

# CAPÍTULO I

## **1. Antecedentes.**

### **1.1.El problema.**

#### **1.1.1. Planteamiento de problema.**

El esclerómetro es un equipo utilizado para ensayos no destructivos en el hormigón, el cual es muy usado en nuestro medio ya sea para el control de obras (supervisión y fiscalización) o para el control de estructuras que ya cumplieron con su vida útil, ya que nos brinda una rápida respuesta para conocer una resistencia a compresión aproximada de estructuras de hormigón y su uniformidad sin provocar daño a las mismas.

Los resultados de rebote, que arroja el esclerómetro, tienen cierto porcentaje de variación con respecto a los resultados que nos brinda la prensa electrónica a través de la rotura de probetas, esto es debido a diversos factores, entre ellos: el tipo de cemento, carbonatación, la procedencia de los agregados (rodado o triturado), etc. Los resultados antes mencionados pueden tener mayor exactitud relacionando los resultados de rebote del esclerómetro con los de resistencia a compresión del hormigón a diferentes edades según dictan las diferentes normas que regulan a este ensayo.

El laboratorio de hormigón de la carrera de ing. Civil de la facultad de ciencias y tecnología de la UAJMS cuenta con el esclerómetro, lastimosamente este no se encuentra calibrado con la prensa electrónica.

#### **1.1.2. Formulación.**

A partir de dicho planteamiento surge el siguiente cuestionamiento para dar proceso con el presente proyecto.

¿Se podrá mejorar la aproximación de los resultados de resistencia a compresión del esclerómetro?

### **1.1.3. Sistematización.**

¿Cuánto será la variación del esclerómetro del laboratorio con su correlación de fábrica?

¿Qué variación habrá de los resultados del esclerómetro con la prensa electrónica?

¿Qué factores influirán en los resultados del esclerómetro?

¿Qué tipo de curva será óptima para la correlación?

¿Cuál será la variación de los resultados del esclerómetro de probetas elaboradas con agregado grueso rodado con respecto a las elaboradas con agregado grueso triturado?

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1. Objetivo general.**

Calibrar el esclerómetro tipo N del laboratorio de hormigón de la UAJMS con la prensa electrónica, a través de los resultados de rebote y rotura de probetas a compresión de dosificación 21, 25 y 30 Mpa.

### **1.2.2. Objetivos específicos.**

- Extraer el agregado triturado del banco ubicado en Charajas del río Camacho y el agregado de canto rodado del banco ubicado en El Temporal del río Guadalquivir para la elaboración de probetas.
- Dosificar la mezcla para las resistencias características de 21, 25 y 30 Mpa según la norma ACI.
- Realizar las curvas de correlación de los resultados de rebote del esclerómetro con los de resistencia a compresión de la rotura de las probetas.
- Determinar la variación de los resultados de la esclerometría a probetas dosificadas con agregado grueso de tipo rodado con respecto a la calibración general (agregado grueso triturado).
- Aplicar el ensayo no destructivo “esclerometría” en la estructura del laboratorio de farmacología de la UAJMS.

- Analizar los resultados de resistencia a la compresión de los testigos del laboratorio de farmacología con los resultados obtenidos por el ensayo de esclerometría.

### **1.3. Justificación.**

#### **1.3.1. Académica.**

Se necesita conocer más acerca del esclerómetro, tanto la forma correcta de cómo usarlo para tratar de tener la menor cantidad de errores posibles, como en que nos puede ser útil el equipo.

Esta investigación pretende dar a conocer un valor estimativo de cuanto es la variación de los resultados del esclerómetro del laboratorio de hormigón de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Se aplicarán los conocimientos adquiridos en estadística, tecnología del hormigón y hormigón armado I.

A partir de este proyecto se puede crear una línea de investigación con respecto a este equipo y otros ensayos no destructivos. Los estudiantes podrán abarcar más en este tema a partir de este trabajo tomando en cuenta otros factores que no se incluyeron en el mismo.

#### **1.3.2. Técnica.**

Diferentes autores determinan que la realización de ensayos esclerométricos, para la determinación de la resistencia del hormigón, puede conducir a errores muy importantes si no se relacionan estos ensayos de dureza con la resistencia de probetas de hormigón con materiales representativos o testigos obtenidos de los mismos lugares de la estructura. Por tanto, el presente trabajo estimará curvas adecuadas para reducir el porcentaje de error del esclerómetro de nuestro laboratorio.

La aplicación del equipo en el laboratorio de farmacología nos brindará una verificación de la calidad de la estructura.

### **1.3.3. Social.**

Los estudiantes de la universidad, los técnicos y empresas que necesiten utilizar el equipo, estarán beneficiados con la correlación del esclerómetro, ya que tendrán mayor confianza en los valores de resistencia que obtendrán con el equipo.

### **1.4. Alcance.**

#### **1.4.1. Alcance general.**

Esta investigación se apoyará en la norma ACI 228.1R-03 y ASTM C 805 se obtendrán los resultados de forma empírica, en la cual se realizará la calibración del esclerómetro, a través de probetas de diferentes dosificaciones para tres resistencias características (21, 25, 30 Mpa).

Las probetas tienen dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura y serán dosificadas por el método ACI, se realizarán probetas para cada día de edad del hormigón entre el día 1 y los 28 días de edad. Estas se realizarán con cemento portland IP-30 El puente y con dos tipos de agregado grueso, los cuales serán sometidos a los ensayos de rutina para la dosificación según la resistencia deseada a alcanzar.

Cada una de las probetas se someterá al ensayo de esclerometría (ASTM C805) y al ensayo de rotura (ASTM C39). Para la esclerometría se realizarán 16 rebotes, con las recomendaciones que dictan las normas, en la cara más adecuada de la probeta.

Se va a correlacionar los resultados de rebote que nos brinda el esclerómetro y los resultados de resistencia a compresión que nos da la prensa electrónica, a partir de curvas de correlación. Se analizará los efectos ocasionados en los resultados de rebote por: el tipo de agregado grueso (triturado o canto rodado), la edad del hormigón, para así tratar de reducir la variación de los resultados del esclerómetro. Dichas curvas de correlación tendrán como variable dependiente la resistencia a compresión obtenida con la prensa electrónica y como variable independiente el número de rebote del esclerómetro.

Existen otros factores que influyen, pero debido a la magnitud del trabajo que sería tomar en cuenta todos ellos, sólo se analizarán los resultados con las variables ya mencionadas.

Se realizará la aplicación del ensayo no destructivo “esclerometría” en la estructura del laboratorio de farmacología de la UAJMS y se compararan esos resultados con los de resistencia a la compresión de los testigos del laboratorio de farmacología. Con dicha comparación se verificará si el equipo obtuvo resultados más precisos.

#### **1.4.2. Hipótesis.**

La calibración del equipo permitirá reducir el error hasta 20% en los resultados del esclerómetro con respecto al resultado de resistencia a compresión de la prensa electrónica.

#### **1.4.3. Aporte académico.**

Se conocerá más acerca del equipo “esclerómetro” que tiene la universidad, el cómo usarlo y que parámetros puedes conocer del hormigón con los resultados que te brinda. También se estará más al tanto de las normas que rigen este ensayo no destructivo.

Con esta investigación se dará a conocer un valor estimativo de cuanto es la variación que tiene el equipo sin calibrar. Además de que los estudiantes pueden usar como base este estudio para crear una línea de investigación de otros ensayos no destructivos o semi-destructivos y también pueden profundizar en este tema a partir de este trabajo, tomando en cuenta otros factores que no se tomaron en cuenta.

### **1.5. Aspectos metodológicos.**

#### **1.5.1. Tipo de estudio.**

La presente investigación es científica debido a que profundizara los conceptos con respecto al ensayo esclerométrico y es de tipo correlacional, ya que tiene como objetivo determinar la relación entre los resultados de rebote del esclerómetro y la resistencia a compresión de la prensa hidráulica tomando en cuenta otras variables como la edad del hormigón y el tipo de agregado.

### **1.5.2. Métodos.**

El método para realizar esta investigación es empírico mediante el análisis experimental de una cantidad considerable de muestras (probetas de hormigón).

### **1.5.3. Normas.**

ACI 211.1-91. Standard Practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete.

ACI 228.1R-03. In-Place Methods to Estimate Concrete Strength.

ASTM C 805. Standard test method for rebound number of hardened concrete.

COGUANOR NTG 41017 h11. Método de ensayo. Determinación del número de rebote en hormigón endurecido.

NMX-C-192-ONNCCE-2006. Industria de la construcción-hormigón-determinación del índice de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro.

### **1.5.4. Técnicas para la recolección y tratamiento de información.**

Se elaborarán las probetas y posteriormente se aplicará el ensayo esclerométrico en las mismas, realizando 16 rebotes con las recomendaciones que dictan las normas, en la cara más adecuada de la probeta.

Se anotarán las lecturas de rebote que se obtengan en las probetas con el esclerómetro, examinando la impresión hecha en la superficie después de impacto, y si el impacto machaca o rompe, significa que la superficie tiene un vacío de aire, por ello se debe desechar la lectura y tomar otra. Posteriormente, se realizará la ruptura de la probeta en la prensa electrónica y se anotará el valor que haya lecturado la misma.

Continuando, en el tratamiento de la información, las lecturas que difieran del promedio de 10 lecturas por más de 6 unidades serán desechadas y se determinará el promedio de las lecturas restantes. Si más de 2 lecturas difieren del promedio en 6 unidades, se desechará todo el conjunto de lecturas.

Por último, se efectuará la reciprocidad de los resultados obtenidos mediante curvas de correlación y a partir de estas se definirá ecuaciones que tendrá como variable dependiente la resistencia a compresión obtenida con la prensa electrónica y como variable independiente el número de rebote del esclerómetro.

## **CAPÍTULO II**

### **2. Fundamento teórico.**

#### **2.1.El hormigón.**

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo. Se utiliza en construcciones residenciales (edificios, casas y bloques de varios pisos) y también en obras de infraestructura como puentes o carreteras. El hormigón es un producto de alta calidad, resistente y duradero.

Viterbo O'Reilly (1998), en tecnología del hormigón-SOBOCE, define al hormigón como una masa heterogénea constituida básicamente por agregados, cemento portland, agua, aire y algunas veces aditivos, que una vez endurecida tiene la característica de resistir esfuerzos mecánicos en especial los de compresión.

#### **2.2.Materiales componentes empleados en la elaboración de hormigones.**

##### **2.2.1. Cemento hidráulico.**

Se define como un material con propiedades adhesivas y cohesivas que le dan capacidad de unir fragmentos sólidos para formar un material resistente y durable.

El cemento portland es el tipo de cemento más utilizado, aunque cada vez se realizan más adiciones activas al cemento molido de clinker y piedra de yeso. Según las adiciones se puede obtener cemento puzolánico, siderúrgico o cemento aluminoso entre otras distinciones.

Para el presente estudio se empleará cemento “El puente” tipo IP 30.

##### **2.2.2. Áridos (Agregados).**

Los agregados son una masa de materiales casi siempre pétreos, que se consideraban originalmente inertes y que unidos por medio de la pasta de cemento conforman la masa del hormigón.

Los agregados ocupan entre el 60 y 80% del volumen total del hormigón. Están constituidos por agregados finos (arena) y por agregados gruesos (grava). La arena o

agregado fino, es aquella cuyo diámetro varía entre 0.074 mm y 5 mm; y la grava o agregado grueso es aquella con diámetro superior a 5mm.

Para la confección de hormigones pueden emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de machaqueo, que reúnan en igual o superior grado las características de resistencia y durabilidad que se le exijan al hormigón.

Con áridos naturales rodados, los hormigones son más trabajables y requieren menos agua de amasado que los áridos de machaqueo, teniéndose además la garantía de que son piedras duras y limpias. Los áridos machacados procedentes de trituración, al tener más caras de fractura cuesta más ponerlos en obra, pero se traban mejor y se refleja en una mayor resistencia.

#### **2.2.2.1. Ubicación de los áridos para la investigación.**

El agregado grueso triturado para la elaboración de probetas para la calibración general del equipo fue extraído de la planta de producción de agregados del SEDECA del río Camacho, ubicado en la comunidad de “Charajas”, siguiendo la carretera Chocloca-Juntas, en la provincia Avilés, Tarija, Bolivia. La planta se encuentra a 43 km de la ciudad de Tarija y a 17 km del Valle de la Concepción.

*Figura 2.1 Ubicación de cantera del agregado grueso triturado*



*Fuente: Google Earth*

El agregado grueso de canto rodado para la comparación entre tipo de agregado fue extraído de la cantera ubicado en la comunidad “El temporal” siguiendo la carretera San Luis-Temporal-San Jacinto, antes de llegar al puente colgante del rio Guadalquivir, en la provincia Cercado, Tarija, Bolivia. La planta CasBal se encuentra a 9,1 km del centro de la ciudad de Tarija

*Figura 2.2 Ubicación de cantera de agregado grueso de canto rodado*



*Fuente: Google Earth*

El agregado fino para la elaboración de probetas de ambos casos fue extraído de la planta de producción de agregados del SEDECA.

### **2.2.3. Agua.**

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estricta necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo. Puede estimarse que cada litro de agua de amasado de exceso supone anular dos kilos de cemento en la mezcla. Sin embargo, una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua.

Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade el agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento.

Ambas, el agua destinada al amasado, como la destinada al curado deben ser aptas para cumplir su función. El agua de curado es muy importante que sea apta pues puede afectar más negativamente a las reacciones químicas cuando se está endureciendo el hormigón.

Cuando una masa es excesivamente fluida o muy seca hay peligro de que se produzca el fenómeno de la segregación (separación del hormigón en sus componentes: áridos, cemento y agua). Suele presentarse cuando se hormigona con caídas de material superiores a los 2 metros.

### **2.3. Propiedades del hormigón fresco.**

#### **2.3.1. Consistencia.**

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía con multitud de factores: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los áridos, etc.; el que más influye es la cantidad de agua de amasado, como puede comprobarse.

Existen varios procedimientos para determinar la consistencia, siendo los más empleados el cono de Abrams, la mesa de sacudidas y el consistómetro Vebe. a) El cono de Abrams es un molde tronco cónico de 30 cm de altura que se rellena con el hormigón objeto de ensayo. La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros, da una medida de su consistencia.

#### **2.3.2. Docilidad.**

La docilidad del hormigón es la facilidad con que una mezcla de áridos, cemento y agua se transforman en hormigón, y la facilidad de ser manejado, transportado, colocado y compactado en los moldes o encofrados con la mínima pérdida de homogeneidad.

Esta será la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin producir coqueras.

La docilidad de una amasada de hormigón fresco depende de las características y proporciones relativas del cemento, áridos, agua y aditivos que la forman. Es mayor con áridos rodados que con machacados, a igualdad de otras condiciones.

Por otra parte, la docilidad aumenta con el contenido de árido fino, con la dosificación de cemento, con el empleo de cenizas volantes, con el empleo de aditivos plastificantes e incluso aireantes y con el aumento de agua de amasado, si bien este último puede resultar peligroso por la repercusión que el aumento de la relación agua/cemento puede tener sobre las resistencias del hormigón.

También depende de la forma y tamaño del molde y de los medios de compactación disponibles. Así, un hormigón de consistencia plástica puede ser ideal para su utilización como hormigón en masa en un pavimento, mientras que puede ser totalmente inadecuado para su empleo en una viga de sección en T fuertemente armada. En el primer caso el hormigón tendrá una buena docilidad y en el segundo mala.

Igualmente, ese mismo hormigón de consistencia plástica puede ser muy dócil si se emplea en una cimentación y su compactación se hace mediante vibración y muy poco dócil si se consolida mediante picado con barra.

En general, secciones pequeñas y muy armadas requieren hormigones de alta docilidad, como los hormigones autocompactantes, mientras que, por el contrario, en estructuras de grandes secciones y sin armar pueden colocarse mezclas menos dóciles.

Un hormigón poco dócil es propenso a la segregación. Además, una baja docilidad puede resultar en resistencias mecánicas menores a las previstas y a superficies poco vistosas después de realizar el desencofrado.

### **2.3.3. Homogeneidad.**

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten prácticamente iguales. La homogeneidad se consigue con un buen amasado y para mantenerse requiere un transporte cuidadoso y una colocación adecuada.

La homogeneidad puede perderse por segregación (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) o por decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida). Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo del árido, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre.

### **2.3.4. Masa específica.**

Un dato de gran interés como índice de la uniformidad del hormigón en el transcurso de una obra, es la masa específica (densidad) del hormigón fresco, sea sin compactar, sea compactado. La variación de cualquiera de ambos valores, que repercute en la consistencia, indica una alteración de la granulometría de los áridos, del contenido en cemento o del agua de amasado, por lo que debe dar origen a las correcciones oportunas. Valores medios de la masa específica en función del tamaño máximo del árido.

## **2.4. Propiedades del hormigón endurecido.**

El hormigón experimenta un proceso de endurecimiento progresivo que lo transforma de un material plástico en un sólido, producido por el proceso físico-químico complejo de larga duración.

En esta etapa, las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los materiales componentes y de las condiciones ambientales a que estará expuesto durante su vida útil.

Estas propiedades son:

### **2.4.1. Densidad.**

La densidad de hormigón se define como el peso por unidad de volumen.

Depende de la densidad real y de la proporción en que participan cada uno de los diferentes materiales que constituyentes del hormigón. Para los hormigones convencionales, formados por materiales granulares provenientes de rocas no mineralizadas de la corteza terrestre su valor oscila entre 2350 y 2550 Kg/m<sup>3</sup>.

La densidad normalmente experimenta ligeras variaciones con el tiempo, las que provienen de la evaporación del agua de amasado hacia la atmosfera y que puede significar una variación de hasta un 7% de su densidad inicial.

Esta puede ser variada artificialmente, ya sea por debajo o sobre los valores mencionados, constituyendo en este caso los denominados hormigones livianos o pesados, respectivamente.

Hormigones livianos: Se obtienen por medio de la incorporación de aire, ya sea directamente en la masa de hormigón o incorporada en los áridos utilizando áridos livianos. Se utiliza principalmente cuando se desea obtener aislación térmica y acústica mayores a la del hormigón convencional.

Hormigones pesados: Se obtienen mediante el uso de áridos mineralizados, cuya densidad real es mayor que la de los áridos normales, se utiliza principalmente cuando se desea obtener aislación contra partículas radiactivas.

### **2.4.2. Compacidad.**

Se define la compacidad como la cantidad de material solido contenida en una unidad de volumen, está íntimamente ligada a la densidad y depende de los mismos factores que ésta, sobre todo del método de consolidación empleado. Estos métodos de consolidación tienen por objeto introducir, en un volumen determinado, la mayor cantidad posible de áridos y, al mismo tiempo, que los huecos dejados por éstos se rellenen con la pasta de cemento, eliminando por completo las burbujas de aire. (Montoya, et al., 1998).

Es evidente la relación directa que existe entre la compacidad de un hormigón y sus resistencias mecánicas, por cuanto dicha compacidad aumenta con el volumen de materias sólidas que componen el hormigón, en relación con los volúmenes ocupados por el agua y el aire.

Una buena compacidad no solo proporciona una mayor resistencia mecánica (frente a esfuerzos, impactos, desgaste, vibraciones, etc.), sino también una mayor resistencia física (efecto de la helada) y química frente a las acciones agresivas, ya que, al contener una cantidad mínima de huecos o porosidades, las vías de penetración de los agentes exteriores son también mínimas.

### **2.4.3. Permeabilidad.**

El hormigón es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exteriormente, se produce escurrimiento a través de su masa.

El grado de permeabilidad del hormigón depende de su constitución, y cuenta con un rango de permeabilidad relativamente amplio, por lo cual es conveniente conocer el mecanismo mediante el cual se produce el escurrimiento de agua en el hormigón.

El agua puede escurrir en el interior del hormigón a través de dos vías:

- La discontinuidad (poros y fisuras) de la pasta de cemento, producida principalmente por la porosidad derivada del agua introducida en el hormigón para otorgarle trabajabilidad necesaria y por las microfisuras producidas por las variaciones de volumen interna por retracción hidráulica y térmica.
- La porosidad existente en el contacto entre la pasta de cemento y los áridos constituyentes del hormigón, que proviene principalmente de su insuficiente relleno de los huecos del esqueleto constituido por los áridos por parte de la pasta de cemento.

#### **2.4.4. Durabilidad.**

Durante toda la vida útil, el hormigón está permanentemente expuesto a las acciones provenientes de agentes externos e internos, que pueden afectar su durabilidad si no se les tiene debidamente en cuenta.

#### **2.4.5. Resistencia.**

La resistencia es una de las propiedades más importantes del hormigón principalmente cuando se le utiliza con fines estructurales.

El hormigón en su calidad de constituyente de un elemento estructural, queda sometido a las tensiones derivadas de las solicitaciones que actúan sobre este. Si sobrepasan su capacidad resistente se producirán fracturas, primero de origen local y posteriormente generalizadas, que podrán afectar la seguridad de la estructura.

Por este motivo, los elementos estructurales deben ser dimensionados de manera que las tensiones producidas no sobrepasen la capacidad resistente del material constituyente, lo cual muestra la importancia de conocer esas características.

Dentro de la resistencia del hormigón podemos encontrar dos tipos:

- Resistencia a Compresión.

Característica mecánica más importante de un hormigón, su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas empleadas para determinar la resistencia a la compresión, son de forma cubica o cilíndrica. De las primeras, se emplean de preferencia las de 15 y 20cm de arista, y para las segundas, las de 15cm de diámetro y 30cm de altura.

- Resistencia a Tracción.

La resistencia a la tracción del hormigón ha sido menos estudiada que la resistencia a la compresión, en parte debido a la mayor incertidumbre que existe para su determinación.

## **2.5. Resistencia característica del hormigón.**

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón, su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas. La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de rotura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes usadas en EEUU, en mega pascales (MPa) en unidades del SI y en Kg/cm<sup>2</sup> en unidades MKS.

Los valores de ensayo que proporcionan las diferentes probetas son más o menos dispersos, es debido a ese inconveniente que se ha adoptado el concepto de resistencia característica del hormigón, ya que es una medida estadística que toma en cuenta el valor de la media aritmética y la desviación típica relativa.

Se define como resistencia característica, fck, del hormigón aquel valor que representa un grado de confianza del 95%, es decir, que existe una probabilidad de 0,95 de que se presenten valores individuales de resistencia más altos que fck.

## **2.6. Evolución de la resistencia del hormigón.**

Inmediatamente que se presenta el fraguado del hormigón comienza el proceso de adquisición de resistencia con el transcurso del tiempo.

En la práctica, normalmente se especifica que el hormigón alcanza la máxima resistencia a la compresión a la edad de 28 días.

En el cuadro siguiente se observa la evolución de la resistencia a compresión de un hormigón tomando como unidad la resistencia a 28 días, siendo cifras orientativas:

*Cuadro 2.1 Resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo*

Edad del hormigón, en días	3	7	28	90	360
Cemento portland normal	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
Cemento portland de alta resistencia inicial	0,55	0,75	1,00	1,15	1,2

*Fuente: (EHE, Cuadro 30.4.b)*

En lo mostrado anteriormente está claro que las ganancias de endurecimiento del hormigón se produce mayormente en los días iniciales después de la colada del mismo, y llega a alcanzar un 100% al llegar los 28 días, pero después de estos 28 días el hormigón sigue adquiriendo mayor resistencia, pero ya es mínima a comparación de estos días mostrados anteriormente.

No se tiene un estudio exacto en que tiempo el hormigón adquiere su resistencia total, pero se supone que después del primer año está casi totalmente el su punto máximo de la resistencia tomada.

