

**EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CONCRETO  
SIN REFUERZO A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO  
ULTRASÓNICO**

**JAIRO IVÁN VARGAS ARDILA  
JUAN CARLOS RAMÍREZ ALCÁZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIAS DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2012**

**EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CONCRETO SIN  
REFUERZO A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO  
ULTRASÓNICO**

**JAIRO IVÁN VARGAS ARDILA  
JUAN CARLOS RAMÍREZ ALCÁZAR**

Trabajo de grado, presentado como requisito para optar al título de ingeniero  
metalúrgico y de materiales

**Director**

**RICARDO ALFREDO CRUZ  
Ingeniero Civil, Ph.D**

**Codirectora**

**LUZ AMPARO QUINTERO  
Ingeniera Metalúrgica, MsC.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIAS DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2012**

## **DEDICATORIA**

**Todos en la vida somos el resultado de las enseñanzas que se forjan en el transcurso de nuestra existencia, heredado del grupo de seres humanos que nos acompaña en las diferentes etapas de ésta.**

**Dedico éste importante triunfo al Creador. A mí familia, a mí Mamá Rosa Lilia, energía creadora que sólo se puede traducir en calor y amor, a mí Papá Luis Francisco, un quijote más en el mundo cargado de mucha alegría, a mí hermana Francy Liliana, que me ha enseñado bastante sobre lo importante que es tener determinación y actitud, a mí hermano Luis Eduardo, hombre de grandes criterios, humildad y equilibrio y a mí sobrina Danna Alejandra, que día a día llena de luz mis días y puede destrozarse todo aquello que ve y de un soplo lo vuelve a crear, como si nada, ella borra las horas de cada reloj y me enseña a pintar con su sonrisa. A mis dos abuelas, a mis tíos y tías (en especial a Carmen, Martha, Nelly y Jairo). A mis amigos y compañeros (Narces Jiménez (excelente amigo y profesional), Carolina Vargas, John Henry Neira, Freddy Vargas, Juan Carlos Ramírez, etc.). A mis maestros (Luz Amparo Quintero, Orlando José Gómez, Afranio Cardona, Custodio Vásquez, Walter Pardave, etc.), al grupo de técnicos (Javier, Mario, Ambrosio, Jairo. Jaime, John, Iván etc.). A todos gracias.**

**Jairo Iván Vargas Ardila**

## DEDICATORIA

Todas aquellas personas presentes en la vida, cumplen un papel sin comparación para quienes somos protagonistas de este capítulo de la historia. A todos ellos quiero decir muchas gracias.

Dedico éste logro

A **Dios**, por iluminar mi camino, por acompañarme y no dejarme flaquear.

A **mi Madre**, GRACIELA, quien es mi modelo a seguir. Por mostrarme que la fuerza está con Dios y la tenacidad en el hombre. Por enseñarme a analizar todo y en todo momento. Por prepararme para el camino y dejarme avanzar.

A **mis hermanos**, quienes me han ayudado a moldear mi personalidad. Por mostrarme que la vida es más bella cuando se logran metas, pero es hermosa cuando después de esas victorias y derrotas se desea un nuevo reto. Por enseñarme que no existe nada que no se pueda hacer, si se tiene fuerza, voluntad coraje y compañía. Dedico en especial a mi hermana Leidy.

A **mi abuela**, Soledad. Por mostrarme que el amor siempre puede más, por estar siempre dispuesta a conversar, a compartir su sabiduría y a enseñar a amar.

A **mis tíos**, Nuvia y Alfonso. Por mostrarme la manera de enfrentarme a la vida con amor, tesón y esperanza.

A **mi novia**, Natalia, quien llena mi mundo. Por brindarme su apoyo incondicional, por no dejar desviar mi atención a cosas que no la merecen.

A **mis amigos**, por instruirme, por corregirme, por estar siempre allí, caminando a mi lado, por mostrarme que siempre se debe luchar y jamás rendirse.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander UIS.

Al excelente grupo humano y profesional que hizo parte de las diferentes etapas del presente proyecto.

A la importante concretera que nos concedió el honor de trabajar en su interior y conocer en el sentido más práctico.

A la Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, a la Escuela de Ingeniería Civil, a la Dirección de Investigaciones de la Facultad (DIEF), al grupo de Investigación en materiales y estructuras para la construcción (INME), al Grupo de Investigación en Desarrollo y tecnología de nuevos Materiales (GIMAT).

A nuestro Director de proyecto el PhD. Ricardo Alfredo Cruz.

A nuestra Codirectora de proyecto la Msc. Luz amparo Quintero.

Al Msc. Julián Ortiz, al Ing. Pedro, al excelente Grupo Técnico (Jairo, John e Iván), a la escuela de Geología y a Jossimar Sáenz quienes hicieron parte con sus aportes, de la presente investigación.

A Dios, a nuestras familias, a nuestros docentes, amigos y compañeros.

A todos y todas gracias.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	20
<b>1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>22</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 JUSTIFICACIÓN	23
1.3 ALCANCE	23
1.4 ESTADO DEL ARTE	24
1.5 OBJETIVOS	28
<b>2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>29</b>
2.1. CONCRETO	29
2.1.1 Componentes del Concreto	29
2.1.1.1 Cemento	29
2.1.1.2 Agua	30
2.1.1.3 Agregados	31
2.1.1.4 Aditivos	33
2.1.1.5 Peso Unitario del Concreto	34
2.1.2 Generalidades Del Concreto	34
2.2 CONCRETO FRESCO (PROPIEDADES Y ENSAYOS)	37
2.3 CONCRETO ENDURECIDO (PROPIEDADES Y ENSAYOS)	41
2.4 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	43
2.4.1 Caracterización de la Materia Prima	43
2.4.2 Diseño de Mezcla	44
2.4.3 Fraguado	44
2.4.4 Curado	45
2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD	45
2.5.1 Módulo de Elasticidad Estático del Concreto	45
2.5.2 Módulo de Elasticidad Dinámico del Concreto	49
2.5.3 Factores que Afectan el Módulo de Elasticidad del Concreto	50
2.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	51
2.6.1 Ensayo de Inspección Visual	51
2.6.2. Ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico	51
2.7. ENSAYO DESTRUCTIVO	53
2.7.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión	53
2.7.2 Factores que afectan la resistencia del concreto	54
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>55</b>
3.1 FASE 1: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	56
3.2 FASE 2: SOLICITUD DE PERMISO PARA EL INGRESO A LA PLANTA CONCRETERA	56
3.3 FASE 3: CAPACITACIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL	56

3.4 FASE 4: INGRESO A LA PLANTA CONCRETERA	56
3.5 FASE 5: SELECCIÓN EL TAMAÑO DE MUESTRA	56
3.6 FASE 6: PROCESOS DE FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO	57
3.6.1 Etapa 1: Caracterización De La Materia Prima	57
3.6.2 Etapa 2: Diseños De Mezcla	58
3.6.3 Determinación de las Propiedades del Concreto Fresco	58
3.6.4 Etapa 3: Fabricación De Especímenes Cilíndricos	58
3.6.5 Etapa 4: Fraguado, Curado y Secado	58
3.7 FASE 7: ENSAYOS EXPERIMENTALES	59
3.7.1 Inspección Visual	59
3.2.2 Ensayo De Velocidad de Velocidad de Pulso Ultrasónico	59
3.7.3 Ensayo De Resistencia a la Compresión	61
<b>4. RESULTADOS</b>	63
4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO	63
4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES	64
2.1 Ensayo de Inspección Visual	64
4.2.2 Ensayo De Velocidad de Pulso Ultrasónico	65
4.2.3 Ensayo De Resistencia a la Compresión	66
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	68
<b>6. CONCLUSIONES</b>	76
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	78
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	83
<b>ANEXOS</b>	85

## LISTA DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
Figura 1	Variación de las proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto. Las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados de pequeño tamaño. Las barras 2 y 4 Representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes.	29
Figura 2	Ensayo de asentamiento usando el cono de Abrams.	37
Figura 3	Desarrollo de fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.	42
Figura 4	Curva esfuerzo-deformación para compresión, con ilustración de los tramos elástico y plástico del Concreto.	47
Figura 5	Curvas esquemáticas esfuerzo-deformación para materiales casi-elásticos (e.g., basaltos, granitos de grano fino), semi-elásticos (e.g., calizas, areniscas, mármoles) y plásticos (morteros de cal, morteros de yeso).	49
Figura 6	Deformación frágil y dúctil bajo compresión, torsión y extensión en el concreto.	49
Figura 7	Diferentes posiciones de los palpadores.	52
Figura 8	Principio de funcionamiento del aparato de ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.	52
Figura 9	Proceso de fabricación de especímenes cilíndricos.	64
Figura10	Fraguado, Desencofrado, Curado y Secado al aire.	64
Figura11	Ensayo de inspección visual	64
Figura12	Equipo de Ultrasonido Pundit Plus	65
Figura13	Prueba de Ultrasonido Pundit Plus	65
Figura14	Equipo de Ultrasonido Controls E0048	65
Figura15	Prueba de Ultrasonido Controls E0048	65
Figura16	Máquina universal de ensayos MODEL CT-1500 tipo AUTOMAX System marca DIRIMPEX LTDA	66
Figura17	Prueba de Compresión	66
Figura18	Balance de los pesos unitarios de cada resistencia	69
Figura19	Relación de $E_c$ Vs VPU calculado Pundit Plus	71
Figura20	Relación de $E_c$ Vs VPU valores arrojados por el equipo PUNDIT PLUS	71
Figura21	Relación de $E_c$ Vs valores de $E_d$ arrojados por el equipo PUNDIT PLUS	72

Figura22	Relación entre Ed en función de VPU, Ed calculado y la VPU Pundit Plus	73
Figura23	Relación Entre el Ec y la VPU Controls E0048	74
Figura24	Relación Entre el Ec y el Ed calculado Controls E0048	75

## LISTA DE TABLAS

		<b>Pág.</b>
Tabla I	Clasificación del Cemento Según Norma ASTM C 150	30
Tabla II	Familias De Rocas	32
Tabla III	Ensayo de Medición del Contenido De Aire.	41
Tabla IV	Ventajas e inconvenientes del método con ultrasonido.	53
Tabla V	Clasificación del Concreto Según Resistencia a la Compresión.	54
Tabla VI	Diseño de mezcla, Asentamiento y Densidad por Resistencia.	63
Tabla VII	Valores promedios para el ensayo con equipo Pundit Plus.	67
Tabla VIII	Valores medios para el ensayo con el equipo Controls.	67

## LISTA DE GRÁFICOS

		<b>Pág.</b>
Flujograma 1	Proceso de fabricación del cemento Portland.	30
Flujograma 2	Proceso de fabricación del concreto.	43
Flujograma 2	Metodología Desarrollada en La Presente Investigación.	55

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.	85
ANEXO B CRONOGRAMA ACTIVIDADES SEGUIDO DURANTE LA EXPERIENCIA	90
ANEXO C DIMENSIONES DE ESPECÍMENES DESPUÉS DEL FRAGUADO Y CURADO	91
ANEXO D DATOS ARROJADOS POR LA TÉCNICA DE VPU PARA AMBOS EQUIPOS	93
ANEXO E DATOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN	98
ANEXO F ESTUDIO GEÓLOGICO DEL AGREGADO GRUESO.	103
ANEXO G ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO	122
ANEXO H ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO	124

## GLOSARIO

**Análisis Granulométrico.** Etapa en la cual se separa una masa de agregado en fracciones de igual tamaño a través de una serie de tamices cuyas características se ajustan según la norma.

**Densidad Absoluta.** Es la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupa única y exclusivamente la masa sólida, es decir, se excluyen los poros saturables o no saturables.

**Densidad Aparente.** Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas de agregado, incluyendo los poros saturables y no saturables.

**Densidad o Peso Específico.** Está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada. Sin embargo, en el caso de los agregados para concreto generalmente se presentan poros que pueden estar vacíos o llenos de agua variando de una u otra manera este valor.

**Durabilidad del Concreto.** Se define como la resistencia que presenta el concreto a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o a cualquier otro proceso de deterioro.

**Granulometría.** Procedimiento mediante el cual se establece las proporciones de las partículas de los diversos tamaños que componen el agregado fino o grueso.

**Gravedad Específica.** Relación peso/volumen de un cuerpo comparado con la relación peso/volumen del agua.

**Humedad.** Es la cantidad de agua superficial retenida por partícula, su influencia está en mayor o menor cantidad de agua necesaria en la mezcla.

**Intemperismo.** Proceso de degradación y descomposición que sufren las rocas y los minerales debido a la corrosión atmosférica.

**Isotropía:** es la característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección. Es decir, se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales conmensurables, dan resultados idénticos con independencia de la dirección escogida para dicha medida.

**Masa Unitaria.** Masa promedio de las partículas de un agregado contenido en un recipiente de volumen unitario.

**Módulo de Finura.** Es un factor empírico que se obtiene al sumar los porcentajes retenidos acumulados desde el tamiz N°4 (4.75mm) hasta el tamiz N°100 (0.150mm) y dividirlos entre 100.

**Modulo de elasticidad estático.** Es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial, al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico.

**Modulo de elasticidad Dinámico.** Se determina no destructivamente utilizando el pulso ultrasónico midiendo el tiempo que tarda una onda longitudinal en atravesar el concreto, conociendo la distancia que recorre la onda.

**Pasta.** Se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (atrapado o incluido) y aditivos (si se añaden).

**Peso Unitario del Concreto.** Está definido como la cantidad de masa por unidad de volumen y generalmente se expresa en Kg/m<sup>3</sup>. Este valor depende de la densidad y tamaño máximo de los agregados, la cantidad de aire atrapado y del contenido de agua y cemento.

**Porcentaje de Vacíos.** Es la medida de volumen expresado en porcentaje de los espacios entre las partículas de agregados, depende del acomodo de las partículas por lo que su valor es relativo como en el caso del peso unitario.

**Relación Agua/Cemento.** Relación entre las masas de agua (excluyendo el agua absorbida por los agregados) y de cemento en una mezcla de hormigón.

**Tamaño Máximo del Agregado.** Es el tamaño de partícula más grande que hay dentro de la masa de agregados, el cual debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de la estructura.

**Tamaño Máximo Nominal del Agregado.** Es el tamaño promedio de partículas más grande que hay dentro de la masa de agregados.

**Trabajabilidad.** Es una propiedad importante para muchas aplicaciones del concreto. En esencia, es la facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad.

**Saturado y Superficialmente Seco (SSS).** Todos los poros se encuentran llenos de agua, pero sin una película de humedad sobre la superficie de las partículas de agregado.

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CONCRETO SIN REFUERZO A PARTIR DE MEDIDAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO\*

**AUTORES:** VARGAS ARDILA Jairo Iván; RAMÍREZ ALCÁZAR Juan Carlos.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** concreto, velocidad de pulso ultrasónico, módulo de elasticidad dinámico, módulo de elasticidad estático, coeficiente de Poisson.

## DESCRIPCIÓN

En éste trabajo se presentan los modelos de regresión obtenidos de las mediciones de velocidad en especímenes cilíndricos de concreto y de los valores alcanzados con su posterior destrucción en pruebas uniaxiales a la compresión, a fin de establecer una relación que permita ajustar lecturas arrojadas por el ensayo no destructivo de VPU, con las obtenidas en el ensayo destructivo de resistencia a la compresión respecto al módulo de elasticidad, a muestras de concreto especificado, basándose en la literatura y normativa referida, partiendo de las características que presentan los materiales utilizados por una importante concretera que distribuye a Bucaramanga y su área metropolitana.

Se analizaron 200 especímenes fabricados al interior de la concretera de dimensiones 10X20 cm, de resistencias 140, 210, 245, 280, 350 [Kg/cm<sup>2</sup>], 40 especímenes por resistencia. A cada espécimen se le realizó ensayo de inspección visual, 15 días después de terminado el curado, se les realizó el ensayo no destructivo de VPU para cada resistencia, posterior a esto se generó el ensayo destructivo de resistencia a la compresión y se obtuvo el módulo de elasticidad estático de cada espécimen mediante el uso de la ecuación  $E_c=6250\sqrt{f_c}$  en Kg/cm<sup>2</sup> o  $E_c=1950\sqrt{f_c}$  en MPa propuesta para hormigones de Bucaramanga y su área metropolitana como una modificación a la fijada en la norma NSR-10 de uso general.

En éste estudio se proponen las ecuaciones  $E_c = 0,4646E_{\text{equipo}} - 6342$  (opción 5);  $E_c = 8,0728VPU_{\text{equipo}} - 20419$  (Opción 4)  $E_c = 9,2763(L/Tv) - 26218$  (Opción 2); Para el equipo Pundit Plus y la ecuación  $E_c = 10,181(L/Tv) - 28245$  Para el equipo Controls.

El análisis de los resultados nos permite concluir que la técnica no debe ser abordada como un método sustituto, sino más bien como un método adicional o complementario que permite conocer desde su perspectiva propiedades y características del concreto especificado atendiendo a su calidad y durabilidad.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Director RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ; Codirectora LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE ELASTIC MODULUS UNREINFORCED CONCRETE FROM MEASUREMENT OF ULTRASONIC PULSE VELOCITY (V.P.U) \*

**AUTHORS:** Jairo Iván VARGAS ARDILA (jairoivanvargasardila@hotmail.com); Juan Carlos RAMÍREZ ALCÁZAR (juan.c\_ramirez@hotmail.com). \*\*

**KEYWORDS:** concrete, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus, static modulus, Poisson's ratio.

## DESCRIPTION

This work presents regression models obtained from velocity measurements in Cylindrical Concrete Specimens and the values obtained with its subsequent destruction in uniaxial compression tests, In order to establish a relation that allows to fit readings produced by the non-destructive testing of UPV, with the one obtained in the destructive testing of resistance to compression concerning to modulus of elasticity, to samples of specified concrete based on the literature and mentioned legislation, from the characteristics presented in the materials used by an important concrete mixer which distributes to Bucaramanga and its metropolitan area.

It was analyzed 200 specimens made inside the concrete mixer with dimensions of 10X20 cm, with resistances of 140, 210, 245, 280, 350 [Kgf/cm<sup>2</sup>], 40 specimens per resistance. It was practiced a visual inspection test to every specimen, 15 days after the curing finished, it was practiced to them the non-destructive testing of UPV for every resistance, after this the destructive test of resistance was generated to the compression and it was obtained the static modulus of elasticity of every specimen by means of the use of the equation  $E_c=6250\sqrt{f_c}$  in Kg/cm<sup>2</sup> or  $E_c=1950\sqrt{f_c}$  in MPa proposed for Bucaramanga's concretes and its metropolitan area as a modification to the fixed one in the norm NSR-10 of general use.

In this study is proposed the equations  $E_c= 0,4646E_{d_{equipo}} - 6342$  (option 5);  $E_c = 8,0728VPU_{equipo} - 20419$  (Option 2);  $E_c= 9,2763(L/Tv) - 26218$  (Option 4) for Pundit Plus equipment and the equation  $E_c = 10,181(L/Tv) - 28245$  for Controls equipment.

The analysis of the results allows us to conclude that the technique should not be approached as a substitute method, but rather as an additional or complementary method that allows to know from its perspective properties and characteristics of the specified concrete one according to its quality and durability.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Director RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ; Codirectora LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

## INTRODUCCIÓN

Para el análisis y diseño de estructuras en concreto es utilizado el módulo de elasticidad estático ( $E_c$ ) mediante el ensayo de resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) usando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico.

A nivel nacional, el módulo de elasticidad estático empleado en el diseño estructural se encuentra sugerido en la norma NSR-10 a partir de la ecuación  $E_c = 3900\sqrt{f'_c}$  [MPa] ( $f'_c$ = Resistencia a la compresión del concreto).

Sin embargo, ha sido necesario revisar la norma NSR-10 a la luz de cada región del país, ajustando la ecuación a las características geológicas propias de cada región. Son varias las investigaciones que se han adelantado en este campo con la participación y colaboración de importantes empresas concreteras que fabrican y distribuyen material en el departamento de Santander, encontrando que la ecuación sugerida por la NSR-10, sobrevalora en un 50% las características geológicas de los agregados de Santander [3] y con base en esto se sugiere la ecuación  $E_c=1950\sqrt{f'_c}$  [MPa] para conocer el módulo de elasticidad estático del concreto en Santander.

La técnica de medición de velocidad de pulso ultrasónico permite conocer el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) del concreto a partir de la ecuación  $E_d = (\rho V^2(1+\sigma)(1-2\sigma)/(1-\sigma))$  [Pa].

Teniendo en cuenta el registro que reporta el consumo del concreto a nivel mundial, vale la pena optimizar los métodos de evaluación a los que es sometido, sobre todo si mediante éstos métodos se reducen los costos, el tiempo y facilidad de mantenimiento.

Atendiendo a la información anterior en la presente investigación se midió la velocidad de pulso ultrasónico en especímenes cilíndricos de concreto y los valores alcanzados con su posterior destrucción en pruebas uniaxiales a la compresión usando el método de mínimos cuadrados, obteniendo las ecuaciones de correlación, entre el módulo de elasticidad estático ( $E_c$ ) y dinámico ( $E_d$ ) del concreto usado en Santander.

Las ecuaciones ajustadas se encontraron para dos unidades, el equipo de ultrasonido PUNDIT PLUS (CNS FARNELL) y el equipo UPV E0048 (CONTROLS).

## **1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con el planteamiento del problema, justificación, alcance, estado del arte y objetivos planteados en la investigación.

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Desde el ejercicio profesional que conlleva el estudio del concreto y siguiendo la normativa conferida para éste, la presente investigación, busca establecer una correlación orientada a evaluar el módulo de elasticidad ajustándolo a las características propias de las materias primas de la región.

El método de medición de pulso ultrasónico ha sido usado hace aproximadamente cincuenta años en muchos países y día a día ha ido incrementando sus aplicaciones gracias a la tecnología, como una alternativa de prueba no destructiva. Es de gran importancia para las diferentes regiones de un país que trabajen con la técnica de velocidad de pulso ultrasónico, consolidada como una de las más usadas para determinar la durabilidad del concreto, entre otras relevancias; establecer una correlación que permita llevar un control para el cual es recomendado en lo posible instaurar por cada hormigón fabricado una correlación fiable, mediante el uso de probetas representativas realizadas durante su construcción y curadas en las mismas condiciones, evitando la extracción de una serie de núcleos de concreto perjudicando la estructura en servicio. De los estudios encontrados en la literatura no se reporta como tal un método de ajuste general del equipo debido a la diversificación y diferencias que presentan las materias primas pertenecientes a cada zona o región del mundo. La presente investigación abordó ésta temática para contribuir al conocimiento y al desarrollo de la técnica y tratar de establecer una correlación con datos reales recopilados en la presente investigación, referente a los arrojados por dicho método y el ensayo

de compresión, en base a estudios preliminares ajustados a las materias primas de la región; investigación, apoyada por una importante concretera de la ciudad y la Universidad Industrial de Santander.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El interés de conocer las propiedades (como la resistencia) del concreto in situ han aumentado desde los años 1960 y progresos significativos han sido hechos con respecto a las técnicas, los métodos y los aparatos de ensayos. Eso es el resultado del aumento de las estructuras en concreto sobre todo las nuevas que presentan signos de deterioro. Así se desarrollan numerosos métodos de ensayos que permiten evaluar la durabilidad o integridad de las estructuras [2]. En efecto los daños eventualmente causados a la estructura durante ensayos tradicionales pueden perjudicar al rendimiento de la obra, al ser extraídos los núcleos para su posterior ensayo. Eso se traducirá en un coste suplementario de tiempo y mano de obra; así los métodos no destructivos pueden ser muy recomendables. Los inconvenientes del ensayo de compresión a rotura justifican el interés de los ingenieros por desarrollar otros tipos de tecnologías de control de calidad para estimar la resistencia del hormigón. Conocer el módulo de elasticidad del concreto en estructuras a diferentes edades durante su tiempo en servicio, permite estar al tanto del comportamiento interno de las fuerzas en el material y si nos basamos en un historial detallado que además de proveernos información del proceso de fabricación nos entere sobre la calidad de cada uno de los materiales utilizados, permitirá establecer juicios de valor acertados sobre el estado del material.

## **1.3 ALCANCE**

Uno de los problemas sobre el que los ingenieros centran su atención es la posibilidad de dictaminar el estado de una estructura de hormigón reduciendo el coste de la campaña de control y conservando la integridad física de la estructura a lo largo de esta campaña. En efecto, en el campo del concreto el número de probetas sometidas a un ensayo de rotura para determinar la resistencia a

compresión, alcanza proporciones exageradas en algunos casos; lo que se traduce en un aumento de costos debidos a la campaña de control simplemente basada en estos tipos de ensayos. Por lo que es necesario estudiar como mínimo 30 especímenes por resistencia para que el análisis estadístico sea representativo [12]. Cit., p. 189 y es precisamente de éste problema, del que nace la presente investigación.

#### **1.4 ESTADO DEL ARTE**

En el análisis y diseño de estructuras de concreto es utilizado el módulo de elasticidad (Módulo de Young) del concreto  $E_c$ , parámetro relacionado con la resistencia a compresión del mismo. En Colombia, el módulo de elasticidad usado en el diseño estructural está basado en los valores recomendados en la “Norma Sismo Resistente de 2010 (NSR-10)” [42]. El comité 364 del ACI (American Concrete Institute) [4] en su guía para la evaluación de estructuras de concreto, ha recomendado la utilización de la técnica no destructiva de velocidad de pulso ultrasónico para determinar las diferentes propiedades y condiciones físicas del concreto como la resistencia a la compresión. Una de las aplicaciones más comunes de la técnica ha sido la verificación del nivel de calidad de las estructuras de concreto basándose en la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico con la resistencia a la compresión. De esta manera, Malhotra [5] pp. 34-35 estableció un criterio de aceptación para el concreto, en el cual calificó al material como excelente si presenta velocidades de pulso arriba de los 4575 metros por segundo, bueno con velocidad en el rango de 3660 a 4575, cuestionable si el pulso transita entre 3050 y 3660, pobre para velocidades entre 2135 y 3050 y finalmente muy pobre con mediciones por debajo de los 2135 metros por segundo. Chung y Law [6] pusieron en duda este tipo de criterio de calificación para el concreto, ya que encontraron que pequeñas diferencias en la velocidad de pulso, en ocasiones reflejan diferencias relativamente grandes en la calidad de los concretos. Lo anterior se debe a que son muchos los factores que influyen en la relación de la velocidad con la resistencia del concreto. Sturup, Vecchio y Caratin [7]

establecieron que tanto la velocidad de pulso ultrasónico como la resistencia a la compresión están influenciados por los mismos factores, pero éstos pueden afectar a cada una de las dos variables en diferentes medidas. Los factores más importantes que estos autores encontraron fueron: las propiedades de los componentes, las proporciones establecidas, las condiciones de curado, el contenido de humedad del concreto y la acción del deterioro ambiental. Por su parte Anderson y Seals [8] encontraron que la relación agregados/cemento tienen un efecto significativo en la relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso, ya que cuando se varía esta razón se pueden generar grandes diferencias en los valores de la velocidad ultrasónica, debido a que el pulso es generalmente más rápido a través del agregado grueso que en el interior de la pasta de cemento; mientras que el mismo cambio en esta relación puede producir en la resistencia, apenas una pequeña diferencia o incluso un cambio en sentido inverso. Muchos investigadores han encontrado que la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión se ve afectada significativamente cuando se varía el tipo de agregado, manteniendo bajo control de laboratorio la mayoría de los otros factores, como son: tipo de cemento, proporciones, procedimiento de compactación y curado, contenido de humedad, entre otros. Por esto, autores como Jenkins [9] han llegado a la conclusión que debido a que no hay una relación estándar entre la velocidad y la resistencia, la técnica no debería ser usada para predecir la resistencia del concreto; excepto en los casos en los que se haya establecido una relación entre las dos variables para el tipo de concreto específico sujeto a evaluación. De acuerdo a lo establecido arriba, Castellanos [10] estudió la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión del concreto, utilizando una muestra de agregados calizos triturados provenientes de la ciudad de Mérida, México; logró obtener un coeficiente de determinación de 0,86 para la población estudiada, el cual representa una correlación estadística entre las variables, razonablemente buena. El módulo de elasticidad del concreto es una propiedad mecánica que refleja la habilidad que tiene el concreto para deformarse elásticamente, el cual

puede ser obtenido aplicando cargas conocidas sobre un espécimen para evaluar la deformación del material (Pauw, 1960) [3]. Este módulo describe la rigidez relativa de un material. Es medido en laboratorio y determinado con la pendiente de la región elástica de la curva esfuerzo/deformación (Helvatjoglu-Antoniades et. al., 2006). La resistencia y comportamiento dentro de un elemento de concreto bajo cargas depende de la compatibilidad del mortero y agregados en términos del módulo de elasticidad del mortero y del agregado grueso (Mesbah et. al., 2002; Serrano et. al., 2009). Cabe decir que la forma, textura, densidad, y porosidad de los agregados son propiedades específicas de los materiales y representan un efecto significativo en la calidad del concreto (Al-Rousan et. al., 2007). El módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ) ha sido considerado como un factor importante en el diseño de estructuras de concreto (Ruiz et. al., 2007; Hernández, 2005; Chen et. al., 2001; Huo et. al., 2001). Para su determinación se plantean diferentes procedimientos experimentales para mezclas en estado fresco donde se mide la deformación durante el tiempo de fraguado (Chen et. al., 2001), así como en estado endurecido en donde se utiliza un extensómetro con el cual se miden deformaciones (Hernández, 2005). Estudios realizados sobre un total de 1,300 muestras analizadas en Bogotá demostraron que las ecuaciones del código colombiano NSR-10, sobreestima el valor de los concretos de la capital (Ruiz et. al., 2007), La norma, sugiere; como ecuación general para la determinación del  $E_c$  la siguiente expresión  $E_c=3900*\sqrt{f_c}$  (MPa) y cuando se conoce el origen de los agregados y se dispone de  $W_c$  (Peso unitario) y  $f_c$  las siguientes ecuaciones:  $E_c=(W_c)^{1.50}*0.047\sqrt{f_c}$ (MPa) para material Ígneo;  $E_c=(W_c)^{1.50}*0.031\sqrt{f_c}$ (MPa), para material sedimentario y  $E_c=(W_c)^{1.50}*0.041\sqrt{f_c}$  (MPa) para material Metamórfico. Entre tanto, determinaciones del  $E_c$  para la ciudad de Bucaramanga en un total de 70 muestras en tres concreteiras arrojaron valores sobreestimados de  $E_c$  para materiales metamórficos y subestimados para materiales sedimentarios (Hernández, 2005). Luego Se sugiere evaluar las diferentes ecuaciones que permiten determinar el valor del módulo de elasticidad partiendo del peso unitario

$W_c$  y de la resistencia del concreto  $\sigma$  para Bucaramanga (Topcu y Ugurlo, 2007) [3].

