimentos, la contaminación por sulfatos la carbonatación, la contaminación por cloruros el efecto que los aditivos empleados ejercen en la durabilidad de las mezclas de concreto elaboradas en la construcción de pavimentos.

2.6.3. Propiedades del concreto para pavimento rígido

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño y en su comportamiento a lo largo de su vida útil.

→ Resistencia a la tensión por flexión o Módulo de Ruptura (MR)

→ Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

2.6.4. Calidad del concreto para pavimento rígido.

Las mezclas del Concreto Hidráulico para Pavimentos deben de estar previstas para:

- a) Garantizar una durabilidad satisfactoria dentro de las condiciones de requerimiento del Pavimento.
- b) Para asegurar la resistencia deseada a la flexión.

La flexión en los Pavimentos de Concreto Hidráulico, bajo las cargas aplicadas por los neumáticos, produce esfuerzos de compresión y tensión. Los esfuerzos de compresión son pequeños en relación a la resistencia de la misma, y sin mayor incidencia en el espesor de la losa.

Por lo tanto el concreto hidráulico que se utiliza en los pavimentos se especifica por su resistencia a la flexión, medida por el Módulo de Rotura a Flexión, a los 28 días.

(MR) expresada en kg/cm² y generalmente varía entre los siguientes valores:

$$40 \leq MR \leq 50$$

2.7. MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO

2.7.1. Introducción

Es un parámetro muy importante en el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por flexión.



Fig. (c) Ensayo de una viga a Flexión
(Ref. Bibliografía 12)

El módulo de rotura también se puede determinar a través de las siguientes correlaciones:

Estimación a través de la resistencia a compresión del concreto.

$$S'_c = k(f'_c)^{0.5} \quad \Rightarrow \quad 7 < k < 12$$

Dónde: f = Resistencia a compresión del concreto en psi.

Estimación a través de la resistencia a la tracción indirecta.

$$S'_c = 210 + 1.02IT$$

Dónde: IT = Tracción indirecta medida en las probetas en psi.

Los valores del módulo de rotura varían entre 2.8 MPa (400 psi) y 4.8 MPa (700 psi), llegando incluso a valores de 8.2 MPa (1200 psi), en concretos con alta resistencia inicial.

2.7.2. Módulo de Ruptura (Resistencia de Tensión por Flexión)

En estructuras que trabajan predominantemente a flexión, como es el caso de los pavimentos de concreto hidráulico, el diseño estructural se realiza con base en la resistencia del concreto a tensión o flexión.

Existen dos ensayos, para determinar la resistencia de concreto a tensión por flexión. En ambos ensayos se utiliza el mismo tipo de espécimen prismático, que se prueba a flexión como viga libremente apoyada, pero con la diferencia del modo como se le aplica la carga: en un caso, la flexión se produce con una carga concentrada en el centro del claro, y en el otro con dos cargas concentradas iguales, aplicadas en los tercios del claro. Ambos modos de ensayo, se encuentran normalizados conforme a los métodos de prueba ASTM C 293 y ASTM C 78 respectivamente; sin embargo, en la práctica se prefiere el segundo (con cargas iguales en los tercios del claro) porque en esta condición de carga, todo el tercio central del espécimen queda sometido al momento máximo de flexión y al correspondiente esfuerzo máximo de tensión,

creando un estado constante de esfuerzo, que da oportunidad para que la falla ocurra dentro de este tramo central, según se representa en el esquema de la Fig. 21.

La resistencia a tensión del concreto determinada por flexión, suele manifestar valores más elevados que por los obtenidos por tensión directa e indirecta, debido a la distribución no uniforme de esfuerzos en la sección de falla, que restringe la propagación de las grietas y las simplificaciones teóricas que se hacen para el cálculo del esfuerzo máximo, a los cuales se suma en este caso, cierto efecto de trabazón entre la pasta de cemento y el agregado grueso, particularmente, cuando este se ha constituido por fragmentos producto de la trituración de una roca de buena calidad. Por todo ello, frecuentemente se dice que en esta forma de ensaye se sobrestima la resistencia a tensión del concreto; no obstante, por considerar la representatividad de las condiciones operativas del concreto en las estructuras que trabajan a flexión, como es el caso de los pavimentos rígidos, se le considera la forma apropiada para definir y verificar la resistencia de diseño de estas estructuras.

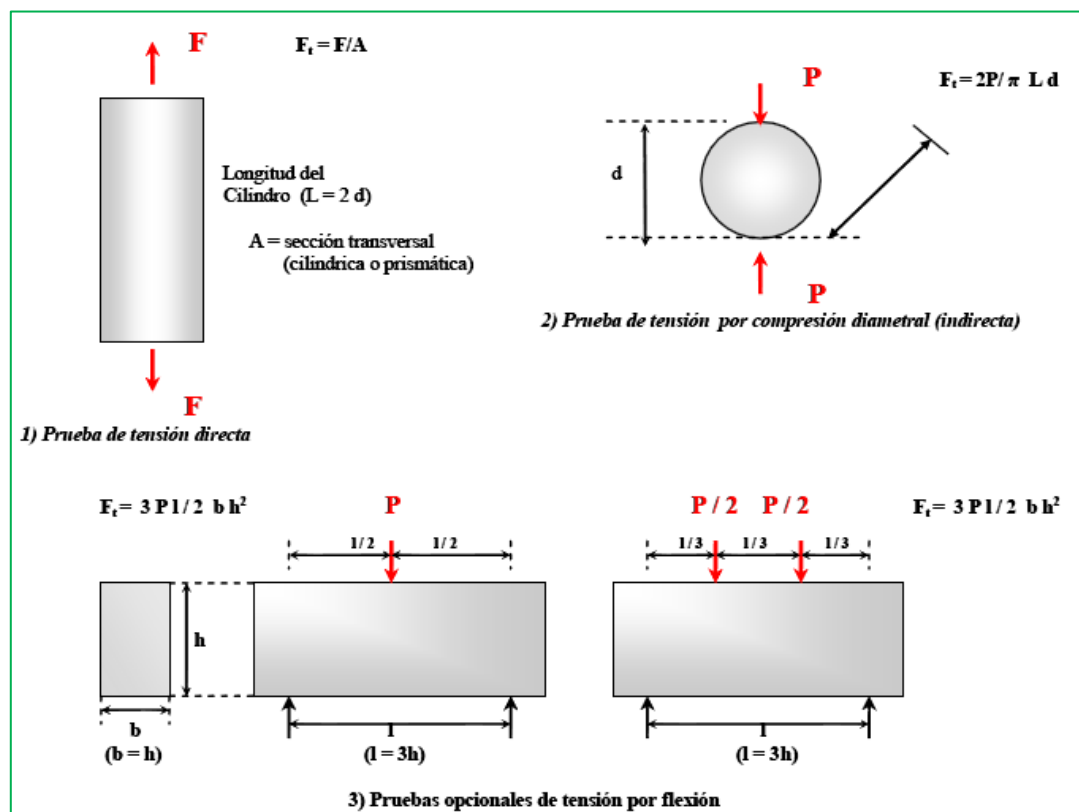


Fig. 21. Representación esquemática de los procedimientos usuales para determinar la resistencia a tensión del concreto. (Ref. Bibliografía 14)

Conforme al método normal de prueba (ASTM C 78), el ensaye debe realizarse en especímenes de forma prismática y sección rectangular que cumplan con los requisitos dimensionales establecidos para su elaboración en los métodos ASTM C 31 y ASTM C 192, como sigue:

La sección puede ser rectangular o cuadrada, y si es rectangular el peralte h no debe exceder a 1.5 veces el ancho b ; la longitud del espécimen (viga) debe ser por lo menos 50 mm mayor que el triple del peralte, a fin de que el claro de prueba sea exactamente igual a $3h$; el ancho b , debe ser igual o mayor que tres veces el tamaño máximo del agregado que contenga el concreto.

No obstante, con el fin de eliminar variables y hacer el resultado de esta prueba más comprensible, en dichos métodos se considera como espécimen estándar la viga de sección cuadrada de 152 x 152 mm o (6 x 6 pulg) y longitud igual a 508 mm (20 pulg), que es aplicable a todo concreto cuyo tamaño máximo de agregado no exceda a 51 mm (2 pulg). Cabe hacer notar, que cuando se trata de ensayar a flexión especímenes prismáticos extraídos de la estructura (generalmente losas de pavimento) el método ASTM C 42 también recomienda el uso de la viga estándar de 152 x 152 mm, pero admite el empleo de vigas con menores dimensiones, condicionadas al espesor de la losa y al tamaño máximo del agregado.

El ensaye a tensión por flexión, consiste esencialmente en colocar la viga en posición horizontal, apoyada libremente en sus extremos, y transmitirle en todo el ancho de la viga dos cargas iguales en los tercios del claro, como se muestra en el esquema 3 de la fig. 21, tomando precauciones para que tanto las reacciones en los apoyos como las cargas en los tercios actúen verticalmente, y colocando en las líneas de contacto de concreto con el dispositivo de apoyo y de transmisión de carga, sendas tiras de material compresible (usualmente cuero) para evitar la concentración de esfuerzos cuando en la superficie de concreto hay desviaciones mayores de 0.038 mm con respecto a una superficie plana.

La aplicación de carga debe iniciarse sin choque y puede conducirse con cierta rapidez hasta llegar aproximadamente a la mitad de la carga máxima prevista, y

después debe continuarse a una velocidad constante que produzca un aumento en el esfuerzo máximo a tensión comprendido entre 8.8 y 12.3 kg/cm²/min, que para el caso de la viga estándar de 152 x 152 mm corresponde a una velocidad de carga, comprendida entre 11 y 16 Kg/seg aproximadamente.

Este proceso de carga debe prolongarse hasta que se produzca la falla de la viga, a fin de registrar la carga máxima alcanzada como dato para calcular el esfuerzo máximo de tensión producido por flexión, en el plano inferior de la viga a cuyo esfuerzo máximo se le denomina Módulo de Ruptura por Flexión del Concreto. En condiciones normales la falla de la viga debe ocurrir dentro del tercio central y el Módulo de Ruptura (MR) se determina por la expresión:

Dónde:
 P= Carga máxima en Kg.
 l= Claro en cm.
 b= Ancho en cm.
 h= Peralte en cm.

$$MR = \frac{Pl}{bh^2}$$

Si la sección de falla ocurre fuera del tercio central (pero sin exceder más del 5% del claro) el método recomienda calcular el método de ruptura por la expresión:

Dónde:
 a= Distancia media entre la línea de fractura y el apoyo más próximo, medida sobre la superficie a tensión de la viga (cm).

$$MR = \frac{3Pa}{bh^2}$$

Finalmente, si la sección de falla queda fuera del tercio central, a una distancia que exceda 5% del claro el resultado del ensayo debe desecharse.

El estado de humedad del espécimen del concreto en el momento de ensayarlo a tensión por flexión, influye en la magnitud de su Módulo de Ruptura de la siguiente manera: si el espécimen se ensaya completamente seco, su resistencia a tensión por flexión suele ser mayor que si se ensaya completamente saturado, pero si se le ensaya parcialmente seco, su resistencia a tensión por flexión tiende a disminuir (con respecto a su estado saturado) en una proporción significativa que puede llegar a representar una pérdida de resistencia hasta del 40%, lo cual se atribuye a los

esfuerzos de tensión que son inducidos en el concreto a causa de la contracción que experimente cuando pierde humedad. Para prevenir este efecto adverso a la resistencia a tensión por flexión, en los métodos de prueba ASTM C 31 y C 192 se hace notar la necesidad de evitar cualquier secado superficial de las vigas antes de su ensaye.

2.7.3. Importancia del módulo de rotura en los pavimentos rígidos

Los diseñadores de pavimentos utilizan una teoría basada en la resistencia a la flexión, por lo tanto, puede ser requerido el diseño de la mezcla en el laboratorio, basado en los ensayos de resistencia a la flexión, o puede ser seleccionado un contenido de material cementante, basado en una experiencia pasada, para obtener el Módulo de Rotura de diseño.

El Módulo de rotura es utilizado en el diseño, bajo el criterio de la fatiga que sufren los materiales por el paso de las cargas impuestas por los vehículos pesados, que tienden a producir agrietamiento en el pavimento.

La deformación que se produce en el pavimento de hormigón por efecto de las cargas, hace que las losas estén sometidas a esfuerzos de tensión y compresión. La relación existente entre las deformaciones debido a las cargas y los esfuerzos de compresión es muy baja como para incidir en el diseño del espesor de la losa. La relación entre la tensión y la flexión son mayores, situación que afecta el espesor de la losa. De lo anterior se deduce que los esfuerzos y la resistencia a la flexión son factores principales a considerar en el diseño de pavimentos rígidos.

2.8. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

2.8.1. Introducción

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto. En los pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del concreto, son los que rigen el estado de tensiones en las armaduras.



**Fig. (d) Módulo de elasticidad
(Ref. Bibliografía 23)**

Para concreto de peso normal, el Instituto del Concreto Americano ACI sugirió:

$$E_c = 57000 * f_c^{0.5}$$

Dónde:
Ec y f^c están dados en psi.

$$E_c = 4779.4 * f_c^{0.5}$$

Dónde:
Ec= Modulo de elasticidad del hormigón (MPa)
f^c= Resistencia a la compresión cilíndrica (MPa)

El Módulo de Elasticidad del concreto está íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad a partir del Módulo de Ruptura

Los dos más utilizados son:

$$\begin{array}{ccc} & \downarrow & \downarrow \\ E_c = 6750 * MR & & E_c = 26454 * MR^{0.77} \end{array}$$

Estas fórmulas aplican con unidades inglesas, la primera recomendada por la AASHTO y Asociación Americana de Pavimento de Concreto (ACPA).

2.8.2.- Módulo de Elasticidad (E_c)

Cuando un espécimen de concreto endurecido se somete por primera vez a una carga de compresión axial, que se incrementa progresivamente a velocidad uniforme hasta un valor inferior al de ruptura y después se retira a la misma velocidad, ocurre lo que se indica esquemáticamente en la Fig. 22.

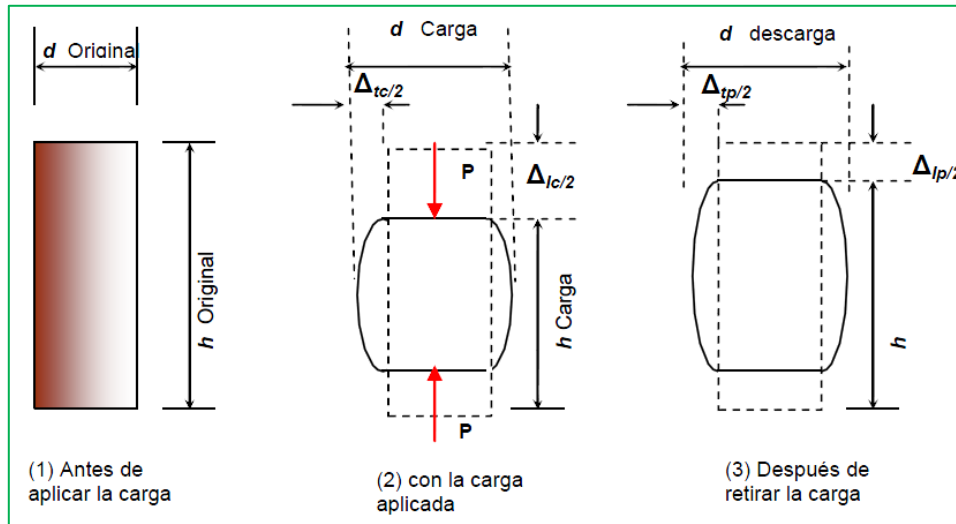


Fig. 22. Representación esquemática de las deformaciones de un espécimen cilíndrico de concreto a compresión axial, durante y después de la aplicación de carga. Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

En el esquema (1) de esta figura, se representa un espécimen cilíndrico de diámetro d y altura h , antes de aplicarle la carga; una vez aplicada la carga hasta llegar al valor P , (que produce una deformación longitudinal Δ_{lc} y una deformación transversal simultánea Δ_{tc} , según se muestra en el esquema (2)); después de retirar completamente la carga, el espécimen no recupera totalmente sus dimensiones originales, quedándole una deformación permanente, tanto en dirección longitudinal (Δ_{lp}) como en dirección transversal (Δ_{tp}), como se hace notar en el esquema (3).

Si durante el proceso de carga y descarga completo en el espécimen, se miden las deformaciones parciales (δ) a diferentes niveles del esfuerzo aplicados (ζ) se pueden obtener pares de datos (esfuerzo y deformación) que al ser representadas en un sistema de ejes ortogonales, con las deformaciones como abscisas y los esfuerzos

longitudinales como ordenadas, producen una gráfica como la indicada en la Fig 23, la cual identifica la manera cómo evolucionan las deformaciones longitudinales del espécimen en el curso de este proceso de carga y descarga.

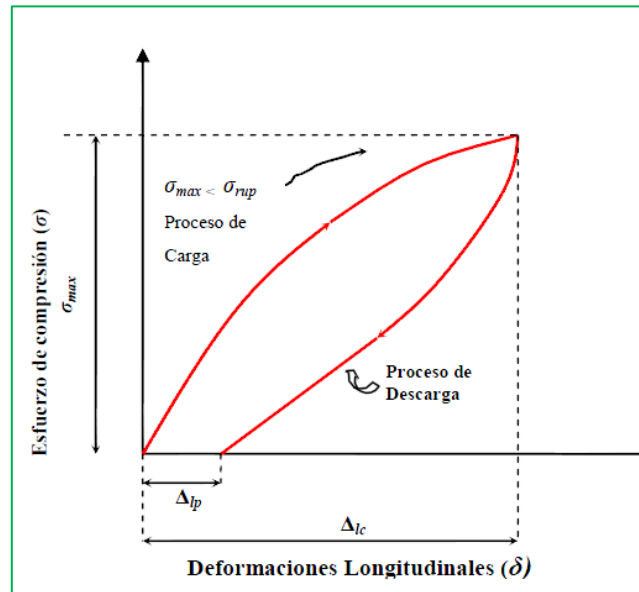


Fig. 23. Representación gráfica característica de la correlación entre esfuerzos y deformaciones del concreto sometido a un proceso de carga axial a compresión y descarga. . Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

En esta figura se observa, que el concreto no se comporta como un material elástico, pues además de que conserva una deformación permanente (ΔI_p), la línea que representa la relación entre esfuerzos y deformaciones sólo exhibe un reducido tramo inicial de proporcionalidad, al comenzar la aplicación de la carga, y después se manifiesta como una curva debido a que las deformaciones aumentan progresivamente en mayor proporción que los esfuerzos. Para explicar el comportamiento del concreto endurecido en este aspecto, es frecuente considerarlo como un material consistente de dos fases, es decir, un conjunto de partículas duras y resistentes (los agregados) dispersos en una matriz relativamente más débil (la pasta de cemento hidratada), y que la respuesta del conjunto (el concreto) a la aplicación de esfuerzos deriva de lo que ocurre en la región del contacto entre ambas fases. En apoyo de esta consideración, en la Fig. 24, se indican las formas que ordinariamente presentan las gráficas esfuerzo deformación unitaria, determinadas individualmente

para agregados de buena calidad, la pasta de cemento hidratado y el concreto que los contiene

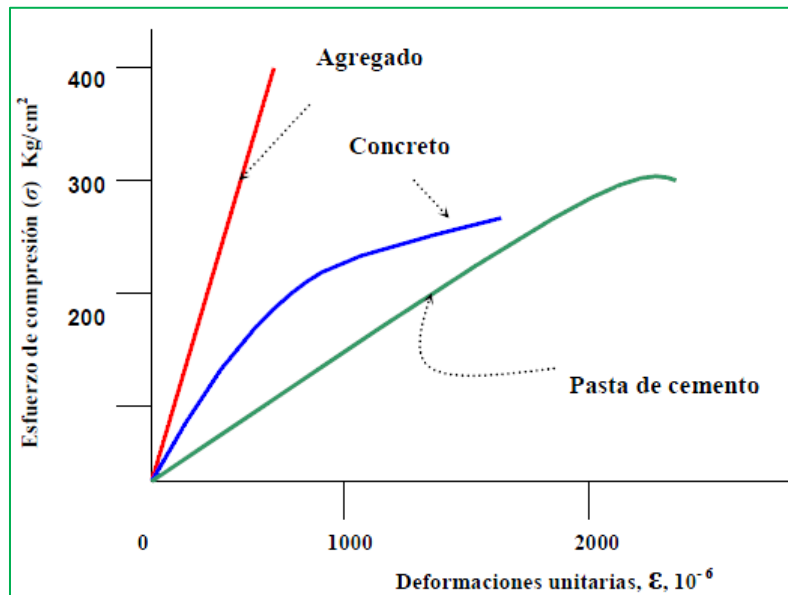


Fig. 24. Gráficas esfuerzos - deformaciones de los agregados, la pasta de cemento y el concreto, determinadas individualmente. Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

De acuerdo con esta presentación, en los agregados la gráfica es prácticamente una línea recta hasta el punto de ruptura y la que corresponde a la pasta también lo es, hasta un nivel aproximado de 90 a 95 por ciento de su esfuerzo de ruptura, y ambos componentes exhiben una falla de tipo frágil; no obstante ello, la unión de estos materiales para construir el concreto, conduce a un material compuesto cuya gráfica es una línea casi desde el principio, y que en la falla se manifiesta menos frágil.

Lo que con frecuencia se admite que ocurre en el concreto, es que existan microfisuras y otras discontinuidades en la zona de contacto pasta – agregado desde antes que el concreto reciba su primera carga, lo que se traduce en una adhesión imperfecta entre ambos componentes y en la posibilidad de que se produzcan concentraciones de esfuerzo en esa zona.

A continuación, conforme se aplica la primera carga, las microfisuras comienzan a extenderse, después se propagan a través de la pasta y terminan por hacer fallar el concreto. En estas condiciones, las deformaciones en el concreto tienden a

incrementar más que los esfuerzos medios aplicados, salvo en un breve intervalo inicial, en el que las micro fisuras preexistentes permanecen prácticamente estables y se manifiesta proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones.

En la fig. 25 se delimitan cuatro intervalos del nivel de esfuerzos en la gráfica esfuerzo–deformación unitaria del concreto, que se identifican con cuatro diferentes etapas en el proceso de crecimiento y propagación de las grietas durante la aplicación de carga continua hasta la ruptura.

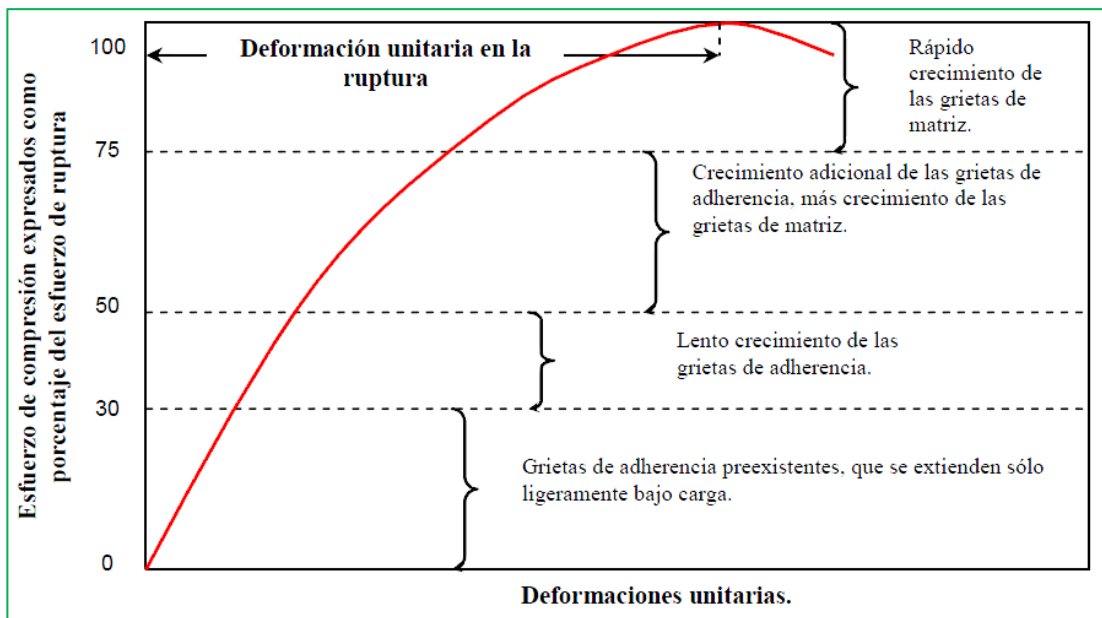


Fig. 25. Declinación de la curva esfuerzo – deformación unitaria del concreto conforme evoluciona el crecimiento de grietas. Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

En los materiales elásticos cuya gráfica esfuerzo – deformación unitaria es una línea recta, el Módulo de Elasticidad define la relación de proporcionalidad que existe entre ambas variables, es decir, se identifica con la pendiente de esa recta.

Debido a la forma como se manifiesta la relación entre los esfuerzos y las deformaciones en el concreto, no es posible asignarle estrictamente hablando, un Módulo de Elasticidad; sin embargo para materiales así, cuya gráfica es una curva, suelen considerarse otras variantes del módulo de elasticidad, que pueden referirse a la pendiente de la tangente en el origen o en otro sitio, de la secante entre el origen y otro punto, o de la cuerda entre dos puntos sobre la curva.

En el caso del concreto, abarcando un intervalo inicial de esfuerzo adecuado a los valores de diseño, de modo que al trabajar el concreto dentro de ese intervalo pueda suponerse razonablemente elástico.

Conforme a la norma ASTM C 469 el Módulo se define por la pendiente de la cuerda AB, tal como se indica en la Fig. 26.

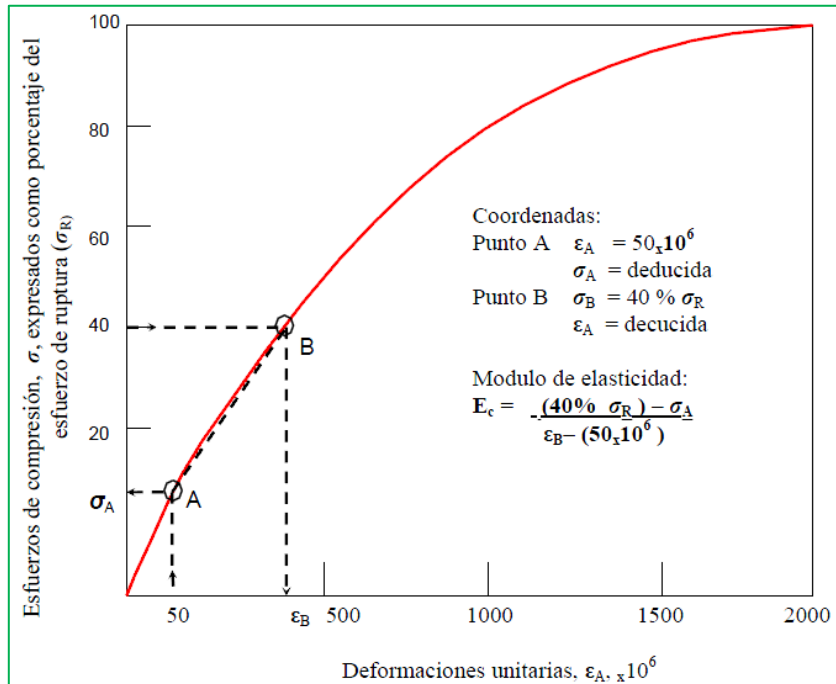


Fig. 26. Criterio para definir el Módulo de Elasticidad Estático a compresión del concreto (ASTM C 469). Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

En el método de prueba ASTM C 469, se define el procedimiento para determinar el Módulo de Elasticidad estático a compresión del concreto, ensayando especímenes cilíndricos elaborados normalmente conforme a los métodos ASTM C 192 y C 31 y también núcleos extraídos de la estructura conforme al método ASTM C 42. el criterio que se aplica, según lo indicado en la Fig 26 consiste básicamente en definir dos puntos (A y B) sobre la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto ensayado, a fin de calcular la pendiente de la cuerda AB definida de esa manera. Las coordenadas del punto A, son: una abscisa fija (ϵ_A) igual a una deformación unitaria de 50 millonésimas, y una ordenada (ζ_A) determinada a partir de esa deformación, las coordenadas del punto B son: una ordenada fija (ζ_B) igual a un esfuerzo equivalente

al 40 por ciento del esfuerzo de ruptura del concreto que se ensaya; y una abscisa (ϵ_B) determinada a partir de ese esfuerzo. Una vez conocidas estas coordenadas, el Módulo de Elasticidad se determina calculando la tangente del ángulo que la cuerda AB forma con el eje horizontal.

El Módulo de Elasticidad del concreto, puede variar en función de diversos factores, tales como: el estado de humedad y de compactación del concreto, la relación agua / cemento y edad de la pasta y las características de los agregados, principalmente. En relación con la humedad del concreto, se dice que en estado saturado exhibe un módulo de elasticidad más altos que en estado seco (contrariamente a lo que ocurre con la resistencia a compresión) y que este incremento en el módulo, puede ser del orden de un 3 %. En este aspecto, cabe hacer la consideración de que en estado seco las microfisuras y discontinuidades preexistentes no contiene agua y por ello el concreto se deforma con más facilidad, lo cual a veces se manifiesta por una excesiva deformación al iniciar la carga del espécimen. Se supone que, para evitar la eventual influencia de un secado superficial o de cualquier reajuste que pueda ocurrir en el espécimen al comenzar a cargarlo, el módulo se calcula por la pendiente de la cuerda a partir del punto A (ver fig. 2.26) en vez de hacerlo por la pendiente de la secante al origen, a fin de no tomar en cuenta las posibles deformaciones anormales al principio de la carga.

