

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE  
ULTRASONIDO PARA EVALUAR ESTRUCTURAS DE  
CONCRETO UTILIZANDO EL EQUIPO V-Meter MK IV**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**PEDRO ERDULFO MORENO DEL AGUILA**

**Lima- Perú  
2015**

**Digitalizado por:**

**Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse**

**RESUMEN**

**LISTA DE CUADROS**

**LISTA DE FIGURAS**

**RESUMEN**

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO I. ASPECTO GENERALES .....</b>	<b>12</b>
1.1 ENSAYOS DE INFORMACIÓN EN ESTRUCTURAS CONCRETO ARMADO .....	12
1.1.1 Ensayos Destructivos.....	13
1.1.2 Ensayos Semi-Destructivos .....	14
1.1.3 Ensayos No Destructivos .....	14
1.1.4 Restricciones y ventajas de los resultados de los métodos destructivos y no Destructivos (describir el artículo de Malhorta).....	23
1.2 ONDAS:.....	25
1.3 FENÓMENO PIEZOELÉCTRICO.....	26
1.4 MÉTODO DE ULTRASONIDO.....	27
1.5 CONCRETO .....	32
1.5.1 Propiedades del concreto que influyen en el ensayo de Ultrasonido ....	34
1.5.2 Tipo de concreto .....	35
1.5.3 Tipo y dosificación del concreto .....	36
1.5.4 Tipo, dosificación y tamaño máximo del agregado.....	37
1.5.5 Relación agua/cemento.....	38
1.5.6 Tipo y dimensiones del elemento estructural o pieza que se ensaya ...	38
1.5.7 Temperatura del concreto .....	40
1.5.8 Edad del concreto .....	41
1.5.9 Contenido de humedad del concreto.....	41
1.5.10 Condiciones de curado del concreto .....	43
1.5.11 Presencia de armaduras .....	43
1.5.12 Armadura paralela a la dirección de la trayectoria.....	43
1.5.13 Armadura transversal a la dirección de la trayectoria .....	45

---

1.5.14	Rugosidad de la superficie del elemento o pieza.....	45
1.5.15	Nivel tensional de la zona o elemento estructural.....	46
1.6	PERSPECTIVAS SOBRE LA PRUEBA DE ULTRASONIDO .....	47
<b>CAPÍTULO II. NORMATIVAS DEL MÉTODO .....</b>		<b>50</b>
2.1.	NORMA ASTM C597 “MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DEL PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO” .....	50
2.1.1.	Importancia y Uso .....	52
2.1.2.	Recomendaciones de ASTM C-597 .....	52
2.1.3.	Aparato .....	54
2.1.4.	Procedimiento .....	57
2.1.5.	Cálculo.....	59
2.1.6.	Informe.....	59
2.1.7.	Precisión y Tendencia:.....	59
2.1.8.	Incertidumbre: .....	60
2.2.	NORMAS NTP 339.237:2012.....	60
2.3.	BS EN 12504-4:2004 .....	60
<b>CAPÍTULO III. CARACTERIZACION DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO V-Meter Mark IV .....</b>		<b>62</b>
3.1	COMPONENTES Y ACCESORIOS .....	62
3.2	EQUIPO DE ENSAYO .....	64
3.3	TRANSDUCTORES.....	65
3.3.1	Clasificación de los transductores .....	66
3.3.2	Posición de los transductores.....	67
3.4	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL V-METER MARK IV V-C-400 .....	69
3.4.1	Uso de acoplante .....	69
3.5	RANGO DE APLICACIÓN DEL EQUIPO.....	70
3.5.1	Niveles de precisión .....	70
3.6	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71

---

<b>CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ULTRASONIDO .....</b>	<b>72</b>
4.1 HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO .....	73
4.1.1 Trabajo de Campo para determinación de la Homogeneidad.....	76
4.1.2 Procedimiento .....	77
4.2 DETECCIÓN DE CANGREJERAS E IMPERFECCIONES .....	78
4.2.1 Trabajo de Campo para detección de Cangrejas .....	80
4.2.2 Procedimiento .....	80
4.3 VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.....	80
4.3.1 Trabajo de Campo .....	81
4.3.2 Procedimiento .....	82
4.4 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS GRIETAS .....	82
4.4.1 Trabajo de Laboratorio .....	84
4.4.2 Procedimiento .....	85
4.5 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO .....	85
4.5.1 Trabajo de laboratorio .....	86
4.5.2 Procedimiento .....	87
4.6 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG/ POISSON .....	87
4.6.1 Trabajo de laboratorio .....	88
4.6.2 Procedimiento .....	89
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS.....</b>	<b>90</b>
5.1 HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO .....	90
5.2 DETECCIÓN DE CANGREJERAS E IMPERFECCIONES .....	93
5.3 VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.....	96
5.4 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS GRIETAS .....	100
5.5 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO.....	106
5.6 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG/ POISSON .....	108
<b>CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>109</b>

---

6.1.	HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO .....	109
6.2	DETECCIÓN DE CANGREJERAS E IMPERFECCIONES .....	109
6.3	VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO .....	110
6.4	DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS GRIETAS .....	110
6.5	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO .....	111
6.6	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG/ POISSON .....	111
	<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>112</b>
7.1.	CONCLUSIONES .....	112
7.2.	RECOMENDACIONES .....	113
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>118</b>

## RESUMEN

El presente trabajo busca fomentar en la industria de la construcción peruana el uso del método no destructivo de ultrasonido como una alternativa económica, rápida, flexible y que puede realizarse in situ (sobre las estructuras) para la determinación de la profundidad de grietas, estimar la resistencia del concreto y conocer la homogeneidad del concreto. Para ello se ha realizado ensayos en laboratorio los mismos que nos han permitido determinar relaciones existentes entre la calidad del concreto y la velocidad de la onda ultrasónica (principal parámetro en este método), obteniéndose resultados que se podrán utilizar. La aplicación de este método es muy amplia y más aún en supervisión, monitoreo y/o evaluación de proyectos por la versatilidad y calidad de la información que brindan en combinación con otros métodos destructivos y no destructivos.

## FUNDAMENTO DEL MÉTODO

La aplicación del método de ultrasonido consiste en la medición de la velocidad que alcanza un impulso en recorrer la distancia comprendida entre un transductor emisor y uno receptor, acoplados al concreto que se va ensayar.

Las características del material, se determinan teniendo en cuenta dos variables esenciales:

- a. El tiempo de recorrido
- b. La potencia del impulso recibido, considerando la pérdida de potencia con respecto a la del impulso emitido.

En el estudio del concreto, impulsos de vibraciones ultrasónicas longitudinales son producidos por un transductor emisor electro acústico, que ha sido puesto en contacto con la superficie del concreto que se ensaya. Después de recorrer a través de la masa del concreto una distancia conocida "L", los impulsos son convertidos en señales eléctricas por medio de un segundo transductor receptor, que también está en contacto con la superficie del concreto ensayado. Utilizando un circuito electrónico, se determina el tiempo de tránsito "t", que han necesitado los impulsos para recorrer la distancia "L".

La velocidad de los impulsos ultrasónicos, viene entonces dado por:  $V=L/t$

Es preferible la utilización de pulsaciones ultrasónicas (de mayor frecuencia) frente a las sónicas (de menor frecuencia), por dos razones:

- ✓ Proporcionan un flanco delantero del impulso nítido y bien definido.
- ✓ Generan la máxima energía en la dirección de propagación.

Para estudiar el concreto, las frecuencias utilizadas comienzan en las proximidades de la zona audible y se extiende hasta una frecuencia de 250 kHz, habiendo llegado a consenso que 54 kHz es la más apropiada para la evaluación del concreto. El equipo V-Meter MK IV viene implementado con dos transductores (emisor y transmisor) de 54 kHz.

El equipo V-Meter MK IV utilizado para la medición de la velocidad de las pulsaciones ultrasónicas, son capaces de computar el tiempo de tránsito con una precisión de  $\pm 1\%$ . La distancia entre transductores, debe ser medido también con una precisión de acuerdo al tipo de trabajo realizado.

#### APLICACIONES DEL MÉTODO DE ULTRASONIDO

Los principales **campos de aplicación** del método de los ultrasonidos son los siguientes:

- a. Estudio de la uniformidad del concreto en los distintos elementos estructurales que se ensayan, delimitando zonas con calidades diferentes.
- b. Monitoreo de los cambios cualitativos en las propiedades del concreto, a lo largo del tiempo.
- c. Determinación del módulo de elasticidad dinámico y del coeficiente de Poisson del concreto.
- d. Detección de defectos, tales como cangrejeras, fisuras, grietas, etc.
- e. Determinación de la profundidad de las grietas
- f. Estimación de la resistencia del concreto

Respecto a esta última aplicación, la norma UNE 83308:1986(54), indica que se trata de una estimación orientativa y que el ensayo de ultrasonido no reemplaza la tradicional rotura de probetas para estimar la resistencia del concreto. La presente tesis contempla todas estas aplicaciones las mismas que se explicarán con mayor detalle en los capítulos correspondientes.

## LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1.1 Clasificación de las ondas de acuerdo a la frecuencia .....</i>	<i>26</i>
<i>Cuadro 1.2 Clasificación de la calidad del concreto sobre la base de la velocidad de pulso. ....</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 1.3 Correcciones en la velocidad de onda, por efecto de temperaturas extremas en el concreto. ....</i>	<i>40</i>
<i>Cuadro 1.4 Resultados de la Velocidad Ultrasónica en probetas de concreto secas y húmedas.....</i>	<i>42</i>
<i>Cuadro 5.1 Resumen de la información recopilada en el Elemento Monitoreado 1.....</i>	<i>90</i>
<i>Cuadro 5.2 Resumen de la información recopilada en el Elemento Monitoreado 2.....</i>	<i>91</i>
<i>Cuadro 5.3 Ubicación y velocidades en el eje Vertical a 26cm de la cara interior de las Columnas 1 y 2.....</i>	<i>92</i>
<i>Cuadro 5.4 Velocidad de la Onda en el CUBO 1 de Concreto sin hueco, perforación de 5/8", 3/4" y 3".....</i>	<i>93</i>
<i>Cuadro 5.5 Velocidad de la Onda en el CUBO 2 de Concreto sin hueco, perforación de 5/8", 3/4" y 3".....</i>	<i>94</i>
<i>Cuadro 5.6 Velocidad de la Onda en el CUBO 3 de Concreto sin hueco, perforación de 5/8", 3/4" y 3".....</i>	<i>94</i>
<i>Cuadro 5.7 Longitud de onda y comparación con diámetro de interferencia en el CUBO 1.....</i>	<i>95</i>
<i>Cuadro 5.8 Longitud de onda y comparación con diámetro de interferencia en el CUBO 2.....</i>	<i>96</i>
<i>Cuadro 5.9 Longitud de onda y comparación con diámetro de interferencia en el CUBO 3.....</i>	<i>96</i>
<i>Cuadro 5.10 Resultados de la evaluación de la resistencia y velocidad de la onda con la edad del concreto.....</i>	<i>97</i>
<i>Cuadro 5.11 Profundidad de grietas verticales medido con Vernier y con el método de Velocidad de Ultrasonido.....</i>	<i>102</i>
<i>Cuadro 5.12 Profundidad de grietas inclinadas medido con Vernier y con método de Velocidad de Ultrasonido.....</i>	<i>102</i>

---

<i>Cuadro 5.13 Resultados de 120 probetas de la velocidad de onda y su resistencia a compresión. ....</i>	<i>107</i>
<i>Cuadro 5.14. Módulo de Elasticidad del concreto con ASTM C-469 y ULTRASONIDO, probeta 1. ....</i>	<i>108</i>
<i>Cuadro 5.15. Módulo de Elasticidad del concreto con ASTM C-469 y ULTRASONIDO, probeta 2. ....</i>	<i>108</i>
<i>Cuadro 6.1 Longitudes mínimas de las cangrejeras para que sean detectados con ultrasonido. ....</i>	<i>110</i>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Esclerómetro utilizado durante una prueba</i> .....	15
<i>Figura 1.2 Equipo utilizado durante una prueba de penetración ASTM C 803.</i> .....	17
<i>Figura 1.3 Representación esquemática de la prueba a la extracción.</i> .....	17
<i>Figura 1.4. Esquema del ensayo radiográfico.</i> .....	19
<i>Figura 1.5. Esquema de funcionamiento del Ensayo de la Prueba de Ruptura.</i> .....	20
<i>Figura 1.6 Esquema del trabajo del primer Soniscope, antecesor del V-Meter MK IV.</i> .....	28
<i>Figura 1.7 Resistencia a la compresión versus velocidad de la Onda Ultrasónica, basado en más de 46 mezclas con el mismo agregado.</i> ....	30
<i>Figura 1.8 Influencia del tipo de árido en la resistencia del concreto.</i> .....	38
<i>Figura 1.9 Efecto de sucesivos cortes en la longitud del elemento ensayado.</i> .....	39
<i>Figura 1.10 Armadura paralela a la dirección del impulso ultrasónico.</i> .....	44
<i>Figura 2.1 Esquema del aparato para ensayar con Pulso Ultrasónico.</i> .....	55
<i>Figura 3.1 Equipo V- Meter MK IV y accesorios.</i> .....	63
<i>Figura 3.2 Posición de los Transductores: directa, semi directa e indirecta.</i> .....	68
<i>Figura 4.1 Variación de la Resistencia a compresión en varios tipos de pieza.</i> .....	75
<i>Figura 4.2. Contorneos típicos de resistencia a compresión del concreto para una viga y un muro.</i> .....	76
<i>Figura 4.3 Muros Tipo C-1, del proyecto de Ampliación y Mejoramiento del LEM.</i> .....	78
<i>Figura 4.4. Esquema para detección de cavidades y cangrejeras.</i> .....	79
<i>Figura 4.5. Curvas del comportamiento de la Velocidad de la Onda en el tiempo.</i> .....	81
<i>Figura 4.6 Esquema para calcular la profundidad de grietas.</i> .....	83
<i>Figura 4.7. Esquema para conocer la orientación de la grieta.</i> .....	83
<i>Figura 4.8 Esquema para determinación de la profundidad de grietas (Segundo Caso)</i> .....	84
<i>Figura 4.10 Correlación típica entre velocidad de los pulsos ultrasónicos y resistencia del concreto.</i> .....	86

---

<i>Figura 4.11 Curvas de correlación entre la velocidad de onda y los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos .....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.1 Mapa de iso-velocidades del Muro 1 (izquierda) y Muro 2 (derecha) analizado. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.2 Nube de puntos correspondientes a la velocidad de onda en las Columnas 1 y 2.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.3 Variación de la Velocidad de la onda por efecto de Perforaciones.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.4 Comportamiento de la Velocidad de la onda en 7, 14 y 21 días.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.5 Evolución de la Velocidad de la Onda y la Resistencia del Concreto en la Tanda "A".....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.6 Evolución de la Velocidad de la Onda y la Resistencia del Concreto en la Tanda "B".....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.7 Evolución de la Velocidad de la Onda y la Resistencia del Concreto en la Tanda "C".....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.8 Corte Vertical de la viga hasta una profundidad controlada. ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.9 Corte Inclinado de la viga hasta una profundidad controlada. ....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.10 Viga 1 y 2 con grietas inclinadas.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5.11 Proceso para determinar la profundidad de la grieta de la Viga 1.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.12 Proceso para determinar la profundidad de la grieta de la Viga 2.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.13 Nube de puntos y correlación de resistencia a compresión y velocidad de la Onda Ultrasónica.....</i>	<i>106</i>

## INTRODUCCIÓN

Los Ensayos No Destructivos (END) son usados para determinar las propiedades del concreto y evaluar las condiciones en la que se encuentra en cimentaciones profundas, puentes, edificios, pavimentos, presas y otras construcciones de concreto. Para esta tesis, un ensayo no destructivo se define como aquel ensayo que no causa daño estructural significativo al concreto.