Otras investigaciones encontraron que las ecuaciones ajustadas cuando se conoce la resistencia máxima es  $E_c=1875*\sqrt{f_c}$ (MPa) y cuando se conoce el peso unitario y la resistencia máxima es  $E_c= (W_c)^{1.50}*0.016*\sqrt{f_c}$ (MPa) y en cuanto al módulo dinámico, para cuya determinación se utilizó el medidor de pulso ultrasónico, la relación entre el módulo estático y dinámico es  $E_d = 11.86*E_c$  y el valor del módulo de Poisson para la medida de las muestras fue del orden de 0.16 para concretos normales.(Torrado L. y Porras N., 2009) [11]. En la última investigación referente al módulo de elasticidad estático para Bucaramanga; se propone utilizar la ecuación  $E_c=6250*\sqrt{f_c}$  (en  $Kg/cm^2$ ) en lugar de la fórmula sugerida por el NSR-10. Por otro lado, evaluando la fórmula propuesta por el ACI, se recomienda utilizar esta ecuación cuando se tenga conocimiento del peso unitario  $W_c$  del concreto y trabajar la ecuación ajustada a  $E_c=0.054W_c^{1.5*}\sqrt{f_c}$  en  $Kg/cm^2$ , observándose que para concretos con  $W = 2,375 Kg/m^3$  y  $f_c = 210 kg/cm^2$ , la ecuación propuesta por el NSR-10 sobrestima los valores de  $E_c$  en un 50%, entre tanto que la ecuaciones propuestas por el ACI y el CEC sobrestiman el  $E_c$  en un 24% y 46.2% respectivamente [3].

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

- ❖ Evaluación del módulo de elasticidad en concreto sin refuerzo a partir de medidas de velocidad de pulso ultrasónico.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

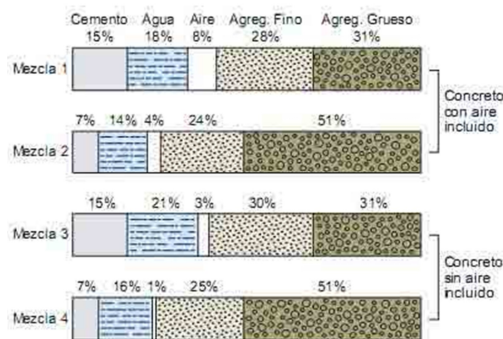
- ❖ Determinar mediante el equipo de ultrasonido de baja frecuencia la velocidad de pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad de muestras de concreto especificadas.
- ❖ Evaluar el módulo de elasticidad del concreto especificado mediante resultados de resistencia a la compresión.
- ❖ Ajustar la ecuación del módulo de elasticidad utilizada por los equipos de ultrasonido MODEL PC 1600 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA y la unidad de ultrasonido MODEL 58-E0048 Tipo UPV E48 marca Controls.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

**2.1 CONCRETO.** El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava, creando roca artificial. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementosos y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta. Es un material versátil en cuanto a su forma (se puede moldear), función (Uso estructural y no estructural) y economía, ya que la tecnología desarrollada a su alrededor hace posible su competencia no solo con las construcciones de piedra y madera, sino también con las de acero [12]. Cit., p. 19. La figura 1 muestra los componentes del concreto.

### 2.1.1 Componentes del Concreto

**Figura 1. Variación de las Proporciones de los Materiales Usados en Concreto**



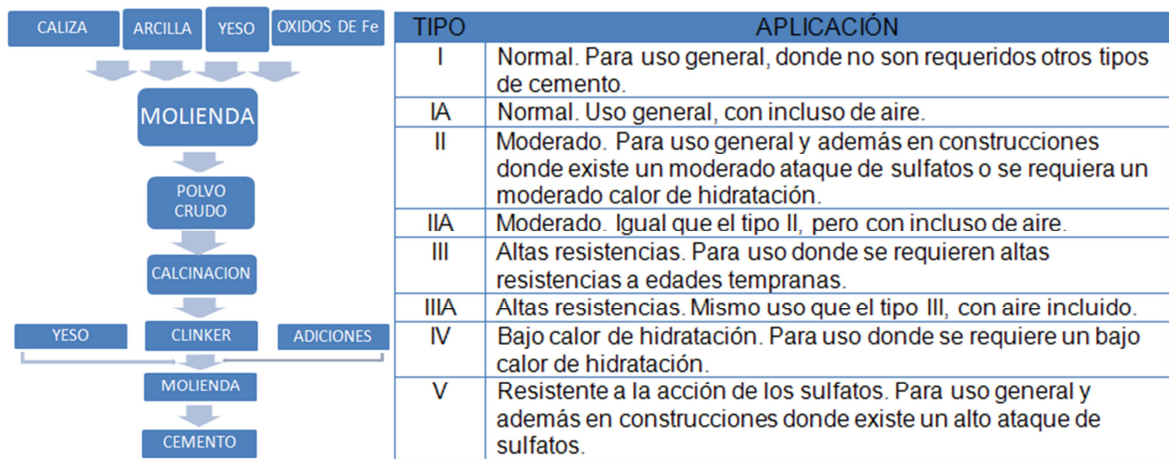
La barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados de pequeño tamaño. Las barras 2 y 4 Representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes.

**Fuente:** Notas del Ingeniero Civil 2011 [13]

**2.1.1.1 Cemento.** Material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. En el medio de la construcción y más específicamente en la fabricación de concreto para

estructuras, es reconocido que al mencionar la palabra cemento, implícitamente esta se refiere al cemento portland, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción química. Este proceso se llama hidratación por lo cual son llamados también cementos hidráulicos [12] Cit., p. 27. Ya que el cemento presenta grandes características su aplicación es principalmente en construcciones que requieran una elevada firmeza y resistencia.

**Flujograma 1.** Proceso de Fabricación del Cemento Portland.; Tabla I. Clasificación del Cemento



**Fuente.** De derecha a izquierda apuntes del Ingeniero Civil [14] y Norma ASTM C 150 [15].

**Composición Química Del Cemento Portland.** Las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento portland consisten principalmente de cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Estos compuestos interactúan en el horno rotatorio de producción, para formar una serie de productos más complejos, hasta alcanzar un estado de equilibrio químico, con la acepción de un pequeño residuo de cal no combinada, que no ha tenido suficiente tiempo para reaccionar [12]. Cit., p. 37

**2.1.1.2 Agua.** Es el componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello se clasifica en agua de mezclado y agua de curado.

Agua De Mezclado: El agua de mezclado debe ser: Agua potable, limpia de impurezas como ácidos, bases y materias orgánicas. Esto es con el fin de evitar que propiedades como: tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, acabado y durabilidad, sean afectadas por las impurezas. La norma ASTM C 94 presenta las especificaciones del agua a utilizar en el mezclado como también el contenido máximo de sustancias disueltas o sales aceptables para uso dentro de la mezcla.

Agua de Curado: Constituye el suministro adicional de agua para hidratar eficientemente el cemento incluido en el concreto [12]. Cit., p. 57-59

**2.1.1.3 Agregados.** Los agregados son materiales inorgánicos naturales o artificiales que conforman el esqueleto granular del concreto, puesto que al mezclarse con la pasta creada por el cemento y agua, ocupan entre el 60 y 80% del volumen de la unidad cúbica de concreto. Por esto se considera que afecta significativamente las propiedades buscadas, al ser el elemento mayoritario en la mezcla [16]. **Estos pueden clasificarse según su:** Tamaño: Los agregados generalmente se dividen en dos grupos finos y gruesos. *El agregado fino* está constituido por arenas y/o piedras trituradas o manufacturadas cuyo tamaño debe estar entre 75µm (malla 200) hasta 4.75mm. El contenido del agregado fino en un concreto normalmente se encuentra entre 35 y 45% por masa o volumen total de agregado. *Los agregados gruesos* son aquellos cuyo tamaño de partícula está entre 4.75mm (son retenidos en la malla 4) y 50mm. El tamaño de agregado grueso más utilizado es el de 19mm (3/4") o el de 25mm (1") [17]. Peso Específico: Normal 2,400K/m<sup>3</sup>; ligero 1,800K/m<sup>3</sup> y pesado (3,200 K/m<sup>3</sup>) [18]. Origen: La siguiente tabla resume los diferentes tipos de rocas usadas en la producción de concreto.

**Tabla II. Familias De Rocas**

	Tipo de roca y origen	Nombre	Componentes mineralógicos	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto	
Ígneas	Plutónicas	Granito	Cuarzo, feldespatos, mica y plagioclase	Fanerítica	Batolitos cuerpos intrusivos	Fácilmente intemperizable en clima tropical, intemperismo esferoidal	
		Diorita	Plagioclase y mica	Fanerítica	Cuerpos intrusivos		
		Gabro	Plagioclase y mica	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	Alto peso específico	
	Volcánicas piroclásticas	Riolita	Cuarzo, feldespato, plagioclase, vidrio y mica	Afanítica porfídica	Domos flujos de lava	Altamente reactiva con los álcalis del cemento	
		Andesita	Plagioclase, vidrio y mica	Afanítica porfídica	Derrames de lava		
Sedimentarias		Basalto	P1, V Y M	Afanítica vesicular	Derrames de lava	Alta resistencia a la compresión, porosa y resistente a la abrasión	
		Tobas	Variable	Porfídica	Pseudoestratificación	Dependiendo de la mineralogía pueden ser reactivas y algunas son muy deleznales	
	Clásticas	Conglomerado	Fragmentos de roca y matriz	Fragmentos redondeados 2mm de diámetro	Estratificación gruesa, lentes rellenos de cauces, masiva		
		Arenisca	Qz, Pk, p1 y fragmentos de roca	Fragmentos 2mm a 1/16 mm de diámetro	Estratificación masiva lentes	Puede contener cementante silico que es reactivo con los álcalis del cemento	
		Lutita	Materiales arcillosos	Fragmentos 1/6 mm de diámetro	Laminaciones masiva	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión, puede hidratarse a través de los materiales arcillosos	
	No clásticas	Caliza	Calcita	Cristalina	Estratificación masiva	Altamente soluble	
		Marga	Calcita y minerales arcillosos	Cristalina	Estratificación	Sus minerales arcillosos puede hidratarse fácilmente	
		Dolomita	Calcita y dolomita	Cristalina	Estratificación masiva	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato (a través de la desdolormitación)	
		Yeso	Yeso anhidrita	Cristalina	Vetas y lentes	Muy ligero, baja restencia a la abrasión	
		Carbón	Carbón	Criptocristalina	Mantos, vetas, lentes	Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento pórtland	
	Metamórficas	Foliadas	Pizarra pilita	Qz, micas, clorita, sericita.	Foliada de grano fino	Foliación	Deleznable
			Esquisto	Micas, Fk, clorita Qz, calcita y feldespatos	Foliada de grano medio	Foliación	A veces muy deleznable
			Gneiss	Qz, feldespatos ferromagnesianos	Foliada de grano grueso	Foliación masiva	
		No foliadas	Hornfels	Mica, granate, Px cuarzo, feldespatos	Afanítica	Masiva	Puede presentar silice del tipo reactivo con los álcalis del cemento
			Cuarcita	Qz, feldespatos sillimanita	Granoblástica	Masiva	Denhornfles
Mármol skarn			Calcita, Px y AN.	Granoblástica	Masiva		

**Fuente:** Influencia de los Agregados Pétreos en las Características del Concreto [19].

### 2.1.1.3.1 Propiedades de los Agregados

Absorción: Es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla [20]. Una buena

Consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas.

Porosidad: Se relaciona con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad y su volumen total. A nivel práctico, la medida a través de la cual se conoce cuál es el nivel de porosidad de un agregado es su capacidad de absorción.

El efecto de la porosidad de las partículas de agregado es muy importante dentro del concreto ya que no solo afectan propiedades mecánicas como la adherencia, resistencia a la compresión entre otras, sino también propiedades como durabilidad, resistencia al congelamiento y deshielo, etc. Ya que una partícula porosa es menos dura que una partícula compacta o maciza [12]. Cit., p. 96 – 97.

Adherencia: Es la interacción que existe entre la zona de contacto agregado-pasta, este tipo de interacción se produce por fuerzas de origen físico-químico. Por lo tanto, entre mayor adherencia se consiga entre la pasta de cemento y el agregado mayor será la resistencia del concreto. Esta propiedad mecánica depende de la calidad de la pasta de cemento, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas de agregado [21] Cit., p. 92.

**2.1.1.4. Aditivos.** Son materiales distintos del agua, los agregados y el cemento hidráulico que se utilizan como ingredientes en el concreto y se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado. En términos de su

función estos pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes. Hay algunos otros, como los inclusores de aire, las puzolanas, los colorantes, etc. Pueden ser utilizados para modificar las propiedades del concreto de manera que lo hagan más adecuado para las condiciones de trabajo. Pero también pueden ser usados por razones de orden económico, ya que permiten en algunos casos reducir los costos de fabricación del concreto [12] Cit., p. 24.

#### **2.1.1.5 PESO UNITARIO DEL CONCRETO**

El concreto convencional, empleado normalmente en pavimentos, edificios y en otras estructuras tiene un peso unitario dentro del rango de 2,240 y 2,400 kg por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>). El peso unitario del concreto, varía dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado, de la cantidad del aire atrapado o intencionalmente incluido y de los contenidos de agua y de cemento, mismos que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo del agregado.

#### **2.1.2 GENERALIDADES DEL CONCRETO.**

Su desarrollo se ha visto estrechamente vinculado al del “Concreto Armado”, debido a que inicialmente se le concibió para fines estructurales, pues la asociación de concreto propiamente dicho y armaduras o varillas de acero forman un sólido único desde el punto de vista mecánico. El concreto ofrece, como las piedras naturales, una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción (Por lo general, su resistencia a la tracción es del orden de 10% de su resistencia a la compresión); por lo tanto, es inadecuado para piezas que han de resistir tracciones o flexiones. Pero al disponer varillas de acero en las zonas de tracción, se suple esta deficiencia, teniendo entonces una pieza resistente a la flexión de manera que el “concreto armado” es una piedra artificial que puede resistir esfuerzos de compresión, tracción y flexión, circunstancias que no se dan en las piedras naturales. Por tal motivo, las propiedades y las características del concreto se estudian con el fin de determinar el diseño de mezcla adecuado para las condiciones especificadas en un proyecto dado. Para

lograr las mejores propiedades mecánicas, el concreto debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que este deje (Palbol 1996). [22]. El concreto es un material compuesto, en el cual existe una gran variabilidad en las características de sus componentes, siendo estas de carácter físico y químico produciendo diferentes efectos, tanto en su trabajabilidad como en su comportamiento en estado endurecido, el cual regirá su vida de servicio. El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto está determinado principalmente, por las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos y de la interfase entre éstos dos componentes. Debido a lo anterior, morteros con diferentes calidades y agregados gruesos con diferentes características (Forma, textura, mineralogía, resistencia, etc.), pueden producir concretos de distintas resistencias (Özturan y Cecen 1997) [23]. Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación de sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Puesto que estos forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Chan 1993) [24]. La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos (Cerón et al.1996) [25]. Además de lo anterior, el comportamiento del concreto esta también determinado por la influencia de la relación agua/cemento, debido a que se puede obtener las siguientes ventajas a la hora de reducir el contenido del agua: (1) incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión, (2) obtener menor permeabilidad y por ende mayor hermeticidad y menor absorción, (3) incrementar la resistencia al intemperismo, (4) logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo y (5) reducir las tendencias de agrietamientos por contracción. Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto, a condición que se pueda consolidar adecuadamente.

Menores cantidades de agua de mezclado resultan en mezclas más rígidas; pero con vibración, aun las mezclas más rígidas pueden ser empleadas. Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se puede modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación. Los aditivos se usan comúnmente para: (1) ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento, (2) reducir la demanda de agua, (3) aumentar la trabajabilidad, (4) incluir intencionalmente aire, (5) ajustar otras propiedades del concreto. Después de un proporcionamiento adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado, y curado, el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, con resistencia al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco o nulo mantenimiento [26].

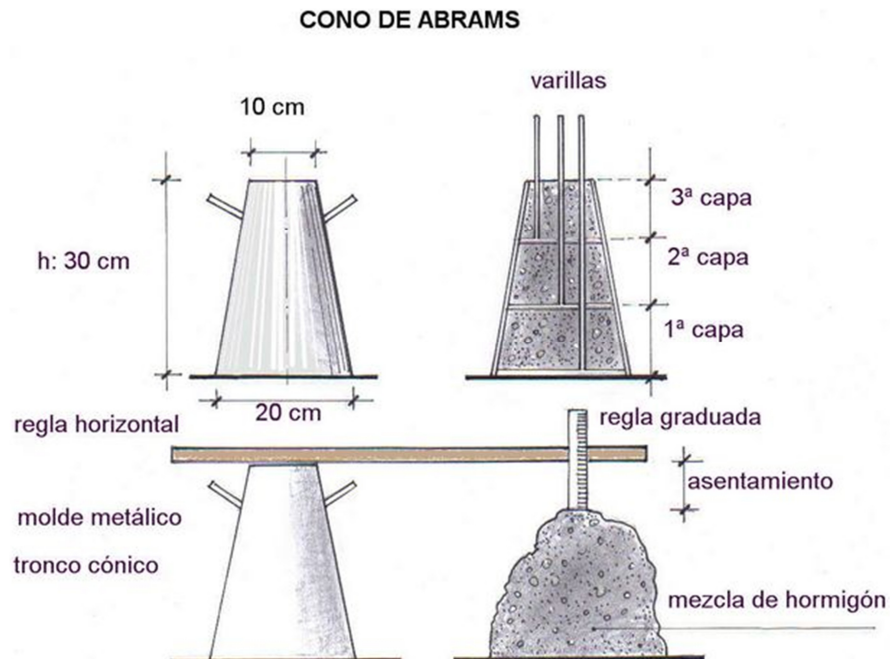
Naturaleza de la Resistencia del Concreto. El concreto por su propia naturaleza es una masa endurecida, heterogénea y discontinúa. Debido que al exudarse y evaporarse el agua libre, deja microporos y canales capilares continuos en el gel de cemento, los cuales se convierten posteriormente en medios para el intercambio de Humedad entre el concreto y el ambiente que lo rodea. Por otro lado, la presencia de agregados incide notablemente en la heterogeneidad, debido a la diversidad de tamaños, textura superficial y geometría de las partículas. Todo esto es lo que hace imposible lograr una adherencia completa entre la pasta (matriz) de cemento y cada una de las partículas del agregado. Sin embargo, esta heterogeneidad del concreto y su naturaleza discontinúa son ventajosas debido a que proporcionan la “cuasiductilidad” y los mecanismos de disipación de energía esenciales para un material de construcción bajo *cargas estáticas y dinámicas*. [12] Cit., p. 129.

## 2.2. CONCRETO FRESCO (PROPIEDADES Y ENSAYOS)

**Manejabilidad.** Es la cantidad de trabajo interno útil necesario para producir una compactación completa, entendiéndose como trabajo interno a la energía requerida para vencer a la fricción interna entre las partículas en el concreto, debido a que la fricción interna es una propiedad intrínseca de la mezcla y no depende de un tipo o sistema particular de construcción [27].

Ensayo de Asentamiento: Mide la consistencia o fluidez de una mezcla fresca de concreto cuyo tamaño máximo de agregado grueso puede ser hasta de 50.8 mm (2") figura 2. Es un indicativo de la distribución proporcional de la cantidad de agua y demás materiales empleados en la mezcla, su resultado indica las variaciones que puede sufrir la mezcla durante su producción y se encuentra especificado en la norma NTC 396 [28].

Figura 2. Ensayo de Asentamiento Usando el Cono de Abrams.



Fuente. Construmática [29]

Ensayo de la Bola de Kelly: Esta entre los procedimientos que amplía la información que proporciona el cono de Abrams o que sustituye a este, basado en la resistencia a la penetración del concreto. Consiste en un cilindro de masa constante de punta esférica que se hunde bajo la acción de su propio peso y dependiendo de la profundidad que alcanza depende su manejabilidad (Descrito en la norma ASTM-C360) [12] Cit., p. 114.

Contenido de Agua: Es el factor que más influye en la manejabilidad y la base para analizar el comportamiento de los demás componentes al interior de la mezcla, debido a que si se crea una pasta con poca agua y mucho cemento será muy rígida por falta de agua evaporable, lo cual hace inmanejable la mezcla al no poder lubricar los agregados. Por el contrario si el contenido de agua es alto y del cemento es bajo, la pasta puede llegar a ser tan fluida, por exceso de agua evaporable, que no es capaz de impedir la segregación de los agregados (especialmente los gruesos). Bajo estas consideraciones se debe aclarar entonces que la pasta fresca es una suspensión y no una solución de cemento en agua y que entre más diluida sea, mayor será el espacio entre las partículas de cemento, por lo cual será más débil la estructura de la pasta, sin importar el estado de hidratación del cemento. [12] Cit., p. 120.

Contenido de Aire: Se debe tener un control de este puesto que refleja un aumento en la manejabilidad cuando el concreto se encuentra en estado plástico debido a que una parte de las burbujas de aire aumentan el volumen de la pasta además de actuar como “balineras” entre los agregados permitiendo una mejor movilidad. La disminución de agua recomendada en relación al aire permitido debe ser de un 3% por cada 1% de aire. En general el contenido de aire en una mezcla de concreto aumentara si se presenta una o varias de las siguientes situaciones: (1) Mezclas pobres en cemento, (2) Agregados con tamaño máximo menor, (3) Mayor cantidad de arena, (4) Consistencias más húmedas, (5) Operaciones de

mezclado más fuertes o prolongadas y (6) Inclusión de aditivos incorporadores de aire [12] Cit., p. 120.

Gradación del Concreto: La distribución granulométrica de los agregados es otro factor que influye en la manejabilidad de una mezcla de concreto, debido a que un agregado mal gradado presenta un exceso de vacíos que deben ser llenados con pasta en el caso de la arena y con mortero en el caso del agregado grueso, para que la mezcla sea manejable y no quede porosa. Por otra parte, debe evitarse la utilización de arenas muy finas o muy gruesas, ya que con las primeras el requerimiento de agua es muy alto y fácilmente se segregan y con las segundas se obtienen mezclas muy ásperas y poco cohesivas [12] Cit., p. 120-121.

Forma y Textura Superficial de los Agregados: Los agregados gruesos con partículas alargadas, aplanadas o de forma cúbica y textura rugosa exigen una mayor cantidad de arena, agua y pasta en una mezcla, para mantener una manejabilidad comparable, que los compuestos por partículas redondeadas y lisas, debido a la fricción generada por la “trabazón” que existe entre las partículas. Por tanto por el lado de la manejabilidad, son más adecuados los agregados naturales (cantos rodados y arenas de río) que los obtenidos por los procesos de trituración. [12] Cit., p. 121.

Condiciones del Clima: Los agentes atmosféricos pueden cambiar la consistencia de la mezcla debido a que si hay evaporación por causa del sol o del viento, la mezcla se puede endurecer rápidamente y por consiguiente perder manejabilidad. Por el contrario si hay lluvia, aparte de un aumento en la relación agua-cemento y pérdida de resistencia, la humedad de la mezcla se puede incrementar hasta el punto de causar segregación [12] Cit., p. 122-123.

**Segregación.** Se define como la separación de los materiales que constituyen una mezcla heterogénea, de manera que su distribución deje de ser uniforme por falta

de cohesión [12] Cit., p.123. También se entiende como la tendencia que poseen las partículas gruesas de separarse de la fase del mortero del concreto y la deficiencia de esas en el perímetro del concreto colocado. [30]

**Exudación.** Consiste en que parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie del concreto recién colocado o durante el proceso de fraguado, debido a que las partículas no pueden retener toda el agua cuando se asientan. Tanto la cantidad de agua de exudación como la velocidad a la cual esta llega a la superficie del concreto, tienen mucho que ver con la evaporación, debido a que si la velocidad de la evaporación es menor que la velocidad de exudación se forma una película de agua que aumenta la relación agua-cemento en la superficie que posteriormente queda porosa y con baja resistencia al desgaste. Por otro lado si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de exudación se pueden producir grietas de contracción plástica. (NTC- 189)

**Temperatura.** Afecta todas las propiedades del concreto en estado plástico, especialmente el asentamiento y el contenido de aire. Las temperaturas elevadas en el concreto dan por resultado que se requiera mayor cantidad de agua de mezclado para mantener un determinado asentamiento y mayor cantidad de algún aditivo inductor de aire para producir el contenido de aire requerido. La temperatura del concreto fresco depende del aporte calorífico de cada uno de sus componentes, ya que la influencia de cada material de su calor específico, de su masa y de su temperatura, además del calor liberado por la hidratación del cemento, la energía añadida durante el mezclado y el calor absorbido o entregado al medio ambiente [12] Cit., p. 124.

**Masa Unitaria Y Rendimiento Volumétrico.** Consiste en determinar la masa requerida para llenar un molde de volumen conocido, compactándolo con 25 golpes con una varilla de 5/8" lisa. Se mide según lo estipulado en la NTC-1926 [11].

**Tabla III. Ensayo de Medición del Contenido De Aire.**

Ensayo	Norma NTC
Método De Presión Normal	1028
Método gravimétrico	1926
Método Volumétrico	1032

**Consistencia.** Hace referencia al estado de fluidez, es decir que tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla de concreto cuando se encuentra en estado plástico, por lo cual se dice que es el grado de humedad de la mezcla [12] Cit., p. 111.

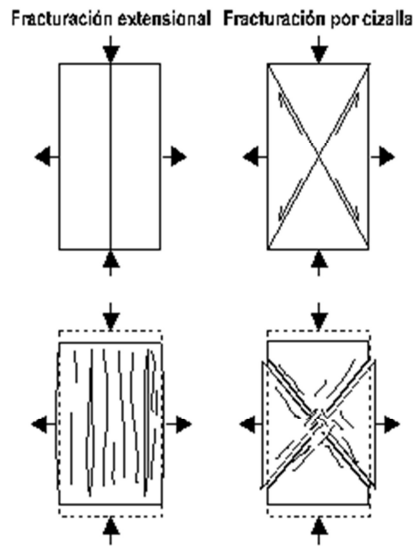
**Plasticidad.** Consistencia del concreto tal que puede ser fácilmente moldeado, pero que le permite al concreto fresco cambiar de forma lentamente si se saca el molde. Por tal razón no pueden considerarse como mezclas de consistencia plástica ni las muy secas ni las muy fluidas [12] Cit., p. 112.

**Peso Unitario del Concreto Fresco.** Consiste en determinar el peso del concreto que se requiere para llenar un molde de volumen conocido.

### **2.3. CONCRETO ENDURECIDO (PROPIEDADES Y ENSAYOS)**

**Resistencia a la Compresión.** Es la característica mecánica principal del concreto, se expresa en Mpa; la metodología experimental puede seguir la norma ASTM D3148-86. Los procedimientos relativos a este ensayo se encuentran especificados en la norma Icontec 550 y 673 [12] Cit., p. 138. El espécimen de concreto es cargado hasta su rotura, por medio de una prensa de características y especificaciones definidas, con una velocidad controlada según la norma NTC-693 [31]. La resistencia a la compresión es la carga por unidad de área a la que el material falla por fracturación por cizalla o extensional (Figura 3).