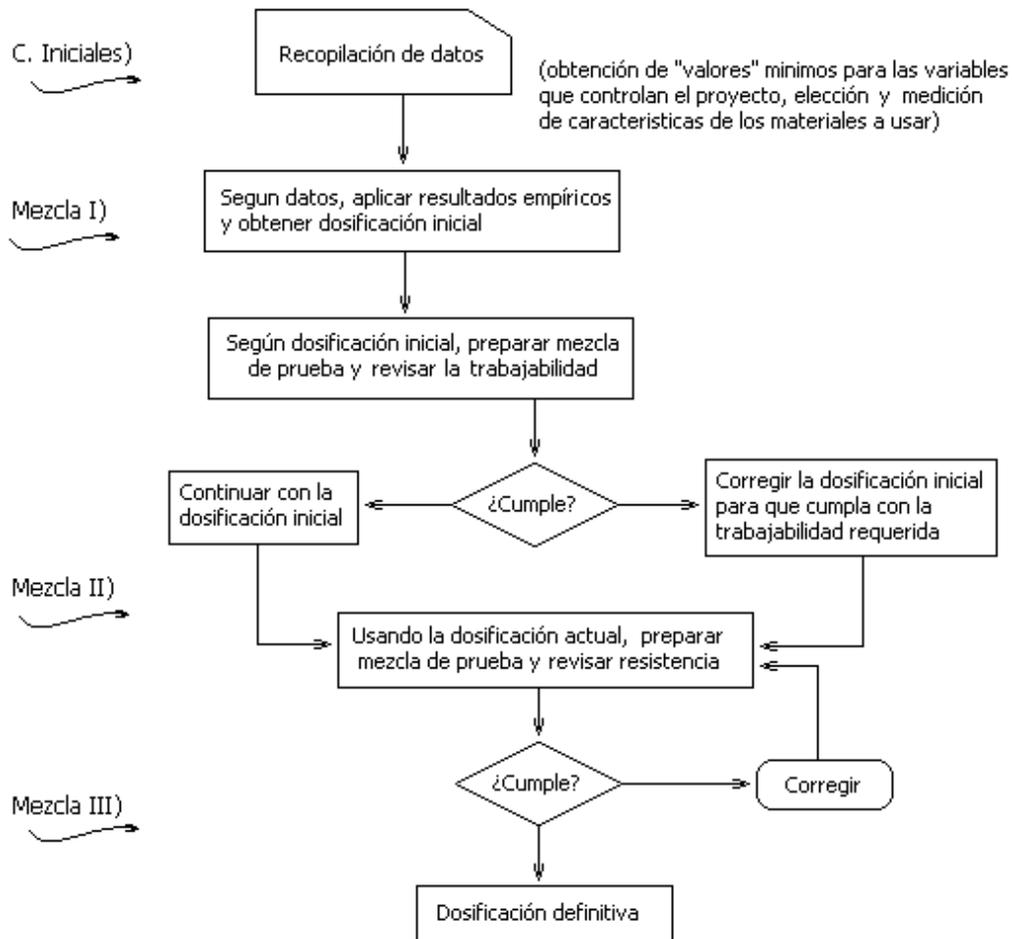
### **2.7. Dosificación del hormigón.**

Existen diversos métodos de dosificación de hormigón de múltiples autores y normas, los cuales terminan siendo de carácter orientativo. En el presente proyecto se decidió seguir la metodología en base a la norma ACI 211.1, el cual será explicado a más detalle a continuación:

El Instituto Americano del Hormigón (ACI) presentó, como resultado de extensas investigaciones y fundamentándose en los trabajos experimentales de Abrams, Richard y Talbot, Goldbeck y Gray, un método con resultados aceptables para hormigones con dos agregados, de peso unitario entre los 2000 kg/m<sup>3</sup> y los 2500 kg/m<sup>3</sup> y con requisitos de resistencia menores a 42 MPa, los cuales son llamados usualmente hormigones normales.

La forma más simple de trabajar este método se indica en la figura 2.3.

Figura 2.3 Metodología gráfica en el diseño de mezclas según ACI 211.1



Fuente: (Orlando Bolivar I.C., 2006)

### 2.7.1. Datos iniciales.

Antes de comenzar el proceso de dosificación es fundamental conocer ciertos datos iniciales los cuales se relacionan con: a) la estructura, b) los materiales y c) los registros estadísticos con mezclas similares. De esta forma se pueden clasificar las variables primordiales para el proyecto. Es fundamental comprobar que los agregados, el cemento, el agua y los aditivos cumplan con sus respectivas normas. (Orlando Bolivar I.C., 2006).

A continuación, se explican cuáles son los datos necesarios para la aplicación del método, indicando las variables específicas relacionadas con las ecuaciones de diseño.

- Condiciones de colocación (asentamiento).

Se debe definir la trabajabilidad de la mezcla, teniendo en cuenta para ello el tipo de construcción, su forma, el método de vibrado, la forma de transporte, la textura final y las necesidades de bombeo (Cuadro A2.1 de anexos). Medir directamente la trabajabilidad de una mezcla no es fácil por lo que suele correlacionarse con otras características de la mezcla, una de las más usadas es la prueba de asentamiento por el cono de Abrams.

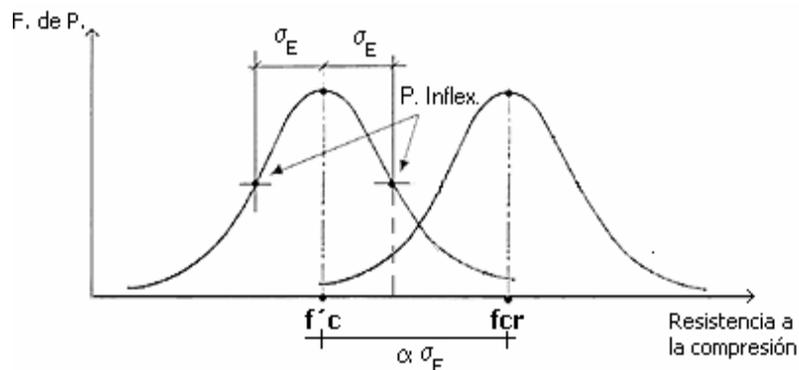
- Requisitos de resistencia ( $f'c$ ).

Debe indicarse la resistencia del hormigón a compresión ( $f'c$ ) requerida para la estructura. Su valor se encuentra especificado en los planos y memorias estructurales. Por lo general su valor se obtiene mediante ensayos sobre probetas estándar a una edad definida. Es frecuente en nuestro medio especificar en los diseños estructurales resistencias de: 21, 25, 30, 35 y 40 MPa a 28 días.

- Experiencia en el diseño de mezclas.

Como ya se ha dicho, el obtener un hormigón de características aceptables no solo depende de escoger las cantidades adecuadas de cada material, sino también del cuidado que se tenga durante la preparación y el curado de la mezcla. Dicho cuidado está determinado por la experiencia de quien fabrica la mezcla, dependiendo de esta experiencia es necesario aumentar el  $f'c$ . (Orlando Bolivar I.C., 2006).

Figura 2.4 Relación entre  $f'c$  y  $f'cr$  en la dosificación del hormigón



Fuente: (Orlando Bolivar I.C., 2006)

*Cuadro 2.2 Valores orientativos de la resistencia media en función de la resistencia característica*

Código	Valor de $f_{ck}$ que se desea en N/mm <sup>2</sup> (MPa)	Valor necesario de $f_{cm}$ en N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Código Modelo	$f_{ck} \leq 50$	$f_{cm} = f_{ck} + 8$
Código ACI	$f_{ck} < 20$	$f_{cm} = f_{ck} + 7$
	$20 \leq f_{ck} \leq 35$	$f_{cm} = f_{ck} + 8.5$
	$f_{ck} > 35$	$f_{cm} = f_{ck} + 10$

*Fuente: (Jimenez Montoya, 2009)*

- Características del ambiente y dimensiones de la estructura (A/C por durabilidad).

La durabilidad del hormigón depende en forma directa de las condiciones ambientales a las cuales sea sometida la estructura durante su vida útil y de ciertas características de la misma. Experimentalmente se ha podido comprobar que mediante el control de la relación entre las dosificaciones de agua y cemento (relación A/C) pueden alcanzarse las vidas útiles esperadas, por lo cual se han diseñado Cuadros y criterios que especifican los valores máximos que debe tener dicha relación para que la estructura no sufra desgastes, daños ni deterioros debidos a una baja durabilidad. *(Orlando Bolivar I.C., 2006)*.

El control de la relación agua-cemento por durabilidad puede estar especificado por el ingeniero estructural, por normas o por códigos. El ACI 211 recomienda la siguiente Cuadro:

*Cuadro 2.3 Máxima relación agua/cemento por durabilidad*

Tipo de estructura	Condiciones de exposición	
	Exposición 1	Exposición 2
Secciones delgadas	0,45	0,40
Otras estructuras	0,50	0,45

*Fuente: (Orlando Bolivar I.C., 2006)*

Exposición 1: Exposición a sulfatos o al agua de mar.

Exposición 2: Continua o frecuentemente húmeda.

- Características de los materiales.

El conocimiento de las propiedades de los constituyentes del hormigón representa la etapa experimental previa al estudio de la dosificación. Se deben evaluar las características físicas químicas y mecánicas de los materiales y confrontarlas con las especificadas normativamente. *(Orlando Bolivar I.C., 2006)*.

### **2.7.2. Dosificación inicial.**

Para la dosificación inicial se realizan los siguientes cálculos de cantidades iniciales:

- Cálculo de la cantidad inicial de agua (A) y del porcentaje de aire atrapado.

Para la estimación del contenido inicial de agua y el porcentaje de aire atrapado, el ACI recomienda utilizar como primera aproximación los resultados experimentales indicados en el cuadro A2.3 y A2.4 de anexos.

La mayoría de los cuadros para obtener la cantidad inicial de agua, especifican unos rangos muy amplios para el asentamiento e incluso no dan valores para algunos de ellos, como en el cuadro anterior para el asentamiento entre 50 y 80 mm. Esta deficiencia puede explicarse, por una parte, en el paso de unidades inglesas al Sistema Internacional, y por otra, en que la estimación inicial de la cantidad de agua sólo es una

aproximación razonable, esta cantidad se ajusta posteriormente usando el ensayo de asentamiento.

- Cálculo de la cantidad inicial de cemento (C).

Antes de calcular de manera explícita el contenido de cemento, debe obtenerse la relación agua- cemento necesaria por resistencia  $(A/C)_r$  para compararla con la necesaria por durabilidad  $(A/C)_d$  y escoger la definitiva para el proyecto, con la cual se calcula el contenido de cemento.

En la práctica los usos de Cuadros facilitan el cálculo de dicha relación agua-cemento dependiendo de la resistencia promedio de la mezcla ( $f'_{cr}$ ) y la resistencia característica del cemento. (*Orlando Bolivar I.C., 2006*).

El cuadro utilizado para el cálculo inicial de cemento se encuentra en el cuadro A2.5 de anexos.

- Cálculo de la cantidad inicial de agregado grueso (Grava).

Las recomendaciones del ACI, basadas en el trabajo experimental del profesor W. M. Dunagan, señalan que, dados unos agregados y un determinado asentamiento, es necesario dejar constantes el contenido de agua y el volumen de agregado grueso para mantener la misma trabajabilidad con la misma relación agua-cemento. ACI, basado en estos resultados, recomienda ciertos volúmenes de agregado dependiendo de su tamaño máximo y del módulo de finura de la arena.

El cuadro utilizado para el cálculo inicial del agregado grueso se encuentra en el cuadro A2.6 de anexos.

- Cálculo de la cantidad inicial de agregado fino (Arena).

Aunque existe un procedimiento por peso; este requiere el conocimiento previo de la densidad del hormigón, la cual a este nivel del diseño no se conoce por lo que el método por volumen es el más recomendable inicialmente. Este método se basa en que la suma de los volúmenes absolutos de los componentes del material debe conformar un metro cúbico de hormigón:

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{cemento}} + V_{\text{grava}} + V_{\text{arena}} = 1 \text{ m}^3 \text{ H}^\circ$$

De aquí se despeja el volumen de arena necesario para conformar inicialmente el metro cubico de hormigón.

$$V_{\text{arena}} = 1 \text{ m}^3 \text{ H}^\circ - (V_{\text{agua}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{cemento}} + V_{\text{grava}} + V_{\text{arena}})$$

- Dosificación inicial.

$$V_{\text{agua}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{cemento}} + V_{\text{grava}} + V_{\text{arena}} = 1 \text{ m}^3 \text{ H}^\circ$$

Se debe anotar que antes de medir y mezclar los materiales para hacer la prueba de asentamiento se debe hacer la corrección por humedad de los agregados.

### **2.7.3. Mezclas de prueba.**

- Corrección por humedad.

Dada la porosidad de los agregados, estos absorben agua que no alcanza a reaccionar con el cemento y que por ende no hace parte de la cantidad que se especifica en cada una de las dosificaciones obtenidas en los numerales anteriores. Es por esto que es necesario, a la hora de preparar cualquier mezcla, corregir las cantidades a medir según sea la cantidad de agua que posean los agregados y el grado de porosidad de los mismos. El no tener en cuenta esta precisión puede ocasionar variaciones de la relación agua cemento y de la trabajabilidad de la mezcla. (*Orlando Bolivar I.C., 2006*).

- Corrección por asentamiento y densidad del hormigón.

Para corregir la dosificación inicial con el fin de que cumpla los requisitos trabajabilidad, es necesario realizar el ensayo de asentamiento, el cual debe complementarse con la prueba de densidad y con la prueba de contenido de aire ambos resultados son necesarios para realizar los primeros ajustes a la mezcla de prueba. Esto hace que los cálculos para obtener las cantidades de finos, en las correcciones por asentamiento y por resistencia, se hagan mediante procedimientos por peso y no por volumen absoluto. (*Orlando Bolivar I.C., 2006*).

- Corrección por resistencia.

Una vez realizada la prueba de resistencia a compresión debe obtenerse el valor promedio de las probetas ensayadas ( $f_{c_{prom}}$ ) así:

$$f_{c_{prom}} = (\sum f_{c_i}) / n$$

Dónde:

n: número de probetas

$f_{c_i}$ : Resistencia a la compresión a los 28 días de la probeta i

Debe tenerse en cuenta que, si el coeficiente de variación “v” de las probetas es mayor al 4%, el promedio no es confiable y la prueba se debe repetir.

$$v = \frac{f_{c_{max}} - f_{c_{min}}}{t(f_{c_{prom}})}$$

Dónde:

t: depende del número de probetas (si  $n = 2 \Rightarrow t = 1.128$ , si  $n = 3 \Rightarrow t = 1.693$ )

El valor de la resistencia promedio de las probetas ( $f_{c_{prom}}$ ) se compara con el valor de la resistencia promedio requerida para la mezcla ( $f'_{cr}$ ), en caso de que la diferencia entre ambos sea menor del 2%, no es necesario corregir la dosificación por resistencia, en caso contrario se debe realizar el ajuste correspondiente. (*Orlando Bolivar I.C., 2006*).

### **2.8.Elaboración de probetas de hormigón.**

Las probetas consisten en cilindros de hormigón de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto. La elaboración se lleva a cabo llenando un molde metálico en 3 capas de igual altura con la muestra en estado fresco. Cada capa se apisona con 25 golpes aplicados en diferentes sitios de la superficie del hormigón proporcionados por una varilla de 16 mm de diámetro y aproximadamente 60 cm de longitud. La capa de fondo se debe compactar con toda su profundidad mientras que, en la capa superior e intermedia, la varilla debe penetrar ligeramente la capa adyacente. Una vez terminada la

compactación, se completa el molde con más mezcla y se alisa la superficie con un palustre o cualquier otro instrumento adecuado.

Elaborado los especímenes, se les golpea en las paredes con un martillo de caucho con el fin de eliminar la mayor cantidad de burbujas de aire que ha quedado atrapado dentro de la masa de hormigón.

Los cilindros deben quedar en reposo en un sitio cubierto. Pasadas aproximadamente 24 horas se les quita el molde y se someten a curado (cuando se tratan de muestras de laboratorio, sumergiéndolos en tanques de agua o en una cámara de curado hasta el día que vayan a ser ensayados; cuando se trata de testigos de obra, se deben dejar al lado de la estructura fundida, a las mismas condiciones de exposición). (Viterbo O'Really, 1998).

*Figura 2.5 Molde cilíndrico para elaboración de probetas Controls UAJMS*



*Fuente: Controls Group*

### **2.9. Ensayos destructivos.**

Los métodos destructivos son realizados sobre testigos de hormigón que permiten determinar ciertas propiedades de la muestra, produciendo en ellos una alteración irreversible de su geométrica dimensional y/o de su composición química. Se tiene, por ejemplo:

- Ensayo de resistencia a compresión
- Ensayo a tracción indirecta
- Ensayo de extracción de núcleos
- Ensayo de humedad
- Ensayo a flexo compresión
- Ensayo de permeabilidad
- Ensayo de resistencia a la abrasión
- Ensayo del grado de carbonatación

De los cuales, los más representativos para calcular la resistencia del hormigón son el ensayo a compresión y el ensayo de extracción de núcleos.

### **2.9.1. Ensayo de rotura a compresión de cilindros de hormigón.**

Es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión.

Jiménez Montoya describe como se realiza de la siguiente manera:

Una vez preparada la prensa, se limpiarán las superficies, se debe centrar la probeta sobre el plato inferior, después se lleva el plato superior hasta que quede en contacto con ella, haciendo girar a mano la parte móvil acoplada a la rótula, con el objetivo de realizar un contacto uniforme.

La carga debe aplicarse de una manera continua y sin saltos, a una velocidad constante tal que el incremento de la carga por segundo produzca un aumento de tensión de 0,5 0,2 Mpa. Se tolera una velocidad de carga mayor durante la primera mitad de la carga de rotura. Se continuará el ensayo hasta la rotura, registrando la carga máxima soportada por la probeta.

*Figura 2.6 Prensa electrónica de rotura de probetas Controls UAJMS*



*Fuente: Controls Group*

### **2.10. Extracción y ensayo de probetas testigo (núcleos).**

Los núcleos cilíndricos o corazones de hormigón son extraídos haciendo una perforación en el hormigón con una broca cilíndrica de pared delgada; utilizando un equipo rotatorio como una especie de taladro el cual se adapta la broca con corona de diamante. Se debe tener un sistema de enfriamiento para la broca, impidiendo así la alteración del hormigón y el calentamiento de la broca.

Para hacer pruebas en pavimentos, losas, paredes o elementos estructurales se tendrá que tener un diámetro de al menos 95mm de broca de acuerdo a la norma del ASTM C174. Además, para núcleos que no están proyectados a determinar dimensiones estructurales en promedio debe ser de 5mm.

Los núcleos se deben extraer, siempre que sea posible, perpendicularmente a una superficie horizontal de manera que su eje sea perpendicular a la capa del hormigón, tal como se coloca originalmente y cuidando de no hacerlo en vecindades de juntas o bordes obvios del elemento construido. Si la muestra se extrae en dirección perpendicular a una superficie vertical o a una superficie irregular, se debe extraer lo

más cerca posible del centro de la pieza y nunca cerca de las juntas o bordes de ella (tal como se muestra en la figura).

*Figura 2.7 Extracción de núcleo*



*Fuente: Construyored*

Los núcleos deberán tener una relación altura/diámetro de 2; sin embargo, si la relación varía se aplica un factor de corrección a la resistencia.

*Cuadro 2.4 Factor de correlación de resistencia según relación altura/diámetro del núcleo*

Relación de altura/diámetro del corazón	Factor de correlación de la resistencia
2.00	1.00
1.75	0.99
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

*Fuente: (Remigio Rojas Reyes, 2010)*

Si la relación de altura/diámetro que obtiene no se encuentra en dicha Cuadro deberá interpolar los valores para hallar el factor de correlación correcto.

Evitar hacer extracciones de núcleo en zonas en la que haya presencia de armadura; en caso de ser necesario, hacer las pruebas en dirección perpendicular a la armadura, ya

que su efecto es mínimo y si se llegasen a hacer pruebas paralelas a la estructura estas serán invalidadas.

### **2.11. Ensayos no destructivos.**

Los ensayos no destructivos son técnicas aplicadas a la inspección de productos acabados y semi-acabados para la determinación rápida de valores de resistencia a compresión a través de principios físicos, sin perjudicar la posterior utilización de los productos inspeccionados. Tienen por objeto conocer la calidad del hormigón en obra, sin que resulte afectada la pieza o estructura objeto de examen. Estos ensayos son materia de estudio para la mayor parte de los laboratorios especializados y se encuentran en continuo desarrollo y perfeccionamiento.

Existe una gran variedad de métodos de ensayo no destructivos, pero todos ellos van encaminados a determinar ciertas características del hormigón (dureza, módulo de elasticidad, densidad, grado de humedad, etc.) que, en algunos casos, permiten obtener un valor aproximado de la resistencia del hormigón. Los métodos mejor desarrollados son los siguientes:

#### **2.11.1. Métodos por resonancia.**

Los métodos no destructivos, para determinar la calidad del hormigón por resonancia, están basados en la relación existente entre la frecuencia de resonancia de una pieza y las constantes elásticas del material (Montoya, et al., 1978).

Estos ensayos presentan el inconveniente de que han de efectuarse sobre probetas o piezas de pequeñas dimensiones.

#### **2.11.2. Métodos por absorción o difusión de radioisótopos.**

Aunque estos métodos de ensayo están aún en vías de experimentación, pueden ser de bastante interés para efectuar un control de la homogeneidad del hormigón (Montoya, et al., 1978).

El control de calidad del hormigón puede efectuarse, bien midiendo su densidad, o bien mediante la determinación del contenido de agua. De ambos métodos vamos a tratar sucintamente (Montoya, et al., 1978).

### **2.11.3. Métodos por velocidad de propagación.**

Los métodos de ensayo en obra mediante la determinación de la velocidad de propagación son, probablemente, los más interesantes de los ensayos no destructivos. Se fundan en la relación que existe entre la velocidad de propagación de una onda progresiva o impulso, a través de un medio homogéneo e isótropo, y las constantes elásticas del material, que a su vez están ligadas con la resistencia del mismo. (Montoya, et al., 1978).

### **2.11.4. Métodos esclerométricos.**

Los métodos esclerométricos constituyen ensayos elementales que proporcionan una idea de la resistencia del hormigón, fundándose en la correlación existente entre dicha resistencia y el rechazo de un martillo, o la huella impresa por una bola al chocar contra la superficie de la pieza que se ensaya.

Se explica en el punto 2.12. con mayor detalle.

### **2.11.5. Métodos mixtos.**

Cada uno de los métodos que acaban de ser expuestos posee sus propias limitaciones. Todo ello ha dado lugar a que se desarrollen métodos mixtos, combinando los anteriores. De ellos puede esperarse una mayor precisión, según varios autores.

Como ensayo mixto se recomienda la realización de tres medidas ultrasónicas y seis determinaciones con esclerómetro, por zona de hormigón en estudio. Con los datos medios obtenidos (velocidad de propagación e índice esclerométrico) se entra en unas curvas, obteniéndose la resistencia a compresión del hormigón. Para ciertas condiciones, se emplean factores de corrección (Montoya, et al., 1978).

## **2.12. Ensayos esclerométricos.**

Los ensayos esclerométricos pretenden proporcionar una estimación de la resistencia a la compresión del hormigón basándose en la correlación entre dicha resistencia con su dureza superficial. Para determinar la dureza superficial existen tres formas principales de medida: Medición de un rebote (con el esclerómetro o martillo Schmidt), medición de la huella impresa por una bola (martillo Frank), y medición de la profundidad de la penetración de un clavo (sonda Windsor). En cada uno de estos ensayos el principio es impactar la superficie del hormigón con una determinada masa, activada de una determinada energía cinética, y medir la magnitud de la fuerza, del rebote, o de la profundidad de penetración. Los ensayos de rebote son rápidos y baratos, y además permiten estudiar la uniformidad superficial del hormigón.

A continuación, se explica las tres formas principales del método esclerométrico:

a) El martillo Frank, que mide la resistencia del hormigón por el diámetro de la huella que deja impresa una bola de acero sobre la que se da un golpe. Para efectuar el ensayo se sigue la norma DIN 4.240, muy fácil de ejecutar; pero, como en el caso anterior, los resultados no tienen gran precisión, por lo que sólo debe emplearse para obtener una idea de la calidad del hormigón o de la marcha de endurecimiento del mismo.

b) El esclerómetro Windsor CT.460, de origen americano, que constituye una de las más recientes aportaciones a este tema. Se basa en aplicar a la superficie del hormigón una especie de clavo de acero extra duro, que se introduce en el material por medio de una carga explosiva. Recuerda en cierto modo al esclerómetro Spit.

Lo que se mide es la profundidad de penetración, que viene relacionada con la resistencia a compresión del hormigón. Se afirma que la reproducibilidad de las medidas es grande y que el ensayo es aplicable a superficies planas y curvas, losas de pequeño espesor, etc., lo cual representa, sin duda, una ventaja respecto al martillo Schmidt (Montoya et al., 1978)

c) El martillo Schmidt que mide la resistencia del hormigón en función del rechazo de un martillo ligero, constituido por un pequeño cilindro macizo de acero, al hacerlo

chocar con la superficie de la pieza. Debe obtenerse el rechazo medio de varias determinaciones, limpiando y alisando previamente la superficie que se ensaya. Puede resultar útil para determinar la marcha del endurecimiento del hormigón, o para comparar su calidad entre distintas zonas de una misma obra. Se explica más a detalle en los siguientes puntos.