Los Ensayos No Destructivos son aplicados a construcciones de concreto por cuatro razones:

- Control de Calidad a construcciones nuevas
- Solución de litigios y/o arbitrajes
- Evaluación de las condiciones con fines de rehabilitación
- Asegurarse de la calidad de las reparaciones

Las actuales tecnologías de ensayos no destructivos aún se están desarrollando y la investigación continúa para mejorar los métodos existentes y desarrollar nuevos métodos.

Esta tesis habla y desarrolla las pruebas y aplicaciones del método ultrasónico. Es uno de los ensayos No Destructivos más antiguos y se basa en la medición del tiempo de viaje a través de una longitud de recorrido conocido de un pulso de ondas compresionales en una frecuencia ultrasónica.

## CAPÍTULO I. ASPECTO GENERALES

### 1.1 ENSAYOS DE INFORMACIÓN EN ESTRUCTURAS CONCRETO ARMADO

Los **ensayos de información** surgen como consecuencia de la necesidad puntual de conocer determinadas características inherentes al concreto *colocado en la estructura (in situ)* de un proyecto y/u obra.

En ocasiones, la necesidad de efectuar ensayos de información suele venir motivada por la inexistencia de un control sistemático del concreto de la estructura, pero el caso más generalizado corresponde a la necesidad de valorar el estado real del concreto colocado en una determinada estructura cuya estimación previa de resistencia, obtenida a partir de datos de ensayo en probetas, ha resultado inferior a los valores mínimos exigibles.

Al establecer, por ejemplo, la resistencia a compresión del concreto (quizá la propiedad más representativa) en probetas, hay que valorar una serie de aspectos de indudable influencia en el resultado final:

- Tamaño y forma de las probetas de concreto fresco utilizadas en el ensayo.
- Definición de las condiciones de curado de referencia (curado patrón)
- Establecimiento de la edad de ensayo, dado que la resistencia varía con el tiempo.
- Adopción de unos procedimientos normalizados de fabricación y ensayo que minimicen la influencia de muchas de las variables que intervienen en el proceso.

En toda estructura de concreto armado se define la resistencia de los elementos estructurales, bien conocidos como  $f_c$  y que representa la calidad del concreto suministrado en la obra. Sin embargo, la estructura misma del concreto tendrá otra resistencia, debido a las distintas condiciones de curado, a factores del vaciado y al tamaño del elemento, y, evidentemente, por la edad a la que queramos realizar la valoración. Esta resistencia se denomina "resistencia real", y representa la resistencia del concreto "en obra" ya endurecido.

La determinación de esta segunda resistencia implica la realización de ensayos directos sobre la estructura. Este tipo de ensayos se denomina "ensayos de información". Del mismo modo se pueden realizar ensayos de información para conocer cualquier propiedad del concreto en la estructura. Así, los estudios para conocer la compacidad, posición de la armadura, recubrimiento, corrosión de las

armaduras, propiedades mecánicas e incluso la determinación experimental del comportamiento en servicio o del grado de seguridad de una estructura.

Para distinguir el conjunto de ensayos y métodos de estudio que se pueden aplicar a las estructuras de concreto, se puede hacer hincapié en el grado de “daño” que la aplicación de un método produce en el concreto, entendiendo por “daño” o “destrucción” al hecho de afectar, de alguna forma, bien a la superficie, bien al interior del elemento. Siguiendo este criterio los ensayos se clasifican en:

### 1.1.1 Ensayos Destructivos

En este grupo se encuentran aquellos ensayos que tienen por objeto tomar muestras de un cierto elemento y obtener testigos para su posterior ensayo hasta la destrucción, esto requerirá la reparación posterior del elemento donde se realizó el ensayo o de la zona de donde se extrajo el testigo. Las probetas se usan una vez y se descartan. En muchos casos, las probetas deben ser moldeadas y modificadas para adecuarse a estándares antes de la prueba en sí.

Los ejemplos más representativos utilizados en nuestro país son la extracción de testigos de diamantina y la rotura de probetas en los ensayos a compresión, ensayo de adherencia, pruebas para determinar el módulo de elasticidad y de Poisson estático y pruebas de carga.

El ensayo a la compresión de probetas se realiza a diferentes edades, tales como 7, 14 y/o 28 días, este método destructivo ampliamente difundido y aceptado se fundamenta en que:

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más usada de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión los laboratorios de ensayos de materiales lo estiman fracturando probetas cilíndricas de concreto en la máquina de compresión.

De manera similar se realizan otras pruebas **destructivas** que involucran el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en el ensayo correspondiente y también la prueba de carga de la estructura la que podría dejar seriamente dañada a la estructura.

Debe tenerse en cuenta que no se puede aplicar a todas las partes o componentes de una estructura, ya que serían destruidos y perderían su utilidad; entonces podemos concluir que los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente (al componente sujeto a evaluación) las

propiedades físicas, mecánicas o dimensionales de un elemento estructural de una estructura.

### 1.1.2 Ensayos Semi-Destructivos

En este grupo se engloban aquellos ensayos que afectan ligeramente al hormigón, bien como consecuencia de la extracción de muestras de pequeño tamaño o por ocasionar destrucciones que afectando a profundidades relativamente pequeñas, no precisan reparación estructural. En cualquier caso el elemento afectado debe ser reparado por fines estéticos. Ejemplo de este grupo podrían ser los ensayos de arrancamiento, las tomas de muestras para algunos ensayos de durabilidad y los micro-testigos.

### 1.1.3 Ensayos No Destructivos

Para **ACI 228.2R-98 Métodos de ensayo no destructivos para la Evaluación de estructuras de concreto**, los Ensayos No Destructivos (END) son usados para determinar las propiedades del concreto y para evaluar las condiciones sobre los elementos de las estructuras, pudiéndose aplicar en cimentaciones profundas, puentes, edificios, presas y otras construcciones de concreto. También en esta norma indican que se trata de **ensayos que no causan daño estructural significativo al concreto**.

En esta larga relación de pruebas no destructivas tenemos la prueba de martillo de rebote, la prueba de resistencia a la penetración, prueba de extracción o pull out, método de la madures del concreto, radiografía, eco-impacto, análisis espectral de las ondas de superficie y termografía infrarroja. Es importante mencionar que en la Tabla 2.1. Resumen de métodos no destructivos del **ACI 228.2R-98**, encontrará una breve descripción de los métodos No destructivos y su aplicación. En lo que sigue este trabajo, realizaremos una descripción de los principales métodos no destructivos.

#### 1.1.3.1 PRUEBA DEL MARTILLO DE REBOTE o ESCLEROMETRO (ASTM C 805, NTP 339.181:2013)

De acuerdo a **ASTM C -805 Método de prueba estándar para determinar el número de rebote en concreto endurecido**; se busca medir el **número de rebote** que representa la cantidad de energía residual del impacto de un martillo de acero, el mismo que se impulsa (mediante un pistón) contra el concreto con una cantidad predeterminada de energía.

Según ASTM C-805 se podría aplicar para conocer la uniformidad del concreto, para diagnosticar zonas deterioradas o de baja calidad, y también, para realizar correlaciones con la resistencia del concreto.

Se han hecho muchos intentos de crear pruebas no destructivas, pero muy pocas de ellas han sido realmente exitosas como esta. Un método para el que se ha encontrado aplicación práctica dentro de un campo limitado, desarrollada por Ernst Schmidt. También se conoce como la prueba de martillo de impacto o Esclerómetro el mismo que se muestra en la Figura 1.1.

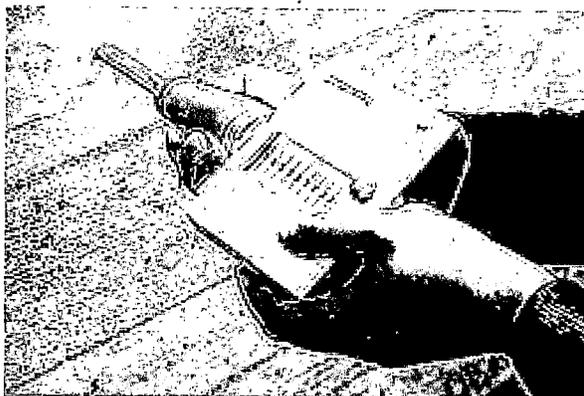


Figura 1.1 Esclerómetro utilizado durante una prueba  
*Fuente: Manual de usuario de esclerómetro Schmidt*

La prueba está basada en el principio de que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie sobre la que golpea la masa. En la prueba del martillo de rebote, una masa impulsada por un resorte tiene una cantidad fija de energía que se le imprime al extender el resorte hasta una posición determinada; esto se logra presionando el émbolo contra la superficie del concreto que se va evaluar. Al liberarlo, la masa rebota del émbolo que aún está en contacto con el concreto y la distancia recorrida por la masa, expresada como porcentaje de la extensión inicial del resorte, es lo que se llama número de rebote y es señalado por un indicador que corre sobre una escala graduada. El número de rebote es una medida, que depende de la energía almacenada en el resorte y del volumen de la masa.

### 1.1.3.2 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA PENETRACION EN CONCRETO ENDURECIDO (ASTM C 803, NTP 339.082:2011)

El **Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la penetración en concreto endurecido (ASTM C 803)**, conocida comercialmente como la prueba de la sonda de Windsor, consiste en calcular la resistencia del concreto a partir de la profundidad de la penetración de una varilla metálica impulsada por una carga estipulada de pólvora. El principio del método es que para condiciones estándar de prueba, la penetración es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión del concreto, pero la relación también depende de la dureza del agregado. Así pues, tiene que determinarse la dureza del agregado en la escala de Mohs, pero esto no representa dificultad alguna.

Debe indicarse que la prueba mide básicamente la dureza y no puede proporcionar valores de resistencia absolutos aunque es muy útil al determinar la resistencia relativa, es decir para hacer comparaciones.

Este método de ensayo esta refrendado en nuestro país por la norma **NTP 339.082:2011 Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de mezclas por medio de su resistencia a la penetración.**

Es probable que la prueba de la resistencia a la penetración llegue a sustituir al menos en parte, a la prueba del martillo de rebote, a la que es superior en muchos aspectos, ya que la medición no sólo se lleva a cabo en la superficie del concreto, sino también a profundidad: ya que la sonda fractura el agregado y comprime el material dentro del cual se introduce.

La Figura 1.2 muestra el momento cuando se lleva a cabo la realización de la prueba de resistencia a la penetración.

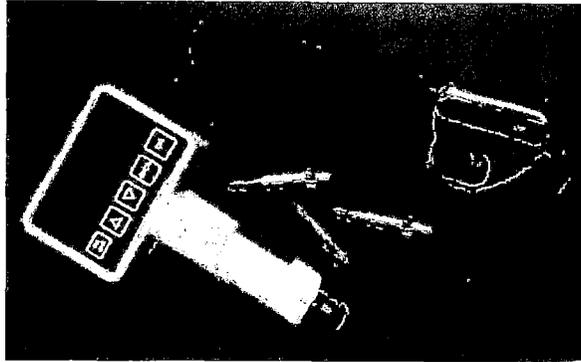


Figura 1.2 Equipo utilizado durante una prueba de penetración ASTM C 803.

Fuente: Catalogo de equipos Marca: Windsor.

### 1.1.3.3 PRUEBA DE PULL OUT o EXTRACCIÓN (ASTM C 900)

Es una prueba que mide, mediante un ariete de tensión, la fuerza requerida para desprender una varilla de acero, con un extremo de mayor sección transversal previamente empotrada generalmente de 25 mm de diámetro (véase Figura 1.3 Representación esquemática de la prueba a la extracción.). Durante la operación se extrae un cono de concreto y la fuerza requerida para ello está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto. La norma **ASTM C 900 Método de prueba estándar para estimar la resistencia a la extracción del concreto endurecido**, el mismo que consiste en extraer una pieza metálica introducida en el concreto fresco. La resistencia a la extracción se determina midiendo la fuerza máxima necesaria para sacar o extraer la pieza embebida en la masa de concreto.

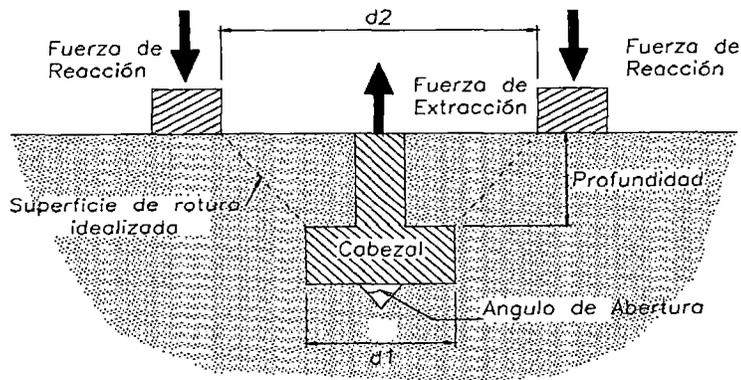


Figura 1.3 Representación esquemática de la prueba a la extracción.

Fuente: ASTM C-900

#### 1.1.3.4 PRUEBAS RADIOACTIVAS ASTM C 1040/ C1040M-08(2013)

Otro de los mayores desarrollos de los años 50s fue la difusión en la aplicación de los métodos radiactivos para la inspección del concreto. Este método requiere de una fuente de penetración electromecánica y el uso de un sensor detector de intensidad de radiación que llega al atravesar el cuerpo del objeto. Si el sensor está en forma de una película fotográfica especial, el método es denominado radiográfico. Si el sensor es un dispositivo electrónico, ósea es capaz de convertir la incidencia de radiación en pulsos eléctricos, el método es denominado radiometría. (Mitchell 1991)

Los primeros trabajos realizados en 1940 se centraron en el uso de rayos X para producir radiografías lo que permitió revelar la estructura interna del elemento de concreto, sin embargo en la década de los 50s se dio más atención al uso de rayos gamma. Las diferencias fundamentales de estos dos modos de penetración radioactiva son i) la fuente generadora de la radiación y ii) la capacidad de penetración de la radiación.

Los rayos X son producidos por dispositivos electrónicos de alto voltaje mientras que los rayos gamma son el resultado de la desintegración de isotopos radioactivos. La capacidad de penetración de los rayos gamma dependerá del isotopo y de la edad del radiactivo utilizado, mientras que con los rayos X depende del voltaje del aparato que lo genera.

Existen entonces 2 métodos al utilizar fuentes de rayos X y Gamma en los ensayos no destructivos del concreto. En el método por transmisión, la amplitud de la radiación que pasa a través de un elemento es medido, ver Figura 1.4, la atenuación dependerá de la densidad del material y del camino de recorrido desde la fuente hasta el sensor. En el método por emisión, una fuente radioactiva se utiliza para generar rayos gamma y un detector cerca de la fuente sirve para medir los rayos emitidos. El método por emisión fue utilizado para medir la densidad in situ de los materiales de construcción.

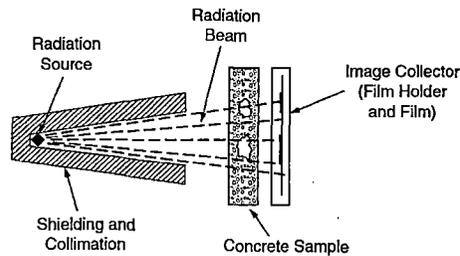


Figura 1.4. Esquema del ensayo radiográfico.

Fuente: ASTM C 1040/C1040M-08(2013)

En 1979, The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) desarrolló la norma T 271 "Determinación de la densidad en estado plástico y endurecido del concreto mediante métodos nucleares" y en 1984 The American Society for Testing Materials siguió los pasos de AASHTO y desarrollo el norma C 1040. Este método de prueba busca determinar la densidad del concreto fresco y endurecido incluyendo concretos compactados con rodillo aplicando emisiones radioactivas con rayos gamma de forma controlada.