**Figura 3. Desarrollo de Fracturas Extensionales y de Cizalla como Resultado de Compresión.**

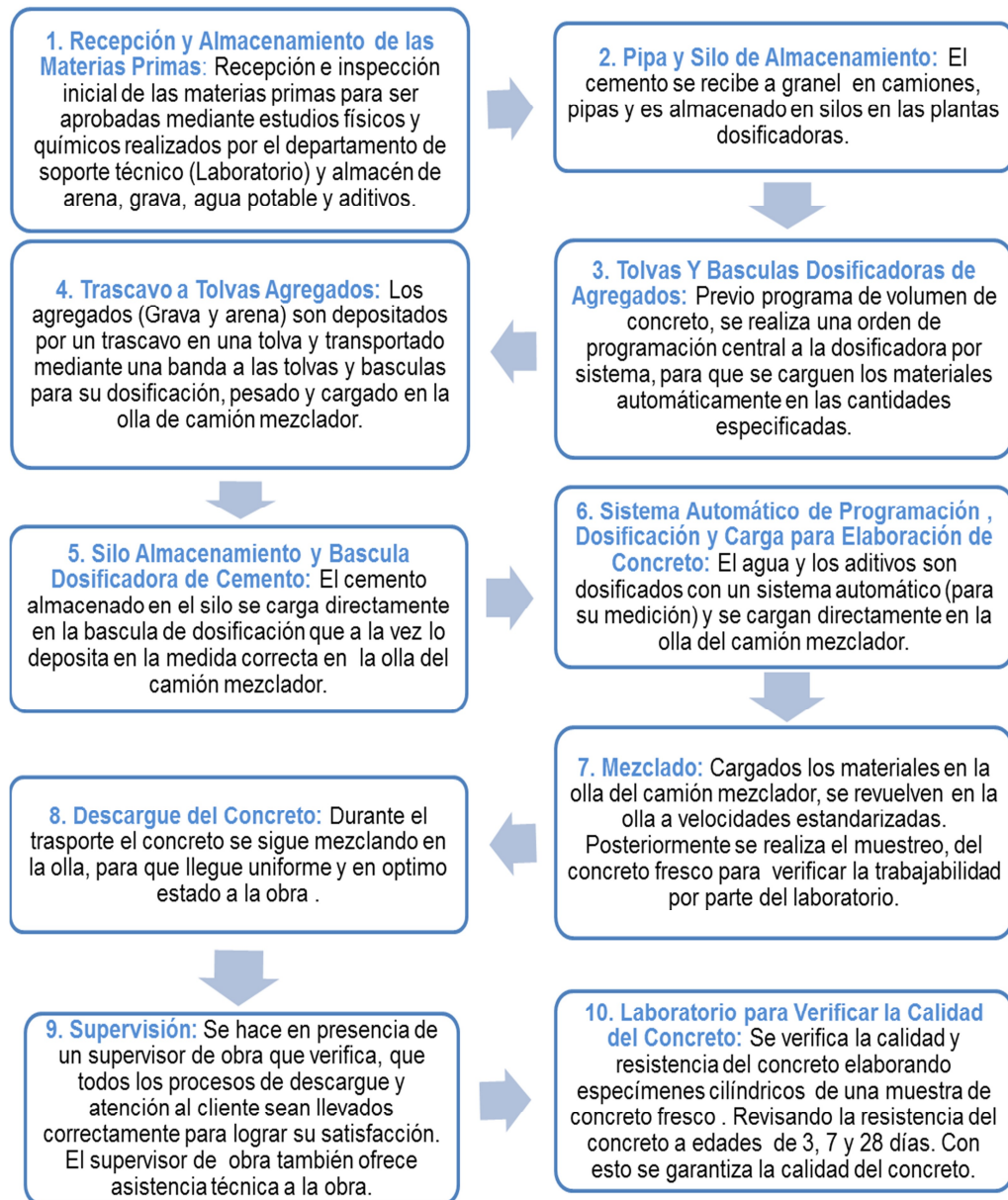


**Fuente.** Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación [32]

**Expansión Térmica.** En general, el incremento de la temperatura de cualquier material produce un aumento de su volumen. Esto se debe a que la energía térmica absorbida induce un incremento en las vibraciones de los átomos constitutivos de la materia, agrandando las distancias interatómicas. [32]

## 2.4. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO.

Flujograma 2. Proceso de Fabricación del Concreto



**Fuente.** Grupo Cementos de Chihuahua adaptaciones los autores [33].

**2.4.1 Caracterización de la Materia Prima.** Consta de una caracterización detallada de los agregados presentes en la mezcla, a fin de conocer el Módulo de finura de la arena, gravedad específica, peso específico, porcentaje de absorción,

tamaño máximo y tamaño máximo nominal. El análisis granulométrico se realiza según las siguientes normas: NTC 77 [34], NTC 78 [35] y consiste en hacer pasar el agregado de cualquier tamaño por una serie de tamices con el fin de seleccionar el material cuya granulometría pueda clasificarse como fino o grueso. A partir de esto, se pesa tanto el material que pasa por cada malla, como el material que queda retenido, a fin de conocer el módulo de finura. Por otra parte, la gravedad específica, masa unitaria, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos, se obtienen siguiendo la metodología presentada por las normas NTC 92 [36], NTC 176 [37] y NTC 237 [38] respectivamente.

**2.4.2 Diseño De Mezcla.** En la actualidad existen diversos métodos de diseño de mezcla disponibles sin que haya variaciones representativas en las proporciones calculadas para cada uno de los materiales a utilizar. Sin embargo en Colombia el método más empleado es “Práctica Recomendada Para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado A.C.I.- 211”.

La ACI (American Concrete Institute) cuenta con un procedimiento a través del cual se puede realizar el diseño de mezcla [39] Este método consiste en una serie de tablas obtenidas de forma empírica, las cuales permiten determinar las cantidades necesarias de cada uno de los materiales presentes en la mezcla [40] A fin de obtener un concreto adecuado y para un uso específico. Los pasos a seguir son: (1) selección del asentamiento, (2) selección de la relación agua/cemento, (3) estimación del contenido de agua, (4) estimación del contenido de cemento, (5) estimación del contenido de agregado grueso, (6) estimación del contenido de agregado fino, (7) fraguado y curado. [12] Cit., p. 226 – 240

**2.4.3 Fraguado.** El fraguado puede definirse como el lapso de tiempo necesario para que la mezcla pase de un estado fluido a un estado sólido, debido a las reacciones químicas que se producen cuando se ponen en contacto el cemento con el agua de mezclado, causando un endurecimiento paulatino de la

mezcla. El fraguado ocurre al exponer las probetas al aire libre durante mínimo 10 horas en las que se busca obtener una parte del endurecimiento que será completado con los 28 días del proceso de curado [41].

**2.4.4 Curado:** El curado es el proceso natural por medio del cual el concreto madura y desarrolla propiedades mecánicas típicas del estado endurecido bajo condiciones de temperatura y humedad. En el tiempo durante el cual se lleva a cabo este proceso se desarrollan una serie de reacciones químicas de hidratación entre el cemento y el agua. Se ha comprobado que mediante el curado en húmedo se tienen las condiciones más favorables para el proceso, además mejores propiedades mecánicas. Según la American Concrete Institute y la Portland Cement Association “El curado tiene una influencia significativa sobre las propiedades del concreto endurecido, tanto en el interior como en su superficie, tales como la resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen y resistencia al hielo- deshielo y sustancias anticongelantes. El desarrollo de resistencia superficial se puede reducir significativamente cuando el curado es defectuoso”.

**2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD.** Se define como la pendiente de la secante trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de 0.40 f.c. El módulo de elasticidad del concreto es sensible al módulo de elasticidad del agregado y puede diferir del valor especificado. Los valores medidos varían típicamente de 120 a 80 por ciento del valor especificado. La norma NTC 4025 Describe los Métodos Para la Determinación del Módulo De Elasticidad Del Concreto. Allí se indica además como medir el Módulo de Poisson. En caso de que no se disponga de un valor experimental el módulo de Poisson puede tomarse como 0.20 [42].

**2.5.1 Módulo de Elasticidad Estático ( $E_c$ ) o Secante del Concreto.** Es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar

sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica [43]. El Módulo de elasticidad estático del concreto se determina a través de la prueba estándar de compresión definida en la Norma ASTM C469<sup>C.8.8</sup> [44] y Puede calcularse como (Duboeuf., 2007)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A_o}}{\frac{\Delta L}{L_o}} = \frac{FL_o}{A_o \Delta L} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

En donde E: es el módulo de elasticidad o Módulo de Young, F: es la fuerza axial, aplicada, Ao: es el área de la sección transversal original, ΔL: es la variación de dimensión longitudinal del objeto y Lo: es la altura original. El módulo de elasticidad experimental de todas la muestras de concreto se obtiene haciendo uso de la siguiente ecuación proporcionada por la norma anterior.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

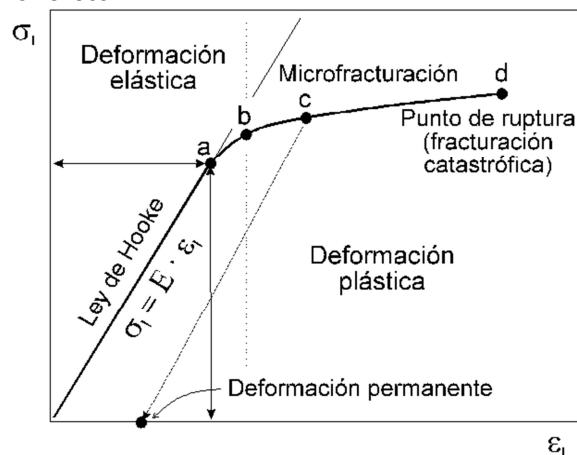
En donde E: Es el módulo de elasticidad en Mpa, S<sub>2</sub>: Es el esfuerzo al 40% de carga ultima, S<sub>1</sub>: Es el esfuerzo a una deformación unitaria  $\varepsilon_1$  0.00005 en Mpa,  $\varepsilon_1$ : Deformación unitaria producida por S<sub>1</sub> y  $\varepsilon_2$ : Deformación unitaria producida por S<sub>2</sub> [3]. En la Figura 4 puede apreciarse un tramo de la curva  $s_f-e_f$  donde el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. Este comportamiento constituye la **ley de Hooke**, que aplica solo para pequeñas deformaciones, hasta un límite denominado **límite de proporcionalidad**, representado en la Figura 4 por el punto **a**. En este tramo, el comportamiento del material es elástico, esto, si al disminuir el esfuerzo aplicado lentamente, se recorre el mismo tramo de la curva en sentido contrario, hasta alcanzar el punto de origen donde el esfuerzo y la

deformación son nulos. La proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación en el tramo de la ley de Hooke permite definir el **módulo de Young** o **módulo de elasticidad** ( $E$ ). Este módulo es la constante de proporcionalidad, de manera que:

$$E = \frac{\sigma_l}{\varepsilon_l} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde el módulo de elasticidad  $E$  es positivo ( $s_l$  y  $e_l$  son negativos) y presenta las mismas dimensiones que el esfuerzo ya que  $e_l$  es adimensional. El valor del módulo de Young es característico para distintos materiales, por lo que puede utilizarse para comparar las características mecánicas de los mismos.

**Figura 4. Curva Esfuerzo-deformación para Compresión, con ilustración de los Tramos Elástico y Plástico del Concreto**

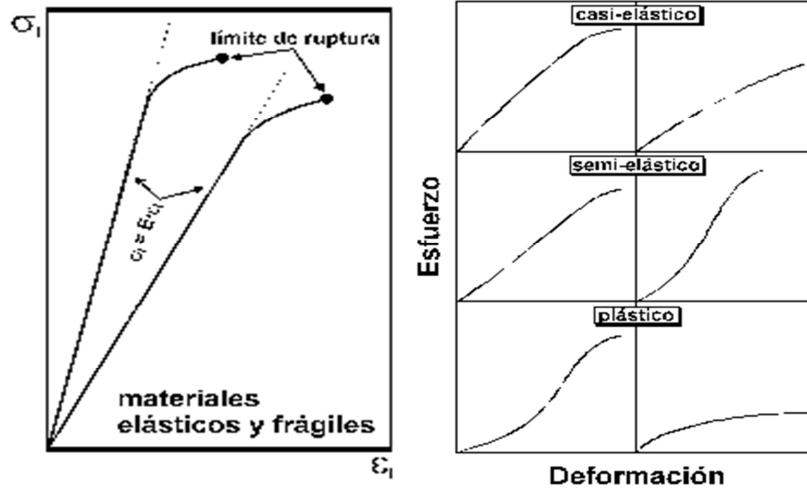


**Fuente.** Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación [32].

El ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático del concreto se hace por medio de la Norma técnica Colombiana 4025 que tiene como antecedente la ASTM C 469 [44]. Para deformaciones superiores al límite de proporcionalidad, existe un cierto tramo de la curva  $s_l$ - $e_l$  donde el comportamiento del material es elástico, aunque no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. El límite en el que el comportamiento del material deja de ser elástico se denomina **límite elástico**, representado por el punto **b** de la curva en la Figura 4. Al aumentar el esfuerzo y superarse el límite elástico (punto **b**), la

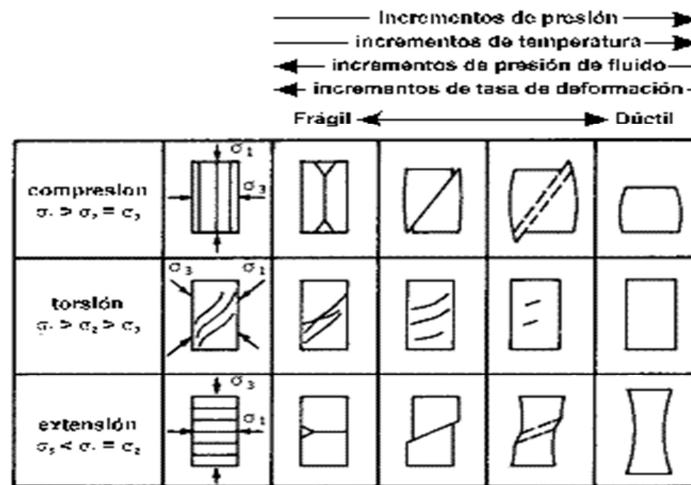
deformación aumenta rápidamente y es en parte permanente. Así, si se disminuye el esfuerzo aplicado lentamente a partir del punto **c** de la curva, se recorrerá el trayecto indicado por una flecha de puntos hasta alcanzar el punto donde el esfuerzo es nulo, pero existe una cierta deformación permanente (el cuerpo no recupera su longitud original). Al aumentar el esfuerzo se llega finalmente al punto **d**, denominado **punto de ruptura**, donde el cuerpo experimenta una fracturación catastrófica debido a esfuerzos cortantes (por cizalladura) o fisuración extensional. Este punto de ruptura define, en términos del esfuerzo compresivo, la **resistencia a la compresión (R)**. Las relaciones entre esfuerzo y deformación ilustradas en la Figura 4 son ideales, ya que representan un comportamiento estrictamente elástico para el material en el tramo lineal de la curva correspondiente a la ley de Hooke. No obstante, los materiales reales muestran relaciones esfuerzo-deformación más complicadas, no siguiéndose estrictamente la relación de linealidad. Esto significa que las curvas esfuerzo-deformación pueden presentar tramos **elásticos, casi-elásticos, semi-elásticos y no-elásticos** (Figura 5). Sólo puede definirse en rigor cuando los materiales son elásticos, ya que la proporcionalidad lineal entre esfuerzo y deformación no se verifica en los materiales casi-elásticos, semi-elásticos y plásticos. A pesar de ello, este módulo puede calcularse para partes determinadas de las curvas esfuerzo-deformación, aunque sin el conocimiento de sus formas este dato sirve de poco. No obstante, cuando los materiales son frágiles, y su comportamiento es elástico o casi elástico, el módulo de Young y la resistencia a la compresión nos permiten tener una idea bastante aproximada de las curvas esfuerzo-deformación, ya que en estos materiales el límite de proporcionalidad, el límite elástico y el punto de ruptura casi son coincidentes. En estos casos, el módulo de Young será muy útil para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales ante la acción de esfuerzos compresivos de tipo uniaxial [32].

**Figura 5. Curvas Esquemáticas Esfuerzo-deformación para Materiales Casi-elásticos, Semi-elásticos y Plásticos**



**Fuente.** Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación [32].

**Figura 6. Deformación Frágil y Dúctil Bajo Compresión, Torsión y Extensión del Concreto**



$s_1$ ,  $s_2$  y  $s_3$ , son los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor, respectivamente.

**Fuente.** Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación [32].

**2.5.2 Módulo de Elasticidad Dinámico del Concreto.** Puede ser determinado no destructivamente usando la prueba de resonancia (Malaikah y otros, 2004) descrita en la norma ASTM C-215, utilizando el pulso ultrasónico y midiendo la velocidad que tarda la onda en atravesar la muestra de concreto.

Nótese que al utilizar la fórmula para la determinación de la velocidad longitudinal del pulso ultrasónico se deduce el módulo de elasticidad dinámico, mediante la siguiente expresión (Malaikah y otros, 2004; Solís y otros) [11].

$$E_d = \frac{\rho v^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

En donde  $E_d$ : es el módulo de elasticidad dinámico del concreto  $\text{MN/m}^2$ ,  $\nu$ : Es la relación dinámica de Poisson,  $\rho$ : Es la densidad del material en  $\text{Kg/m}^3$ ,  $v$ : Es la velocidad de pulso en  $\text{Km/s}$ .

### 2.5.3 Factores que Afectan el Módulo de Elasticidad del Concreto

La microestructura del concreto presenta una estructura heterogénea que exhibe diferentes comportamientos durante el proceso de carga debido a las diversas fases de los agregados, la matriz de cemento + agua y a la interface arena cemento (Shah et. al., 1994; Topcu y Ugurlu, 2007).

Son varios los factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto, unos tendrán relación con los materiales y otros con las reacciones que se dan en estado plástico y endurecido (Ver Tabla 1). La porosidad y el módulo de elasticidad de los agregados también son elementos importantes en la determinación de la rigidez. Es así como Módulos de Elasticidad de materiales no porosos con alta densidad producen módulos de elasticidad extremadamente altos. La relación agua/cemento influye también en el módulo de elasticidad tanto de la pasta como del concreto. Morteros con relaciones A/C bajas ocasionan un incremento en el módulo de elasticidad del concreto. (Adaptado de Topcu y Ugurlu, 2007).

Relación de Poisson. Es la relación entre las deformaciones transversales y longitudinales al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico [44].

## **2.6 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

### **2.6.1 Ensayo de Inspección Visual**

Es un ensayo con el cual se puede obtener información de la condición superficial de los materiales que se estén inspeccionando, con el simple uso del ojo humano o con ayuda de instrumentación auxiliar [45].

### **2.6.2. Ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico**

El método ultrasónico se basa en un fenómeno físico bien conocido: la propagación de ondas en un medio material. Es un método que se utiliza frecuentemente cuando se trata de determinar la uniformidad de un elemento, su espesor, su módulo elástico de Young o de Coulomb. Sin embargo el fenómeno se compleja cuando el medio de propagación (en nuestro caso el hormigón) es heterogéneo, y que las diferentes fases que le componen tienen diferentes propiedades elásticas relativas a la propagación de ondas. Esta heterogeneidad provoca un mal conocimiento de la forma del frente de onda y luego del camino seguido por la onda. Pero cualquiera que sea el medio de propagación de las ondas, este método tiene como principales ventajas de necesitar una única medida para obtener un valor representativo, es decir que la dispersión de este ensayo está muy baja (del orden del 2,5%).

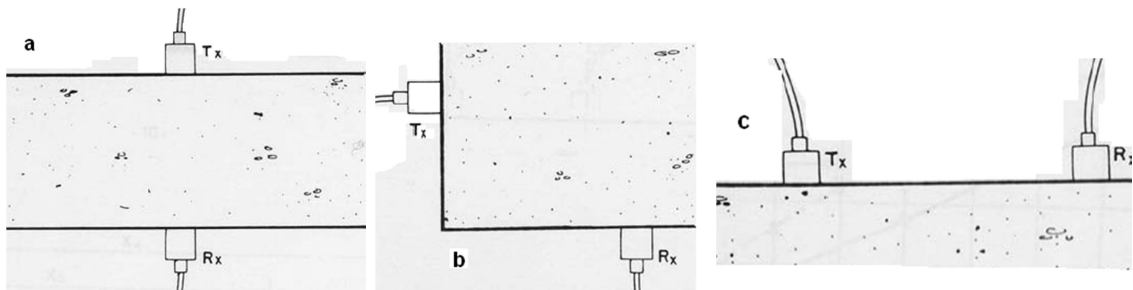
No es un ensayo destructivo, lo que permite conservar intacta la estructura que se ensaya. Aunque no permita evaluar directamente la resistencia del hormigón, este método combinado a una campaña de calibración en laboratorio -que correlaciona las medidas ultrasónicas con la resistencia- puede dar una estimación de la resistencia característica del hormigón ensayado con una precisión de  $\pm 20\%$ . Por último, los ensayos sólo necesitan un aparato barato y de fácil manipulación.

El método moderno consiste en la medición del tiempo que emplea un impulso ultrasónico (es decir de frecuencia entre 20 y 150 kHz) al recorrer la distancia

entre un transductor emisor Tx y un transductor receptor Rx, ambos acoplados al hormigón que se está estudiando.

**Posición Relativa de los Dos Transductores.** Por el método de los ultrasonidos existen tres tipos de ensayos que corresponden a la posición relativa de los transductores uno con relación a otro: medidas de velocidad con transmisión de las ondas acústicas directa, semi-directa e indirecta (figura 7 sacada de la norma UNE 83-308-86) [46].

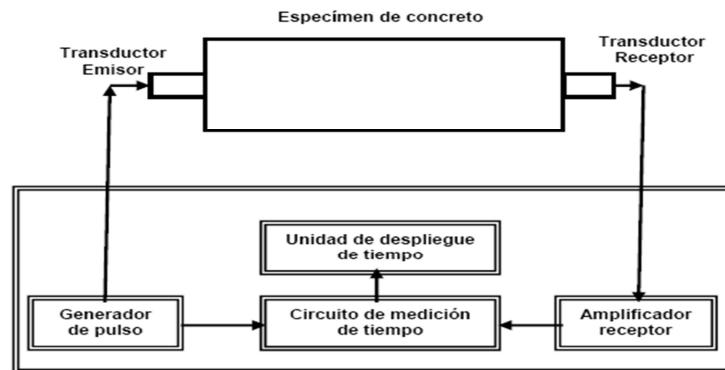
**Figura 7. Diferentes Posiciones de los Palpadores (Emisor Tx y Receptor Rx)**



a) Transmisión Directa, b) Transmisión Semi-directa, c) Transmisión Superficial

**Fuente.** Métodos de Ensayos Ultrasonicos [46].

**Figura 8. Principio de Funcionamiento del Aparato de Ensayo de VPU.**



**Fuente.** Métodos de Ensayos Ultrasonicos [46].

La velocidad de transmisión o velocidad de propagación se determina en cada caso por el cociente entre la distancia o separación  $L$  entre los transductores y el tiempo de transito  $t$  para esta distancia ( $V= L/T$ ).

La velocidad de las ondas en el material permite obtener informaciones sobre las propiedades elásticas. Las frecuencias de las ondas generadas varían entre 20 y 150 kHz, y para el hormigón se utilizan frecuencias comprendidas entre 54 y 82 kHz. Las velocidades de propagación de las ondas en estos casos varían entre 3,5 km y 4,8 km/s, lo que impone un cuidado especial durante los ensayos in situ, siendo el intervalo de velocidades posibles reducido [46].

En la tabla 4 se resumen las ventajas e inconvenientes del método ultrasónico; estos puntos son válidos para cualquier propiedad evaluada.

**Tabla IV Ventajas e inconvenientes del método con ultrasonido**

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
No destructivo.	Motivación y formación previa del operario.
Evolución temporal de la velocidad.	Calidad de la ejecución (rugosidad de las superficies a ensayar).
Ahorro económico con un equipo barato y una vida útil prolongada.	Influencia de las condiciones climáticas sobre el fraguado y el endurecimiento del hormigón.
Poca interacción con el proceso constructivo.	Influencia de las sobrecargas de ejecución.
Dispersión baja.	Estado de la superficie a ensayar in situ independientemente de la ejecución.
	No permite estimar la resistencia sin establecer curvas de calibración.
	Propagación en medios heterogéneos mal conocida.
	Fallo de datos, depende del tipo de hormigón.

**Fuente.** Método de ensayos ultrasónicos [46].

## **2.7 ENSAYO DESTRUCTIVO**

### **2.7.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión**

En la actualidad el concreto es el material de construcción más utilizado en nuestro país gracias a sus propiedades mecánicas, principalmente a la resistencia a la compresión, característica del concreto que se utiliza como medio evaluador de su calidad. Es por esto que las mezclas de concreto son diseñadas de acuerdo a esta característica y a requerimientos en durabilidad con fin de determinar cuál

es la aplicación que se le va a dar (Puentes, edificios, entre otros). Esta característica física del concreto se puede definir como la máxima resistencia que puede soportar un espécimen de este material a carga axial a una edad de 28 días. Las unidades con las que generalmente se expresa esta propiedad son  $\text{Kg/cm}^2$  ó MPa. El ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión a partir de la fuerza de ruptura dividida por el área de sección de la probeta y se reporta en unidades de PSI o en MPa. Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden varían desde 17MPa (2500 PSI) para el concreto residencial hasta 28 MPa (4000 PSI) y más para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 70 MPa (10000 PSI) y más [47].

**Tabla V. Clasificación del Concreto Según Resistencia a la Compresión.**

Descripción	f'c [Mpa]	f'c [ $\text{Kg/cm}^2$ ]
Normal	7-42	70-420
Alta resistencia	42-100	420-1000
Ultra Alta Resistencia	Más de 100	Más de 1000

**Fuente.** Concretos y Morteros [48]

### 2.7.2 Factores que Afectan la Resistencia del Concreto

Dentro de los factores que influyen sobre la resistencia del concreto están [49]:

**a.** Aquellas variables que influyen en el proceso de fabricación del concreto, como: Mezclado, transporte, colocación, compactación y curado. **b.** Aquellos factores relacionados con la calidad y la cantidad de elementos constitutivos en el concreto, tales como: Agregados, cemento y agua.

De estos dos grandes grupos los factores que más afectan esta propiedad son: el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, el tamaño máximo de agregado grueso, el tiempo y tipo de curado.

### 3. METODOLOGÍA



Flujograma 3. Metodología Desarrollada en La Presente Investigación.

### **3.1 FASE 1: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

Se realizó una recopilación de calidad de diferentes normas, textos, trabajos de grado, internet, consulta (técnica y profesional), etc. Revisando, argumentando y atendiendo a las exigencias de la investigación.

### **3.2 FASE 2: SOLICITUD DE PERMISO PARA EL INGRESO A LA PLANTA CONCRETERA**

Se presentó una propuesta a la planta concretera, encontrando interés de parte de ésta, se acordó una cita concertando la actividad en su interior a fin de enterar a groso modo el enfoque de la investigación y pactar las condiciones necesarias para su ejecución.

### **3.3 FASE 3: CAPACITACIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL**

Atendiendo a las condiciones de seguridad y salud ocupacional para el ingreso a la empresa y acorde sus políticas, se habilitó la entrada a la planta a partir de una capacitación evaluada.

### **3.4 FASE 4: INGRESO A LA PLANTA CONCRETERA**

Antes de ingresar a la concretera se verifica contar con los elementos de seguridad industrial (Casco, gafas, guantes y botas) y fueron revisadas las cartas relacionadas con la ARP y seguridad médica.

### **3.5 FASE 5: SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA**

Se seleccionaron cinco resistencias, atendiendo a las de mayor producción en la planta y al enfoque de la investigación, se elaboraron cuarenta especímenes en formaletas cilíndricas de pasta (dimensiones 10cmx20cm) por resistencia para un total de 200 probetas.

## **3.6 FASE 6: PROCESOS DE FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO**

### **3.6.1 Etapa 1: Caracterización de la Materia Prima.**

Los materiales utilizados fueron: agua potable, cemento Portland tipo I, agregados y un aditivo. Los ensayos de caracterización se llevaron a cabo en los laboratorios al interior de la planta. Aquí se citan las características de los mismos al igual que los procesos y ensayos manejados.

**Cemento.** Con el fin de cumplir las especificaciones mecánicas, físicas y químicas indicadas por las Normas NTC 121[47] y NTC 321 [48], el cemento empleado fue PORTLAND TIPO I.

**Agua Potable.** Se utilizó agua potable procedente del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

**Agregados.** Para conseguir una mezcla de concreto que fuera consistente se trabajó con agregados procedentes del municipio de Chimitá (Santander), utilizando la arena como agregado fino y grava como agregado grueso. Se determinó el módulo de finura, peso específico, porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos para cada uno de los agregados, a través de un análisis granulométrico basado en las normas: NTC 92 [22], NTC176 [23] y NTC 237 [24]. La clasificación de los agregados por tamaños (a fin de obtener una granulometría específica) se realizó siguiendo las Normas NTC 77 [20] y NTC 78 [21]. Se solicitó un estudio geológico (ANEXO C) del agregado grueso, a la Escuela de Geología de la U.I.S. a fin de conocer el origen mineral presente en la muestra.

**Aditivo.** Manejado por la concretera, a fin de mejorar las propiedades de la mezcla en estado fresco, optimizando el fraguado y permitiendo un buen curado proporcionando calidad al hormigón.