El método esclerométrico es el ensayo no destructivo (END) más difundido en Ingeniería Civil, siendo relativa la calidad de sus resultados, debido a diversos motivos. Las correlaciones empíricas que se pueden establecer entre el índice esclerométrico y la resistencia a compresión de los hormigones, son modificadas por ciertos factores, siendo los principales: tipo y cantidad de cemento, tipo de áridos, condiciones de curado (en agua, o al aire seco), humedad de superficie, carbonatación, tipo de superficie, u otros factores tales como edad del hormigón, compactación, aditivos utilizados, estado tensional del elemento ensayado, espesor, curvatura, etc. Las alteraciones más evidentes se producen cuando el hormigón se carbonata (endurecimiento superficial) o la pieza en estudio, está sometida a cargas importantes (por ejemplo, columnas de los primeros pisos de un edificio), se obtienen valores superiores a los reales, no obstante, en combinación con Ultrasonidos, tiene una potencialidad importante.

### **2.13. Esclerómetro (martillo Schmidt).**

El esclerómetro o martillo de rebote Schmidt es un ensayo no destructivo que mide la dureza de una superficie que proporciona un rápido y sencillo medio para verificar la uniformidad del hormigón a través de la lectura del número del rebote, como también estima la resistencia del hormigón.

Es el más utilizado por su sencillez y bajo costo, mide la dureza superficial del hormigón en función del rechazo de un martillo ligero. Debe obtenerse el rechazo medio de varias determinaciones, limpiando y alisando previamente la superficie que se ensaya. Útil para determinar la evolución de la resistencia y además es práctica, no destructiva, rápida y confiable, en la que el constructor o supervisor pueda apoyarse

para conocer en campo y de manera aproximada la resistencia del endurecimiento del hormigón o para comparar su calidad entre distintas zonas de una misma obra.

### **2.13.1. Tipos de esclerómetro (martillo Schmidt).**

En la actualidad se encuentra en el mercado varios tipos de esclerómetro:

- Modelo N

Energía de percusión = 2,207 N·m (0,225 k·gm), sirve para el control del hormigón en los casos normales de construcción de edificios y puentes.

- Modelo L

Energía de percusión 0,735 N·m (0,075 kg·m) es una reducción del modelo N. Es más apropiado para el examen de elementos en hormigón de escasas dimensiones a los golpes.

- Modelo M

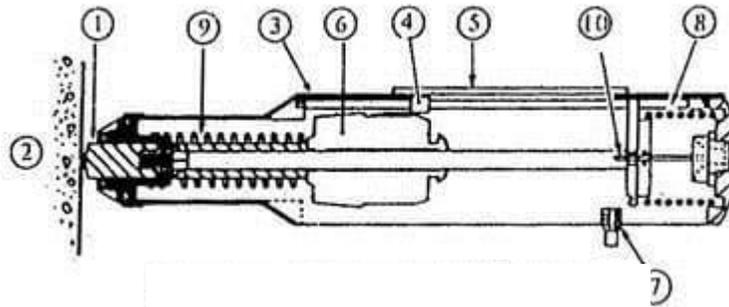
Energía de percusión = 29,43 N·m (3 kg·m) sirve especialmente para la determinación de la resistencia del hormigón en obras de grandes dimensiones y para el examen de calidad de carreteras y pistas de aeródromos de hormigón. Sin embargo, no es excluyente el uso del modelo M.

### **2.13.2. Principio de funcionamiento del esclerómetro.**

En tiempos los maestros de obra y los adeptos a trabajos de edificación en general, solían controlar el estado del hormigón con un martillo la superficie. En base al sonido más o menos metálico y al rebote, alcanzaban a establecer aproximadamente la resistencia del hormigón. el esclerómetro es el perfeccionamiento de este antiguo sistema de valoración.

Para entender el principio de funcionamiento se necesita conocer un esquema general del esclerómetro, el cual es el siguiente:

Figura 2.8 Esquema del esclerómetro



Fuente: CivilGeeks

1. Percutor, 2. Hormigón, 3. Cuerpo exterior, 4. Aguja, 5. Escala, 6. Martillo, 7. Botón de fijación de lectura, 8. Resorte, 9. Resorte, 10. Seguro.

El ensayo se efectúa apretando la punta del esclerómetro (el percutor) contra la superficie a examinar, hasta que el martillo, impulsado por un resorte, se descargue sobre el percutor, es decir, se carga un muelle. Cuando la punta ha entrado totalmente en el esclerómetro, se desengancha automáticamente una masa que golpea la misma punta en la extremidad interna y a través de esta la superficie del hormigón. Por reacción la punta retransmite a la masa el contragolpeo rebote que es tanto mayor cuanto más duro y compacto es el hormigón, es decir, el martillo rebota una cierta distancia, la cual se indica por una aguja en una escala graduada. La lectura de la posición de la aguja representa la medida del retroceso en porcentaje del avance del martillo.

Básicamente el proceso está constituido por una masa móvil, con una cierta energía inicial, que impacta la superficie de una masa de hormigón, produciendo una redistribución de la energía cinética inicial. Parte de la energía es absorbida como fricción mecánica en el instrumento y otra parte como energía de formación plástica del hormigón. La parte restante es restituida a la masa móvil en proporción a la energía disponible. Para tal distribución de energía es condición básica que la masa de hormigón sea prácticamente infinita con relación a la masa del percutor del aparato, lo que se da en la mayoría de las estructuras. En consecuencia, el rebote del esclerómetro

es un indicador de las propiedades del hormigón, con relación a su resistencia y grado de rigidez.

### **2.13.3. Campo de aplicación.**

Originalmente, fue propuesto como un método de ensayo para determinar la resistencia a la comprensión del hormigón, estableciendo curvas de correlación en laboratorio. Sin embargo, por los diferentes factores que afectan los resultados y la dispersión que se encuentra, en la actualidad se le emplea mayormente en los siguientes campos:

- Evaluar la uniformidad (homogeneidad) del hormigón en una obra.
- Delimitar zonas de baja resistencia en las estructuras.
- Informar sobre la oportunidad para desencofrar elementos de hormigón.
- Apreciar, cuando se cuenta con antecedentes, la evolución de la resistencia de estructuras.
- Determinar niveles de calidad resistentes, cuando no se cuenta con información al respecto.
- Contribuir, conjuntamente con otros métodos no destructivos a la evaluación de las estructuras.
- Comparación de la calidad de un hormigón con otro de referencia, cuya calidad se conoce por otros medios; por ejemplo, rotura de probetas; y
- Estimación de la resistencia del hormigón "in situ".

#### **2.13.4. Características del esclerómetro del laboratorio de la UAJMS.**

Para realizar ensayos no destructivos en la superficie del hormigón endurecido con la finalidad de evaluar la resistencia de una estructura en distintos puntos.

El esclerómetro para hormigón se suministra con maleta de transporte de plástico, piedra abrasiva y manual de instrucciones.

El modelo 58-C0181/N1 incluye certificado de conformidad de calibración.

Energía del impacto: 2.207 N·m

Dimensiones con la maleta de plástico: 78 mm de diámetro x 355 mm

Peso aproximado: 1,5 kg (con maleta y piedra abrasiva)

Precisión:  $\pm 8$  Mpa.

*Figura 2.9 Esclerómetro Controls UAJMS*



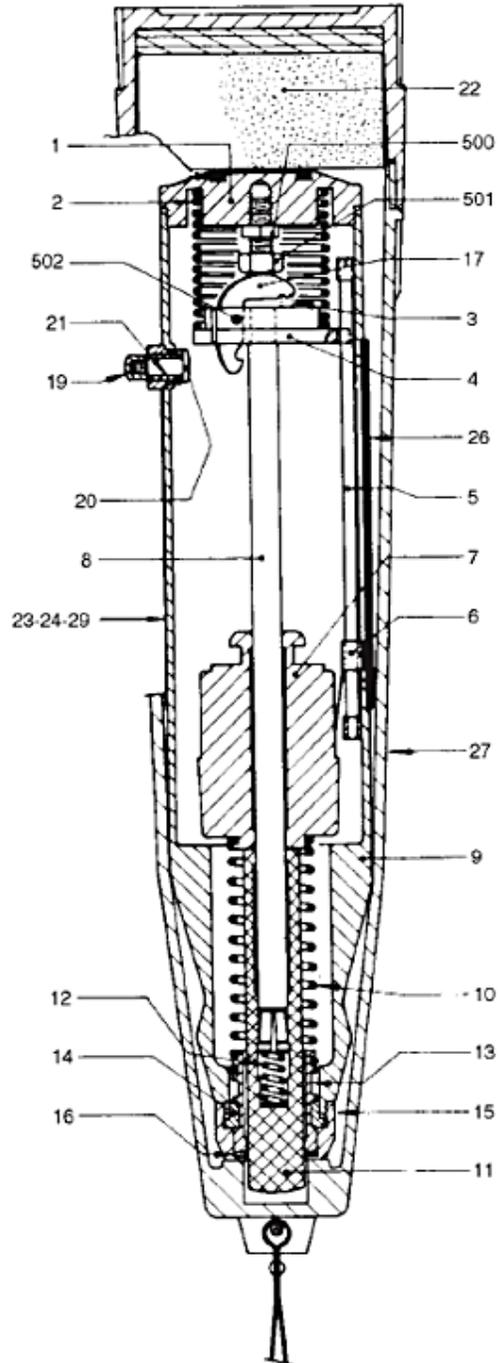
*Fuente: Controls Group*

- Partes del esclerómetro del laboratorio de la UAJMS

Figura 2.7 Corte longitudinal del esclerómetro C 181 N

### Piezas de recambio

1. Tapa.
2. Resorte de presión.
3. Resorte del cerrojo.
4. Disco.
5. Barra guía.  
ó. Placa de lectura.
7. Martillo.
8. Barra de desplazamiento.
9. Cuerpo del esclerómetro.
10. Resorte de percusión.
11. Barra de percusión.
12. Resorte amortiguador.
13. Fijación exterior del resorte.
14. Abrazadera de precisión.
15. Casquillos.
16. Junta de filtro.
17. Cerrojo.
18. Carcas del pulsador.
19. Botón pulsador.
20. Resorte del botón pulsador.
21. Piedra abrasiva.
- 23,  
24 y  
25 Etiqueta adhesiva en metal con  
escala en MPa·kg/cm<sup>2</sup> - PSI.
26. Ventana-Escala graduada.
27. Carcasa de plástico
500. Tornillo.
501. Tuerca regulable.
502. Eje del cerrojo.
504. Anillo elástico.



Fuente: Controls Group, Manual de instrucciones del esclerómetro C 181 N

### **2.13.5. Yunque de calibración.**

Los martillos de rebote deben ser sometidos a mantenimiento y verificación anualmente y siempre que haya una razón para cuestionar su operación. Verificar la operación funcional de un martillo de rebote por medio del yunque de verificación. Durante la verificación, colocar el yunque sobre un piso o losa de concreto. El fabricante del martillo debe indicar el número de rebote a ser obtenido por el martillo de rebote apropiadamente operado cuando se ensaya sobre un yunque de verificación de una dureza especificada. (ASTM c805, 2002).

Típicamente, un martillo de rebote dará un número de rebote de  $80 \pm 2$  cuando se ensaya sobre un yunque. El yunque de verificación debe ser soportado sobre una base rígida para obtener números de rebote confiable. La verificación en el yunque de calibración o verificación, no garantiza que el martillo dará lecturas repetibles en otros puntos de la escala de lectura. El martillo puede ser verificado a números de rebote más bajos, usando bloques de piedra pulida que tengan una dureza uniforme. Algunos usuarios comparan varios martillos sobre superficies de piedra o de concreto que tengan el rango de números de rebote que se presume encontrar en la obra. (ASTM c805, 2002).

### **2.13.6. Procedimiento del ensayo.**

De acuerdo a la norma ASTM c 805-02, se debe seguir el siguiente procedimiento:

Se sostiene el esclerómetro firmemente de manera que el émbolo esté perpendicular a la superficie de la prueba, luego se empuja gradualmente el instrumento hacia la superficie de la prueba hasta que el martillo impacte. Después del impacto, se mantiene la presión en el instrumento y, si es necesario, se presiona el botón al lado del instrumento para trabar el émbolo en su posición contraída. Se lee el número de rebote en la escala al número entero más cercano y se registra. Las pruebas se realizan a no menos de 25 mm [1 pulg.] entre los puntos. Se examina la impresión hecha en la superficie después de impacto, y si el impacto machaca o rompe, significa que la superficie tiene un vacío de aire, por ello se debe desechar la lectura y tomar otra.

### 2.13.7. Cálculo y validación de lecturas del ensayo.

De acuerdo a la norma ASTM c 805-02, las lecturas se procesan de la siguiente forma: Se desecha las lecturas que difieren del promedio de 10 lecturas por más de 6 unidades y se determina el promedio de las lecturas restantes. Si más de 2 lecturas difieren del promedio en 6 unidades, deseche todo el conjunto de lecturas y determinar los números de rebote en 10 nuevas ubicaciones dentro de la prueba zona.

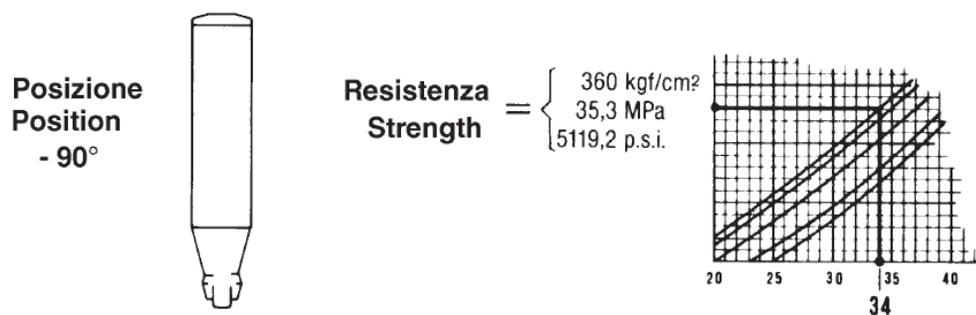
### 2.13.8. Posiciones del equipo.

Resulta evidente que, al depender el índice de la magnitud del rebote de la masa, el valor determinado se verá afectado por la posición del aparato: horizontal, inclinado hacia arriba o hacia abajo, ya que, la componente de la gravedad actuará de una manera favorable o desfavorable sobre el rebote de esa masa.

El ensayo consiste básicamente en el rebote de la masa que es impulsada por un resorte, por tanto:

- a) Si el esclerómetro se encuentra hacia abajo (posición  $-90^\circ$ ) se verá afectado desfavorablemente por la gravedad, es decir, la gravedad será una fuerza en contra de la acción de rebote generando que de un índice de rebote menor.

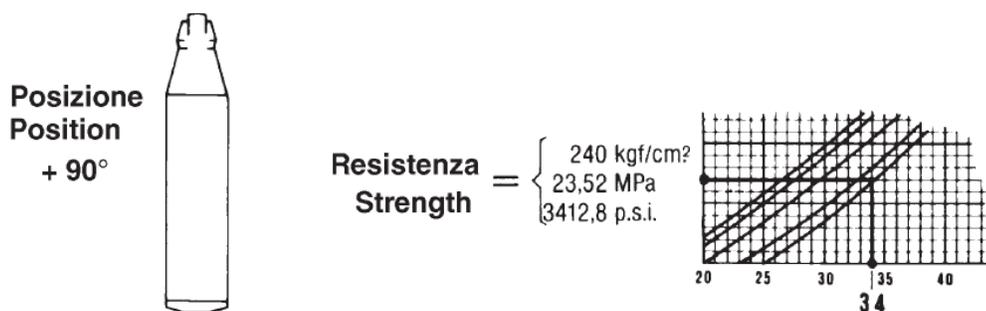
Figura 2.10 Posición ( $-90^\circ$ ) esclerómetro



Fuente: Controls Group, Manual de instrucciones del esclerómetro C 181 N

- b) Por otro lado, si el esclerómetro se encuentra hacia arriba (posición  $+90^\circ$ ) se verá favorecido por la acción de la gravedad, ya que este ayudará a que la masa regrese con mayor fuerza dando un mayor número de rebote.

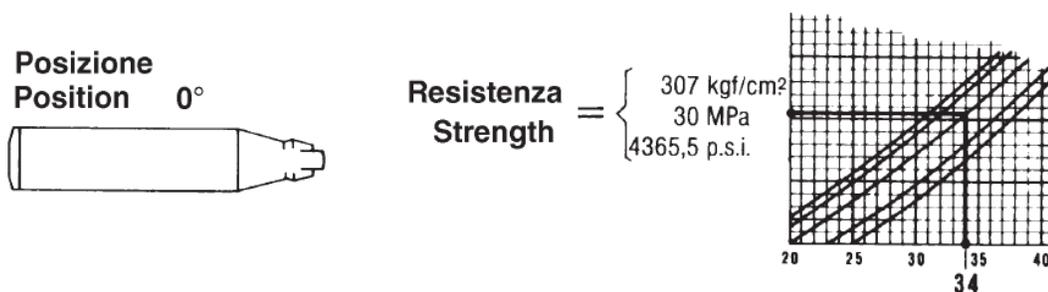
Figura 2.11 Posición (+90°) esclerómetro



Fuente: Controls Group, Manual de instrucciones del esclerómetro C 181 N

- c) Por último, si el esclerómetro se encuentra horizontal (posición 0°) estará levemente afectando por la gravedad, debido a que la gravedad no se encontrará en el mismo eje de acción de la masa.

Figura 2.12 Posición (0°) esclerómetro



Fuente: Controls Group, Manual de instrucciones del esclerómetro C 181 N

### 2.13.9. Variables que intervienen en el resultado de una determinación esclerométrica.

El ingeniero Adolfo Delibes Liniers afirma en su investigación que: del conjunto de variables que intervienen en el resultado de una determinación esclerométrica son: tipo de cemento, dosificación, edad del hormigón, acabado superficial, carbonatación. Se deduce una influencia notable en el resultado, la cual puede reducirse o atenuarse utilizando métodos que combinan estas determinaciones de la dureza superficial con otros ensayos que afectan a la totalidad de la masa del elemento.

El ingeniero Gabriel Gomez Cortes en su investigación: “Determinación del índice esclerométrico en hormigones: factores que lo afectan”, identifica una serie de factores que afectan su lectura. Entre los más notables están

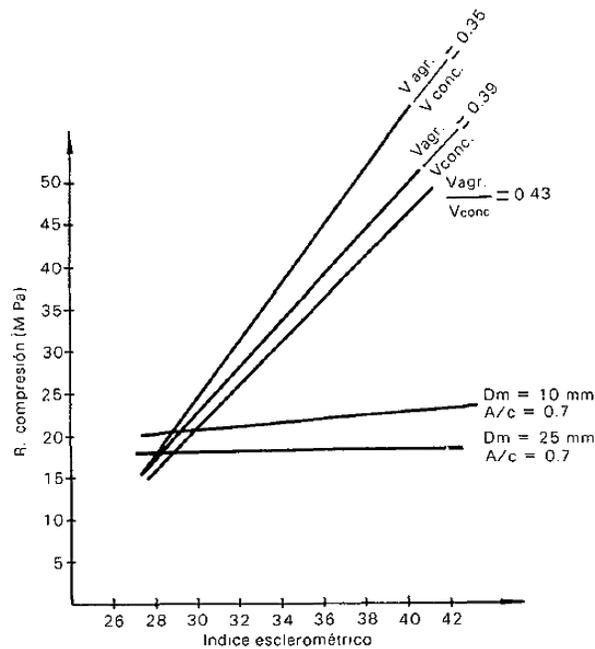
I. Tipo de cemento.

Se ha determinado que el tipo de cemento imprime una dureza superficial característica al hormigón con el confeccionado. Esas diferencias en dureza superficial (por tanto, igual en el índice esclerométrico) son mayores a medida que aumenta la resistencia a compresión del hormigón. (Gomez Cortes, 2004).

II. Contenido, tipo y tamaño máximo de agregado.

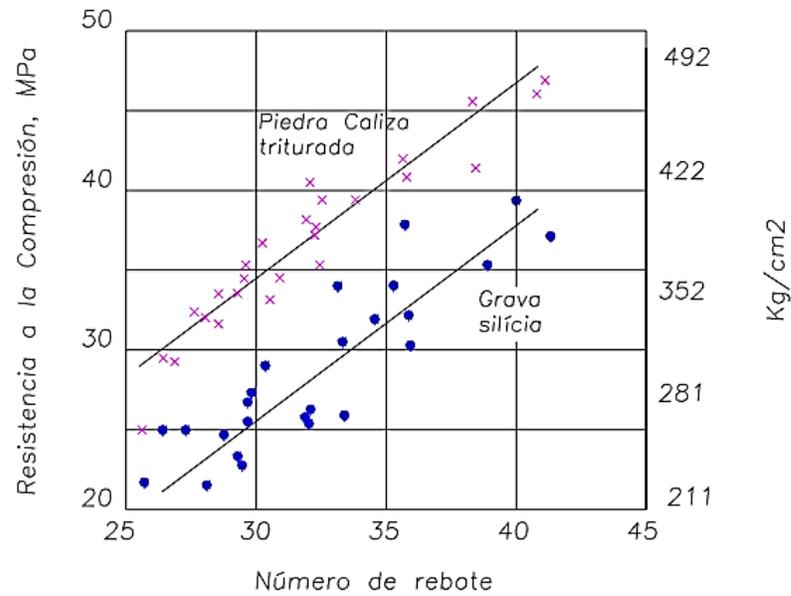
Se ha establecido que mayores contenidos de agregado por volumen de hormigón (para agregados de peso unitario normal) conducen a valores más altos de índice esclerométrico y los tamaños máximos pequeños producen valores más altos que tamaños máximos grandes. (Gomez Cortes, 2004).

Figura 2.13 Influencia del contenido y tamaño máximo del agregado sobre el índice esclerométrico



Fuente: (Gomez Cortes, 2004)

Figura 2.14 Relaciones entre resistencia a la compresión y número de rebote con distintos agregados

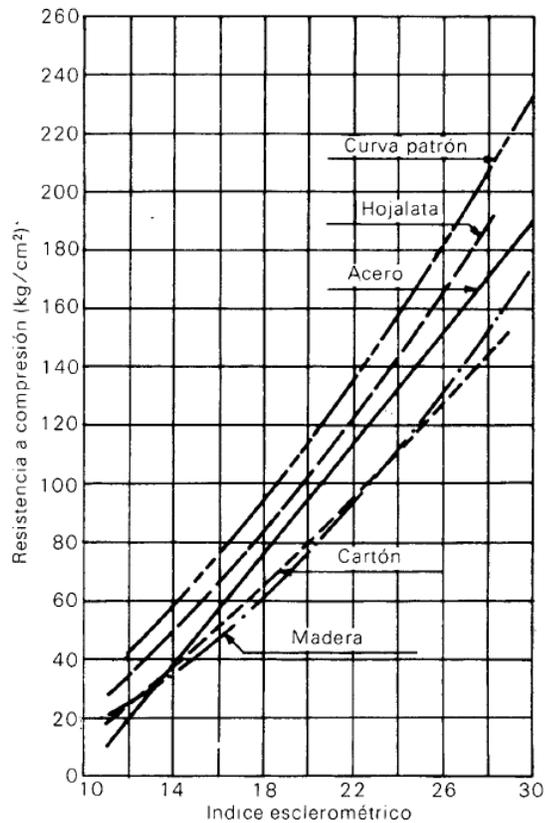


Fuente: (Universidad de Piura, Perú)

### III. Textura y forma de la superficie.

La forma de la superficie y la textura dejada por la formaleta introducen diferencias en las lecturas de índice esclerométrico. Superficies planas arrojan valores levemente superiores a las superficies curvas y las formaletas metálicas (que producen textura más lisa) llevan a valores de índice menores que las de cartón (no usadas en nuestro medio) y madera (muy frecuentes). (Gomez Cortes, 2004).

Figura 2.15 Resistencia a compresión e índice esclerométrico influencia de los moldes



Fuente: (Gomez Cortes, 2004)

#### IV. Posición del aparato.

Resulta evidente que, al depender el índice de la magnitud del rebote de la masa, el valor determinado se verá afectado por la posición del aparato: horizontal, inclinado hacia arriba o hacia abajo, ya que la componente de la gravedad actuará de una manera favorable o desfavorable sobre el rebote de esa masa. Los productores de aparatos acostumbran colocar sobre cada uno de ellos unas curvas de calibración para todas las posiciones.

## V. Carbonatación superficial del hormigón.

El hormigón presenta, con el paso del tiempo, un fenómeno de carbonatación de la superficie, que ocasiona un aumento de la dureza superficial, sin aumento de las resistencias mecánicas.