Tanto la relación agua/cemento de la pasta como su edad, son factores que determinan la resistencia a compresión del concreto en el momento de su ensaye, por consiguiente; su influencia en el módulo de elasticidad puede considerarse agrupada al examinar la relación que normalmente se manifiesta entre la resistencia a compresión y el Módulo de Elasticidad del concreto.

Con el uso de agregados de buena calidad, el Módulo de Elasticidad del concreto tiende a incrementarse a medida que aumenta su resistencia a compresión, según se observa en las gráficas esfuerzo - deformación unitaria que se muestran en la fig. 27 para concretos con diferentes grados de resistencia; en donde se aprecia también que al aumentar su resistencia a compresión el concreto tiende a perder “ductilidad”, esto

es, su forma de falla se vuelve más frágil, dado el aumento de pendiente que exhiben consecutivamente las ramas descendentes de dichas gráficas.

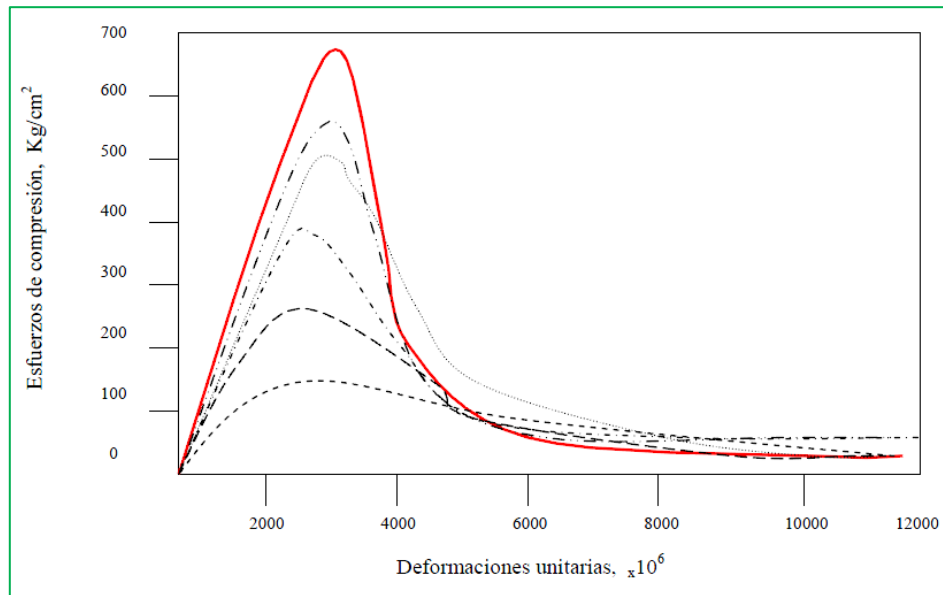


Fig. 27. Grafica esfuerzo deformación unitaria, completas, para concretos de diferentes resistencias a compresión. . Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

Cuando se requiere definir el Módulo de Elasticidad del concreto para fines de diseño, es posible estimarlo directamente en el concreto de uso previsto o estimarlo mediante expresiones empíricas que lo relacionan con la resistencia a compresión, si bien en la mayoría de los casos se opta por lo segundo.

Para esta finalidad, en el Reglamento ACI 318 se recomienda la siguiente expresión, en unidades del mismo sistema inglés, que es aplicable a concretos con peso unitario entre 90 y 55 lb/pie³ (entre 1.5 y 2.5 ton/m³) aproximadamente.

$$E_c = 33w_c^{0.5}\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

En donde:

E_c = Módulo de Elasticidad estático a compresión, determinado a la edad de proyecto en lb/pul² o en Kg/cm²

w_c = Peso unitario del concreto endurecido, en condición seca al aire.

f'_c = Resistencia a compresión del proyecto en lb/pul² o en Kg/cm².

O su equivalente en unidades del sistema métrico.

$$E_c = 0.1303w_c^{0.5}\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Procede señalar, que el hecho de incluir como variable el peso unitario del concreto, es una forma de reconocer la influencia que sobre el módulo de elasticidad ejercen el peso específico de los agregados y su proporción en el concreto.

Por otra parte, en el informe del comité ACI 363 relativo a los concretos de alta resistencia, se cuestiona la aproximación con que puede estimarse el Módulo de Elasticidad mediante la expresión anterior, cuando la resistencia a compresión del concreto es mayor de 400 Kg/cm², y se plantea la posibilidad de una mejor estimación con el uso de la siguiente expresión, que es aplicable en el intervalo de resistencias entre 3000 y 1200 lb/pul² (entre 200 y 850 Kg/cm²) aproximadamente, aunque sólo para concreto de peso “normal” al que puede suponerse un peso unitario entre 140 y 155 lb/pie³ (entre 2.2 y 2.5 Ton/m³):

$$E_c = 40000\sqrt{f'_c} + 1.0 \times 10^6 \quad (3)$$

Expresada en unidades del sistema inglés, o su equivalente en unidades del sistema métrico:

$$E_c = 10615\sqrt{f'_c} + 70423 \quad (4)$$

En las cuales E_c y f'_c están considerados en lb/pul² o en Kg/cm² en ambas expresiones respectivamente.

En la fig. 28, se representa gráficamente la correlación entre la resistencia a compresión y el Módulo de Elasticidad del concreto; definida mediante las expresiones anteriores, para concreto de peso unitario en el intervalo normal, esto es de 2.2 a 2.5 ton/m³. En dicha figura se observa que efectivamente, para resistencias a compresión superiores a 400 Kg/m², el cálculo del Módulo de Elasticidad con la expresión (3) del reglamento ACI 318 produce valores más altos que los obtenidos con la expresión antes mencionada; lo que parece justificar el señalamiento del informe ACI 363, en el sentido de que la primera, sobreestima el Módulo de Elasticidad en los concretos de alta resistencia.

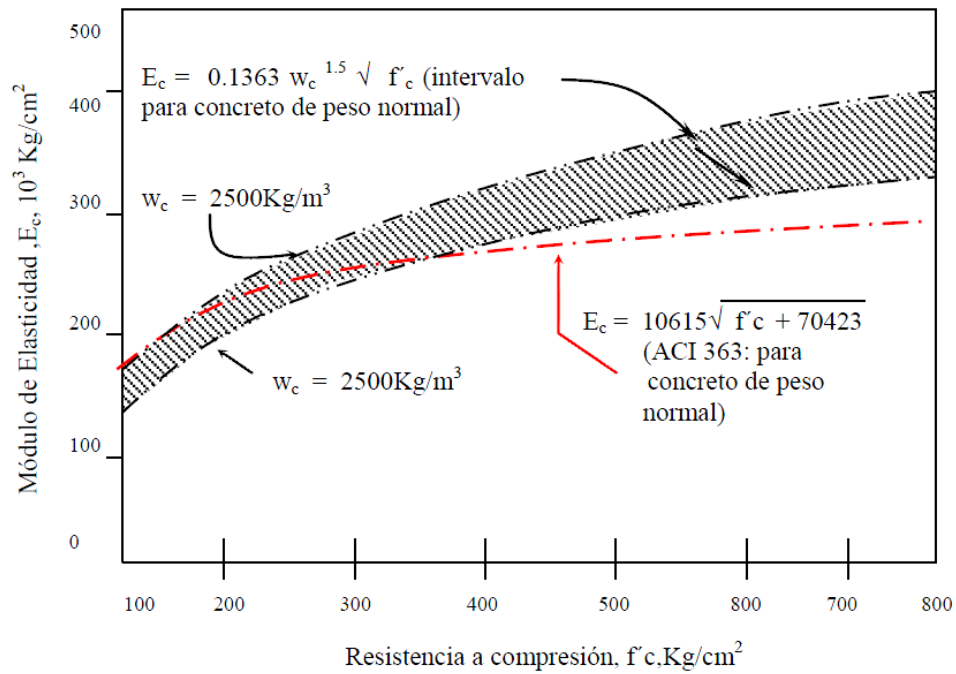


Fig. 28. Comparación de expresiones propuestas para estimar el Módulo de Elasticidad del concreto en función de su resistencia a compresión. Fuente: Norma técnica Guatemalteca. (Ref. Bibliografía 26)

3.1. UNIDAD DE MUESTREO

Para la elaboración de la investigación se tomaron cuatro lugares representativos de los agregados locales, de la cual se extrajo muestras representativas para el estudio de laboratorio para su caracterización de estos agregados como grava y arena.

Los materiales estudiados proceden de San Luis, San Blas, Santa Ana y La Victoria, obteniendo tres muestras de agregados.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Procedencia	San Luis	San Blas	La Victoria	Santa Ana
Agregados	Grava	Grava	Grava	Arena
	Arena	Arena		

Cuadro 4. Procedencias de materiales. Fuente: Elaboración propia

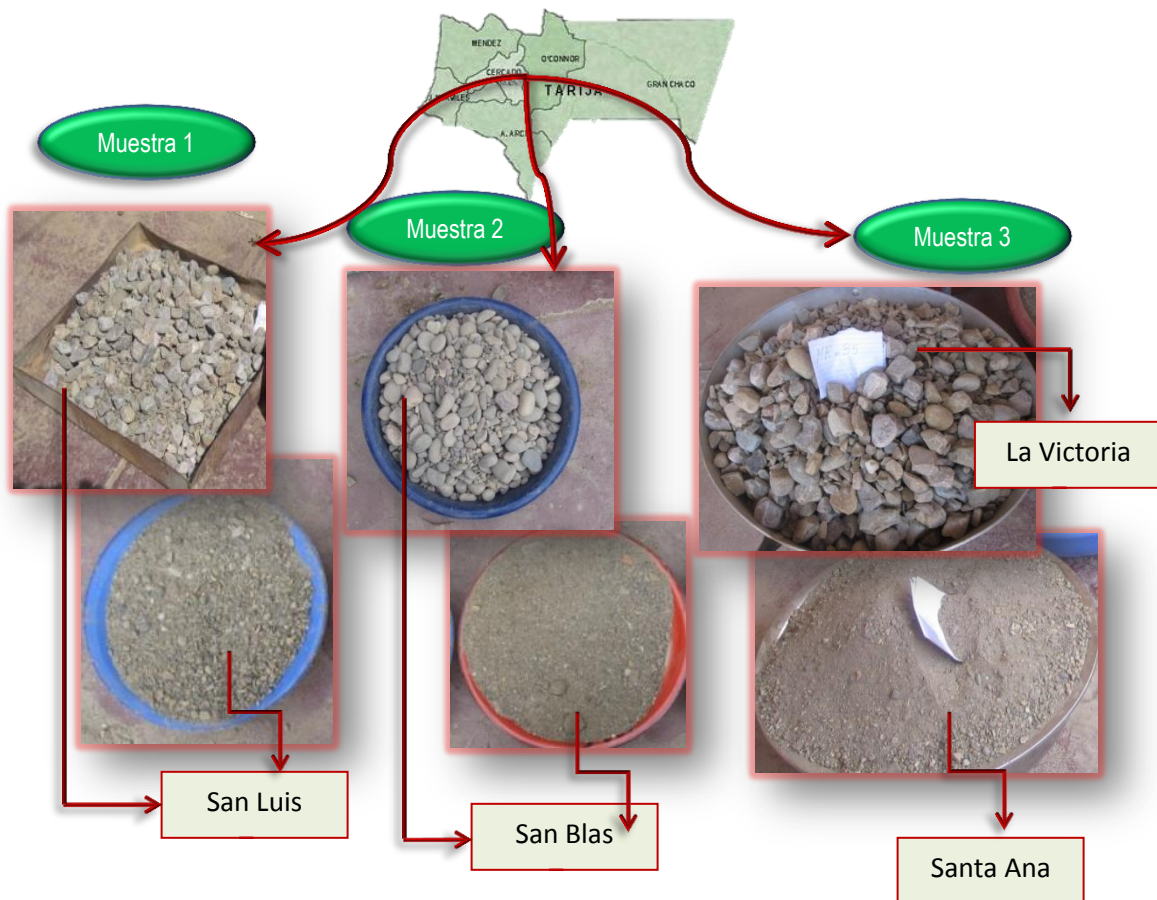


Fig. 29. Agregados (grueso y fino) en condiciones locales. Fuente: Elaboración propia

Para la caracterización de los agregados locales se realizó los siguientes ensayos:

- Granulometría del agregado grueso.
- Granulometría del agregado fino.
- Peso unitario suelto y compactado del agregado grueso.
- Peso unitario suelto y compactado del agregado fino.
- Peso específico del agregado grueso por el método del cesto.
- Por ciento de absorción del agregado grueso.
- Peso específico del agregado fino por el método del picnómetro.
- Por ciento de absorción del agregado fino.

Se dosificaron tres tipos de mezclas para cada muestra (muestra 1, muestra 2 y muestra 3), para hormigones de tipo HF-3,5 Mpa, HF-4,0 Mpa y HF-4,5 Mpa. Se elaboró 30 especímenes por cada muestra entre ellas 15 cilindros y 15 vigas, de la cual 10 especímenes por cada tipo de hormigón, entre ellas 5 cilindros y 5 vigas, y para cada tipo de mezcla se elaboró un cilindro adicional para ser ensayada a compresión como indica el ensayo para determinar el módulo de elasticidad, llegando a elaborar en total 33 especímenes por muestra, así obteniendo en total 99 especímenes (45 vigas ensayo a flexión, 45 cilindros ensayo para módulo de elasticidad y 9 cilindros ensayo a compresión).

	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3		
Procedencia	San Luis			San Blas			Santa Ana y La Vic.		
Especímenes	cilindro		vigas	cilindro		vigas	cilindro		vigas
HF-3,5 Mpa	5	1	5	5	1	5	5	1	5
HF-4,0 Mpa	5	1	5	5	1	5	5	1	5
HF-4,5 Mpa	5	1	5	5	1	5	5	1	5
Total	15	3	15	15	3	15	15	3	15
Total muestra	33			33			33		
Total esp.	99								

Cuadro 5. Muestra de N° de especímenes. Fuente: Elaboración propia

Para el moldeo de los especímenes se utilizaron probetas cilíndricas de 6 pulg de diámetro y 12 pulg de altura y probetas rectangulares de 15x15cm y 50cm de largo.

La mezcla del material se realizó en una mezcladora de tambor giratorio eléctrico, de la cual se extrae un amuestra representativa para determinar la consistencia del hormigón mediante el cono de Abrams, posteriormente se realiza el vaciado de los especímenes y después de 24 hrs se sacan los especímenes de los moldes y estos se sumerge en la piscina para el curado, durante 28 días para luego realizar los ensayos de estos especímenes para determinar el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura.



Fig. 30. Moldeado de especímenes. Fuente: Elaboración propia

3.2. MEDIOS

Los materiales tanto como aridos (agregado grueso y agregado fino) así como el cemento se extraen de nuestro medio (Departamento de Tarija). Teniendo como canteras de estudio o abastecedores de agregados ubicados en San Luis, San Blas, Santa Ana y La Victoria, para el material hidráulico utilizando así el cemento fabricado en nuestro departamento cemento El Puente.

Para la investigación se hizo el uso de las instalaciones del Laboratorio de Suelos de la Empresa Consultora S.R.L. CONSUNIÓN ubicada en el barrio San Jorge, el cual cuenta con los siguientes instrumentos y equipos necesarios para realizar los diferentes ensayos.

Para el ensayo de granulometría del agregado grueso y agregado fino

- ✓ Balanzas de 0.1 y 0.5 g de precisión.
- ✓ Juego de Mallas: 2 ½”, 2”, 1 ½”, 1”, ¾”, ½”, ⅜”, No 4, No 8, No 16, No 30, No 50, No 100, No 200, fondo y tapa.
- ✓ Agitador de Mallas Mecánico “RO-TAP”.
- ✓ Un horno a temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- ✓ Juego de pesas: 500 grs., 1, 2, 5 y 10 kg.
- ✓ Un brochuelo.
- ✓ Recipientes de aluminio, un cucharón de aluminio, una brocha, etc.

Para el ensayo de peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso y agregado fino

Equipo y Herramientas para el agregado grueso

- ✓ Balanza de 0.1 y 0.5 g de precisión.
- ✓ Contenedor de Muestra.
- ✓ Tanque de agua.

- ✓ Mallas de 4.75 mm (No. 4).

Equipo y Herramientas para el agregado fino

- ✓ Balanza o báscula que tenga una capacidad de 1 Kg. o más, con sensibilidad a 0.1 g.
- ✓ Un Picnómetro.
- ✓ Molde y Pisón para Ensayo de Humedad Superficial.

Para el ensayo de pesos unitarios, suelto y compactado del agregado grueso y agregado fino

- ✓ Balanza o báscula con una precisión de 0.1 % de la carga de ensayo.
- ✓ Varilla Compactadora.
- ✓ Recipiente Volumétrico.
- ✓ Pala o cucharón.
- ✓ Equipo de calibración.

Para la determinación del asentamiento de la mezcla de Concretos Hidráulicos

- ✓ Cono de Abrams.
- ✓ Varilla de apisonamiento.

Para la Elaboración y Curado de Especímenes de Prueba de Concreto

- ✓ Moldes para hacer especímenes verticales (cilindros).
- ✓ Moldes para Vigas.
- ✓ Varilla de apisonamiento.
- ✓ Martillo con cabeza de goma.
- ✓ Herramientas Auxiliares: Palas, cubetas, llanas, charola de madera, charola de lámina, enrazado, calibrador de precisión, cucharones y reglas.
- ✓ Equipo de Revenimiento: Cono de Abrams.

- ✓ Recipiente para Muestreo y Remezclado de Muestras.

Para Obtener el Módulo de Elasticidad a través de la prueba estándar de Compresión

- ✓ Especímenes cilíndricos.
- ✓ Máquina hidráulica para ensayos de compresión y deformímetros.
- ✓ Balanza con una precisión de 1g.

Para el ensayo de la Resistencia a Flexión del Concreto

- ✓ Especímenes prismáticos.
- ✓ Máquina Universal y accesorios.
- ✓ Base Metálica para apoyar el espécimen.
- ✓ Balanza de 0.01 kg. de precisión.
- ✓ Cinta métrica.
- ✓ Crayón.
- ✓ Escuadra.

3.3. METODOLOGÍA

Para la siguiente investigación se identificó cuatro abastecedores de agregados para el estudio, el cual pueda representar en su conjunto la calidad de los agregados locales, una vez identificado se ha extraído muestras representativas de agregados de cada abastecedor, trasladando el material al laboratorio para su posterior estudio.

Para realizar la caracterización de los agregados locales y posteriormente la elaboración de especímenes de hormigones se realizó en las instalaciones de laboratorio de suelos de la empresa CONSULTORA UNIÓN S.R.L. CONSUNION, cuyo laboratorio está ubicado sobre la calle Andrés raña s/n. y Av. Panamericana en el Barrio San Jorge.

Para la caracterización de los agregados locales tanto como agregado grueso (grava) y agregado fino (arena) se realizó mediante los siguientes ensayos de laboratorio:

Para el ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO de los agregados según lo describe en la norma ASTM (designación C33-82, C136-82), se toma una muestra representativa de cada uno de los agregados en una cantidad especificada mediante cuarteo, los cuales se secaron al horno a temperaturas de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, en el caso del agregado fino se realizara el lavado de la arena a través del tamiz No 200, se secaran al horno, luego tanto el agregado grueso como el agregado fino se ara pasar el material por mallas con aberturas adecuadas para cada uno de ellos para proveer la información requerida por la especificación, posteriormente se pesara la masa de agregados retenida en cada uno de los tamices. Con este ensayo se determinara los tamaños de los agregados (tamaño máximo TM, tamaño máximo nominal TMN y módulo de finura MF).



Fig. 31 (A) Cuarteo del material, (B) Granulometría de la grava, (C) Peso retenido.

EL PESO ESPECÍFICO y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN de los agregados gruesos y finos se realizó según la norma ASTM (designación C127-81) para los agregados gruesos el ensayo consistirá en seleccionar una masa de material por medio

del cuarteo, esta muestra se sumergirá en agua por un tiempo de 24 horas, luego sacarlos del agua y pesarlos en condición saturada. Posteriormente se procederá a pesar los agregados dentro del agua, luego secarlos con una toalla y pesarlos en condición superficialmente seco internamente saturado.

En cuanto a los agregados finos estos se seleccionara por cuarteo y se dejara inmersos en agua por 24 horas, se secan superficialmente por medio de una corriente de aire para comprobar que el material fino estaba en esta condición, se llenara un molde troncocónico compactándolo con 24 golpes y si al lavarlo el material fino se desmoronara parcialmente entonces el material estaba en esta condición. Seguidamente se tomara 500g de agregado llenando el picnómetro, luego se pesara y se le adicionara agua hasta la marcación de 500 cm³ desairando la muestra y pesando el conjunto de picnómetro-agregado fino-agua.

Para la determinación de los PESOS UNITARIOS, se realizara el ensayo siguiendo la norma ASTM (designación C29-78), pesando el molde inicialmente, posteriormente se llenara el molde con agregados y luego se pesara el conjunto de molde +agregado, de esta forma se realizara el ensayo de peso unitario suelto y el peso unitario compactado se realizar llenando el molde tres capas de las cuales deberán ser compactadas con 25 golpes.



Fig. 32 (A) PU. Enrazado de Arena, (B) PU. Enrazado de Grava.

Luego de haber caracterizado los agregados se procederá a realizar las **DOSIFICACIONES DE MEZCLAS** para tres tipos de hormigones HF-3,5Mpa, HF-4,0Mpa y HF-4,5Mpa, para cada uno de las muestra, utilizando la norma ACI211.

Después se procedió a la **ELABORACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO**, con las proporciones calculadas inicialmente. De las mezclas se extraerán observaciones sobre la trabajabilidad y mediante la medición del asentamiento se deducirá si las proporciones son adecuadas o necesitan correcciones.



Fig. 33 (A) Proporciones de mezcla, (B) mezcladora giratoria eléctrica.

EL ASENTAMIENTO se determinara utilizando el cono de Abrams en la forma que indica la norma ASTM (designación C143-78), que consistirá en llenar el cono de Abrams en tres capas compactadas con 25 golpes cada una y posteriormente levantarla sin girarlo , para medir lo que la mezcla se había asentado , midiendo así el grado de manejabilidad que esta posee

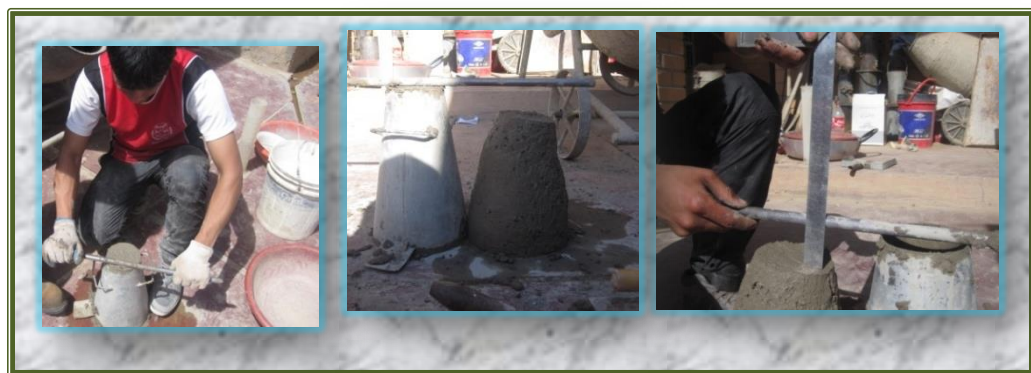


Fig. 34 Determinación de la consistencia del hormigón mediante el cono de Abrams.

Para el VACIADO Y COMPACTADO DE LOS ESPECÍMENES se indica en la norma ASTM (designación C192 sección 6.3.1-6.3.2 y secciones 6.4.1, 6.4.2 y 6.4.5). Llenando cada uno de los moldes debidamente engrasados y nivelados.

Para la ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS se colocará la muestra en tres capas iguales y compactándolas cada capa con 25 golpes por medio de una varilla lisa. Una vez llenado el molde se eliminará el aire golpeándolo con un mazo de caucho, finalmente la nivelada mediante un enrazado la superficie de la muestra.



Fig. 35 Compactado de la mezcla de hormigón en molde cilíndrico

Para la ELABORACIÓN DE LAS VIGAS de concreto estas serán elaboradas colocando el concreto en dos capas debidamente compactadas con 70 golpes con la varilla lisa y posteriormente golpeándolas con un martillo de caucho por los lados exteriores a fin de eliminar las burbujas de aire presentes durante la elaboración de las muestras.



Fig. 36 Compactado de la mezcla de hormigón en molde rectangular “viga”

Una vez vaciadas las mezclas, se dejarán **FRAGUAR** durante 24 horas para luego desencofrarlas y realizar el **CURADO DEL HORMIGÓN** sumergiéndolas las probetas en la piscina de curado a una temperatura ambiente de aproximadamente de 22° C. procedimiento indicado en la norma ASTM (designación 192 sección 7).

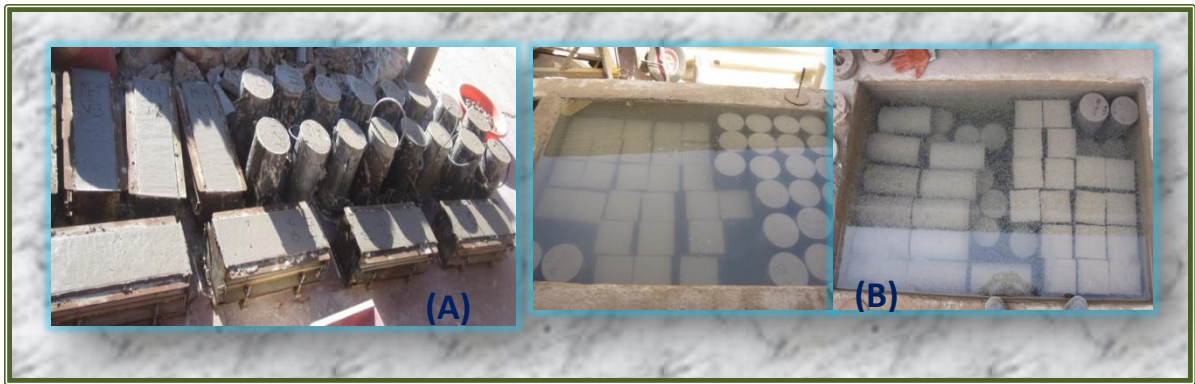


Fig. 37 (A) Fraguado del Hormigón “especímenes cilindros y vigas”, (B) Curado del Hormigón.

Posteriormente después de 28 días los especímenes serán ensayados según especificaciones.

Para el **ENSAYO DE PRUEBA** para obtener el **MÓDULO DE ELASTICIDAD E_c** : El Módulo de Elasticidad del concreto hidráulico se determinará a través de la prueba estándar de compresión definida en la norma ASTM C469, preparando especímenes cilíndricos, los cuales serán sometidos a una carga axial incrementada gradualmente hasta que el cilindro del concreto falle. Las deformaciones transversales y longitudinales serán medidas continuamente durante la aplicación de la carga incremental.



Fig. 38 Ensayo a compresión

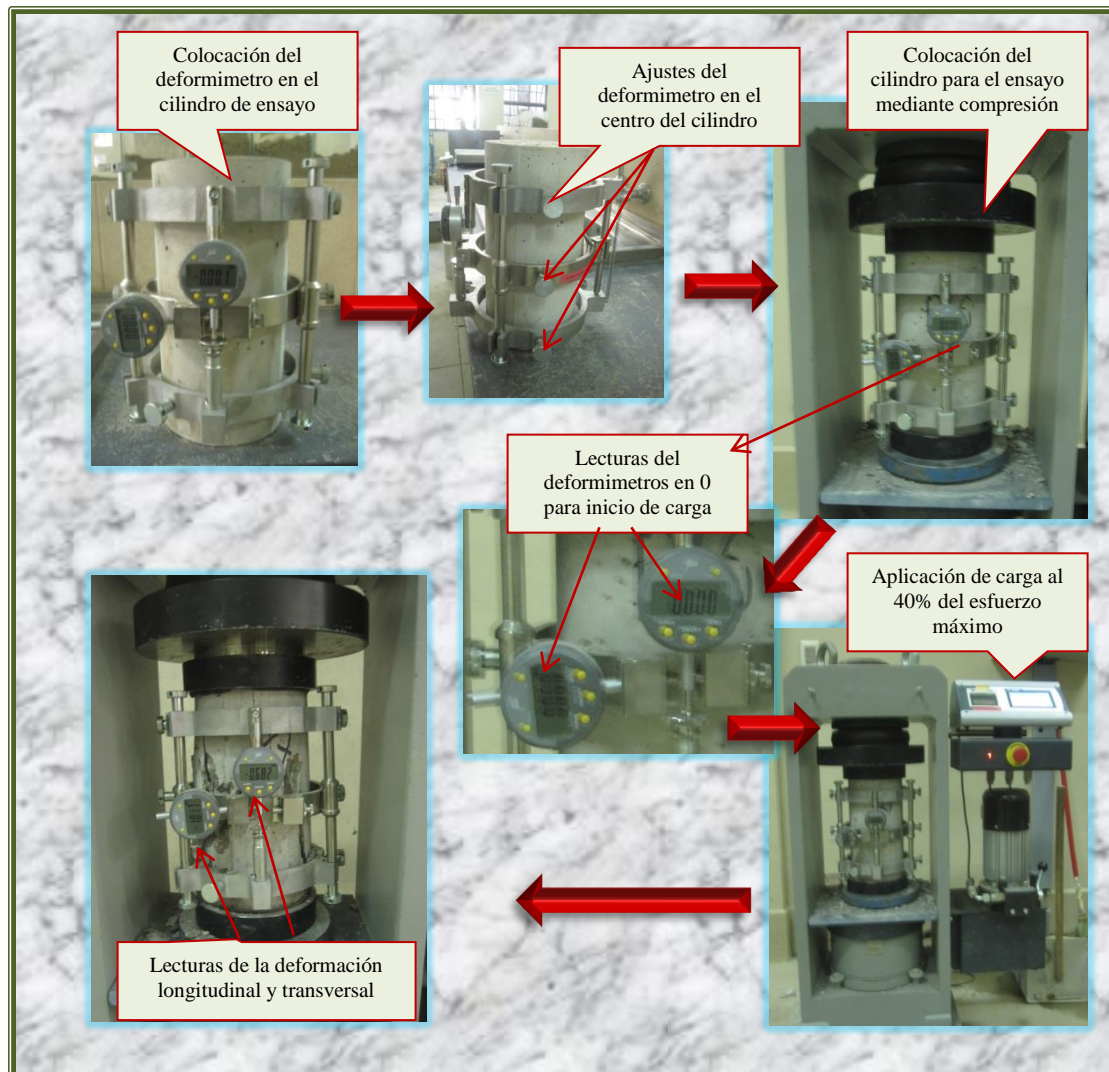


Fig. 39 Ensayo de Módulo de Elasticidad

En cuanto al **ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN** una vez sacada el espécimen de almacenamiento de curado, se determinara las dimensiones del mismo, se marca en el espécimen los puntos de apoyo y aplicación de carga, con el espécimen en posición de elaboración (superficie moldeada-acabada), se montara y se centrara en la base metálica, haciendo coincidir las marcas del espécimen con los apoyos de dicha base y el elemento de carga de la máquina de prueba con el punto de aplicación, se aplicara carga al espécimen a una proporción constante a la falla procurando que la fibra externa aumente su tensión entre 125 y 175 PSI/min (0.86 y 1.21 MPa/min) hasta que la ruptura se suscita, posteriormente se medirá todas las

dimensiones del espécimen después de ensayado, para la medida de longitud se tomará tres valores, uno en cada extremo y uno al centro, para el ancho y alto se tomara una medida en cada extremo y la otra sobre el área fallada. De cada una de las medidas se obtendrá el promedio, mismas se incluirá en el cálculo del Módulo de Ruptura.