#### 1.1.3.5 PRUEBA DE RUPTURA (ASTM C 1150)

La prueba de Ruptura muestra las medidas de la fuerza requerida para cortar una base cilíndrica de una masa de concreto más grande (Johansen 1979). Se utilizan la fuerza medida y un lazo preestablecido de la fuerza para estimar la fuerza compresiva sobre el terreno. Los procedimientos estándares para usar este método se dan en **ASTM C 1150 Método de prueba para determinar el número de ruptura del concreto**, este método de ensayo cubre la determinación del número ruptura del concreto endurecido en especímenes o estructuras de prueba, midiendo la fuerza requerida para provocar el fallo de un espécimen central perforado como un voladizo de acuerdo a la Figura 1.5.

El diagrama esquemático de la prueba de ruptura se muestra en la Figura 1.5. Esquema de funcionamiento del Ensayo de la Prueba de Ruptura.

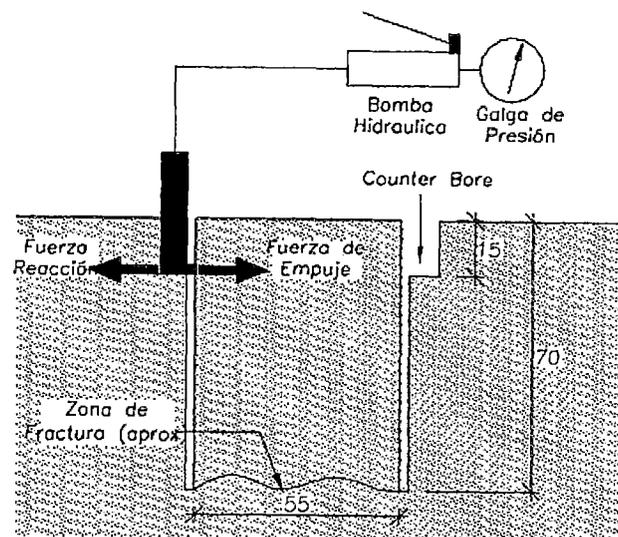


Figura 1.5. Esquema de funcionamiento del Ensayo de la Prueba de Ruptura.

Fuente: ASTM C 1150

La prueba de ruptura se ha utilizado con éxito en una variedad de proyectos de construcción en los países escandinavos, (Carlsson, 1984). Además de su uso para estimar la fuerza compresiva sobre el terreno, el método también se ha utilizado para evaluar la fuerza de enlace entre el concreto y los materiales de recubrimiento (Dahl-Jorgeson y Johansen 1984).

De acuerdo a ACI 228.1R, página 24, recomienda que esta prueba se realice en losas cuyo espesor sea mayor a 150mm (6 pulgadas).

#### 1.1.3.6 VELOCIDAD DE PULSOS ULTRASONICOS (ASTM C 597, NTP 339.237:2012)

Las pruebas tradicionales para conocer la resistencia del concreto se practican sobre especímenes especialmente preparados, que por su origen no son verdaderamente representativos del concreto de la estructura real. Prueba de esto es que el grado de compactación del concreto de la estructura no se refleja en los resultados de la prueba de resistencia, y no es posible determinar si realmente representa la resistencia potencial de la mezcla, como lo indica la prueba del cilindro o del cubo. Ciertamente es posible cortar una muestra de la misma estructura, pero esto da necesariamente como resultado el daño al elemento estudiado.

Por estas razones, intentaron medir de manera no destructiva alguna propiedad física del concreto relacionada con su resistencia. Han tenido mucho éxito con la determinación de la velocidad de las ondas mecánicas ultrasónicas al pasar a través

del concreto. No existe ninguna relación especial entre esta velocidad y la resistencia del concreto, pero, en condiciones específicas, las dos cantidades se relacionan directamente. El factor común es la densidad del concreto: un cambio en la densidad del concreto da como resultado un cambio de la velocidad del pulso. De manera similar en una mezcla dada, la relación de la densidad real con la densidad potencial (bien compactada) y la resistencia resultante se relacionan estrechamente. Así pues un descenso en la densidad causado por un incremento en la relación agua cemento debe disminuir tanto la resistencia a la compresión como la velocidad de un pulso a través de éste.

Según **ASTM C 597 Método de prueba estándar para determinar la velocidad del pulso a través del concreto**, al aplicar este método se determina la velocidad de la propagación de un pulso de energía vibratoria a través de un miembro de concreto. Un transductor envía una onda de corta-duración, señal de alto voltaje a un transductor de recepción. El ensayo comienza generando un pulso eléctrico y en simultáneo se enciende un temporizador electrónico. Las vibraciones del transductor se transfieren al concreto a través de un líquido viscoso como acoplador.

El pulso vibratorio viaja a través del elemento ensayado y es detectado por el transductor receptor. Cuando se recibe el pulso, el temporizador electrónico se detiene y se calcula el tiempo transcurrido.

La longitud del camino o distancia entre los transductores se divide por el tiempo del recorrido para obtener la velocidad del pulso a través del concreto. Es también posible medir la atenuación del pulso ultrasónico que viaja del transmisor al receptor. (George Teodoru 1988).

#### 1.1.3.7 MÉTODOS COMBINADOS

El término "Método combinado" se refiere al uso de dos o más métodos sobre el terreno como una prueba para estimar la fuerza del concreto. Combinando resultados de varias pruebas, se puede establecer una correlación multi-variable para estimar la fuerza.

Los métodos combinados están señalados para aumentar la confiabilidad de la fuerza estimada. El concepto subyacente es que si los dos métodos son influenciados de diversas maneras por el mismo factor, su uso combinado da lugar a un efecto que cancela esto y que mejore la exactitud de la fuerza estimada. Por ejemplo, la velocidad del pulso aumenta con la humedad mientras que disminuye el número del rebote.

Las combinaciones tales como velocidad del pulso y número de rebote (o velocidad del pulso, número del rebote, y atenuación del pulso) han sido reportados para dar lugar a relaciones de fuerza con coeficientes de correlación más altos que cuando los métodos son utilizados individualmente. Sin embargo, las mejoras han sido por lo general, solamente marginales. (George V. Teodoru 1988).

Se acentúa que la combinación de métodos no es un extremo en sí mismo. Un método combinado se debe utilizar en esos casos donde está la manera más económica de obtener una estimación confiable de la fuerza del concreto (Leshchinsky 1991). En Norteamérica, el uso de métodos combinados ha despertado poco interés entre investigadores.

Como resultado, no ha habido esfuerzos de desarrollar los estándares de ASTM para su uso.

Las actuales tecnologías de ensayos no destructivos se continúan desarrollando y la investigación busca mejorar los métodos existentes y desarrollar nuevos métodos.

Los Ensayos No Destructivos se vienen aplicando a construcciones de concreto por cuatro razones:

- Control de Calidad a construcciones nuevas
- Solución de litigios y/o arbitrajes
- Evaluación de las condiciones con fines de rehabilitación
- Aseguramiento de la calidad de las reparaciones

Los END se vienen aplicando para la investigación de estructuras de concreto. Estos tipos de ensayos se vienen incrementando cada vez más debido a algunos factores como:

- Desarrollo de la tecnología en hardware y software para la recopilación y análisis de información.
- Las ventajas económicas al realizar evaluaciones de grandes volúmenes de concreto en comparación con las pruebas destructivas (probetas y muestras diamantinas)
- Evaluaciones rápidas y completas de estructuras.
- Garantía de los resultados cuando se evalúan cimentaciones profundas y a las reparaciones estructurales que se hayan realizado a elementos de una estructura.

#### 1.1.4 Restricciones y ventajas de los resultados de los métodos destructivos y no destructivos (describir el artículo de Malhorta)

Tradicionalmente la inspección y estudio del concreto in situ se ha venido realizando mediante inspección visual de la construcción en proceso y mediante ensayos estandarizados sobre especímenes de concreto. Esta última no provee información del concreto en la estructura (lo que implica ser parte de un macizo sólido y bajo las cargas actuantes).

Los END ofrecen la ventaja de que los resultados de las propiedades del concreto endurecido como el módulo de elasticidad, densidad, resistividad, etc. se obtienen in situ.

La mayoría de END son métodos indirectos de ensayo pues la condición del concreto se determina a partir de la medición de algún estímulo aplicado y su posterior evaluación. Se podrán realizar una o varias de estas pruebas. Algunos ensayos resultan ser ambiguos y es por eso la necesidad de realizar ensayos complementarios. Los Ensayos complementarios pueden ser otros ensayos no destructivos o también algunas pruebas invasivas o destructivas.

Skramtajev en 1938; después de realizar varios trabajos de investigación llegó a las siguientes conclusiones con respecto a los ensayos de laboratorio en estructuras de concreto:

- Las condiciones de curado de los especímenes de laboratorio no son representativos del concreto in-situ.
- El número de ensayos en probetas estándar es insuficiente para asegurar la similitud en todos los miembros de la estructura.

- Las probetas ensayadas a 28 días no proveen información de la resistencia a largo plazo de la estructura.
- Los ensayos superficiales no proveen información del estado del concreto a los efectos de la carbonatación, forma de vaciado y condiciones de humedad.
- Métodos que requieren instalación de equipamiento tienden a proveer estimaciones más precisas de la resistencia del concreto en comparación de los métodos que no lo requieren pero carecen de flexibilidad para usarse en cualquier locación en una estructura existente.

Es interesante que 70 años después, los mismos argumentos y limitaciones son citados en relación a los ensayos in situ (página 2, 1.2 Necesidad de pruebas in situ durante la construcción ACI 228,1989)

En 1938 salió a la luz otro trabajo de investigación el cual realmente utilizaba un método no destructivo. Esta investigación "**Medición del Módulo de Elasticidad de Young por Medio de Vibraciones Sónicas**" que fue llevado a cabo por T.C Powers, de la Asociación de Cementeras de Portland, reportó la aplicación del ensayo de la frecuencia de resonancia para calcular el módulo de elasticidad del concreto (T. C. Powers 1938).

Especímenes prismáticos fueron golpeados utilizando un martillo y la frecuencia de resonancia resultante fue determinada por comparación con el nivel del sonido emitido al realizarse el mismo ensayo en una barra de acero calibrado. Posteriormente con el desarrollo de equipos electrónicos se eliminó la necesidad de comparar el nivel del sonido generado al golpear el espécimen en estudio. Estos nuevos dispositivos utilizaban parlantes para hacer vibrar el espécimen a una determinada frecuencia y un transductor (aguja de fonógrafo) fue utilizado para medir la amplitud de la vibración. Cuando el espécimen empezaba a vibrar en su frecuencia de resonancia se apreciaba la máxima amplitud.

El método de prueba que utilizaba la frecuencia de resonancia fue rápidamente adoptado para monitorear el deterioro durante el ensayo de congelamiento y descongelamiento, y así se convirtió en el primer ensayo no destructivo en ser estandarizado por ASTM. Un ensayo tentativo para medir la frecuencia de resonancia transversal de especímenes de laboratorio fue publicado en 1947. Se trata del **ASTM**

**C 215 "Método de prueba estándar aplicando frecuencia resonante transversal, longitudinal y de torsión en probetas de concreto"** el método de ensayo cubre la medición de la frecuencia resonante transversal, longitudinal, y de torsión de prismas de concreto y cilindros para el propósito de calcular módulo dinámico de elasticidad de Young, el módulo dinámico de rigidez (a veces designado como "el módulo de elasticidad en cortante"), y la relación dinámica de Poisson.

## 1.2 ONDAS:

El término "onda" se utiliza para describir una perturbación que varía en el tiempo y en el espacio y que al hacerlo transporta energía.

Hay dos maneras de categorizar las ondas.

- El primero se basa en la dirección del movimiento de las partículas individuales relativa a la dirección en la que la onda viaja. De esta manera, se pueden distinguir tres tipos de ondas en sólidos:
  - Longitudinal (con vibraciones de partículas paralelas a la dirección de las olas);
  - Transversal o cortante (con vibraciones de partículas perpendiculares a la dirección de las olas);
  - Superficial o Rayleigh (con vibraciones de partículas en la órbita elíptica de forma simétrica).
  
- La segunda forma de categorizar las ondas depende de la capacidad de propagación a través del vacío. En este caso, se puede especificar dos tipos de ondas: mecánica y electromagnética.
  - Una onda mecánica no es capaz de transmitir su energía a través de vacío. Las ondas mecánicas requieren un medio con el fin de transportar su energía de una ubicación a otra. Algunos ejemplos de ondas mecánicas:
    - Las olas del mar
    - Ondas sísmicas

- Ondas acústicas.

Debido a que las ondas mecánicas causan desplazamientos en el medio en el cual se propagan, la velocidad de propagación se ve afectada por las propiedades del medio. Específicamente, la rigidez del medio, o módulo dinámico de elasticidad, el cual tiene un efecto significativo en la velocidad de propagación así también la densidad del medio.

Una onda electromagnética, es una onda que es capaz de transmitir su energía a través del vacío. Estas ondas se propagan por los cambios en el estado eléctrico y magnético y no requieren un medio para propagarse. En los sólidos, las ondas electromagnéticas consisten de una onda transversal con un componente eléctrico y magnético.

Dependiendo del tipo y frecuencia de onda, los ensayos no destructivos aplicados para la inspección de estructuras de concreto y de mampostería pueden clasificarse de diversas maneras. Un ejemplo de dicha clasificación se muestra en Cuadro 1.1.

*Cuadro1.1 Clasificación de las ondas de acuerdo a la frecuencia*

Método	Forma de Onda	Frecuencia
Radiografía	Gamma	$10^{21}$ Hz
	Rayos X	$10^{17}$ Hz
Termografía	Far Infra red	$10^{12}$ Hz
Radar	Radio y Micro Ondas	50MHz-2.5 GHz
Ultrasónico	Mecánica	50kHz-10MHz
Sónico	Mecánica	50Hz-20kHz

*Fuente: Elaboración Propia.*

La inspección visual se basa en la propagación de las ondas electromagnéticas dentro de la luz visible. Sin embargo, los resultados de este tipo de inspección son sólo superficiales y puede dar sólo una estimación de lo que puede estar sucediendo en el interior de la estructura.

### 1.3 FENÓMENO PIEZOELÉCTRICO

El efecto piezoeléctrico es la generación de una carga eléctrica por un material cristalino que es sujeto a un esfuerzo mecánico. Al aplicar una tensión mecánica,

cambia la polarización eléctrica del material generándose un campo eléctrico (aparición de cargas en las superficies del material).

La tensión mecánica cambia el centro de gravedad de cargas negativas y positivas produciendo un cambio en el momento bipolar. El efecto existe en cristales naturales, como el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), y en cerámicos polarizados artificialmente y algunos polímeros.

Los Hermanos Pierre y Jacques Curie descubrieron el efecto piezoeléctrico en el cuarzo en 1880, pero se le dio muy poco uso práctico hasta 1917 cuando el profesor francés Paul Langevin usó láminas de cuarzo para generar y detectar ondas en agua. El efecto inverso también se da al aplicar un campo eléctrico en el cristal; apareciendo una deformación mecánica en el cristal.

#### 1.4 MÉTODO DE ULTRASONIDO

El método de ultrasonido es un ensayo relacionado con la propagación de ondas de compresión a una frecuencia ultrasónica, en donde se mide el tiempo de viaje de las ondas ultrasónicas al atravesar una distancia conocida en la muestra ensayada.

Estas ondas que viajan a una frecuencia de entre 50kHz – 10 MHz son llamados por la literatura especializada como pulsos ultrasónicos; estos son generados por un transductor piezoeléctrico y un transductor similar actúa recibiendo las ondas, esto para monitorear las vibraciones en la superficie del concreto causado por la llegada de los pulsos de onda.

Un circuito de temporización es utilizado para medir el tiempo que toma un pulso al viajar desde el transductor emisor al receptor. La presencia de concreto de bajas densidades y fisuras incrementa el tiempo de viaje lo cual resulta en una disminución de la velocidad de las ondas ultrasónicas. El tiempo de viaje aumenta en vista de que las ondas ultrasónicas generadas son mecánicas y no pueden viajar en el vacío, es así que cuando encuentre fisuras, oquedades y/o cangrejas buscan otros caminos para propagarse, lo que conlleva un aumento del tiempo de viaje.