El anhídrido carbónico contenido en el aire penetra en el hormigón a través de los capilares y se combina con el hidróxido de calcio (Portlandita) disuelto en los poros del gel, formando carbonato de calcio neutro y agua:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  esto hace que el pH líquido contenido en los poros, que originalmente corresponde a valores de 12 a 13, se reduzca paulatinamente. La carbonatación progresará naturalmente del exterior al interior y su velocidad dependerá de otros factores como la humedad relativa del ambiente, contenido de  $\text{CO}_2$  del ambiente, porosidad y contenido de cemento del hormigón.

*Cuadro 2.5 Factor de corrección según la profundidad de carbonatación*

Profundidad de carbonatación (cm)	Factor de corrección
0,5	0,97
1	0,94
1,5	0,90
2	0,87
2,5	0,84
3	0,80
3,5	0,78
4	0,74
4,5	0,72
5	0,68
5,5	0,65
6 o mayor	0,62

*Fuente: (Sanjuán Fernández, 2014, pág. 2)*

Se ha establecido que la profundidad de la carbonatación varía de unos 3 mm al cabo de 30 años para condiciones favorables. A unos 20 mm en 10 años para condiciones adversas. Aproximadamente se puede establecer la profundidad de la carbonatación mediante la expresión:

$$C = K \times \sqrt{T}$$

Donde:

C= Profundidad de la carbonatación (mm)

T= Tiempo (años)

K= Parámetro que depende de condiciones límites (medio ambiente, calidad del hormigón), menor en cuanto mejor sea la calidad del hormigón y menos agresivo sea el medio ambiente y mayor en caso contrario. Varía ampliamente con valores que oscilan entre 0.5 y 10.

Según Delibes Adolfo, el parámetro *K* puede establecerse según la siguiente expresión:

*Cuadro 2.6 Parámetro de la carbonatación*

Influencia del cemento	Portland normal	Alta resistencia	Escorias 40% - 60%	Puzolánico
Valor de r(1)	1.0	0.6	1.4 – 2.2	1.7 – 1.9
Influencia del agregado	Rodado de río	Arena natural, grava ligera	Agregados livianos	Cenizas
Valor de r(2)	1.0	1.2	2.9	3.3
Influencia del aditivo	Normal	Aireantes		Plastificantes
Valor de r(3)	1.0	0.6		0.4

*Fuente: (Gomez Cortes, 2004)*

$$K = R \times \sqrt{a}$$

$$a = \sqrt{\frac{\left(\left(\frac{a}{c}\right) - 0,25\right)^2}{0,3 \times (1,15 + 3 \times (a/c))}}$$

$$R = r(1) \times r(2) \times r(3)$$

a/c = Relación agua/cemento

r(1), r(2), r(3) = factores que dependen del cemento, agregados y aditivos empleados

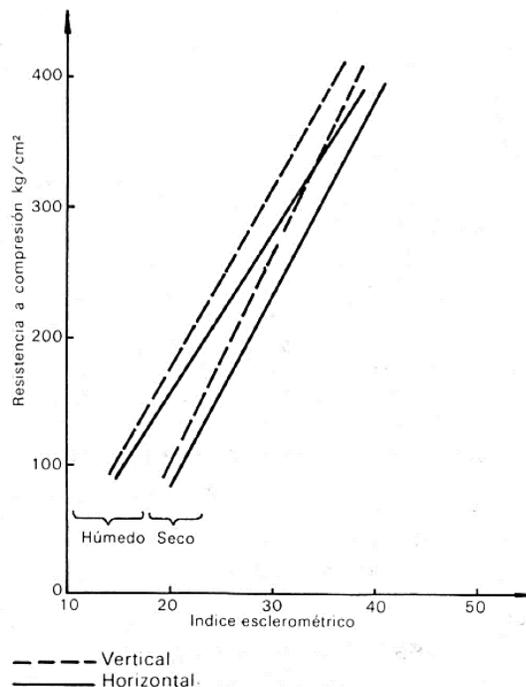
## VI. Diferentes capas de hormigón.

Al existir dos o más capas de hormigón, se crea una discontinuidad en la superficie de contacto entre ellas, que altera el valor del índice esclerométrico determinado, situación que se hace más notable, si las capas presentan valores muy diferentes. Sobra advertir que cuando el hormigón está recubierto de una capa de mortero, es necesario retirarla para efectuar la determinación del índice. (Gomez Cortes, 2004).

## VII. Condiciones de humedad de la superficie.

La presencia de agua saturando los poros superficiales del hormigón ejerce un efecto amortiguador sobre el golpe de la masa, haciendo que superficies húmedas presenten menores valores de índice que las superficies secas. (Gomez Cortes, 2004).

*Figura 2.16 Influencia de la posición del aparato y condición de humedad de la superficie en lecturas de índice esclerométrico*



*Fuente: (Gomez Cortes, 2004)*

VIII. Destreza del operario.

Se ha detectado que la destreza del operador en ejercer presión sobre el resorte, de manera suave y gradual, evitando los “impulsos”, también tiene influencia sobre los valores determinados. (Gomez Cortes, 2004).

*Cuadro 2.7 Lecturas de rebote según destreza del operario*

	Izquierda				Derecha			
	(A)	(B)	(C)	(D)	(A)	(B)	(C)	(D)
	I R	I R	I R	I R	I R	I R	I R	I R
Arriba	32 (1)	37 (8)	34 (3)	35 (6)	32 (3)	35 (8)	34 (4)	33 (4)
Centro	31 (1)	38 (8)	35 (5)	39 (8)	36 (7)	35 (7)	35 (5)	37 (10)
Abajo	32 (3)	36 (4)	36 (5)	38 (6)	36 (9)	41 (6)	37 (6)	39 (11)

I: Índice esclerométrico determinado (promedio de seis lecturas).

R: Recorrido de lecturas (mayor valor - menor valor)

(A): Laboratorista con experiencia

(B): Laboratorista sin experiencia

(C): Ingeniero con experiencia

(D): Estudiante de tesis, sin experiencia

*Fuente: (Gomez Cortes, 2004)*

**2.13.10. Correcciones de la resistencia estimada por el esclerómetro por la experiencia italiana.**

La propuesta concreta basada en la experiencia italiana emplea una correlación general y una serie de coeficientes correctores de la resistencia estimada que describimos a continuación:

- Corrección en función del tipo y categoría del cemento que varía de 0,94 a 1,00
- Corrección en función de la dosificación, que aumenta con la cantidad de cemento, desde 0,76 a 1,24
- Corrección dependiente del tipo de agregado grueso, desde 1,00 a 1,41, siendo máximo para árido rodado de naturaleza silíceo.
- Corrección dependiente de la granulometría del árido, que aumenta con la cantidad de arena fina, desde 0,91 a 1,07.
- Corrección en función del tamaño máximo del árido, disminuyendo cuando este crece. El coeficiente varía entre 0,96 y 1,09.
- Corrección dependiente del tipo de aditivos, pues algunos hacen aplicable un incremento de la resistencia hasta de 1,08 veces.

## 2.14. Estadística.

### 2.14.1. Medida de posición media aritmética.

También se la conoce directamente como media o promedio de un conjunto de  $N$  números, es una medida de tendencia central, siendo la medida de mayor uso y más conocida. Se define por:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} = \frac{\sum X}{N}$$

### 2.14.2. Medida de dispersión

#### Desviación estándar.

La desviación estándar de un conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  se define por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N}} = \sqrt{(X - \bar{X})^2}$$

#### Coefficiente de variación.

También conocido como coeficiente de dispersión, se define por:

$$(CV) = \frac{s}{\bar{X}}$$

### 2.14.3. Distribución de medidas y errores.

Se observa con frecuencia que varias medidas de la misma propiedad, bajo las mismas condiciones, poseen cierta discrepancia unas con otras, ningún instrumento es totalmente exacto, en consecuencia, toda medida lleva consigo un cierto grado de incertidumbre, debiendo expresarse en la forma:

$$x = \bar{x} \pm E_x$$

Donde  $\bar{x}$  se denomina de diversas maneras: Valor medio, valor esperado, valor central, valor más probable, promedio aritmético, esperanza matemática, etc., y  $E_x$  es el error del valor medio.

### **Valor verdadero o exacto (U).**

Se conoce como valor verdadero al que pudiera ser obtenido por una medición perfecta y por ende son de naturaleza indeterminada. Su determinación por medición en la generalidad de los casos es muy difícil y solo se conocen aproximaciones. Esto se debe a las limitaciones de los instrumentos, limitaciones en el sujeto que efectuó la medición y algunas veces a la inaccesibilidad de la medición.

- Cuando la magnitud a medir es una variable **discreta**, es posible conocer el valor verdadero, ya que en este caso la medida se obtiene por conteo, por ejemplo, número de estudiantes en una clase o número de focos producidos por cierta fábrica en un día.
- Si la variable es **continua**, diámetro de un cilindro, por ejemplo, debido a las limitaciones del instrumento de medida y a las del sujeto que efectúa la medición, no es posible conocer el valor verdadero y este solamente sirve como referencia teórica al cual tiende el valor experimental.

### **Exactitud y precisión.**

La **exactitud** señala el grado en que un valor experimental ( $x_i$ ) o un promedio ( $\bar{x}$ ) se acerca al valor verdadero (U).

La **precisión** indica el grado de concordancia entre los valores experimentales, es decir en cuanto se aproxima unas a otras.

Debe notarse que precisión y exactitud no son sinónimos, aunque muchas veces se usan indistintamente y en consecuencia incorrectamente.

#### **2.14.4. Teoría de muestras pequeñas.**

Para muestras de tamaño  $N > 30$ , llamadas muestras grandes, las distribuciones muestrales de muchos estadísticos son muy normales, mejorando la aproximación a mayor tamaño de N. Para muestras de tamaño  $N < 30$ , conocidas como muestras pequeñas, tal aproximación no es buena y empeora al disminuirse N, por lo que deben hacerse modificaciones apropiadas.

La teoría de muestras pequeñas o teoría exacta del muestreo, es el estudio de distribuciones muestrales de estadísticos para muestras pequeñas, sin embargo, los resultados que se obtienen son válidos tanto para muestras grandes como para pequeñas.

### **Distribución t de Student.**

Se define el estadístico:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$$

Se puede definir los intervalos de confianza a 95%, 99% u otros, usando el cuadro de distribución t del Anexo 13.

### **Error absoluto para una muestra menor a 30 ( $\varepsilon_a$ ).**

$$\varepsilon_a = t_{\frac{\alpha}{2}} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde “t” es la variable aleatoria para distinto nivel de confianza, “σ” es la desviación estándar y “n” es el número total de datos. (Alvarez C. & Huayta C., 2019, pág. 25)

#### **2.14.5. Relación entre dos variables.**

La relación que puede existir entre dos variables se puede clasificar de la siguiente forma:

- Dependencia casual unilateral. - Esta relación se da cuando una de las variables influye en la otra, pero no al contrario.
- Interdependencia. - Se presenta cuando la influencia entre las dos variables es recíproca. Sería en caso de dependencia bilateral.
- Dependencia indirecta. - Dos variables pueden mostrar una correlación a través de una tercera variable que influye en ellas.
- Concordancia. -Se presenta en dos variables independientes a las cuales se les determina la correlación que pueda existir.

- Covariación casual. - Cuando la correlación que se presenta entre dos variables es totalmente casual o accidental.

#### **2.14.6. Relación gráfica entre dos variables.**

La investigación de una relación entre dos variables, comienza con un intento de descubrir la forma aproximada de la relación, para lo cual se representan los datos observados en un sistema de coordenadas. Esta grafica recibe el nombre de diagrama de dispersión, el cual muestra la ubicación de los valores o puntos  $(x_i, y_i)$  de la variable bidimensional  $(x, y)$ , en un sistema de coordenadas rectangulares. En la gráfica se puede observar si existe o no una relación acentuada entre las variables  $x$  e  $y$ , y si se puede ver qué forma tiene: lineal u otra. Además, puede observarse los valores extremos que puede presentar el diagrama.

#### **2.14.7. Diagrama de dispersión.**

Es una gráfica en la que cada punto trazado representa un par de valores observados de las variables independiente y dependiente. El valor de la variable independiente “ $x$ ” se identifica respecto del eje horizontal, mientras que el valor de la variable dependiente “ $y$ ” se identifica respecto del eje vertical.

Un punto conocido se designa por  $(X_i, Y_i)$ . Al conjunto de puntos en el plano se lo llama también nube de puntos.

#### **2.14.8. Regresión.**

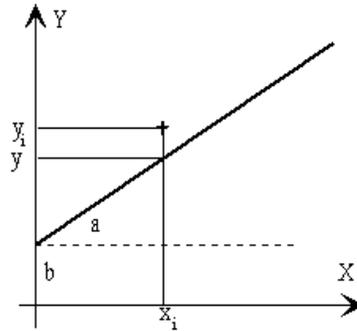
El análisis de regresión busca la forma matemática de la relación entre variables, es decir, se trata de encontrar una ecuación (relación fundamental), que para el caso de dos variables será de la forma  $Y = f(X)$ , de manera que se pueda calcular el valor de una variable de acuerdo al valor que tome la otra variable.

Los tipos de regresión son:

- a) Regresión lineal.

Si a los puntos de un diagrama de dispersión se trata de representarlos cerca de una recta en el plano real, se llama regresión lineal simple.

Figura 2.17 Regresión lineal



Fuente: (Chungara Castro, 2015)

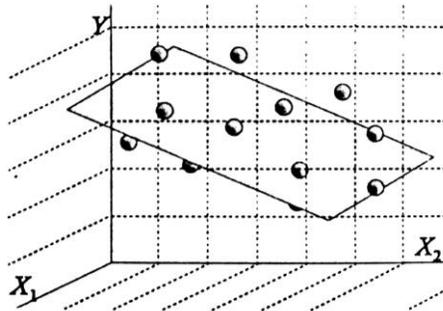
La ecuación de una recta es de la forma:  $Y = a_0 + a_1 \times X$

b) Regresión múltiple.

Cuando las variables son tres o más y se trata de expresarlas por una ecuación lineal de varias variables, se llama regresión lineal múltiple.

Para el caso de tres variables, de acuerdo del diagrama de dispersión en el espacio, se trata de hallar la ecuación de un plano, como muestra gráfica.

Figura 2.18 Regresión múltiple



Fuente: (Chungara Castro, 2015)

La ecuación a obtener en este caso será de la forma:

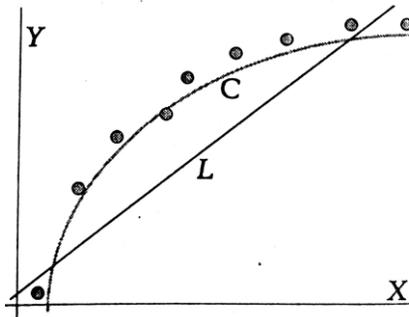
$$Y = a_0 + a_1 \times X_1 + a_2 \times X_2$$

c) Regresión no lineal.

Para el caso de que los puntos de un diagrama de dispersión se tratan de representarlos por la ecuación de una curva, se efectúa el análisis de regresión no lineal.

Por ejemplo, si un conjunto de pares de datos muestra un diagrama de dispersión como el indicado en la gráfica adjunta.

*Figura 2.19 Regresión no lineal*



*Fuente: (Chungara Castro, 2015)*

La recta (L), no está muy cercana a todos los puntos, siendo preferible insertar una curva C como mejor aproximación a todos los puntos.

Cuando se presenta un diagrama de dispersión de este tipo se dice que hay una relación no lineal.

Si se va a ajustar a una parábola (segundo grado), la ecuación debe ser de la forma:

$$Y = a_0 + a_1 \times X + a_2 \times X^2$$

d) Formas de regresión (ecuaciones de curvas de aproximación).

Otras formas de Ecuaciones generales con las cuales se puede procurar el Ajuste de curvas de un Diagrama de dispersión son:

Lineal	$Y = a_0 + a_1X$
Lineal múltiple (Plano)	$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$
Curva de grado “n”	$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n$
Hipérbola	$Y = \frac{1}{a_0 + a_1X}$
Exponencial	$Y = ae^{bx}$
Potencial	$Y = aX^b$
Logarítmica	$Y = a \ln(X) + b$

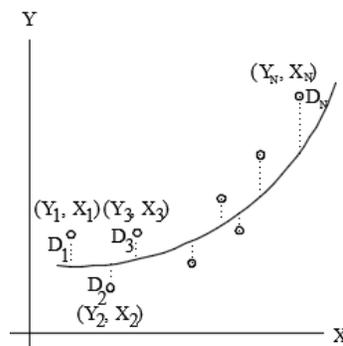
### 2.14.9. Ajuste de curva.

Cuando a partir de un conjunto de datos, se tiene un diagrama de dispersión, es decir un conjunto de puntos en el plano, se entiende por ajustar los puntos a una curva o recta, el obtener la ecuación de la curva o recta que más se aproxime a todos esos puntos.

Para ajustar a una recta o curva, se emplea el método matemático llamado de mínimos cuadrados.

A partir del diagrama de dispersión indicado en la gráfica adjunta, y asumiendo que se lo está ajustando a la curva insertada.

Figura 2.20 Ajuste de curva



Fuente: (Chungara Castro, 2015)

Los puntos del diagrama de dispersión en forma general se expresan por:  $(X_i, Y_i)$ .

Para cierto valor de  $X$ , por ejemplo,  $X_1$  entre su valor correspondiente de  $Y_1$  con respecto al valor de la curva ya obtenida existirá una diferencia  $D_1$ .

Note que algunos casos la diferencia será positiva ( $D_1, D_3$ ), en otros casos negativa ( $D_2$ ).

Una medida de la separación entre puntos y curva obtenida es:

$$S = D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + \dots + D_N^2$$

Los cuadrados hacen que las diferencias sean todas positivas. Se debe procurar que  $S$  sea lo más pequeño posible ya que ello significara una mejor aproximación. Obviamente si  $S$  es grande significara menor aproximación.

En caso ideal ( $S=0$ ) seria hallar una ecuación que contenga a todos los puntos del diagrama de dispersión.

Una curva, que se ajusta de acuerdo al criterio de que  $S$  sea más pequeño, se llama curva de mínimos cuadrados, porque se está considerando el mínimo del cuadrado de la desviación  $S$ .

Si se ajusta una recta con el criterio de que  $S$  sea lo más pequeño, se llama recta de mínimos cuadrados. (Chungara Castro, 2015).

#### **2.14.10. Medida de la fuerza de relación.**

##### **2.14.10.1. Análisis de correlación.**

Busca conocer el grado de relación entre dos variables, es decir, se trata de medir cuan relacionadas están entre si las variables.

En nuestro caso, mediante el análisis de regresión se trata de establecer una relación entre el índice de rebote del esclerómetro y la resistencia a compresión del hormigón, por otro lado, con el análisis de correlación queremos cuantificar el grado de relación entre esas dos variables.

### 2.14.10.2. Coeficiente de correlación.

El coeficiente de correlación es una medida de interdependencia de dos variables aleatorias. Cuando se establece una relación funcional entre las variables X, Y de la forma:  $Y = f(X)$ . asumiendo que, “Y” es el valor inicial y conocido de la variable dependiente, siendo  $\bar{Y}$  su media aritmética.  $Y_{Est}$  es el valor que se calcula de acuerdo a la relación funcional. Entonces se llama coeficiente de correlación a:

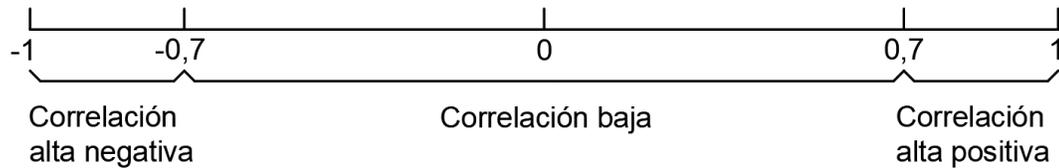
$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{Variación explicada}}{\text{Variación total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum(Y_{Est} - \bar{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

El coeficiente de correlación lineal posee las siguientes propiedades:

- Carece de unidades de medida (adimensional).
- Es invariable para transformaciones lineales (cambio de origen y escala) de las variables.
- Sólo toma valores comprendidos entre -1 y 1,  $-1 \leq r \leq 1$ .
- Cuando r esté próximo a uno, se tiene que existe una relación lineal muy fuerte entre variables.
- Cuando  $r \approx 0$ , puede afirmarse que no existe relación lineal entre ambas variables.

Usualmente se aplica la siguiente escala de “r”, para estimar una correlación.

*Figura 2.21 Escala de coeficiente de correlación*



*Fuente: (Chungara Castro, 2015)*

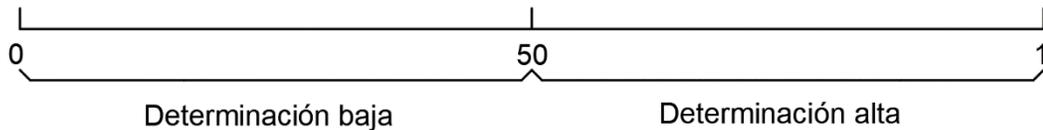
### 2.14.10.3. Coeficiente de determinación.

En primer lugar, deberá considerarse el cálculo del coeficiente de correlación al cuadrado denominado también como coeficiente de determinación, simbolizado por  $R^2$ .

El coeficiente de determinación es un número positivo que varía entre 0 y 1, permite indicar el grado de certeza con que una variable depende de la otra.

Al multiplicarse por 100 el coeficiente de determinación será un porcentaje de validez con que se afirma que una variable depende de otra.

*Figura 2.22 Escala de coeficiente de determinación*



*Fuente: (Chungara Castro, 2015)*

### 2.14.11. Coeficiente de estimación (error típico) de una regresión lineal.

Al coeficiente de estimación se lo llama también Error típico XY o error típico de estimación. Para medir el error cometido al calcular un valor de Y para un cierto valor de X, de acuerdo a una ecuación de regresión, se usa el Coeficiente de estimación, que calcula el Error típico de Y. (Chungara Castro, 2015).

Cuando Y es la variable dependiente de una ecuación de regresión, el coeficiente de estimación simple se define como:

$$S_{Y,X} = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_{est})^2}{N - 2}}$$

Donde:

Y, es el dato de inicial de esta variable.

Yest, es el valor de Y obtenido en la ecuación.

$N$ , es el número de datos de la muestra.

El coeficiente de estimación posee propiedades equivalentes a la desviación estándar.

Algunas son:

Si se trazan dos rectas paralelas, distantes en  $2 S_{yx}$ , entonces tiene una confianza del 95% de los datos.

## CAPÍTULO III

### 3. Metodología experimental.

#### 3.1. Dosificación del hormigón.

Se siguió el siguiente procedimiento para dosificar la mezcla:

*Cuadro 3.1 Procedimiento de diseño ACI-211*

<b>Procedimiento de diseño ACI-211</b>	
<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>
1	Selección del asentamiento
2	Selección del tamaño máximo del agregado
3	Estimación del contenido de aire
4	Estimación del contenido de agua de mezclado
5	Determinación de la resistencia de diseño
6	Selección de la relación agua-cemento
7	Cálculo del contenido de cemento
8	Estimación de las proporciones de agregados
9	Ajuste por humedad de los agregados
10	Ajustes a las mezclas de prueba

*Fuente: ACI-211*

Los cuadros que se utilizaron para el procedimiento de diseño de la mezcla se encuentran adjuntados en el Anexo 2.

#### **3.1.1. Caracterización de los materiales.**

Para realizar el cálculo de la dosificación ya se tenía los materiales previamente caracterizados a través de los diferentes ensayos correspondientes y con sus respectivas normas, los cuales se encuentran bien detallados y adjuntados en el Anexo 3 y 4 del presente proyecto.

- Caracterización para calibración general (agregado grueso triturado).

*Cuadro 3.2 Características de los materiales para calibración general*

<b>Características de los materiales</b>			
<b>Ensayo</b>		<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
1	Peso específico del cemento	3,15	gr/cm <sup>3</sup>
2	Módulo de finura de la arena	2,74	s/u
3	Tamaño Máximo Nominal (TMN)	0,75	pulg
4	Tamaño Máximo ( TM )	1	pulg
5	Humedad de la arena (H_a)	0,61%	s/u
6	Humedad de la grava (H_g)	0,46%	s/u
7	Peso unitario compactado de la grava	1551,71	kg/m <sup>3</sup>
8	Peso Específico de la grava ( $\gamma_g$ )	2,704	gr/cm <sup>3</sup>
9	Absorción de la grava (Ag)	1,48%	s/u
10	Peso específico de la arena ( $\gamma_a$ )	2,730	gr/cm <sup>3</sup>
11	Absorción de la arena (Aa)	1,95%	s/u

*Fuente: Propia.*

La caracterización de los materiales para la dosificación de hormigón con agregado grueso triturado y de canto rodado se encuentra detallado en el Anexo 3 y 4.