### **3.6.2 Etapa 2: Diseño de la mezcla.**

Conforme a las especificaciones de la investigación se seleccionaron cinco diseños de acuerdo a las resistencias acordadas (140, 210, 245, 280 y 350 Kg/cm<sup>2</sup>).

### **3.6.3 Determinación de las propiedades del concreto fresco:**

Se midió el asentamiento en cada una de las mezclas trabajadas bajo la norma NTC 396 mediante el ensayo del cono de Abrams.

### **3.6.4 Etapa 3: Fabricación de Especímenes Cilíndricos (10x20 cm).**

Primero se confirmaron las remisiones solicitadas atendiendo a la hora en que la mezcla estuviera lista, luego con la ayuda de los elementos necesarios (Como palas, palustres y carretillas, además de los elementos de protección) se realizó el transporte del material (aproximadamente carretada y media) de la mezcladora al laboratorio de fabricación de probetas. Para la elaboración de las probetas fue necesario inicialmente limpiar los moldes de plástico con dimensiones de 10±0.5cm de diámetro por 20±0.5cm de largo. Posteriormente se sometieron a un baño con ACPM a fin de evitar que la mezcla se adhiriera al molde y lograr un fácil desencofrado. La mezcla completa finalmente homogeneizada fue colocada con una cuchara por capas en los moldes cilíndricos y se compactó de forma manual cada capa, aplicando 25 golpes en diferentes lugares de la superficie con una varilla metálica. Después de llenar cada capa, se aplicaron una serie de golpes con un martillo de caucho tanto en la parte lateral como superior del cilindro a fin de eliminar el aire atrapado [50].

### **3.6.5 Etapa 4: Fraguado, Desencofrado, Curado y Secado al Aire.**

Después de adecuar los moldes, las probetas se dejaron 24 horas al aire libre como tiempo de fraguado y luego el desencofrado. A fin de obtener una hidratación completa el curado se realizó bajo condiciones estándar de temperatura y humedad (23°C y humedad del 100%) durante 28 días, según

norma ICONTEC 1377 [51] y se dejaron 15 días al aire a fin de establecer un secado regular.

### **3.7 FASE 7: ENSAYOS EXPERIMENTALES**

En la fase experimental de esta investigación se realizaron tres pruebas a fin de conocer el estado superficial de las probetas así como el comportamiento físico-mecánico del concreto trabajado:

- Inspección Visual [45] pg. 44-46
- Ensayo de Velocidad de Pulso ultrasónico (Norma ASTM C 597-02) [52]
- Ensayo de Resistencia a la Compresión (Norma ASTM C39/C39M-04) [53]

#### **3.7.1 Inspección visual.**

Después de extraer las probetas de la piscina de curado, cada espécimen se sometió a inspección visual y fue pesado. Durante este ensayo se observó cuidadosamente la probeta a fin de conocer cuál era su estado superficial y detectar posibles defectos como: mal acabado superficial, discontinuidades abiertas a la superficie y porosidad.

#### **3.7.2 Ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico.**

Para medir la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) se trabajó con dos equipos, el equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA, utilizando transductores de 54KHz de frecuencia y con el equipo de ultrasonido MODEL 58-E0048 Tipo UPV E48 marca Controls regido bajo la norma ASTM-C597, ISO E0048. Los cuales miden el tiempo de propagación de la onda a través de la pieza con relación a la distancia entre los transductores.

Las mediciones se aplicaron a 200 cilindros, para cada resistencia. Para cada probeta se tomaron tres lecturas en tres puntos diferentes dentro de la misma

cara, luego estos valores fueron promediados. El procedimiento seguido para realizar este ensayo se encuentra en la norma ASTM C597-02.

Preparación y acondicionamiento de las probetas. Inicialmente se preparó la probeta al nivelar y limpiar la superficie de las dos caras paralelas para evitar una superficie rugosa e impurezas que causaran lecturas erróneas. Luego cada probeta se colocó sobre una guía que permitía obtener mejores valores de velocidad al mantener los transductores firmes en la misma posición el uno frente al otro.

Ajustes del equipo. Para empezar se conectaron los transductores a los puertos correspondientes en el equipo ya cargado. Para el caso del equipo de la universidad Se ajustaron los parámetros bajo los cuales iba a trabajar el dispositivo, debido a que este equipo además de leer velocidades cuenta con un sistema integrado y contiene una opción que permite fijar parámetros a fin de obtener mayor precisión en los resultados y cuenta con ocho opciones que facilitan el manejo del ensayo permitiendo obtener lecturas no solo de VPU, si no también de espesores, módulo de elasticidad dinámico etc. En el caso del equipo de la empresa concretera solo se tomaron lecturas de tiempo de vuelo debido a las especificaciones de la unidad, con la cual se puede conocer la VPU si se conocen las dimensiones de los especímenes.

Mediciones. Se calibró el equipo según las recomendaciones del fabricante, se utilizó como acoplamiento vaselina y se empleó como método de transmisión el método directo. Con las condiciones indicadas se hicieron las mediciones en cada una de las probetas. Teniendo en cuenta que el equipo de la empresa concretera cuenta con un patrón de calibración referente a una medida de  $56.7\mu\text{s}$ .

Respecto al módulo de elasticidad dinámico haciendo uso del ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico, bajo la norma ASTM C 597-02, utilizando la posición de transmisión directa se usó la siguiente ecuación:

$$E_d = \rho v^2 (1 + \sigma) (1 - 2\sigma) / (1 - \sigma) \text{ [Pa]}$$

$\rho$ = Densidad [Kg/m<sup>3</sup>],  $v$ = Velocidad [m/s] y  $\sigma$ = Relación de Poisson.

### **3.7.3 Ensayo de resistencia a la compresión.**

La prueba de resistencia a la compresión del concreto también se efectuó sobre todos los especímenes. El ensayo se realizó bajo la norma ASTM C39/C39M-04. Utilizando la máquina universal de ensayos MODEL CT-1500 tipo AUTOMAX System marca DIRIMPEX LTDA, certificada y calibrada bajo la norma NTC- 150 7500-1 dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas.

Para el desarrollo de éste ensayo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Preparación y acondicionamiento de las probetas. Como punto de partida fue necesario determinar el diámetro de cada una de las probetas, para luego determinar el área bajo el cual se aplicaba la carga. Posteriormente se niveló con un desbaste superficial las caras transversales al eje del cilindro a fin de eliminar cualquier irregularidad presente.
2. Condiciones de humedad. Terminado el curado se dio un espacio de 15 días de secado con el fin de obtener mayores resistencias y menor contenido de humedad al realizar el ensayo y así correlacionar valores cercanos a los experimentados por una estructura en servicio.
3. Aplicación de carga: Tras limpiar las bases de la probeta, ésta se colocó en el equipo alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga, después se bajó la placa superior hacia la probeta con el fin de generar contacto.

Luego de colocar la probeta se aplicó la carga con una velocidad uniforme y continúa hasta que se produjo la falla del espécimen.

4. Toma de datos. Terminado el ensayo se tomaron datos como: Edad de probeta, características de la probeta, dimensiones, peso final, carga aplicada y registro de video y fotográfico.

Partiendo de investigaciones anteriores acometidas para Bucaramanga y su área metropolitana, estudiadas y analizadas en esta investigación y tomando el valor de 0.20 para el Coeficiente de Poisson sugerido en la NSR-10. Haciendo uso del ensayo destructivo de resistencia a la compresión, bajo la norma ASTM C39/C39M-04 se usó la siguiente ecuación planteada en el trabajo de investigación “Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto” propuesta por los autores [3]:

$$E_c = 6250 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ [Kg/cm}^2\text{]}; f'_c = \text{Resistencia a la compresión.}$$

## 5. RESULTADOS

Los datos presentados a continuación fueron resultados del trabajo de campo realizado en la empresa concretera, y en afinidad con la metodología se muestran como sigue:

### 4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CONCRETO

#### Etapa 1. Caracterización de la materia prima.

Presentado en el **anexo A**

**Arena:** Módulo de finura

#### Etapa 2. Diseño de mezcla

Resultados de dosificación arrojados por el diseño de mezcla para cada resistencia, seguido asentamiento y densidad de las mezclas trabajadas.

**Tabla VI. Diseño de mezcla, Asentamiento y Densidad por Resistencia.**

Muestra	f'c [Kg/cm <sup>2</sup> ]	Cantidad	Agua [Kg]	Cemento [Kg]	Arena [Kg]	Grava [Kg]	Aditivo [Kg]	Asent/ [pulg]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
4	140	40	195	200	1064	968	500	4½	2358
1	210	40	195	265	1001	968	663	5	2351
5	245	40	203	310	966	938	775	6¾	2348
2	280	40	207	340	927	940	850	7	2376
3	350	40	120	410	948	938	1025	6½	2385

**Fuente.** Concretera

#### Etapa 3. Fabricación de especímenes cilíndricos (10x20 cm).

Después de seleccionadas las resistencias a evaluar, se procedió a la elaboración de especímenes cilíndricos como se muestra a continuación.

**Figura 9. Proceso de Fabricación de Especímenes Cilíndricos (10x20 cm).**



De izquierda a derecha: Toma de muestra, Transporte hacia la zona de fabricación de especímenes, Llenado de moldes y Enlaces de probetas cilíndricas de concreto.

#### **Etapas 4: Fraguado, Desencofrado, Curado y Secado al Aire.**

**Figura 10. Fraguado, Desencofrado, Curado y Secado al Aire**



## **4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES**

**4.2.1 Ensayo de Inspección Visual.** Durante esta fase se consignaron las medidas de los especímenes, éstas se muestran en las tablas XII, XIII.

**Figura 11. Ensayo de Inspección Visual**



**\*Dimensiones de especímenes después del fraguado y curado ANEXO C**

## 4.2.2 Ensayo De Velocidad de Pulso Ultrasónico

Figura 12. Equipo de Ultrasonido Pundit Plus



Equipo de ultrasonido MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA y Calibración de la unidad.

Figura 13. Prueba de ultrasonido Pundit Plus

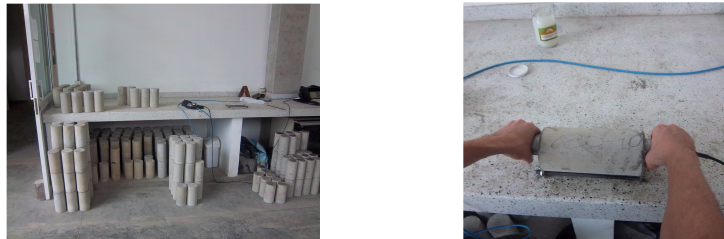


Figura 14. Equipo de Ultrasonido Controls E0048



Equipo de ultrasonido MODEL 58-E0048 Tipo UPV E48 marca Controls y Calibración de la unidad.

Figura 15. Prueba de ultrasonido Controls E0048



A partir de la ecuación  $E_d = \rho v^2 (1+\sigma) (1-2\sigma) / (1-\sigma)$  [Pa] se hallaron los valores correspondientes al módulo de elasticidad dinámico para ambos equipos.

\*Datos arrojados por la técnica de VPU para ambos equipos ANEXO D

### 4.2.3 Ensayo De Resistencia a la Compresión

Figura 16. Máquina universal de ensayos MODEL CT-1500 tipo AUTOMAX System marca DIRIMPEX LTDA



Figura 17. Prueba de compresión.



Luego de haber tomado lecturas de VPU, el exceso del medio acoplante (Vaselina blanca) fue removido y se procedió con el ensayo de compresión (ASTM C39) usando cauchos de neopreno a fin de tener una mejor distribución del esfuerzo en las probetas durante el ensayo.

Para éste trabajo de investigación, el módulo de elasticidad se calculó con base a la ecuación  $E_c = 1950 \cdot \sqrt{f'_c}$  (MPa), propuesta en el estudio hecho por María Fernanda Serrano Guzmán (Ph.D Ingeniería civil, Directora general de investigaciones, Universidad Pontificia Bolivariana) y Diego Darío Ruiz (Ph.D Ingeniería civil, Profesor asociado, Pontificia Universidad Javeriana, Cali) (ver referencia [3]).

\*Datos del ensayo de compresión presentados en el ANEXO E

A continuación se presenta un resumen de los datos obtenidos en los ensayos anteriores.

**Tabla VII. Valores promedios para el ensayo con equipo Pundit Plus.**

Valores medios para el ensayo con el equipo Pundit Plus					
	Lecturas directas de la pantalla del equipo Pundit Plus			VPU = L/Tv	Ed = $(\rho V^2(1+\sigma)(1-2\sigma)/(1-\sigma))$ [MPa]
f c (Kg/cm <sup>2</sup> )	VPU (m/s)	Tv (μs)	Ed [MPa]	VPU[m/s]- Calculado	Ed calculado
<b>140</b>	3517,78±39,73	56,67±0,65	29571,67±681	3667,54±44,87	26845,27±723
<b>210</b>	3891,6±63,73	51,57±0,79	35811,67±969	3987,26±53,85	32711,18±969
<b>245</b>	3947,36±39,49	53,1±0,54	36989,17±558	3910,13±37,8	31034,91±663
<b>280</b>	3842,91±48.49	50,57±0,54	41513,33±777	4113,03±44,25	34899,32±733
<b>350</b>	4132,61±39,91	48,36±0,52	40540±738	4278,76±47,25	38319,35±870

**Tabla VIII. Valores medios para el ensayo con el equipo Controls.**

Valores medios para el ensayo con el equipo Controls			
f c (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tv (media)	VPU[m/s]- Calculado	Ed calculado
<b>140</b>	58,97±0,96	3525,51±58.3	24809,94±881
<b>210</b>	52,87±0,84	3891,28±59,3	31156,51±1007
<b>245</b>	55,16±0,72	3763,97±49,1	28760,31±796
<b>280</b>	52,54±0,65	3959,48±50,7	32344,45±843
<b>350</b>	51,31±0,71	4032,69±53,9	34040,32±915

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### ❖ **Respecto a los materiales usados en la fabricación del concreto**

El tamaño de la arena es de gran importancia ya que en la mezcla, ésta se encuentra en la pasta la cual se deposita en los espacios que deja la grava, contribuyendo a la resistencia y mejorando la fluidez.

Al caracterizar la arena usada, se encontró que su módulo de finura fue de 2,72, la norma ASTM C33 recomienda que éste valor se encuentre en un rango comprendido entre 2,1 y 3,0.

La grava (agregado grueso) se escogió de acuerdo al tamaño del molde usado para hacer las probetas.

### ❖ **Respecto al ensayo de inspección visual**

En la etapa de desencofrado el método utilizado fue mediante un compresor de aire (inyectando aire por un orificio ubicado en la parte inferior de la formaleta).

Debido a que la empresa concretera trabaja con concretos tipo bombeable, las mezclas deben ser muy fluidas y para ello la cantidad de agua usada en la preparación de las mezclas fue alta, lo que tiene incidencia directa en el contenido de aire incluido en el concreto, por consiguiente al elaborar las probetas no se pudo eliminar totalmente éste aire, quedando atrapado en el concreto y reflejándose en la superficie de la probeta fraguada en forma de poros.

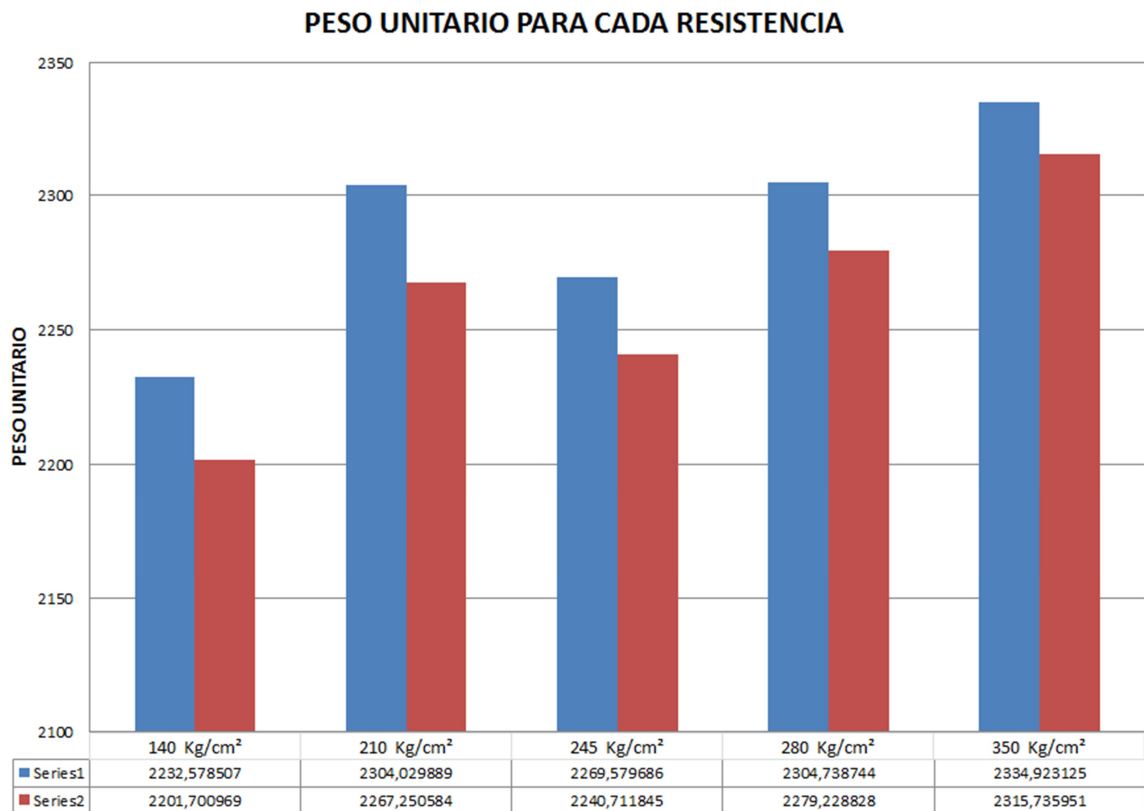
En general todos los especímenes presentaron porosidad heterogénea registrando diámetros de hasta 2 mm distribuidos uniformemente en la superficie.

Las variaciones dimensionales en general fueron despreciables:

En cuanto al peso, la tendencia general fue a disminuir, debido a la evaporación del agua que está presente en el concreto, pero que no reacciona. Ésta pérdida va aumentando conforme la resistencia va disminuyendo, (para resistencias bajas la relación agua/cemento es mayor, comparativamente con resistencias más altas), debido a que éstas tienen mayor cantidad de agua que no reacciona. La resistencia que presentó una pérdida de peso mayor fue la 140 Kg/cm<sup>2</sup>.

### ❖ En Cuanto al Peso Específico

Figura 18. Balance de los Pesos Unitarios de cada Resistencia.



En la figura 18, se puede observar que la tecnología empleada en la empresa concretera para la dosificación es eficiente y conserva las proporciones definidas

en el diseño de mezcla, no permitiendo de esta manera grandes cambios en el peso unitario del concreto.

Nótese la tendencia de aumento del peso unitario cuando aumenta la resistencia propuesta.

Los pequeños intervalos de variación muestran que las mezclas se encontraban homogéneas al momento de la elaboración de las probetas, si las proporciones de los agregados, el cemento y el agua, no fuesen semejantes para una resistencia dada (variación del peso específico), muy seguramente al momento de ensayar dicha resistencia, mostraría muchas variaciones en los resultados.

#### ❖ **Respecto a los valores arrojados por el equipo Pundit Plus**

El equipo Pundit Plus PC 1600, presenta tres opciones de medida:

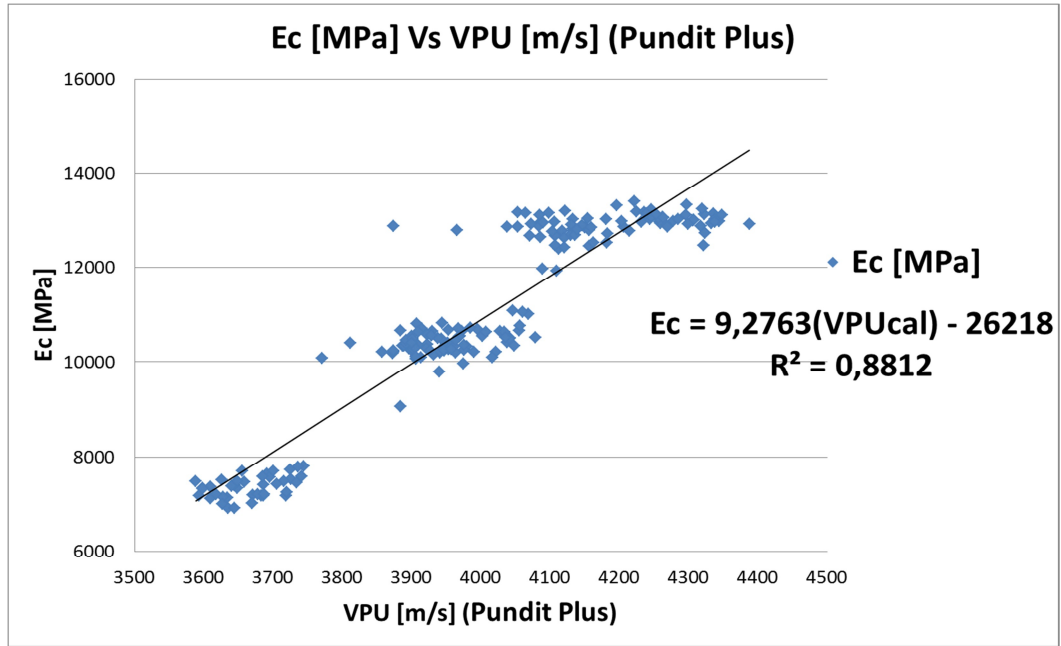
Opción 2: Mide el tiempo de recorrido de la onda a través del material.

Opción 4: Mide velocidad de pulso de la onda que atraviesa el material.

Opción 5: Mide el módulo de elasticidad del material.

Para cada opción se encontró una relación entre la medida tomada por el equipo (tiempo de recorrido, vpu y módulo de elasticidad) y el valor del módulo de elasticidad encontrado por el ensayo destructivo de resistencia a la compresión (módulo de elasticidad estático,  $E_c$ ).

Figura 19. Relación Ec Vs VPU Calculado, Pundit Plus.



En la figura (19) se evidencia la relación que existe entre el módulo de elasticidad estático y las medidas de velocidad de pulso ultrasónico, observando que mayores VPU corresponden a mayores valores de módulos.

Figura 20. Relación Ec Vs Valores de VPU Arrojados por el Equipo Pundit Plus

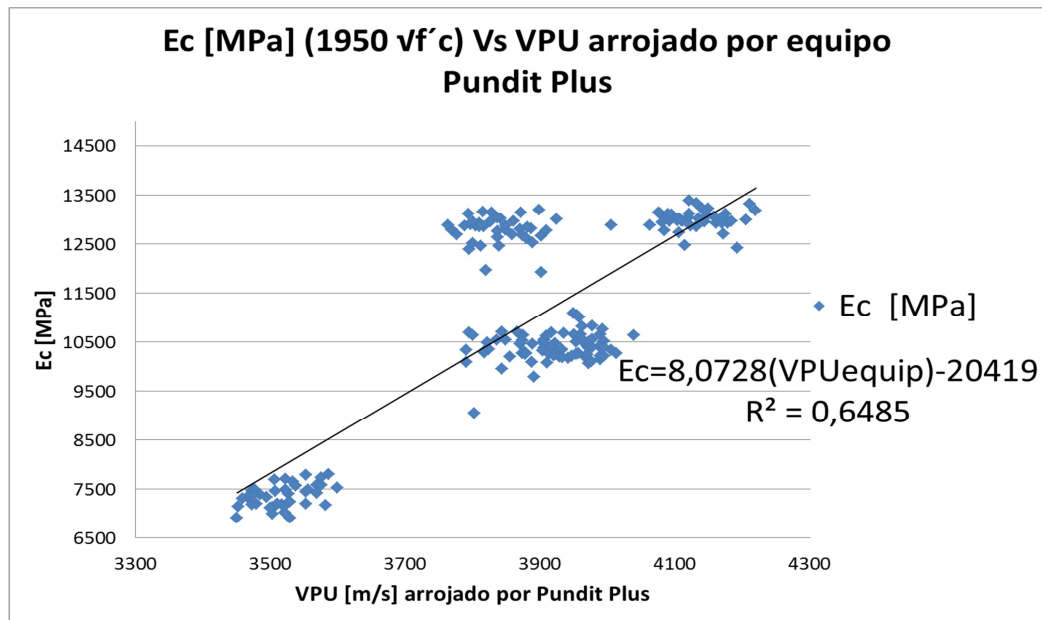
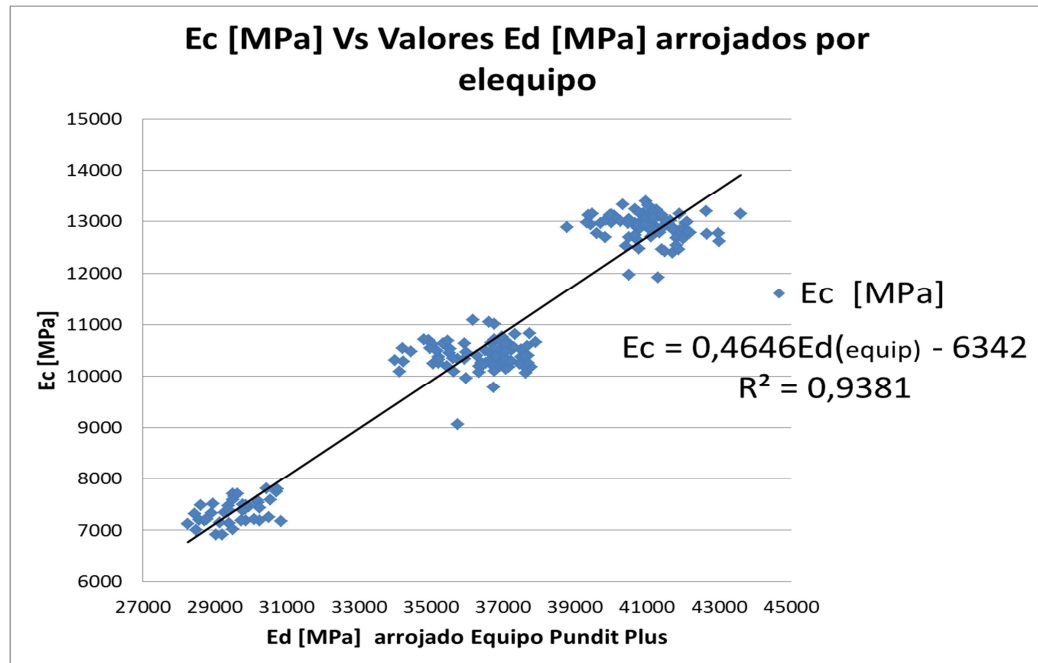


Figura 21. Relación  $E_c$  Vs Valores de  $E_d$  Arrojados por el Equipo Pundit Plus



Tendencia seguida por todas las propiedades analizadas ( $VPU$ ,  $E_d$  y  $VPU_{\text{calculado}}$ ).

Recordemos que todas las resistencias se elaboraron con la misma materia prima (arena con módulo de finura de 2,7; Grava con tamaño máximo nominal de 3/4 de pulgada, aditivo), entonces ¿por qué las resistencias eran tan diferentes? – la resistencia del concreto depende de factores como el tamaño y forma del agregado grueso (grava), tamaño, forma y pureza del agregado fino (arena), relación agua cemento, cantidad y tipo de cemento, la forma en que la grava se encuentra unida a la matriz de cemento-arena, entre otras. Como las diferentes resistencias se elaboraron con grava y arena (de iguales propiedades para todas las resistencias) y el aditivo, el cambio en la resistencia se debe en gran medida, a la diferencia en la relación agua cemento, la cantidad de aditivo usado y las propiedades físico-químicas de la interface agregado-matriz de cemento.

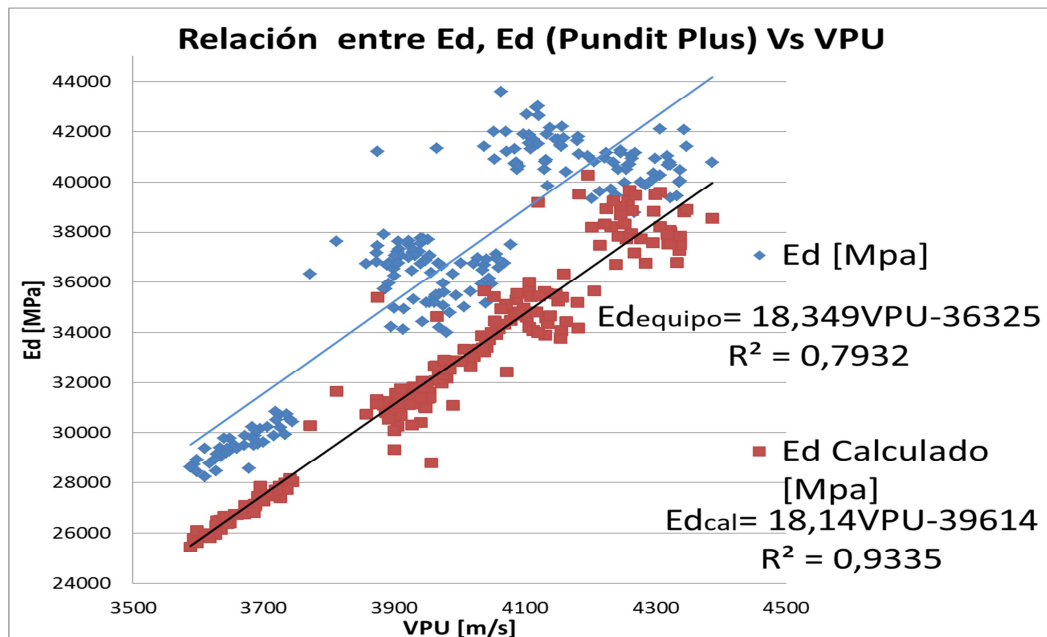
La técnica de velocidad de pulso ultrasónico depende de las propiedades físicas del material en estudio (densidad, módulo de elasticidad ( $E$ ) y la relación de las deformaciones (coeficiente de poisson)), al ensayar un material estamos

“midiendo” estas relaciones, por ello al graficar es natural que la velocidad de pulso ultrasónico aumente cuando mejoramos estas propiedades y mejoramos la relación físico-química de la interface entre el agregado y la matriz (aumentamos la resistencia).