Desarrollando ensayos en varios puntos de la estructura, la determinación y ubicación de zonas con concreto de baja calidad se puede identificar por las bajas velocidades de los pulsos ultrasónicos.

El desarrollo de la instrumentación para medir la velocidad de los pulsos ocurrió casi simultáneamente en Canadá y en Inglaterra (Whiteburst 1951)

El desarrollo tuvo éxito por el trabajo logrado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos al medir la velocidad de las ondas mecánicas de compresión en el concreto (Long 1945).

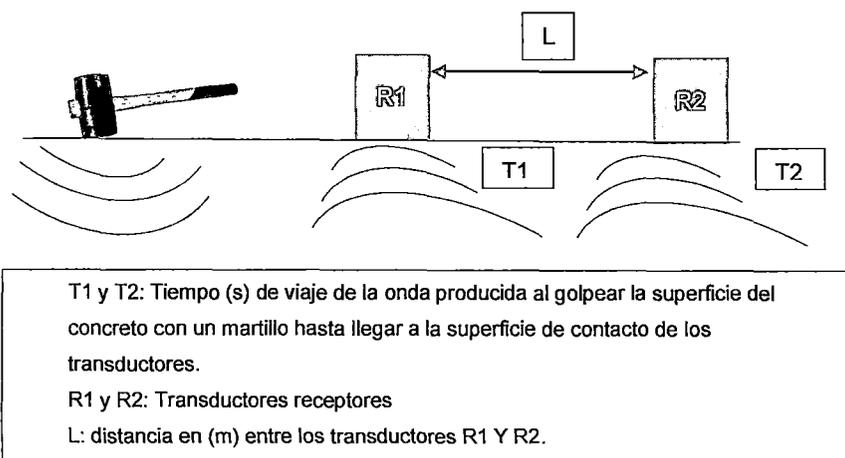


Figura 1.6 Esquema del trabajo del primer Soniscope, antecesor del V-Meter MK IV.  
Fuente: Elaboración Propia

Los primeros ensayos utilizaban 2 transductores receptores dispuestos sobre la superficie ensayada, donde se martillaba horizontalmente sobre la misma línea "imaginaria" de los transductores receptores y un equipo electrónico diseñado para medir los intervalos de tiempo fue utilizado para medir el tiempo de viaje del pulso entre el primer y segundo transductor. En la Figura 1.6, se puede ver la disposición de los transductores R1 y R2 alineados con el martillo generador de las ondas.

El principal propósito del método fue estimar el módulo de elasticidad in-situ.

Entre 1946 y 1947, los ingenieros de la Comisión de la Hidroeléctrica de Ontario trabajaron para desarrollar un artefacto para la detección de grietas en la presa de la hidroeléctrica (Leslie and Cheesman, 1949)

Este artefacto se denominó "SONISCOPE", tenía un transductor que operaba a una frecuencia de 10kHz y cuyas ondas generadas eran capaces de penetrar 15m dentro del cuerpo del concreto y podía medir el tiempo de viaje con una exactitud de 3%.

El propósito declarado del Soniscope fue la identificación y ubicación de fisuras internas, determinar la profundidad de fisuras superficiales y la estimación del módulo dinámico del concreto (Leslie and Cheesman, 1949)

Se mencionó que el tiempo de viaje era el parámetro fundamental del método, la amplitud de la señal recibida es el siguiente parámetro en orden de importancia, porque la transferencia de energía entre los transductores no puede ser controlado. También se enfatizó que la interpretación de los resultados requiere un conocimiento de la historia de la estructura investigada.

De las primeras aplicaciones del Soniscope al investigar las masas del concreto se enfatizó en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico más que en la estimación de la resistencia o el cálculo del módulo de rigidez elástico, Parker 1953.

Al realizar la lectura de la velocidad a lo largo y ancho del cuerpo del concreto de la estructura ensayada se puede fácilmente localizar zonas con dificultades como cangrejeras y fisuras.

Parker (1953) reportó los primeros intentos en la hidroeléctrica de Ontario para desarrollar relaciones entre la velocidad del pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión.

Realizó 46 mezclas que involucraron los mismos agregados, diferentes tipos de cemento y aditivos y se ensayaron con el Soniscope y posteriormente se comprimieron; los resultados indicaban que no existían diferencias significativas entre velocidad vs resistencia para las diferentes mezclas. Estos resultados fueron tratados estadísticamente en grupo y se realizó el cálculo para determinar la curva de menor ajuste.

La Figura 1.7 muestra la relación entre la fuerza estimada a partir de la velocidad del pulso y el límite inferior de confianza ( $\alpha=5\%$ ) estuvo alrededor del 45% de la resistencia media. Esto muestra el alto nivel de incertidumbre del método al pretender correlacionar la resistencia versus la velocidad de la onda ultrasónica.

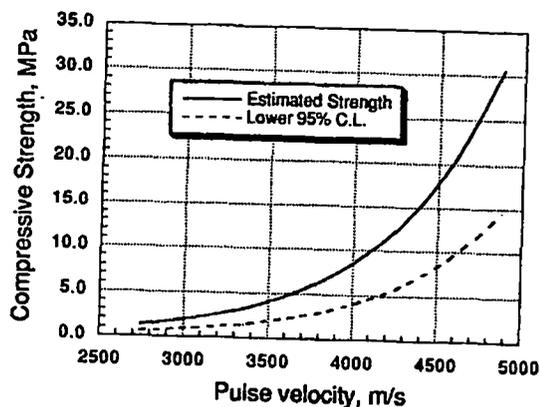


Figura 1.7 Resistencia a la compresión versus velocidad de la Onda Ultrasónica, basado en más de 46 mezclas con el mismo agregado.

Fuente: (Parker 1953)

La incertidumbre inherente en el uso del método de ultrasonido para estimar la resistencia fue determinada tempranamente casi simultáneamente como salió el método de ultrasonido.

La Figura 1.7 también muestra que el cambio en una unidad de la velocidad del pulso ultrasónico decrece con el incremento de la resistencia. Lo que significa que la velocidad del pulso ultrasónico es relativamente insensible a la resistencia en concretos maduros.

Mientras los trabajos con el soniscope progresaban en Canadá, R. Jones y colaboradores en el Laboratorio de Investigaciones en Carreteras (RRL) por sus siglas en inglés; desarrollaron un aparato para ensayos ultrasónicos (Jones 1949).

Los investigadores de la Road Research Laboratory (R.R.L) estuvieron interesados en ensayar la calidad de los pavimentos, los cuales utilizaban muestras de pequeña longitud. Así fue que desarrollaron un aparato que debería ser operado a frecuencias más altas que el Soniscope. Este aparato fue denominado Probador Ultrasónico de Concreto. Durante los ensayos se utilizaban transductores a frecuencias de 60 a 200 kHz, dependiendo de la penetración requerida en los ensayos (Jones 1953).

Además de utilizar diferentes frecuencias, el aparato inglés era mucho más exacto que el soniscope cuando se medía el tiempo de viaje de las ondas. Era fundamental tener menos márgenes de error en medir este parámetro debido a que los especímenes que utilizaban eran de mucha menor longitud de ensayo. El tiempo de

viaje era estimado por el probador ultrasónico de concreto con una exactitud del orden de  $\pm 0.2 \mu\text{s}$  ( $\mu\text{s}$ =micro segundo,  $10^{-6}\text{s}$ )

Jones revisó el programa de ensayos llevado a cabo con el aparato que acaban de desarrollar (Jones 1949), y realizaron los siguientes estudios:

- Investigaron el comportamiento del pulso ultrasónico a diferentes profundidades de penetración en especímenes cubos y en losas. Fue uno de los primeros estudios realizados.
- Investigaron la influencia de la relación agua-cemento, del tipo de agregado y la cantidad utilizada en las pruebas de medición de la velocidad de ultrasonido. Estos estudios demostraron la importancia del tipo y el contenido del agregado en los resultados de los ensayos con ultrasonido.
- Investigaron la relación entre la velocidad de los pulsos ultrasónicos y la resistencia a la compresión. Estos estudios llegaron a demostrar que para determinadas mezclas y bajo condiciones uniformes se encontraban buenas correlaciones entre velocidad y resistencia.

Entonces Jones estableció los problemas inherentes en utilizar la velocidad de los pulsos ultrasónicos para estimar la resistencia del concreto.

A pesar de estos tempranos descubrimientos, muchos investigadores trataron de establecer correlaciones entre la velocidad de los pulsos y la resistencia, muchos de estos investigadores llegaron a la misma conclusión que Jones.

Whiteburst publicó el Cuadro 1.2 Clasificación de la calidad del concreto sobre la base de la velocidad de pulso, utilizado como indicador de la calidad del concreto utilizando la velocidad de los pulsos ultrasónicos.

Esta tabla fue citada posteriormente en varias publicaciones. Sin embargo, Whiteburst advirtió que estos resultados eran aplicables en concreto con densidades de  $2400 \text{ kg/m}^3$  aproximadamente. A pesar de todo esto la tabla fue usada frecuentemente por investigadores sin experiencia con el único fin de relacionar sus resultados obtenidos. Se recomienda que se realicen estudios a fin de llegar a resultados similares a la tabla anterior con otras densidades de concreto, las cuales sean las más usadas en la industria de la construcción peruana.

Cuadro 1.2 Clasificación de la calidad del concreto sobre la base de la velocidad de pulso.

Velocidad de los pulsos (m/s)	Condición
> 4570	Excelente
3660-4570	Generalmente bueno
3050-3660	Cuestionable
2130-3050	Generalmente pobre
< 2130	Muy pobre

Fuente: Whiteburst (1951)

Esta tabla fue citada posteriormente en varias publicaciones. Sin embargo, Whiteburst advirtió que estos resultados eran aplicables en concreto con densidades de 2400 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente. A pesar de todo esto la tabla fue usada frecuentemente por investigadores sin experiencia con el único fin de relacionar sus resultados obtenidos. Se recomienda que se realicen estudios a fin de llegar a resultados similares a la tabla anterior con otras densidades de concreto, las cuales sean las más usadas en la industria de la construcción peruana.

## 1.5 CONCRETO

Las propiedades del concreto son sus características o cualidades básicas. Las cuatro propiedades principales del concreto son: TRABAJABILIDAD, COHESIVIDAD, RESISTENCIA Y DURABILIDAD. (IMCYC, 2004).

Las características del concreto pueden variar en un grado considerable, mediante el control de sus ingredientes. Por tanto, para una estructura específica, resulta económico utilizar un concreto que tenga las características exactas necesarias, aunque esté débil en otras.

- **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.
- **Cohesividad:** se define como la propiedad del concreto fresco gracias a la cual es posible controlar el peligro de segregación durante la etapa de colocación de la mezcla, al mismo tiempo que contribuye a prevenir la

aspereza de la misma y facilitar su manejo durante el proceso de compactación del concreto.

- **Resistencia:** Es una propiedad del concreto que, casi siempre, es motivo de preocupación. Por lo general se determina por la resistencia final de una probeta en compresión. Como el concreto suele aumentar su resistencia en un periodo largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad.
- **Durabilidad.** El concreto debe ser capaz de resistir a la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido en el servicio.

También se debe entender el proceso por el que pasa el concreto desde una etapa temprana como concreto fresco hasta que endurece.

- **Concreto fresco:** Al principio el concreto parece una "masa". Es plástica y puede ser trabajada y moldeado en diferentes formas. Y así se conserva durante la colocación y la compactación. Las propiedades más importantes del concreto fresco son la trabajabilidad y la cohesividad.
- **Estado fraguado:** Después, el concreto empieza a ponerse rígido. Cuando ya no está blando, se conoce como FRAGUADO del concreto. El fraguado tiene lugar después de la compactación y durante el acabado.
- **Concreto endurecido:** Después que el concreto ha fraguado empieza a ganar resistencia y se endurece. Las propiedades más importantes del concreto endurecido son resistencia y durabilidad.

## Componentes

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua. Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas

naturales o manufacturadas con tamaño de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152mm. El tamaño máximo del agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25mm. (Steven, 1992)

### **Cemento**

Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes.

### **Agua**

Es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que estas desarrollen sus propiedades aglutinantes.

### **Agregados**

Los agregados para concreto pueden ser definidos como aquellos materiales inertes que poseen una resistencia propia suficiente que no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico y que garantizan una adherencia con la pasta de cemento endurecida.

### **Aditivos**

Se utilizan como ingredientes del concreto y, se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado, con el objeto de modificar sus propiedades para que sea más adecuada a las condiciones de trabajo o para reducir los costos de producción.

#### **1.5.1 Propiedades del concreto que influyen en el ensayo de Ultrasonido**

La filosofía que gobierna el ensayo del concreto endurecido mediante ultrasonidos, está basada en la medición de la velocidad de propagación de un impulso ultrasónico a través de dicho material. Este parámetro está relacionado con las propiedades elásticas del concreto que se ensaya, que están conectadas a su vez con sus parámetros resistentes y de densidad.

Por lo general, es la velocidad de un impulso de ondas longitudinales o de compresión la que se mide, por ser las que van asociadas a una mayor energía de impulso y, por tanto, las que proporcionan un frente de ondas bien definidos que puede ser detectado con suficiente nitidez en el transmisor receptor.

Los diversos factores que influyen en los resultados que se obtienen con el ensayo de ultrasonidos en el concreto van asociados a:

Tipo y composición del hormigón

- Tipo de concreto (normal o ligero)
- Tipo y dosificación de cemento
- Tipo, dosificación y tamaño máximo del agregado grueso.
- Relación agua/cemento (a/c)

Factores relacionados con el tipo de pieza que se investiga

- Tipo y dimensiones del elemento estructural o pieza que se ensaya.  
Posición de la zona ensayada en la pieza.
- Temperatura del hormigón
- Edad del hormigón
- Contenido de humedad del concreto
- Condiciones de curado del concreto
- Presencia de armaduras
- Rugosidad de la superficie del elemento o pieza que se ensaya
- Nivel tensional de la zona o elemento estructural ensayado

En lo que sigue, analizaremos los aspectos más destacados relacionados con dichas variables.

### 1.5.2 Tipo de concreto

La mayoría de las investigaciones realizadas sobre las aplicaciones de los ultrasonidos en el concreto, han estado basadas en ensayos sobre concreto de densidad normal. Las referencias bibliográficas sobre la aplicación de la técnica ultrasónica a los hormigones ligeros son relativamente escasas.

Por otra parte, las aplicaciones estructurales a base de concretos fabricados con áridos de bajo peso específico son cada vez más numerosas y, por ello, es interesante

conocer las diferencias básicas de comportamiento del ensayo ultrasónico en concretos normales y en concretos ligeros.

Las experiencias realizadas en concretos fabricados con arcillas expandidas y otros áridos ligeros, han mostrado que cuando ha sido utilizada la técnica ultrasónica para estimar la resistencia de estos últimos, para una misma velocidad de tránsito, ha sido superior a la estimada para hormigones de densidad normal.

Para niveles de resistencia a compresión similares, la velocidad de tránsito obtenida en hormigones ligeros fue siempre inferior a la de los hormigones normales. El mayor agrupamiento de los resultados que se observa en hormigones ligeros, parece indicar que el contenido de humedad del hormigón ejerce una menor influencia sobre la velocidad de los ultrasonidos en este tipo de hormigones.

### 1.5.3 Tipo y dosificación del concreto

El tiempo requerido para que las ondas de tipo ultrasónico atraviesen un medio heterogéneo es la suma de los tiempos de tránsito a través de sus componentes individuales.

Dado que el tiempo de tránsito es inversamente proporcional a la velocidad del impulso ultrasónico, que a su vez está relacionada con las propiedades elásticas del concreto, las propiedades y proporciones de los componentes individuales, tendrán una indudable influencia en la medida de la velocidad final de propagación a través del concreto.