### **3.1.2. Dosificación 21 Mpa. para calibración general.**

*Cuadro 3.3 Datos iniciales de la dosificación 21 Mpa. para calibración general*

<b>Datos iniciales</b>		
Resistencia de diseño (fc)	21	Mpa.
Resistencia característica (fck)	29,5	Mpa.
Asentamiento	3	Pulg.
Relación a/c	0,49	s/u
Vol. Agregado grueso/ vol. Unitario hormigón	0,626	s/u

*Fuente: Propia.*

Cuadro 3.4 Dosificación inicial 21 Mpa. para calibración general

<b>Dosificación inicial para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>		
Requerimiento de agua (A)	188	Kg
Masa del agregado grueso	971,37	Kg
Masa del cemento	383,67	Kg
Volumen de agregado grueso	359,30	m <sup>3</sup>
Volumen del cemento	121,80	m <sup>3</sup>
Volumen de aire	1,5%	s/u
Volumen de arena	315,90	m <sup>3</sup>
Masa del agregado fino	862,50	Kg

Fuente: Propia.

Cuadro 3.5 Corrección por humedad dosificación 21Mpa. para calibración general

<b>Corrección por humedad y absorción</b>					
Proporción base		Grava	Arena	Cemento	Agua
Masa Seca (kg)		971,37	862,50	383,67	188
Volumen absoluto (m <sup>3</sup> )		0,359	0,316	0,122	0,188
Densidad neta (kg/m <sup>3</sup> )		2704	2730	3150	1000
Humedad	%	0,46%	0,61%		
	kg	4,47	5,26		9,73
Absorción	%	1,48%	1,95%		
	kg	14,38	16,79		31,17
Proporción real para 1 m <sup>3</sup> de H	kg	975,84	867,76	383,67	209,44
Proporción de mezcla		2,54	2,26	1,00	0,55
Volumen de 4 probetas (m <sup>3</sup> )		0,02	0,02	0,02	0,02
0 % de perdidas		20,69	18,40	8,14	4,44
5 % de perdidas		21,73	19,32	8,54	4,66
10 % de perdidas		22,76	20,24	8,95	4,89

Fuente: Propia.

La dosificación de 21 Mpa. para el agregado de canto rodado se encuentra en el Anexo 4 del presente documento.

### 3.1.3. Dosificación 25 Mpa. para calibración general

*Cuadro 3.6 Datos iniciales de la dosificación 25 Mpa. para calibración general*

<b>Datos iniciales</b>		
Resistencia de diseño (fc)	25	Mpa,
Resistencia característica (fck)	33,5	Mpa.
Asentamiento	3	Pulg.
Relación a/c	0,417	s/u
Vol. Agregado grueso/ vol. Unitario hormigón	0,626	s/u

*Fuente: Propia.*

*Cuadro 3.7 Dosificación inicial 25 Mpa. para calibración general*

<b>Dosificación inicial para 1 m3 de hormigón</b>		
Requerimiento de agua (A)	188	Kg
Masa del agregado grueso	971,37	Kg
Masa del cemento	450,84	Kg
Volumen de agregado grueso	359,30	m3
Volumen del cemento	143,12	m3
Volumen de aire	1,5%	s/u
Volumen de arena	294,58	m3
Masa del agregado fino	804,28	Kg

*Fuente: Propia.*

Cuadro 3.8 Corrección por humedad dosificación 25 Mpa. para calibración general

Corrección por humedad y absorción					
Proporción base		Grava	Arena	Cemento	Agua
Masa Seca (kg)		971,37	804,28	450,84	188
Volumen absoluto (m <sup>3</sup> )		0,359	0,295	0,143	0,188
Densidad neta (kg/m <sup>3</sup> )		2704	2730	3150	1000
Humedad	%	0,46%	0,61%		
	kg	4,47	4,91		9,37
Absorción	%	1,48%	1,95%		
	kg	14,38	15,66		30,04
Proporción real para 1 m <sup>3</sup> de H		kg 975,84	809,19	450,84	208,66
Proporción de mezcla		2,16	1,79	1,00	0,46
Volumen de 4 probetas (m <sup>3</sup> )		0,02	0,02	0,02	0,02
0 % de perdidas		20,69	17,16	9,56	4,42
5 % de perdidas		21,73	18,02	10,04	4,65
10 % de perdidas		22,76	18,88	10,52	4,87

Fuente: Propia.

La dosificación de 25 Mpa. para el agregado de canto rodado se encuentra en el Anexo 4 del presente documento.

### 3.1.4. Dosificación 30 Mpa. para calibración general

Cuadro 3.9 Datos iniciales de la dosificación 30 Mpa. para calibración general

Datos iniciales		
Resistencia de diseño (fc)	30	Mpa.
Resistencia característica (fck)	38,5	Mpa.
Asentamiento	0	Pulg.
Relación a/c	0,4	s/u
Vol. Agregado grueso/ vol. Unitario hormigón	0,626	s/u

Fuente: Propia.

Cuadro 3.10 Dosificación inicial 30 Mpa. para calibración general

Dosificación inicial para 1 m3 de hormigón		
Requerimiento de agua (A)	171	Kg
Masa del agregado grueso	971,37	Kg
Masa del cemento	427,50	Kg
Volumen de agregado grueso	359,30	m3
Volumen del cemento	135,71	m3
Volumen de aire	1,5%	s/u
Volumen de arena	318,99	m3
Masa del agregado fino	870,93	Kg
Aditivo Viscocrete	4,28	Kg

Fuente: Propia.

Cuadro 3.11 Corrección por humedad dosificación 30 Mpa. para calibración general

Corrección por humedad y absorción						
Proporción base		Grava	Arena	Cemento	Agua	Aditivo
Masa Seca (kg)		971,37	870,93	427,50	171	4,275
Volumen absoluto (m <sup>3</sup> )		0,359	0,319	0,136	0,171	
Densidad neta (kg/m <sup>3</sup> )		2704	2730	3150	1000	
Humedad	%	0,46%	0,61%			
	kg	4,47	5,31		9,78	
Absorción	%	1,48%	1,95%			
	kg	14,38	16,96		31,33	
Proporción real para 1 m <sup>3</sup> de H (kg)		975,84	876,24	427,50	192,55	4,275
Proporción de mezcla		2,28	2,05	1,00	0,45	
Volumen de 4 probetas (m <sup>3</sup> )		0,02	0,02	0,02	0,02	
0 % de pérdidas		20,69	18,58	9,07	4,08	0,091
5 % de pérdidas		21,73	19,51	9,52	4,29	0,095
10 % de pérdidas		22,76	20,44	9,97	4,49	0,100

Fuente: Propia.

Se usó un aditivo plastificante Viscocrete al 1% del peso del cemento.

La dosificación de 30 Mpa. para el agregado de canto rodado se encuentra en el Anexo 4 del presente documento.

### 3.2. Elaboración de probetas de hormigón y curado.

Se elaboró la mezcla con ayuda de una hormigonera siguiendo las recomendaciones del laboratorio de hormigón y se realizó la prueba de revenimiento a través del cono de Abrams para verificar que cumpla el asentamiento del hormigón con respecto a la dosificación. En el Anexo 10 se muestran fotografías de lo explicado.

Las probetas se elaboraron aplicando el procedimiento recomendado por el laboratorio expuesto en la teoría en el apartado 2.8. A las 24 horas de elaboradas las probetas, se procede a desmoldar, rotular y se las somete a curado por sumersión hasta un día (24

horas) antes de ser ensayado, ya que la humedad genera variación en los resultados de la esclerometría. En el Anexo 10 se muestran fotografías de lo explicado.

Muestra.

Para la calibración general se elaboraron 252 probetas en total de dosificación 21, 25 y 30 Mpa, sometidas a ensayo a edades de 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28 días. El hormigón fue confeccionado con agregado grueso triturado, en el apartado 2.2.2.1 de este documento se indica la procedencia del agregado y en el Anexo 3 la caracterización del mismo.

Para estimar la variación por posición entre 0° y -90° se elaboraron 24 probetas, de dosificación de 21 Mpa, sometidas a ensayo a una edad de 28 días.

Para estimar la variación por tipo de agregado grueso se elaboraron 120 probetas confeccionadas con agregado grueso de canto rodado de dosificación 21, 25 y 30 Mpa, sometidas a ensayo a edades de 3, 7, 14 y 28 días. En el apartado 2.2.2.2 de este documento se indica la procedencia del agregado y en el Anexo 4 la caracterización del mismo.

### **3.3. Ensayo esclerométrico y de resistencia a compresión en probetas (Calibración general-agregado triturado).**

Se aplicó el ensayo esclerométrico en una cara de la probeta, en posición -90°, analizando 16 puntos, separados a un poco más de una pulgada, cumpliendo como indica la norma ASTM c 805. Se aplicó el ensayo de esclerometría y de resistencia a compresión en probetas de dosificación 21, 25 y 30 Mpa. a edades de 3, 5, 7, 10, 14, 21 y 28. Se elaboraron 12 probetas para cada respectiva edad y dosificación con agregado grueso triturado, en total son 252 probetas ensayadas. Se utilizó el agregado grueso triturado para la calibración general del equipo, debido a que este tipo de agregado se usa más en nuestro medio y la tendencia en el mundo es a usar más este tipo de agregado. Las planillas completas de los datos levantados en laboratorio y el procesamiento estadístico de los mismos se encuentran en el Anexo 5.

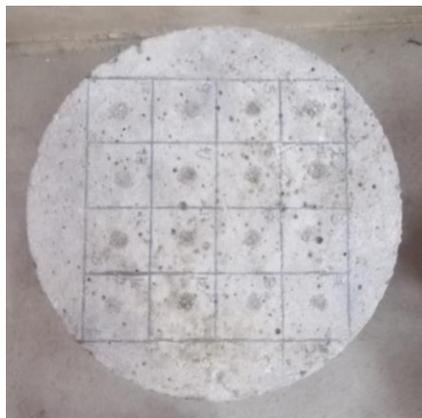
La prensa electrónica del laboratorio de hormigón, utilizada para el ensayo de rotura a compresión de las probetas, tiene el número de serie 13001079 y su respectivo informe de calibración se encuentra en el apartado Anexo 14.

*Figura 3.1 Planilla de recolección de datos esclerometría en probetas*

<b>PROBETA:</b>	<b>1 - E3 - TR</b>	<b>DOSIFICACIÓN</b>	<b>21 [Mpa]</b>
<b>OPERADOR:</b>	AGUSTIN ROMERO GUTIERREZ	<b>NORMA:</b>	ASTM C 805
<b>DATOS TÉCNICOS:</b>			
Fecha de vaciado:	2/9/2019	Edad del hormigón:	3 días
Fecha ensayo:	5/9/2019	Ángulo de ensayo:	-90 °
Procedencia agregado:	Camacho	Tipo de agregado grueso:	Triturado
<b>LECTURAS DE CAMPO</b>		<b>LECTURAS PROCESADAS</b>	
23	22	21	22
22	22	22	25
21	23	22	25
21	21	25	21
Promedio lecturas:	22	Valor promedio de rebote (R):	22,38
		Desviación estándar:	1,45
<b>Resistencia de la Esclerometria sin calibrar:</b>		17,67 [MPa]	
<b>Resistencia a compresión en prensa:</b>		9,20 [MPa]	

*Fuente: Propia.*

*Figura 3.2 Puntos de análisis con esclerómetro en las probetas*



*Fuente: Propia.*

### 3.4. Análisis de los datos y estadística descriptiva.

Con ayuda del software Excel se computó del conjunto de 16 lecturas por probeta un valor medio, desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) se calcula dividiendo la desviación estándar por la media del conjunto de datos por cien. Se realizan los mismos cálculos para el resto de las probetas.

Figura 3.3 Procesamiento estadístico de las lecturas del esclerómetro

DATOS		ESCLEROMETRIA ASTM C805																				
N°	HORMIGÓN	Angulo de ensayo	LECTURAS DE CAMPO																Rebote medio X̄	DESV. s	t de Student t <sub>α</sub> 95%	CV %
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
1		-90°	23	22	21	22	22	22	22	25	21	23	22	25	21	21	25	21	22,38	1,45	0,78	6,50
2		-90°	24	24	22	25	26	22	21	20	24	24	22	22	24	25	21	24	23,13	1,71	0,91	7,39
3	Edad del H° : 3 Días Dosificación: 21 MPa	-90°	21	23	23	24	24	24	24	24	22	20	25	21	22	24	24	23	23,00	1,41	0,75	6,15
4			25	23	25	23	23	23	24	23	20	23	24	21	22	20	22	22	22,69	1,49	0,80	6,58
5			21	21	20	21	24	20	19	23	24	21	24	23	21	22	20	23	21,69	1,62	0,86	7,48
6			24	20	20	20	20	24	24	24	20	20	23	21	23	24	23	21	21,94	1,81	0,96	8,23
7			20	22	22	20	21	23	21	20	24	25	24	21	26	20	21	20	21,88	1,96	1,05	8,97
8			24	22	22	23	25	21	20	23	21	23	23	21	24	20	24	25	22,56	1,63	0,87	7,23
9			25	22	23	22	21	21	21	22	20	20	24	21	25	23	22	20	22,00	1,63	0,87	7,42
10			21	21	25	25	22	23	22	23	21	22	22	24	21	25	24	21	22,63	1,54	0,82	6,82
11			22	26	21	25	21	26	21	21	24	23	25	21	21	22	23	21	22,69	1,92	1,02	8,47
12			22	25	20	21	20	25	21	24	22	22	24	21	21	23	24	21	22,25	1,69	0,90	7,61

Fuente: Propia.

Se calculó un intervalo de confianza al 95%, a través de la distribución t de Student (Cuadro en el Anexo 13) para muestras pequeñas (N<30), se calculó el error absoluto de la siguiente manera:

$$\varepsilon_a = t_{\alpha/2} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde “t<sub>α/2</sub>” es la variable aleatoria para distinto nivel de confianza, “σ” es la desviación estándar y “n” es el número total de datos.

El valor t<sub>α/2</sub>, también llamado valor crítico, se obtiene del cuadro de valores percentiles de la distribución t de Student, que se encuentra en el Anexo 13, según el grado de libertad y el nivel de confianza deseado.

El grado de libertad viene dado por:  $\nu = N - 1$

Siendo  $N = 16$  datos tenemos que:  $\nu = 16 - 1 = 15$

Se desea un nivel de confianza del 95%.

Por tanto, según el cuadro de valores percentiles de la distribución t, tenemos que:

$$t_{\frac{\alpha}{2}} = 2,131$$

Entonces para el primer conjunto de datos de la probeta 1-Edad 3 días- dosificación 21Mpa, el error absoluto es:

$$\varepsilon_a = \pm 2,131 \times \frac{1,45}{\sqrt{16}} = \pm 0,78$$

De igual manera se calcula para el resto de conjunto de datos de las probetas.

Las planillas completas de los datos levantados en laboratorio, el procesamiento estadístico de los mismos y la validación de datos se encuentran en el Anexo 5.

Validación de los datos. (Criterio ASTM c805).

De acuerdo a la norma ASTM c 805-02, las lecturas se procesan de la siguiente forma:

Se desecha las lecturas que difieren del promedio de 10 lecturas por más de 6 unidades y se determina el promedio de las lecturas restantes. Si más de 2 lecturas (20% de lecturas) difieren del promedio en 6 unidades, deseche todo el conjunto de lecturas y determinar los números de rebote en 10 nuevas ubicaciones dentro de la prueba zona.

Para nuestro caso tenemos 16 lecturas, por tanto, 3 lecturas serían aproximadamente el 20 %.

La validación de datos y la media de los mismos por el criterio de la norma ASTM c805 se encuentra en el Anexo 5.

Los siguientes cuadros muestran la estadística descriptiva general de todos los datos levantados en laboratorio.

*Cuadro 3.12 Estadística descriptiva de los datos (edad 3-7) calibración general*

<b>Estadística descriptiva (edad 3-7)</b>			
Cantidad de probetas	108		u.
Rebote medio	26,16		adim.
Min/máx. rebote	19	-	41 adim.
Media desviación estándar	2,25		adim.
Min/máx. desviación estándar	1,11	-	4,54 adim.
Media de coeficiente de variación	8,49		%
Min/máx. coeficiente de variación	4,23	-	15,10 %
Resistencia a compresión media	15,43		Mpa.
Min/máx. Resistencia a compresión	9,20	-	23,85 Mpa.

*Fuente: Propia.*

*Cuadro 3.13 Estadística descriptiva de los datos (edad 7-28) calibración general*

<b>Estadística descriptiva (edad 7-28)</b>			
Cantidad de probetas	144		u.
Rebote medio	32,17		adim.
Min/máx. rebote	17	-	50 adim.
Media desviación estándar	3,29		adim.
Min/máx. desviación estándar	1,19	-	5,35 adim.
Media de coeficiente de variación	10,26		%
Min/máx. coeficiente de variación	4,32	-	15,61 %
Resistencia a compresión media	22,70		Mpa.
Min/máx. Resistencia a compresión	15,55	-	32,09 Mpa.

*Fuente: Propia.*

Los resultados de la estadística descriptiva de los datos procesados de esta investigación son similares a los encontrados en diferentes estudios de diversos autores expuestos en la norma ACI 228.1R 03.

A continuación, se muestran cuadros resumen de medias validadas por la norma ASTM c805 para la regresión.

Cuadro 3.14 Resumen de datos calibración general 21 Mpa edad 3 a 7

Probetas agregado triturado dosificación 21 Mpa.						
Edad (Días)	3		5		7	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)
1	22,38	9,20	22,69	12,19	28,38	15,34
2	23,13	10,00	24,25	13,25	26,19	14,45
3	23,00	9,62	23,56	12,79	25,81	14,34
4	22,69	9,50	23,06	12,49	24,44	14,88
5	21,69	9,37	23,38	12,52	28,25	15,21
6	21,94	9,87	23,81	13,10	29,19	15,28
7	21,88	9,33	23,31	13,00	27,25	15,80
8	22,56	10,00	23,44	13,08	25,63	14,74
9	22,00	10,14	22,56	11,90	26,88	15,74
10	22,63	9,85	22,81	12,56	26,33	15,46
11	22,69	9,86	23,00	12,87	23,93	14,47
12	22,25	10,17	22,56	12,13	25,25	14,99
<b>Prom.</b>	22,40	9,74	23,20	12,66	26,46	15,06

Fuente: Propia.

Cuadro 3.15 Resumen de datos calibración general 21 Mpa edad 10 a 28

Probetas agregado triturado dosificación 21 Mpa.								
Edad (Días)	10		14		21		28	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)						
1	26,74	16,85	27,06	16,85	29,14	18,44	29,79	22,40
2	28,17	15,87	28,43	18,45	28,75	20,01	30,07	21,28
3	27,13	15,96	29,38	17,40	28,44	20,12	29,33	20,38
4	26,59	16,02	28,25	17,68	29,19	18,59	33,47	20,94
5	26,38	16,10	27,60	17,42	29,75	19,36	28,53	22,35
6	26,97	16,53	29,71	18,67	29,38	19,44	30,64	22,39
7	25,26	16,84	29,29	16,98	29,06	18,99	30,81	21,58
8	26,75	16,23	27,87	18,52	28,44	19,17	31,23	20,54
9	27,06	16,97	27,38	18,55	27,47	19,30	31,36	20,39
10	28,60	17,27	27,43	17,68	28,75	20,16	32,00	22,05
11	27,17	15,55	29,07	17,98	27,94	20,35	32,00	20,86
12	27,04	16,79	28,86	16,82	29,44	18,76	29,27	21,08
<b>Prom.</b>	26,99	16,42	28,36	17,75	28,81	19,39	30,71	21,35

Fuente: Propia.

Cuadro 3.16 Resumen de datos calibración general 25 Mpa edad 3 a 7

Probetas agregado triturado dosificación 25 Mpa.						
Edad (Días)	3		5		7	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)
1	23,56	11,02	23,94	14,88	27,43	16,82
2	23,06	11,34	24,00	14,72	26,46	17,87
3	23,38	10,89	23,69	15,81	26,75	18,42
4	22,81	11,14	22,88	15,28	27,93	17,00
5	24,31	11,59	23,13	15,41	27,06	17,75
6	23,44	11,47	23,88	15,89	28,44	17,89
7	24,56	10,95	24,69	15,74	29,80	17,45
8	21,81	11,00	25,94	16,02	30,93	17,22
9	24,00	11,78	26,81	16,18	29,17	16,99
10	23,56	11,21	22,94	15,82	29,07	17,56
11	23,81	11,56	24,00	14,75	30,38	18,54
12	22,75	10,80	23,63	14,87	26,07	18,42
<b>Prom.</b>	23,42	11,23	24,13	15,45	28,29	17,66

Fuente: Propia.

Cuadro 3.17 Resumen de datos calibración general 25 Mpa edad 10 a 28

Probetas agregado triturado dosificación 25 Mpa.								
Edad (Días)	10		14		21		28	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)						
1	31,19	18,84	30,20	20,52	32,36	22,64	34,93	25,56
2	27,53	18,52	29,00	20,64	32,54	24,62	33,27	25,20
3	28,50	19,90	30,38	21,17	31,36	23,35	32,57	25,10
4	30,84	19,63	32,27	22,50	32,13	22,22	31,69	25,45
5	27,63	18,69	29,33	20,77	34,86	22,87	34,85	23,89
6	28,00	18,47	29,06	22,64	31,93	23,85	36,00	23,84
7	26,94	18,55	31,69	22,49	34,25	24,08	35,43	26,05
8	28,25	19,27	33,47	22,08	34,13	24,36	32,63	25,47
9	28,69	18,73	32,33	20,87	32,19	24,12	34,69	24,77
10	28,53	19,24	31,47	21,04	32,07	22,47	34,87	24,21
11	28,78	19,08	30,53	21,89	33,53	24,50	34,46	24,78
12	27,56	18,83	31,40	21,95	32,57	24,07	33,06	25,18
<b>Prom.</b>	28,54	18,98	30,93	21,55	32,83	23,60	34,04	24,96

Fuente: Propia.

Cuadro 3.18 Resumen de datos calibración general 30 Mpa edad 3 a 7

Probetas agregado triturado dosificación 30 Mpa.						
Edad (Días)	3		5		7	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)
1	25,29	15,60	29,07	20,46	28,79	23,22
2	25,86	15,27	31,21	20,52	30,00	22,08
3	24,86	15,06	27,38	19,65	32,33	22,25
4	23,33	13,28	30,69	19,30	29,63	22,00
5	28,67	15,44	28,86	19,87	33,38	23,85
6	23,50	14,29	30,25	20,04	30,81	22,40
7	28,33	14,41	31,06	20,02	31,64	22,94
8	26,73	14,52	30,44	18,84	31,07	21,85
9	26,47	15,21	31,07	19,47	29,87	22,97
10	24,25	14,16	29,13	18,94	30,53	21,50
11	27,13	15,69	30,27	20,55	32,83	23,42
12	26,06	14,71	30,21	18,67	31,38	22,32
<b>Prom.</b>	25,87	14,80	29,97	19,69	31,02	22,57

Fuente: Propia.