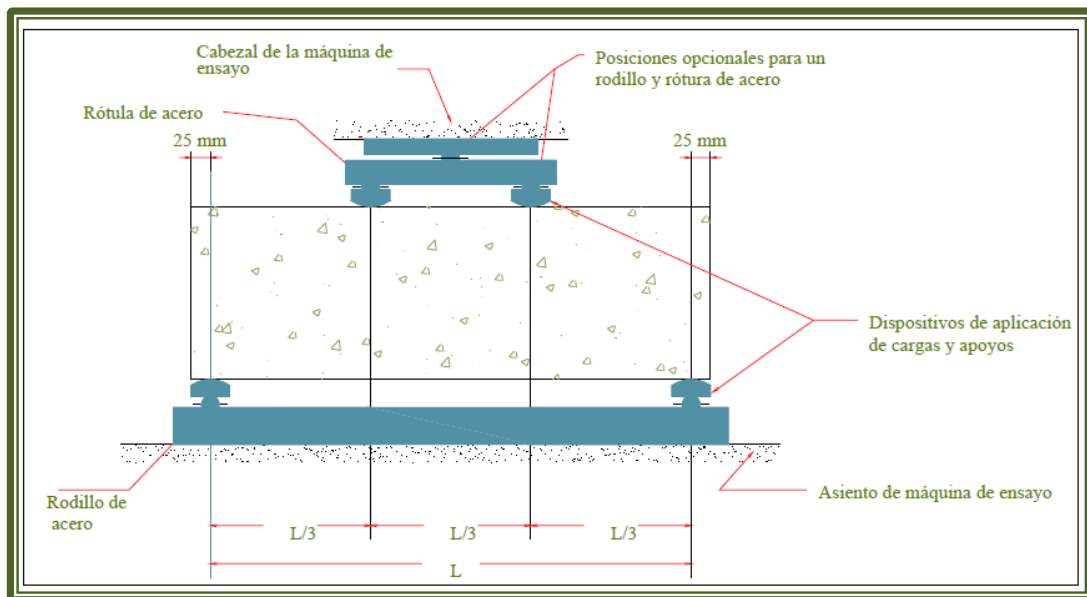


Fig. 40 Ensayos a flexión con carga a los dos tercios. Fuente: (Ref. Bibliografía 12)

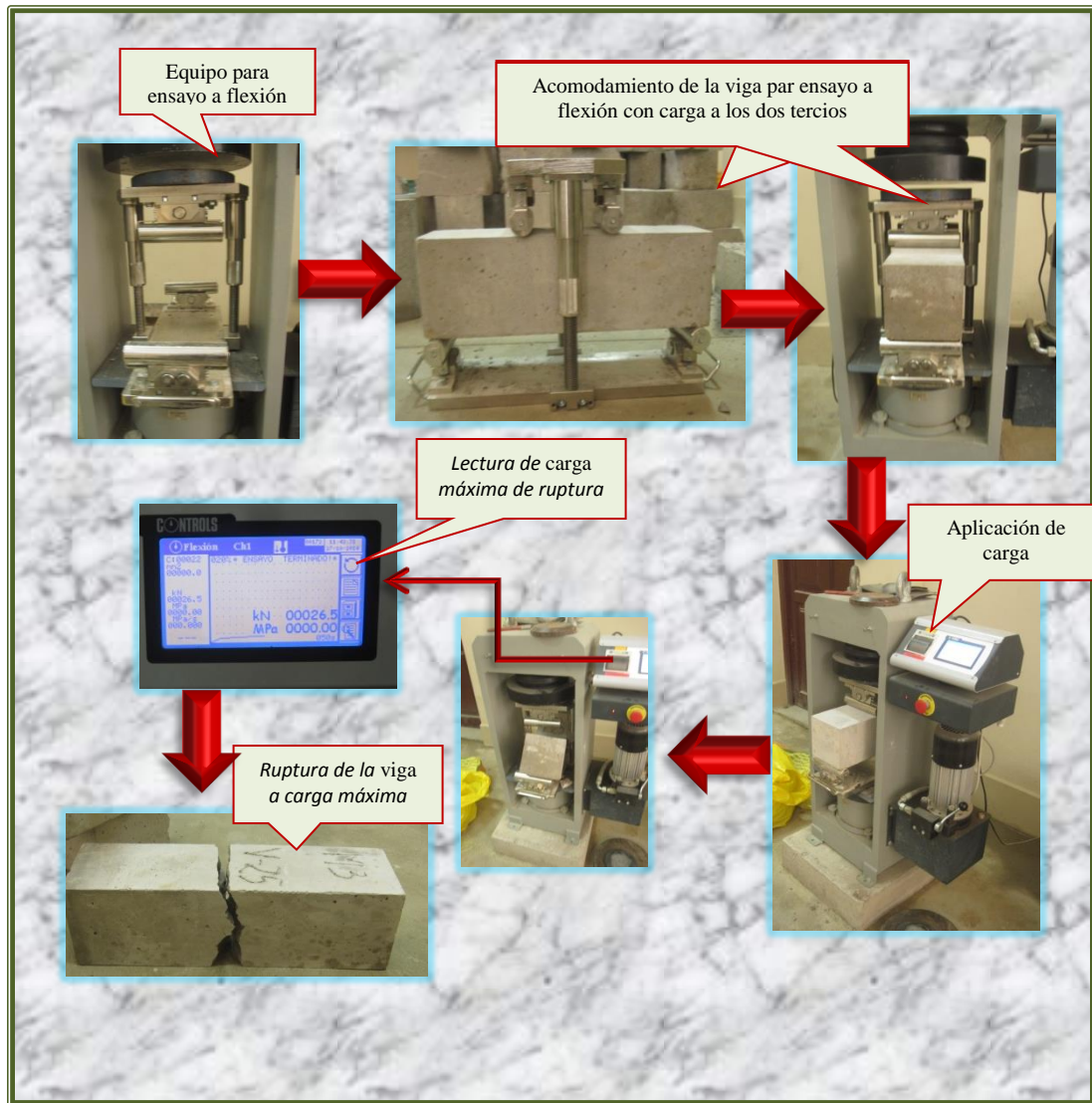
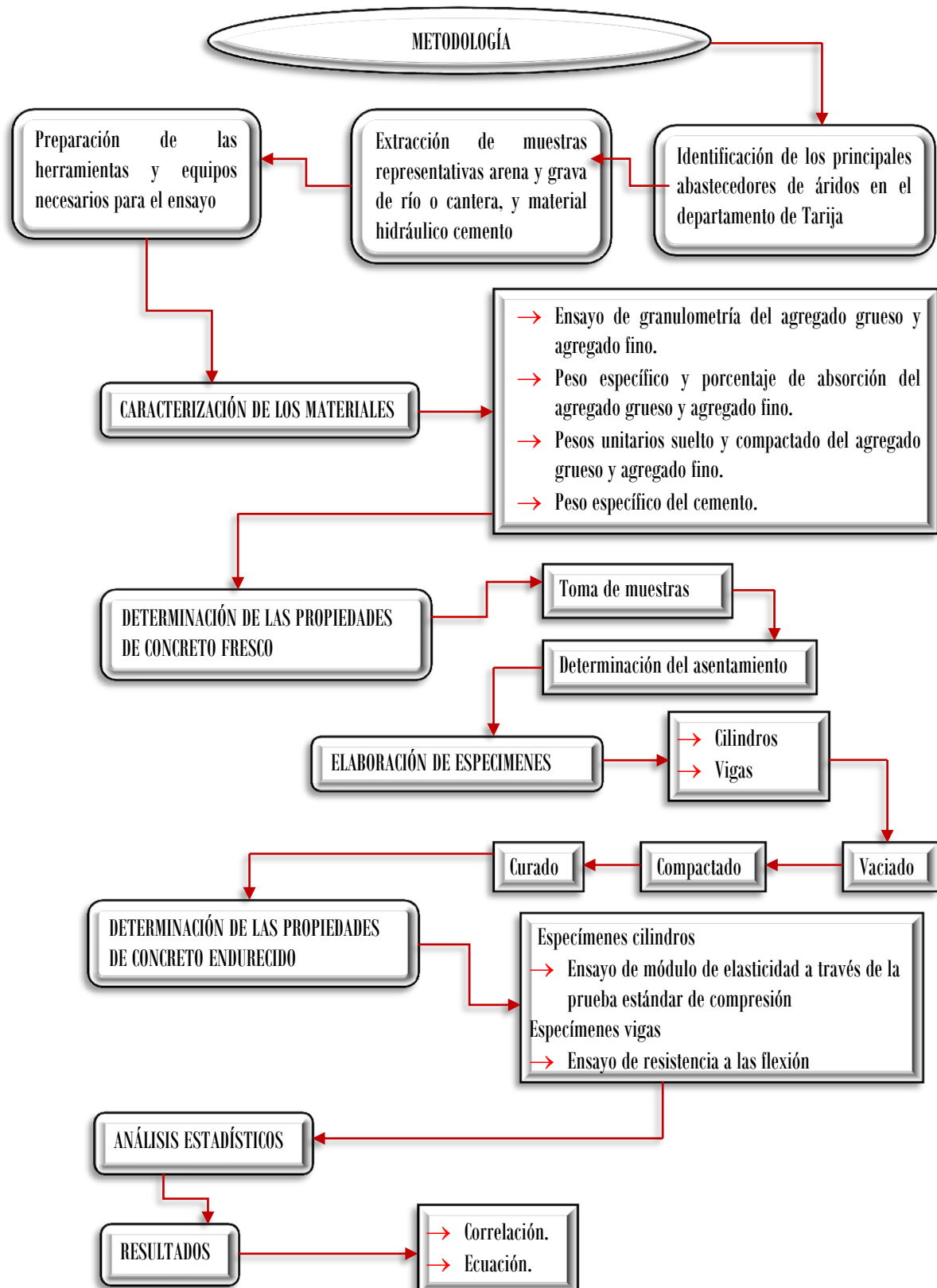


Fig. 41 Ensayos a flexión con carga a los dos tercios


3.3.1. PROCESO METODOLÓGICO



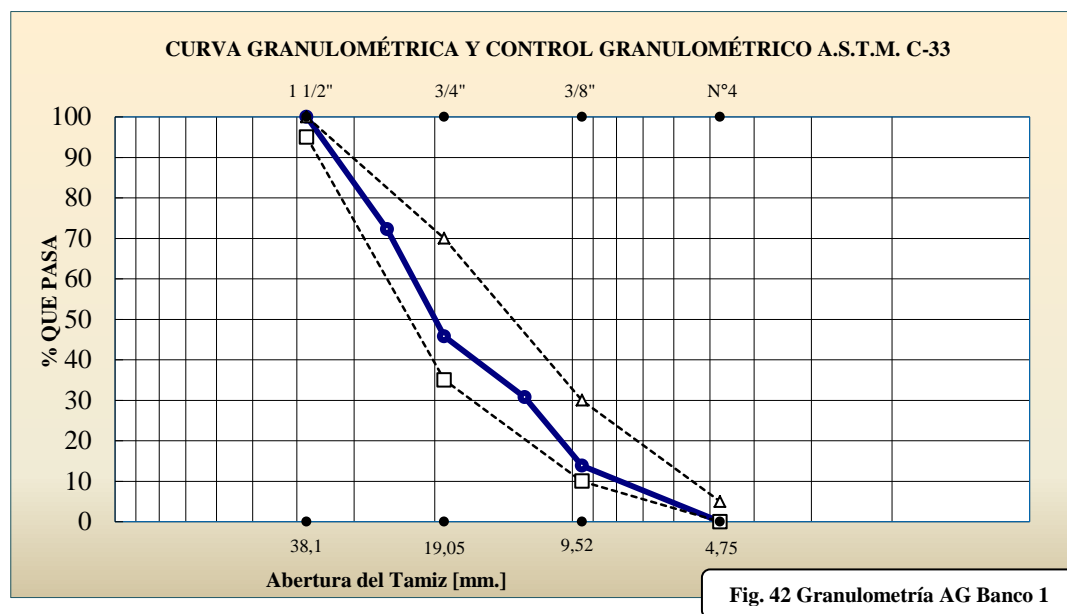
3.4 RESULTADOS

3.4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO **BANCO 1**

 U.A.J.M.S.	PROYECTO DE GRADO	DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
	Estudiante:	Gonzalo Jerez Chavarría
	Material:	Agregado Grueso "GRAVA"
	Procedencia:	SAN LUIS
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Muestra:	1


Granulometría del Agregado Grueso



Tamaño máximo	TM=	1	Pulg.
Peso Unitario Suelto	PU=	1,45	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	PU=	1,57	gr/cm ³
Peso Específico Bruto (S.S.S.)	Gbs=	2,58	gr/cm ³
Peso Específico Bruto (muestra secada al horno)	Gb=	2,57	gr/cm ³
Peso específico Aparente	G=	2,61	gr/cm ³
Por Ciento de Absorción	% abs=	0,65	%

Cuadro 6. Caracterización Agregado Grueso Banco 1. Ref. Anexo 1

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO **BANCO 1**

 U.A.J.M.S.	PROYECTO DE GRADO	DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
	Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Estudiante: Gonzalo Jerez Chavarría
	Material:	Agregado Fino "ARENA"
	Procedencia:	SAN LUIS
	Muestra:	1

Granulometría del Agregado Fino

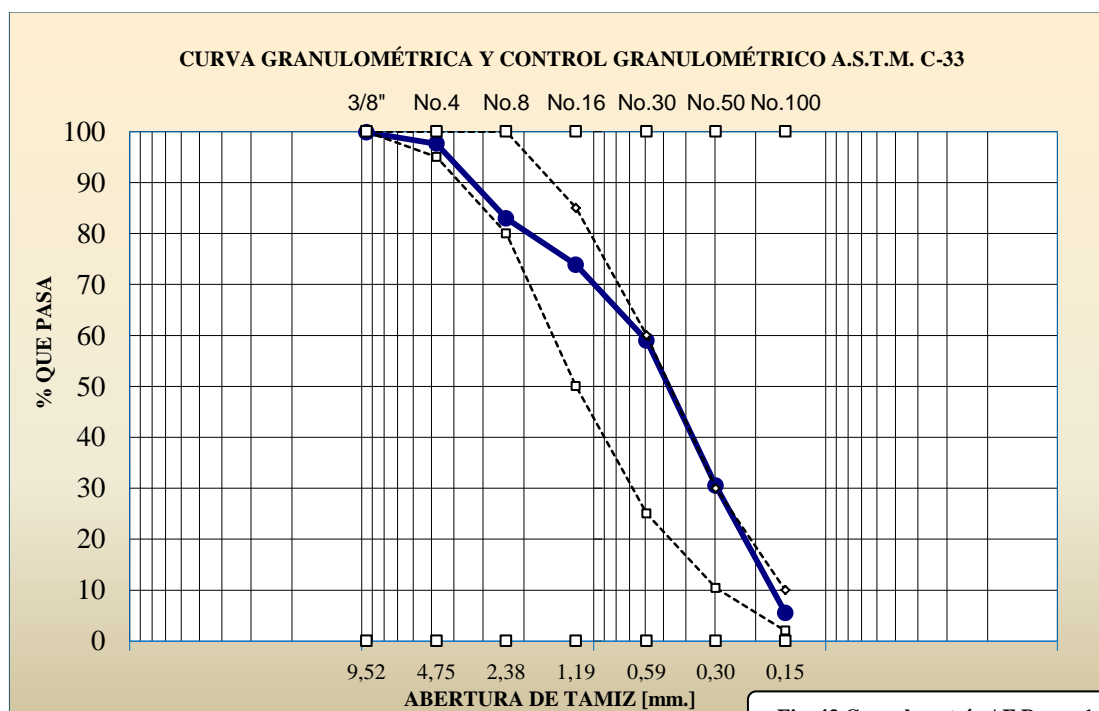



Fig. 43 Granulometría AF Banco 1

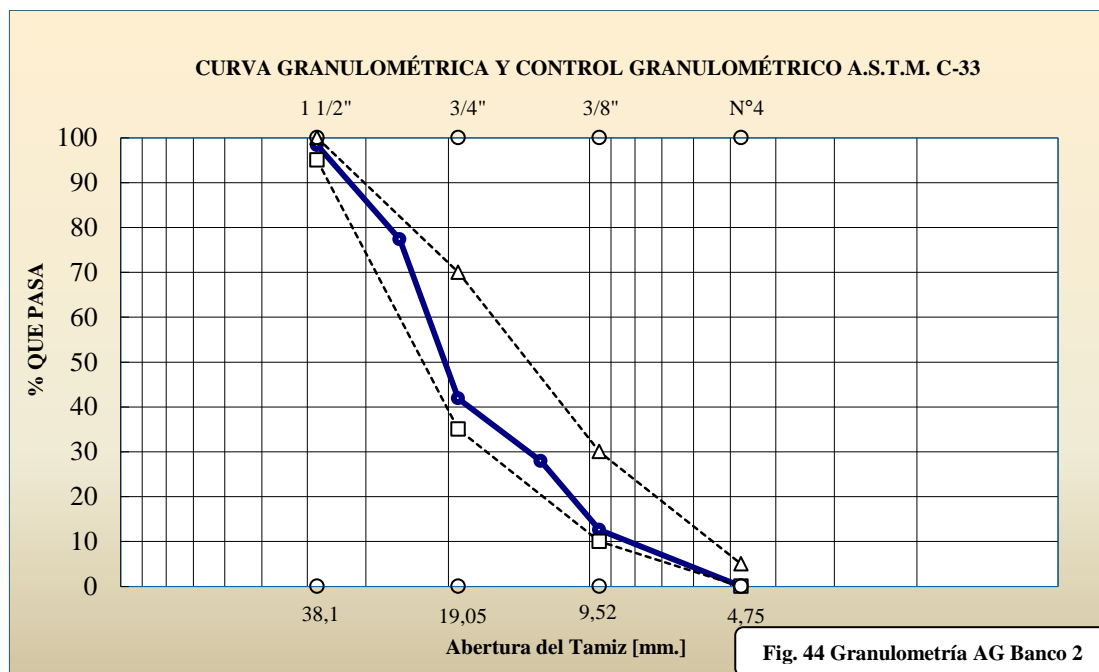
Módulo de Finura	MF=	2,51	s/u
Peso Unitario Suelto	PU=	1,69	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	PU=	1,80	gr/cm ³
Peso Específico	G=	2,75	gr/cm ³
Por Ciento de Absorción	%abs=	1,44	%

Cuadro 7. Caracterización Agregado Fino Banco 1. Ref. Anexo 1

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO **BANCO 2**

 U.A.J.M.S.	PROYECTO DE GRADO	DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Estudiante:	Gonzalo Jerez Chavarría
	Material:	Agregado Grueso "GRAVA"
	Procedencia:	SAN BLAS
	Muestra:	2


Granulometría del Agregado Grueso



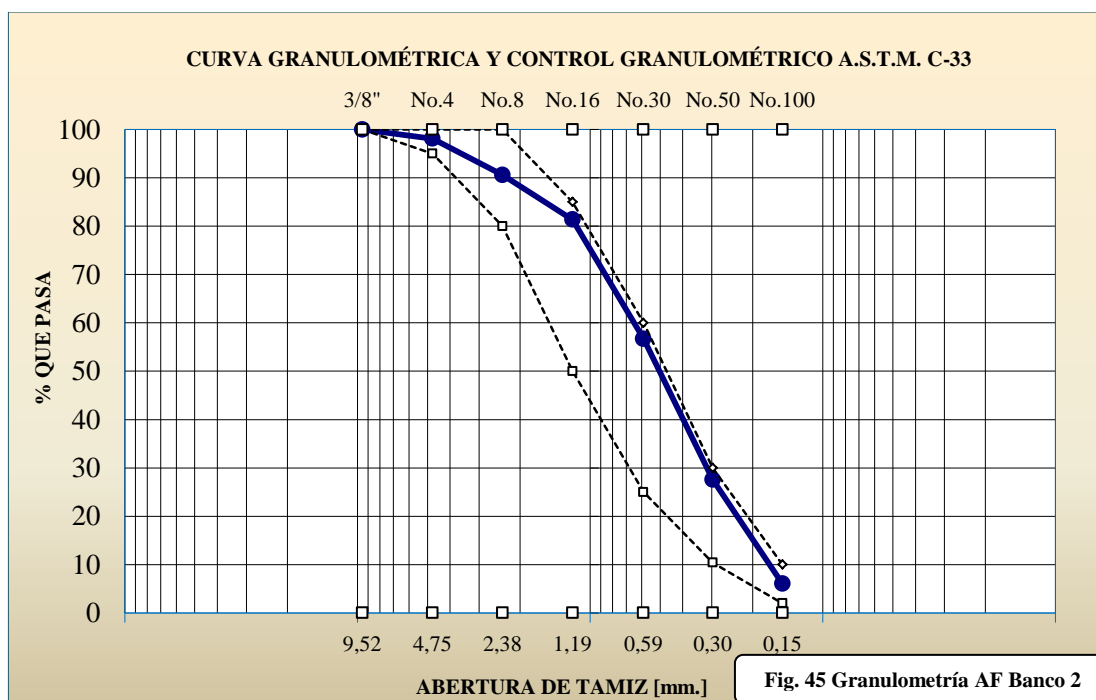
Tamaño máximo	TM=	1½	Pulg.
Peso Unitario Suelto	PU=	1,43	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	PU=	1,57	gr/cm ³
Peso Específico Bruto (S.S.S.)	Gbs=	2,59	gr/cm ³
Peso Específico Bruto (muestra secada al horno)	Gb=	2,56	gr/cm ³
Peso específico Aparente	G=	2,63	gr/cm ³
Por Ciento de Absorción	% abs=	1,04	%

Cuadro 8. Caracterización Agregado Grueso Banco 2. Ref. Anexo 1

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO **BANCO 2**

 U.A.J.M.S.	PROYECTO DE GRADO	DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Estudiante:	Gonzalo Jerez Chavarría
	Material:	Agregado Fino "ARENA"
	Procedencia:	SAN BLAS
	Muestra:	2


Granulometría del Agregado Fino



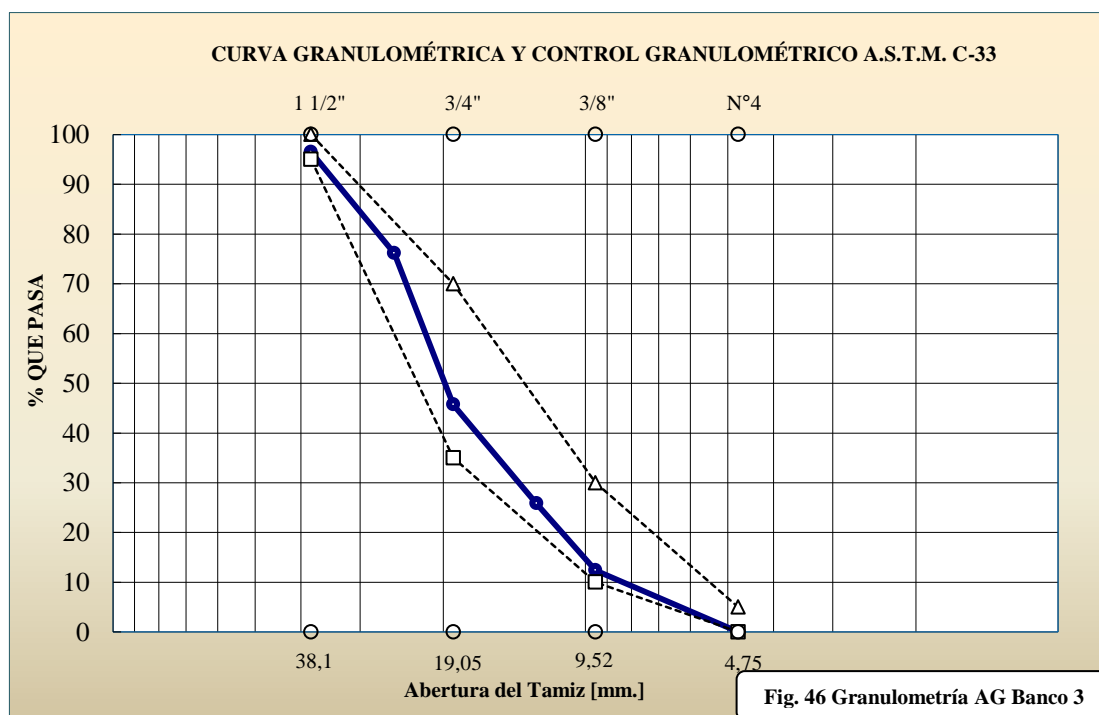
Módulo de Finura	MF=	2,40	s/u
Peso Unitario Suelto	PU=	1,61	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	PU=	1,74	gr/cm ³
Peso Específico	G=	2,71	gr/cm ³
Por Ciento de Absorción	%abs=	2,33	%

Cuadro 9. Caracterización Agregado Fino Banco 2. Ref. Anexo 1

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO BANCO 3

 U.A.J.M.S.	PROYECTO DE GRADO	DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
	Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Estudiante: Gonzalo Jerez Chavarría Material: Agregado Grueso "GRAVA" Procedencia: LA VICTORIA Muestra: 3


Granulometría del Agregado Grueso



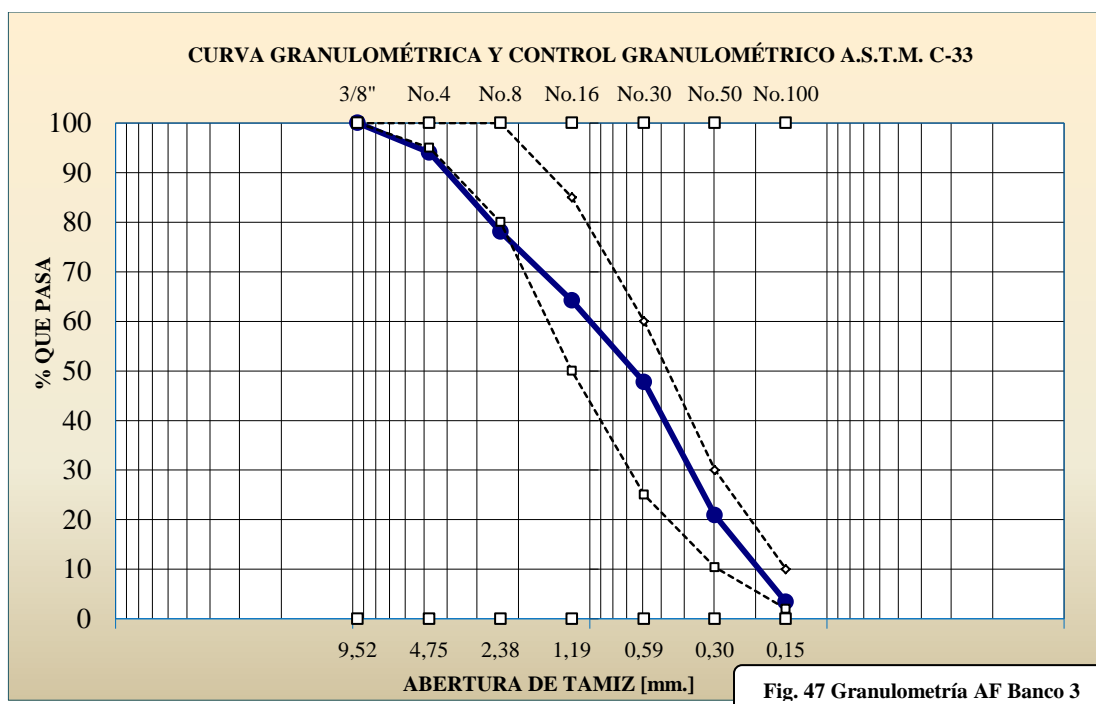
Tamaño máximo	TM=	1½	Pulg.
Peso Unitario Suelto	PU=	1,45	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	PU=	1,61	gr/cm ³
Peso Específico Bruto (S.S.S.)	Gbs=	2,57	gr/cm ³
Peso Específico Bruto (muestra secada al horno)	Gb=	2,55	gr/cm ³
Peso específico Aparente	G=	2,61	gr/cm ³
Por Ciento de Absorción	% abs=	1,01	%

Cuadro 10. Caracterización Agregado Grueso Banco 3. Ref. Anexo 1

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO **BANCO 3**

 U.A.J.M.S.	PROYECTO DE GRADO	DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Estudiante:	Gonzalo Jerez Chavarría
	Material:	Agregado Fino "ARENA"
	Procedencia:	SANTA ANA
	Muestra:	3

Granulometría del Agregado Fino




Módulo de Finura	MF=	2,92	s/u
Peso Unitario Suelto	PU=	1,70	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	PU=	1,78	gr/cm ³
Peso Específico	G=	2,66	gr/cm ³
Por Ciento de Absorción	% abs=	2,25	%

Cuadro 11. Caracterización Agregado Fino Banco 3. Ref. Anexo 1

3.4.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE RUPTURA


MÓDULO DE RUPTURA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL BANCO 1

 U.A. J.M.S.	PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Valores de los Módulos de Elasticidad y Módulos de Ruptura a los 28 días Banco de Estudio: SAN LUIS Muestra: 1

Nº	Módulo de Ruptura MR (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad Ec (kg/cm ²)
1	39,57	253930,79
2	39,00	250628,33
3	36,48	233702,52
4	36,21	212033,66
5	38,50	229949,83
6	45,27	294777,30
7	41,59	269699,12
8	39,74	288830,23
9	39,88	234731,74
10	40,45	274432,34
11	47,27	317100,60
12	47,00	321897,88
13	47,48	326736,77
14	45,19	332097,90
15	46,97	321330,24

Cuadro 12. Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura de concretos elaborados con agregados provenientes de San Luis “Banco 1”. Ref. Anexo 3


MÓDULO DE RUPTURA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL BANCO 2

 U.A. J.M.S.	PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Valores de los Módulos de Elasticidad y Módulos de Ruptura a los 28 días Banco de Estudio: SAN BLAS Muestra: 2

Nº	Módulo de Ruptura MR (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad Ec (kg/cm ²)
1	37,12	201151,19
2	36,48	191660,05
3	35,85	195813,17
4	36,80	228534,35
5	35,80	209372,91
6	42,06	300131,45
7	44,46	329176,24
8	45,52	333627,76
9	43,81	259185,73
10	39,50	235640,46
11	46,59	312263,71
12	47,61	336600,11
13	46,04	346873,30
14	49,75	361327,39
15	49,02	329255,22

Cuadro 13. Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura de concretos elaborados con agregados provenientes de San Blas “Banco 2”. Ref. Anexo 3

MÓDULO DE RUPTURA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL BANCO 3

 U.A. J.M.S.	PROYECTO: DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y EL MÓDULO DE RUPTURA PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON MATERIALES EN CONDICIONES LOCALES
Facultad de Ciencias y Tecnología ING CIVIL	Valores de los Módulos de Elasticidad y Módulos de Ruptura a los 28 días Banco de Estudio: SANTA ANA y LA VICTORIA Muestra: 3

Nº	Módulo de Ruptura MR (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad Ec (kg/cm ²)
1	38,57	235481,65
2	38,16	236659,65
3	37,48	192064,46
4	37,21	201100,76
5	38,16	202663,06
6	43,27	282050,21
7	42,59	313954,00
8	40,74	303235,00
9	40,89	283180,03
10	41,45	303453,76
11	44,27	353101,72
12	45,59	334566,45
13	46,48	341346,41
14	46,19	292294,14
15	46,97	360281,47

Cuadro 14. Módulo de Elasticidad y Módulo de Ruptura de concretos elaborados con agregados provenientes de La Victoria y Santa Ana “Banco 3”. Ref. Anexo 3

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Construcción de las cartas de control

La construcción de una carta se lleva a cabo tomando muestras de un tamaño prefijado en un determinado lugar del proceso. De dichas muestras se calcula el valor del estadístico “y” que interesa. Las variaciones de dicho estadístico se atribuirán de acuerdo a cierto modelo probabilístico, lo cual permitirá calcular el promedio y otros parámetros del proceso como es la dispersión del estadístico.