La bibliografía publicada sobre la influencia que el tipo de cemento ejerce en la medida de la velocidad, hacen referencia a que el tipo y dosificación del cemento utilizado en la fabricación del hormigón, influyen en los resultados de la velocidad de los ultrasonidos, pero en ninguno de estos documentos se cuantifica dicha influencia. Hay otros factores que influyen sobre los valores de la velocidad y resistencia como son, adherencia árido-pasta, nivel de compactación, calidad de la matriz cementada y distribución de áridos en el hormigón. La calidad de la matriz determina las diferencias pendientes obtenidas para las curvas que se correlacionan la resistencia y la velocidad del impulso ultrasónico; al aumentar la dosificación de cemento, la pendiente de las curvas de regresión se hace mayor, resultando un menor rango de las velocidades de tránsito obtenidas para diferencias de resistencia a compresión superiores.

#### 1.5.4 Tipo, dosificación y tamaño máximo del agregado

El ensayo con ultrasonidos no proporciona una estimación directa de la resistencia a compresión de un hormigón endurecido, debiéndose para ello establecer correlaciones entre los parámetros de resistencia y velocidad. Estas relaciones se verán alteradas por los componentes del hormigón, en particular por las propiedades del árido utilizado.

El tipo y el tamaño máximo el árido influyen de modo considerable en la velocidad de los ultrasonidos que se obtiene, mientras que para una relación agua/cemento constante, su influencia en los valores de la resistencia a compresión es comparativamente mucho menor. Por tanto se deben estudiar diferentes calibraciones entre los parámetros de resistencia y velocidad, para diferentes dosificaciones del árido grueso.

Los cambios en la dosificación de áridos en el hormigón tienen un efecto apreciable sobre la medida de la velocidad ultrasónica, mientras que no afectan del mismo modo a su resistencia. Al ser la velocidad de los ultrasonidos sustancialmente mayor en la mayoría de los áridos naturales que en la pasta de mortero endurecido existen diferentes correlaciones entra velocidad y resistencia para diferentes dosificaciones de árido en la mezcla.

La Figura 1.8, tomada de la publicación de John Henry Bungey, presenta las diferentes velocidades del impulso ultrasónico que se obtienen para hormigones con iguales dosificaciones de cemento, áridos y agua, al variar el tipo de árido utilizado. Para un mismo nivel de resistencia a compresión, las velocidades de transito que se obtienen en concreto fabricados con áridos silíceos son menores que las obtenidas con áridos graníticos o calizos. En general, para un determinado valor de la resistencia a compresión del hormigón, la velocidad de transito obtenida es inferior cuanto menor es la densidad del árido utilizado. Igualmente, puede establecerse que la velocidad del impulso ultrasónico aumenta a medida que lo hace el tamaño máximo del árido.

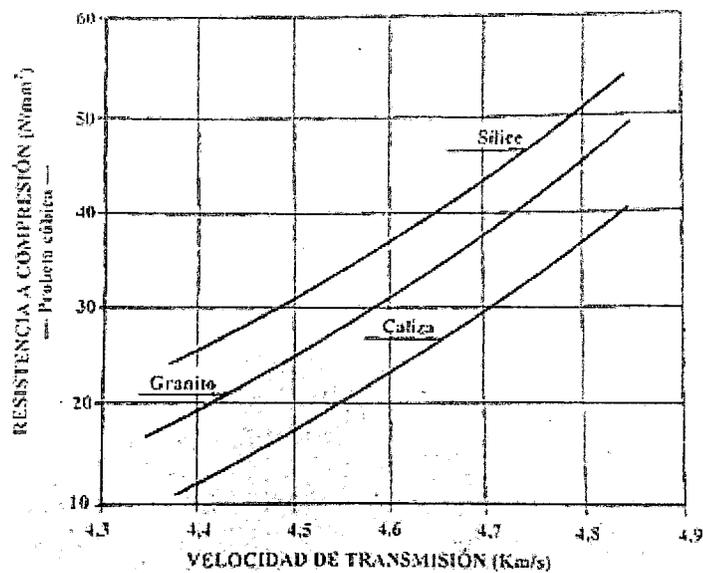


Figura 1.8 Influencia del tipo de árido en la resistencia del concreto.  
Fuente: John Henry Bungey

### 1.5.5 Relación agua/cemento

El efecto de la variación de la relación agua/cemento, sobre la velocidad de los ultrasonidos, va asociados con la edad del hormigón que se ensaya. A cortas edades (es decir, en las primeras horas o días) la influencia relativa de la cantidad de agua presente en el hormigón es superior a la que ejerce la calidad de la pasta endurecida, que está en pleno proceso de hidratación. A mayores edades, es más determinante la calidad de la pasta endurecida y el tipo y dosificación del áridos, que la propia relación A/C.

Para niveles bajos de resistencia (o a cortas edades del hormigón) los efectos de las proporciones de la mezcla son menos significativos que a edades posteriores.

### 1.5.6 Tipo y dimensiones del elemento estructural o pieza que se ensaya

Las velocidades del impulso ultrasónico no se ven generalmente influenciadas por la longitud de la trayectoria siempre que ésta no sea excesivamente pequeña, en cuyo caso la naturaleza heterogénea puede afectar de forma importante a la medida realizada.

La norma **UNE 83308:1986 Ensayos en Concreto. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos**. Recomienda por ello, que la longitud sea al menos cinco veces mayor que el tamaño máximo del árido. En este sentido,

otras normas europeas contienen comentarios similares, recomendando longitudes mínimas de trayectoria de 100 y 150mm, para hormigones con 20 y 40mm de tamaño máximo de árido, respectivamente. Es importante mencionar que al momento de realizar los ensayos de esta investigación siempre se tuvo en cuenta las recomendaciones de esta y otras normas referentes en el tema de ultrasonido en concreto.

Las limitaciones físicas del equipo en la medición del tiempo de transito que incorpora el equipo, pueden introducir también errores importantes cuando se trabaja en trayectorias cortas. Este posible efecto se muestra en la Figura 1.9, en la que se muestran los resultados de ensayos realizados en laboratorio sobre probetas en las que se iba reduciendo su longitud por medio de sucesivos cortes con sierra diamantada.

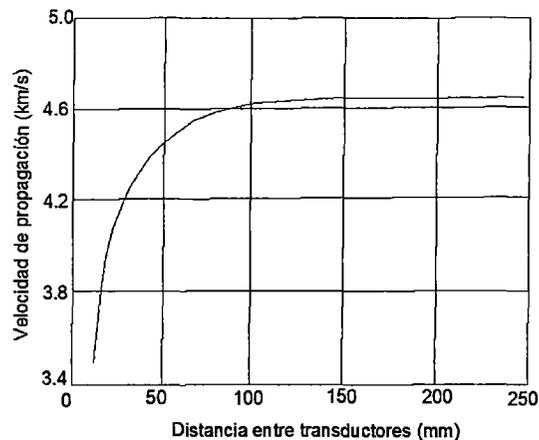


Figura 1.9 Efecto de sucesivos cortes en la longitud del elemento ensayado.  
 Fuente: John Henry Bungey

Respecto a la forma y tamaño de los elementos a ensayar con ultrasonidos, la totalidad de la bibliografía consultada, incluida la correspondiente a la norma **UNE 83308:1986 Ensayos en Concreto. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos**, hace referencia a que la propagación de los impulsos ultrasónicos es independiente de la forma y tamaño de los elementos a ensayar, siempre que las dimensiones transversales a la dirección de propagación no sean inferiores a la longitud de onda del impulso.

La posición de la zona de ensayo en el elemento estructural que se investiga, es también una variable a tener en cuenta en la medida de la velocidad del impulso ultrasónico.

Cualquier cambio en la concentración de áridos en el hormigón, motivado por los efectos de la compactación, es debido casi enteramente al movimiento de las partículas más gruesas de árido, lo que puede justificar la reducción de velocidad que se obtiene en las partes altas de elementos hormigonados verticalmente, donde se acumula una mayor concentración de pasta de mortero endurecido, cuya velocidad de impulso ultrasónico es inferior a la de la mayoría de los áridos utilizados.

### 1.5.7 Temperatura del concreto

Las variaciones de temperatura del hormigón entre 5°C y 30°C, no producen cambios significativos en las velocidades medidas. La norma **UNE 83308:1986 Ensayos en Concreto. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos**, indica que fuera de este intervalo de temperaturas, los resultados obtenidos cambian sin que necesariamente se hayan producido modificaciones paralelas en las propiedades del hormigón ensayado.

Para temperaturas extremas, el efecto de variación de la velocidad del impulso ultrasónico puede ser estimado a partir del Cuadro 1.3 Correcciones en la velocidad de onda, por efecto de temperaturas extremas en el concreto., tomada de BS 1881, parte 203, que permite corregir la velocidad del impulso ultrasónico para temperaturas fuera del rango comprendido entre 5°C - 30°C.

*Cuadro 1.3 Correcciones en la velocidad de onda, por efecto de temperaturas extremas en el concreto.*

Temperatura (°C)	Corrección (%)	
	Concreto curado al aire	Concreto curado en agua (saturado)
+60	+5	+4
+40	+2	1.7
+20	0	0
0	-0.5	-1.0
-4	-1.5	-7.5

*Fuente: BS 1881, part 203.*

Los resultados presentados en la citada tabla, están basados en los trabajos de Jones y Facaoaru, y han sido obtenidos a partir del ensayo de un solo tipo de hormigón, fabricado con cemento portland sin adiciones.

Según estos autores, la disminución de la velocidad del impulso ultrasónico es debido a la micro-fisuración interna asociada a altas temperaturas del hormigo. Por otra parte, la congelación del agua del concreto a bajas temperaturas hace aumentar la velocidad si no se produce un efecto disruptivo en la masa.

Igualmente, debe tenerse en cuenta que el incremento de temperatura del concreto, aumenta la desviación típica de la población de velocidades del impulso ultrasónico, respecto a los valores obtenidos inicialmente.

#### 1.5.8 Edad del concreto

El método de los ultrasonidos se muestra muy sensible para detectar los cambios que van produciéndose en la masa de hormigón durante las primeras horas y días después de su fabricación, es decir, durante el inicio y primer desarrollo del proceso de hidratación del cemento. Sin embargo, a medida que ese proceso va completándose, pequeñas variaciones de la velocidad del impulso ultrasónico pueden representar diferencias ostensibles en la resistencia a compresión del hormigón.

Para un valor determinado de la velocidad ultrasónica, la resistencia del hormigón es superior para hormigones de mayor edad. También es interesante observar cómo van aumentando las pendientes de estas curvas de correlación con la edad del hormigón, resultando que para un menor rango de velocidades, se obtienen variaciones más amplias en la resistencia.

#### 1.5.9 Contenido de humedad del concreto

En general, la velocidad del impulso ultrasónico aumenta con el contenido de humedad del concreto. Esta influencia es más acusada en hormigones de bajos niveles de resistencia. La velocidad ultrasónica en un hormigón saturado puede ser hasta un 5% superior que la obtenida en ese mismo hormigón en estado seco, aunque hay autores que cifran ese incremento en 2%, aproximadamente.

La norma **UNE 83308:1986 Ensayos en Concreto. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos** indica que el contenido de humedad del concreto ensayado tiene una ligera influencia sobre la velocidad, que puede llegar a ser, en hormigones con un elevado contenido de humedad, hasta un 5% mayor que en hormigones secos.

Los efectos distintos que el contenido de humedad del hormigón produce sobre la velocidad ultrasónica y sobre su resistencia, revierten en una mayor dificultad para

establecer correlaciones validas entre ambos parámetros. Estas correlaciones, pueden no ser aplicables para determinados intervalos de la edad del hormigón, al variar su contenido en humedad con el tiempo.

En una probeta húmeda se obtuvo un valor superior de la velocidad ultrasónica. Entonces que el proceso de “secado” del concreto, se obtendrá menor valor de la velocidad, para un determinado nivel de resistencia.

Por ello, con el fin de corroborar esta teoría, se comparó los resultados en dos probetas de concreto en estado seco y humedecido durante una hora en una poza de fraguado.

El Cuadro 1.4 Muestra los valores de la velocidad de la onda de dos probetas en estado seco y saturado. En ambos casos las mismas probetas saturadas incrementan la velocidad de la onda con respecto a cuándo se encuentran mojadas. Para el caso de la probeta 1 el incremento de la velocidad es de 22% y para la probeta 2 el incremento fue de 7%.

Cuadro 1.4 Resultados de la Velocidad Ultrasónica en probetas de concreto secas y húmedas.

Velocidad de la Onda Ultrasónica (m/s)			
Muestra	SECO	SATURADO	INCREMENTO
Probeta 1	3046	3723	+22%
Probeta 2	3578	3843	7%

Fuente: Elaboración Propia.

Este efecto conduce a la necesidad de que las mediciones de la velocidad de los ultrasonidos y resistencia a compresión, estén basadas en ensayos realizados sobre probetas o piezas con contenidos de humedad similares al hormigón de la estructura. El contenido de humedad del hormigón tiene dos efectos sobre la velocidad ultrasónica, uno de orden físico y otro químico. Muchas de las diferencias de velocidad que se obtienen, son debidas a los efectos que las diferentes condiciones de curado ejercen sobre la hidratación del cemento, mientras que otra parte menor de esas diferencias, son debidas a la presencia de agua libre en los poros. Ambos efectos han de ser cuidadosamente considerados cuando se estime la resistencia a compresión.

#### 1.5.10 Condiciones de curado del concreto

No es fácil establecer una relación lógica entre la velocidad de los ultrasonidos con la temperatura de curado y, por tanto, con la madurez del concreto. Ensayos realizados al respecto demuestran que se obtienen correlaciones diferentes para un mismo hormigón curado en condiciones de laboratorio y obra, o entre probetas testigo extraídas de probetas fabricados con dicho concreto, lo que conduce a la necesidad de obtener correlaciones diferenciadas en cada caso.

#### 1.5.11 Presencia de armaduras

La velocidad de la pulsación ultrasónica que se mide en piezas de concreto armado en la proximidad de las armaduras, pues generalmente es superior a la que se obtiene en ese mismo concreto cuando la trayectoria del impulso no está influenciada por el acero de refuerzo.

El aparente incremento de velocidad que se detecta en estos casos, depende de la proximidad de los puntos de medida a las armaduras, del diámetro de las mismas y de su orientación con respecto a la dirección de propagación.

A efectos prácticos, si existe armadura en el elemento estructural que se ensaya con ultrasonidos, debe replantearse su posición con detección magnética, para evitar, en la medida de lo posible, que las trayectorias del impulso ultrasónico se produzcan en sus cercanías.

Este hecho puede ser importante, no solo por las incertidumbres que rodean a las medidas de velocidad que se obtienen en estos casos, sino porque pueden no ser representativas del concreto ensayado, al atravesar zonas de compactación defectuosas, producida por acumulación de armaduras.

Existen dos casos fundamentales a considerar, en relación con la influencia de las armaduras sobre las medidas de la velocidad ultrasónica.

Armadura paralela a la dirección de la trayectoria

Armadura situada transversalmente a la dirección de la trayectoria

#### 1.5.12 Armadura paralela a la dirección de la trayectoria

Si en la proximidad de la zona donde va a efectuarse el ensayo, existe armadura colocada paralelamente a la dirección de la trayectoria del impulso ultrasónico, los valores medidos de la velocidad deberán ser corregidos al objeto de tener en cuenta

la presencia de dicha armadura. La corrección dependerá de la distancia entre la línea correspondiente a la trayectoria del impulso y el eje de la barra de acero más próxima, del diámetro de la barra y de la velocidad ultrasónica del hormigón situado en las inmediaciones de la armadura, ver Figura 1.10.