Cuadro 3.19 Resumen de datos calibración general 30 Mpa edad 10 a 28

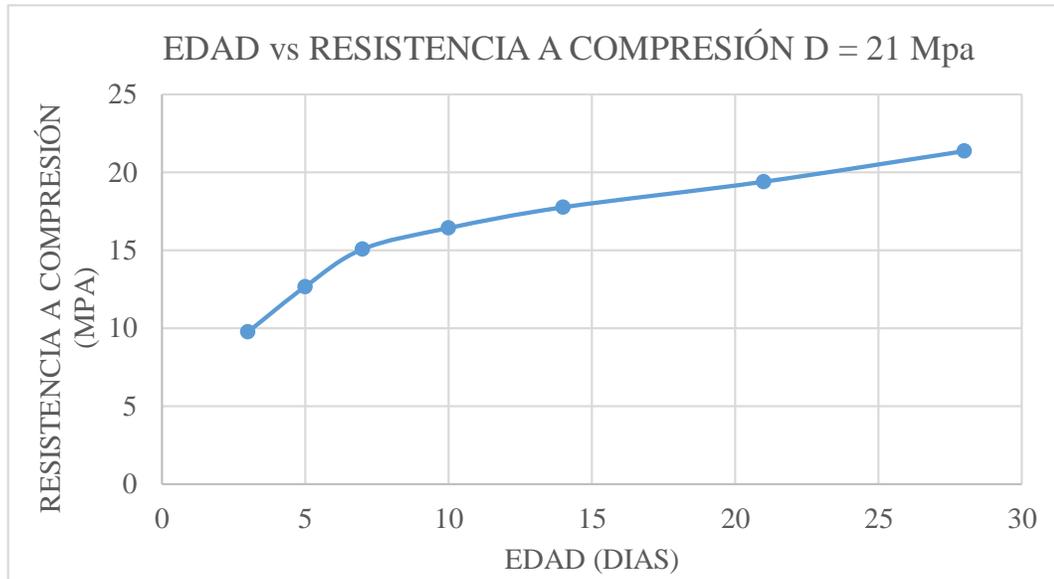
Probetas agregado triturado dosificación 30 Mpa								
Edad (Días)	10		14		21		28	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)						
1	32,21	24,52	34,25	25,47	38,44	29,52	40,44	29,89
2	33,44	22,27	33,38	27,06	39,00	29,26	38,40	30,43
3	32,63	23,51	33,00	27,12	37,13	28,81	38,20	29,07
4	33,17	23,47	35,31	26,84	35,88	27,08	38,67	29,97
5	34,93	23,92	34,57	26,24	37,29	27,59	38,46	30,69
6	33,27	22,44	36,50	26,91	35,47	28,44	39,56	30,20
7	31,57	22,56	35,53	26,34	37,29	28,88	38,21	30,80
8	32,10	24,54	35,21	25,41	39,67	28,72	41,00	32,09
9	31,79	23,88	34,31	25,55	37,94	27,20	37,93	29,87
10	33,30	24,21	34,87	25,98	37,29	27,63	40,13	30,14
11	34,84	24,56	34,64	25,06	37,27	27,04	40,73	30,59
12	32,29	24,70	34,19	24,64	38,71	28,20	39,87	31,83
<b>Prom.</b>	32,96	23,72	34,65	26,05	37,61	28,20	39,30	30,46

Fuente: Propia.

### 3.5. Análisis de la resistencia a compresión y dureza superficial en función de la edad del hormigón.

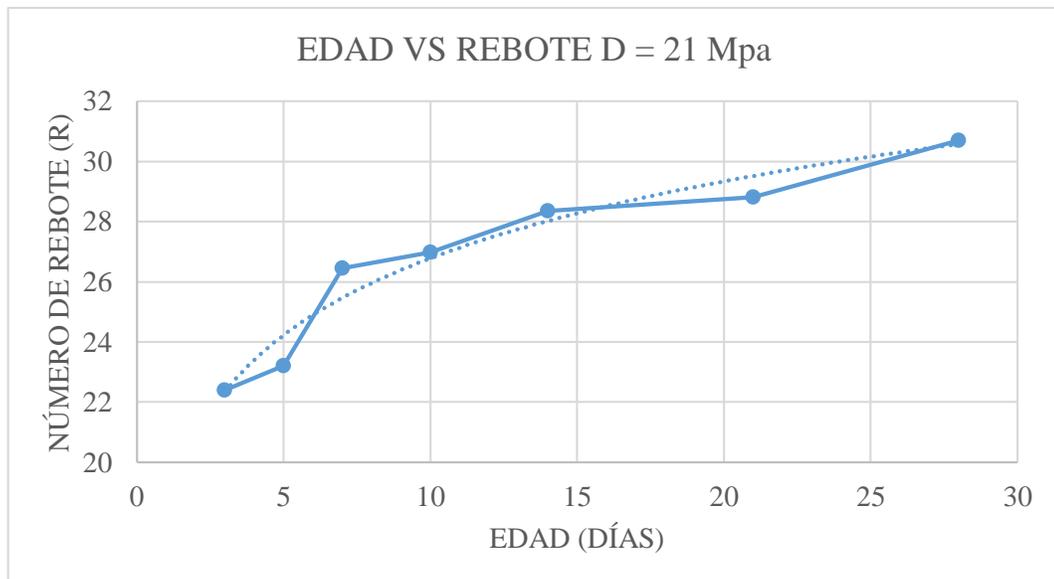
Con los datos de número de rebote promedio, resistencia a compresión promedio y edad de las probetas, se elaboraron los siguientes gráficos:

Gráfico 3.1 Edad vs resistencia a compresión dosificación 21Mpa.



Fuente: Propia.

Gráfico 3.2 Edad vs número de rebote (R) dosificación 21 Mpa.

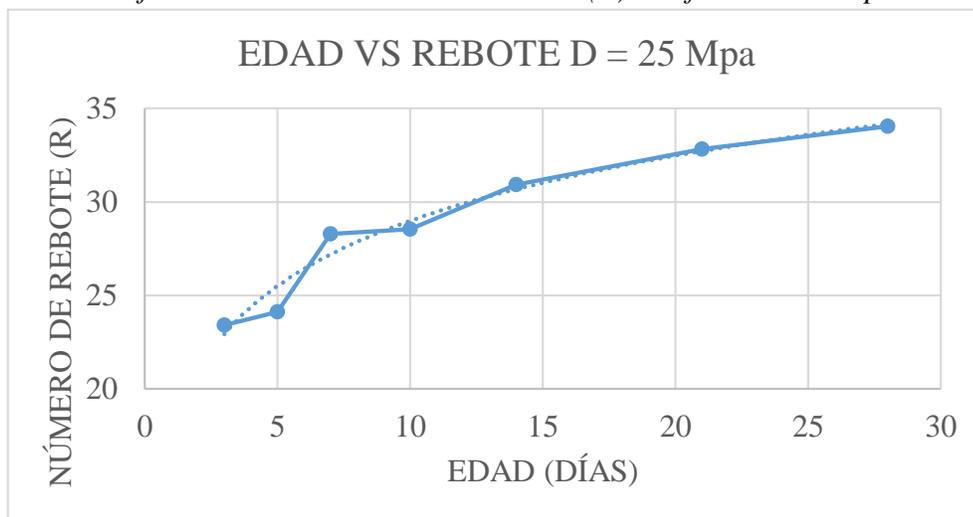


Fuente: Propia.

El gráfico 3.2 es la curva de dureza superficial del hormigón a lo largo de su edad tomando en cuenta el promedio de los índices de rebote de las probetas analizadas. Se puede observar que tiene una tendencia similar a la curva de endurecimiento del hormigón (gráfico 3.1), exponiendo así la relación que se tiene entre la dureza superficial y la resistencia a compresión.

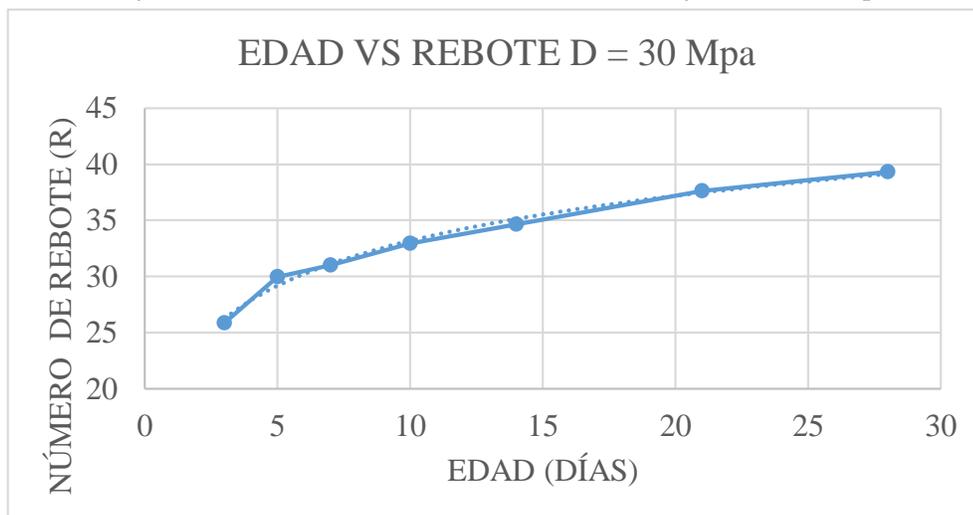
Se realizó los gráficos de edad vs rebote para las demás resistencias analizadas en el proyecto.

Gráfico 3.3 Edad vs número de rebote (R) dosificación 25 Mpa.



Fuente: Propia.

Gráfico 3.4 Edad vs número de rebote (R) dosificación 30 Mpa.



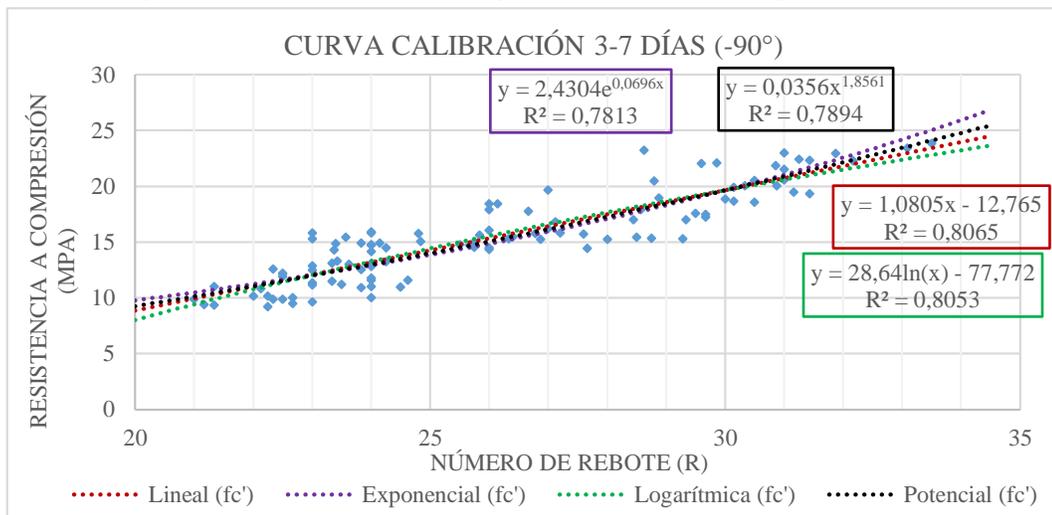
Fuente: Propia.

### 3.6. Análisis de regresión para la calibración del esclerómetro.

Se prosiguió con la elaboración de regresiones para la calibración con los datos de: número de rebote medio (variable independiente) y el valor de resistencia a compresión (variable dependiente) de cada probeta analizada. Se trazó las regresiones con ayuda del software Excel. También con ayuda del programa se obtienen las ecuaciones con sus respectivos valores de  $R^2$ ,  $r$  y error típico.

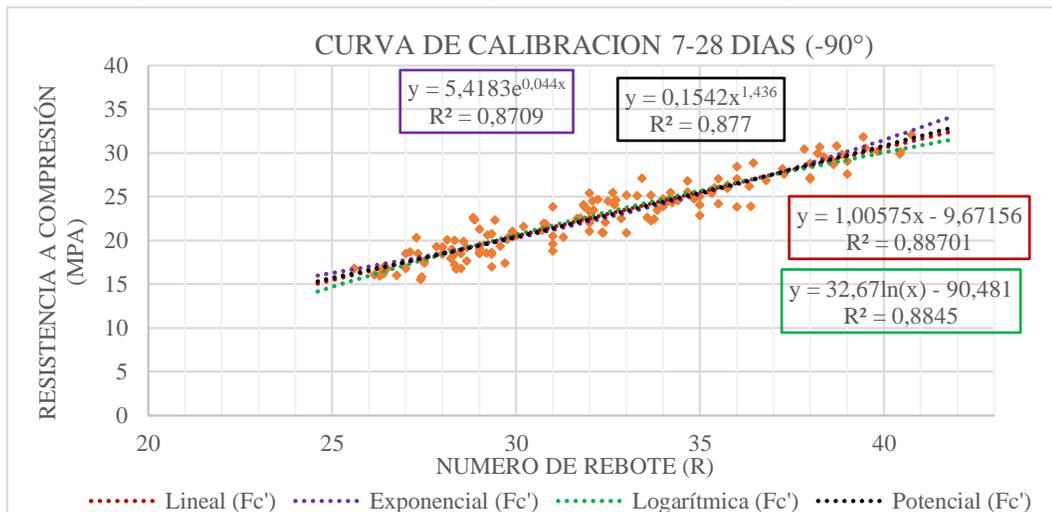
Regresiones de medias de rebote “R” recortadas al intervalo de confianza  $t$ .

Gráfico 3.5 Curva calibración general edad 3-7 días posición (-90°)



Fuente: Propia.

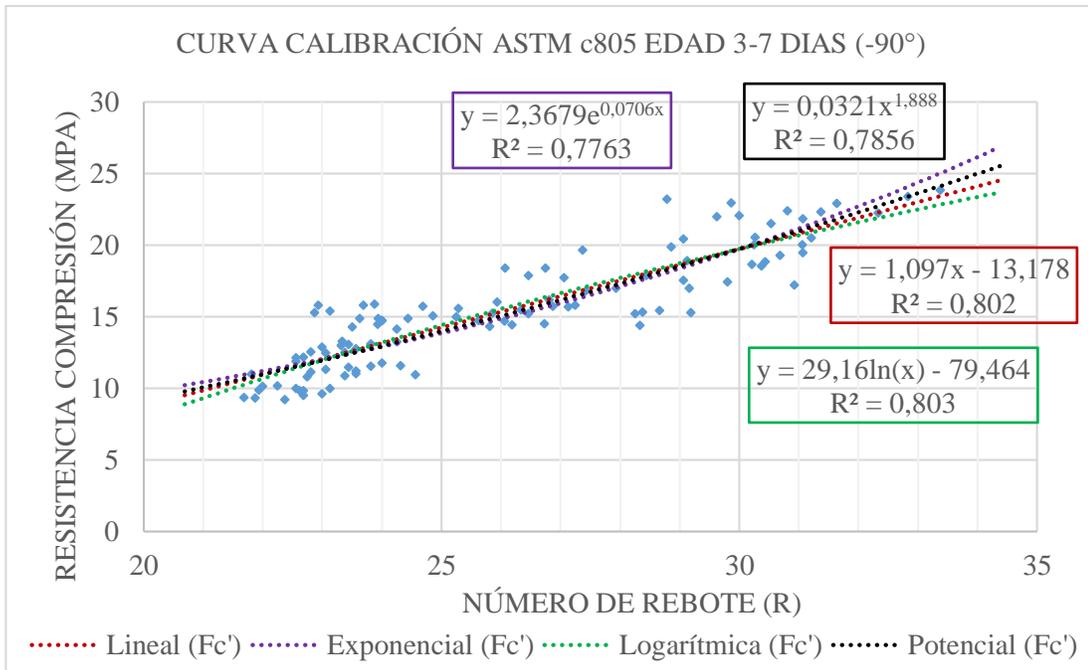
Gráfico 3.6 Curva calibración general edad 7-28 días posición (-90°)



Fuente: Propia.

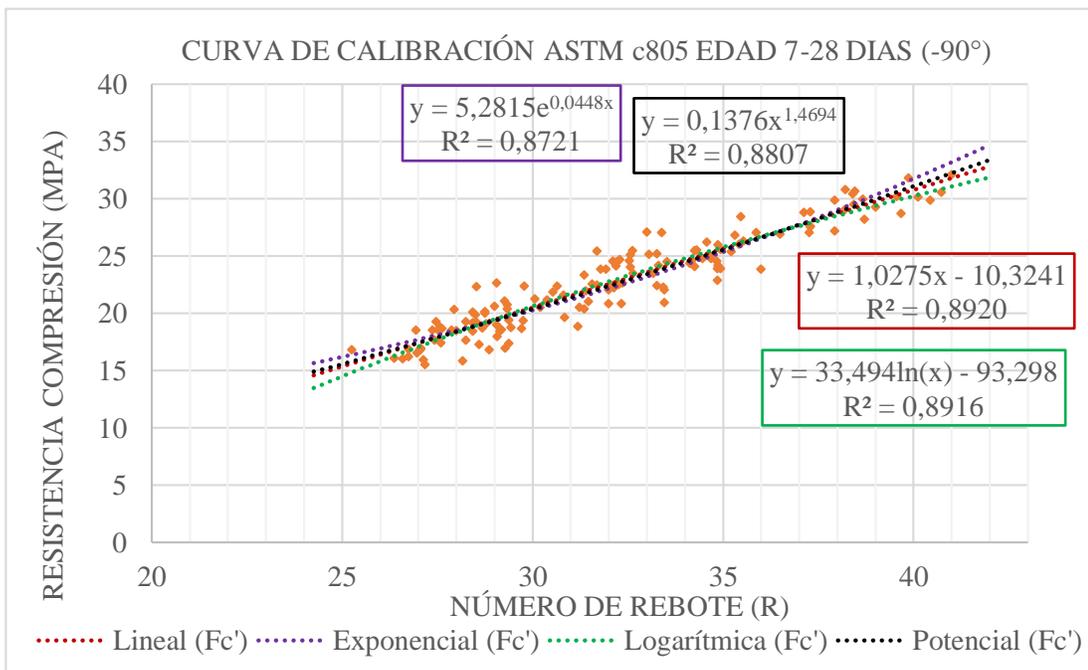
Regresiones obtenidas con medias validadas por el criterio de la norma ASTM c805.

Gráfico 3.7 Curva calibración general ASTM c805 edad 3-7 días posición (-90°)



Fuente: Propia.

Gráfico 3.8 Curva calibración general ASTM c805 edad 7-28 días posición (-90°)



Fuente: Propia.

Como se puede observar en los gráficos 3.5 a 3.8, las regresiones obtenidas con el criterio de la norma y la distribución t de Student se aproximan. En el siguiente cuadro se muestra las ecuaciones logradas de las regresiones obtenidas con el criterio de la norma ASTM c805.

*Cuadro 3.20 Ecuaciones de regresión para calibración general posición (-90°)*

Ecuaciones de calibración general posición (-90°)				
Edad	Ecuación		R <sup>2</sup>	r
3 a 7	Lineal	$Y = 1,0967 \cdot X - 13,178$	0,8020	0,896
	Exponencial	$Y = 2,3679 \cdot e^{0,0706 \cdot X}$	0,7763	0,881
	Logarítmica	$Y = 29,16 \cdot \ln(X) - 79,464$	0,8030	0,896
	Potencial	$Y = 0,0321 \cdot X^{1,888}$	0,7866	0,886
7 a 28	Lineal	$Y = 1,02746 \cdot X - 10,3241$	0,8920	0,944
	Exponencial	$Y = 5,281 \cdot e^{0,0448 \cdot X}$	0,8721	0,934
	Logarítmica	$Y = 33,494 \cdot \ln(X) - 93,298$	0,8916	0,944
	Potencial	$Y = 0,1376 \cdot X^{1,4694}$	0,8807	0,938

*Fuente: Propia.*

Se decidió separar en esos dos rangos de edades debido a que puede existir una variación del número de rebote por edad temprana del hormigón. Como se muestra en el cuadro las ecuaciones logarítmica y lineal son las que mejor se ajustan estadísticamente. Se escogió la regresión lineal debido a que la norma ACI 228 1R 03 así lo recomienda y las mismas presentan coeficientes de determinación y correlación aceptables.

*Cuadro 3.21 Ecuaciones concluyentes de calibración general posición (-90°)*

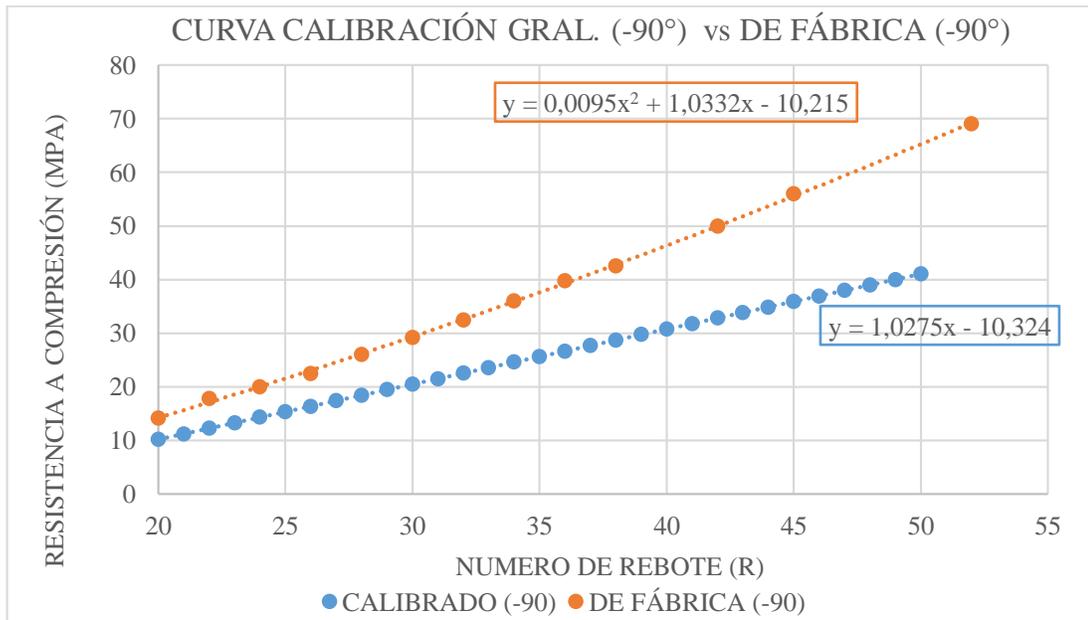
Ecuaciones de calibración general posición (-90°)					
Edad	Ecuación		Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	Coefficiente de correlación (r)	Error típico al 95% (Mpa)
3 a 7	Lineal	$Y = 1,0967 \cdot X - 13,178$	0,8020	0,896	±3,478
7 a 28	Lineal	$Y = 1,02746 \cdot X - 10,3241$	0,8920	0,944	±2,745

*Fuente: Propia.*

El cálculo de los coeficientes y error típico para la regresión lineal se encuentran detallados en el Anexo 5.

Una vez definida la curva de calibración general, al compararla gráficamente con la curva que llega en el equipo de fábrica, tenemos:

*Gráfico 3.9 Curva calibración general (-90°) vs curva de fábrica (-90°) del esclerómetro*



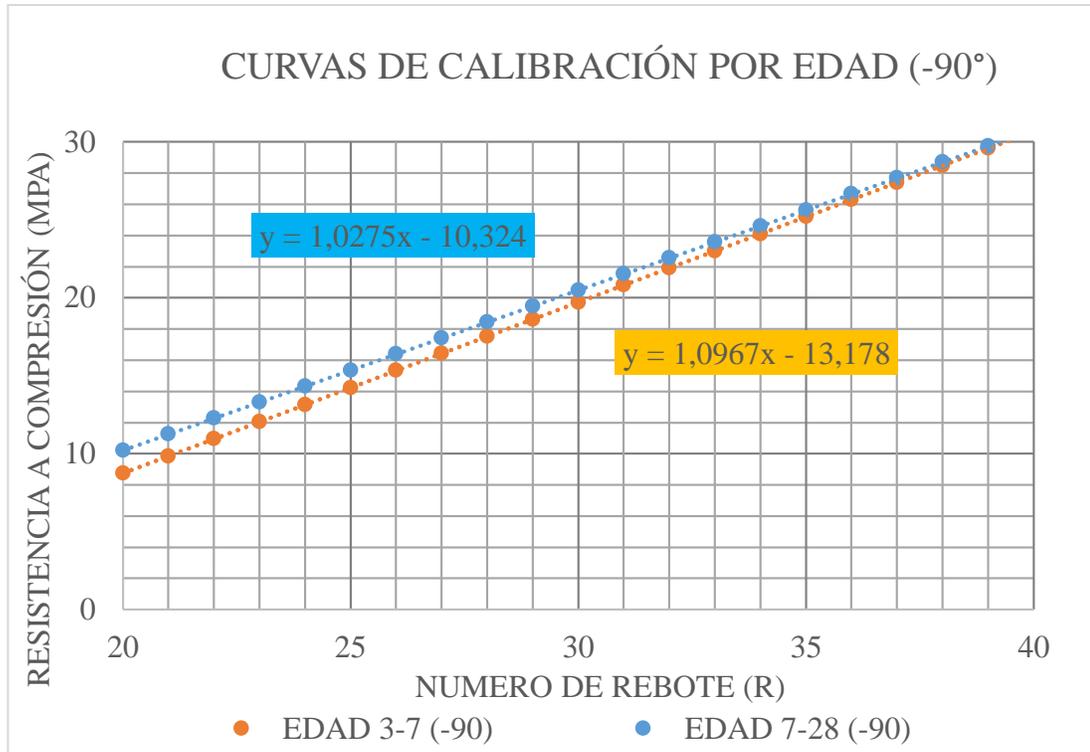
*Fuente: Propia.*

Al comparar la curva de fábrica del equipo con la encontrada en esta investigación, podemos afirmar que la primera tiene demasiado error, ya que, la curva del fabricante arroja valores muy altos de resistencia a compresión.