Para presentar gráficamente las cartas de control, utilizando un cuadrante donde el eje vertical representa los valores del estadístico, y en el eje horizontal el tiempo o el orden cronológico en que las muestras fueron tomadas. Se trazan tres líneas horizontales, una en el centro de la distribución y las otras dos en los valores extremos de la distribución representando el promedio $\bar{\bar{X}}$, límites superior LCS y límite inferior LCI de las cartas, valores que se determinan de la siguiente forma:

$$\text{Linea central} = \bar{\bar{X}}$$

$$\text{LCS} = \bar{\bar{X}} + A2 * \bar{\bar{R}}$$

$$\text{LCI} = \bar{\bar{X}} - A2 * \bar{\bar{R}}$$

El coeficiente A2, para varios valores de n, depende de la suposición de que las medidas constituyen una muestra de una población normal.

Construida la gráfica, el siguiente paso es plotear los distintos valores de “y”, y si todos los datos caen dentro de los límites de control y no demuestran ciclos o flujos de puntos arriba o abajo del promedio que demuestren inestabilidad, podrá decirse que el proceso está bajo control estadístico a un nivel igual al promedio de la carta de control.

Si la distribución de los datos no presenta las características mencionadas anteriormente; entonces los puntos que caen fuera de los límites deben ser

investigados descubriendo las causas asignables correspondientes, mientras sucede esta búsqueda puede decirse que el proceso está fuera de control.

Construcción de las cartas de control para el Módulo de Ruptura y el Módulo de Elasticidad.

La construcción de las cartas de control, se llevó a cabo a través del procedimiento descrito a continuación:

Para determinar los límites de control, fue necesario el cálculo del valor promedio y el rango en cada ensayo realizado, el cual está formado por n muestras.

VALOR PROMEDIO.

Dónde:

\bar{X} = Valor promedio de Módulo de Ruptura o Módulo de elasticidad

X_n = Valor del Módulo de Ruptura o Módulo de Elasticidad de cada muestra.

n = Numero de muestras por ensayo.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

RANGO

Dónde:

\bar{R} = Rango del Módulo de Ruptura o Módulo de elasticidad.

VMayor = Valor mayor del Módulo de Ruptura o Módulo de Elasticidad.

VMenor = Valor menor del Módulo de Ruptura o Módulo de Elasticidad.

$$\bar{R} = \text{VMayor} - \text{VMenor}$$

Determinación de la media mayor de los k ensayos. La cual denotamos como $\bar{\bar{X}}$

Dónde:

$\bar{\bar{X}}$ = Media mayor de las medias de cada ensayo.

\bar{X} = Media de cada ensayo.

k = Numero de ensayos.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{X}$$

Determinación de la media de los rangos de los k ensayos.

Dónde:

$\bar{\bar{R}}$ = Media mayor de los rangos de cada ensayo.

\bar{R} = Rango de cada ensayo.

k = Numero de ensayos.

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{R}$$

Para el cálculo del Límite Superior e Inferior es necesario el coeficiente constante A2, el cual se toma, basándose en el número de observaciones en el ensayo.

$$LCS = \bar{X} + A2 * \bar{R}$$

$$LCI = \bar{X} - A2 * \bar{R}$$

Desviación Estándar para cada tipo de ensayo de prueba

La desviación estándar es una medida que nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. La desviación estándar nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media.

La ecuación es la siguiente:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n - 1}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n - 1}}$$

Correlación

El término correlación se utiliza generalmente para indicar la correspondencia o la relación recíproca que se da entre dos o más cosas, en tanto a estadística la correlación es aquello que indicará la fuerza y la dirección lineal que se establece entre dos variables aleatorias.

Análisis de correlación

El análisis de correlación emplea métodos para medir la significación del grado o intensidad de asociación entre dos o más variables. Normalmente, el primer paso es mostrar los datos en un diagrama de dispersión. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al concepto de regresión, pues, para que una ecuación de

regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a la ecuación de regresión; además el coeficiente de correlación debe ser:

- Grande cuando el grado de asociación es alto (cerca de +1 o -1, y pequeño cuando
- Es bajo, cerca de cero.
- Independiente de las unidades en que se miden las variables.

Vale la pena mencionar en este momento, la íntima relación que guarda la regresión y correlación, ya que entre mayor sea el valor del coeficiente de correlación r , mayor será la utilidad de la ecuación de regresión para hacer estimaciones de la variable dependiente y en función de la variable independiente x ; y viceversa.

Coefficiente de determinación r^2

El coeficiente de determinación en la regresión lineal simple es una medida de la bondad de ajuste de la recta estimada a los datos reales.

Dónde:

Suma de cuadrados debido al error..... $SCE = \sum (y_i - \hat{y})^2$

Suma de cuadrados totales..... $SCT = \sum (y_i - \bar{y})^2$

Suma de cuadrados debido a la regresión..... $SCR = \sum (\hat{y} - \bar{y})^2$

Relación entre SCT, SCR y SCE $\rightarrow SCT=SCR+SCE$

Coeficiente de determinación: $\rightarrow r^2 = \frac{SCR}{SCT} = \frac{SCT-SCE}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT}$

Expresado r^2 en porcentaje, se puede interpretar como el porcentaje de la variabilidad total de "Y" que se puede explicar aplicando la ecuación de regresión.

Con lo referente a designación de las variables para este proceso se designa de la siguiente manera:

Variable independiente \rightarrow "x" \rightarrow Módulo de Ruptura MR

Variable dependiente \rightarrow "y" \rightarrow Módulo de Elasticidad Ec

3.5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO BANCO 1

Determinación de la correlación de “Ec” y “MR” para concretos elaborados con agregados provenientes de San Luis

3.5.1.1. CONSTRUCCIÓN DE CARTAS DE CONTROL.

Carta de control de calidad para Módulo de Elasticidad

	N° de Ensayo		
	1	2	3
Módulo de Elasticidad Ec (kg/cm ²)	253930,79	294777,30	317100,60
	250628,33	269699,12	321897,88
	233702,52	288830,23	326736,77
	212033,66	234731,74	332097,90
	229949,83	274432,34	321330,24

Media	236049,03	272494,15	323832,68
-------	-----------	-----------	-----------

Rango	41897,14	60045,56	14997,29
-------	----------	----------	----------

Media Mayor	277458,62	LCS	370776,73
-------------	-----------	-----	-----------

M de Rangos	38980,00	LCI	184140,51
-------------	----------	-----	-----------

Cuadro 15. Parámetros para el control de calidad para Ec “Banco 1”

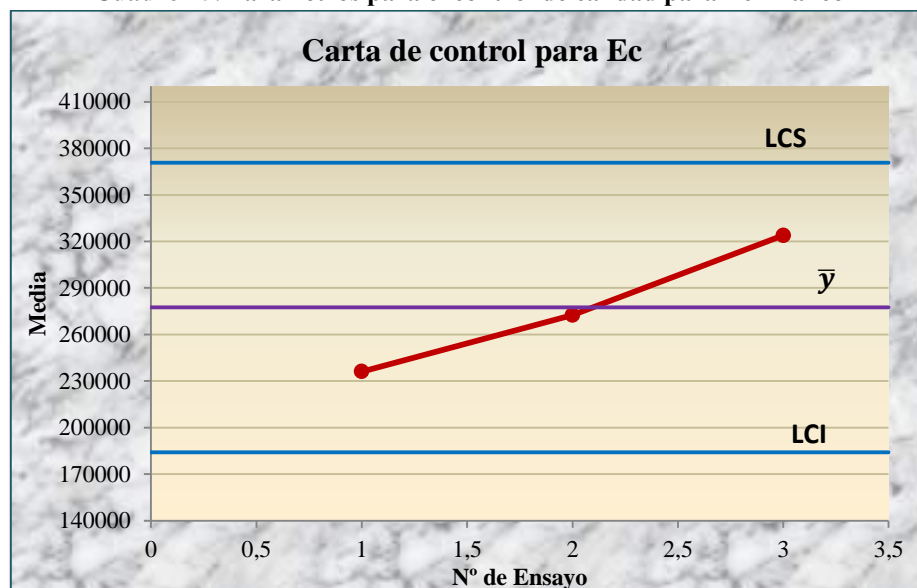


Fig. 48. Carta de control de calidad para Ec “Banco 1”

Carta de control de calidad para Módulo de Ruptura			
	N° de Ensayo		
	1	2	3
Módulo de Ruptura MR (kg/cm²)	39,57	45,27	47,27
	39,00	41,59	47,00
	36,48	39,74	47,48
	36,21	39,88	45,19
	38,50	40,45	46,97
Media	37,95	41,39	46,78
Rango	3,36	5,53	2,29
Media Mayor	42,04	LCS	50,96
M de Rangos	3,73	LCI	33,12

Cuadro 16. Parámetros para el control de calidad para MR “Banco 1”

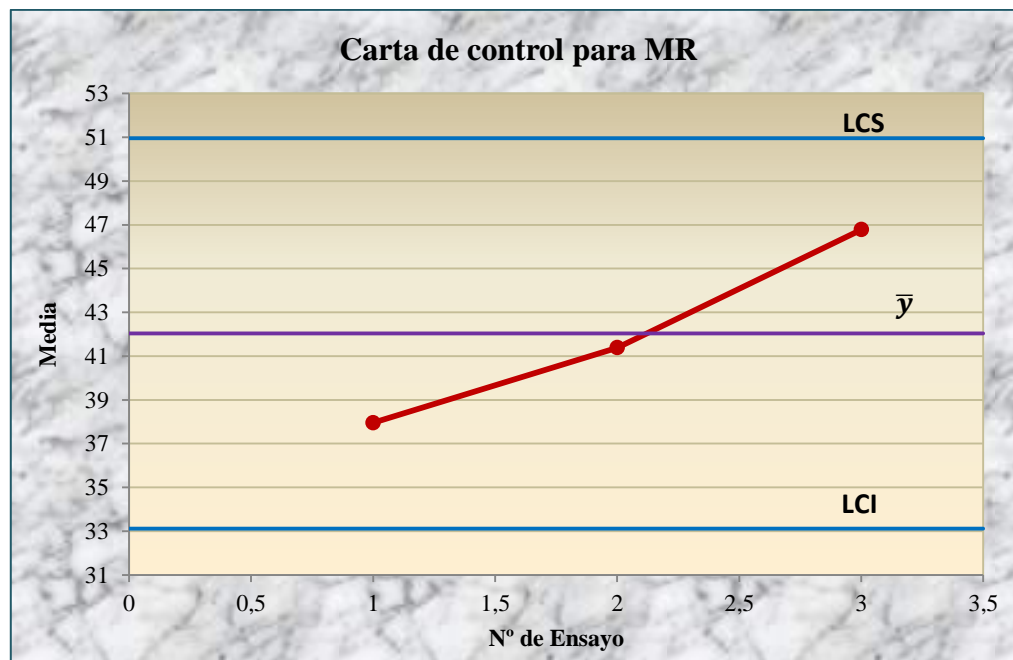


Fig. 49. Carta de control de calidad para MR “Banco 1”

3.5.1.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n - 1}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n - 1}}$$

	MR (kg/cm ²)	Ec (kg/cm ²)		
Nº	x _i	y _i	x _i ²	y _i ²
1	39,57	253930,79	1565,78	64480848499,28
2	39,00	250628,33	1521,00	62814560186,77
3	36,48	233702,52	1330,79	54616867564,89
4	36,21	212033,66	1311,16	44958271057,77
5	38,50	229949,83	1482,25	52876922838,83
6	45,27	294777,30	2049,37	86893656595,29
7	41,59	269699,12	1729,73	72737616973,91
8	39,74	288830,23	1579,27	83422903195,39
9	39,88	234731,74	1590,41	55098991853,96
10	40,45	274432,34	1636,20	75313107611,04
11	47,27	317100,60	2234,45	100552791270,56
12	47,00	321897,88	2209,00	103618247145,38
13	47,48	326736,77	2254,35	106756915218,90
14	45,19	332097,90	2042,14	110289012267,24
15	46,97	321330,24	2206,18	103253126208,88
n	Σx_i	Σy_i	Σx_i²	Σy_i²
15	630,60	4161879,26	26742,10	1177683838488,10

Promedio de x	42,04
---------------	-------

Desviación Estándar de x	4,07
--------------------------	------

Promedio de y	277458,62
---------------	-----------

Desviación Estándar de y	40474,49
--------------------------	----------

Cuadro 17. Cálculo de la Desviación Estándar y la Media de Ec - MR “Banco 1”

3.5.1.3. “DIAGRAMA DE DISPERSIÓN” Representación gráfica de las variables

Nº	X _i	Y _i
1	39,57	253930,79
2	39,00	250628,33
3	36,48	233702,52
4	36,21	212033,66
5	38,50	229949,83
6	45,27	294777,30
7	41,59	269699,12
8	39,74	288830,23
9	39,88	234731,74
10	40,45	274432,34
11	47,27	317100,60
12	47,00	321897,88
13	47,48	326736,77
14	45,19	332097,90
15	46,97	321330,24

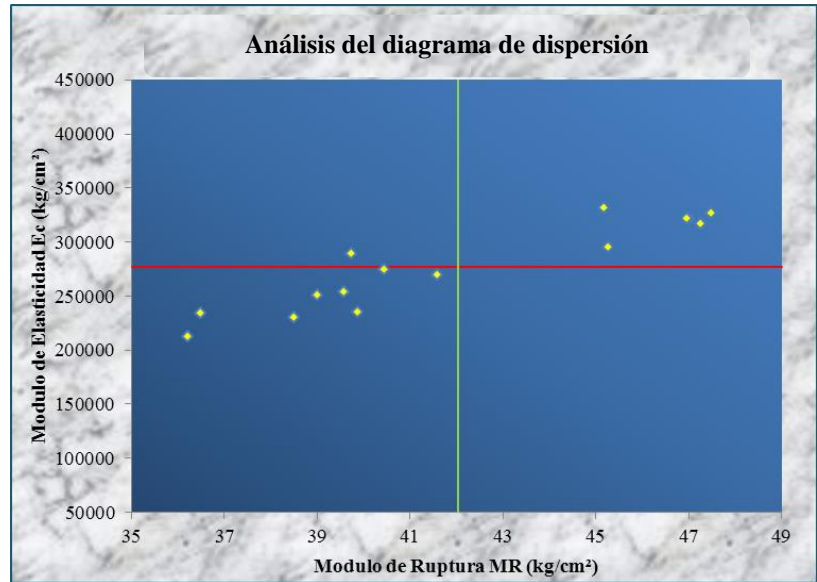


Fig. 50. Análisis del Diagrama de dispersión “Banco 1”

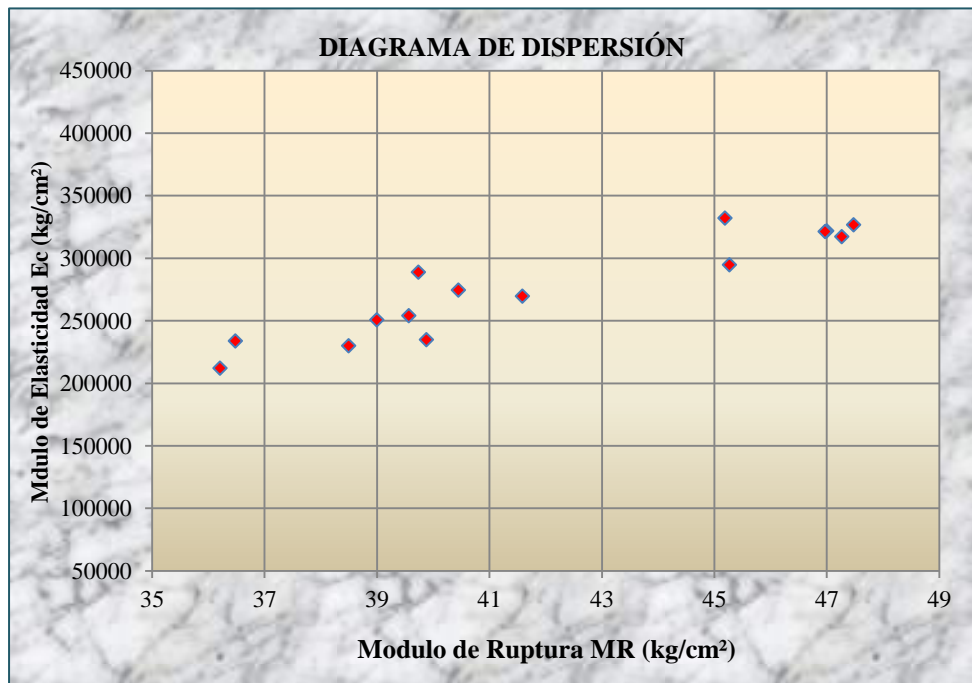


Fig. 51. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de Ec - MR) “Banco 1”

3.5.1.4. ECUACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL por el método de mínimos cuadrados

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
1	39,57	253930,79	10048041,55	1565,78
2	39,00	250628,33	9774504,90	1521,00
3	36,48	233702,52	8525467,91	1330,79
4	36,21	212033,66	7677738,67	1311,16
5	38,50	229949,83	8853068,33	1482,25
6	45,27	294777,30	13344568,37	2049,37
7	41,59	269699,12	11216786,53	1729,73
8	39,74	288830,23	11478113,44	1579,27
9	39,88	234731,74	9361101,97	1590,41
10	40,45	274432,34	11100788,03	1636,20
11	47,27	317100,60	14989345,42	2234,45
12	47,00	321897,88	15129200,51	2209,00
13	47,48	326736,77	15513461,72	2254,35
14	45,19	332097,90	15007503,90	2042,14
15	46,97	321330,24	15092881,60	2206,18
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2
15	630,60	4161879,26	177112572,83	26742,10

$$y = a + bx$$

$$\Sigma y_i = n * a + b * \Sigma x_i$$

$$\Sigma x_i y_i = a * \Sigma x_i + b * \Sigma x_i^2$$

$$\begin{array}{rcl} 4161879,26 & = & a * 15 + b * 630,60 \\ 177112572,83 & = & a * 630,60 + b * 26742,10 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} 630,60 \\ -15 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{rcl} 2624481059,02 & = & a * 9459,00 + b * 397656,36 \\ -2656688592,49 & = & a * -9459,00 + b * -401131,43 \\ \hline -32207533,47 & = & 0,00 + b * -3475,07 \end{array}$$

$$b = 9268,17$$

$$a = -112175,40$$

$$a = -112175,40$$

$$y = 9268.2 x - 112175$$

Cuadro 18. Cálculo de la Ecuación de Regresión Lineal para Ec - MR "Banco 1"

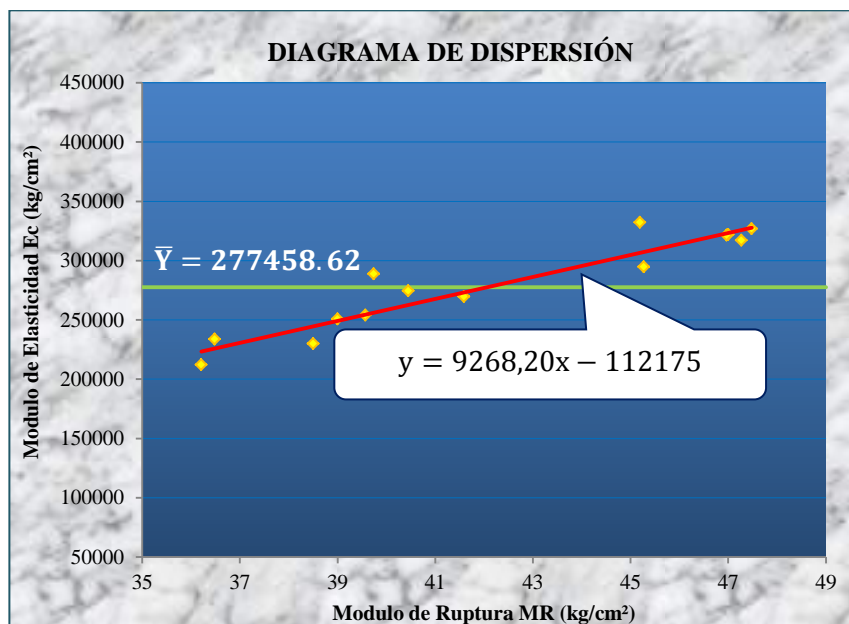
3.5.1.5.- COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN r^2

$$\bar{y} = 277458.62$$

$$y = 9268.2 * x - 112175$$

Nº	x_i	y_i	y	$y_i - y$	$(y_i - y)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	39,57	253930,79	254566,23	-635,43	403775,87	-23527,82	553558426,02
2	39,00	250628,33	249283,37	1344,96	1808921,19	-26830,29	719864263,57
3	36,48	233702,52	225927,57	7774,95	60449808,09	-43756,10	1914596086,41
4	36,21	212033,66	223425,17	-11391,51	129766490,10	-65424,96	4280425600,69
5	38,50	229949,83	244649,28	-14699,46	216074000,38	-47508,79	2257085155,81
6	45,27	294777,30	307394,82	-12617,52	159201755,13	17318,68	299936777,87
7	41,59	269699,12	273287,94	-3588,82	12879599,71	-7759,49	60209747,70
8	39,74	288830,23	256141,82	32688,41	1068532452,77	11371,62	129313636,70
9	39,88	234731,74	257439,36	-22707,62	515635900,46	-42726,87	1825585645,01
10	40,45	274432,34	262722,22	11710,12	137126815,82	-3026,28	9158370,94
11	47,27	317100,60	325931,16	-8830,56	77978856,83	39641,98	1571486903,12
12	47,00	321897,88	323428,76	-1530,88	2343578,27	44439,27	1974848364,00
13	47,48	326736,77	327877,48	-1140,71	1301228,32	49278,15	2428336105,57
14	45,19	332097,90	306653,36	25444,53	647424193,81	54639,28	2985450757,38
15	46,97	321330,24	323150,71	-1820,47	3314104,16	43871,63	1924719716,30
n	Σx_i	Σy_i			$\Sigma(y_i - y)^2$		$\Sigma(y_i - \bar{y})^2$
45	190,45	1256792,51			SCE = 149833111.78		SCT = 1223484372.18

Cuadro 19. Cálculo del Coeficiente de Determinación para E_c - MR “Banco 1”



Coeficiente de determinación:

$$\rightarrow r^2 = \frac{SCT - SCE}{SCT}$$

$$r^2 = 0,8677 \cong 0.87$$

Fig. 52. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de E_c -MR, Línea Recta y la Media de E_c) “Banco 1”

3.5.1.6. CORRELACIÓN

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	y_i^2
1	39,57	253930,79	10048041,55	1565,78	64480848499,28
2	39,00	250628,33	9774504,90	1521,00	62814560186,77
3	36,48	233702,52	8525467,91	1330,79	54616867564,89
4	36,21	212033,66	7677738,67	1311,16	44958271057,77
5	38,50	229949,83	8853068,33	1482,25	52876922838,83
6	45,27	294777,30	13344568,37	2049,37	86893656595,29
7	41,59	269699,12	11216786,53	1729,73	72737616973,91
8	39,74	288830,23	11478113,44	1579,27	83422903195,39
9	39,88	234731,74	9361101,97	1590,41	55098991853,96
10	40,45	274432,34	11100788,03	1636,20	75313107611,04
11	47,27	317100,60	14989345,42	2234,45	100552791270,56
12	47,00	321897,88	15129200,51	2209,00	103618247145,38
13	47,48	326736,77	15513461,72	2254,35	106756915218,90
14	45,19	332097,90	15007503,90	2042,14	110289012267,24
15	46,97	321330,24	15092881,60	2206,18	103253126208,88
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2	Σy_i^2
15	630,60	4161879,26	177112572,83	26742,10	1177683838488,10

$$r = 0.93$$

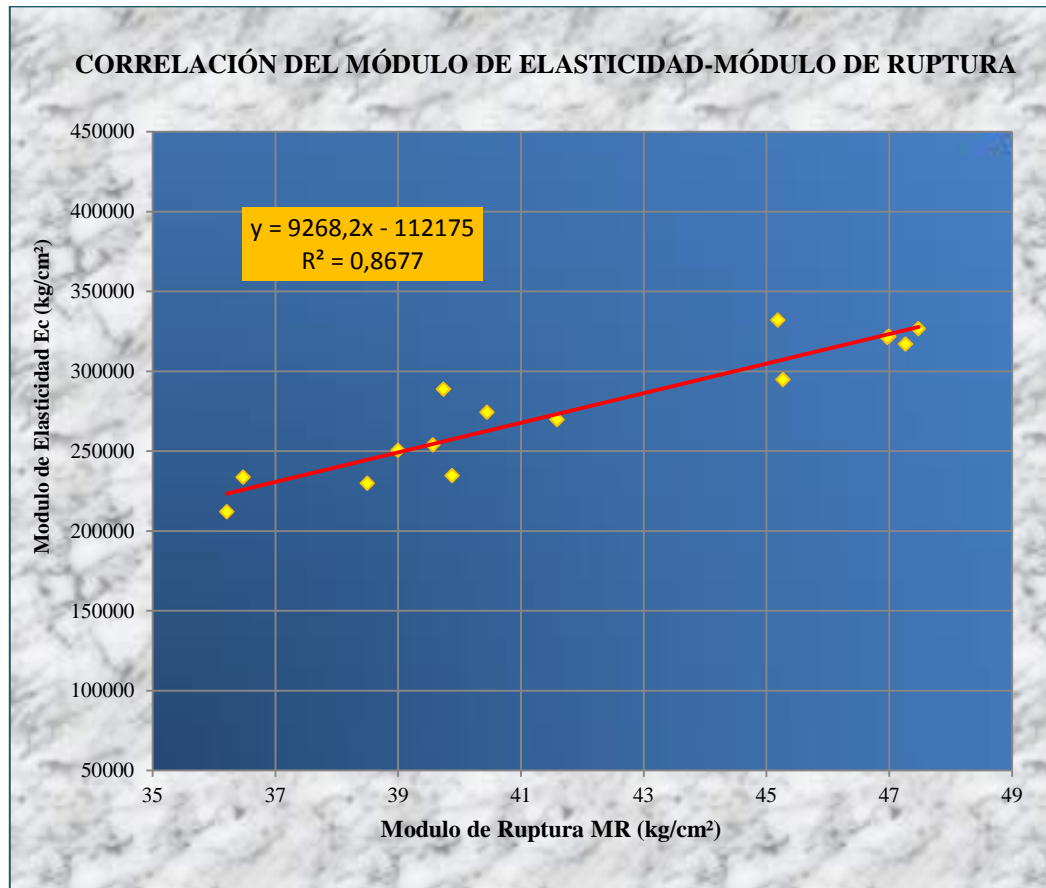
Tipo y grado de correlación Positiva Fuerte