- Al disminuir la relación agua/cemento, estamos disminuyendo el contenido de aire en el concreto, estamos incidiendo en el módulo de elasticidad de éste.
- Al mejorar la interface entre el agregado grueso y la matriz de cemento, estamos ayudando a que las propiedades generales sean más homogéneas, cuando la onda atraviesa el concreto, esta se divide en el momento en el que encuentra una fase diferente (matriz de cemento-grava), dando pérdida de energía, si mejoramos la interface lograríamos minimizar ésta pérdida influyendo directamente en el tiempo que se tarda la onda en atravesar el concreto.

Ésta tendencia se muestra en las figuras 19, 20, 21, 23 y 24.

Figura 22. Relación Entre Ed en Función de VPU, Ed Calculado y la Velocidad de Pulso



Al relacionar los valores de  $E_d$  obtenidos en función de la VPU con los valores de  $E_d$  arrojados por el equipo pundit plus (opción 5), la ecuación que relaciona ambos valores nos permite argumentar respecto a esto que los valores de  $E_d$  arrojados por el equipo son ligeramente mayores que los valores de  $E_d$  calculados.

Se observa que los valores de  $E_d$  del equipo siempre van a ser mayores (aproximadamente 15%) que los valores de  $E_d$  en función de VPU.

La diferencia mostrada puede ser consecuencia de que el equipo no se encuentre calibrado, además de que no permite, al momento de introducir las condiciones de ensayo, que sea introducida una medida con más cifras significativas en los parámetros de entrada (sólo tiene en cuenta medidas de distancia en centímetros).

#### ❖ Respecto a los valores arrojados por el equipo Controls E0048

Figura 23. Relación Entre el  $E_c$  y la VPU (Controls E0048)

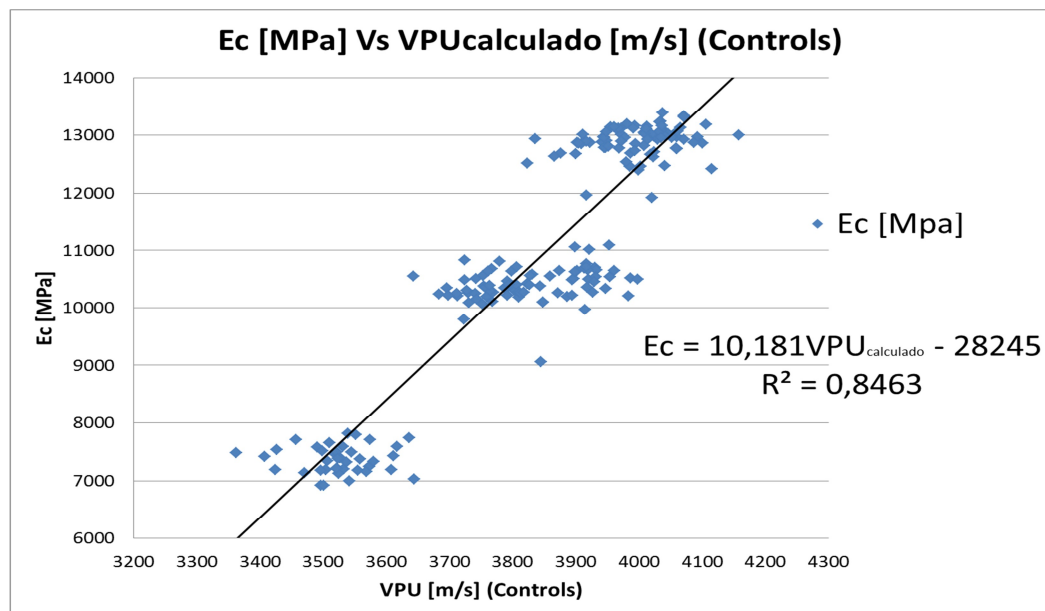
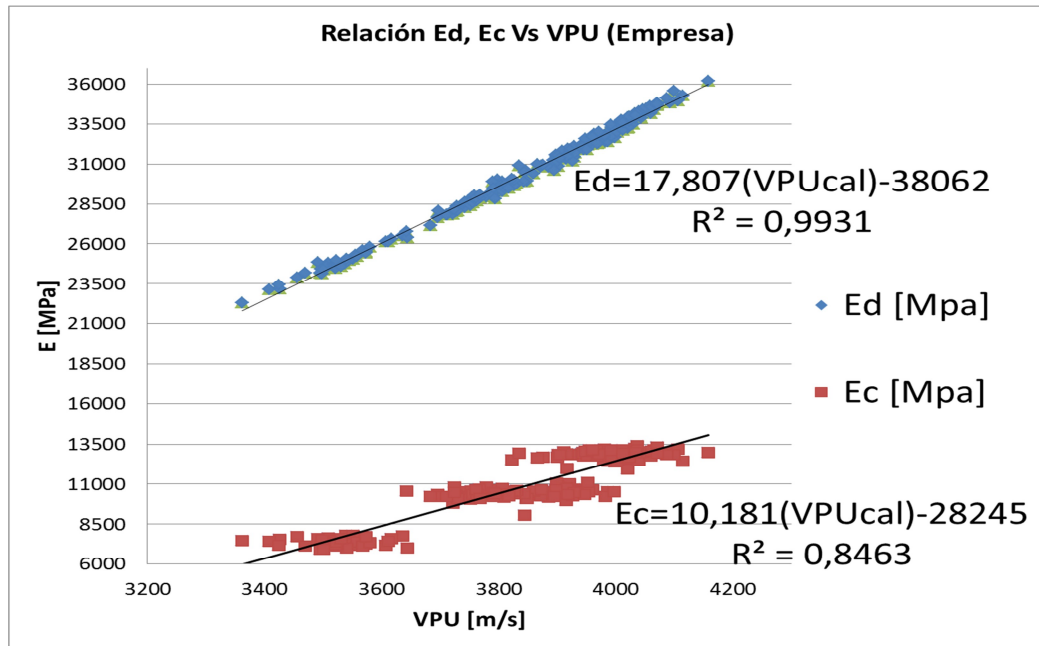


Figura 24. Relación entre Ed, Ec Vs la VPU (Controls E0048)



En el intervalo de experimentación, los valores obtenidos del Ed siempre fueron mayores que los arrojados por Ec.

**Nota:** Las relaciones obtenidas en todas las gráficas corresponden a valores obtenidos por regresión lineal (mínimos cuadrados) para darle sencillez a las relaciones encontradas y en todas se obtuvo un buen coeficiente de correlación, para fines investigativos, la relación existente entre las variables y las velocidades de pulso se comportan de una manera general de acuerdo a la ecuación:  $Y = m(VPU)^b$  obteniendo coeficientes de correlación ligeramente mayores que los mostrados por las ecuaciones lineales.

## 6. CONCLUSIONES

- ❖ Se determinaron, mediante los equipos de VPU, las velocidades para las diferentes resistencias y los módulos de elasticidad dinámicos encontrando valores diferentes para cada equipo, atribuyendo que éstas variaciones se deben a errores de calibración en los equipos.
- ❖ Los valores del módulo de elasticidad estático utilizados como referencia que se obtuvieron a partir de la ecuación  $E_c = 1950\sqrt{f'_c}$  [MPa], siempre fueron menores que los obtenidos con los equipos de VPU (Módulo Elasticidad Dinámico) en un orden del 70%.

- ❖ Relaciones obtenidas a partir del equipo **CONTROLS UPV 58 -E0048:**

$$E_c = 10,181(\text{VPU}_{\text{calculado}}) - 28245; \text{ con un } R^2 = 0,8463$$

- ❖ Relaciones obtenidas a partir del equipo **PUNDIT PLUS CNS FARNELL:**

Opción 2: Tiempo de recorrido Tv

$$E_c = 9,2763(\text{VPU}_{\text{Calculado}}) - 26218; \text{ Con un } R^2 = 0,8812$$

Opción 4: Velocidad de Pulso Ultrasónico

$$E_c = 8,0728(\text{VPU}_{\text{equipo}}) - 20419; \text{ Con un } R^2 = 0,6485$$

Opción 5: Módulo de elasticidad

$$E_c = 0,4646(E_{d_{\text{equipo}}}) - 6342; \text{ Con un } R^2 = 0,9381$$

- ❖ Al evaluar el módulo de elasticidad del concreto sin refuerzo, usando la técnica de VPU, mediante el equipo Pundit Plus, se concluye que el equipo sobrevalora en un 15 % los datos experimentales.
- ❖ El análisis de los resultados permite concluir que la técnica no debe ser abordada como un método sustituto, sino como un método adicional o complementario que permite conocer desde su perspectiva propiedades y características del concreto especificado atendiendo a su calidad y durabilidad.

## 7. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda que estudios similares se realicen en otras regiones del país permitiendo elaborar diseños de mezcla acordes a las características de cada región.
- ❖ Que los equipos de ultrasonido manejen un patrón de calibración que permitan garantizar que el ensayo se está realizando apropiadamente durante la prueba.
- ❖ Es recomendable que las empresas concreteras que usen la técnica de VPU, ofrezcan al consumidor una base de datos que registre las características de los materiales usados y los datos de las mediciones de ambos ensayos a fin de tener un perfil que facilite la interpretación de los valores arrojados por el equipo a diferentes edades y así tener un control sobre la vida útil de la estructura, reduciendo los costos, el tiempo y facilidad de mantenimiento.
- ❖ Para investigaciones posteriores se recomienda trabajar con probetas de 15X30 cm, y obtener una ecuación propia a la investigación, apoyada en las normas ASTM 469 e ICONTEC 2245.

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Malhotra V. M., Carino N. J.: "Handbook on nondestructive testing of concrete". CRC Press, USA, 1991, pp. 171.
- [2]. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6154/7/06.pdf>
- [3]. María F. Serrano G.; Diego D. Pérez R. Análisis de Sensibilidad para Estimar el Módulo de Elasticidad Estático del Concreto (Julio - Diciembre 2010) [http://www.imcyc.com/ccid/pdf/jul-dic10\\_2.pdf](http://www.imcyc.com/ccid/pdf/jul-dic10_2.pdf).
- [4] ACI Committee 364: Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation". ACI Materials Journal, Vol. 90, (1993), pp. 475-479.
- [5]. Malhotra V. M.: "Non destructive methods for testing concrete". Department of energy, mines and resources. Ottawa, Canada, Monograph 875, (1985),
- [6]. Chung H., Law K. S.: "Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique". Concrete International Design and Construction ACI, October, (1983), pp. 42-47
- [7]. Sturup V. R., Vecchio F J., Caratin A.: "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength". Non destructive testing of concrete ACI SP 82-11, Ontario Canada (1982). pp. 201-207
- [8]. Anderson D, seals R.: "Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength". Journal of the American Concrete Institute. March-April, nº 2, (1981), pp. 116-119
- [9]. Jenkins R.S.: "Non destructive testing as evaluation tool". Concrete International Design and Construction ACI, February, (1985), pp. 22-25
- [10]. Castellanos G.: "Aplicaciones del método de velocidad de pulso ultrasónico correlacionado con la resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad del concreto hidráulico". Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán. (1985), pp 218-230.
- [11]. Luz M. Torrado G., Natalia A. Porras A. Determinación de las Ecuaciones del Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico del Concreto Producido en Bucaramanga y su Área Metropolitana.

- [12] SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Tercera Edición. Bogotá: Bhandar Editores LTDA. 1996.
- [13]. <http://www.notasingenierocivil.com/2011/05/fundamentos-de-concreto-generalidades.html>
- [14] <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/normal-0-21-false-false-false.html>
- [15] \_\_\_\_\_. ASTM C 150- 04 (2004). Standard specification for Portland cement. United States. ASTM international - American Society for Testing and Materials.
- [16] Diseño y Control de Mezclas de Concreto—1ª Edición, 2004, Capítulo 5, páginas de 103- 134.
- [17] P. KUMAR MEHTA, Op. cit. 254
- [18] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/diaz\\_m\\_f/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/diaz_m_f/capitulo2.pdf)
- [19] CHAN YAM, José Luís. Solís Carcaño. Moreno, Eric Iván. “Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto” Chan J., et. al. / Ingeniería 7-2 (2003) p. 39-46
- [20] Alaejos P., Fernández M. (1996). High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning. “ACI Materials Journal,” (USA), 93 (3), P. 236.
- [21] SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología y Propiedades. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004.
- [22] Palbol L. (1996). Optimización de los agregados para concreto. “Construcción y Tecnología,” (México), 9(100), p.30.
- [23] Özturan T. Cecen C. (1997). Effect coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. “Cement and concrete research,” (U.S.A.), 27(2), p. 165.
- [24] Chan P. (1993). Quantitative analysis of aggregate shape based on fractals. “ACI Materials journal,” (U.S.A.), 90 (4), p 357.
- [25] Cerón M., Duarte F., Castillo W. (1996). Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida. “Boletín académico FIUADY,” (U.S.A.), 95 (31), p.
- [26] <http://ingenieria-civil2009.blogspot.com/2009/04/concreto.html#>

- [27] Neville, A.M y Brooks, J.J. Tecnología del concreto. Mexico. 319p. 1987.
- [28] \_\_\_\_\_. NTC 396 (1994). Métodos de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Hormigón. NTC- Norma Técnica Colombiana.
- [29] [http://www.construmatica.com/construpedia/Archivo:Cono\\_de\\_Abrams.jpg](http://www.construmatica.com/construpedia/Archivo:Cono_de_Abrams.jpg)
- [30] Instituto del concreto- Asocreto. Tecnología y Propiedades. Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Bogotá 215p. 2000.
- [31] \_\_\_\_\_. NTC 693 Ensayo de Resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto.
- [32] <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>
- [33] [http://www.gcc.com/opencms/opencms/portal/esp/responsabilidad\\_social/compromiso\\_ambiental/produccion\\_del\\_concreto.html](http://www.gcc.com/opencms/opencms/portal/esp/responsabilidad_social/compromiso_ambiental/produccion_del_concreto.html)
- [34] \_\_\_\_\_. NTC 77 (1995). Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis granulométrico. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [35] \_\_\_\_\_. NTC 78 (1995). Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [36] \_\_\_\_\_. NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC - Norma Técnica Colombiana
- [37] \_\_\_\_\_. NTC 176 (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. NTC - Norma Técnica Colombiana
- [38] \_\_\_\_\_. NTC 237 (1995). Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [39] MEZCLAS DE CONCRETO < Disponible en: <http://www.arqhys.com/contenidos/mezcla-concreto.html> > Visitado en mayo de 2010.
- [40] SAMUEL, Laura Huanca. Diseño de Mezclas de Concreto. Puno – Perú: Universidad Nacional del Altiplano. Marzo 2006. p. 13.
- [41] FRAGUADO DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html> > Visitado en mayo de 2010.

- [42] \_\_\_\_\_.NSR-10- Capítulo C.8 – Análisis y Diseño – Consideraciones Generales. Cit., p C-112 y C113.
- [43] <http://www.360gradosblog.com/post/2011/09/19/c2bfQue-es-el-modulo-de-elasticidad-en-el-concreto.aspx>
- [44] <http://www.imcyc.com/ct2009/ene09/PROBLEMAS.pdf>
- [45] Manual de laboratorio de ensayos no destructivos (Universidad industrial de Santander)
- [46] <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6154/8/07.pdf>., Métodos De Ensayos Ultrasónicos Capítulo 3.
- [47] EL CONCRETO EN LA OBRA. PROBLEMAS, Causas y Soluciones., IMCYC (Instituto Mexicano del Concreto y el Cemento), Junio 2006. p. 20-22.
- [48] SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Concretos y Morteros “Manejo y Colocación en obra”. Instituto del Concreto. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. 2004. p. 27.
- [49] CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO - LA RESISTENCIA < Disponible en: <http://elconcreto.blogspot.com/search/label/Caracteristicas%20del%20Concreto-Resistencia> > Visitado en mayo de 2010.
- [50] ICONTEC 550 Y 673. Método para ensayos de cilindros de concreto a la compresión" ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [51] ICONTEC 1377 (1995). Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [52] ASTM C 597-02 (2002). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States. ASTM international - American Society of testing for materials.
- [53] ASTM C39/C39M-04 (2004). United States. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM international - American Society for Testing and Materials.

## BIBLIOGRAFIA

AMERICAN STANDARD TESTING OF MATERIALS. Standard specification for Portland cement. United States. ASTM international ASTM C 150- 04.

AMERICAN STANDARD TESTING OF MATERIALS. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States. ASTM international - American Society of testing for materials. ASTM C 597-02

AMERICAN STANDARD TESTING OF MATERIALS. United States. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM international - American Society for Testing and Materials. ASTM C39/C39M-04

CHAN YAM, José Luís. SOLÍS, Carcaño. MORENO, Eric Iván. “Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto” Ingeniería 7-2, 2003.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Colombia. Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC - Norma Técnica Colombiana. NTC 78, 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Colombia. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC - Norma Técnica Colombiana. NTC 92, 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC 1377, 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
Colombia. Ensayo de Resistencia a la compresión de cilindros normales de  
concreto. NTC- Norma Técnica Colombiana. NTC 693.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
Colombia. Métodos de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Hormigón.  
NTC- Norma Técnica Colombiana. NTC 396, 1994.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
Colombia. Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos.  
NTC - Norma Técnica Colombiana. NTC 237, 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
Colombia. Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del  
agregado grueso. NTC - Norma Técnica Colombiana. NTC 176, 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
Método para ensayos de cilindros de concreto a la compresión" ICONTEC,  
Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC 550 Y 673.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO SISMO RESISTENTE NSR-10. Bogotá: El  
Instituto, 2010.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.  
Colombia. Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis  
granulométrico. NTC - Norma Técnica Colombiana. NTC 77, 1995.

SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Tercera Edición. Bogotá: Bhandar Editores LTDA. 1996.

SERRANO . G, María F. y PÉREZ R., Diego D. Análisis de Sensibilidad para Estimar el Módulo de Elasticidad Estático del Concreto. Bucaramanga, Universidad Pontificia Bolivariana, 2010

TORRADO, Luz M. G., PORRAS A, Natalia A.. Determinación de las Ecuaciones del Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico del Concreto Producido en Bucaramanga y su Área Metropolitana. Trabajo de Grado. Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingenierías, 2009.

## ANEXOS

### ANEXO A. Caracterización de la Materia Prima.

#### ❖ Cemento

La empresa trabaja con cemento “Diamante”, con peso específico de 2,991 g/cm<sup>3</sup>.

#### ❖ Agregado Fino

Tabla VII. Resumen de ensayos, agregado fino.

MATERIAL	ENSAYO		NORMA DE ENSAYO	PARAMETROS DE CONTROL				
				Concretera	IDU	INVIAS	RESULTADOS	
AGREGADO FINO	Caract. Básicas	Densidad	NTC 237	2,4-2,85	-	-	2,53	
		Absorción		3%	-	-	1,92%	
	Petrografía	Análisis petrografico	ASTM C-295	Reportar	Reportar	Reportar		
	Durabilidad	Pérdidas en ensayo de Solidez en sulfatos. Sulfatos de magnesio, %máx.	Sulfato de Magnesio, %máx.	INV E-220 NTC 126	15%	15%	15%	1,70%
			Sulfato de Sodio, %máx.		-	-	10%	
	Limpieza	Límite Líquido, %máx.	INV E-125	No plástico	No plástico	No plástico	NP	
		Límite de Plasticidad, %máx.	INV E-126	No plástico	No plástico	No Plástico	NP	
		Equivalente de arena, %mín.	INV E-183	50%	50%	60%	79%	
		Azul de metileno, máx.	INV E-285	5	5	-	6,5	
		Terrones de arcilla y partículas deleznales, %máx.	INV E-211 NTC 589	1,00%	1,00%	3,0%	0,33%	
		Partículas livianas, %máx.	INV E-221 NTC 130			0,50%	0,5%	
		Material que pasa el tamiz de 75mm (No.200), %máx.	INV E-214 NTC 78	7,00%	5,00%	3%	3,8%	
	Contenido de Materia Orgánica	Color más oscuro permisible	INV E-212 NTC 127	máx. 3,0	Igual a muestra patron	Igual a muestra patron	1	
	Características Químicas	Contenido de sulfatos, expresado como SO <sub>4</sub> , %máx.	INV E-233		1,20%	1,2%		
	Absorción	Absorción de agua, % máx.	INV E-222 NTC 237	3%	4%	4%	1,92%	
	Reactividad	Reactividad Química	Si R ≥ 70, hay Reactividad con SiO <sub>2</sub> > R Si R < 70, hay Reactividad con SiO <sub>2</sub> > (35 + 0.5R)	INV E-234				No podrá presentar reactividad potencial con álcalis del cemento. El agregado es reactivo si se cumplen estas condiciones.
Reactividad de Barras		A 16d... Reactividad con DL > 0.2%	ASTM C-1260					

Fuente. Concretera. Tablas de Caracterización y Ensayos

Tabla VIII. Caracterización de agregado fino.

ABERTURA DEL TAMIZ		Porcentaje Pasa (%)	Límite Inferior	Límite Superior	Cumple?
(mm)	(Estándar)				
12,5	1/2"	100,0%	100,0%	100,0%	OK
9,5	3/8"	99,5%	100,0%	100,0%	NO
4,76	N° 4	97,2%	85,0%	100,0%	OK
2,38	N° 8	81,8%	70,0%	95,0%	OK
1,19	N° 16	67,0%	45,0%	80,0%	OK
0,6	N° 30	45,7%	25,0%	55,0%	OK
0,3	N° 50	27,5%	5,0%	30,0%	OK
0,15	N° 100	9,0%	1,0%	16,0%	OK
0,075	N° 200	3,8%	0,0%	12,0%	OK
Módulo de Finura		2,72	2,7	3,2	OK

Fuente. Concretera. Tablas de Caracterización y Ensayos

❖ **Agregado Grueso** (Tamaño máximo Nominal de 3/4" pulgadas)

Tabla IX. Resumen de ensayos, agregado grueso.

MATERIAL	ENSAYO		NORMA DE ENSAYO	PARAMETROS DE CONTROL				
				Concretera	IDU	INVIAS	RESULTADOS	
AGREGADO GRUESO	Caract. Básicas	Densidad	NTC 176	2,3-2,95	-	-	2,54	
		Absorción		3%	-	-	1,43%	
	Petrografía	Análisis petrográfico	ASTM C-295	Reportar	Reportar	Reportar		
	Dureza	Desgaste Los Angeles (gradación B)	Seco a 500rev, %máx.	INV E-218 NTC 93 Y 98	35%	30%	40%	35,4%
			Seco a 100rev, %máx.		6%	6%	8%	8,4%
			Después de 48h. Inmersión a 500rev, %máx.		50%	50%	60%	35,3%
			Relación húmedo/seco, 500rev, máx.		2	2	2	1,0
	Durabilidad	Desgaste en Micro Deval	%máx.	INV E-238	-	25%	30%	10,49%
			10 % de finos	INV E-224	-	75	90	
	Durabilidad	Períodos en ensayo de Solidez en sulfatos. Sulfatos de magnesio, %máx.	Relación húmedo/seco, %mín.	INV E-220	-	75%	75%	
			Sulfato de Magnesio, %máx.		18%	18%	18%	0,8%
	Limpieza	Terrones de arcilla y partículas deleznales, %máx.	Sulfato de Sodio, %máx.	INV E-211 NTC 589	-	-	12%	
			Partículas livianas, %máx.		3,00%	0,25%	0,25%	0,190%
	Geometría de Partículas	Partículas fracturadas, %mín.	1 cara	INV E-227	85%	85%	60%	88,2%
			2 caras		70%	70%	-	83,0%
			Indíces de aplanamiento, %máx.	INV E-230	20%	20%	25%	9,4%
	Características Químicas	Indíces de alargamiento, %máx.		INV E-233	20%	20%	-	23,4%
			Contenido de sulfatos, expresado como SO <sub>4</sub> , %máx.		INV E-233	-	1,00%	1,0%
	Reactividad	Reactividad Química	Si R ≥ 70, hay Reactividad con SiO <sub>2</sub> > R	INV E-234	-	-	No podrá presentar reactividad potencial con álcalis del cemento. El agregado es reactivo si se cumplen estas condiciones.	
			Si R < 70, hay Reactividad con SiO <sub>2</sub> > (35 + 0,5R)		-	-		
	Reactividad de Barras	A 16d... Reactividad con DL > 0,2%	ASTM C-1260	-	-			

Fuente. Concretera. Tablas de Caracterización y Ensayos


**Tabla X. Caracterización de agregado grueso.**

ABERTURA DEL TAMIZ		Porcentaje Pasa	Límite Inferior	Límite Superior	Cumple?
(mm)	(Estándar)	(%)			
38	1 1/2"	100,0%	100,0%	100,0%	OK
25	1"	97,0%	95,0%	100,0%	OK
19,00	3/4"	63,1%	60,0%	90,0%	OK
12,50	1/2"	16,6%	25,0%	60,0%	NO
9,50	3/8"	5,6%	5,0%	35,0%	OK
4,76	N° 4	0,5%	0,0%	10,0%	OK
2,36	N° 8	0,4%	0,0%	5,0%	OK
0,08	N° 200	0,0%	0,0%	1,5%	OK

Fuente. Concretera. Tablas de Caracterización y Ensayos

- ❖ **Agua potable.** El análisis fisicoquímico y microbiológico del agua suministrado por el acueducto se presenta a continuación.

**Tabla XI. Análisis Fisicoquímico y Microbiológico del Agua Utilizada para la Realización de las probetas.**

No Aplica FCC 507-008 Rev:0		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA		AÑO:		2012														
PARAMETROS	Parámetros Fisicoquímicos										Parámetros Microbiológicos									
	No. Muestras Fisicoquímicas	Cloro residual mg Cl <sub>2</sub> /L	Turbiedad UNT	Color aparente UPC	pH Unidades	Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg AVL	Alcalinidad mg CaCO <sub>3</sub> /L	Dureza mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO <sub>4</sub> /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO <sub>3</sub> /L	Nitritos mg NO <sub>2</sub> /L	No. de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales	Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli	Σ IRCA MENSUAL
Enero	90	1,02	0,57	3,1	7,70	0	0,05	80,9	74,9	4,9	23,9	0,10	1,0	N.D	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,92	0,56	2,4	7,58	0	0,05	59,6	77,5	4,4	28,9	N.D	0,9	N.D	168	0	100	0	100	0,14
Marzo	93	0,92	0,60	2,8	7,44	0	0,05	57,7	77,3	4,7	31,1	0,10	0,9	N.D	186	0	100	0	100	0,16
PROMEDIO	89	0,95	0,58	2,8	7,57	0	0,05	59,4	76,6	4,7	28,0	0,10	0,9	N.D	178	0,0	100	0,0	100	0,10
RES. 2115/07	3 días	0,3-2,0	2	15	6,5-9,0	ACEPT.	0,2	200	300	250	0,2	10	D	3 días	0	100	0	100	0,5	
Convenciones:	mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable																			
Nota:	El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5 AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.																			