Por tanto, con esto podemos confirmar que es completamente necesario realizar la calibración del esclerómetro con la prensa electrónica.

### 3.7. Variación del índice esclerométrico por la edad del hormigón.

Gráfico 3.10 Curva variación número de rebote por edad



Fuente: Propia.

La edad del hormigón es un factor que influye ligeramente en los resultados de la esclerometría. Se puede evidenciar en el gráfico 3.8 que a edades tempranas en el hormigón se genera mayor dureza superficial con respecto a su resistencia a compresión, ya que, para mismos valores de número de rebote (R) en probetas de edades tempranas se tiene valores menores de resistencia a compresión que a edades mayores a 7 días.

### 3.8. Estimación de la diferencia de rebote entre posición 0° y -90°.

La variación debida a la posición está dada en todos los equipos de esclerómetro, pero se realizó una verificación en 24 probetas de la misma resistencia y edad, pero tomando en cuenta dos posiciones distintas.

Cuadro 3.22 Datos para diferencia de posiciones

Diferencia de posiciones						
Nº	Edad del Hormigón (Días)	Ángulo de ensayo	Nº de Rebote medio	Promedio	Rotura (Mpa)	Promedio Rotura
1	28	-90°	29,79	30,71	22,40	21,35
2			30,07		21,28	
3			29,33		20,38	
4			33,47		20,94	
5			28,53		22,35	
6			30,64		22,39	
7			30,81		21,58	
8			31,23		20,54	
9			31,36		20,39	
10			32,00		22,05	
11			32,00		20,86	
12			29,27		21,08	
1	28	0°	34,47	33,87	19,94	21,09
2			32,60		20,01	
3			33,94		20,70	
4			35,00		21,04	
5			32,27		22,15	
6			34,75		22,08	
7			34,67		22,05	
8			33,56		21,17	
9			34,80		20,94	
10			32,81		21,89	
11			34,73		20,96	
12			32,87		20,10	

Fuente: Propia.

Como se pudo evidenciar en la teoría, las curvas generadas por diferente posición del equipo son paralelas, por tanto, se puede generar la curva de posición (0) con la diferencia de número de rebote entre los promedios del cuadro anterior, obteniendo:

$$\text{Diferencia número de rebote} = 33,87 - 30,71 = \mathbf{3,16}$$

Con este valor se prosiguió con el trazado de la curva de calibración para la posición (0°) para ambos rangos de edades. Sumando el valor encontrado al valor de rebote de la ecuación encontrada para la posición (-90°) para ambos rangos de edades.

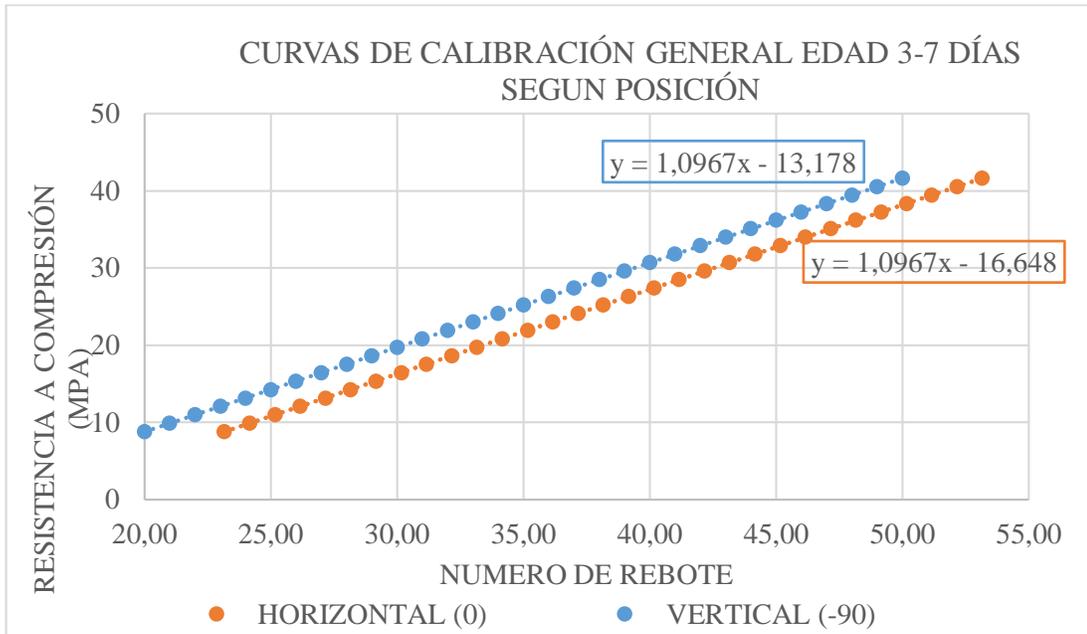
Cuadro 3.23 Valores de rebote y resistencia a compresión curvas (-90°) y (0°)

Valores de rebote y resistencia a compresión curvas (90°) y (0°)					
Edad 3-7			Edad 7-28		
N° de Rebote		Resistencia (Mpa)	N° de Rebote		Resistencia (Mpa)
(-90°)	(0°)		(-90°)	(0°)	
20	23,16	8,76	20	23,16	10,23
21	24,16	9,85	21	24,16	11,25
22	25,16	10,95	22	25,16	12,28
23	26,16	12,05	23	26,16	13,31
24	27,16	13,14	24	27,16	14,33
25	28,16	14,24	25	28,16	15,36
26	29,16	15,34	26	29,16	16,39
27	30,16	16,43	27	30,16	17,42
28	31,16	17,53	28	31,16	18,44
29	32,16	18,63	29	32,16	19,47
30	33,16	19,72	30	33,16	20,5
31	34,16	20,82	31	34,16	21,53
32	35,16	21,92	32	35,16	22,55
33	36,16	23,01	33	36,16	23,58
34	37,16	24,11	34	37,16	24,61
35	38,16	25,21	35	38,16	25,64
36	39,16	26,3	36	39,16	26,66
37	40,16	27,4	37	40,16	27,69
38	41,16	28,5	38	41,16	28,72
39	42,16	29,59	39	42,16	29,75
40	43,16	30,69	40	43,16	30,77
41	44,16	31,79	41	44,16	31,8
42	45,16	32,88	42	45,16	32,83
43	46,16	33,98	43	46,16	33,86
44	47,16	35,08	44	47,16	34,88
45	48,16	36,17	45	48,16	35,91
46	49,16	37,27	46	49,16	36,94
47	50,16	38,37	47	50,16	37,97
48	51,16	39,46	48	51,16	38,99
49	52,16	40,56	49	52,16	40,02
50	53,16	41,66	50	53,16	41,05

Fuente: Propia.

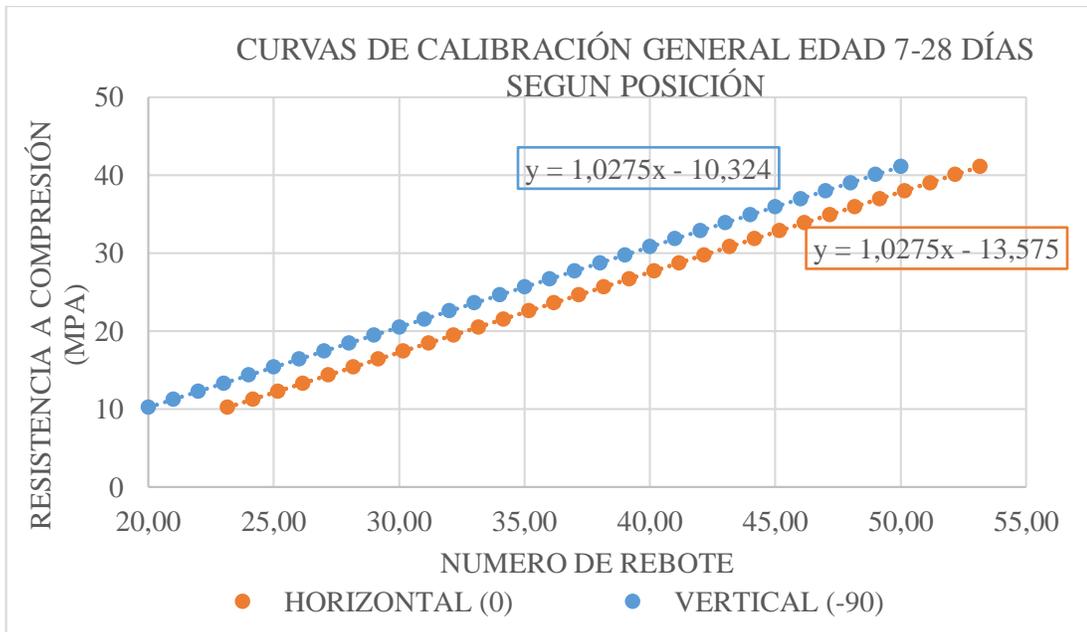
A partir de estos nuevos valores se realizó el trazado de las curvas de calibración para la posición de (0°) para ambos rangos de edades.

Gráfico 3.11 Curva de calibración general edad 3-7 días según posición



Fuente: Propia.

Gráfico 3.12 Curva de calibración general edad 7-28 días según posición



Fuente: Propia.

El fabricante del equipo nos brinda la variación por diferencia de posición del equipo en las curvas de calibración del mismo, la cual es de 3 unidades de rebote, aproximado al valor encontrado en esta investigación.

### 3.9. El número de rebote como indicador de calidad del hormigón.

A partir de los cuadros expuestas en el anterior punto y el análisis de las probetas ensayadas se llega a la siguiente observación:

*Cuadro 3.24 Calidad del hormigón según el número de rebote (R) posición (0°)*

Rango	Calidad del hormigón
<20	Pésimo
20-25	Malo
25-30	Regular
30-40	Bueno
40-50	Excelente
>50	N.N.

*Fuente: Propia.*

Esto Cuadro es para hormigones mayores a 7 días de edad y a un ángulo de aplicación de 0°.

### 3.10. Variación del índice esclerométrico por agregado grueso de tipo rodado.

Se aplicó el ensayo esclerométrico en una cara de la probeta, analizando 16 puntos con las indicaciones de la norma ASTM c 805. Se aplicó el ensayo de esclerometría y de resistencia a compresión en probetas de dosificación 21, 25 y 30 Mpa. a edades de 3, 7 14 y 28. Se elaboraron 10 probetas para cada respectiva edad y resistencia con agregado grueso de canto rodado.

En total se elaboraron 120 probetas con agregado grueso de canto rodado. Las planillas completas de datos y procesamiento estadístico se encuentran en Anexo 6.

Se computó las medidas de dispersión y de tendencia central de las 16 lecturas por probeta y se calculó un intervalo de confianza del 95%, a través de la distribución t de student (Cuadro en el Anexo 13) para muestras pequeñas ( $N < 30$ ).

Resumen de medias validadas por la norma ASTM c805 para la regresión.

*Cuadro 3.25 Resumen de datos probetas canto rodado dosificación 21 Mpa*

Probetas canto rodado dosificación 21 Mpa								
Edad (Días)	3		7		14		28	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)						
1	21,06	8,46	24,53	14,06	30,43	16,72	36,31	20,36
2	21,44	9,13	28,44	14,64	26,07	18,85	34,57	20,49
3	20,56	9,62	28,60	16,80	30,88	16,26	33,85	22,71
4	22,06	8,16	28,06	14,25	30,00	16,85	33,19	20,39
5	23,88	9,20	29,19	15,74	31,00	16,15	33,00	21,08
6	23,50	8,17	26,69	13,85	28,69	16,76	35,25	21,09
7	21,31	8,93	28,00	14,78	29,88	17,73	34,67	21,04
8	22,25	9,37	27,31	17,87	28,19	17,75	32,13	19,88
9	21,75	9,16	29,06	15,47	29,53	16,53	32,06	20,54
10	22,94	8,74	26,94	14,55	31,00	18,83	34,06	19,83
<b>Prom.</b>	22,08	8,89	27,68	15,20	29,57	17,24	33,91	20,74

*Fuente: Propia.*

*Cuadro 3.26 Resumen de datos probetas canto rodado dosificación 25 Mpa*

Probetas canto rodado dosificación 25 Mpa								
Edad (Días)	3		7		14		28	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)						
1	26,86	10,39	30,69	18,49	35,31	22,17	37,31	24,26
2	26,75	11,46	28,87	17,25	34,53	21,24	37,07	25,42
3	25,38	13,43	29,75	17,46	35,87	21,17	37,40	24,63
4	26,60	10,94	31,81	18,30	34,21	20,74	38,00	26,47
5	24,81	13,70	28,88	17,42	36,44	21,44	37,50	24,83
6	25,63	12,95	27,69	17,57	32,19	21,65	38,44	25,74
7	24,81	10,08	29,88	18,60	33,56	22,62	39,13	26,77
8	25,63	11,50	29,00	18,11	32,29	20,16	38,00	24,28
9	23,73	10,87	29,94	17,15	35,00	20,94	37,13	25,32
10	24,13	11,04	30,88	16,96	31,73	21,19	38,31	25,13
<b>Prom.</b>	25,43	11,64	29,74	17,73	34,11	21,33	37,83	25,29

*Fuente: Propia.*

Cuadro 3.27 Resumen de datos probetas canto rodado dosificación 30 Mpa

Probetas canto rodado dosificación 30 Mpa								
Edad (Días)	3		7		14		28	
N° Probeta	N° Rebote medio	Rotura (Mpa)						
1	31,06	16,40	35,00	22,42	39,00	25,34	40,40	29,09
2	28,53	16,00	33,50	20,71	40,88	24,90	41,38	28,70
3	28,25	15,76	35,71	20,97	39,50	23,95	41,40	30,42
4	28,27	13,66	35,38	20,59	38,07	24,69	40,00	29,17
5	29,75	16,20	33,44	23,06	38,19	24,14	40,94	28,84
6	27,81	14,85	36,81	21,19	38,06	26,75	41,46	29,00
7	28,86	14,99	34,40	22,00	37,00	25,23	40,87	27,95
8	29,00	15,12	35,81	20,50	34,85	26,37	39,00	30,16
9	27,19	15,93	34,88	22,05	36,20	24,50	40,88	29,65
10	30,27	14,39	31,43	19,84	37,94	25,90	39,50	29,36
<b>Prom.</b>	28,90	15,33	34,64	21,33	37,97	25,18	40,58	29,23

Fuente: Propia.

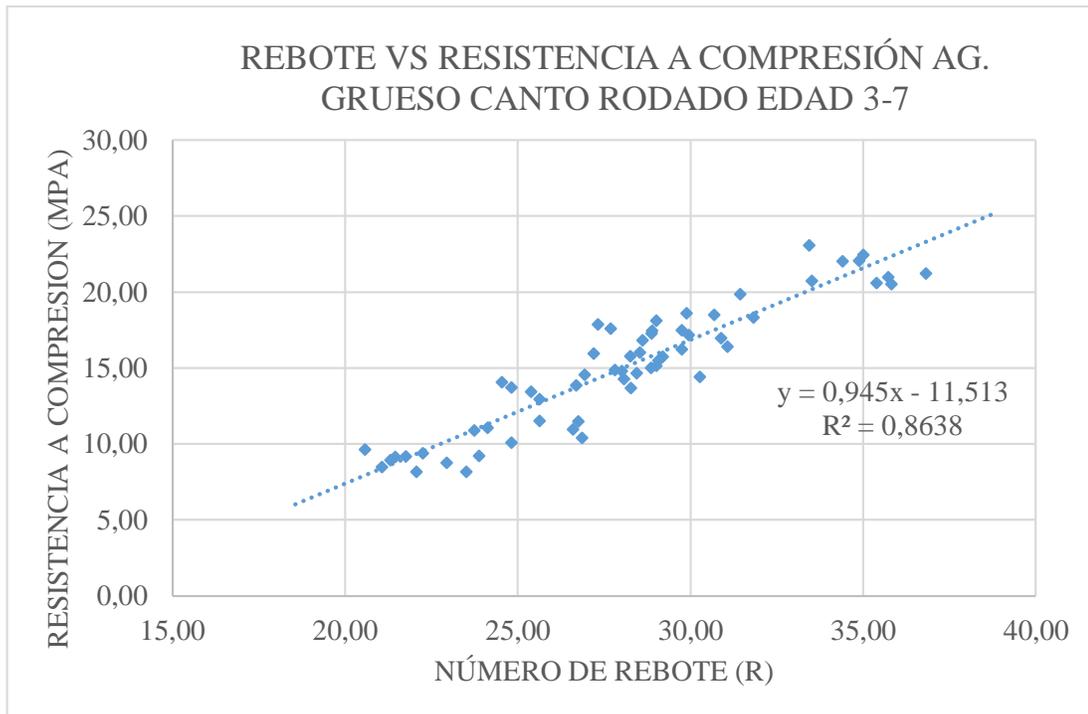
A partir de los datos de número de rebote (R) medio y resistencia a la compresión obtenidas con las probetas elaboradas con agregado grueso de canto rodado, se traza una regresión lineal de igual manera que en la calibración general y así obteniendo una ecuación que, comparada con la ecuación de calibración general (agregado grueso triturado), se puede cuantificar cuanto varían entre los resultados de resistencia a compresión.

Cuadro 3.28 Estadística descriptiva de los datos probetas canto rodado (edad 3-7)

Estadística descriptiva de los datos (edad 3-7)			
Cantidad de probetas	60		u.
Rebote medio	2,49		adim.
Min/máx. rebote	1,10	- 4,11	adim.
Media desviación estándar	8,84		%
Min/máx. desviación estándar	3,78	- 13,39	%
Media de coeficiente de variación	28,08		adim.
Min/máx. coeficiente de variación	16	- 43	adim.
Resistencia a compresión media	15,02		Mpa.
Min/máx. Resistencia a compresión	8,16	- 23,06	Mpa.

Fuente: Propia.

Gráfico 3.13 Número de rebote vs Fc' agregado grueso canto rodado edad 3-7



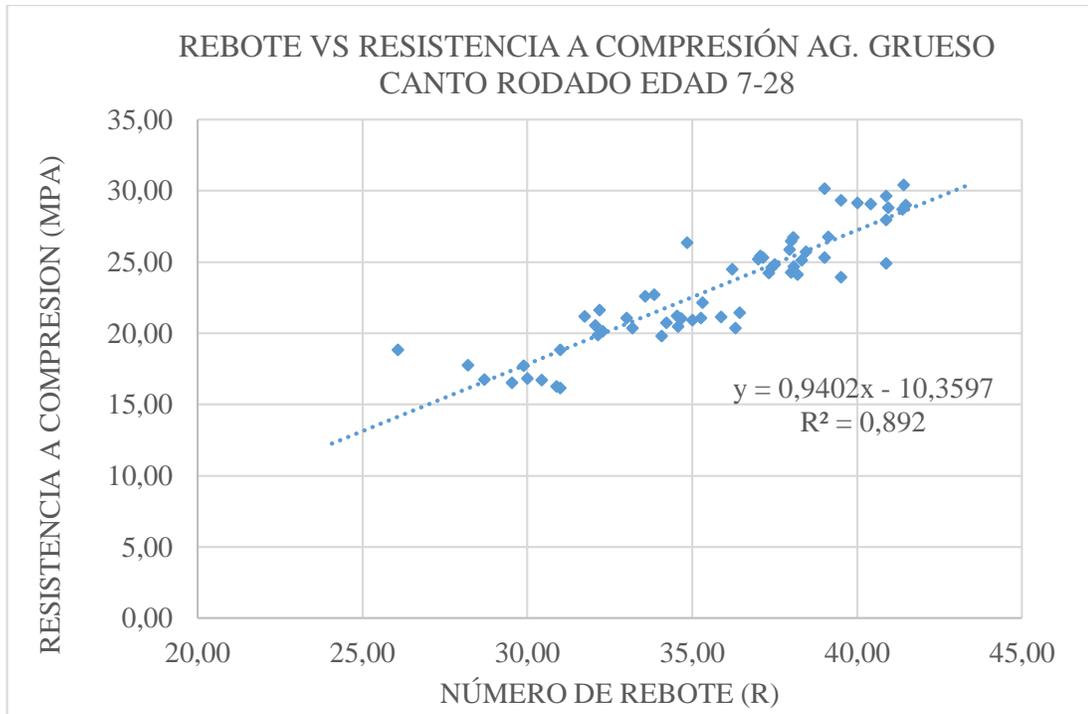
Fuente: Propia.

Cuadro 3.29 Estadística descriptiva de los datos probetas canto rodado (edad 7-28)

Estadística descriptiva de los datos (edad 7-28)			
Cantidad de probetas	60		u.
Rebote medio	3,01		adim.
Min/máx. rebote	1,69	- 5,54	adim.
Media desviación estándar	8,44		%
Min/máx. desviación estándar	4,88	- 15,09	%
Media de coeficiente de variación	35,56		adim.
Min/máx. coeficiente de variación	20	- 51	adim.
Resistencia a compresión media	23,17		Mpa.
Min/máx. Resistencia a compresión	16,15	- 30,42	Mpa.

Fuente: Propia.

Gráfico 3.14 Número de rebote vs  $F_c'$  agregado grueso canto rodado edad 7-28



Fuente: Propia.

Se realizó la comparación de los valores de resistencias a compresión, obtenidas de la ecuación de calibración general y la de agregado grueso de canto rodado, entre los rangos de 20 y 50 de número de rebote (R).

Cuadro 3.30 Variación de resultados por agregado grueso de canto rodado edad 3-7

<b>Edad 3-7</b>			
<b>Número de rebote</b>	<b>R. Compresión. Agregado Canto rodado (Mpa)</b>	<b>R. Compresión Agregado Triturado (Mpa)</b>	<b>Variación (%)</b>
20	7,39	8,76	15,63
21	8,33	9,85	15,43
22	9,28	10,95	15,27
23	10,22	12,05	15,14
24	11,17	13,14	15,03
25	12,11	14,24	14,94
26	13,06	15,34	14,86
27	14,00	16,43	14,79
28	14,95	17,53	14,73
29	15,89	18,63	14,68
30	16,84	19,72	14,63
31	17,78	20,82	14,59
32	18,73	21,92	14,55
33	19,67	23,01	14,52
34	20,62	24,11	14,49
35	21,56	25,21	14,46
36	22,51	26,30	14,43
37	23,45	27,40	14,41
38	24,40	28,50	14,39
39	25,34	29,59	14,37
40	26,29	30,69	14,35
41	27,23	31,79	14,33
42	28,18	32,88	14,31
43	29,12	33,98	14,30
44	30,07	35,08	14,28
45	31,01	36,17	14,27
46	31,96	37,27	14,26
47	32,90	38,37	14,24
48	33,85	39,46	14,23
49	34,79	40,56	14,22
50	35,74	41,66	14,21
		<b>Promedio</b>	14,59

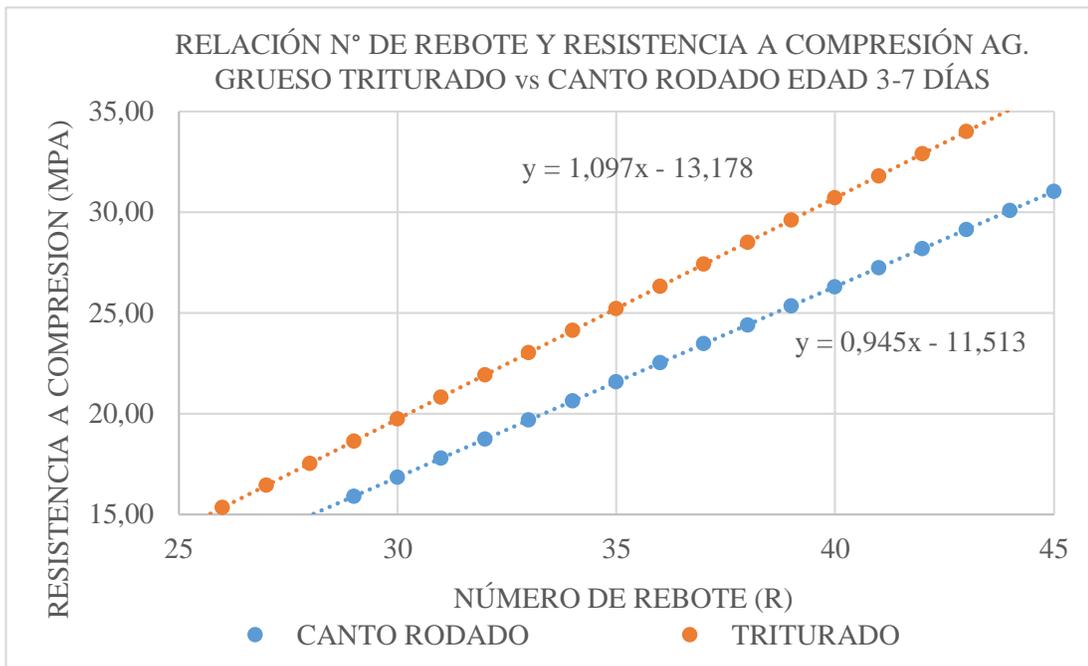
Fuente: Propia.