Valores de r	Tipo y grado de correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r \leq -0.8$	Negativa fuerte
$-0.8 < r < -0.5$	Negativa moderada
$-0.5 \leq r < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r \leq 0.5$	Positiva débil
$0.5 < r < 0.8$	Positiva moderada
$0.8 \leq r < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta

Ref. Probabilidad y Estadística para Ingenieros
Edición 1980. (Bibliografía N°31)

Cuadro 20. Cálculo de la Correlación entre el Módulo de Elasticidad E_c y el Módulo de Ruptura y MR "Banco 1"

3.5.1.7. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE RUPTURA para concretos elaborados con agregados provenientes de San Luis “Banco de Estudio 1”.



$$E_c = 9268.2 MR - 112175$$

$$r = 0.93$$

Fig. 53. Correlación entre el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Ruptura para concretos elaborados con agregados provenientes de San Luis “Banco 1” para MR=35, 40 y 45 kg/cm²

3.5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO BANCO 2

Determinación de la correlación de “Ec” y “MR” para concretos elaborados con agregados provenientes de San Blas

3.5.2.1. CONSTRUCCIÓN DE CARTAS DE CONTROL

Carta de control de calidad para Módulo de Elasticidad

	N° de Ensayo		
	1	2	3
Módulo de Elasticidad Ec (kg/cm ²)	201151,19	300131,45	312263,71
	191660,05	329176,24	336600,11
	195813,17	333627,76	346873,30
	228534,35	259185,73	361327,39
	209372,91	235640,46	329255,22

Media	205306,33	291552,33	337263,95
-------	-----------	-----------	-----------

Rango	36874,30	97987,30	49063,68
-------	----------	----------	----------

Media Mayor	278040,87	LCS	424813,24
-------------	-----------	-----	-----------

M de Rangos	61308,43	LCI	131268,50
-------------	----------	-----	-----------

Cuadro 21. Parámetros para el control de calidad para Ec “Banco 2”

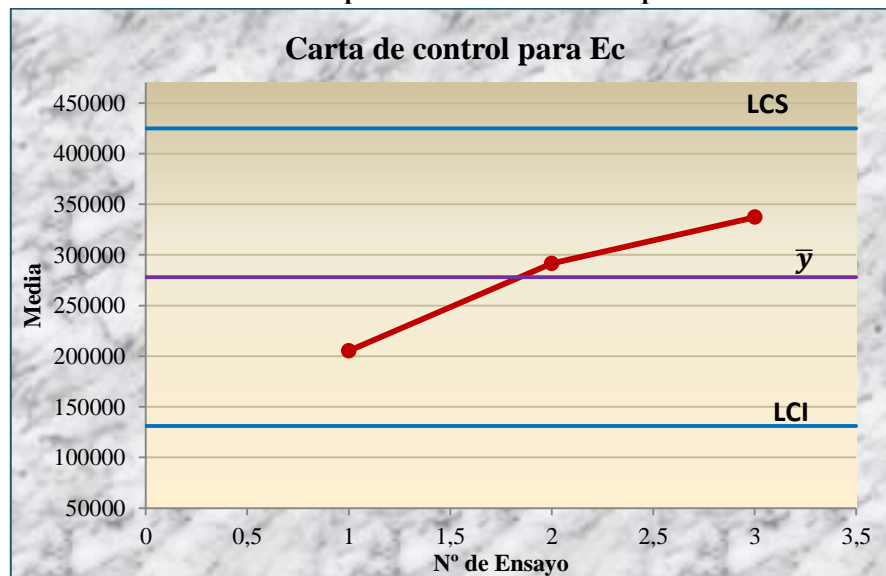


Fig. 54. Carta de control de calidad para Ec “Banco 2”

Carta de control de calidad para Módulo de Ruptura			
	N° de Ensayo		
	1	2	3
Módulo de Ruptura MR (kg/cm²)	37,12	42,06	46,59
	36,48	44,46	47,61
	35,85	45,52	46,04
	36,80	43,81	49,75
	35,80	39,50	49,02
Media	36,41	43,07	47,80
Rango	1,32	6,02	3,71
Media Mayor	42,43	LCS	51,25
M de Rangos	3,68	LCI	33,61

Cuadro 22. Parámetros para el control de calidad para MR “Banco 2”

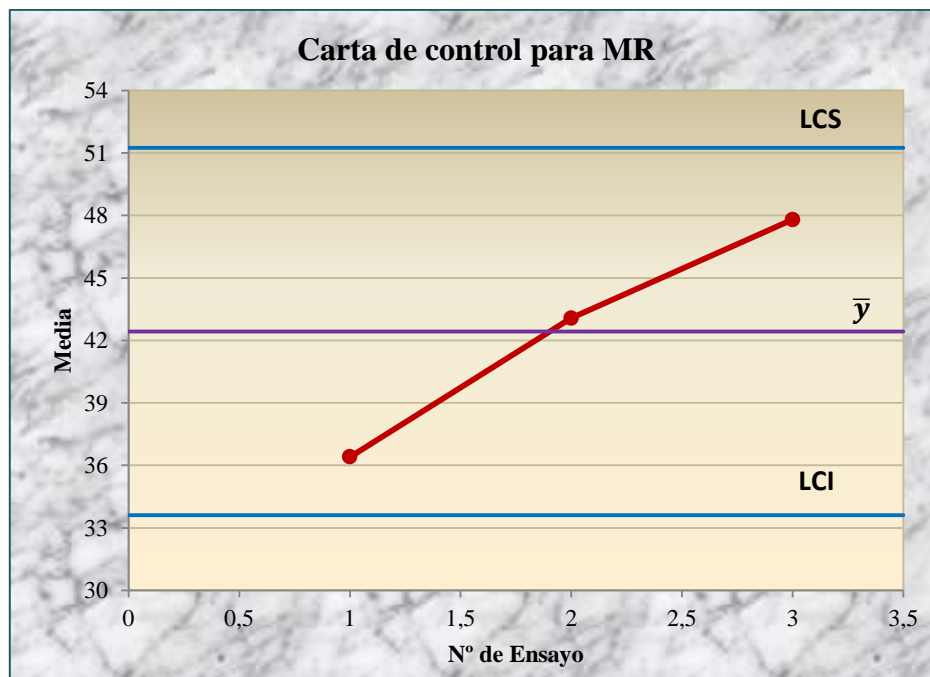


Fig. 55. Carta de control de calidad para MR “Banco 2”

3.5.2.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n - 1}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n - 1}}$$

	MR (kg/cm ²)	Ec (kg/cm ²)		
Nº	x _i	y _i	x _i ²	y _i ²
1	37,12	201151,19	1377,89	40461801238,42
2	36,48	191660,05	1330,79	36733574766,00
3	35,85	195813,17	1285,22	38342797545,45
4	36,80	228534,35	1354,24	52227949129,92
5	35,80	209372,91	1281,64	43837015441,87
6	42,06	300131,45	1769,04	90078887279,10
7	44,46	329176,24	1976,69	108356996980,54
8	45,52	333627,76	2072,07	111307482242,62
9	43,81	259185,73	1919,32	67177242635,63
10	39,50	235640,46	1560,25	55526426389,01
11	46,59	312263,71	2170,63	97508624582,96
12	47,61	336600,11	2266,71	113299634052,01
13	46,04	346873,30	2119,68	120321086252,89
14	49,75	361327,39	2475,06	130557482764,21
15	49,02	329255,22	2402,96	108408999897,25
n	Σx_i	Σy_i	Σx_i²	Σy_i²
15	636,41	4170613,04	27362,20	1214146001197,89

Promedio de x	42,43
---------------	-------

Desviación Estándar de x	5,08
--------------------------	------

Promedio de y	278040,87
---------------	-----------

Desviación Estándar de y	62418,59
--------------------------	----------

Cuadro 23. Cálculo de la Desviación Estándar y la Media de Ec - MR “Banco 2”

3.5.2.3. “DIAGRAMA DE DISPERSIÓN” Representación gráfica de las variables

Nº	x_i	y_i
1	37,12	201151,19
2	36,48	191660,05
3	35,85	195813,17
4	36,80	228534,35
5	35,80	209372,91
6	42,06	300131,45
7	44,46	329176,24
8	45,52	333627,76
9	43,81	259185,73
10	39,50	235640,46
11	46,59	312263,71
12	47,61	336600,11
13	46,04	346873,30
14	49,75	361327,39
15	49,02	329255,22

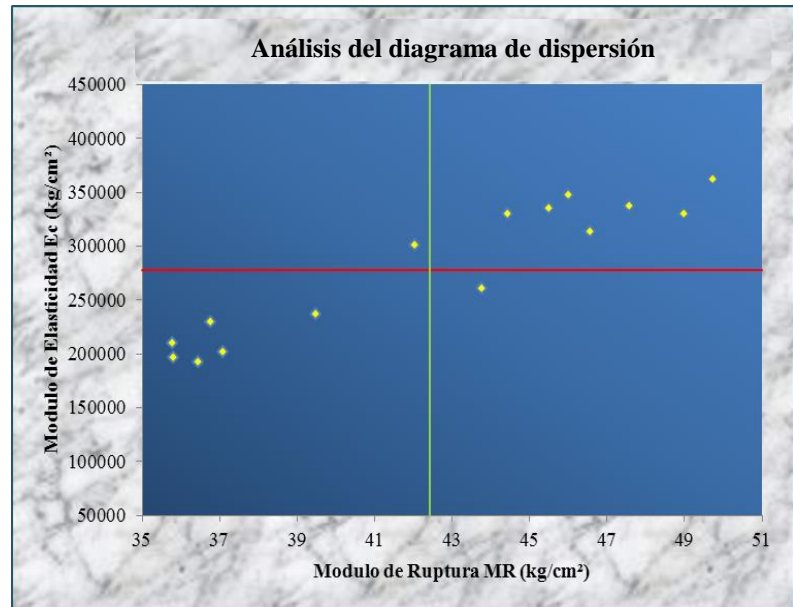


Fig. 56. Análisis del Diagrama de dispersión “Banco 2”

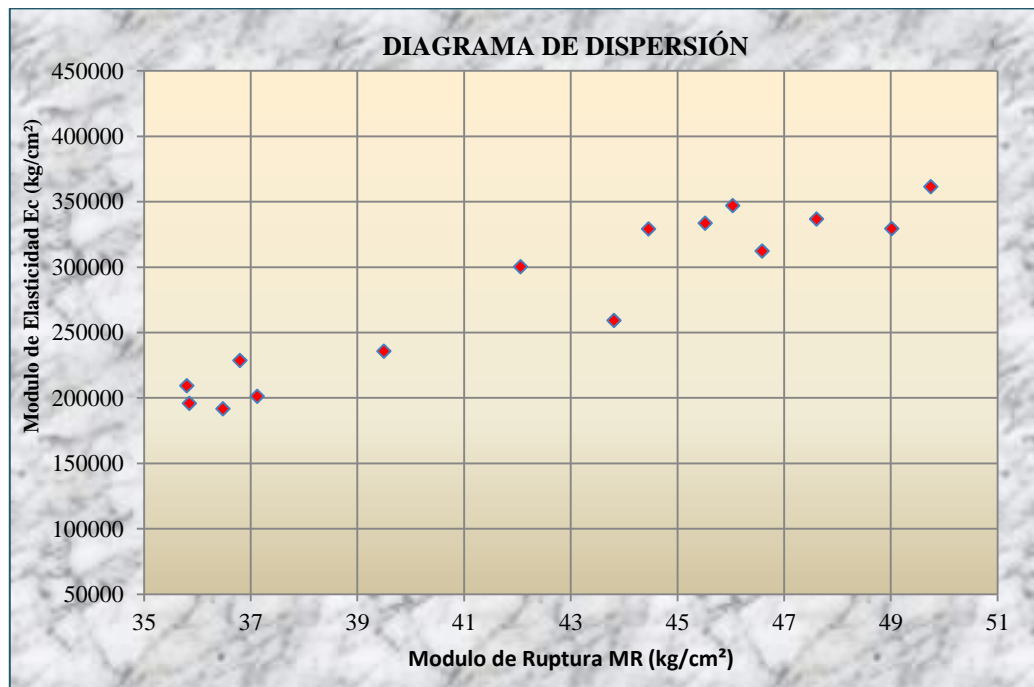


Fig. 57. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de E_c - MR “Banco 2”)

3.5.2.4. ECUACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL por el método de mínimos cuadrados

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
1	37,12	201151,19	7466732,17	1377,89
2	36,48	191660,05	6991758,62	1330,79
3	35,85	195813,17	7019902,14	1285,22
4	36,80	228534,35	8410064,08	1354,24
5	35,80	209372,91	7495550,18	1281,64
6	42,06	300131,45	12623528,79	1769,04
7	44,46	329176,24	14635175,63	1976,69
8	45,52	333627,76	15186735,64	2072,07
9	43,81	259185,73	11354926,83	1919,32
10	39,50	235640,46	9307798,17	1560,25
11	46,59	312263,71	14548366,25	2170,63
12	47,61	336600,11	16025531,24	2266,71
13	46,04	346873,30	15970046,73	2119,68
14	49,75	361327,39	17976037,65	2475,06
15	49,02	329255,22	16140090,88	2402,96
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2
15	636,41	4170613,04	181152245,01	27362,20

$$y = a + bx$$

$$\Sigma y_i = n * a + b * \Sigma x_i$$

$$\Sigma x_i y_i = a * \Sigma x_i + b * \Sigma x_i^2$$

$$\begin{array}{rcl}
 4170613,04 = a * 15 & + & b * 636,41 \\
 181152245,01 = a * 636,41 & + & b * 27362,20
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l} 636,41 \\ -15 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{rcl}
 2654219844,79 = a * 9546,15 & + & b * 405017,69 \\
 -2717283675,12 = a * -9546,15 & + & b * -410433,06 \\
 -63063830,34 = & & 0,00 + b * -5415,37
 \end{array}$$

$$b = 11645,35$$

$$a = -216040,13$$

$$a = -216040,13$$

$$y = 11645,35 x - 216040,13$$

Cuadro 24. Cálculo de la Ecuación de Regresión Lineal para Ec - MR "Banco 2"

3.5.2.5. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN r^2

$$\bar{y} = 278040,87$$

$$y = 11645,35 * x - 216040,13$$

Nº	x_i	y_i	y	$y_i - y$	$(y_i - y)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	37,12	201151,19	216235,13	-15083,94	227525340,92	-76889,68	5912022787,98
2	36,48	191660,05	208782,11	-17122,06	293164984,04	-86380,82	7461645948,70
3	35,85	195813,17	201445,54	-5632,37	31723625,25	-82227,70	6761394537,65
4	36,80	228534,35	212508,62	16025,73	256823950,32	-49506,52	2450895456,50
5	35,80	209372,91	200863,28	8509,63	72413876,97	-68667,96	4715288639,00
6	42,06	300131,45	273763,15	26368,30	695287490,16	22090,58	487993754,19
7	44,46	329176,24	301711,98	27464,26	754285731,84	51135,37	2614826133,22
8	45,52	333627,76	314056,04	19571,72	383052044,38	55586,89	3089902413,99
9	43,81	259185,73	294142,50	-34956,77	1221975901,52	-18855,14	355516279,28
10	39,50	235640,46	243951,06	-8310,60	69066040,04	-42400,41	1797794711,63
11	46,59	312263,71	326516,57	-14252,86	203143888,30	34222,84	1171202823,30
12	47,61	336600,11	338394,82	-1794,71	3220980,30	58559,24	3429184667,46
13	46,04	346873,30	320111,62	26761,68	716187258,76	68832,43	4737903511,48
14	49,75	361327,39	363315,86	-1988,47	3954015,71	83286,52	6936644524,76
15	49,02	329255,22	354814,76	-25559,54	653289966,40	51214,35	2622909714,21
n	Σx_i	Σy_i			$\Sigma (y_i - y)^2$		$\Sigma (y_i - \bar{y})^2$
15	636,41	4170613,04			SCE = 5585115094,92		SCT = 54545125903,35

Cuadro 25. Cálculo del Coeficiente de Determinación para Ec - MR "Banco 2"

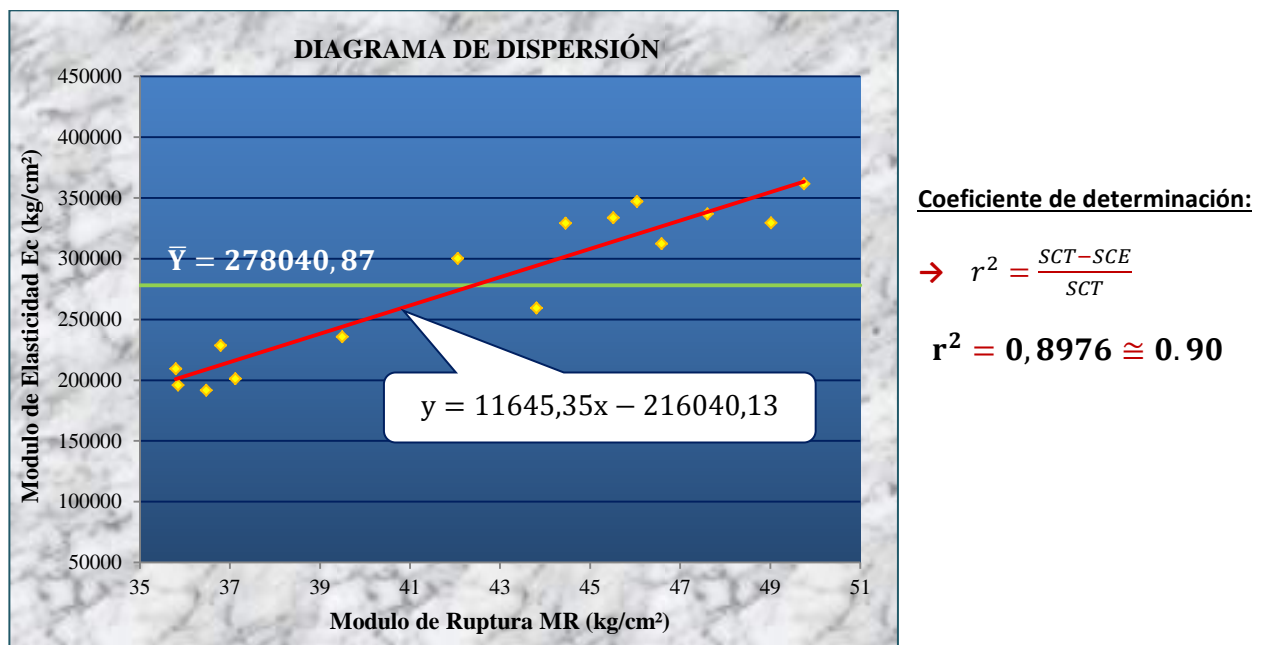


Fig. 58. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de Ec-MR, Línea Recta y la Media de Ec) "Banco 2"

3.5.2.6. CORRELACIÓN

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	y_i^2
1	37,12	201151,19	7466732,17	1377,89	40461801238,42
2	36,48	191660,05	6991758,62	1330,79	36733574766,00
3	35,85	195813,17	7019902,14	1285,22	38342797545,45
4	36,80	228534,35	8410064,08	1354,24	52227949129,92
5	35,80	209372,91	7495550,18	1281,64	43837015441,87
6	42,06	300131,45	12623528,79	1769,04	90078887279,10
7	44,46	329176,24	14635175,63	1976,69	108356996980,54
8	45,52	333627,76	15186735,64	2072,07	111307482242,62
9	43,81	259185,73	11354926,83	1919,32	67177242635,63
10	39,50	235640,46	9307798,17	1560,25	55526426389,01
11	46,59	312263,71	14548366,25	2170,63	97508624582,96
12	47,61	336600,11	16025531,24	2266,71	113299634052,01
13	46,04	346873,30	15970046,73	2119,68	120321086252,89
14	49,75	361327,39	17976037,65	2475,06	130557482764,21
15	49,02	329255,22	16140090,88	2402,96	108408999897,25
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2	Σy_i^2
15	636,41	4170613,04	181152245,01	27362,20	1214146001197,89

$$r = 0.95$$

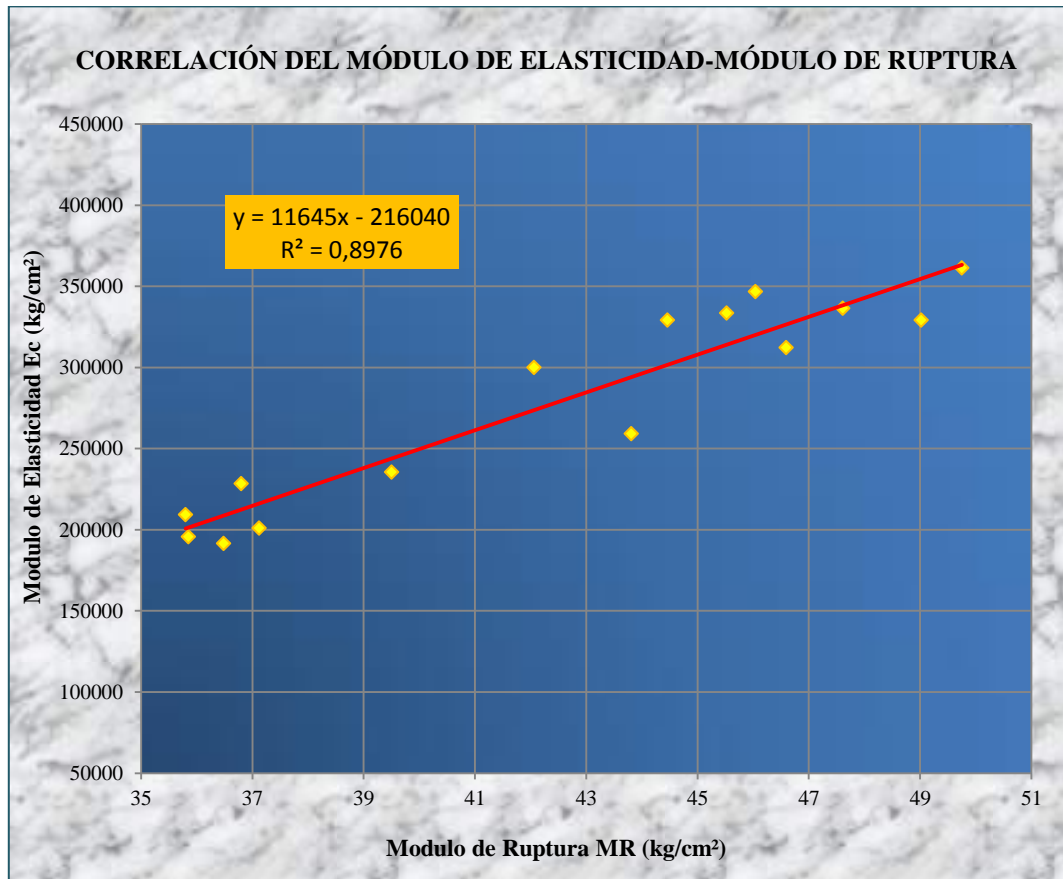
Tipo y grado de correlación Positiva Fuerte

Valores de r	Tipo y grado de correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r \leq -0.8$	Negativa fuerte
$-0.8 < r < -0.5$	Negativa moderada
$-0.5 \leq r < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r \leq 0.5$	Positiva débil
$0.5 < r < 0.8$	Positiva moderada
$0.8 < r < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta

Ref. Probabilidad y Estadística para Ingenieros
Edición 1980. (Bibliografía N°31)

Cuadro 26. Cálculo de la Correlación entre el Módulo de Elasticidad E_c y el Módulo de Ruptura y MR “Banco 2”

3.5.2.7. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE RUPTURA para concretos elaborados con agregados provenientes de San Blas “Banco de Estudio 2”.



$$E_c = 11645 MR - 216040$$

$$r = 0.95$$

Fig. 59. Correlación entre el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Ruptura para concretos elaborados con agregados provenientes de San Blas “Banco 2”. Para MR=35, 40 y 45 kg/cm²

3.5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO BANCO 3

Determinación de la correlación de “Ec” y “MR” para concretos elaborados con agregados provenientes de La Victoria y Santa Ana

3.5.3.1. CONSTRUCCIÓN DE CARTAS DE CONTROL

Carta de control de calidad para Módulo de Elasticidad

	N° de Ensayo		
	1	2	3
Módulo de Elasticidad Ec (kg/cm ²)	235481,65	282050,21	353101,72
	236659,65	313954,00	334566,45
	192064,46	303235,00	341346,41
	201100,76	283180,03	292294,14
	202663,06	303453,76	360281,47

Media	213593,92	297174,60	336318,04
-------	-----------	-----------	-----------

Rango	44595,19	31903,79	67987,33
-------	----------	----------	----------

Media Mayor	282362,18	LCS	397662,26
-------------	-----------	-----	-----------

M de Rangos	48162,10	LCI	167062,11
-------------	----------	-----	-----------

Cuadro 27. Parámetros para el control de calidad para Ec “Banco 3”

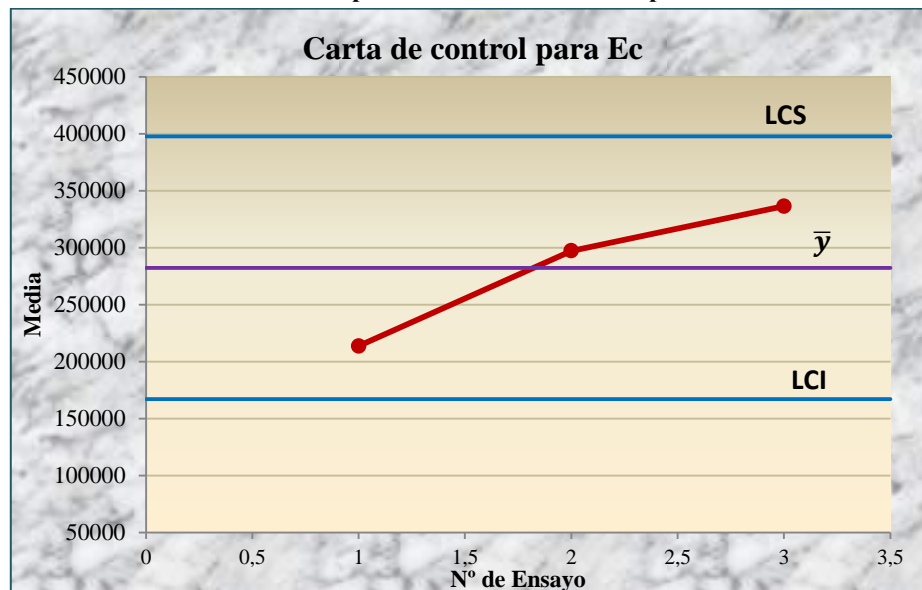


Fig. 60. Carta de control de calidad para Ec “Banco 3”

Carta de control de calidad para Módulo de Ruptura			
	N° de Ensayo		
	1	2	3
Módulo de Ruptura MR (kg/cm²)	37,16	40,68	48,34
	38,16	43,10	47,55
	35,94	43,00	47,69
	38,50	40,55	45,59
	37,65	42,85	50,72
Media	37,48	42,04	47,98
Rango	2,56	2,55	5,13
Media Mayor	42,50	LCS	50,67
M de Rangos	3,41	LCI	34,33

Cuadro 28. Parámetros para el control de calidad para MR “Banco 3”

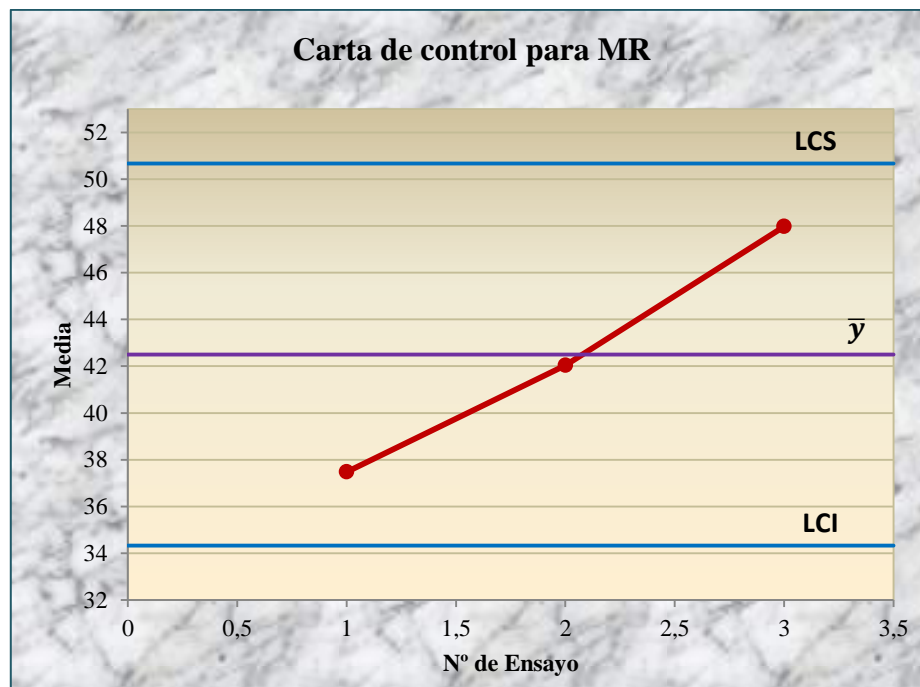


Fig. 61. Carta de control de calidad para MR “Banco 3”