Ha sido demostrado que el primer componente del impulso ultrasónico en llegar al transductor receptor viajar parcialmente a través del acero de refuerzo, si la relación  $a/L$  es tal que:

$$\frac{a}{L} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}} \dots\dots (1)$$

En este caso, será:

$$V_c = \frac{2 * a * V_s}{\sqrt{4 * a^2 * (t * V_s - L)^2}} \dots\dots (2)$$

Dónde:

$V_s$ : Velocidad de los ultrasonidos medido cerca de la barra de acero de refuerzo (km/s)

$V_c$ : Velocidad de los ultrasonidos corregido (km/s)

$a$ : Distancia desde la superficie de la barra al punto más cercano de uno de los dos transductores (mm)

$t$ : tiempo de tránsito (us)

$L$ : Longitud teórica de trayectoria entre los dos transductores (mm)

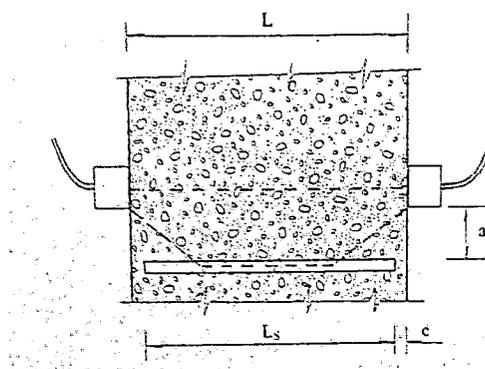


Figura 1.10 Armadura paralela a la dirección del impulso ultrasónico

Fuente: Manual de Usuario del Fabricante

La utilización del factor de corrección en esta forma, requiere una estimación lo más preciso posible de "Vs".

Si el valor de "a" es muy pequeño, puede comprobarse que el camino más rápido seguido por la trayectoria del impulso, incluirá el conjunto de la barra de acero. En este caso, la velocidad ultrasónica Vc en el concreto vendrá dado por la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{2 * V_s * \sqrt{a^2 + c^2}}{t * V_s - L_s} \dots\dots\dots (3)$$

Siendo "Ls" la longitud de la barra en cuestión y c el recubrimiento de la armadura (ambos parámetros en mm)

La transición entre las expresiones (2) y (3) puede ser obtenido evaluando la distancia x existente entre la superficie del hormigón y el punto de la barra en el que se incorpora a la misma trayectoria seguida por el impulso ultrasónico.

Es notorio comprobar que para cualquier diámetro de la barra, la influencia de la corrección es menor a medida que la calidad del concreto mejora (mayores Vc).

#### 1.5.13 Armadura transversal a la dirección de la trayectoria

La influencia máxima de la presencia de armaduras, puede ser teóricamente calculada asumiendo que el frente del impulso ultrasónico atraviesa la totalidad del diámetro de las barras transversalmente, situadas en la dirección de la trayectoria.

En este sentido John Henry Bungey obtiene comportamientos similares a las armaduras situadas paralelamente a la trayectoria, pero detecta que la influencia del acero sobre el parámetro  $g = V_c/V_s$  es mucho menor.

Puede comprobarse que, para efectos prácticos, para diámetros iguales o inferiores a 20mm y velocidades del orden de 4km/s en el concreto, la influencia es muy pequeña y puede ser obviada.

#### 1.5.14 Rugosidad de la superficie del elemento o pieza

La normativa **UNE 83308:1986 Ensayos en Concreto. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos**, también recomienda que la superficie de ensayo debe ser lo más lisa posible para facilitar un buen contacto

entre los transductores y la superficie ensayada, a través del acoplante (acoplantes típicos: vaselina, jabón líquido o pasta de glicerol). Por ello, se elegirán preferiblemente zonas que hayan sido encofradas.

Cuando la superficie del hormigón es muy rugosa, se señala en nuestra normativa que deberá tratar con piedra abrasiva o rellenada con un mínimo espesor de material adecuado (yeso, mortero de cemento o resina epoxi), hasta conseguir una superficie plana. Como alternativa, en el caso de tener que trabajar con superficies muy rugosas, se recomienda que se tomen las medidas del tiempo de tránsito sobre longitudes de trayectoria superiores a las normalmente utilizadas.

A tal efecto, son recomendables longitudes mínimas de recorrido para superficies no encofradas de 150mm en el caso de transmisión directa y de 400mm para transmisión superficial.

#### 1.5.15 Nivel tensional de la zona o elemento estructural

Está generalmente aceptado que la velocidad del impulso ultrasónico, obtenida en laboratorio sobre probetas cúbicas, no está significativamente afectada hasta niveles tensionales del orden de 50% de su resistencia a compresión.

Para niveles tensionales superiores, la aparente reducción de velocidad del impulso está motivada por la formación de micro fisuras internas, que hacen cambiar la longitud y el ancho de la trayectoria.

En condiciones de servicio, cuando las tensiones del hormigón no exceden normalmente del 33% de la tensión de agotamiento, la influencia del estado tensional sobre la velocidad es significativamente y por tanto, la técnica puede ser utilizada con confianza. Sólo si el elemento estructural que se ensaya, ha estado sometido en su historia a niveles tensionales que puedan ser considerados bastante elevados, pueden verse afectados las lecturas obtenidas.

Con niveles de compresión comprendidos entre 50% y el 60% de la carga de rotura, Delibes obtiene unas pérdidas de velocidad ultrasónica comprendidas entre el 0.54% y el 1.22%, dependiendo del tipo de árido utilizado en la fabricación del concreto. Por otra parte, indica el autor que la duración de la carga no afectó al resultado, obteniéndose una baja en la medida de la velocidad del 0.9%.

Cabe pues deducir, una sensibilidad muy pequeña de los ultrasonidos (cambios insignificantes de velocidad) para cargas inferiores al 65% de la rotura por

compresión, que es el nivel correspondiente a lo que Delibes define como "estabilización del daño".

## 1.6 PERSPECTIVAS SOBRE LA PRUEBA DE ULTRASONIDO

Existe un acuerdo unánime entre los investigadores de que los métodos de prueba actualmente disponibles para la determinación no destructiva de la resistencia del concreto requieren más investigación. Cincuenta años de investigación en esta área podría producir mejorar las formulaciones empíricas obtenidas por ajuste de curvas elementales para el cálculo de la fuerza. En vista de la complejidad del problema, parece ser demasiado optimista intentar formular un método de prueba de ultrasonido para la determinación de la resistencia del concreto. Sin embargo, teniendo en cuenta la gravedad del problema de la infraestructura y la magnitud de los costes de rehabilitación, se necesita continuar investigando para mejorar la situación actual. Por ejemplo, se ha demostrado repetidamente que el método estándar ultrasónico usando ondas longitudinales (o L) en concreto (ASTM C 597), puede estimar la resistencia del concreto sólo con una precisión de  $\pm 20\%$  en condiciones de laboratorio (Malhotra, 1980; Popovics, 1998). En campo el error potencial es aún mayor. Esto obviamente no es suficientemente bueno. Sin embargo, los ingenieros se ven obligados a utilizarlos. Por desgracia, la solución no puede venir de la ciencia porque no existe una relación teóricamente justificable entre la fuerza y la velocidad del pulso, incluso para materiales homogéneos y linealmente elásticos, y mucho menos para el concreto.

Las ondas longitudinales ultrasónicas son una herramienta interesante para la investigación de concreto. Estas ondas tienen la velocidad más alta por lo que es simple separarlos de los otros tipos de onda. El equipo es portátil, utilizable en el campo con lo que se pueden realizar ensayos in situ, es verdaderamente no destructivo y ha tenido éxito para probar materiales distintos al concreto. Además, ninguno de los métodos disponibles no destructivos para probar la resistencia del concreto es mejor. Sin embargo, existen factores intrínsecos y prácticos que pueden interferir con la determinación de la resistencia del concreto por medios ultrasónicos. Por lo tanto, el análisis de cuatro de estos factores que interfieren es apropiado con la previsión de que esto mejora la investigación futura sobre la determinación ultrasónica de la resistencia del concreto. Estos factores son:

- La complejidad de la estructura interna de concreto
- Los factores que afectan la resistencia del concreto pueden afectar a la velocidad del pulso de diferente manera, especialmente la fuerza de un concreto estructural típico es controlada por la resistencia de la pasta de cemento, mientras que la velocidad del pulso es controlada por las propiedades del agregado.
- La insensibilidad de la velocidad de onda a pequeños pero importantes cambios en la estructura interna del concreto
- La falta de una relación teóricamente justificable entre fuerza y velocidad de la onda

El análisis de estos factores constituye la primera mitad de este artículo. La segunda parte es la demostración de que las propuestas de dos enfoques, el uso de fórmulas multi-variables desarrollados por modelos matemáticos y el uso de ondas de superficie para el cálculo de la resistencia del concreto reducen estas dificultades.

El concreto es una mezcla de cuatro materiales: cemento Portland, agregado, agua y aire. También puede contener aditivos u otros materiales, pero podemos hacer caso omiso de estos. Las partículas de agregado en un concreto endurecido se mantienen unidas por la pasta porosa de cemento endurecido donde los poros están llenos de aire, agua o ambos. Se puede modelar el concreto como material compuesto, pero este modelo es todavía una simplificación. Lo que hace que la estructura interna del concreto sea tan complejo son:

- La pasta de cemento endurecida en sí es un material altamente complejo
- El agregado mineral es también un material poroso compuesto que difiere mucho de la pasta de cemento endurecido
- La interfaz entre la pasta y las partículas de agregado tiene propiedades especiales

Por lo tanto, el concreto puede ser adecuadamente considerado como un compuesto de materiales compuestos, heterogénea, tanto a nivel microscópico y macroscópico. La naturaleza multi-fase del concreto justifica aún más el uso de modelos multivariados para una mejor estimación de la resistencia.

El concreto es una estructura compleja.

Es frágil en algunos aspectos y dúctiles en otros, es elástico en algunos aspectos, inelástica en los otros y la elasticidad no es lineal

Tiene algunas de las propiedades de un líquido (fluidez, por ejemplo), y algunas de las propiedades de un sólido (resistencia al cizallamiento, por ejemplo)

Se reduce en un grado significativo durante el secado

Está lleno de poros y grietas pequeñas que pueden llenarse con agua, aire o ambos

Tiene propiedades (resistencia, por ejemplo) que cambian con el tiempo

Tiene propiedades que pueden verse afectados en gran medida por las condiciones ambientales.

Esta complejidad hace que el comportamiento de las ondas ultrasónicas en el concreto sea altamente irregular, lo que, a su vez, dificulta esta prueba no destructiva.

Algunos de los obstáculos son:

El hecho de que la atenuación de las ondas ultrasónicas en concreto es alta, más alta que en la mayoría de sólidos, principalmente por la heterogeneidad del material. Los coeficientes de atenuación de  $-0,7 \text{ dB / mm}$  ( $-17,8 \text{ dB / in.}$ ) a  $200 \text{ kHz}$  y  $-2,7 \text{ dB / mm}$  ( $-68,6 \text{ dB / in.}$ ) a  $800 \text{ kHz}$  se han estimado en el concreto (Carleton y Muratore, 1986). Por lo tanto, es difícil, en muchos casos incluso imposibles, producir la penetración de la onda satisfactoriamente.

Los presentes métodos para prueba ultrasónica de concreto requiere el contacto directo entre la superficie de concreto y los transductores. Dado que el contacto no siempre es perfecto, el aire atrapado en el medio puede causar errores en las mediciones de variables.

Los problemas con las pruebas de concreto con ultrasonido son aún más graves cuando no hay acceso a los dos lados opuestos del concreto para la prueba.

## CAPÍTULO II. NORMATIVAS DEL MÉTODO

El método de la velocidad de pulsos ultrasónico ha sido utilizado con éxito para evaluar la calidad del hormigón por más de 60 años. Este método puede ser utilizado para la detección de agrietamiento, fisuras y otros defectos, cambios en el tiempo del hormigón así también del deterioro debido al ambiente químico agresivo, congelación y descongelación.

Al utilizar el método de la velocidad de pulso es posible estimar la fuerza de especímenes de prueba y por ende del elemento de concreto estructural de interés.

El método de la velocidad de pulso es un método verdaderamente no destructivo, ya que la técnica utiliza ondas mecánicas que no ocasionan ningún daño al elemento de hormigón. Un testigo o elemento de interés se puede ensayar una y otra vez, que es útil para el seguimiento y monitoreo del hormigón que puede estar sometido a cambios estructurales internos durante un largo período de tiempo.

Existen normativas internacionales referentes a la aplicación de este método, como ASTM C-597 "Método de prueba estándar para determinar la velocidad del pulso a través del concreto" y B.S. 1881: Parte 203, 1986.

### 2.1. NORMA ASTM C597 "MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DEL PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO"

Varios países han desarrollado procedimientos estandarizados para medir la velocidad del pulso. En los Estados Unidos, el Comité ASTM C09 inició el desarrollo de un estándar para la velocidad de los pulsos ultrasónicos a finales de 1960. Una norma provisional se emitió en 1968 y el método de prueba estándar se publicó en 1971 y hasta la fecha no hay cambios significativos en la norma desde entonces.

La norma ASTM C 597-02 ***Método de prueba estándar para determinar la velocidad del pulso a través del concreto***, indica lo siguiente:

La velocidad de pulso,  $V$ , de ondas de tensión longitudinal en una masa de hormigón está relacionada con sus propiedades elásticas y densidad de acuerdo con la siguiente relación:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

**$E$**  = dynamic modulus of elasticity

**$\mu$**  = dynamic Poisson's ratio

**$\rho$**  = density

Este método de ensayo cubre la aplicación de la velocidad de propagación de las ondas de impulsos de tensión longitudinal o compresionales a través del concreto. Este método no es aplicable a la propagación de otros tipos de ondas a través del concreto.

**ASTM C-597**, no aborda los problemas de seguridad y salud, si hubieran, es la responsabilidad del usuario de este método para establecer prácticas de seguridad y de salud apropiados y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentaria antes de su uso. Se recomienda utilizar la normativa nacional referente a Seguridad y Salud en el trabajo en los casos donde el peligro es inminente y utilizar los sistemas de protección adecuados.

**ASTM C-597**, hace referencia a otras normas de soporte, las mismas que deberán conocer quienes hagan uso del método con la finalidad de dotar al operador de los conocimientos mínimos para desarrollar este tipo de pruebas.

Estas Normas ASTM son:

- C125 Terminología relacionada al concreto y sus agregados.
- C215 Método de prueba para utilizar frecuencias de resonancia transversal, fundamental y longitudinal, en probetas de concreto.
- C823 Práctica para muestro y toma de muestras de concreto endurecido en las construcciones.
- E1316 Terminología para los ensayos no destructivos.

De acuerdo a la norma ASTM C-597 los pulsos de ondas de tensión longitudinales son generados por un transductor electro-acústico que se mantiene en contacto con una superficie del hormigón bajo prueba. Después de viajar a través del hormigón, los

pulsos se reciben y convierten en energía eléctrica por un segundo transductor situado a una distancia  $L$  de transductor transmisor. El tiempo de tránsito  $T$  se mide electrónicamente. La velocidad de pulso  $V$  se calcula dividiendo  $L$  por  $T$ .

### 2.1.1. Importancia y Uso

La norma menciona que método de Ultrasonido es aplicable para evaluar la uniformidad y la calidad relativa del concreto, para indicar la presencia de huecos y grietas, y para evaluar la efectividad de las reparaciones hechas a las grietas o fisuras. También es aplicable para indicar los cambios en las propiedades del hormigón, en la inspección de estructuras, para estimar la severidad del deterioro o grietas. También recomienda que cuando se utiliza para monitorear cambios en el estado a través del tiempo, los lugares de prueba deben ser marcados en la estructura para garantizar que las pruebas se repitan en las mismas posiciones.

### 2.1.2. Recomendaciones de ASTM C-597

El grado de saturación del hormigón afecta la velocidad, y este factor debe tenerse en cuenta cuando se vayan analizar estructuras en contacto con agua.

Es interesante revisar los resultados del Cuadro 1.4. donde se pueden ver los resultados obtenidos en dos (02) probetas ensayadas estando secas y húmedas (puestas en una poza de agua durante una hora). Se comprueba lo recomendado por esta norma, que la velocidad de la onda es sensible a la humedad del concreto.

Cuando se encuentra saturado de agua la velocidad de la onda aumentó, esto es porque los intersticios del cuerpo de concreto se llenan de agua, disminuyendo la cantidad de vacíos (las ondas por ser mecánicas no pueden viajar por el vacío) por lo que "mejora" las condiciones de la trayectoria de la onda.