Elaboró: Uire/Salomon Barragan

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ  
Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga [53]

## ANEXO B. Cronograma Actividades Seguido Durante la Experiencia

Tabla XII. Fabricación de Cilindros Testigos de Dimensiones 10\*20 al Interior de la Empresa Concretera [cm]

M	Fabricación			Desencofrado Luego del Fraguado (24 Horas)	Curado (28 Días)	Secado Al Aire (15 Días)	Tamañ o De Grava [In]	Ase n/ [Cm ]
	Fecha	Resis [Mpa]	#					
1	<b>Ago.31</b> 9:11 am	20.59	40	<b>Sep. 1</b> 7:30 am	<b>Sep. 29</b> 7:45 am	<b>Oct.14</b> 7:45 am	<b>3/4</b>	<b>12.7</b>
2	<b>Sep. 3</b> 8:41 am	27.46	40	<b>Sep. 5</b> 7:42 am	<b>Oct. 3</b> 7:57 am	<b>Oct.18</b> 7:57 am	<b>3/4</b>	<b>17.7 8</b>
3	<b>Sep. 9</b> 8:08 am	34.32	40	<b>Sep. 10</b> 7:40 am	<b>Oct. 8</b> 7:55 am	<b>Oct. 23</b> 7:55 am	<b>3/4</b>	<b>16.5 1</b>
4	<b>Sep. 10</b> 8:39 am	13.73	40	<b>Sep. 12</b> 2:00 pm	<b>Oct. 10</b> 2:15 pm	<b>Oct. 25</b> 2:15 pm	<b>3/4</b>	<b>11.4 3</b>
5	<b>Sep. 21</b> 7:24 am	24.03	40	<b>Sept. 22</b> 9:30 am	<b>Oct. 20</b> 9:45 am	<b>Nov. 4</b> 9:45 am	<b>3/4</b>	<b>17.1 4</b>

M= Mezcla

## ANEXO C. Dimensiones de especímenes después del fraguado y curado

**Tabla XIII. Medición después del fraguado**

Medidas tomadas después del fraguado															
#	Resistencia 140 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 210 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 245 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 280 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 350 Kg/cm <sup>2</sup>		
	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]
1	10,39	20,89	4017,2	10,35	20,55	4048,4	10,38	20,75	4024,1	10,5	20,8	4033	10,35	20,64	4044,6
2	10,35	20,78	3985	10,4	20,5	4014,5	10,38	20,8	4040,2	10,4	20,8	4057,8	10,35	20,7	4046,3
3	10,39	20,82	4020	10,4	20,7	4076,1	10,39	20,75	4037,1	10,3	20,7	4050,9	10,35	20,66	4065,3
4	10,37	20,8	4036,2	10,45	20,6	4032,4	10,37	20,82	4021,9	10,3	20,7	4057	10,35	20,7	4024,3
5	10,35	20,8	4012,3	10,4	20,6	3997,8	10,36	20,73	4018,8	10,4	20,7	4055,1	10,35	20,75	4072,8
6	10,35	20,86	4026,6	10,4	20,6	4062,4	10,39	20,84	4060,6	10,3	20,7	4036,3	10,36	20,74	4081,6
7	10,36	20,76	3978,2	10,4	20,8	4050,6	10,36	20,68	3999	10,4	20,7	4040,5	10,3	20,7	4041,7
8	10,33	20,75	3991,6	10,3	20,6	4065,1	10,36	20,83	4048,7	10,4	20,7	4059,9	10,35	20,74	4066,2
9	10,36	20,79	4032,2	10,45	20,4	3960,9	10,36	20,8	4038	10,4	20,7	4028,5	10,35	20,77	4041,8
10	10,36	20,81	4028	10,4	20,5	4041,3	10,37	20,72	4043,1	10,4	20,7	4058,5	10,38	20,7	4049
11	10,35	20,78	3998,5	10,3	20,5	4053,2	10,39	20,81	4052,5	10,35	20,7	4044,4	10,3	20,65	4050,1
12	10,7	20,82	4011,7	10,45	20,6	4017	10,36	20,77	4034,4	10,4	20,6	4067,4	10,3	20,7	4041,8
13	10,36	20,82	4013,5	10,45	20,5	4026,3	10,38	20,8	4018,7	10,4	20,8	4044,4	10,3	20,65	4053
14	10,36	20,77	4015,1	13,39	20,7	4035,8	10,35	20,7	4018,7	10,3	20,7	4040,9	10,3	20,7	4068,5
15	10,35	20,78	4007,4	10,37	20,6	4054	10,37	20,89	4066,6	10,4	20,7	4032,9	10,3	20,65	4056,7
16	10,39	20,84	3986	10,35	20,6	4062,8	10,35	20,77	4045,2	10,35	20,7	4030	10,38	20,7	4049
17	10,4	20,85	4010	10,36	20,5	4033,8	10,4	20,75	4029,3	10,38	20,7	4036,5	10,35	20,7	4051,8
18	10,39	20,73	3991	10,36	20,5	4015	10,38	20,81	4067	10,35	20,8	4015,8	10,5	20,65	4055,7
19	10,3	20,78	4021	10,36	20,7	4054,4	10,4	20,84	4055,1	10,39	20,8	4053,1	10,35	20,64	4050,6
20	10,35	20,08	4033	10,4	20,6	4071,3	10,35	20,78	4060,9	10,36	20,6	4067	10,36	20,65	4061,4
21	10,39	20,8	4008	10,38	20,6	4059	10,39	20,75	4037,2	10,34	20,8	4038,1	10,32	20,7	4066,1
22	10,35	20,77	4028,4	10,36	20,7	4033,9	10,4	20,78	4020,8	10,37	20,6	4058,6	10,45	20,71	4075,5
23	10,3	20,69	4018,2	10,37	20,5	4017	10,39	20,85	4051,2	10,36	20,6	4031	10,32	20,74	4079,1
24	10,35	20,7	4005,3	10,35	20,5	4062	10,3	20,8	4025,1	10,36	20,8	4053	10,32	20,66	4065,7
25	10,4	20,81	4023,5	10,35	20,5	4054,3	10,35	20,83	4025,3	10,35	20,7	4034	10,35	20,75	4050,4
26	10,37	20,72	3987,8	10,45	20,6	4068,4	10,36	20,81	4027	10,35	20,7	4069,5	10,36	20,7	4049,7
27	10,36	20,84	4060,1	10,36	20,5	4014,6	10,33	20,7	4018,3	10,35	20,8	4061,2	10,51	20,65	4068,5
28	10,35	20,75	4015,4	10,3	20,7	4048	10,45	20,75	4020,1	10,4	20,6	4045	10,32	20,64	4076,5
29	10,4	20,7	4008,1	10,36	20,6	4037,6	10,37	20,7	4071,2	10,4	20,7	4058,8	10,35	20,65	4077,1
30	10,45	20,82	4022,8	10,7	20,6	4062	10,39	20,76	4025	10,35	20,8	4049	10,37	20,7	4070,6
31	10,38	20,73	4016	10,31	20,5	4043,5	10,38	20,75	4056,5	10,37	20,6	4050,1	10,33	20,73	4067,5
32	10,35	20,67	4041,5	10,31	20,6	4068,5	10,3	20,77	4007,8	10,36	20,6	4051,8	10,35	20,74	4062,8
33	10,35	20,76	4008,5	10,4	20,7	4043,8	10,4	20,81	4017,3	10,35	20,7	4050,9	10,36	20,64	4074,7
34	10,36	20,8	4022,3	10,33	20,6	4072,7	10,37	20,8	4021,3	10,35	20,6	4067,3	10,39	20,75	4051,6
35	10,4	20,79	3976	10,35	20,5	4052	10,35	20,75	4004,5	10,38	20,8	4060,5	10,35	20,67	4046,1
36	10,45	20,77	3987,9	10,36	20,5	4040,1	10,4	20,8	4067,8	10,38	20,6	4062	10,38	20,68	4059,1
37	10,3	20,72	3985,5	10,36	20,7	4045,3	10,4	20,81	4045,7	10,35	20,8	4061,3	10,35	20,7	4045,4
38	10,35	20,73	4030	10,4	20,6	4069,8	10,3	20,83	4063,2	10,35	20,7	4052,8	10,36	20,75	4058,6
39	10,36	20,8	4043,5	10,39	20,6	4058,6	10,33	20,75	4087	10,4	20,6	4055,1	10,36	20,65	4068,6
40	10,36	20,84	4014,8	10,42	20,5	4069,8	10,32	20,7	4054,2	10,35	20,6	4034	10,37	20,7	4071,7

**Tabla XIV. Medición Antes de Ensayar**

Medidas tomadas antes de ensayar															
#	Resistencia 140 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 210 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 245 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 280 Kg/cm <sup>2</sup>			Resistencia 350 Kg/cm <sup>2</sup>		
	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]	Ø [cm]	L [cm]	W [g]
1	10,37	20,84	3912	10,36	20,6	3975	10,36	20,75	3926	10,33	20,74	4006	10,35	20,69	4040
2	10,36	20,73	3837	10,36	20,53	3933	10,36	20,78	3943	10,4	20,78	4027	10,36	20,72	4041
3	10,35	20,84	3915	10,4	20,83	3999	10,39	20,75	3937	10,39	20,76	4007	10,37	20,7	4058
4	10,36	20,85	3939	10,3	20,67	3948	10,33	20,79	3926	10,35	20,79	4018	10,35	20,65	4021
5	10,35	20,8	3911	10,34	20,52	3930	10,32	20,73	3932	10,33	20,78	4038	10,34	20,73	4066
6	10,35	20,85	3920	10,35	20,55	3991	10,35	20,78	3970	10,37	20,93	4005	10,37	20,77	4077
7	10,36	20,73	3868	10,35	20,85	3974	10,33	20,71	3912	10,35	20,78	4011	10,34	20,66	4035
8	10,36	20,75	3893	10,35	20,68	3990	10,35	20,8	3953	10,37	20,8	4031	10,33	20,73	4062
9	10,36	20,81	3929	10,4	20,37	3899	10,38	20,74	3948	10,36	20,76	3994	10,36	20,7	4038
10	10,29	20,81	3927	10,4	20,53	3966	10,39	20,74	3947	10,36	20,77	4032	10,36	20,75	4048
11	10,36	20,76	3879	10,36	20,5	3991	10,34	20,81	3965	10,36	20,85	4021	10,32	20,7	4051
12	10,36	20,82	3897	10,38	20,51	3940	10,33	20,73	3942	10,35	20,74	4047	10,33	20,68	4037
13	10,4	20,83	3910	10,37	20,6	3942	10,35	20,78	3924	10,38	20,85	4010	10,38	20,65	4045
14	10,36	20,79	3896	10,3	20,68	3965	10,34	20,72	3923	10,34	20,8	4013	10,34	20,71	4064
15	10,36	20,75	3887	10,32	20,5	3974	10,36	20,87	3984	10,32	20,79	4015	10,34	20,69	4048
16	10,35	20,77	3865	10,37	20,77	3985	10,35	20,65	3956	10,33	20,77	4017	10,36	20,72	4044
17	10,36	20,72	3892	10,36	20,59	3945	10,36	20,71	3945	10,34	20,8	4021	10,34	20,7	4048
18	10,37	20,7	3847	10,39	20,62	3937	10,34	20,69	3977	10,36	20,76	4011	10,32	20,75	4051
19	10,36	20,81	3904	10,34	20,63	3969	10,36	20,73	3967	10,32	20,73	4038	10,36	20,61	4039
20	10,38	20,81	3888	10,36	20,57	3983	10,36	20,8	3961	10,39	20,82	4044	10,34	20,64	4055
21	10,35	20,81	3890	10,38	20,5	3988	10,35	20,77	3942	10,38	20,76	4020	10,36	20,75	4060
22	10,38	20,77	3921	10,38	20,51	3960	10,34	20,81	3921	10,35	20,81	4036	10,36	20,65	4071
23	10,37	20,67	3869	10,36	20,32	3930	10,33	20,82	3963	10,32	20,78	4009	10,35	20,72	4070
24	10,37	20,69	3875	10,35	20,58	3996	10,33	20,76	3940	10,37	20,81	4025	10,34	20,67	4058
25	10,36	20,76	3906	10,36	20,55	3991	10,36	20,72	3938	10,36	20,87	4014	10,38	20,69	4036
26	10,36	20,77	3870	10,38	20,52	3984	10,38	20,71	3945	10,35	20,71	4016	10,37	20,66	4041
27	10,38	20,76	3931	10,39	20,52	3916	10,35	20,78	3920	10,34	20,69	4008	10,36	20,66	4058
28	10,39	20,74	3859	10,38	20,64	3975	10,36	20,74	3922	10,36	20,78	4004	10,34	20,59	4072
29	10,37	20,73	3865	10,33	20,54	3959	10,36	20,67	3981	10,38	20,8	4023	10,36	20,63	4066
30	10,33	20,73	3892	10,36	20,53	3983	10,34	20,66	3934	10,38	20,71	4011	10,35	20,72	4061
31	10,36	20,79	3875	10,35	20,66	3966	10,34	20,78	3975	10,35	20,82	4010	10,34	20,67	4063
32	10,37	20,88	3908	10,37	20,42	3991	10,33	20,77	3922	10,34	20,89	4025	10,36	20,68	4058
33	10,38	20,83	3880	10,37	20,48	3967	10,35	20,79	3924	10,36	20,85	4029	10,36	20,68	4070
34	10,37	20,8	3910	10,36	20,56	3995	10,36	20,74	3931	10,38	20,76	4032	10,35	20,68	4043
35	10,36	20,81	3851	10,38	20,57	3975	10,38	20,79	3916	10,35	20,88	4041	10,36	20,67	4039
36	10,36	20,76	3869	10,36	20,41	3972	10,34	20,74	3970	10,36	20,81	4040	10,35	20,66	4048
37	10,38	20,72	3850	10,38	20,69	3990	10,36	20,84	3945	10,39	20,83	4015	10,36	20,66	4038
38	10,39	20,81	3905	10,36	20,49	3998	10,34	20,78	3943	10,39	20,74	4012	10,34	20,67	4051
39	10,36	20,74	3914	10,35	20,54	3998	10,37	20,69	3981	10,34	20,84	4008	10,37	20,68	4065
40	10,38	20,79	3863	10,36	20,47	3987	10,38	20,83	3927	10,36	20,85	4021	10,36	20,64	4067

## ANEXO D. Datos Arrojadados por la Técnica de VPU para Ambos Equipos

**Tabla XV. Medición de VPU para la resistencia de 140 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 140 Kg/m <sup>2</sup>									
#	L	Pundit Plus					Controls		
		Tv (μs)	VPU <sub>Equip</sub>	VPU calculado [m/s]	Ed [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa]	Tv (μs)	VPU calculado [m/s]	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa]
1	20,84	55,67	3586	3744,43	30433,33	28014,08	58,9	3538,87	25022,82
2	20,73	55,67	3599,3	3725,56	30200	27401,94	60,53	3426,04	23173,02
3	20,84	55,83	3552	3733,61	29933,33	27973,48	59,23	3519,30	24854,28
4	20,86	56,5	3533,33	3691,68	29533,33	27452,78	59,43	3509,47	24809,78
5	20,80	56,67	3523	3671,29	29866,67	27084,83	57,67	3607,63	26153,62
6	20,86	56	3575,33	3724,46	30700	27841,29	57,36	3635,73	26530,54
7	20,73	56,3	3516,33	3682,77	30233,33	27009,25	59,17	3504,33	24455,42
8	20,75	56,77	3522,67	3655,31	29500	26728,38	60,03	3456,41	23898,71
9	20,81	55,63	3569	3740,74	30533,33	28162,94	57,53	3617,20	26333,53
10	20,82	56,33	3537,33	3695,32	30166,67	27835,92	59,63	3490,83	24840,38
11	20,76	56,33	3527	3685,73	29866,67	27060,51	60,93	3407,49	23129,01
12	20,82	56,5	3508,67	3686,01	29733,33	27144,57	59,57	3496,25	24421,55
13	20,83	55,77	3552,33	3735,74	30733,33	27729,48	58,67	3551,07	25055,80
14	20,79	57	3494,33	3647,89	29266,67	26616,21	59,3	3506,40	24591,58
15	20,76	56,73	3506,67	3659,04	29366,67	26740,46	59	3518,47	24725,29
16	20,77	55,9	3556	3715,56	29866,67	27455,24	58,6	3544,36	24983,52
17	20,72	55,73	3581,67	3718,60	30833,33	27698,86	58,3	3554,88	25313,65
18	20,70	56,97	3529	3634,93	29033,33	26157,93	59,23	3495,83	24194,28
19	20,82	55,97	3529	3719,53	30500	27675,38	58,27	3572,71	25533,60
20	20,82	56,6	3479,33	3677,91	28566,67	26844,89	58,93	3532,29	24761,25
21	20,82	57,93	3472,33	3593,26	28700	25785,39	60,8	3423,84	23411,19
22	20,78	56,07	3569	3705,41	30233,33	27513,39	57,53	3610,95	26128,50
23	20,67	57,27	3468,67	3609,60	29366,67	25972,32	58,1	3557,83	25232,62
24	20,69	56,13	3552	3687,11	30100	27118,10	58,77	3521,89	24742,23
25	20,76	57,13	3502,33	3633,95	29400	26500,06	59,83	3469,97	24162,37
26	20,77	57	3484	3644,38	29366,67	26387,68	58,9	3526,82	24712,71
27	20,77	57,23	3451,67	3628,30	29133,33	26489,59	58,2	3568,04	25616,95
28	20,74	57,8	3472	3588,40	28600	25432,02	61,7	3361,58	22318,56
29	20,74	56,83	3522,67	3648,56	29766,67	26405,1	58,9	3520,54	24584,61
30	20,74	57,63	3466	3598,43	28900	26091,05	57,93	3579,80	25821,53
31	20,80	56,67	3520,67	3669,88	29500	26757,97	57,07	3644,15	26384,17
32	20,88	56,43	3506,33	3700,11	29633,33	27262,79	58,43	3573,47	25428,48
33	20,83	57,9	3458	3598,10	28433,33	25619,85	58,9	3537,01	24757,29
34	20,81	57,37	3502,33	3627,36	28466,67	26310,45	58,77	3540,95	25071,79
35	20,81	57,4	3476	3626,13	28933,33	25949,55	59,5	3498,15	24150,14
36	20,77	57,53	3499	3609,55	28233,33	25881,55	58,93	3523,81	24666,49
37	20,73	57,3	3510,33	3617,62	28766,6667	25827,36	58,87	3521,34	24470,92
38	20,82	57,13	3450	3643,93	29200	26412,89	59,47	3500,95	24380,79
39	20,75	57	3474	3640,17	29766,67	26651,72	58,9	3522,75	24959,99
40	20,79	56,43	3575,33	3685,05	29500	26813,32	58,9	3530,73	24614,52

**Tabla XVI. Medición de VPU para la resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 210 Kg/m <sup>2</sup>									
#	L	Pundit Plus					Controls		
		Tv (μs)	VPU <sub>Equip</sub>	(L/Tv) [m/s]	Ed [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ) (1-2σ)/(1- σ)) [Mpa]	Tv (μs)	(L/Tv) [m/s]	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ) (1-2σ)/(1-σ)) [Mpa]
1	20,60	51,16	3960,33	4027,62	36966,67	33355,84	52,03	3960,53	32253,95
2	20,53	51,8	3855,67	3963,51	35433,33	32074,80	52,83	3885,99	30832,41
3	20,83	52,33	3818	3980,25	34000	32180,737	54,76	3803,40	29384,62
4	20,67	52,43	3821,33	3943,48	34433,33	32048,02	53,1	3893,97	31248,35
5	20,52	51,96	3906	3949,83	35200	31972,85	54,66	3754,75	28892,55
6	20,55	50,4	3994,67	4078,37	37500	34487,81	51,56	3986,10	32944,93
7	20,85	53,26	3795	3915,01	34933,33	31233,51	53,06	3929,77	31469,38
8	20,68	51	3950	4055,88	37133,33	33938,03	52,6	3932,50	31904,76
9	20,37	51,3	3875	3972,5	36666,67	31988,79	52,23	3901,53	30855,82
10	20,53	51,06	3929	4021,80	36733,33	33060,91	51,56	3982,80	32422,89
11	20,50	50,4	3957,67	4068,65	36766,67	34345,89	52,3	3920,84	31895,73
12	20,51	50,8	3969,33	4038,18	36700	33259,71	53,66	3822,48	29801,40
13	20,60	53	3790	3887,16	35733,33	30809,16	54,4	3787,13	29243,80
14	20,68	52,03	3878	3975,72	35066,67	32502,71	53,43	3871,55	30821,83
15	20,50	50,83	3871,67	4034,36	35933,33	33883,22	54	3797,77	30025,78
16	20,77	52,33	3835,67	3969,55	34200	32167,05	53,83	3858,94	30399,43
17	20,59	51,8	3843	3975,28	35966,67	32305,63	52,6	3914,82	31330,42
18	20,62	52,16	3873,33	3953,86	35200	31626,98	52,53	3926,26	31187,03
19	20,63	52,5	3799,67	3929,71	35333,33	31823,86	53,26	3873,15	30914,38
20	20,57	51,86	3843,67	3967,48	36766,67	32517,17	54,06	3806,04	29924,73
21	20,50	52,4	3790	3913,35	34133,33	31634,17	53,3	3847,27	30574,87
22	20,51	52,66	3817,33	3895,82	34233,33	31154,95	53,93	3804,32	29708,74
23	20,32	52,33	3802	3883,94	35733,33	31098,87	52,86	3844,76	30474,57
24	20,58	51,86	3873,67	3968,83	35533,33	32678,54	52,06	3953,58	32427,97
25	20,55	52,93	3989,33	3883,75	37900	31246,13	52,46	3918,29	31804,44
26	20,52	50,73	3949,67	4045,86	36166,67	33739,31	51,93	3952,37	32198,12
27	20,52	51,1	3888	4016,43	35633,33	32642,02	53,33	3848,25	29965,49
28	20,64	51,06	3972	4041,77	36933,33	33416,02	51,63	3997,41	32686,57
29	20,54	50,83	3903,67	4040,65	35166,67	33755,68	52,4	3919,84	31767,39
30	20,53	50,63	3992	4056,22	36966,67	34027,98	52,43	3916,97	31731,77
31	20,66	49,96	3963,67	4035,75	36500	33387,10	53,03	3896,60	31124,44
32	20,42	51,56	3903,33	3961,08	35200	32662,46	53,9	3789,61	29895,75
33	20,48	51,26	3916,33	3994,79	35466,67	32883,20	52,33	3913,37	31556,40
34	20,56	50,63	3955	4060,56	36600	34160,47	52,73	3898,86	31493,90
35	20,57	51,4	3906	4002,14	36766,67	32867,42	52,33	3930,76	31705,53
36	20,41	50,43	4005,33	4048,71	35933,33	34018,62	51,73	3946,97	32330,40
37	20,69	51,93	3865,67	3984,72	34800	32529,33	52,83	3916,84	31430,51
38	20,49	51,7	3870,67	3964,02	35500	32697,38	52,16	3928,56	32115,00
39	20,54	51,66	3823,67	3976,06	35600	32906,70	52,43	3917,92	31951,44
40	20,47	51,1	3909,67	4007,43	35033,33	33358,02	52,53	3898,09	31562,56

**Tabla XVII. Medición de VPU para la resistencia de 245 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 245 Kg/m <sup>2</sup>									
#	L	Pundit Plus					Controls		
		Tv (μs)	VPU <sub>Equip</sub>	(L/Tv) [m/s]	Ed [Mpa] Pundit Plus	Ed= $(\rho V^2(1+\sigma)(1-2\sigma)/(1-\sigma))$ [Mpa]	Tv (μs)	(L/Tv) [m/s]	Ed= $(\rho V^2(1+\sigma)(1-2\sigma)/(1-\sigma))$ [Mpa]
1	20,75	52,9	3966,66	3922,68	36333,33	31082,91	55,9	3712,16	27836,16
2	20,78	52,73	3971,66	3940,58	37500	31422,64	54,07	3843,40	29891,92
3	20,75	53,36	3891,33	3889,50	36733,33	30418,44	55,77	3722,11	27856,57
4	20,79	53,33	3922,33	3899,25	36700	30776,75	56,27	3695,97	27651,44
5	20,73	53,53	3913,66	3873,10	36533,33	30585,47	55,6	3729,13	28353,99
6	20,78	53,2	3942	3907,33	37166,67	31137,70	54,57	3809,46	29597,50
7	20,71	52,8	3961,66	3922,34	37333,33	31190,43	54,8	3779,19	28955,30
8	20,80	52,63	3957,33	3952,43	37666,66	31712,19	54,3	3831,12	29795,34
9	20,74	52,67	3987,66	3938,16	37700	31367,89	54,5	3805,68	29293,01
10	20,74	52,8	3953,66	3928,59	37233,33	31156,75	55,43	3741,97	28266,89
11	20,81	52,73	3961,66	3947,21	37200	31767,53	55,47	3752,70	28713,74
12	20,73	53,17	3922,33	3900,56	36866,67	31009,50	55,43	3741,07	28525,39
13	20,78	54,53	3848,33	3811,24	34966,67	29320,05	57,07	3642,05	26774,65
14	20,72	52,43	3994,66	3953,01	37633,33	31645,08	54,16	3826,52	29652,20
15	20,87	53,13	3934,66	3929,36	37033,33	31402,43	55,43	3766,32	28850,65
16	20,65	52,93	3977	3902,07	37300	31154,31	53,96	3827,36	29972,67
17	20,71	52,57	4012,66	3940,71	36800	31563,64	54,96	3768,64	28867,50
18	20,69	52,63	3932,66	3932,29	37766,67	31797,40	55,06	3758,53	29049,30
19	20,73	52,57	3989,66	3944,51	37066,67	31782,57	55,4	3742,77	28614,78
20	20,80	52,7	3977	3948,07	37733,33	31639,47	55,87	3724,22	28154,31
21	20,77	53,17	3932	3906,77	36866,67	30986,86	54,83	3788,02	29131,79
22	20,81	52,63	3972	3954,33	37633,33	31561,95	55,47	3752,34	28419,83
23	20,82	53,1	3922	3922,22	37066,67	31423,61	55,33	3763,91	28938,20
24	20,76	53,1	3957	3909,79	37000	31124,16	54,5	3809,35	29545,66
25	20,72	53,23	3931,66	3892,48	37066,67	30696,74	55,17	3756,07	28582,89
26	20,71	53,03	3977,33	3905,27	36800	30897,17	55,03	3763,35	28692,27
27	20,78	53,67	3877	3873,35	37233,33	30265,73	55,77	3727,49	28029,22
28	20,74	52,63	3989,33	3940,84	36833,33	31322,83	54,7	3791,95	29000,67
29	20,67	52,87	3947,33	3910,02	37566,67	31394,01	55,9	3697,85	28079,35
30	20,66	52,37	4039,33	3945,83	37066,67	31740,96	54,93	3761,46	28844,17
31	20,78	52,53	3954	3957,16	37700	32061,37	54,53	3811,98	29752,80
32	20,77	55,1	3879	3771,14	36400	28787,45	54,43	3817,33	29496,91
33	20,79	53,67	3910	3874,28	36333,33	30274,64	55,73	3730,62	28071,02
34	20,74	52,83	3969,33	3926,68	37466,67	31151,46	55,9	3711,27	27827,28
35	20,79	53,43	3920,33	3892,139	36466,67	30308,82	56,47	3683,05	27139,96
36	20,74	53,77	3888,66	3857,59	35966,67	30529,24	54,7	3791,77	29496,31
37	20,84	53,43	3995	3901,68	36733,33	30726,38	53,53	3894,39	30611,69
38	20,78	53,2	3922,33	3906,01	37066,67	30993,26	55,8	3724,01	28172,29
39	20,69	53,07	3976,66	3900,37	36766,67	31150,42	54,93	3767,83	29069,37
40	20,83	53,77	3915,33	3874,14	36266,67	30065,89	54,9	3794,17	28837,37

**Tabla XVIII. Medición de VPU para la resistencia de 280 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 280 Kg/m <sup>2</sup>									
#	L	Pundit Plus					Controls		
		Tv (μs)	VPU <sub>Equip</sub>	(L/Tv) [m/s]	Ed [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ) 1-2σ)/(1-σ) [Mpa]	Tv (μs)	(L/Tv) [m/s]	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ) 1-2σ)/(1-σ) [Mpa]
1	20,74	50,2	4005,66	4133,07	41200	35412,67	52,64	3941,48	32205,78
2	20,78	50,6	3924	4107,31	40866,67	34579,40	52,33	3971,27	32326,72
3	20,76	50,8	3873,33	4086,61	41800	34211,16	53,23	3899,81	31155,01
4	20,79	50,3	3826,33	4133,20	40766,67	35291,92	52,27	3977,67	32685,99
5	20,78	50,33	3886	4129,87	41900	35566,50	51,87	4007,77	33494,68
6	20,93	50,06	3858,33	4180,46	40500	35635,27	52,5	3986,67	32408,49
7	20,78	50,3	3841	4131,21	41633,33	35199,89	53,33	3910,93	31545,92
8	20,80	51,33	3797	4053,31	40800	33898,29	52,7	3948,14	32162,92
9	20,76	50,67	3815,33	4097,76	40900	34455,39	52	3992,69	32711,10
10	20,77	50,57	3828	4109,03	41900	34981,57	52,53	3955,20	32411,42
11	20,85	50,23	3901,33	4150,63	41300	35425,26	51,87	4019,92	33229,24
12	20,74	50,43	3816,33	4112,75	41700	35250,06	53,07	3908,66	31838,42
13	20,85	51,07	3795	4084,46	41700	34092,55	52,17	3998,33	32669,94
14	20,80	50,67	3787,66	4106,25	40733,33	34805,07	52,77	3942,83	32089,86
15	20,79	50,03	3860,66	4156,42	41533,33	35839,45	52,73	3943,61	32263,37
16	20,77	51,27	3812,33	4053,12	41400	34072,07	52,13	3985,74	32948,65
17	20,80	50,3	3804,33	4135,58	42000	35420,71	53,03	3922,43	31863,64
18	20,76	50,83	3776	4084,52	39833,33	34363,91	53,57	3876,10	30946,42
19	20,73	50,9	3793,66	4072,88	41300	34712,17	52,3	3963,86	32878,64
20	20,82	52,5	3809,33	3965,71	41200	32426,89	51,67	4029,67	33481,36
21	20,76	50,6	3769	4103,35	41333,33	34639,01	52,6	3947,33	32054,93
22	20,81	50,93	3836,66	4086,51	42666,67	34613,81	51,27	4059,94	34165,15
23	20,78	50,83	3836,33	4088,85	40733,33	34690,34	53,77	3865,77	31008,41
24	20,81	50,06	3820	4156,85	40500	35563,29	53,13	3916,93	31576,58
25	20,87	50,23	3849	4154,61	42200	35397,52	52,9	3945,17	31918,72
26	20,71	51,3	3836,33	4038,01	41466,67	33783,67	51,23	4043,26	33871,65
27	20,69	49,9	3848,33	4146,69	41400	35643,42	53,03	3901,69	31556,05
28	20,78	49,96	3763,67	4159,37	41700	35531,60	53,07	3916,39	31501,55
29	20,80	49,46	3880,67	4206,46	41733,33	36329,08	52,1	3993,85	32749,46
30	20,71	49,76	3809,33	4163,02	40800	35664,89	53,07	3904,14	31367,10
31	20,82	50,9	3799,67	4090,37	40400	34445,81	54,47	3822,52	30082,25
32	20,89	50,86	3800,33	4107,20	40633,33	34806,91	52,97	3944,36	32101,61
33	20,85	49,86	3838,67	4181,55	41866,67	36009,22	52,1	4002,30	32988,22
34	20,76	51	3888,33	4070,78	41800	34176,51	52,17	3979,74	32664,94
35	20,88	50,66	3901,33	4121,44	42000	35130,09	51,97	4018,34	33394,44
36	20,81	50,3	3898	4138,56	42633,33	35455,87	52,3	3980,30	32795,98
37	20,83	50,6	3870,67	4117,98	42133,33	34679,13	52,73	3951,39	31929,99
38	20,74	50,33	3908,67	4120,53	42966,67	34831,52	52,27	3968,11	32302,36
39	20,84	51,3	3878,67	4064,13	43000	34000,11	51,83	4022,31	33304,03
40	20,85	50,6	3871	4120,55	43600	34940,67	51,97	4012,18	33127,04