3.5.3.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n-1}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n-1}}$$

	MR (kg/cm ²)	Ec (kg/cm ²)		
Nº	x _i	y _i	x _i ²	y _i ²
1	37,16	235481,65	1380,87	55451607486,72
2	38,16	236659,65	1456,19	56007789938,12
3	35,94	192064,46	1291,68	36888756795,09
4	38,50	201100,76	1482,25	40441515672,58
5	37,65	202663,06	1417,52	41072315888,56
6	40,68	282050,21	1654,86	79552320961,04
7	43,10	313954,00	1857,61	98567114116,00
8	43,00	303235,00	1849,00	91951465225,00
9	40,55	283180,03	1644,30	80190929390,80
10	42,85	303453,76	1836,12	92084184458,14
11	48,34	353101,72	2336,76	124680824666,96
12	47,55	334566,45	2261,00	111934709465,60
13	47,69	341346,41	2274,34	116517371619,89
14	45,59	292294,14	2078,45	85435864278,34
15	50,72	360281,47	2572,52	129802737625,36
n	Σx_i	Σy_i	Σx_i²	Σy_i²
15	637,48	4235432,77	27393,47	1240579507588,21

Promedio de x	42,50
---------------	-------

Desviación Estándar de x	4,64
--------------------------	------

Promedio de y	282362,18
---------------	-----------

Desviación Estándar de y	56475,95
--------------------------	----------

Cuadro 29. Cálculo de la Desviación Estándar y la Media de Ec - MR "Banco 3"

3.5.3.3. “DIAGRAMA DE DISPERSIÓN” Representación gráfica de las variables

Nº	x_i	y_i
1	37,16	235481,65
2	38,16	236659,65
3	35,94	192064,46
4	38,50	201100,76
5	37,65	202663,06
6	40,68	282050,21
7	43,10	313954,00
8	43,00	303235,00
9	40,55	283180,03
10	42,85	303453,76
11	48,34	353101,72
12	47,55	334566,45
13	47,69	341346,41
14	45,59	292294,14
15	50,72	360281,47

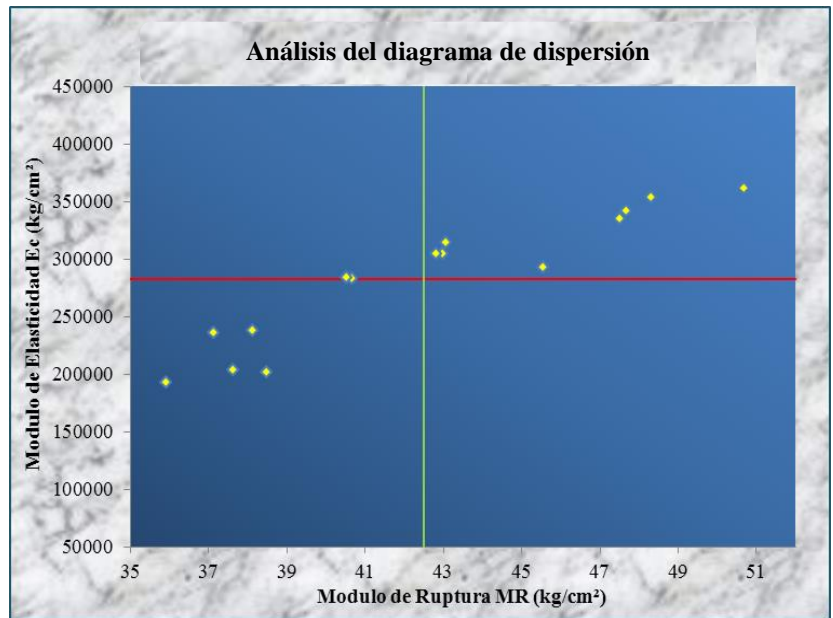


Fig. 62. Análisis del Diagrama de dispersión “Banco 3”

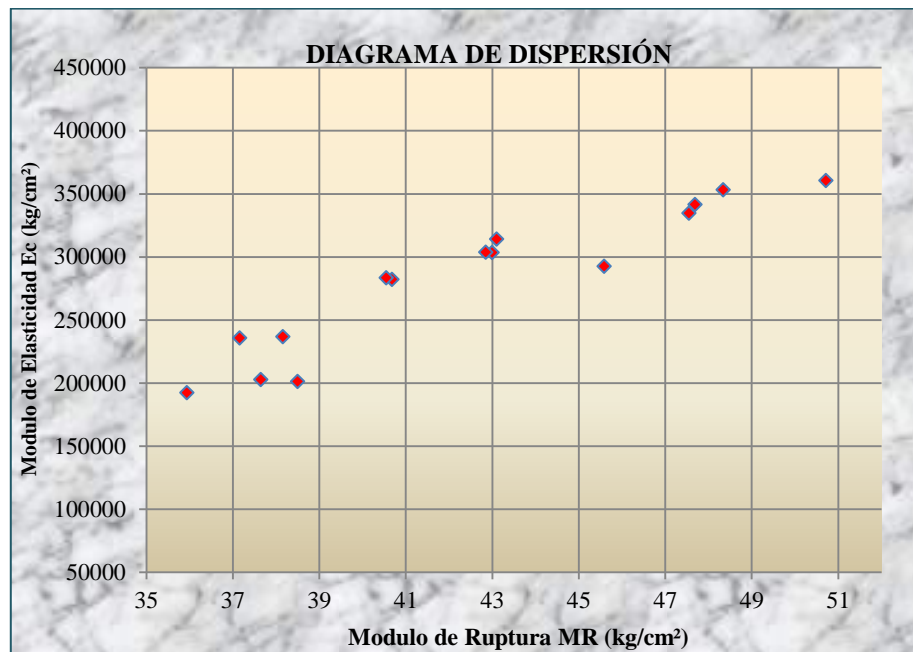


Fig. 63. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de Ec - MR) “Banco 3”

3.5.3.4. ECUACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL por el método de mínimos cuadrados

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
1	37,16	235481,65	8750498,11	1380,87
2	38,16	236659,65	9030932,24	1456,19
3	35,94	192064,46	6902796,69	1291,68
4	38,50	201100,76	7742379,26	1482,25
5	37,65	202663,06	7630264,21	1417,52
6	40,68	282050,21	11473802,54	1654,86
7	43,10	313954,00	13531417,40	1857,61
8	43,00	303235,00	13039105,00	1849,00
9	40,55	283180,03	11482950,22	1644,30
10	42,85	303453,76	13002993,62	1836,12
11	48,34	353101,72	17068937,14	2336,76
12	47,55	334566,45	15908634,70	2261,00
13	47,69	341346,41	16278810,29	2274,34
14	45,59	292294,14	13325689,84	2078,45
15	50,72	360281,47	18273476,16	2572,52
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2
15	637,48	4235432,77	183442687,43	27393,47

$$y = a + bx$$

$$\Sigma y_i = n * a + b * \Sigma x_i$$

$$\Sigma x_i y_i = a * \Sigma x_i + b * \Sigma x_i^2$$

$$\begin{array}{rcl}
 4235432,77 & = & a * 15 + b * 637,48 \\
 183442687,43 & = & a * 637,48 + b * 27393,47
 \end{array}
 \quad \left| \begin{array}{l} 637,48 \\ -15 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{rcl}
 2700003682,22 & = & a * 9562,20 + b * 406380,75 \\
 -2751640311,46 & = & a * -9562,20 + b * -410901,98 \\
 -51636629,24 & = & 0,00 + b * -4521,23
 \end{array}$$

$$b = 11420,92$$

$$a = -203011,84$$

$$a = -203011,84$$

$$y = 11420,92 x - 203011,84$$

Cuadro 30. Cálculo de la Ecuación de Regresión Lineal para Ec - MR "Banco 3"

3.5.3.5. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN r^2

$$\bar{y} = 282362,18$$

$$y = 11420,92 * x - 203011,84$$

Nº	x_i	y_i	y	$y_i - y$	$(y_i - y)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	37,16	235481,65	221389,68	14091,97	198583602,68	-46880,53	2197784530,63
2	38,16	236659,65	232810,60	3849,05	14815153,90	-45702,53	2088721674,96
3	35,94	192064,46	207456,15	-15391,69	236904237,20	-90297,72	8153679079,98
4	38,50	201100,76	236693,72	-35592,96	1266858671,97	-81261,42	6603419138,86
5	37,65	202663,06	226985,93	-24322,87	591602156,94	-79699,12	6351950472,63
6	40,68	282050,21	261591,33	20458,88	418565704,59	-311,97	97328,19
7	43,10	313954,00	289229,97	24724,03	611277821,50	31591,82	998042796,06
8	43,00	303235,00	288087,87	15147,13	229435415,06	20872,82	435674419,94
9	40,55	283180,03	260106,61	23073,42	532382638,88	817,85	668870,99
10	42,85	303453,76	286374,74	17079,02	291693066,82	21091,58	444854550,04
11	48,34	353101,72	349075,61	4026,11	16209590,98	70739,54	5004081859,18
12	47,55	334566,45	340053,08	-5486,63	30103072,83	52204,27	2725285318,99
13	47,69	341346,41	341652,01	-305,60	93388,93	58984,23	3479138838,17
14	45,59	292294,14	317668,07	-25373,93	643836144,88	9931,96	98643736,74
15	50,72	360281,47	376257,40	-15975,93	255230483,99	77919,29	6071415026,86
n	Σx_i	Σy_i			$\Sigma (y_i - y)^2$		$\Sigma (y_i - \bar{y})^2$
15	637,48	4235432,77			SCE = 5337591151,18		SCT = 44653457642,22

Cuadro 31. Cálculo del Coeficiente de Determinación para Ec - MR “Banco 3”

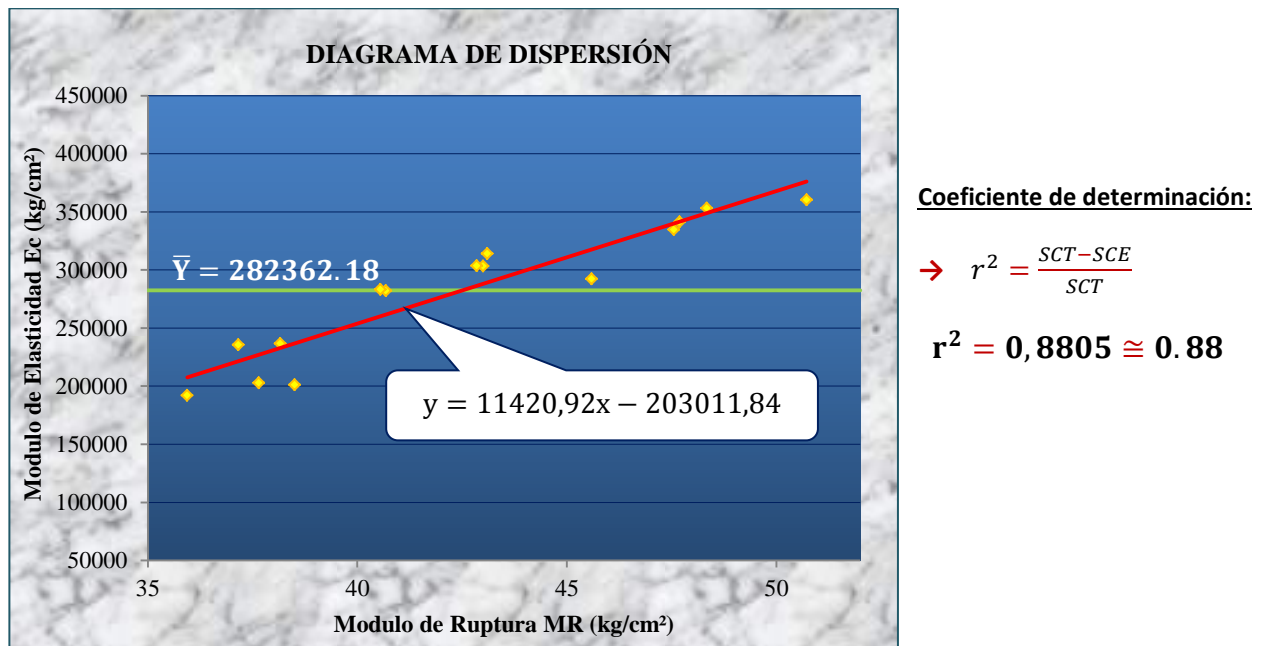


Fig. 64. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de Ec-MR, Línea Recta y la Media de Ec) “Banco 3”

3.5.3.6. CORRELACIÓN

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	y_i^2
1	37,16	235481,65	8750498,11	1380,87	55451607486,72
2	38,16	236659,65	9030932,24	1456,19	56007789938,12
3	35,94	192064,46	6902796,69	1291,68	36888756795,09
4	38,50	201100,76	7742379,26	1482,25	40441515672,58
5	37,65	202663,06	7630264,21	1417,52	41072315888,56
6	40,68	282050,21	11473802,54	1654,86	79552320961,04
7	43,10	313954,00	13531417,40	1857,61	98567114116,00
8	43,00	303235,00	13039105,00	1849,00	91951465225,00
9	40,55	283180,03	11482950,22	1644,30	80190929390,80
10	42,85	303453,76	13002993,62	1836,12	92084184458,14
11	48,34	353101,72	17068937,14	2336,76	124680824666,96
12	47,55	334566,45	15908634,70	2261,00	111934709465,60
13	47,69	341346,41	16278810,29	2274,34	116517371619,89
14	45,59	292294,14	13325689,84	2078,45	85435864278,34
15	50,72	360281,47	18273476,16	2572,52	129802737625,36
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2	Σy_i^2
15	637,48	4235432,77	183442687,43	27393,47	1240579507588,21

$$r = 0.94$$

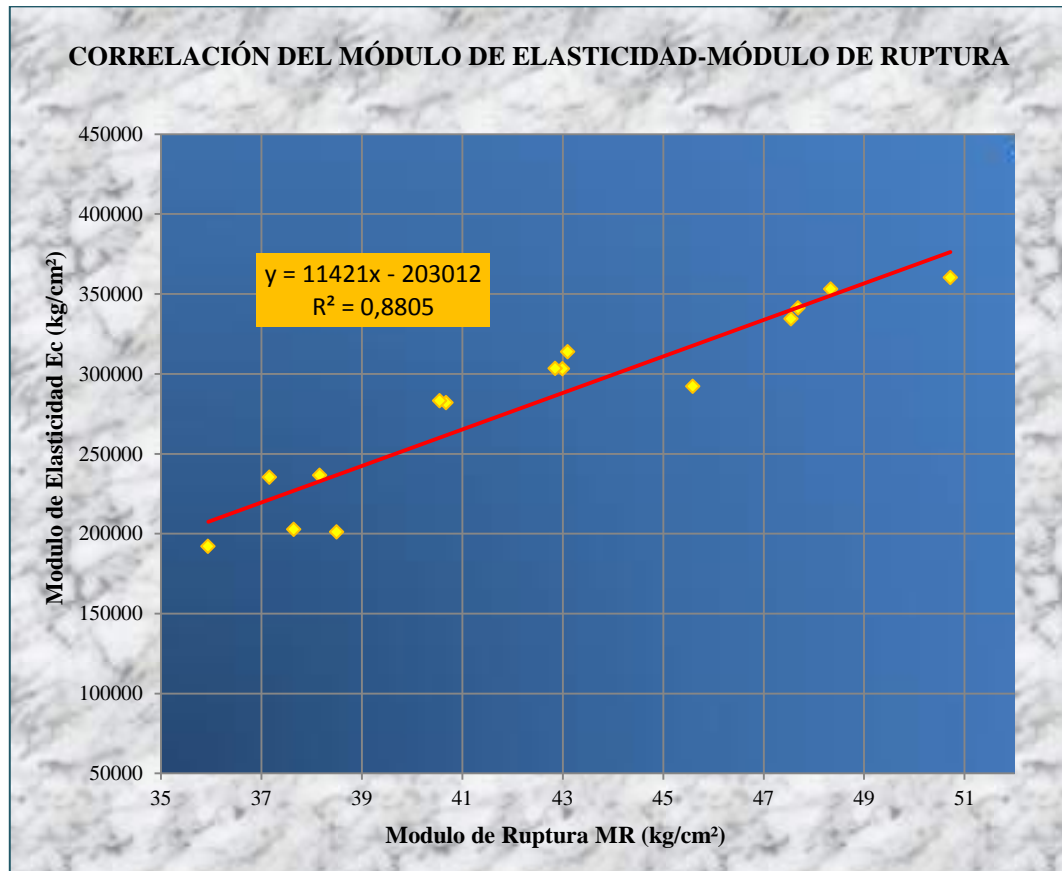
Tipo y grado de correlación Positiva Fuerte

Valores de r	Tipo y grado de correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r \leq -0.8$	Negativa fuerte
$-0.8 < r < -0.5$	Negativa moderada
$-0.5 \leq r < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r \leq 0.5$	Positiva débil
$0.5 < r < 0.8$	Positiva moderada
$0.8 \leq r < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta

Ref. Probabilidad y Estadística para Ingenieros
Edición 1980. (Bibliografía N°31)

Cuadro 32. Cálculo de la Correlación entre el Módulo de Elasticidad E_c y el Módulo de Ruptura y MR "Banco 3"

3.5.3.7. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE RUPTURA para concretos elaborados con agregados provenientes de La Victoria y Santa Ana “Banco de Estudio 3”.



$$E_c = 11421 MR - 203012$$

$$r = 0.94$$

Fig. 65. Correlación entre el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Ruptura para concretos elaborados con agregados provenientes de La Victoria y Santa Ana “Banco 3”. Para MR=35, 40 y 45 kg/cm²

3.5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO GENERAL

Determinación de la correlación de “Ec” y “MR” para concretos elaborados con agregados provenientes de los Bancos de Estudio ubicados en San Luis, San Blas, La Victoria y Santa Ana pertenecientes al Departamento de Tarija

3.5.4.1. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

	MR (kg/cm ²)	Ec (kg/cm ²)		
Nº	x _i	y _i	x _i ²	y _i ²
1	39,57	253930,81	1565,78	64480856267,26
2	39,00	250628,35	1521,00	62814569823,72
3	36,48	233702,50	1330,79	54616858506,25
4	36,21	212033,67	1311,16	44958277213,67
5	38,50	229949,83	1482,25	52876924317,03
6	37,12	201151,19	1377,89	40461801238,42
7	36,48	191660,05	1330,79	36733574766,00
8	35,85	195813,17	1285,22	38342797545,45
9	36,80	228534,35	1354,24	52227949129,92
10	35,80	209372,91	1281,64	43837015441,87
11	37,16	235481,65	1380,87	55451607486,72
12	38,16	236659,65	1456,19	56007789938,12
13	35,94	192064,46	1291,68	36888756795,09
14	38,50	201100,76	1482,25	40441515672,58
15	37,65	202663,06	1417,52	41072315888,56
16	45,27	294777,30	2049,37	86893656595,29
17	41,59	269699,12	1729,73	72737615328,77
18	39,74	288830,22	1579,27	83422895985,25
19	39,88	234731,76	1590,41	55098999152,70
20	40,45	274432,36	1636,20	75313120215,17
21	42,06	300131,45	1769,04	90078887279,10
22	44,46	329176,24	1976,69	108356996980,54
23	45,52	333627,76	2072,07	111307482242,62
24	43,81	259185,73	1919,32	67177242635,63
25	39,50	235640,46	1560,25	55526426389,01
26	40,68	282050,21	1654,86	79552320961,04
27	43,10	313954,00	1857,61	98567114116,00
28	43,00	303235,00	1849,00	91951465225,00
29	40,55	283180,03	1644,30	80190929390,80
30	42,85	303453,76	1836,12	92084184458,14

Continúa la planilla de cálculo

Continuación de la planilla de cálculo de desviación estándar

Nº	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2
31	47,27	317100,59	2234,45	100552784178,35
32	47,00	321897,87	2209,00	103618238710,54
33	47,48	326736,77	2254,35	106756916870,03
34	45,19	332097,87	2042,14	110288995258,54
35	46,97	321330,22	2206,18	103253110285,25
36	46,59	312263,71	2170,63	97508624582,96
37	47,61	336600,11	2266,71	113299634052,01
38	46,04	346873,30	2119,68	120321086252,89
39	49,75	361327,39	2475,06	130557482764,21
40	49,02	329255,22	2402,96	108408999897,25
41	48,34	353101,72	2336,76	124680824666,96
42	47,55	334566,45	2261,00	111934709465,60
43	47,69	341346,41	2274,34	116517371619,89
44	45,59	292294,14	2078,45	85435864278,34
45	50,72	360281,47	2572,52	129802737625,36
n	Σx_i	Σy_i	Σx_i^2	Σy_i^2
45	1904,49	12567925,05	81497,76	3632409327493,91
Promedio de x			42,32	kg/cm²
Desviación Estándar de x			4,51	kg/cm²
Promedio de y			279287,22	kg/cm²
Desviación Estándar de y			52731,83	kg/cm²

Cuadro 33. Cálculo de la Desviación Estándar y la Media de Ec - MR "Banco 1-2-3"

3.5.4.2. “DIAGRAMA DE DISPERSIÓN” Representación gráfica de las variables

Nº	X _i	Y _i
1	39,57	253930,81
2	39,00	250628,35
3	36,48	233702,50
4	36,21	212033,67
5	38,50	229949,83
6	37,12	201151,19
7	36,48	191660,05
8	35,85	195813,17
9	36,80	228534,35
10	35,80	209372,91
11	37,16	235481,65
12	38,16	236659,65
13	35,94	192064,46
14	38,50	201100,76
15	37,65	202663,06
16	45,27	294777,30
17	41,59	269699,12
18	39,74	288830,22
19	39,88	234731,76
20	40,45	274432,36
21	42,06	300131,45
22	44,46	329176,24
23	45,52	333627,76
24	43,81	259185,73
25	39,50	235640,46
26	40,68	282050,21
27	43,10	313954,00
28	43,00	303235,00
29	40,55	283180,03
30	42,85	303453,76
31	47,27	317100,59
32	47,00	321897,87
33	47,48	326736,77
34	45,19	332097,87
35	46,97	321330,22

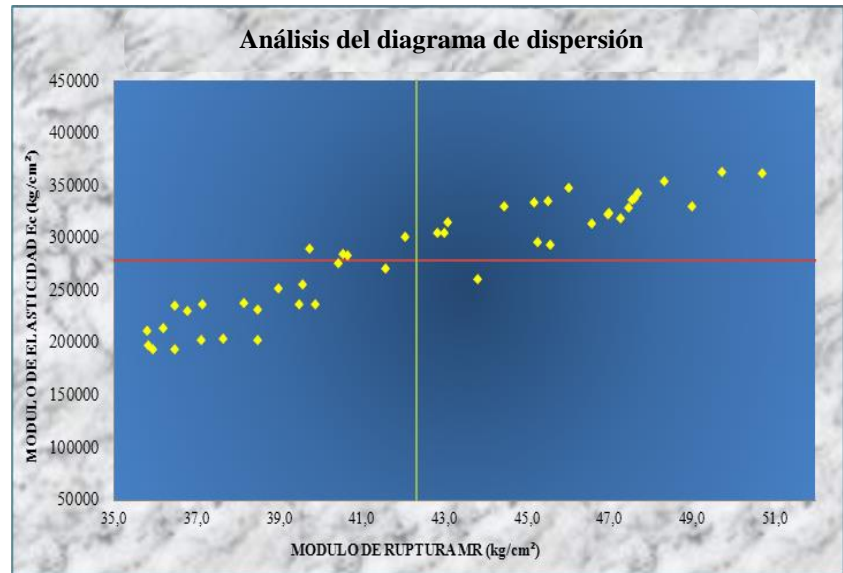


Fig. 66. Análisis del Diagrama de dispersión “Banco 1-2-3”

Continúa la planilla

Continuación de la planilla

Nº	x_i	y_i
36	46,59	312263,71
37	47,61	336600,11
38	46,04	346873,30
39	49,75	361327,39
40	49,02	329255,22
41	48,34	353101,72
42	47,55	334566,45
43	47,69	341346,41
44	45,59	292294,14
45	50,72	360281,47

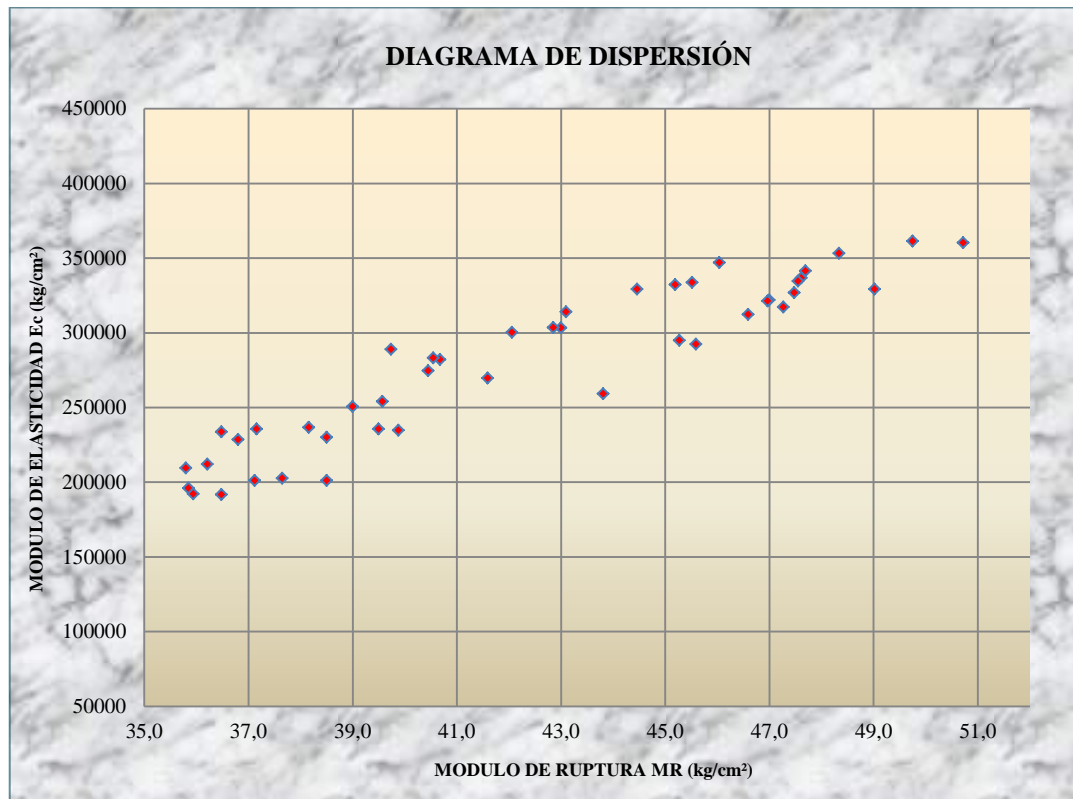


Fig. 67. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de E_c - M_R) “Banco 1-2-3”

3.5.4.3. ECUACIÓN DE REGRESIÓN LINEAL por el método de mínimos cuadrados

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
1	39,57	253930,81	10048042,15	1565,78
2	39,00	250628,35	9774505,65	1521,00
3	36,48	233702,50	8525467,20	1330,79
4	36,21	212033,67	7677739,19	1311,16
5	38,50	229949,83	8853068,46	1482,25
6	37,12	201151,19	7466732,17	1377,89
7	36,48	191660,05	6991758,62	1330,79
8	35,85	195813,17	7019902,14	1285,22
9	36,80	228534,35	8410064,08	1354,24
10	35,80	209372,91	7495550,18	1281,64
11	37,16	235481,65	8750498,11	1380,87
12	38,16	236659,65	9030932,24	1456,19
13	35,94	192064,46	6902796,69	1291,68
14	38,50	201100,76	7742379,26	1482,25
15	37,65	202663,06	7630264,21	1417,52
16	45,27	294777,30	13344568,37	2049,37
17	41,59	269699,12	11216786,40	1729,73
18	39,74	288830,22	11478112,94	1579,27
19	39,88	234731,76	9361102,59	1590,41
20	40,45	274432,36	11100788,96	1636,20
21	42,06	300131,45	12623528,79	1769,04
22	44,46	329176,24	14635175,63	1976,69
23	45,52	333627,76	15186735,64	2072,07
24	43,81	259185,73	11354926,83	1919,32
25	39,50	235640,46	9307798,17	1560,25
26	40,68	282050,21	11473802,54	1654,86
27	43,10	313954,00	13531417,40	1857,61
28	43,00	303235,00	13039105,00	1849,00
29	40,55	283180,03	11482950,22	1644,30
30	42,85	303453,76	13002993,62	1836,12
31	47,27	317100,59	14989344,89	2234,45
32	47,00	321897,87	15129199,89	2209,00
33	47,48	326736,77	15513461,84	2254,35
34	45,19	332097,87	15007502,75	2042,14
35	46,97	321330,22	15092880,43	2206,18