La velocidad de pulso es independiente de las dimensiones del objeto de prueba, las ondas que se reflejan cerca de los límites complican la determinación de la hora de llegada del pulso transmitido.

La dimensión mínima del objeto de prueba deberá superar **la longitud de onda** de los pulsos ultrasónicos, la misma que se determina al dividir la Velocidad de la onda por la frecuencia de las vibraciones. Por ejemplo, para una frecuencia de 54kHz y una velocidad de pulso de 3500 m / s, la longitud de onda es  $3500/54000 = 0.065\text{m}$ . Por ello la longitud mínima de la muestra deberá ser mayor a 0.065m.

La exactitud de la medición depende de la habilidad del operador para determinar con precisión la distancia entre los transductores y de la selección de los equipos para medir con precisión el tiempo de tránsito del pulso. La intensidad de la señal recibida y el tiempo de tránsito medido se ven afectados por el acoplamiento entre los transductores a las superficies de hormigón. Se requiere para ello utilizar suficiente acoplante en los transductores, que deberá presionarse sobre la superficie del elemento a ensayar para garantizar tiempos de tránsito estables. La fuerza de la señal recibida también se ve afectada por la longitud de los viajes y por la presencia y el grado de agrietamiento o deterioro en el hormigón ensayado.

El uso de un adecuado acoplante puede ser verificado mediante la visualización de la forma y la magnitud de la onda recibida. La forma de onda deberá ser sinusoidal decadente. La forma puede ser vista por medio de un osciloscopio o pantalla digital, el equipo utilizado V-Meter MK IV, tiene incorporado una pantalla digital para estos fines.

Los resultados obtenidos por el uso de este método de ensayo no deberán ser considerados como un medio de medición de la fuerza ni como prueba para determinar el cumplimiento del módulo de elasticidad del concreto. El uso de la resonancia longitudinal del método de ensayo ASTM C215 "Método de prueba para utilizar frecuencias de resonancia transversal, fundamental y longitudinal, en probetas de concreto". Esta norma hace recomendaciones para la determinación del módulo dinámico de elasticidad de las muestras de concreto obtenidas de campo, con esto la razón de Poisson no tiene que ser conocido. El equipo V-Meter MK IV solo permite determinar los módulos de elasticidad y la relación de Young, en ambos casos del modo estático.

Cuando las condiciones lo permitan, se puede alcanzar una relación velocidad-resistencia del concreto, esta puede ser establecida por la determinación de la velocidad de pulso y resistencia a la compresión (o módulo de elasticidad) en un número de muestras de concreto. Esta relación puede servir como base para la estimación de la fuerza por otras pruebas de velocidad de pulso en el concreto. Para ello se puede consultar ACI 228.1R para obtener orientación sobre los procedimientos para el desarrollo y el uso de tal relación.

El procedimiento de ultrasonido es aplicable tanto en campo y laboratorio, teniendo en cuenta las condiciones de Seguridad y Salud, las dimensiones mínimas del elemento de concreto, la presencia de acero de refuerzo y el uso de acoplante.

Actualmente están disponible equipos de prueba (para determinar la uniformidad del concreto, detección de fisuras y/o cangrejas y para monitorear el comportamiento de la velocidad de la onda en las estructuras a lo largo del tiempo) para elementos de concreto con dimensiones que van desde aproximadamente 50 mm como mínimo a un máximo de 15m y, esto dependerá, en parte, de la frecuencia y la intensidad de la señal generada. La longitud de la trayectoria depende en parte de las condiciones de la superficie y en parte de las características del hormigón en investigación. Un preamplificador en el transductor de recepción puede ser utilizado para aumentar la longitud del camino máximo que puede ser muestreado. Para el camino con longitudes más cortas donde la pérdida de señal es el factor de gobierno, es recomendable que se utilice frecuencias de resonancia de 50 kHz o superior para obtener mediciones de tiempo de tránsito más preciso y, por tanto, una mayor sensibilidad al determinar la velocidad de los pulsos.

En vista que la velocidad del pulso en acero es hasta el doble que en el concreto, la velocidad de pulso medido en las cercanías del acero de refuerzo será mayor que en concreto simple de misma composición. Siempre que sea posible, evitar mediciones cerca de acero.

### 2.1.3. Aparato

La norma realiza una descripción con las características mínimas del equipo a utilizar en los ensayos con ultrasonido:

El aparato de prueba, que se muestra esquemáticamente en la

, constará de los siguientes componentes: un generador de los impulsos ultrasónicos, un par de transductores (transmisor y receptor), un amplificador, un circuito de medición de tiempo, una unidad de visualización de la hora, y cables de conexión.

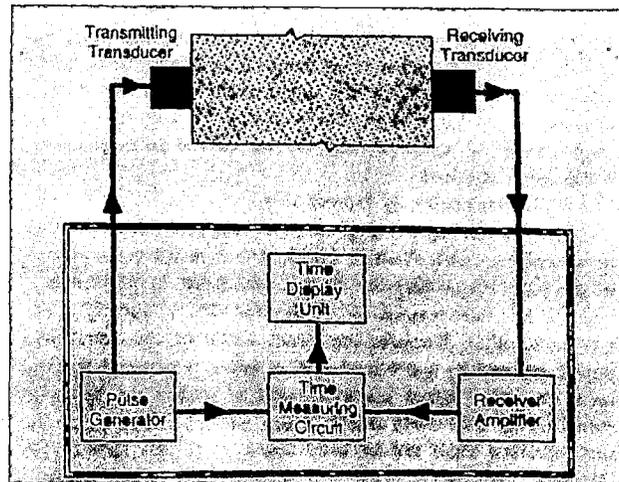


Figura 2.1 Esquema del aparato para ensayar con Pulso Ultrasónico.  
Fuente: ASTM C 597.

#### a. Transductor y generador de impulsos:

El generador de impulsos se compondrá de los circuitos para generar impulsos a una frecuencia ultrasónica. El transductor transformará estos impulsos electrónicos en ráfagas de onda de energía mecánica, trabajará a una frecuencia resonante en el rango de 20 a 100 kHz. El generador de impulsos deberá producir pulsos repetitivos a una tasa de al menos 3 pulsos por segundo. El intervalo de tiempo entre los pulsos excederá el tiempo de apertura del transductor transmisor. El transductor se construye de elementos piezoeléctricos, magnéticos, u otro material sensible al voltaje, y adecuados para la protección humana. Un pulso de ondas debe ser generado para iniciar el control del tiempo en los circuitos electrónicos del equipo.

El voltaje de los impulsos afecta la potencia de salida desde el transductor y la máxima penetración de las ondas de tensión longitudinales. Por esto se podría utilizar pulsos de voltaje de 500 a 1000 V han sido utilizados con éxito.

Transductores con frecuencias de resonancia más altos se han utilizado con éxito en relativamente pequeñas muestras de laboratorio.

#### b. Transductor receptor y amplificador:

El transductor receptor con similares características que el transductor transmisor: misma frecuencia. El voltaje generado por el receptor se amplifica lo necesario para producir pulsos para el circuito de medición del tiempo.

**c. Circuito para medir el tiempo:**

El circuito de medida del tiempo de los pulsos deberá ser capaz de proporcionar una resolución global de al menos  $1\mu\text{s}$ . La medición del tiempo deberá iniciar con los pulsos generados por el transductor emisor, el circuito para medir el tiempo deberá funcionar a la misma frecuencia del generador de impulsos. El circuito de medición de tiempo proporcionará como dato de salida el instante cuando se detecta el pulso recibido, esta salida se utiliza para determinar el tiempo de tránsito que se debe mostrar en la pantalla.

El circuito de medida del tiempo no deberá ser sensible a la temperatura en el rango de  $0$  a  $40^\circ\text{C}$  y los cambios de voltaje en la fuente de energía del 15%.

**d. Unidad de visualización:**

Una pantalla indicará el tiempo de tránsito del pulso con una aproximación de  $0,1\mu\text{s}$ .

**e. Barra de calibración:**

Para las unidades que se calibran a tiempo cero de modo manual, el equipo deberá proporcionar una barra de metal o de otro material resistente para que el tiempo de tránsito de las ondas longitudinales se calibre. El tiempo de tránsito deberá estar permanentemente marcado en la barra de referencia. La barra de calibración es opcional para las unidades que realizan el ajuste automático en tiempo cero. Para nuestro caso, del equipo V-meter MK iv, se calibra poniendo en contacto los dos (02) transductores.

**f. Conexión de los cables:**

Quando se realice la medición de impulsos de velocidad en grandes estructuras, con longitudes de la trayectoria de onda mayor a  $5\text{m}$ , se requiere el uso de cables adaptados para estos fines, con baja capacitancia, reforzados y del tipo coaxiales.

**g. Agente de Acoplamiento:**

Cualquier material viscoso (tales como aceite, vaselina, agua soluble, goma moldeable, o grasa) que se utilizará para asegurar la transferencia eficiente de la energía entre el hormigón y los transductores. La función del agente de acoplamiento es el de eliminar el aire entre las superficies de contacto. El agua es un agente de acoplamiento aceptable cuando está en la superficie, o para las pruebas bajo el agua.

#### 2.1.4. Procedimiento

La norma también hace recomendaciones sobre el procedimiento a seguir en el desarrollo de este método.

##### **Calibración y check del funcionamiento del equipo:**

Verifique que el equipo está funcionando correctamente y realizar la calibración y puesta a tiempo de los componentes del equipo.

##### a. Para unidades con ajuste automático de calibración:

Aplicar el agente de acoplamiento en las caras del transductor y presiónelos sobre la superficie del elemento a ensayar. El instrumento utilizará un micro-procesador para registrar el tiempo de viaje de la onda.

##### b. Para equipos con calibración manual:

Aplicar el agente de acoplamiento en los extremos de la barra de calibración y presione los transductores con firmeza contra los extremos de la barra donde se aplicó el acoplante, hasta que se visualice un tiempo de tránsito estable, en el caso del equipo V-Meter MK IV, indicará en la pantalla cuando haya finalizado la calibración.

El usuario del equipo, deberá comprobar la calibración a cero del equipo a cada hora, durante todo el tiempo de funcionamiento del instrumento, y cada vez que un transductor o cable de conexión se cambia. Si la calibración no se puede lograr, no utilice el instrumento hasta que haya sido reparado.

#### **Determinación del tiempo de tránsito**

1. Para el estudio de una construcción existente, seleccionar los lugares de ensayo de acuerdo con la **Norma C823** "Práctica para muestro y toma de muestras de concreto endurecido en las construcciones" o seguir los requisitos del solicitante de la prueba, lo que sea aplicable.

2. Para obtener buenos resultados, busque que los transductores estén directamente uno frente al otro. Debido a que el ancho del haz de los pulsos de vibración emitidas por los transductores es grande, sin embargo, también es permitido medir los tiempos de tránsito a través de esquinas de una estructura, pero con cierta pérdida de sensibilidad y precisión. Las mediciones a lo largo de la misma superficie no se utilizarán a menos que sólo exista una cara de la estructura accesible y que tales medidas son solamente indicativas de las capas superficiales, y las velocidades de pulso calculadas no estarán de acuerdo con los obtenidos por medio de la transmisión directa.

Una de las fuentes de incertidumbre en las pruebas de superficie o transmisión indirecta, es la longitud de las trayectorias reales de los pulsos. Por lo tanto, las lecturas individuales son de poco valor. Pruebas de superficie, sin embargo, se han utilizado para estimar la profundidad de una capa superficial de baja calidad al hacer múltiples mediciones de tiempo de tránsito con diferentes distancias entre los transductores. Con una gráfica del tiempo de viaje versus la distancia entre los transductor, puede ser posible estimar la profundidad del concreto de calidad inferior.

3. Aplicar el agente de acoplamiento apropiado (tal como aceite, vaselina, grasa, goma moldeable, u otros materiales viscosos) a la superficie de los transductores o la superficie de ensayo, o ambos. Presionar las caras de los transductores firmemente contra las superficies del concreto hasta que se visualice un tiempo de tránsito estable, y en ese momento medir el tiempo de tránsito. Determine la distancia en línea recta entre los centros de las caras del transductor.

La calidad del acoplante es crítico e importante para alcanzar la mayor exactitud y obtener provecho del método. Insuficiente acoplante resultará en medidas de tiempo inestables e inexactas, y reducirá considerablemente el alcance efectivo del instrumento. Mediciones repetidas se deben hacer en el mismo lugar para minimizar lecturas erróneas debido al mal acoplamiento entre transductores y superficies ensayadas del elemento estructural.

### 2.1.5. Cálculo

Calcular la velocidad del pulso de la siguiente manera:  $V = L / T$

Dónde:

V = velocidad del pulso, m / s

L = distancia entre centros de transductor, m

T = tiempo de tránsito, s

El equipo V-Meter MK IV, tiene un algoritmo que le permite calcular y registrar la velocidad de los pulsos ultrasónicos de acuerdo a la norma ASTM C-597.

### 2.1.6. Informe

La norma americana recomienda que al menos la siguiente información deberá reportarse:

- Ubicación de la prueba o la identificación de la muestra
- Ubicación de transductores.
- Distancia entre centros de las caras de los transductores, medido con una precisión de al menos 0,5% de la distancia.
- El tiempo de tránsito, medido con una resolución de al menos 0,1  $\mu$ s.
- La velocidad del pulso al 10 m / s más cercanos.

### 2.1.7. Precisión y Tendencia:

Pruebas con tres instrumentos y cinco operadores han indicado que para longitudes de trayecto de 0,3 a 6 m a través del hormigón, cualquier operador usando el mismo instrumento o un operador utilizando diferentes instrumentos logrará la repetitividad de los resultados de las pruebas dentro del 2%. Para longitudes largas, a través del hormigón, la atenuación de la señal disminuirá la repetitividad de la medición del tiempo de tránsito, pero el tiempo de tránsito más largo, producto de las condiciones dará lugar a un cálculo de la velocidad que tiene el mismo orden de precisión.

En el caso de las pruebas a través de hormigón agrietado o deteriorado, la variación de los resultados se incrementa sustancialmente. La atenuación se ve afectada por la naturaleza del deterioro y la frecuencia de resonancia de los transductores. Las diferencias entre los operadores o instrumentos pueden resultar en diferencias en los resultados de pruebas tan grandes como 20%. En tales casos, sin embargo, velocidades lo suficientemente bajo indicarán claramente la presencia de zonas dañadas en el hormigón ensayado.

### 2.1.8. Incertidumbre:

La norma americana menciona que el nivel de incertidumbre de este método de ensayo no ha sido determinado.

### 2.2. NORMAS NTP 339.237:2012

La NTP 339.237:2012 denominado "MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO".

Tal como lo indica la norma peruana en el acápite A.3, esta ***fue tomada en su totalidad de la norma ASTM C597.***

La norma ASTM C597, fue descrito en su totalidad en el acápite anterior, por ello continuaremos en el estudio de la norma BS EN 1250-4:2004.

### 2.3. BS EN 12504-4:2004

- **British Standard BS EN 12504-4 (2004).** Ensayos en concreto. Determinación del pulso ultrasónica.
- BS 1881, Parte 203, "***Recomendaciones para la medición de la velocidad de los impulsos ultrasónicos en concreto***", BSI (British Standards Institution), Londres, 1986.

Esta norma Europea brinda indicaciones a tener en cuenta para realizar el ensayo en concreto fresco y endurecido y sobre estructuras.

Al igual que la norma americana, solo se refiere a las ondas longitudinales o de compresión.

Brinda los alcances de los principales factores a tener en cuenta el momento de realizar la medición de la velocidad de las ondas ultrasónicas.

La técnica del ultrasonido de acuerdo a la norma británica podría aplicarse en el estudio de la uniformidad del concreto, presencia de fallas y fisuras, cambio de propiedades con el tiempo y la determinación dinámica de las propiedades físicas del material.

Siempre que se pueda la norma sugiere que podrían realizarse estudios en concreto reforzado y pretensado.

Esta norma al igual que la norma americana describe las características mínimas del equipo a utilizar para estos fines.