Cuadro 3.31 Variación de resultados por agregado grueso de canto rodado edad 7-28

<b>Edad 7-28</b>			
<b>Número de rebote</b>	<b>R. Compresión. Agregado Canto rodado (Mpa)</b>	<b>R. Compresión Agregado Triturado (Mpa)</b>	<b>Variación (%)</b>
20	8,44	10,23	17,43
21	9,38	11,25	16,61
22	10,32	12,28	15,93
23	11,26	13,31	15,36
24	12,20	14,34	14,87
25	13,15	15,36	14,44
26	14,09	16,39	14,07
27	15,03	17,42	13,74
28	15,97	18,45	13,45
29	16,91	19,47	13,19
30	17,85	20,50	12,95
31	18,79	21,53	12,74
32	19,73	22,56	12,54
33	20,67	23,58	12,37
34	21,61	24,61	12,21
35	22,55	25,64	12,06
36	23,49	26,67	11,92
37	24,43	27,69	11,79
38	25,37	28,72	11,68
39	26,31	29,75	11,57
40	27,25	30,78	11,46
41	28,19	31,80	11,37
42	29,13	32,83	11,28
43	30,07	33,86	11,19
44	31,01	34,89	11,11
45	31,95	35,91	11,04
46	32,89	36,94	10,97
47	33,83	37,97	10,90
48	34,77	39,00	10,84
49	35,71	40,02	10,78
50	36,65	41,05	10,72
		<b>Promedio</b>	12,66

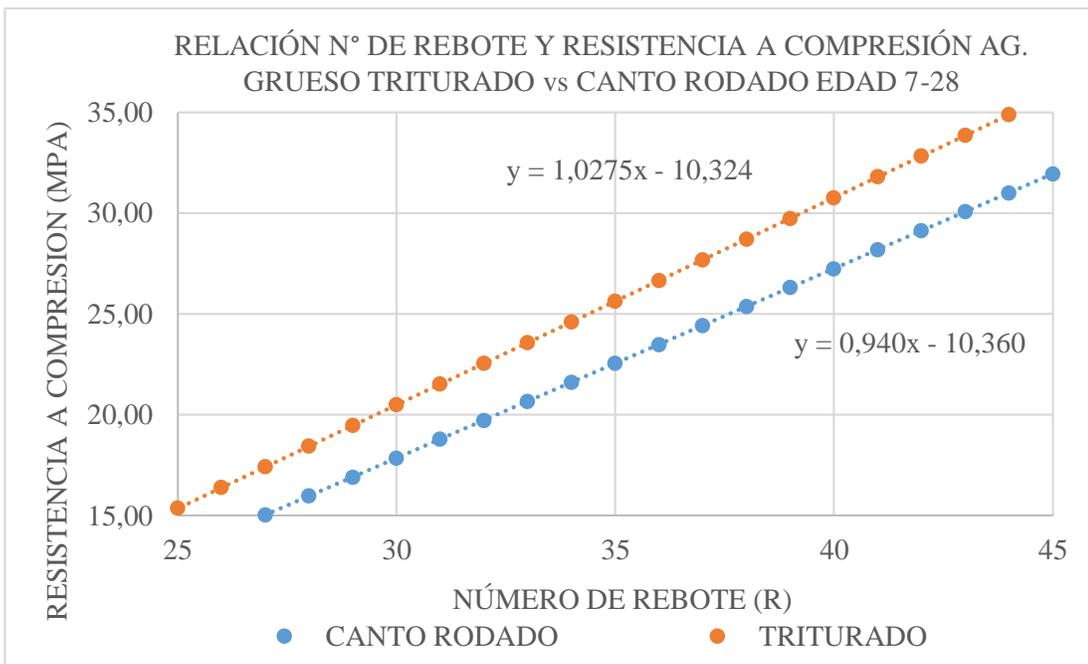
Fuente: Propia.

Gráfico 3.15 Relación número de rebote y resistencia a compresión agregado grueso triturado vs rodado edad 3-7 días



Fuente: Propia.

Gráfico 3.16 Relación número de rebote y resistencia a compresión agregado grueso triturado vs rodado edad 7-28 días



Fuente: Propia.

La variación porcentual se calculó a partir de la diferencia entre la resistencia a compresión de agregado grueso triturado y agregado rodado en términos de un porcentaje del valor de la resistencia a compresión del agregado grueso triturado.

En los cuadros se puede observar la variación promedio entre las resistencias a compresión obtenidas de las ecuaciones de ambos tipos de agregados es de 14,59% para probetas de edad de 3 a 7 días y de 12,66% para probetas de edad de 7 a 28 días. Con lo expuesto anteriormente confirmamos lo que se expuso en la teoría, que el tipo de agregado grueso afecta de forma significativa los resultados de número de rebote (R).

Al observar los gráficos y Cuadros anteriores, se puede determinar que el agregado grueso de canto rodado genera mayor dureza superficial en el hormigón, ya que presenta valores de número de rebote más altos que el hormigón elaborado con agregado grueso triturado para un mismo valor de resistencia a la compresión.

### **3.11. Ensayo esclerométrico aplicado en la estructura del laboratorio de farmacología.**

El laboratorio de farmacología comenzó a construirse en el año 2014, este se encuentra ubicado en el campus universitario de UAJMS en la Av. España entre Celedonio Ávila y Pasaje California. Al sur de la estructura se encuentra el bloque de la facultad de Ciencias Económicas y Financieras y al este la facultad de Ciencias de la Salud.

Se aplicó el ensayo en la estructura del laboratorio de farmacología (vigas y columnas) tomando en cuenta dos sectores de aplicación para las vigas y tres sectores para las columnas.

Como Antecedente se tiene que el material de agregado grueso usado para el hormigonado fue triturado de  $\frac{3}{4}$ ", correspondiente a las características del agregado grueso con el que se realizó la calibración general, por tanto, no se tiene que usar el factor de corrección por el tipo de agregado grueso.

La estructura tiene aproximadamente 5 años, entonces se procede con el cálculo de la carbonatación del hormigón de la estructura.

Los informes de ensayos de muestras de hormigón y los planos de la estructura se encuentran en el Anexo 9 y 7 respectivamente.

### **Cálculo de la carbonatación del hormigón.**

Del punto V en el apartado 2.13.9 del presente documento, sabemos que el cálculo de la profundidad de carbonatación está en función de la siguiente formula:

$$C = K \times \sqrt{T}$$

T= Tiempo (años)

K= Parámetro que depende de condiciones límites (medio ambiente, calidad del hormigón)

Para calcular el parámetro K, tenemos la siguiente formula:

$$K = R \times \sqrt{a}$$

Donde:

“R” se obtiene de la siguiente ecuación:

$$R = r(1) \times r(2) \times r(3)$$

r(1), r(2), r(3) = factores que dependen del cemento, agregados y aditivos empleados

Estos valores se obtienen del cuadro 2.6, siendo el cemento portland normal, el agregado rodado de río y la influencia del aditivo normal, tenemos que:

$$R = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

“a” se obtiene de la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{\frac{\left(\left(\frac{a}{c}\right) - 0,25\right)^2}{0,3 \times (1,15 + 3 \times (a/c))}}$$

a/c = relación agua/cemento.

Siendo la relación a/c = 0,49 para hormigón H-21:

$$a = \sqrt{\frac{((0,49) - 0,25)^2}{0,3 \times (1,15 + 3 \times 0,49)}} = \mathbf{0,27}$$

Por tanto, reemplazando “R” y “a”, tenemos que:

$$K = 1 \times \sqrt{0,27} = \sqrt{\mathbf{0,27}}$$

Sabiendo que T = 5 años y reemplazando “K” en la primera ecuación, encontramos que la profundidad de carbonatación es:

$$C = \sqrt{0,27} \times \sqrt{5} = \mathbf{1,16 \text{ mm}}$$

Por último, interpolando “C” en el cuadro 2.5, tenemos como resultado que:

Factor de carbonatación = **0,99**

**Planilla de recolección de datos.**

Se puede observar en la siguiente figura, el levantamiento de datos en la planilla del ensayo esclerométrico. Se realizaron 16 rebotes en cada sector a analizar y se hizo el tratamiento de datos tal cual se estipula en la norma ASTM c 805.

*Figura 3.4 Planilla de recolección de datos esclerometría en estructura lab.*

**IDENTIFICACION:** VIGA-15

**LOCALIZACION:** CARA SUR

**PROYECTO:** LABORATORIO DE FARMACOLOGIA UAJMS

**OPERADOR:** AGUSTIN ROMERO GUTIERREZ **NORMA:** ASTM C 805

**DATOS TÉCNICOS:**

Fecha ensayo:	23/9/2019	Edad del hormigón:	5 años
Tipo y serie de martillo:	58-C0181/N1 (358)	Ángulo de ensayo:	0 °
Nivel desde base estructura:	0,2 m	Resistencia de diseño:	21 [Mpa]
Factor de carbonatación:	0,99	Tipo de agregado:	Triturado
Características superficie:	Pulida piedra ab	Tamaño de agregado:	3/4"

**SECTOR 1**

**LECTURAS DE CAMPO**

49	42	40	50
38	35	37	40
32	38	42	40
38	40	38	36

**LECTURAS PROCESADAS**

	42	40	
38	35	37	40
	38	42	40
38	40	38	36

Promedio lecturas cara superior: 39,69

Desviación estándar: 4,60

Valor promedio de rebote (R): 38,77

**Resistencia de la Esclerometria sin calibrar:** 39,20 [MPa]

**Resistencia de la Esclerometria calibrado:** 26,26 x F. Carbonatación 26,00 [MPa]

*Farmacología*

*Fuente: Propia.*

El resto de las planillas se encuentran en el Anexo 8.

### 3.12. Comparación de los resultados calibrados, resultados sin calibrar y testigos de obra del laboratorio de farmacología.

Cuadro 3.32 Comparación de resultados del esclerómetro en estructura lab. farmacología

Elemento	Sector	Posición (°)	N° Rebote prom.	Resistencia esclerómetro sin calibrar	Prom.	Resistencia esclerómetro calibrado	Prrrom.	Modif. Carbonatación	Resistencia testigos	Error relativo calibrado	Error relativo de fabrica			
				Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	%	%			
Viga	15	1	0	38,77	39,20	39,46	26,26	26,41	26,15	22,52	16,10	75,20		
		2	0	39,06									39,72	26,56
Viga	32	1	0	38,07	37,95	38,36	25,54	25,78	25,52	24,82	2,81	54,53		
		2	0	38,53									38,77	26,02
Viga	Gr	1	0	39,31	40,16	40,16	26,81	26,81	26,55	24,41	8,75	64,52		
		2	0											
Viga	14	1	0	37,47	36,89	36,89	24,92	24,92	24,67	22,52	9,55	63,79		
		2	0											
Viga	34	1	0	40,08	41,56	41,71	27,61	27,69	27,42	24,82	10,45	68,03		
		2	0	40,25									41,87	27,78
Col.	30	1	0	42,14	45,35	42,83	29,73	28,31	28,03	28,43	-1,41	50,64		
		2	0	40,93									43,11	28,48
		3	0	39,23									40,02	26,73
Col.	23	1	0	41,86	44,82	43,29	29,43	28,58	28,30	28,43	-0,47	52,27		
		2	0	40,53									42,38	28,07
		3	0	40,69									42,67	28,24
Col.	24	1	0	40,14	41,67	41,07	27,67	27,33	27,06	28,43	-4,83	44,45		
		2	0	39,50									40,51	27,01
		3	0	39,79									41,02	27,30
Col.	17	1	0	41,53	44,22	40,93	29,10	27,24	26,97	25,65	5,16	59,60		
		2	0	38,57									38,84	26,06
		3	0	39,07									39,74	26,57
Col.	12	1	0	41,31	43,81	40,40	28,87	26,94	26,67	23,86	11,80	69,36		
		2	0	38,75									39,16	26,24
		3	0	38,23									38,24	25,71
<b>Prom.</b>										7,13	60,24			

Fuente: Propia.

Las casillas con rojo son datos que fueron descartado, debido a que más de 3 valores de número de rebote difirieron con 6 unidades del promedio.

Como se puede observar en el cuadro los resultados de resistencia con el esclerómetro sin calibrar, es decir, con la curva del fabricante nos brinda resultados muy lejanos a la realidad, aproximadamente 15 MPa de diferencia comparado con la resistencia a compresión de los testigos de la obra.

Por otro lado, los resultados de resistencia con la curva de calibración son bastante próximos a de los testigos de obra, confirmando así que la correlación entre el índice

de rebote y la resistencia a compresión están ligadas y que si se puede ser más precisos con los resultados gracias a la calibración.

Por último, en las columnas se puede evidenciar un mayor número de rebote en el punto primer tercio desde la base, por tanto, es preferible aplicar el ensayo en el 2do tercio de la columna para así poder estimar correctamente la resistencia a compresión con el esclerómetro.

Los cuadros completos con los datos levantados en campo, los planos de la estructura del laboratorio de farmacología (ubicación de columnas y vigas ensayadas) y los informes de muestras de hormigón se encuentran en el Anexo 8, 7 y 9 respectivamente.

### 3.13. Análisis de uniformidad de columnas del laboratorio de farmacología.

El esclerómetro puede ser utilizado como indicador de uniformidad en los elementos de hormigón. En este caso estudiamos 5 columnas que se encuentran en la planta baja de laboratorio de farmacología.

En cada columna se aplicó el ensayo esclerométrico a tres diferentes sectores a diferentes distancias desde la base de la columna, estas son: 0.6, 1.3 y 1.9 m., ya que estos se encuentran aproximadamente en el punto medio de cada tercio de la columna.

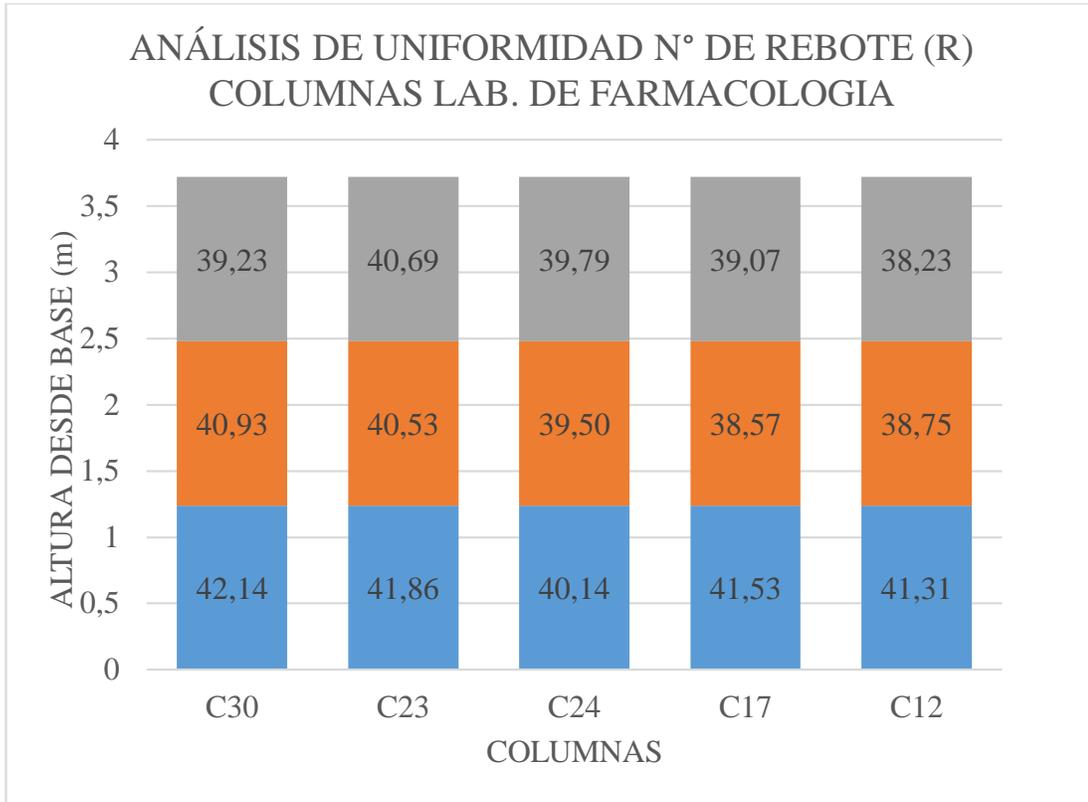
Se obtuvo el valor promedio de rebote en cada sector de la columna

*Cuadro 3.33 Valores de N° de rebote (R) por sector en columnas del lab. farmacología*

<b>Valores de rebote promedio por sector en columnas del lab. De farmacología</b>						
<b>Altura desde base (m)</b>	<b>Columnas</b>					<b>Promedio</b>
	<b>C30</b>	<b>C23</b>	<b>C24</b>	<b>C17</b>	<b>C12</b>	
0.6	42,14	41,86	40,14	41,53	41,31	41,40
1.6	40,93	40,53	39,50	38,57	38,75	39,66
3	39,23	40,69	39,79	39,07	38,23	39,40

*Fuente: Propia.*

Gráfico 3.17 Análisis de uniformidad N° de rebote (R) columnas lab. farmacología



Fuente: Propia.

Se puede observar en los gráficos que en el primer tercio de la columna desde la base se tiene el valor más alto de índice de rebote, aproximadamente una diferencia de 3 unidades con el segundo y tercer tercio, lo cual nos quiere decir que hay mayor concentración de agregados en primer tercio de la columna. Esto puede ser debido a diversos factores como ser: existe mayor carga aplicada en las columnas de las plantas bajas y por la segregación de los materiales al momento del vaciado del hormigón. este último mencionado ocurre debido a que se vacía desde una altura considerable provocando dicho efecto.

## CAPÍTULO IV

### 4. Aporte Académico.

#### 4.1. Resultados.

Los resultados de esta investigación son las ecuaciones expuestas en los cuadros, que podrán ser utilizadas para estimar la resistencia a compresión del hormigón a través del ensayo de esclerometría con el esclerómetro 58-C0181/N1 (358) del laboratorio de hormigón de la UAJMS.

Calibración general del esclerómetro para hormigón confeccionado con agregado grueso triturado:

*Cuadro 4.1 Ecuaciones de calibración esclerómetro 58-C181/N1 (358) AGT*

Ecuaciones de calibración esclerometría				
Hormigón (21Mpa – 30Mpa)		Ángulo del ensayo	Ecuación	Error típico al 95% (Mpa)
Tipo de agregado grueso	Edad			
Agregado grueso triturado	3 a 7	-90°	$Y = 1,0967 \cdot X - 13,178$	±3,478
		0°	$Y = 1,0967 \cdot X - 16,648$	
	7 a 28	-90°	$Y = 1,0275 \cdot X - 10,324$	±2,745
		0°	$Y = 1,0275 \cdot X - 13,575$	
Y = Resistencia a compresión en Mpa.			X = Índice de rebote medio esclerometría (R).	

*Fuente: Propia.*

Ecuaciones de esclerometría para hormigón confeccionado con agregado grueso de canto rodado:

*Cuadro 4.2 Ecuaciones de calibración esclerómetro 58-C181/N1 (358) AGCR*

Ecuaciones de calibración esclerometría					
Hormigón (21Mpa – 30Mpa)		Ángulo del ensayo	Ecuación		
Tipo de agregado grueso	Edad				
Agregado grueso de canto rodado	3 a 7	-90°	$Y = 0,945 \cdot X - 11,513$		
	7 a 28	-90°	$Y = 0,940 \cdot X - 10,360$		
Y = Resistencia a compresión en Mpa.			X = Índice de rebote medio esclerometría (R).		

*Fuente: Propia.*

## CAPÍTULO V

### 5. Conclusiones y Recomendaciones.

#### 5.1. Conclusiones.

Análisis de objetivos.

- Se cumplió con todos los objetivos específicos planteados para esta investigación.
- Se cumplió con el objetivo principal de calibrar el esclerómetro con la prensa electrónica del laboratorio de hormigón de la UAJMS.

Observaciones.

- Mediante la regresión lineal generada entre las variables de número de rebote (R) y resistencia a compresión se puede confirmar que la dureza superficial de hormigón nos da un parámetro aceptable para relacionarla de manera directa con la resistencia a la compresión del hormigón, ya que, se obtuvieron valores aceptables de coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de correlación múltiple mayores a 0,8.
- Al comparar la curva de calibración de fábrica del equipo con la encontrada en esta investigación, podemos afirmar que esta tenía demasiado error, ya que, en la curva de fábrica arrojaba valores altos de resistencia a compresión.
- La edad del hormigón es un factor que influye ligeramente en los resultados de la esclerometría. En la gráfica expuesta en el presente documento, se puede evidenciar que a edad temprana en el hormigón se genera mayor dureza superficial con respecto a su resistencia a compresión, ya que, para mismos valores de número de rebote (R) en probetas de edades tempranas se tiene valores menores de resistencia a compresión que a edades mayores a 7 días.
- La variación por posición entre  $-90^\circ$  y  $0^\circ$ , proporcionada por el fabricante del equipo, es aproximadamente la misma con la encontrada en esta investigación.
- Corroborando a la teoría se pudo evidenciar que existe una notable variación por el tipo de agregado grueso. Se logró cuantificar aproximadamente la variación de los resultados de esclerometría en probetas de agregado grueso de canto rodado

con respecto al agregado grueso triturado, siendo 14,59% para probetas de edad 3-7 días y 12,66% para probetas de edad 7-28 días. Se obtuvo como resultado que los valores de número de rebote (R) en las probetas elaboradas con agregado grueso de canto rodado son mayores que las probetas elaboradas con agregado grueso triturado, para un valor igual de resistencia a compresión, mostrando que el agregado de canto rodado genera mayor dureza superficial en el hormigón.

- A partir de los ensayos aplicados en la estructura de farmacología, se puede concluir que el esclerómetro es una herramienta práctica, económica, rápida y confiable en la que el constructor o supervisor puede apoyarse para conocer en campo y, de manera aproximada, la resistencia y evolución del hormigón de manera factible como control en el proceso constructivo de la obra. Además de conocer la homogeneidad y calidad del hormigón sin deteriorar la estructura, lo cual trae ciertas ventajas con respecto a los ensayos que se usan normalmente para conocer la resistencia a compresión del hormigón.
- En promedio la variación de los resultados de la esclerometría en la estructura del laboratorio de farmacología (vigas y columnas) con respecto los resultados de resistencia a compresión de los ensayos de muestras de hormigón (testigos) son de 7,13 %.
- Se pudo observar que los resultados de esclerometría arrojan valores altos de rebote en la base de la columna, posiblemente debido a segregación, es por eso que se debe aplicar el ensayo de esclerometría en el tercio medio de las columnas para aproximar la resistencia a compresión del hormigón.

#### Conclusión.

- La hipótesis fue acertada, ya que, gracias a la calibración del esclerómetro este mejoró notablemente la aproximación de la resistencia a compresión, hasta tener aproximadamente 16% de error como máximo en los resultados de esclerometría con respecto a los resultados de rotura a compresión de las muestras en la estructura del laboratorio de farmacología, demostrando la importancia de la calibración.

## **5.2. Recomendaciones.**

- El esclerómetro debe estar calibrado para poder conocer la resistencia a compresión del hormigón en obra.
- Se recomienda no aplicar el ensayo en estructuras que se encuentren húmedas, ya que se ve afectado el número de rebote dando valores más bajos de los correspondientes.
- Se debe considerar el factor de carbonatación a partir de 5 años de edad del hormigón, ya que a partir de esa edad resulta relevante.
- Aplicar el esclerómetro de forma perpendicular a la superficie, ya que si se encuentra inclinado se genera error en la lectura.
- Evitar aplicar el ensayo de esclerometría en sitios donde haya cangrejas o vacíos de aire.
- Los valores que se encuentran distantes por más de 6 unidades, después de promediado los valores de impacto, se deben descartar.