Continúa la planilla de cálculo

Continuación de la planilla de cálculo de ecuación de regresión lineal

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2
36	46,59	312263,71	14548366,25	2170,63
37	47,61	336600,11	16025531,24	2266,71
38	46,04	346873,30	15970046,73	2119,68
39	49,75	361327,39	17976037,65	2475,06
40	49,02	329255,22	16140090,88	2402,96
41	48,34	353101,72	17068937,14	2336,76
42	47,55	334566,45	15908634,70	2261,00
43	47,69	341346,41	16278810,29	2274,34
44	45,59	292294,14	13325689,84	2078,45
45	50,72	360281,47	18273476,16	2572,52
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2
45	1904,49	12567925,05	541707504,15	81497,76

$$y = a + bx$$

$$\Sigma y_i = n * a + b * \Sigma x_i$$

$$\Sigma x_i y_i = a * \Sigma x_i + b * \Sigma x_i^2$$

$$\begin{array}{rcl} 12567925,05 = a * & 45 + b * & 1904,49 \\ 541707504,15 = a * & 1904,49 + b * & 81497,76 \end{array} \left| \begin{array}{l} 1904,49 \\ -45 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{rcl} 23935487578 = a * & 85702,05 + b * & 3627082,16 \\ -24376837687 = a * & -85702,05 + b * & -3667399,39 \\ -441350108,2 = a * & 0 + b * & -40317,2334 \end{array}$$

$$b = 10946,93$$

$$a = -184008,93$$

$$a = -184008,93$$

$$y = 10946,93 x - 184008,93$$

Cuadro 34. Cálculo de la Ecuación de Regresión Lineal para Ec - MR "Banco 1-2-3"

3.5.4.4. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN r^2

$$\bar{y} = 279287,22$$

$$y = 10946,93 * x - 184008,93$$

Nº	x_i	y_i	y	$y_i - y$	$(y_i - y)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	39,570	253930,81	249161,26	4769,55	22748607,86	-25356,41	642947697,13
2	39,000	250628,35	242921,51	7706,84	59395423,84	-28658,87	821331020,74
3	36,480	233702,5	215335,23	18367,27	337356507,73	-45584,72	2077967001,38
4	36,210	212033,67	212379,56	-345,89	119640,19	-67253,55	4523040435,96
5	38,500	229949,83	237448,04	-7498,21	56223155,43	-49337,39	2434178380,93
6	37,120	201151,19	222341,27	-21190,08	449019520,49	-78136,03	6105239705,07
7	36,480	191660,05	215335,23	-23675,18	560514276,31	-87627,17	7678521506,39
8	35,850	195813,17	208438,66	-12625,49	159403100,07	-83474,05	6967917579,90
9	36,800	228534,35	218838,25	9696,10	94014322,06	-50752,87	2575854151,59
10	35,800	209372,91	207891,32	1481,59	2195116,83	-69914,31	4888011208,87
11	37,160	235481,65	222779,15	12702,50	161353554,90	-43805,57	1918928255,06
12	38,160	236659,65	233726,08	2933,57	8605818,51	-42627,57	1817110008,29
13	35,940	192064,46	209423,89	-17359,43	301349745,56	-87222,76	7607810443,50
14	38,500	201100,76	237448,04	-36347,28	1321124774,20	-78186,46	6113123048,57
15	37,650	202663,06	228143,15	-25480,09	649234778,95	-76624,16	5871262406,53
16	45,270	294777,3	311558,79	-16781,49	281618268,12	15490,08	239942475,14
17	41,590	269699,12	271274,07	-1574,95	2480459,22	-9588,10	91931725,53
18	39,740	288830,22	251022,24	37807,98	1429443444,33	9543,00	91068785,38
19	39,880	234731,76	252554,81	-17823,05	317661096,59	-44555,46	1985189312,85
20	40,450	274432,36	258794,56	15637,80	244540720,61	-4854,86	23569697,99
21	42,060	300131,45	276419,13	23712,32	562274284,50	20844,23	434481785,33
22	44,460	329176,24	302691,77	26484,47	701427202,61	49889,02	2488913983,97
23	45,520	333627,76	314295,52	19332,24	373735524,01	54340,54	2952893925,22
24	43,810	259185,73	295576,26	-36390,53	1324270796,30	-20101,49	404070034,23
25	39,500	235640,46	248394,97	-12754,51	162677640,76	-43646,76	1905039949,48
26	40,680	282050,21	261312,36	20737,85	430058543,40	2762,99	7634095,32
27	43,100	313954	287803,94	26150,06	683825728,07	34666,78	1201785404,46
28	43,000	303235	286709,24	16525,76	273100583,60	23947,78	573496007,28
29	40,550	283180,03	259889,26	23290,77	542460171,26	3892,81	15153943,74
30	42,850	303453,76	285067,20	18386,56	338065416,39	24166,54	584021494,46
31	47,270	317100,59	333452,65	-16352,06	267390017,51	37813,37	1429850698,67
32	47,000	321897,87	330496,98	-8599,11	73944733,10	42610,65	1815667209,35
33	47,480	326736,77	335751,51	-9014,74	81265552,49	47449,55	2251459478,87

Continúa la planilla de cálculo

Continuación de la planilla de cálculo para el coeficiente de determinación

Nº	x_i	y_i	y	$y_i - y$	$(y_i - y)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
34	45,190	332097,87	310683,03	21414,84	458595324,11	52810,65	2788964401,35
35	46,970	321330,22	330168,57	-8838,35	78116506,96	42043,00	1767613568,71
36	46,590	312263,71	326008,74	-13745,03	188925829,08	32976,49	1087448672,88
37	47,610	336600,11	337174,61	-574,50	330052,91	57312,89	3284766978,07
38	46,040	346873,3	319987,93	26885,37	722823370,45	67586,08	4567877759,19
39	49,750	361327,39	360601,05	726,34	527567,07	82040,17	6730588946,69
40	49,020	329255,22	352609,79	-23354,57	545435929,76	49968,00	2496800690,88
41	48,340	353101,72	345165,87	7935,85	62977645,27	73814,50	5448579918,15
42	47,550	334566,45	336517,80	-1951,35	3807752,19	55279,23	3055792900,86
43	47,690	341346,41	338050,37	3296,04	10863899,04	62059,19	3851342649,73
44	45,590	292294,14	315061,80	-22767,66	518366563,81	13006,92	169179881,17
45	50,720	360281,47	371219,58	-10938,11	119642211,48	80994,25	6560067993,10
n	Σx_i	Σy_i			$\Sigma(y_i - y)^2$		$\Sigma(y_i - \bar{y})^2$
45	1904,49	12567925,05			SCE = 14983311177,92		SCT = 122348437217,96

Cuadro 35. Cálculo del Coeficiente de Determinación para E_c - MR “Banco 1-2-3”

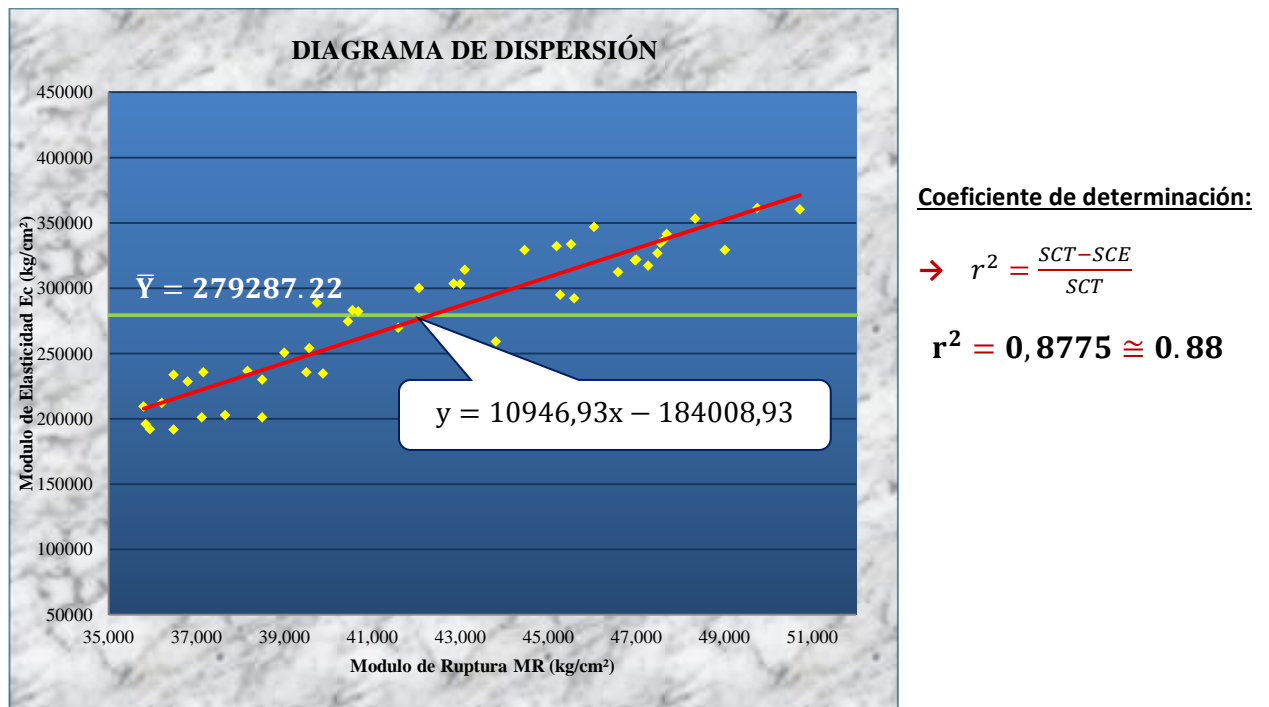


Fig. 68. Diagrama de dispersión (Representación gráfica de E_c -MR, Línea Recta y la Media de E_c) “Banco 1-2-3”

3.5.4.5. CORRELACIÓN

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

Nº	x _i	y _i	x _i y _i	x _i ²	y _i ²
1	39,57	253930,81	10048042,15	1565,78	64480856267,26
2	39,00	250628,35	9774505,65	1521,00	62814569823,72
3	36,48	233702,50	8525467,20	1330,79	54616858506,25
4	36,21	212033,67	7677739,19	1311,16	44958277213,67
5	38,50	229949,83	8853068,46	1482,25	52876924317,03
6	37,12	201151,19	7466732,17	1377,89	40461801238,42
7	36,48	191660,05	6991758,62	1330,79	36733574766,00
8	35,85	195813,17	7019902,14	1285,22	38342797545,45
9	36,80	228534,35	8410064,08	1354,24	52227949129,92
10	35,80	209372,91	7495550,18	1281,64	43837015441,87
11	37,16	235481,65	8750498,11	1380,87	55451607486,72
12	38,16	236659,65	9030932,24	1456,19	56007789938,12
13	35,94	192064,46	6902796,69	1291,68	36888756795,09
14	38,50	201100,76	7742379,26	1482,25	40441515672,58
15	37,65	202663,06	7630264,21	1417,52	41072315888,56
16	45,27	294777,30	13344568,37	2049,37	86893656595,29
17	41,59	269699,12	11216786,40	1729,73	72737615328,77
18	39,74	288830,22	11478112,94	1579,27	83422895985,25
19	39,88	234731,76	9361102,59	1590,41	55098999152,70
20	40,45	274432,36	11100788,96	1636,20	75313120215,17
21	42,06	300131,45	12623528,79	1769,04	90078887279,10
22	44,46	329176,24	14635175,63	1976,69	108356996980,54
23	45,52	333627,76	15186735,64	2072,07	111307482242,62
24	43,81	259185,73	11354926,83	1919,32	67177242635,63
25	39,50	235640,46	9307798,17	1560,25	55526426389,01
26	40,68	282050,21	11473802,54	1654,86	79552320961,04
27	43,10	313954,00	13531417,40	1857,61	98567114116,00
28	43,00	303235,00	13039105,00	1849,00	91951465225,00
29	40,55	283180,03	11482950,22	1644,30	80190929390,80
30	42,85	303453,76	13002993,62	1836,12	92084184458,14

Continúa la planilla de cálculo

Continuación de la planilla de cálculo para la correlación

Nº	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	y_i^2
31	47,27	317100,59	14989344,89	2234,45	100552784178,35
32	47,00	321897,87	15129199,89	2209,00	103618238710,54
33	47,48	326736,77	15513461,84	2254,35	106756916870,03
34	45,19	332097,87	15007502,75	2042,14	110288995258,54
35	46,97	321330,22	15092880,43	2206,18	103253110285,25
36	46,59	312263,71	14548366,25	2170,63	97508624582,96
37	47,61	336600,11	16025531,24	2266,71	113299634052,01
38	46,04	346873,30	15970046,73	2119,68	120321086252,89
39	49,75	361327,39	17976037,65	2475,06	130557482764,21
40	49,02	329255,22	16140090,88	2402,96	108408999897,25
41	48,34	353101,72	17068937,14	2336,76	124680824666,96
42	47,55	334566,45	15908634,70	2261,00	111934709465,60
43	47,69	341346,41	16278810,29	2274,34	116517371619,89
44	45,59	292294,14	13325689,84	2078,45	85435864278,34
45	50,72	360281,47	18273476,16	2572,52	129802737625,36
n	Σx_i	Σy_i	$\Sigma x_i y_i$	Σx_i^2	Σy_i^2
45	1904,49	12567925,05	541707504,15	81497,76	3632409327493,91

$$r = 0.94$$

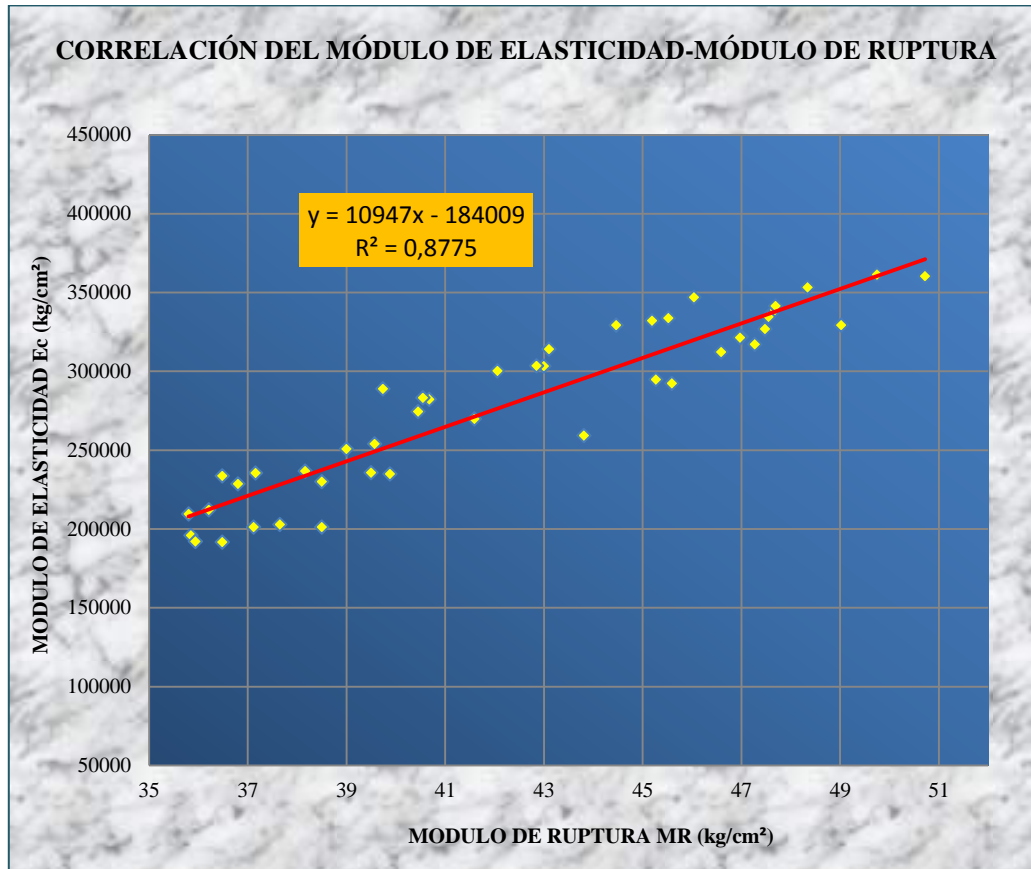
Tipo y grado de correlación Positiva Fuerte

Valores de r	Tipo y grado de correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r \leq -0.8$	Negativa fuerte
$-0.8 < r < -0.5$	Negativa moderada
$-0.5 \leq r < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r \leq 0.5$	Positiva débil
$0.5 < r < 0.8$	Positiva moderada
$0.8 \leq r < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta

Ref. Probabilidad y Estadística para Ingenieros
Edición 1980. (Bibliografía N°31)

Cuadro 36. Cálculo de la Correlación entre el Módulo de Elasticidad E_c y el Módulo de Ruptura y MR “Banco 1-2-3”

3.5.4.6. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE RUPTURA para concretos elaborados con agregados provenientes de San Luis, San Blas, La Victoria y Santa Ana.



$$E_c = 10947 MR - 184009$$

$$r = 0.94$$

Fig. 69. Correlación entre el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Ruptura para concretos elaborados con agregados provenientes de San Luis, San Blas, La Victoria y Santa Ana. Para MR=35, 40 y 45 kg/cm²

3.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

$$E_c = 9268.2MR - 112175 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Cuadro 37. Ecuación determinada de concretos elaborados con **agregados** provenientes **de San Luis-Dpto. de Tarija**. Aplicables entre $MR=35 \text{ kg/cm}^2$, 40 kg/cm^2 y 45 kg/cm^2

$$E_c = 11645MR - 216040 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Cuadro 38. Ecuación determinada de concretos elaborados con **agregados** provenientes **de San Blas-Dpto. de Tarija**. Aplicables entre $MR=35 \text{ kg/cm}^2$, 40 kg/cm^2 y 45 kg/cm^2

$$E_c = 11421MR - 203012 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Cuadro 39. Ecuación determinada de concretos elaborados con **agregados** provenientes **de La Victoria (AG) y Santa Ana (AF)-Dpto. de Tarija**. Aplicables entre $MR=35 \text{ kg/cm}^2$, 40 kg/cm^2 y 45 kg/cm^2

$$E_c = 10947MR - 184009 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Cuadro 40. Ecuación determinada de concretos elaborados con **agregados** provenientes **de San Luis, San Blas, La Victoria y Santa Ana-Dpto. de Tarija**. Aplicables entre $MR=35 \text{ kg/cm}^2$, 40 kg/cm^2 y 45 kg/cm^2

CORRELACIÓN: Tipo y grado de correlación entre el E_c y MR es de $0.8 < r < 1$ positiva fuerte

3.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Respecto a la granulometría de los agregados estas están conformadas por diferentes tamaños de acuerdo al análisis granulométrico realizado.

Con respecto al agregado grueso las granulometrías de cada banco presentan similitud comparando cada uno de ellas entre sí, también como podemos ver en el cuadro 41 los porcentajes que pasan del total se encuentran dentro de lo especificado según la norma ASTM.

Tamices	% pasa del total Agregado Grueso			% Que Pasa Espec. ASTM
	San Luis	San Blas	La Victoria	
2"	100,00	100,00	100,00	100
1 1/2"	100,00	98,32	96,45	95 - 100
1"	72,25	77,34	76,15	-
3/4"	45,77	41,85	45,70	35 - 70
1/2"	30,75	27,90	25,83	20 - 44
3/8"	13,85	12,57	12,40	10 - 30
N°4	0,00	0,04	0,04	0 - 5

Cuadro 41. Comparación de %PTAG de los Bancos 1-2-3. Ref. Anexo 1

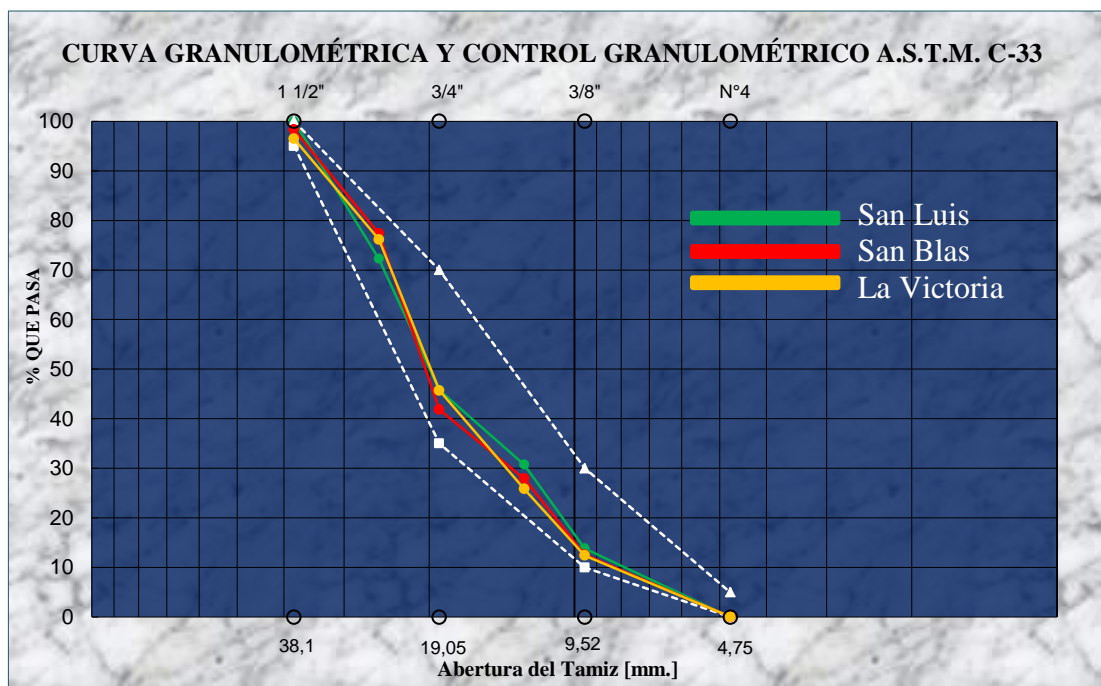


Fig. 70. Comparación de granulometrías del AG (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 1

Con lo referente al agregado fino según los análisis granulométricos estos presentan diferencias de granulometría pudiéndose observar gráficamente en la fig. 71 en el cual se muestra la distribución de sus tamaños que conforma cada agregado fino. De acuerdo al cuadro 42 y representado en la fig. 71 se puede observar que el banco 2 presenta una arena con un porcentaje mayor de arenas con partícula mayores a 1.19mm (T#16), con lo referente a los demás bancos estas arenas tienen mayores porcentajes de arenas con partículas de tamaños menores a 0.59 mm (T#30).

Así también se puede observar que la granulometría del agregado fino de ambos bancos se encuentra dentro de lo especificado por la norma ASTM.

Tamices	%pasa del total Agregado Fino			% Que Pasa Espc. ASTM
	San Luis	San Blas	Santa Ana	
3/8"	99,83	100,00	100,00	100
Nº 4	97,62	98,10	94,03	95 - 100
Nº 8	82,95	90,58	78,07	80 - 100
Nº 16	73,83	81,34	64,17	50 - 85
Nº 30	58,94	56,72	47,73	25 - 60
Nº 50	30,48	27,58	20,88	10 - 30
Nº 100	5,51	6,04	3,38	2 - 10

Cuadro 42. Comparación de %PTAF de los Bancos 1-2-3. Ref. Anexo 1

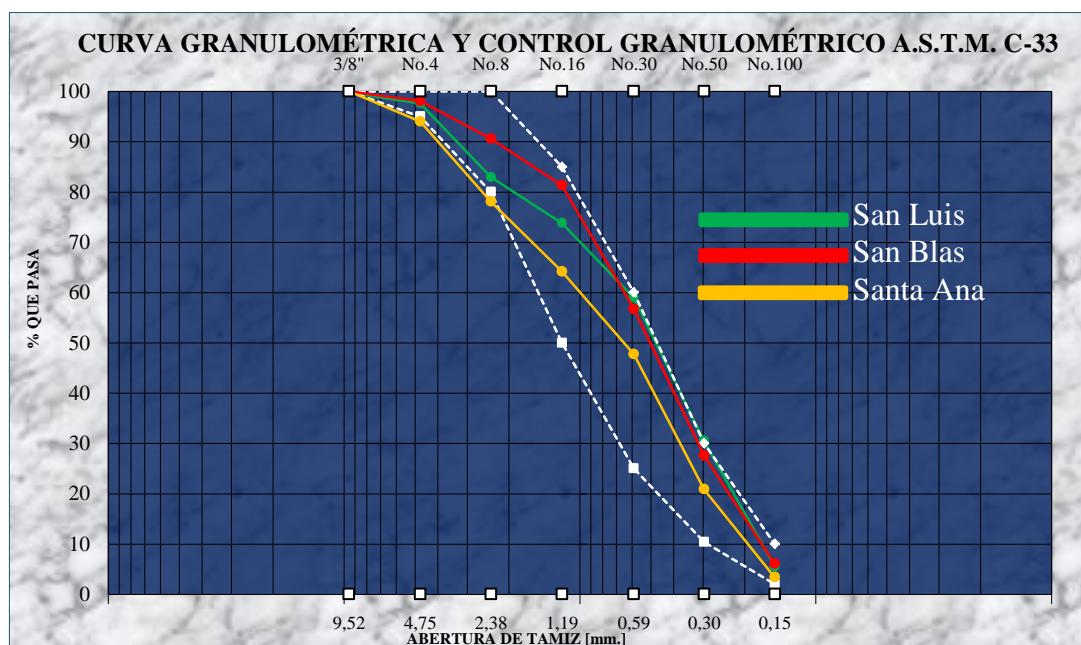


Fig. 71. Comparación de granulometrías del AF (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 1

De acuerdo a los resultados de la caracterización de los agregados en términos generales éstos se encuentran en buena calidad teniendo así los requisitos de calidad para la elaboración de concretos.

Observando los resultados los cuales se muestran en el cuadro 43 Para cada banco de estudio; En el caso del agregado grueso también según estos resultados presentan similitudes, de acuerdo según el tamaño máximo éstos presentan $TM= 1''$ a $1\frac{1}{2}''$ en el caso de los PU tanto del agregado grueso como del agregado fino estos valores son casi aproximados a un mismo valor en el caso de los pesos específicos existe una cierta diferencia de uno con respecto al otro y con mayor razón comparando el agregado grueso con el agregado fino pudiéndose observar que los pesos específicos son mayores en los agregados finos, y por último de acuerdo a los % de absorción estos varían de acuerdo a procedencia y estado del agregado de la cual se extrajo pudiendo así observar el los valores mostrados en el cuadro 43, en este caso del agregado fino presentan mayores % de absorción que en agregado grueso, debido al tamaño y a la estructura de las partículas que presentan. Y por último los PU como los pesos específicos se encuentran dentro de los rangos establecidos teóricamente tanto para el agregado grueso como también para el agregado fino.

		Banco 1		Banco 2		Banco 3	
		A.G.	A.F.	A.G.	A.F.	A.G.	A.F.
Tamaño Máximo TM	pulg	1		1½		1½	
Peso unitario suelto PU	gr/cm ³	1,45	1,69	1,43	1,61	1,45	1,7
Peso unitario compactado PU	gr/cm ³	1,57	1,8	1,57	1,74	1,61	1,78
Peso específico (S.S.S) Gbs	gr/cm ³	2,58		2,59		2,57	
Peso específico muestra seca Gb	gr/cm ³	2,57	2,75	2,56	2,71	2,55	2,66
Peso específico aparente G	gr/cm ³	2,61		2,63		2,61	
Módulo de Finura MF			2,51		2,4		2,91
% absorción %abs	%	0,65	1,44	1,04	2,33	1,01	2,25

Cuadro 43. Comparación de resultados de caracterización (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 1

En los siguientes cuadros (cuadro 44-45-46) se muestra los valores promedios de cada tipo de ensayo, recordando que para cada banco se elaboraron 3 tipos de mezclas para determinar dicha investigación.

De acuerdo al cuadro 44 en el cual se muestran los valores promedio de los Módulos de Ruptura de la misma se puede observar que los valores con respecto a cada tipo de ensayo el banco 1 presenta un valor mayor de $MR=37.95$, el banco 2 $MR=43.07$ y el banco 3 $MR=47.98$. Pero desde el punto de vista general el banco que mayor resistencia a flexión presenta es el banco 3 teniendo así una resistencia a flexión en promedio de $MR=42.50 \text{ kg/cm}^2$. Cuyo concreto ha sido elaborado con agregados provenientes de la Victoria y santa Ana.

Módulo de Ruptura MR (kg/cm²)		
Banco 1	Banco 2	Banco 3
37,95	36,41	37,48
41,39	43,07	42,04
46,78	47,80	47,98

Promedio	42,04	42,43	42,50
-----------------	--------------	--------------	--------------

Cuadro 44. Comparación de MR (kg/cm²) en promedios (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 3

En el cuadro siguiente (cuadro 45) se muestran los valores de la resistencia a flexión en promedio para los concretos elaborados con agregados de los bancos de estudio. En el cual se puede apreciar la similitud que existe en sus resistencias pero existiendo una pequeña diferencia entre ellas. De acuerdo a este se observa que los concretos elaborados con agregados provenientes del banco 1 presentan mayores resistencias a compresión en comparación a los bancos restantes, presentando así una resistencia a compresión en promedio $f'c=330,29 \text{ kg/cm}^2$.

Resistencia a la Compresión $f'c$ (kg/cm ²)		
Banco 1	Banco 2	Banco 3
255,78	252,21	244,68
360,18	308,53	333,11
374,90	363,40	365,47

Promedio	330,29	308,05	314,42
----------	--------	--------	--------

Cuadro 45. Comparación de $f'c$ (kg/cm²) en promedios (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 3

Con lo referente al Módulo de Elasticidad en el cuadro 46 se muestran los valores promedios de cada banco de estudio, en el cual se observa que los concretos elaborados con agregados provenientes del banco 3 según los resultados obtenidos este concreto presenta mayor Módulo de Elasticidad en comparación a los bancos restantes, con un valor de $E_c=282362,18$ kg/cm².