**Tabla XIX. Medición de VPU para la resistencia de 350 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 350 Kg/m <sup>2</sup>									
#	L	Pundit Plus					Controls		
		Tv (μs)	VPU <sub>Equip</sub>	(L/Tv) [m/s]	Ed [Mpa] Pundit Plus	Ed= $(\rho V^2(1+\sigma)(1-2\sigma)/(1-\sigma))$ [Mpa]	Tv (μs)	(L/Tv) [m/s]	Ed= $(\rho V^2(1+\sigma)(1-2\sigma)/(1-\sigma))$ [Mpa]
1	20,69	47,73	4192,67	4336,17	41500	39191,67	50,3	4114,91	22018,58
2	20,72	48,97	4078,33	4231,65	40000	37278,49	50,97	4065,59	23281,50
3	20,70	48,4	4092	4277,89	39700	38213,64	51	4059,80	22987,04
4	20,65	48,5	4103,33	4258,35	40000	37738,15	51,33	4023,31	23001,09
5	20,73	47,97	4143,67	4322,58	40666,67	39227,41	51,17	4052,24	22970,37
6	20,77	48,73	4090	4262,58	39366,67	37986,20	52,3	3971,89	23254,73
7	20,66	48,5	4157,67	4259,79	41066,67	37933,65	52,33	3947,77	23146,99
8	20,73	47,73	4178,67	4344,55	40700	39649,47	54,07	3835,63	22921,19
9	20,70	47,93	4183,67	4319,95	42066,67	38802,99	50,6	4092,29	22989,31
10	20,75	48,87	4140,33	4246,24	40666,67	37534,04	51,43	4034,34	23457,21
11	20,7	48,07	4149,67	4306,51	41266,67	38991,98	51,33	4032,46	23445,05
12	20,68	47,57	4205	4347,79	42100	39580,66	49,73	4158,37	23035,90
13	20,65	47,8	4175	4321,96	41400	38899,18	52,07	3967,79	23247,09
14	20,71	48,67	4115	4255,89	40766,67	38062,62	51,27	4040,05	22101,86
15	20,69	48,77	4120,33	4243,67	40500	37726,45	51,63	4008,06	23110,56
16	20,72	48,6	4134,67	4263,99	40500	37838,33	51,27	4042,19	23075,13
17	20,70	48,07	4170,67	4307,55	40933,33	38852,04	51,37	4030,82	23121,02
18	20,75	48,63	4101,33	4268,26	40266,67	38224,94	51,63	4020,27	23053,60
19	20,61	48,9	4062,33	4214,92	38766,67	37170,54	51,9	3971,29	22850,29
20	20,64	48,9	4084	4222,08	39600	37475,15	50,87	4058,84	22636,18
21	20,75	48,43	4120,67	4284,44	40966,67	38323,80	51,4	4037,15	23738,89
22	20,65	49,37	4087	4183,38	39866,67	36776,36	51,03	4046,76	23090,38
23	20,72	47,77	4172	4337,75	41100	39500,01	51,5	4023,30	22529,67
24	20,67	48,93	4106,33	4224,93	40033,33	37502,59	51,57	4009,17	23085,18
25	20,69	47,77	4219,67	4332,51	41166,67	38934,55	50,4	4106,15	23363,17
26	20,66	49,17	4081	4202,84	39433,33	36788,84	51,47	4015,02	22929,99
27	20,66	48,4	4109,33	4269,42	39333,33	38182,14	51,13	4041,19	22999,54
28	20,59	47,7	4132	4317,81	41166,67	39469	50,23	4100,06	22786,38
29	20,63	48,6	4123,33	4246,50	41033,33	37910,07	50,5	4086,73	22811,49
30	20,72	48,23	4147,33	4297,02	41166,67	38664,90	51,03	4061,26	23154,22
31	20,67	48,13	4132,33	4296,19	40333,33	38816,71	50,8	4070,66	23629,94
32	20,68	48,83	4095,33	4235,63	40100	37572,81	51,57	4011,11	23233,64
33	20,68	47,83	4145	4323,34	40766,67	39222,98	51,23	4036,43	23337,50
34	20,68	48,8	4106,33	4239,13	40666,67	37526,73	51,8	3993,62	22569,39
35	20,67	49,27	4075,67	4196,14	39466,67	36729,47	52,2	3960,34	23288,89
36	20,66	47,1	4210,33	4387,47	41033,33	40275,92	50,77	4070,58	23604,30
37	20,66	48,07	4160,67	4299,65	40766,67	38558,09	51,5	4013,00	22904,52
38	20,67	47,67	4169,33	4338,25	40933,33	39478,84	50,8	4070,66	22907,77
39	20,68	48,63	4111,67	4253,25	40466,67	37832,72	51,27	4034,78	22976,10
40	20,64	48,33	4120,67	4272,20	39966,67	38329,81	51,73	3991,43	23257,26

## ANEXO E. Datos del Ensayo de Compresión

Tabla XX. Resultados de ensayo a la compresión. Para la resistencia de 140 Kg/cm<sup>2</sup>

RESISTENCIA 140 Kg/cm <sup>2</sup>							
#	Peso Unitario	f <sub>c</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>c</sub> KN/mm <sup>2</sup>	R. de poiss-on (σ)	Ec [MPa] =1950 √f <sub>c</sub>	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa] Controls
1	2220,04	163,63	16,04	0,2	7811,35	28014,08	25022,82
2	2193,58	152,08	14,91	0,2	7530,77	27401,94	23173,02
3	2229,69	149,02	14,61	0,2	7454,51	27973,48	24854,28
4	2238,18	156,95	15,39	0,2	7650,36	27452,78	24809,78
5	2232,77	138,65	13,59	0,2	7190,46	27084,83	26153,62
6	2230,07	160,69	15,75	0,2	7740,93	27841,29	26530,54
7	2212,69	138,50	13,58	0,2	7186,53	27009,25	24455,42
8	2222,69	159,36	15,62	0,2	7708,89	26728,38	23898,71
9	2236,24	154,35	15,13	0,2	7586,65	28162,94	26333,53
10	2264,94	154,09	15,11	0,2	7580,35	27835,92	24840,38
11	2213,31	147,47	14,46	0,2	7415,61	27060,51	23129,01
12	2219,86	138,39	13,57	0,2	7183,87	27144,57	24421,55
13	2207,72	163,09	15,99	0,2	7798,65	27729,48	25055,80
14	2222,38	144,41	14,16	0,2	7338,47	26616,21	24591,59
15	2219,16	149,53	14,66	0,2	7467,20	26740,46	24725,29
16	2209,71	150,44	14,75	0,2	7490,08	27455,24	24983,52
17	2225,66	138,03	13,53	0,2	7174,29	27698,86	25313,65
18	2199,72	128,50	12,60	0,2	6922,29	26157,93	24194,28
19	2222,66	140,88	13,81	0,2	7248,08	27675,38	25533,60
20	2205,03	139,12	13,64	0,2	7202,76	26844,89	24761,25
21	2218,97	138,46	13,57	0,2	7185,59	25785,39	23411,19
22	2226,53	147,94	14,50	0,2	7427,63	27513,39	26128,50
23	2214,87	145,76	14,29	0,2	7372,71	25972,32	25232,62
24	2216,37	139,39	13,66	0,2	7209,69	27118,10	24742,23
25	2229,69	136,61	13,39	0,2	7137,42	26500,06	24162,37
26	2207,54	146,57	14,37	0,2	7392,96	26387,68	24712,71
27	2235,76	137,19	13,45	0,2	7152,68	26489,59	25616,95
28	2194,49	150,11	14,72	0,2	7481,62	25432,02	22318,56
29	2203,94	150,50	14,75	0,2	7491,52	26405,1	24584,61
30	2238,82	144,29	14,15	0,2	7335,28	26091,05	25821,53
31	2207,52	132,31	12,97	0,2	7024,12	26757,97	26384,17
32	2212,56	159,14	15,60	0,2	7703,58	27262,79	25428,48
33	2198,80	143,69	14,09	0,2	7319,99	25619,85	24757,29
34	2221,78	131,43	12,88	0,2	7000,69	26310,45	25071,79
35	2192,80	151,21	14,82	0,2	7509,06	25949,55	24150,14
36	2207,18	136,01	13,33	0,2	7121,63	25881,55	24666,49
37	2192,75	139,31	13,66	0,2	7207,43	25827,36	24470,92
38	2210,20	128,29	12,58	0,2	6916,59	26412,89	24380,79
39	2234,79	146,14	14,33	0,2	7382,09	26651,72	24959,99
40	2193,91	154,52	15,15	0,2	7590,99	26813,32	24614,52

**Tabla XXI. Resultados de ensayo a la compresión. Para la resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 210 Kg/cm <sup>2</sup>							
#	Peso Unitario	f <sub>c</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>c</sub> KN/mm <sup>2</sup>	R. de poiss- on (σ)	Ec [MPa] =1950 √f <sub>c</sub>	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1- 2σ)/(1-σ)) [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1- 2σ)/(1-σ)) [Mpa] Controls
1	2284,71	304,21	29,83	0,2	10650,90	33355,84	32253,95
2	2268,61	278,86	27,34	0,2	10197,49	32074,80	30832,41
3	2257	285,58	28	0,2	10319,56	32180,73	29384,62
4	2289,80	294,76	28,90	0,2	10484,12	32048,02	31248,35
5	2277,08	288,84	28,32	0,2	10378,36	31972,85	28892,55
6	2303,82	296,82	29,10	0,2	10520,63	34487,81	32944,93
7	2264,17	307,09	30,11	0,2	10701,21	31233,51	31469,38
8	2292,31	304,55	29,86	0,2	10656,71	33938,03	31904,76
9	2252,29	303,91	29,80	0,2	10645,52	31988,79	30855,82
10	2271,07	279,27	27,38	0,2	10204,88	33060,91	32422,89
11	2305,32	325,08	31,87	0,2	11010,04	34345,89	31895,73
12	2266,22	291,14	28,55	0,2	10419,51	33259,71	29801,40
13	2265,53	287,01	28,14	0,2	10345,44	30809,16	29243,80
14	2284,78	282,12	27,66	0,2	10256,89	32502,71	30821,83
15	2313,09	303,46	29,75	0,2	10637,72	33883,22	30025,78
16	2268,22	298,22	29,24	0,2	10545,38	32167,05	30399,43
17	2271,42	266,10	26,09	0,2	9961,461	32305,63	31330,42
18	2247,87	282,69	27,72	0,2	10267,24	31626,98	31187,03
19	2289,75	303,78	29,79	0,2	10643,38	31823,86	30914,37
20	2295,30	307,67	30,17	0,2	10711,26	32517,17	29924,73
21	2295,16	273,26	26,79	0,2	10094,57	31634,17	30574,87
22	2280,79	283,74	27,82	0,2	10286,33	31154,95	29708,73
23	2290,63	219,91	21,56	0,2	9055,782	31098,87	30474,57
24	2305,12	297,67	29,19	0,2	10535,79	32678,54	32427,97
25	2301,70	304,61	29,87	0,2	10657,88	31246,13	31804,44
26	2290,19	329,78	32,34	0,2	11089,35	33739,31	32198,12
27	2248,29	273,53	26,82	0,2	10099,57	32642,02	29965,49
28	2272,83	295,55	28,98	0,2	10498,21	33416,02	32686,57
29	2297,21	295,09	28,93	0,2	10490,03	33755,68	31767,39
30	2298	310,79	30,47	0,2	10765,34	34027,98	31731,77
31	2277,64	296,26	29,05	0,2	10510,68	33387,10	31124,44
32	2313,01	286,11	28,05	0,2	10329,20	32662,46	29895,75
33	2289,50	306,38	30,04	0,2	10688,68	32883,21	31556,40
34	2302,01	327,76	32,14	0,2	11055,42	34160,47	31493,90
35	2280,01	298,07	29,23	0,2	10542,88	32867,42	31705,53
36	2305,90	286,43	28,08	0,2	10334,99	34018,62	32330,40
37	2276,33	307,86	30,19	0,2	10714,50	32529,33	31430,51
38	2312,05	293,18	28,75	0,2	10455,91	32697,38	32115
39	2312,78	287,35	28,17	0,2	10351,50	32906,70	31951,43
40	2307,94	302,97	29,71	0,2	10629,11	33358,02	31562,56

**Tabla XXII. Resultados de ensayo a la compresión. Para la resistencia de 245 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 245 Kg/cm <sup>2</sup>							
#	Peso Unitario	f'c Kgf/cm <sup>2</sup>	f'c KN/mm <sup>2</sup>	R. de poisson (σ)	Ec [MPa] =1950 √f'c	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa] Controls
1	2244,46	279,27	27,38	0,2	10204,86	31082,91	27836,16
2	2248,43	288,77	28,31	0,2	10377,04	31422,64	29891,92
3	2234,11	257,05	25,20	0,2	9790,54	30418,44	27856,5
4	2249,14	287,08	28,15	0,2	10346,55	30776,75	27651,44
5	2265,45	282,28	27,68	0,2	10259,71	30585,47	28353,99
6	2266,12	277,99	27,26	0,2	10181,57	31137,70	29597,50
7	2252,61	313,56	30,75	0,2	10813,35	31190,43	28955,30
8	2255,55	300,24	29,44	0,2	10581,11	31712,19	29795,34
9	2247,26	290,16	28,45	0,2	10401,90	31367,89	29293,01
10	2243,02	296,12	29,03	0,2	10508,25	31156,75	28266,8
11	2265,47	299,07	29,32	0,2	10560,49	31767,53	28713,74
12	2264,63	281,47	27,60	0,2	10245,07	31009,50	28525,39
13	2242,78	298,54	29,27	0,2	10551,09	29320,05	26774,65
14	2250,12	289,71	28,41	0,2	10393,99	31645,08	29652,20
15	2259,83	305,88	29,99	0,2	10680,06	31402,45	28850,65
16	2273,44	299,05	29,32	0,2	10560,17	31154,31	29972,67
17	2258,37	282,73	27,72	0,2	10267,97	31563,64	28867,50
18	2284,84	278,50	27,31	0,2	10190,90	31797,40	29049,30
19	2269,65	276,42	27,10	0,2	10152,75	31782,57	28614,78
20	2255,43	314,41	30,83	0,2	10827,94	31639,47	28154,31
21	2255,79	286,94	28,13	0,2	10344,04	30986,86	29131,79
22	2242,71	271,61	26,63	0,2	10064,08	31561,95	28419,83
23	2269,59	283,85	27,83	0,2	10288,21	31423,61	28938,20
24	2262,28	283,22	27,77	0,2	10276,8	31124,16	29545,66
25	2251,10	287,45	28,18	0,2	10353,34	30696,74	28582,89
26	2250,98	289,55	28,39	0,2	10391,12	30897,17	28692,27
27	2241,47	284,68	27,91	0,2	10303,31	30265,73	28029,22
28	2240,98	279,76	27,43	0,2	10213,87	31322,83	29000,67
29	2281,62	279,96	27,45	0,2	10217,47	31394,01	28079,35
30	2265,16	303,29	29,74	0,2	10634,67	31740,96	28844,17
31	2275,01	282,33	27,68	0,2	10260,73	32061,37	29752,80
32	2249,13	282,62	27,71	0,2	10266,04	28787,45	29496,91
33	2241,05	272,59	26,73	0,2	10082,18	30274,64	28071,02
34	2244,82	281,54	27,61	0,2	10246,32	31151,46	27827,28
35	2223,05	280,98	27,55	0,2	10236,04	30308,82	27139,96
36	2279,50	293,68	28,80	0,2	10464,81	30529,24	29496,31
37	2242,66	279,76	27,43	0,2	10213,87	30726,38	30611,69
38	2257,13	294,63	28,89	0,2	10481,80	30993,26	28172,29
39	2275,14	273,98	26,86	0,2	10107,88	31150,42	29069,37
40	2225,76	290,16	28,45	0,2	10401,90	30065,89	28837,37

**Tabla XXIII. Resultados de ensayo a la compresión. Para la resistencia de 280 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 280 Kg/cm <sup>2</sup>							
#	Peso Unitario	f <sub>c</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>c</sub> KN/mm <sup>2</sup>	R. de poisson (σ)	Ec [MPa] =1950 √f <sub>c</sub>	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1-2σ)/(1-σ)) [Mpa] Controls
1	2303,40	445,05	43,64	0,2	12882,52	35412,63	32205,78
2	2277,50	454,20	44,54	0,2	13014,24	34579,40	32326,72
3	2276,13	430,89	42,25	0,2	12675,96	34211,16	31155,01
4	2295,40	450,36	44,16	0,2	12959,10	35291,92	32685,99
5	2317	440,81	43,22	0,2	12821,05	35566,50	33494,68
6	2265,66	431,73	42,33	0,2	12688,32	35635,27	32408,49
7	2291,62	454,36	44,55	0,2	13016,57	35199,89	31545,92
8	2292,53	446,27	43,76	0,2	12900,19	33898,29	32162,92
9	2279,92	464,76	45,57	0,2	13164,69	34455,39	32711,10
10	2302,06	463,37	45,44	0,2	13145,05	34981,57	32411,42
11	2284,77	381,30	37,39	0,2	11924,19	35425,26	33229,24
12	2315,53	443,03	43,44	0,2	12853,24	35250,06	31838,42
13	2270,63	412,13	40,41	0,2	12396,86	34092,55	32669,94
14	2293,55	444,63	43,60	0,2	12876,37	34805,07	32089,86
15	2305,03	450,81	44,20	0,2	12965,61	35839,45	32263,37
16	2304,50	416,32	40,82	0,2	12459,82	34072,07	32948,65
17	2301,12	443,95	43,53	0,2	12866,53	35420,71	31863,64
18	2288,63	432,01	42,36	0,2	12692,4	34363,91	30946,42
19	2325,06	461,10	45,21	0,2	13112,73	34712,17	32878,64
20	2290,97	448,01	43,93	0,2	12925,24	32426,89	33481,36
21	2285,82	438,22	42,97	0,2	12783,23	34639	32054,93
22	2303,03	436,88	42,84	0,2	12763,73	34613,81	34165,15
23	2305,48	428,36	42,00	0,2	12638,67	34690,34	31008,41
24	2286,80	384,11	37,66	0,2	11968,10	35563,29	31576,58
25	2278,60	438,65	43,01	0,2	12789,52	35397,52	31918,72
26	2302,12	456,11	44,72	0,2	13041,6	33783,67	33871,65
27	2303,20	443,92	43,53	0,2	12866,18	35643,42	31556,05
28	2282	445,67	43,70	0,2	12891,47	35531,60	31501,55
29	2281,26	442,68	43,41	0,2	12848,16	36329,08	32749,46
30	2286,54	443,37	43,47	0,2	12858,1	35664,89	31367,10
31	2287,53	420,36	41,22	0,2	12520,11	34445,81	30082,25
32	2292,60	449,92	44,12	0,2	12952,75	34806,91	32101,61
33	2288,21	416,72	40,86	0,2	12465,82	36009,22	32988,22
34	2291,54	421,16	41,30	0,2	12532,04	34176,51	32664,94
35	2297,93	430,20	42,18	0,2	12665,82	35130,09	33394,44
36	2300,09	467,28	45,82	0,2	13200,27	35455,87	32795,98
37	2272,25	439,77	43,12	0,2	12805,92	34679,13	31929,99
38	2279,41	437,78	42,93	0,2	12776,91	34831,52	32302,36
39	2287,18	427,22	41,89	0,2	12621,86	34000,11	33304,03
40	2286,53	463,67	45,47	0,2	13149,26	34940,67	33127,04

**Tabla XXIV. Resultados de ensayo a la compresión. Para la resistencia de 350 Kg/cm<sup>2</sup>**

RESISTENCIA 350 Kg/cm <sup>2</sup>							
#	Peso Unitario	f <sub>c</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>c</sub> KN/mm <sup>2</sup>	R. de poiss- on (σ)	Ec [MPa] =1950 √f <sub>c</sub>	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1- 2σ)/(1-σ)) [Mpa] Pundit Plus	Ed= (ρV <sup>2</sup> (1+σ)(1- 2σ)/(1-σ)) [Mpa] Controls
1	2315,99	413,84	40,58	0,2	12422,65	39191,67	35294,03
2	2313,10	462,68	45,37	0,2	13135,18	37278,49	34410,18
3	2320,15	451,05	44,23	0,2	12969,05	38213,6	34416,67
4	2312,35	451,60	44,28	0,2	12976,97	37738,15	33687,22
5	2332,70	450,40	44,16	0,2	12959,64	39227,41	34474,22
6	2322,93	461,62	45,26	0,2	13120,08	37986,20	32981,83
7	2322,76	457,35	44,85	0,2	13059,29	37933,65	32580,02
8	2334,02	448,47	43,98	0,2	12931,9	39649,47	30904,50
9	2310,27	451,14	44,24	0,2	12970,33	38802,99	34820,85
10	2312,98	469,69	46,06	0,2	13234,31	37534,04	33881,41
11	2336,03	469,20	46,01	0,2	13227,45	38991,98	34187,27
12	2326,49	452,97	44,42	0,2	12996,61	39580,66	36207,06
13	2313,85	461,31	45,23	0,2	13115,77	38899,18	32785,12
14	2334,93	416,98	40,89	0,2	12469,64	38062,62	34299,81
15	2327,65	455,91	44,70	0,2	13038,74	37726,45	33653,62
16	2312,36	454,51	44,57	0,2	13018,75	37838,33	34004,34
17	2326,53	456,32	44,75	0,2	13044,64	38852,04	34020,38
18	2331,31	453,67	44,48	0,2	13006,6	38224,94	33912,09
19	2324,74	445,70	43,70	0,2	12891,9	37170,54	32997,56
20	2335,85	437,39	42,89	0,2	12771,09	37475,15	34633,35
21	2319,72	481,04	47,17	0,2	13393,23	38323,80	34027,57
22	2334,90	455,11	44,63	0,2	13027,35	36776,36	34413,48
23	2332,51	433,28	42,49	0,2	12711,01	39500,01	33980,73
24	2334,42	454,91	44,61	0,2	13024,42	37502,59	33770,13
25	2304,68	465,93	45,69	0,2	13181,26	38934,55	34972,28
26	2314,12	448,81	44,04	0,2	12936,86	36788,84	33574,19
27	2327,44	451,54	44,28	0,2	12976,1	38182,14	34209,19
28	2352,25	443,21	43,46	0,2	12855,84	39469	35588,43
29	2335,87	444,19	43,56	0,2	12870,1	37910,07	35111,10
30	2326,68	457,63	44,87	0,2	13063,37	38664,90	34538,51
31	2336,73	476,63	46,74	0,2	13331,76	38816,71	34848,43
32	2326,99	460,78	45,18	0,2	13108,18	37572,81	33695,22
33	2331,62	464,91	45,59	0,2	13166,77	39222,98	34189,81
34	2320,29	434,81	42,64	0,2	12733,41	37526,73	33305,87
35	2317,77	462,97	45,40	0,2	13139,35	36729,47	32717,49
36	2324,73	475,60	46,64	0,2	13317,3	40275,92	34668,0
37	2317,42	447,82	43,91	0,2	12922,49	38558,09	33588,38
38	2330,73	447,94	43,92	0,2	12924,32	39478,84	34758,94
39	2323,71	450,62	44,19	0,2	12962,87	37832,72	34045,95
40	2333,40	461,72	45,27	0,2	13121,51	38329,81	33457,17



## **ANEXO F. ESTUDIO GEÓLOGICO DEL AGREGADO GRUESO.**

### **ENTREGA DE RESULTADOS**

### **DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA**

#### **Apoyo al proyecto de investigación con título:**

“Evaluación de módulo de elasticidad en concretos sin refuerzo, a partir de medidas de velocidad de pulso ultrasónico”

**BUCARAMANGA, ENERO DE 2012**

## DESCRIPCION MACROSCÓPICA

### PROPIEDADES FISICAS DE LAS ROCA SEDIMENTARIAS

Las rocas sedimentarias son formadas sobre la superficie de la Tierra por procesos de baja presión y baja temperatura, temperaturas menores de 150° C. Estas rocas están conformadas por 1) **Materia terrígena** (partículas) derivadas del intemperismo y erosión de rocas preexistentes, condiciones que ocurren en exposición a la atmosfera o, 2) Por **cristales** precipitados a partir de agua marina o de aguas frescas por procesos biológicos o químicos y, 3) **Aloquímicos** materiales precipitados químicamente pero de manera diferente a la normal, ejemplo de estos materiales son los bioclástos, oolitos, pelets e intraclastos.

Las rocas sedimentarias terrígenas: Son rocas integradas por más del 50% de materiales terrígenos, dentro de ellas las más conocidas son las siliciclásticas, las cuales son de composición silícea.

Los procesos de transporte y de depositación generan una amplia variedad de rocas sedimentarias cada una ellas caracterizada por propiedades físicas distintivas. Las más importantes propiedades de las Rocas Sedimentarias son textura, composición y estructuras sedimentarias.

La **textura** de las Rocas Sedimentarias se refiere a las características de pequeñas escala **como el tamaño, forma, fabrica, el armazón, la matriz, el cemento** y una propiedad derivada de las anteriores como porosidad.

La **composición** contempla la composición química de las partículas como su composición mineralógica y tipo de partículas.

Las **estructuras** son características de gran escala tales como la estratificación, la laminación, las estructuras y marcas de corrientes, entre otras.

### TEXTURA DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

Las texturas sedimentarias se refiere a las características de pequeña escala que comprometen a cada una de las partículas individualmente o a una población de ellas, las texturas sedimentarias son o están determinadas por:

## **Tamaño de las partículas**

El tamaño de las partículas es un atributo fundamental y por ende una de las propiedades más importantes en la descripción de las rocas sedimentarias. El tamaño de los materiales sedimentarios es importante porque refleja: 1) los tipos de material parental (roca sedimentaria, ígnea o metamórfica) en varias clases de tamaño de grano (grava, arena y lodo). 2) la resistencia de las partículas a la erosión y la abrasión y 3) los procesos de transporte y el ambiente de depositación que actuaron sobre la partícula. Ver Figura 1 (Tabla 1)

TABLA 1.1. Tabla de tamaño de grano (textura) de Wentworth.  
 Tomada de Folk 1974, Pág. 25

No de malla para tamiz U.S. estandard	Milímetros (mm)	Micrones ( $\mu$ )	Phi ( $\Phi$ )	Clase de tamaño Wentworth		Clase Mayor	Una vez Litificado el sedimento
			-20				
	4096		-12	Cantos		GRAVA	CONGLOMERADO
	1024		-10				
	256		-8	Guijarros			
	64		-6				
	16		-4	Guijas			
5	4		-2				
6	3.36		-1.75				
7	2.83		-1.5				
8	2.38		-1.25	Gránulos			
10	2.0		-1				
12	1.68		-0.75	Upper		ARENA	ARENISCA
14	1.41		-0.5	Arena muy gruesa			
16	1.19		-0.25	Lower			
18	1	1.0	0.0				
20	0.84		0.25	Upper			
25	0.71		0.5	Arena gruesa			
30	0.59		0.75	Lower			
35	1/2	0.5	1				
40	0.42	420	1.25	Upper			
45	0.35	350	1.5	Arena media			
50	0.3	300	1.75	Lower			
60	1/4	0.25	2.0				
70	0.21	210	2.25	Upper			
80	0.177	177	2.5	Arena fina			
100	0.149	149	2.75	Lower			
120	1/8	0.125	3.0				
140	0.105	105	3.25	Upper			
170	0.088	88	3.5	Arena muy fina			
200	0.074	74	3.75	Lower			
230	1/16	0.0625	4.0				
270	0.053	53	4.25	Grueso (4 a 5 $\Phi$ )		LIMO	LODOLITA
325	0.044	44	4.5				
	0.037	37	4.75				
	1/32	0.031	5.0	medio			
	1/34	0.0156	6.0	fino			
	1/128	0.0078	7.0	muy fino			
	1/256	0.0039	8.0				
	0.002	2	9.0				
	0.00098	0.98	10				
	0.00049	0.49	11				
	0.00012	0.12	13				
	0.00006	0.06	14				
Analizado por pipeta o hidrómetro				Algunos usan $9\Phi$ como límite de la arcilla		Arcillas Arcillolita	

## Métodos medir el tamaño de grano

Teniendo como base la escala de tamaño de grano de Wentworth, las partículas sedimentarias (armazón, cemento, matriz) se pueden medir por los siguientes medios:

- (1) Para materiales de tamaño grava (tamaños superiores a 2 mm) la medición se puede realizar directamente con una regla milimétrica o un calibrador.
- (2) Para materiales de tamaño arena y limo, se puede utilizar los siguientes métodos: (a) por comparación directa con imágenes de tamaño de grano. Ver Figura 2. (b) realizando primero la separación (en caso de requerirlo) y luego el tamizado (c) para muestras duras en las cuales sus constituyentes no se puedan separar, se utiliza la medición en sección delgada bajo microscopio petrográfico con ayuda del micrómetro.
- (3) Para los materiales más finos materiales arcillosos y arcillosos limosos se utilizan: (a) para materiales que se puedan disgregar, análisis por pipeta, hidrómetro, fotómetro, *coulter counter* y, (b) para materiales que no se puedan disgregar el microscopio electrónico.