Módulo de Elasticidad E_c (kg/cm ²)		
Banco 1	Banco 2	Banco 3
236049,03	205306,33	213593,92
272494,15	291552,33	297174,60
323832,68	337263,95	336318,04

Promedio	277458,62	278040,87	282362,18
----------	-----------	-----------	-----------

Cuadro 46. Comparación de E_c (kg/cm²) en promedios (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 3

En el siguiente cuadro (cuadro 47) se muestra los valores promedios de cada tipo de resistencia para cada banco estudiado, en el cual se puede apreciar que el banco 3 presenta mayor resistencia a flexión con un módulo de elasticidad mayor y con una resistencia a compresión considerada con respecto a los valores de los bancos restantes.

	MR	f_c	E_c
Banco 1	42,04	330,29	277458,62
Banco 2	42,43	308,05	278040,87
Banco 3	42,50	314,42	282362,18

Cuadro 47. Comparación de MR, $f'c$ y E_c (kg/cm²) en promedios (Bancos 1-2-3). Ref. Anexo 3

Para evaluar y determinar si el comportamiento del proceso de datos se mantenga en un nivel aceptable de calidad se elabora las cartas de control cuyo objetivo es verificar que los datos se encuentren en un nivel aceptable de calidad para el procesamiento, esta grafica se construye graficando los valores de “y” en la ordenadas (que en este caso son los valores de los Módulos de Elasticidad y de los Módulo de Ruptura), y en las abscisas los n° de ensayos. Como se muestra en la figura a continuación fig. 72

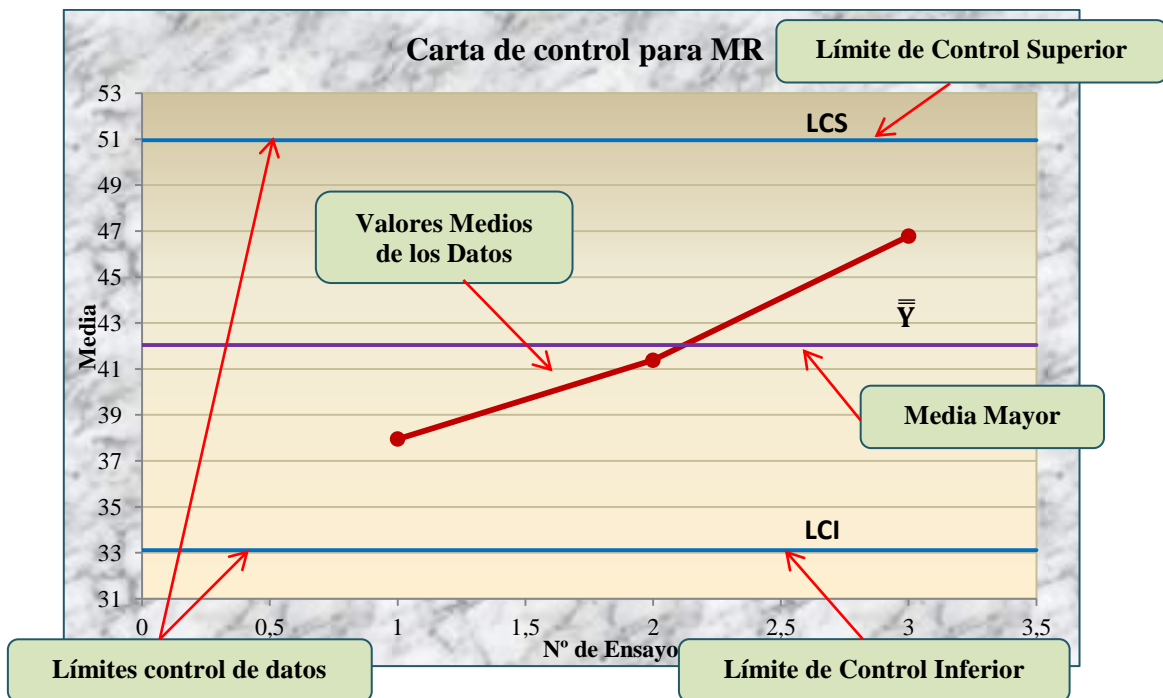


Fig. 72. Partes de la carta de control de datos. Ref. Análisis Estadístico Banco 1

Para la elaboración de las cartas de control se cálculos los parámetros correspondientes el cual se muestra en el cuadro 48 para el Módulo de Elasticidad y en el cuadro 49 para el Módulo de Ruptura.

De acuerdo a los valores mostrados en el cuadro 48 y en el cuadro 49 se observa que de acuerdo a los límites obtenidos para cada banco todos los datos se encuentran dentro de los límites, por el cual los datos obtenidos experimentalmente para

determinar la correlación entre Ec y MR se encuentran dentro de un nivel aceptable de calidad para su procesamiento.

Cartas de control para Módulo de Elasticidad Ec

	Banco 1			Banco 2			Banco 3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Módulo de Elasticidad Ec kg/cm ²	253930,79	294777,30	317100,60	201151,19	300131,45	312263,71	235481,65	282050,21	353101,72
	250628,33	269699,12	321897,88	191660,05	329176,24	336600,11	236659,65	313954,00	334566,45
	233702,52	288830,23	326736,77	195813,17	333627,76	346873,30	192064,46	303235,00	341346,41
	212033,66	234731,74	332097,90	228534,35	259185,73	361327,39	201100,76	283180,03	292294,14
	229949,83	274432,34	321330,24	209372,91	235640,46	329255,22	202663,06	303453,76	360281,47
Media \bar{Y}	236049,03	272494,15	323832,68	205306,33	291552,33	337263,95	213593,92	297174,60	336318,04
Rango R	41897,14	60045,56	14997,29	36874,30	97987,30	49063,68	44595,19	31903,79	67987,33
\bar{Y}	277458,62	LCS	370776,73	278040,87	LCS	424813,24	282362,18	LCS	397662,26
\bar{R}	38980,00	LCI	184140,51	61308,43	LCI	131268,50	48162,10	LCI	167062,11

Cuadro 48. Límites de control de datos para Ec (Bancos 1-2-3). Ref. Análisis estéticos (Banco 1-2-3)

Cartas de control para Modulo de Ruptura MR

	Banco 1			Banco 2			Banco 3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Módulo de Elasticidad Ec kg/cm ²	39,57	45,27	47,27	37,12	42,06	46,59	37,16	40,68	48,34
	39,00	41,59	47,00	36,48	44,46	47,61	38,16	43,10	47,55
	36,48	39,74	47,48	35,85	45,52	46,04	35,94	43,00	47,69
	36,21	39,88	45,19	36,80	43,81	49,75	38,50	40,55	45,59
	38,50	40,45	46,97	35,80	39,50	49,02	37,65	42,85	50,72
Media \bar{Y}	37,95	41,39	46,78	36,41	43,07	47,80	37,48	42,04	47,98
Rango R	3,36	5,53	2,29	1,32	6,02	3,71	2,56	2,55	5,13
\bar{Y}	42,04	LCS	50,96	42,43	LCS	51,25	42,50	LCS	50,67
\bar{R}	3,73	LCI	33,12	3,68	LCI	33,61	3,41	LCI	34,33

Cuadro 49. Límites de control para MR (Bancos 1-2-3). Ref. Análisis estadístico (Banco 1-2-3)

En el siguiente cuadro (cuadro 50) se muestra los valores representativos de MR y Ec en forma agrupada de los 3 bancos de estudio para su análisis de una manera general así poder observar el comportamiento de dichas variables, como podemos apreciar según los datos experimentales obtenidos el valor de MR tiene un aumento estricto con un incremento apreciable, con respecto al valor de Ec a medida que se incrementa el valor de MR también lo hace el valor de Ec, pero existiendo también en algunos casos el aumento de Ec no es estricto en comparación a MR, pudiéndose observar pequeñas disminuciones y aumentos de Ec a medida que MR aumenta, pero desde un punto de vista general este emparejamiento de datos muestra la correlación que existe entre ambas variables demostrando así que al aumentar la variable MR también lo hace la variable Ec.

MR	Ec
36,41	205306,33
37,48	213593,92
37,95	236049,03
41,39	272494,15
42,04	297174,60
43,07	291552,33
46,78	323832,66
47,80	337263,95
47,98	336318,04

**Cuadro 50. MR y Ec (kg/cm²) promedios de cada tipo de ensayo en general.
Ref. Anexo 3**

En el siguiente cuadro (cuadro 51) se puede apreciar los resultados obtenidos del análisis estadístico en el cual el banco 2 presenta una desviación estándar mayor con respecto a los bancos restantes, presentando así un MR=42.43 kg/cm² en promedio con una tendencia averiar por encima o por debajo de la media con un valor de 5.08 kg/cm², para concretos de MR=35, 40 y 45 kg/cm².

		Banco 1	Banco 2	Banco 3	General	
Módulo de Ruptura en Promedio	MR	42,04	42,43	42,50	42,32	Kg/cm ²
Desviación estándar	Sx	4,07	5,08	4,64	4,51	Kg/cm ²
Módulo de elasticidad en promedio	Ec	277458,62	278040,87	282362,18	279287,22	Kg/cm ²
Desviación estándar	Sy	40474,49	62418,59	56475,95	52731,83	Kg/cm ²
Correlación	r	0,93	0,95	0,94	0,94	

Cuadro 51. Comparación de resultados del análisis estadístico (Banco 1-2-3).
Ref. Análisis estadístico Banco 1-2-3 y general

De acuerdo al tipo de correlación este pertenece a un tipo y grado de correlación positiva fuerte debido que se obtuvo valores de r entre $0.8 < r < 1$. A continuación se presentan para su análisis las siguientes figuras del cual se puede apreciar la variación que existe entre los datos de acuerdo a su punto central o medio como así también pudiéndose apreciar a qué tipo de correlación y regresión pertenece:

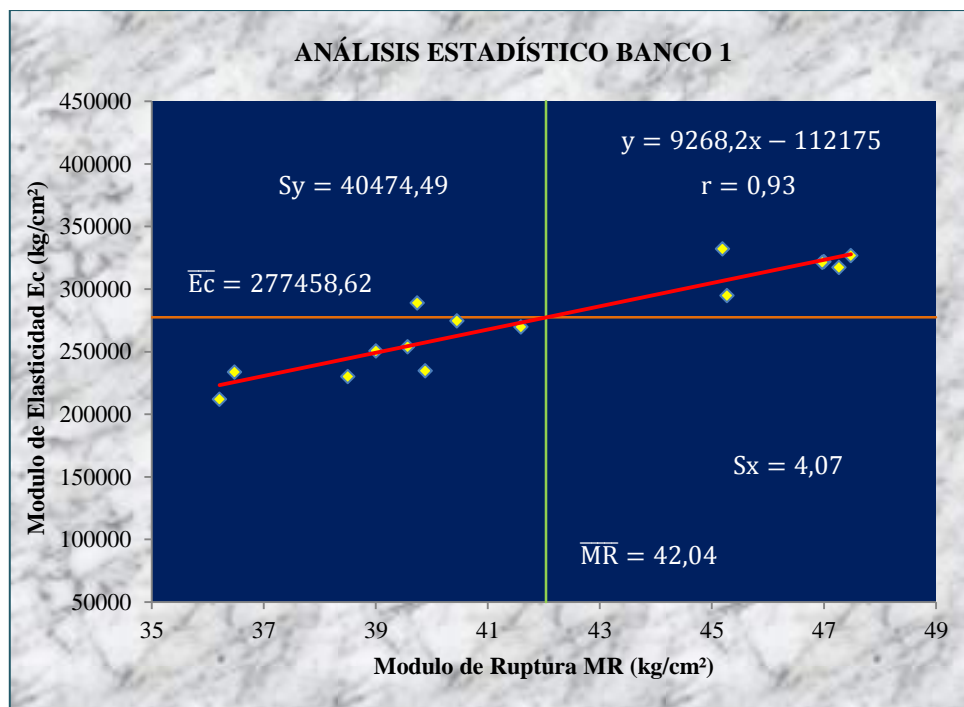


Fig. 73. Diagrama de dispersión. Ref. Análisis Estadístico Banco 1

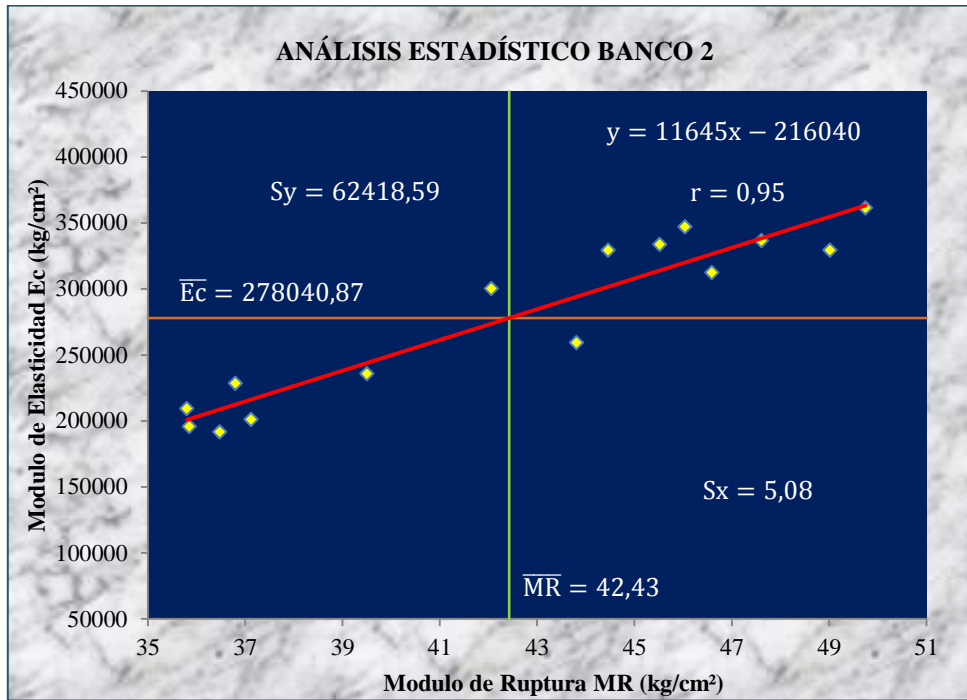


Fig. 74. Diagrama de dispersión. Ref. Análisis Estadístico Banco 2

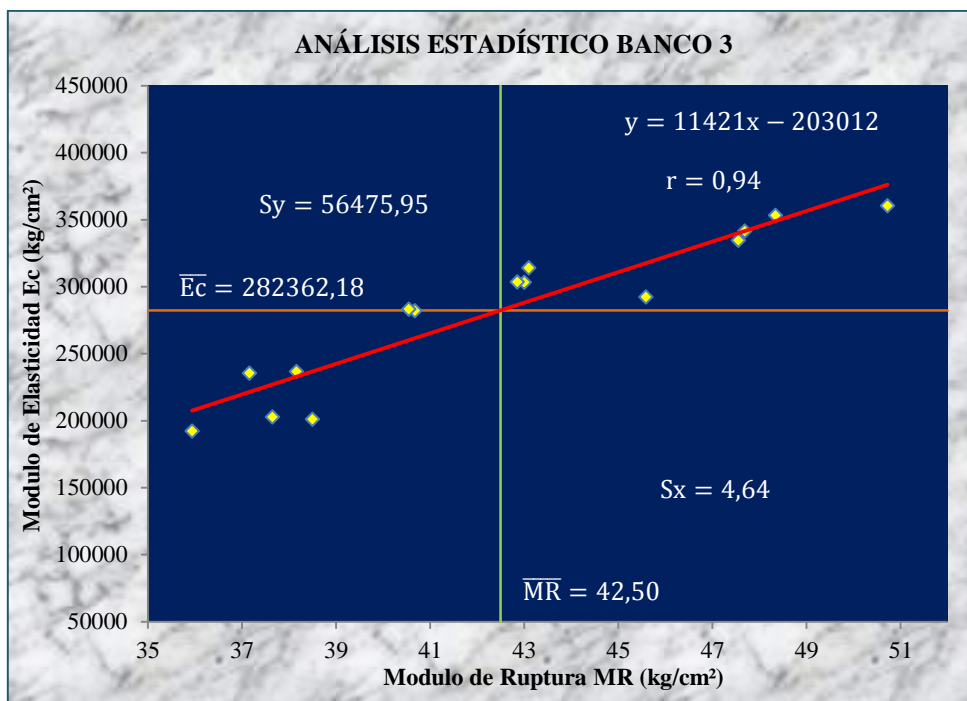


Fig. 75. Diagrama de dispersión. Ref. Análisis Estadístico Banco 3

Y por último el tipo de regresión lineal se identificó de acuerdo al comportamiento que presentan los datos mediante el diagrama de dispersión el cual se puede apreciar en la fig. 76 donde se observa que los puntos en el diagrama siguen un patrón gráfico lineal, desde ese punto de vista se determinó la ecuación de la línea recta para cada tipo banco así como también para una ecuación general. Teniendo así 4 ecuaciones que nos permiten estimar el valor de E_c con respecto a un valor dado de MR.

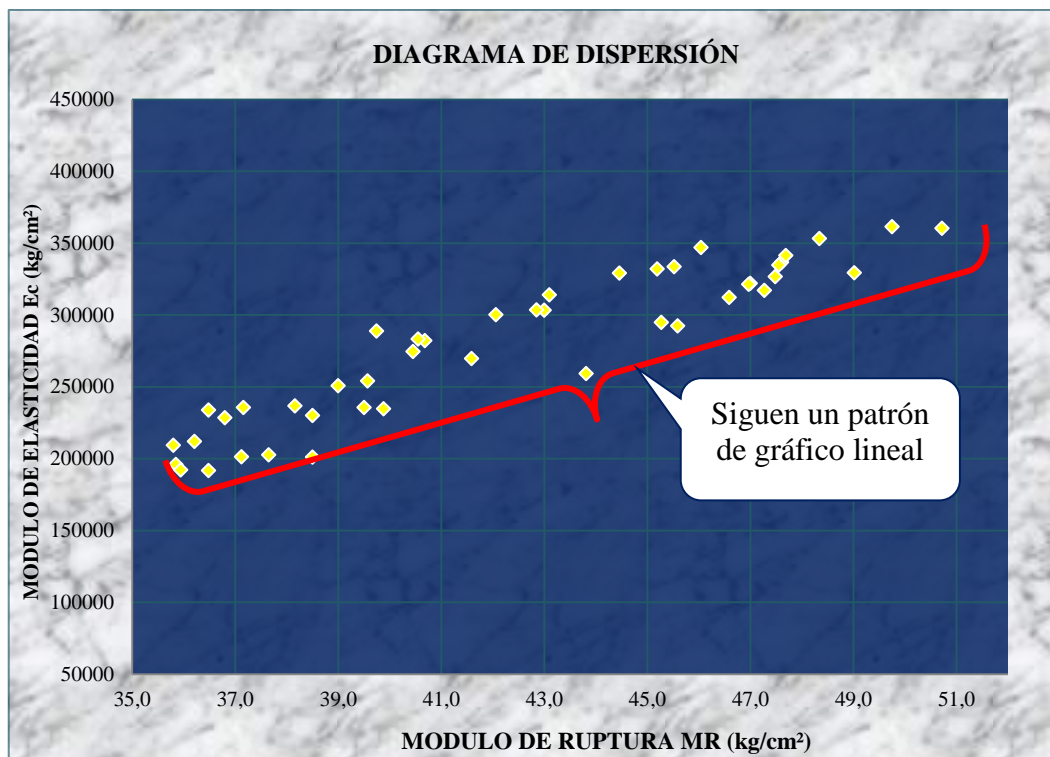


Fig. 76. Diagrama de dispersión. Ref. Análisis Estadístico General

De esta manera se determinó las ecuaciones para cada banco de la cual sus diagramas de dispersión se muestran en las figuras mostradas anteriormente (fig. 73, fig. 74, y fig. 75).

Las ecuaciones resultantes son:

$$\text{Banco 1} \rightarrow E_c = 9268.2MR - 112175 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{Banco 2} \rightarrow E_c = 11645MR - 216040 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{Banco 3} \rightarrow E_c = 11421MR - 203012 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{General} \rightarrow E_c = 10947MR - 184009 \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

Utilizando estas ecuaciones se obtuvo los siguientes Módulos de Elasticidad “Ec” para cada banco estudiado el cual se muestra en el siguiente cuadro (cuadro 52).

(kg/cm ²)	Módulos de elasticidad Ec para concretos elaborados con agregados provenientes de los bancos especificados calculados con la ecuación determinada propia de cada banco			
MR	Banco 1	Banco 2	Banco 3	Banco (1-2-3)
	San Luis	San Blas	La Victoria (A.G.) Santa Ana (A.F.)	
35	212212	191535	196723	199136
40	258553	249760	253828	253871
45	304894	307985	310933	308606

Cuadro 52. Módulos de Elasticidad para MR=35, 40 y 45 kg/cm², calculados a partir de las ecuaciones determinadas para cada banco. Ref. Análisis Estadístico Banco 1-2-3-general

De acuerdo a estos resultados (cuadro 52) se puede observar que para un MR=35 kg/cm², MR=40 kg/cm², para concretos elaborados con agregados del banco 1 se adquiere un Ec mayor en comparación a los concretos elaborados con agregados de los bancos restantes. Así también para un MR=45 kg/cm², se obtiene un valor mayor de Ec con concretos elaborados con agregados del banco 3, en comparación a los bancos restantes.

4.1. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis granulométrico de los agregados (fino y grueso) provenientes de San Luis, San Blas, Santa Ana y La Victoria, cumplen con las condiciones establecidas por la norma ASTM, donde sus porcentajes que pasan del total se encuentran dentro de los rangos establecidos en dicha norma.

Desde el punto de vista particular existe diferencia de granulometría del agregado fino entre las arenas provenientes de San Blas, San Luis y Santa Ana. Y con respecto al agregado grueso las gravas provenientes de San Luis, San Blas y La Victoria presentan granulometría similar.

Se obtuvo valores de pesos unitarios que varían de 1.43 a 1.70, los cuales se encuentran dentro del rango establecido teóricamente cuyo rango es de 1.2 a 1.75. Con respecto a los pesos específicos de los agregados se obtuvo valores que varían de 2.55 a 2.75 los cuales se encuentran dentro de los rangos teóricos que varían de 2.4 a 2.9.

Concluyendo con el estudio de los agregados de manera general, la calidad de los agregados locales tanto el agregado grueso como agregado fino es bueno de acuerdo a las normativas vigentes, cuyos agregados presentan características que cumplen con los requisitos de calidad para ser utilizados en la elaboración de concreto hidráulico para pavimentos rígidos.

Con lo referente al concreto en estado endurecido, los concretos elaborados con agregados provenientes de los tres bancos de estudio el banco 3 presenta mayor resistencia a flexión en promedio cuyo concreto está elaborado con agregados provenientes de La Victoria (A.G.) y Santa Ana (A.F.), presentando así un $MR=42,5$ kg/cm². Como también presentándose así un Módulo de Ruptura en promedio menor

en comparación a los bancos restantes el cual se dio en concretos elaborados con agregados provenientes del banco 1 “San Luis” obteniendo un $MR=42,04 \text{ kg/cm}^2$.

De acuerdo a la resistencia a la compresión los concretos elaborados con agregados del banco 1 “San Luis” presenta una resistencia a la compresión en promedio mayor los obtenidos de los bancos restantes presentando así un $f'_c=330,29 \text{ kg/cm}^2$, así mismo también presentándose una resistencia a compresión en promedio menor en los concretos elaborados con agregados provenientes del banco 2 “San Blas” presentando un valor en promedio de $f'_c=308,05 \text{ kg/cm}^2$.

Con respecto al módulo de elasticidad se obtuvo un E_c en promedio mayor en los concretos elaborados con agregados provenientes del banco 3 “La Victoria (A.G.) y Santa Ana (A.F.)” siendo así $E_c=282362,18 \text{ kg/cm}^2$. Así mismo de igual manera se obtuvo un valor mínimo en promedio de E_c , el cual se obtuvo de los concretos elaborados con agregados del banco 1 “San Luis” siendo $E_c=277458,62 \text{ kg/cm}^2$.

De acuerdo a los valores obtenidos del E_c y MR de cada banco, en comparación según lo investigado se puede concluir que los concretos elaborados con agregados provenientes de La Victoria (A.G.) y de Santa Ana (A.F.) presentan mayores resistencias a flexión con un módulo de elasticidad elevado y una resistencia a la compresión considerable, el cual puede ser en comparación a los bancos estudiados, el banco más aceptable para la elaboración de concretos para pavimentos rígidos.

De acuerdo a los concretos elaborados para de $MR=35 \text{ kg/cm}^2$, 40 kg/cm^2 y 45 kg/cm^2 , con agregados provenientes de los tres bancos de estudio, en el caso de concretos elaborados con agregados del banco 1 “San Luis” presentan una desviación estándar de $4,07 \text{ kg/cm}^2$.

Los concretos elaborados con agregados del banco 2 “San Blas” presentan una desviación estándar de 5,08 kg/cm² y los concretos elaborados con agregados del banco 3 “La Victoria (A.G.) y Santa Ana (A.F.)” presentan una desviación estándar de 4.64 kg/cm².

Con lo referente al análisis estadístico, de acuerdo al comportamiento de los datos reflejados en el diagrama de dispersión la correlación que se determinó pertenece a una correlación simple y positiva por lo que se ha demostrado el grado y asociación o dependencia entre ambas variables como también que el aumento de una variable afecta a la otra variable incrementando su valor. De igual manera con lo referente a la ecuación de regresión según lo demuestra el diagrama de dispersión pertenece a una regresión lineal del cual se determinó la ecuación de la línea recta para cada banco de estudio.

Del análisis de regresión se obtuvo las siguientes fórmulas, donde; E_c es el Módulo de Elasticidad en kg/cm²; y M_R es el Módulo de Ruptura en kg/cm²:

$E_c = 9268,2M_R - 112175$ Concreto preparados con agregados de San Luis

$E_c = 11645M_R - 216040$ Concreto preparados con agregados de San Blas

$E_c = 11421M_R - 203012$ Concreto preparados con agregados de La Victoria y Santa Ana; y por ultimo $E_c = 10947M_R - 184009$ Fórmula determinada de concretos elaborados con agregados de los bancos estudiados en general.

Cuyas formulas son aceptables para Módulos de Ruptura entre rangos de $M_R=35$ kg/cm², 40 kg/cm² y 45 kg/cm².

El grado y tipo de correlación que se obtuvo del análisis de la correlación tiene valores de $r=0,93$ para el banco 1; $r=0,95$ para el banco 2; $0,94$ para el banco 3 y finalmente $r=0,94$ de manera general. Los cuales de acuerdo a los valores estadísticos teóricos se encuentra entre rangos de $0,8 < r < 1$ por lo que pertenecen a un tipo y grado de correlación positiva fuerte, llegando así confirmar la correlación que existe entre estas dos variables.

De acuerdo a los resultados obtenidos los ensayos realizados como mínimo son suficientes para afirmar la relación que existe entre el Módulo de Elasticidad con el Módulo de Ruptura habiendo comprobado estadísticamente se considera como válida la correlación determinada entre estas dos variables.

Al evaluar el Módulo de Elasticidad en la correlación establecida en el presente trabajo puede observarse, que los resultados dejan ver similitud con la evaluación del módulo de Elasticidad obtenido a partir de la correlación publicada en 1993 por AASHTO: $E_c=6750MR$. El cual se muestra en el anexo 4.

Del párrafo anterior puede inferirse el hecho de obtener una diferencia de espesores mínimo (0.001 pulg.), cuando se diseñan espesores de pavimento de concreto hidráulico, utilizando las fórmulas que involucran los módulos en estudio indistintamente y, manteniendo constante el resto de factores involucrados en tal diseño. El cual se muestra en el anexo 4.

4.2. RECOMENDACIONES

- Durante la elaboración de especímenes se recomienda mantener un control de calidad del hormigón fresco como también durante el moldeado en el caso de la compactación o vibración de la mezcla ya que esto influye mucho en la resistencia.
- Verificar periódicamente que todos los componentes que se utilizaran en la elaboración de mezclas, se encuentren en condiciones similares a las supuestas en los cálculos del diseño de mezclas, por ejemplo: granulometría, humedad, absorción, pesos volumétricos entre otras, con el fin de no alterar significativamente la calidad esperada del concreto.
- En cuanto a los especímenes de concreto, desde el momento en que son compactados y enrasados es conveniente cubrirlos con bolsas de papel húmedas o cubiertas plásticas, evitando de esta manera las pérdidas de humedad y así poder obtener resultados más favorables, principalmente en la determinación de Módulo de Ruptura.
- Para determinar el módulo de ruptura existe dos formas una aplicando una carga en el centro del claro y otra manera aplicando cargas que se concentran en los $2/3$ del claro; para esto es recomendable determinar el módulo de ruptura con cargas concentradas a los $2/3$, debido a que el diagrama de momento se extiende en más longitud a lo largo de la viga propiciando un diagrama de esfuerzo más uniforme que con el otro método.
- Se recomienda, la utilización de las Cartas de Control para la escogitación de los datos que servirían de base en la determinación de la correlación de los Módulos de Elasticidad y Módulo de Ruptura, expuesta en la Practica Recomendada para la Evaluación de Resistencia de las Pruebas de Concreto (ACI 214-77)

- En futuros estudios se recomienda hacer pruebas de dosificación variando las características de los componentes del concreto, por ejemplo utilizando agregados de diferentes canteras y cementos con otras propiedades, así como también realizar mezclas de diferentes resistencias, para disponer con una mayor cantidad de parámetros de comparación.
- Debe tomarse en cuenta que la ecuación obtenida es solamente un método de tantos que existen, para la determinación del Módulo de Elasticidad a partir de un dato conocido y de manera indirecta; ejemplo de lo anterior puede ser determinar el Módulo de Elasticidad a partir de la resistencia a la compresión del concreto.
- Finalmente, se recomienda el empleo de esta correlación principalmente para cálculos relacionados con el diseño de pavimentos y, de manera secundaria en otras aplicaciones de la tecnología del concreto, debido a las características de los materiales utilizados.