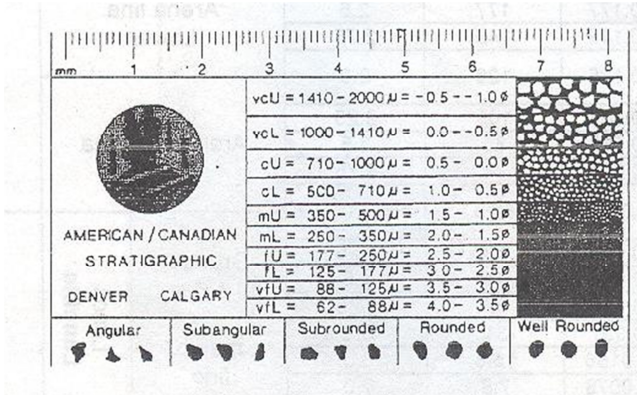
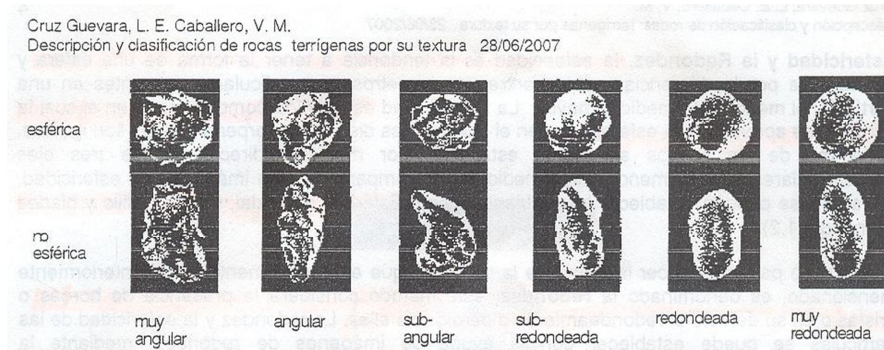


Figura 2 Imágenes comparativas de tamaño de grano, Miall 1990. Tomado en Cruz & Caballero

## Forma de las partículas

Las partículas poseen formas particulares que reflejan tanto el origen de la partícula, como los procesos de erosión, transporte depositación y retrabajamiento ocurridos antes o durante su depositación final. En la determinación de la forma de la partícula se utilizan dos criterios la **esfericidad** y la **redondez**. La esfericidad

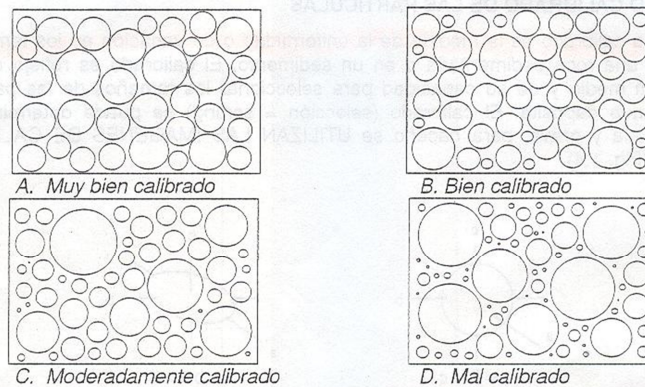
es la tendencia a tener la forma de una esfera y redetermina por la diferencia métrica entre los diámetros perpendiculares presentes en una partícula el menor, intermedio y mayor. La **esfericidad** es definida como el grado en el cual la partícula se aproxima a la esfera. La **Redondez** este método considera la presencia de bordes o aristas o en su defecto el redondeamiento o pérdida de ellas. Ver Figura 3



*Figura.3. Términos de grado de redondeamiento y esfericidad de las partículas según, Powers 1953, en Compton 1962. Tomado en Cruz & Caballero.*

### Selección o calibrado de las partículas

La selección o calibrado es la medida de la uniformidad o de variación en los tamaños de las partículas en una roca sedimentaria o en un sedimento. Figura 4

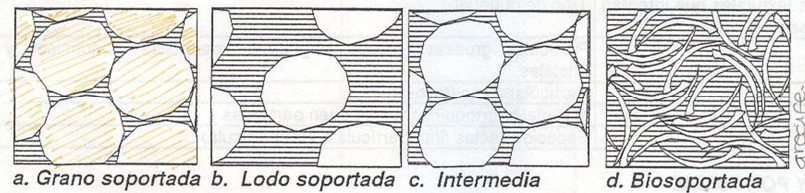


*Figura 4 Imágenes de calibrado de las partículas de pettjhon, en Boggs, Jr. 1987. Tomado en Cruz & Caballero.*

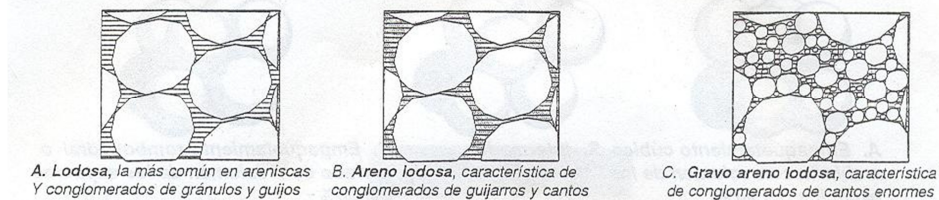
### Fábrica en las rocas sedimentarias

La fábrica se refiere a la relación espacial entre la matriz y los granos en una roca sedimentaria, en la fábrica interviene el concepto de armazón, matriz y cemento.

- **Armazón:** El armazón de la roca son los materiales que soportan la roca, generalmente son los de mayor tamaño o las más abundantes. El armazón determina si la roca presenta fábrica (a) grano soportada, ya sea, areno soportada, gravo soportada o areno gravo soportada (b) lodo soportada, o (c) intermedia, o si presenta fragmentos esqueléticos (d) biosoportada. Ver Figura 5
- **Matriz:** El material de menor tamaño que se apila en los intersticios dejados por el armazón. La matriz puede ser combinada: (a) areno lodosa, (b) lodosa (arcillosa y limosa) y en un caso muy especial y para materiales de tamaño grueso (c) gravo areno lodosa tipo particular que ocurre cuando el armazón es de diversos tamaños de bloques (gravas de gran tamaño) Ver Figura 6.
- **Cemento:** El material precipitado químicamente entre los intersticios dejados por el armazón se le conoce como el cemento. El cemento es el que le da una fuerte unión a las partículas, evitando que estas puedan ser separadas con facilidad.



*Figura 5 tipos de fábrica presente en los sedimentos y en las rocas sedimentarias*



*Figura 6. Tipos de matriz presente en los sedimentos y en las rocas sedimentarias.*

## Poros y porosidad

Los poros son los espacios vacíos que se encuentran en la roca y la porosidad es la relación poros vs volumen total de la muestra.

## DESCRIPCIÓN DE LAS ROCAS



Muestra No 1		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	87%	99.9%
COMPOSICIÓN	Moscovita	9%	
MINERALÓGICA	Impurezas	2%	
MATRIZ	lodosa	0.5%	
CEMENTO	Silíceo	1.5%	
POROS			
TAMAÑO	Grano fino (0.25- 0.125mm)		
FORMA	Angulares		
SELECCIÓN	Bien calibrado		
ARMAZON	Grano soportada		
COLOR	10 YR 7/4		
TIPO DE ROCA	Sedimentaria		
NOMBRE DE LA ROCA	Cuarzo arenita		



Muestra No 2		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	88%	99.9%
<b>COMPOSICIÓN MINERALÓGICA</b>	Moscovita	2%	
	Impurezas	0.5%	
<b>MATRIZ</b>	Lodosa	3%	
<b>CEMENTO</b>	Silíceo	2%	
<b>POROS</b>		5%	
<b>TAMAÑO</b>	Arena media-fina		
<b>FORMA</b>	Subangular		
<b>SELECCIÓN</b>	Bien calibrado		
<b>ARMAZON</b>	Grano soportada		
<b>COLOR</b>	10YR 6/2		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	Cuarzo arenita		



Muestra No 3		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	98%	99.9%
<b>COMPOSICIÓN</b>	Moscovita	0.8%	
<b>MINERALÓGICA</b>	Impurezas	0.4%	
<b>MATRIZ</b>	Lodosa		
<b>CEMENTO</b>	Silíceo		
<b>POROS</b>			
<b>TAMAÑO</b>	Arenisca fino-medio		
<b>FORMA</b>	Subangulares angulares		
<b>SELECCIÓN</b>	Bien calibrado		
<b>ARMAZON</b>	Grano soportada		
<b>COLOR</b>	5 YR 3/4		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	<b>Cuarzo arenita</b>		

Muestra 4



Muestra No 4		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
<b>COMPOSICIÓN MINERALÒGICA</b>	Cuarzo	88%	99.8%
	Moscovita	6%	
	Feldespatos potasico	0.1%	0.1%
<b>MATRIZ</b>	Lodosa	1%	
<b>CEMENTO</b>	Silicea	0.3%	
<b>POROS</b>		5%	
<b>TAMAÑO</b>	Arena media		
<b>FORMA</b>	Subredondeada		
<b>SELECCIÓN</b>	Bien calibrada		
<b>ARMAZON</b>	Grano soportada		
<b>COLOR</b>	5 YR Gris amarillento		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	Cuarzo arenita		

Muestra 5



Muestra No 5		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	85%	99.8%
<b>COMPOSICIÓN</b>	Moscovita	8%	0.1%
<b>MINERALÓGICA</b>	Feldespato potásico	0.1%	
<b>MATRIZ</b>	Lodosa	0.7%	
<b>CEMENTO</b>	Silíceo	0.2%	
<b>POROS</b>		0.1%	
<b>TAMAÑO</b>	arena fina		
<b>FORMA</b>	Subangular		
<b>SELECCIÓN</b>	bien calibrada		
<b>ARMAZON</b>	grano soportada		
<b>COLOR</b>	10 YR 6/2		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	<b>Cuarzo Arenita</b>		



Muestra No 6		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	70,0%	73%
<b>COMPOSICIÓN</b>	Feldespato K	25,0%	26%
<b>MINERALÓGICA</b>	Moscovita	3,0%	
<b>MATRIZ</b>	Lodosa	0.7%	
<b>CEMENTO</b>	Silíceo	0.3%	
<b>POROS</b>		1,0%	
<b>TAMAÑO</b>	arena fina		
<b>FORMA</b>	angular esferica		
<b>SELECCIÓN</b>	bien calibrada		
<b>ARMAZON</b>	grano soporatada		
<b>COLOR</b>	5 YR 8/2		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	<b>Sub Arcosa</b>		



Muestra No 7		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	70%	71%
<b>COMPOSICIÓN</b>	Feldespato	28%	28.5%
<b>MINERALÓGICA</b>	Moscovita	1%	
<b>MATRIZ</b>	Iodosa	0.5%	
<b>CEMENTO</b>	Silíceo	0.2%	
<b>POROS</b>		1%	
<b>TAMAÑO</b>	arena media		
<b>FORMA</b>	subangular		
<b>SELECCIÓN</b>	bien calibrado		
<b>ARMAZON</b>	grano soportada		
<b>COLOR</b>	5 YR 6/4		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	<b>Arcosa</b>		



Muestra No 8		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo	98.5%	99.9%
<b>COMPOSICIÓN MINERALÓGICA</b>	Moscovita	1%	
<b>MATRIZ</b>	Iodosa		
<b>CEMENTO</b>	Silíceo	5%	
<b>POROS</b>		2%	
<b>TAMAÑO</b>	arena fino		
<b>FORMA</b>	subangular		
<b>SELECCIÓN</b>	muy bien calibrado		
<b>ARMAZON</b>	grano soportada		
<b>COLOR</b>	10 YR 7/4		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	Cuarzo arenita		



Muestra No 9		PORCENTAJE	PORCENTAJE RECALCULADO
	Cuarzo		
<b>COMPOSICIÓN MINERALÓGICA</b>	Moscovita		
<b>MATRIZ</b>			
<b>CEMENTO</b>			
<b>POROS</b>			
<b>TAMAÑO</b>	Iodolita		
<b>FORMA</b>			
<b>SELECCIÓN</b>	muy bien calibrado		
<b>ARMAZON</b>			
<b>COLOR</b>	5 RP 4/2		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>NOMBRE DE LA ROCA</b>	Iodolita		

Muestra 10



Observaciones

El conjunto de rocas, analizadas en el laboratorio corresponde a fragmentos de roca ígnea. Posiblemente granitos ricos en cuarzo es posible tener una descripción más precisa de las rocas de interés, si se cuenta con muestras de un tamaño mayor, y con una estricta georeferenciación. De preferencia debe ser material in-situ. (tomado del lugar de origen directamente).



Muestra	Peso (g)	tipo de roca	%
1	88,50	Sedimentaria	77,79%
2	64,90	Sedimentaria	
3	16,60	Sedimentaria	
4	89,40	Sedimentaria	
5	163,30	Sedimentaria	
6	47,70	Sedimentaria	
7	32,10	Sedimentaria	
8	20,70	Sedimentaria	
9	10,20	Sedimentaria	
10	90,10	Ígnea	
11	62,30	Cuarzo	9,08%
<b>total</b>	685,80		

## **CONCLUSIONES**

- En esta muestra se encontraron tres variedades de roca: Sedimentarias, Ígneas, y mineral puro.
- El material estudiado se clasifica según el tamaño de las partículas como Gravas, las cuales presenta formas subangulares y subredondeadas predominan las subangulares.

## **RECOMENDACIONES**

Para determinar el tipo de roca ígnea y su composición es necesario contar con muestras de mayor tamaño.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Cruz Guevara L.E & Caballero, V.M Guía de Laboratorio de Sedimentología para Geología, UIS. 2007

SAIT KHURAMA VELASQUEZ  
Director de Escuela de Geología  
Universidad Industrial de Santander

**ANEXO G.**

**Ensayos de Caracterización del Agregado Fino**

<b>Masa Unitaria Compacta</b>				
<b>MUESTRA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>PROMEDIO</b>
Peso del recipiente : P1 (kg).	2,04	2,04	2,04	2,04
Peso de la muestra seca y del recipiente P2 (kg).	6,72	6,76	6,76	6,75
Peso de la muestra seca P3 = P2 - P1 (kg).	4,68	4,72	4,72	4,71
Volumen definido del recipiente. V (m <sup>3</sup> ).	0,00286	0,00286	0,00286	0,0029
Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> ). M:U: = P3/V.	1636,4	1650,3	1650,3	<b>1645,7</b>

<b>Masa Unitaria Suelta</b>				
<b>MUESTRA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>PROMEDIO</b>
Peso del recipiente : P1 (kg).	2,04	2,04	2,04	2,04
Peso de la muestra seca y del recipiente P2 (kg).	6,20	6,20	6,22	6,21
Peso de la muestra seca P3 = P2 - P1 (kg).	4,16	4,16	4,18	4,17
Volumen definido del recipiente. V (m <sup>3</sup> ).	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286
Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> ). M:U: = P3/V.	1454,5	1454,5	1461,5	<b>1456,9</b>

**Registro de Densidad y Absorción en Agregados Finos**

B = Masa al aire de la muestra secada al horno (g).		490,6
A=Masa al aire muestra SSS (g)		500
C=Masa del picnómetro lleno de agua (g)		648,3
D=Masa del picnómetro con agua hasta su capacidad y muestra (g)		954,4
Ds Aparente (g/cm3)	B/(C+A-D)	<b>2,53</b>
Ds Aparente SSS (g/cm3)	A/(C+A-D)	2,58
Ds Nominal (g/cm3)	B/(C+B-D)	2,66
Absorción (%).	((A-B)/B)*100	<b>1,92</b>

## Terrones de Arcilla y Partículas Deleznales para Agregados Finos

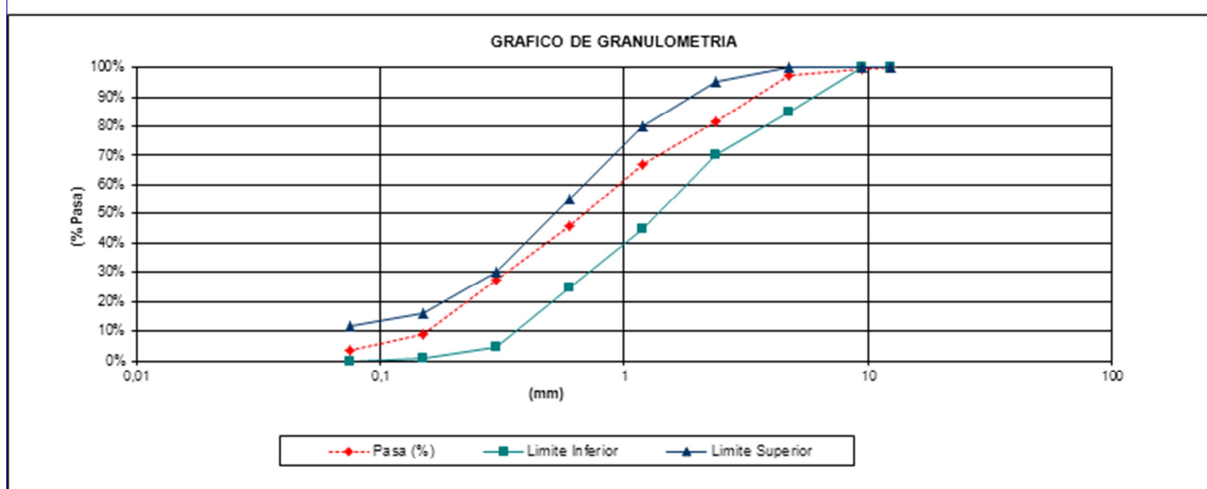
Tamiz	Masa muestra de ensayo (g)	Masa despues de ensayo (g)
Tamiz No. 16	300,0	299,0
Porcentaje de Terrones de Arcilla %	<b>0,33%</b>	

## Características Físicas de la Arena Gruesa

Descripción: ARENA GRUESA

Mina: CHIMITA  
Fecha Ensayo: 27/09/2011

ABERTURA DEL TAMIZ (mm)		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
(Denom. Estándar)	Limite Inferior					Limite Superior	
12,5	1/2"	0,0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
9,5	3/8"	5,0	0,5%	0,5%	99,5%	100%	100%
4,76	N° 4	22,0	2,3%	2,8%	97,2%	85%	100%
2,38	N° 8	146,1	15,3%	18,2%	81,8%	70%	95%
1,19	N° 16	141,0	14,8%	33,0%	67,0%	45%	80%
0,6	N° 30	202,8	21,3%	54,3%	45,7%	25%	55%
0,3	N° 50	172,9	18,2%	72,5%	27,5%	5%	30%
0,15	N° 100	176,6	18,6%	91,0%	9,0%	1%	16%
0,075	N° 200	49,0	5,1%	96,2%	3,8%	0%	12%
Fondo		36,5	3,8%	100,0%	0,0%		



Masa inicial húmeda (g): 1000  
Masa inicial seca (g): 952,3  
Modulo de finura: 2,72  
Materia orgánica: 1  
Humedad (%): 5,01%

pH: 7  
Sumatoria masas retenidas (g): 951,9  
Fondo despues de tamizado (g): 2,3  
Masa final seca despues de lavado sobre tamiz 0.075 mm (g): 918,1

## ANEXO H. Ensayos de Caracterización del Agregado Grueso

Masa Unitaria Compacta				
MUESTRA	1	2	3	PROMEDIO
Peso del recipiente : P1 (kg).	3,76	3,76	3,76	3,76
Peso de la muestra seca y del recipiente P2 (kg).	18,82	18,80	18,84	18,82
Peso de la muestra seca P3 = P2 - P1 (kg).	15,06	15,04	15,08	15,06
Volumen definido del recipiente. V (m <sup>3</sup> ).	0,00988	0,00988	0,00988	0,0099
Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> ). M:U: = P3/V.	1524,3	1522,3	1526,3	1524,3

Masa Unitaria Suelta				
MUESTRA	1	2	3	PROMEDIO
Peso del recipiente : P1 (kg).	3,76	3,76	3,76	3,76
Peso de la muestra seca y del recipiente P2 (kg).	17,82	17,76	17,76	17,78
Peso de la muestra seca P3 = P2 - P1 (kg).	14,06	14	14	14,02
Volumen definido del recipiente. V (m <sup>3</sup> ).	0,00988	0,00988	0,00988	0,0099
Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> ). M:U: = P3/V.	1423,1	1417,0	1417,0	1419,0

### Índice de Aplanamiento

FECHA:	04/10/2011
MATERIA:	GA4
PLANTA:	BUCARAMANGA

RANGO	
Limite Inferior	0%
Limite Superior	20%

TAMIZ	% RETENIDO (R1)	PESO TOTAL DE CADA FRACCIÓN (gr) (P1)	PARTÍCULAS APLANADAS QUÉ PASAN.(gr) (P2)	ÍNDICE DE LA FRACCIÓN $\%(P2/P1)*100(I 2)$	ÍNDICE DE APLANAMIENTO $(\%)(SUM(I 2^*R1)/SUM R1)$
1-1/2"	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0
1"	3,0%	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	33,8%	3008,6	283,6	9,4	3,2
1/2"	46,5%	1248,5	142,1	11,4	5,3
3/8"	11,0%	218,7	18,1	8,3	0,9
TOTAL	94,4%	4475,8	443,8	29,1	9,4

## Índice de Alargamiento

FECHA:	04/10/2011
MATERIA:	GA4
PLANTA:	BUCARAMANGA

RANGO	
Limite Inferior	0%
Limite Superior	20%

TAMIZ	% RETENIDO (R1)	PESO TOTAL DE CADA FRACCIÓN (gr) (P1)	PARTÍCULAS ALARGADAS QUE PASAN.(gr) (P2)	ÍNDICE DE LA FRACCIÓN $\%(P2/P1)*100(I 2)$	ÍNDICE DE ALARGAMIENTO $\%(SUM(I 2*R1)/SUM R1)$
1-1/2"	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0
1"	3,0%	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	33,8%	3008,6	334,9	11,1	3,8
1/2"	46,5%	1248,5	437,5	35,0	16,3
3/8"	11,0%	218,7	66,6	30,5	3,4
<b>TOTAL</b>	94,4%	4475,8	839,0	76,6	<b>23,4</b>

## Registro de Porcentaje de Caras Fracturadas

Origen:	<u>BUCARAMANGA</u>
Tipo de Agregado:	<u>GRAVA 3/4"</u>
Fecha Toma de Muestra:	<u>27-Sep-2011</u>
Fecha de Ensayo:	<u>29-Sep-2011</u>
Muestra No.	<u>532</u>

TAMIZ	RETENIDO (g)	PARTICULAS CON UNA (1) CARA FRACTURADA (g)	PORCENTAJE DE PARTÍCULAS CON UNA (1) CARA FRACTURADA (%)	PARTICULAS CON DOS (2) CARAS FRACTURADAS (g)	PORCENTAJE DE PARTÍCULAS CON DOS (2) CARAS FRACTURADAS (%)
1-1/2"	0,0	0,0	0,0%	0,0	0,0%
1"	0,0	0,0	0,0%	0,0	0,0%
3/4"	1503,7	1325,0	88,1%	1252,4	83,3%
1/2"	500,8	445,7	89,0%	409,1	81,7%
3/8"	200,5	173,1	86,3%	167,6	83,6%
<b>TOTAL</b>	2205,0	1943,8	<b>88,2%</b>	1829,1	<b>83,0%</b>

## Registro de Resistencia al Desgaste del Agregado Grueso

MUESTRA						
Gradación utilizada.	B	B	B			
Número de esferas.	11	11	11			
Número de vueltas.	100	500	500 HUMEDO			
Peso de la muestra seca antes del ensayo P1 (g).	5001	5001	5000			
Peso de la muestra seca después del ensayo y después de lavar sobre Tamiz No 12 (1.70 mm) P2 (g).	4582,7	3230,2	3237			
Perdida P = P1 - P2 (g).	418,3	1770,8	1763			
Desgaste D = P/P1 * 100 (%).	8,4	35,4	35,3			
Relacion Humedo / Seco	1,00					

### Características Físicas de la Grava de ¾"

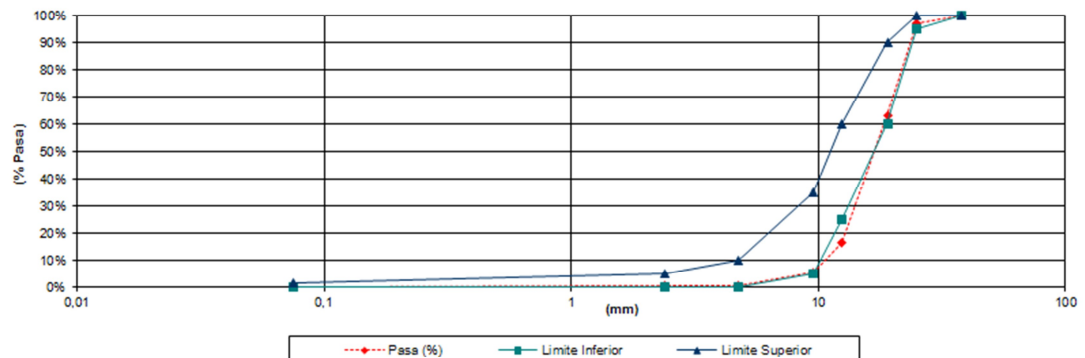
Descripción: GRAVA ¾"

Mina: CHIMITA

Fecha Ensayo: 27/09/2011

ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)					Limite Inferior	Limite Superior
38	1 1/2"	0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
25	1"	90	3,0%	3,0%	97,0%	95%	100%
19	¾"	1010,3	33,8%	36,9%	63,1%	60%	90%
12,5	1/2"	1388,6	46,5%	83,4%	16,6%	25%	60%
9,5	3/8"	329,6	11,0%	94,4%	5,6%	5%	35%
4,76	Nº 4	152,9	5,1%	99,5%	0,5%	0%	10%
2,38	Nº 8	1,4	0,0%	99,6%	0,4%	0%	5%
0,075	Nº 200	4,3	0,1%	99,7%	0,3%	0%	1,5%
Fondo		8,6	0,3%	100,0%	0,0%		

GRAFICO DE GRANULOMETRIA



Masa inicial húmeda (g): 3000  
 Masa inicial seca (g): 2986,1  
 Humedad (%): 0,5%  
 Tamaño máximo: 1 1/2"  
 Tamaño máximo nominal: 1"

Sumatoria masas retenidas (g): 2985,7  
 Fondo después de tamizado (g): 1,0  
 Masa final seca después de lavado sobre tamiz 0.075 mm (g): 2978,5

### Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables para Agregado grueso

Tamiz	Masa muestra de ensayo (g)	Masa despues de ensayo (g)
3/4"	3001,4	2996,6
3/8"	2001,5	1996,8
No 4	0,0	0,0
<b>Total</b>	<b>5002,9</b>	<b>4993,4</b>
Porcentaje de Terrones de Arcilla %	<b>0,190%</b>	

### Registro de Densidad y Absorción del Agregado Grueso

A = Masa muestra seca (g).	4929,8
B = Masa al aire muestra SSS (g).	5000,1
C = Masa en el agua de la muestra (g).	3061,4
Ds Aparente (g/cm <sup>3</sup> )      A/(B-C)	2,54
Ds Aparente SSS (g/cm <sup>3</sup> )      B/(B-C)	2,58
Ds Nominal (g/cm <sup>3</sup> )      A/(A-C)	2,64
Absorción (%).      (B-A)/(A)*100	1,43