Plantea el uso de métodos de correlación para variables estudiadas, las mismas que serán comparadas con la velocidad de la onda.

Recomienda que las pruebas deberán realizarse en condiciones favorables, eliminando durante la realización de las pruebas toda fuente externa de distorsión de la onda y recomienda el uso de acoplante y de una barra de calibración para poner a cero los transductores.

Esta norma propone que la variación de la temperatura en el concreto en el rango de 5 y 30°C, no modifica los resultados aplicando el método de ultrasonido, sin embargo, para valores fuera de este rango, esta norma, propone los valores del Cuadro 1.3 Correcciones en la velocidad de onda, por efecto de temperaturas extremas en el concreto. Para corregir la velocidad de los pulsos ultrasónicos, que podrían estar distorsionados por efecto de la temperatura.

El cambio en la velocidad del impulso ultrasónico, debido a la presencia de barras de refuerzo en la dirección de propagación del pulso fue investigado por un gran número de investigadores. Si la posición de acero es conocido o puede ser localizado por un detector de acero, correcciones según lo dado por Chung o como se muestra en la BS 1881: Parte 203: 1986, se puede aplicar. Sin embargo, los patrones complicados de acero en la dirección del impulso ultrasónico deben ser evitados.

Un pulso de vibraciones longitudinales es producido por un transductor electroacústico, el que se mantiene en contacto con una superficie del hormigón bajo prueba. Después de atravesar una longitud, conocida, de recorrido en el concreto, el pulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo transductor y algunos circuitos de sincronización electrónicos deberán determinar el tiempo de tránsito del pulso a medir.

### **CAPÍTULO III. CARACTERIZACION DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO V-Meter Mark IV**

El equipo consta esencialmente de un generador de impulsos eléctricos, un par de transductores, un amplificador y un dispositivo electrónico para medir el intervalo de tiempo entre la generación del pulso en el transductor emisor y su llegada al transductor receptor.

El equipo tiene las siguientes características. Es capaz de medir el tiempo de tránsito con una precisión de  $\pm 1\%$ . Generalmente los transductores utilizados deben estar en el intervalo de 20 a 150 kHz aunque se podrían utilizar frecuencias tan bajas como 10 kHz que pueden ser aplicadas para longitudes largas y tan altas como 1 MHz para morteros y/o lechadas o para longitudes de trayecto corto, para el caso del equipo V-Meter MK IV, corresponden, transductores de 54kHz, esta frecuencia es la más recomendada en aplicaciones de concreto. Es posible adquirir transductores que operan a frecuencias mayores o menores.

Impulsos de alta frecuencia tienen un comienzo bien definido, pero, a medida que pasan a través del concreto, se atenuarán más rápidamente que los pulsos de baja frecuencia. Por tanto, es preferible utilizar transductores de alta frecuencia para longitudes de trayecto corto y transductores de baja frecuencia para largas longitudes de trayectoria. Transductores con una frecuencia de 50 kHz a 60 kHz son adecuadas para las aplicaciones más comunes.

#### **3.1 COMPONENTES Y ACCESORIOS**

Cada V-C-400 V-Meter Mark IV viene con los siguientes componentes y accesorios incluidos en el estuche, de acuerdo a la Figura 3.1.

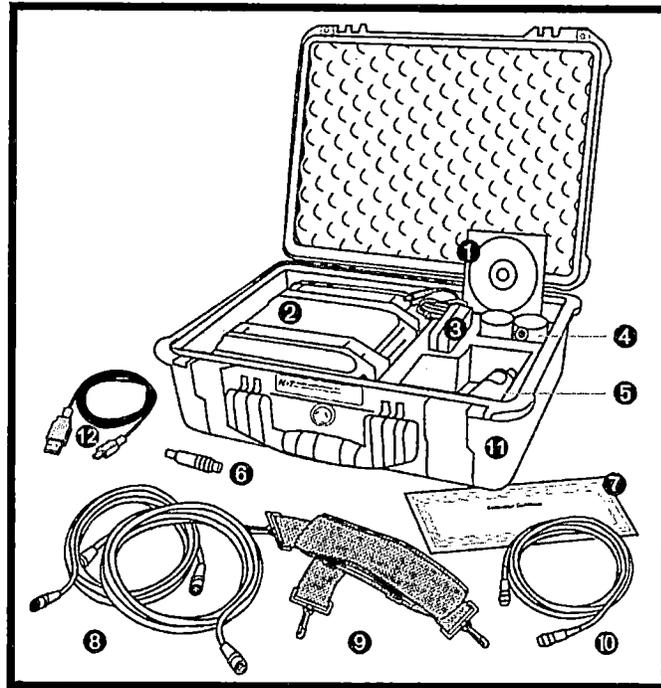


Figura 3.1 Equipo V- Meter MK IV y accesorios.  
Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

1. **CD – software:** CD que contiene el programa que permite subir la información a la PC.
2. **V-Meter:** Equipo probador de velocidad de pulso ultrasónico. Está dentro de una caja protectora duradera.
3. **AC / cable de Alimentación/Poder:** Es un cable eléctrico que sirve para conectar la V-Meter a la red de suministro eléctrico a través de un enchufe o conectándose a un alargador eléctrico. Se caracteriza porque forma una conexión temporal, fácil de desconectar y volver a reconectar en cualquier otro punto.
4. **Dos transductores (54kHz):** Elementos piezoeléctricos de cerámica robusta de plomo zirconato titanato montados en cajas de acero inoxidable diseñados para proporcionar una transmisión acústica altamente eficiente.
5. **Tubo de Gel Acoplante:** Se utiliza en materiales de concreto o de otro tipo que tengan superficies lisas, el uso de este gel pastoso permite asegurar el acoplamiento acústico adecuado. El equipo vino con dos tubos de gel, cuando se terminaron fueron sustituidos por pasta dental.
6. **Adaptador coaxial a cable adaptador:** este adaptador conecta al botón del receptor con el cable coaxial del transductor.

7. **Certificado de Calibración:** certificado que garantiza que el instrumento ha sido calibrado antes de salir de fábrica, el equipo ultrasónico deberá cumplir o exceder las especificaciones publicadas.
8. **Dos Cables Coaxiales de transductores:** Se utiliza para conectar los transductores estándar con la V-Meter.
9. **Correa de Soporte:** Se utiliza para fijar la V-Meter al operador durante la prueba. Es muy útil para el trabajo en altura.
10. **Cable Rec Connector:** Se utiliza para conectar el transductor con el botón interruptor a la V-Meter.
11. **Case:** Se utiliza para guardar a la V-Meter y accesorios. Permite transportar el equipo con mayor facilidad.
12. **Cable USB:** Se utiliza para conectar el V-Meter a una PC, previo a ello deberá instalarse el software incluido en el CD. Deberá tenerse mucho cuidado con la selección del Puerto COM, es importante que el número de Puerto COM que se elija coincida con el que se generó en el sistema operativo de la computadora al instalarse.

### 3.2 EQUIPO DE ENSAYO

El instrumento V-meter MK IV, consta de un medio de generación e introducción de los impulsos de onda dentro del hormigón (generador de impulsos y transmisor) y un medio de detección de la llegada del pulso (receptor) y un circuito para medir con precisión el tiempo que tarda el pulso de viajar a través del hormigón, desde que se envía hasta el instante en que es reconocido por el transductor receptor. El equipo también puede estar conectado a un osciloscopio, u otro dispositivo de visualización, para observar la naturaleza del impulso recibido.

Equipos de ensayo ultrasónicas portátiles están disponibles en todo el mundo. El equipo es portátil, fácil de operar, y puede incluir una batería recargable y la unidad de carga. Por lo general, los tiempos de frecuencia de hasta 6500  $\mu$ s se pueden medir con una resolución de 0.1 $\mu$ s. El instrumento viene con un conjunto de dos transductores, uno para transmitir y otro para recibir el impulso ultrasónico. Transductores con frecuencias de 25 a 100 kHz se utilizan usualmente para pruebas de concreto. Están disponibles los conjuntos de transductores con diferentes frecuencias de resonancia para aplicaciones especiales: transductores de alta frecuencia (por encima de 100 kHz) se utilizan para muestras de pequeño

tamaño, trayectoria relativamente corta, o concreto de alta resistencia, mientras que los transductores de baja frecuencia (por debajo de 25 kHz) se utilizan para los especímenes más grandes y longitudes de trayectoria relativamente más largas, o de hormigón con agregados de mayor tamaño. Estos transductores generan principalmente las ondas de compresión a una frecuencia, predominante con la mayor parte de la energía de onda dirigida a lo largo del eje normal a la cara del transductor.

### 3.3 TRANSDUCTORES

Dispositivo que convierte los estímulos mecánicos en producción eléctrica, la denominación ha sido ampliado a todas las formas de estímulos como el calor, radiación, sonido, vibración, presión, aceleración, etc. y que puede producir una señal de salida diferente al eléctrico como neumático o hidráulico. Muchos dispositivos de medición y detección, como el fonógrafo, termopares, micrófonos y altavoces, puede definirse como transductores.

Los transductores del equipo V-Meter Mark iv son elementos piezoeléctricos de cerámica revestidos con zirconato de titanio montados en cajas de acero inoxidable diseñados para proporcionar una transmisión acústica altamente eficiente. El V-Meter MK - iv dispone de 2 transductores (uno emisor y otro receptor) los mismos que operan a una frecuencia de 54kHz, según especificaciones, sin embargo tal como se menciona líneas arriba existen transductores que operan a otras frecuencias de acuerdo a la necesidad de evaluador y/o operador y de las características del material en mención.

La estructura del transductor es lo suficientemente robusto para soportar condiciones bastante duras, como puede verse en un entorno industrial.

La excitación a un alto voltaje del generador del pulso provoca que el transductor oscile mecánicamente en su propia frecuencia natural. Esta frecuencia varía según el tamaño y la rigidez del transductor. Los diferentes tamaños de los elementos piezoeléctricos y combinaciones de ellos permiten distintas frecuencias de los pulsos a obtenerse.

Cada transductor está equipado con un cable conector independiente, el equipo viene de fábrica con un cable de 5m de longitud, sin embargo, pueden adquirir al fabricante cables de diferentes longitudes. Cables más largos pueden utilizarse cuando exista restricción de acceso a las áreas de prueba o ensayo. Estos cables

más largos pueden reducir el tamaño de la señal de recepción y el pulso transmitido, sin embargo, éstos suelen ser de suficiente magnitud para la prueba; incluso cuando los cables son de hasta 20 metros se han utilizado con éxito con el preamplificador.

### 3.3.1 Clasificación de los transductores

El usuario debe ser consciente que la inapropiada selección del transductor para una aplicación puede conducir a resultados erróneos. Si un transductor de bajas frecuencias (24 kHz por ejemplo) se utiliza cuando el agregado del concreto es un fino, el equipo V-Meter podría afirmar equivocadamente que no hay problemas con el elemento ensayado. Del mismo modo, si un transductor de frecuencia alta (150 o 500kHz) se utiliza cuando el agregado es demasiado grande, el V-Meter puede afirmar que hay problemas en el elemento encontrado cuando puede que no exista.

A continuación se muestra una lista de los tipos de transductores existentes:

#### 1. Por la Frecuencia

- 24 kHz:

Utilizado para concreto con agregados grandes. Alcance de hasta 4.8 metros, no es necesario el preamplificador.

- 54kHz:

Transductores más utilizados. Se utiliza para los agregados de diámetro de ½ pulgadas. El rango es de hasta 4.8 metros sin preamplificador. Con preamplificador se alcanza mayores distancias.

El equipo V- Meter MK IV, viene con 2 transductores de 54 kHz.

- 150 kHz:

Se utiliza para agregados del tamaño de la arena (mortero). El rango es de hasta 1 pie y sin pre-amplificador.

- 500Khz:

Se utiliza en materiales con pequeños partículas (por ejemplo: cerámica y vidrio). Alcance de hasta 1 pie sin preamplificador.

## 2. Por la función

- Emisor

El transductor emisor, se encarga de generar la onda a través del efecto piezo-eléctrico. Es necesario determinar la frecuencia de operación de todo el equipo a fin de tener la misma en todos los componentes.

- Receptor

Este transductor se encarga de reconocer el momento cuando llega la onda ultrasónica y de transmitir esta información a los circuitos electrónicos para el posterior cómputo del tiempo de viaje. Además permite conocer la cantidad y niveles de energía con los que llegan los impulsos generados.

## 3. Para aplicaciones especiales

- Transductor para Ondas S de cizalla:

Se utiliza para el diagnóstico de condiciones homogéneas de una superficie. El espacio entre los transductores deberá ser mínimo de 1 pie cuando se dispongan frente a frente. Preamplificador no es necesario.

- Transductor Exponencial:

Se utiliza para el análisis de muestras con superficies no planas a ambos lados. El rango es de 1 pie con preamplificador.

- Transductor para trabajos bajo el agua:

Se utiliza para elementos de concreto con agregados del tamaño de una pelota de softbol y que se encuentren sumergidas bajo el agua. El rango es de 4.8m sin preamplificador.

### 3.3.2 Posición de los transductores

Es posible, realizar mediciones de la velocidad de la onda mediante la colocación de los dos transductores, en las siguientes posiciones:

- Transductores en lados opuestos (transmisión directa)
- Transductores en lados adyacentes (transmisión semi-directa)
- Transductores en el mismo lado (transmisión indirecta o de superficie)

En la

se muestra la posición de los transductores cuando se realizan las pruebas de ultrasonido.

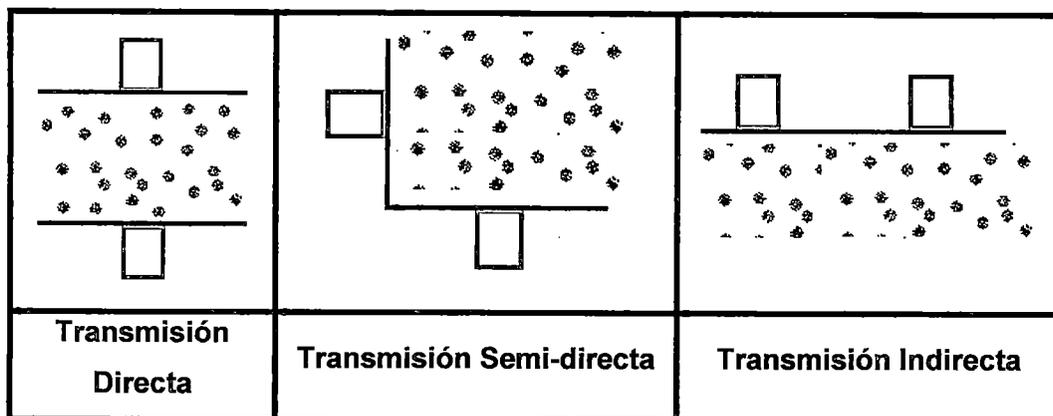


Figura 3.2 Posición de los Transductores: directa, semi directa e indirecta.  
 Fuente: *Elaboración Propia.*

- Transmisión directa

Donde sea posible la disposición de transmisión directa debe ser usada ya que la transferencia de energía entre los transductores es máxima y con lo cual la exactitud para determinar la velocidad de la onda se registrará principalmente por la exactitud de la medición de la longitud camino (distancia entre las dos caras). El gel de acoplamiento utilizado debe untarse lo más homogéneo posible para evitar efectos finales resultantes de las diferentes velocidades entre acoplante y concreto.

- Transmisión semi-directa

La disposición de transmisión semi-directa tiene una sensibilidad intermedia entre las de los otros dos disposiciones y, aunque puede haber alguna reducción en la precisión de la medición de la longitud del camino, en general se encontró que es suficiente tomar la distancia medida de centro a centro de las caras de los transductores.

- Transmisión indirecta

La transmisión indirecta, se debe usar sólo cuando una cara del concreto es accesible, cuando se va a determinar la profundidad de una grieta superficial o cuando la calidad de la superficie de concreto relativa a la calidad total es de interés.

Es el menos sensible de los arreglos y, para una longitud de camino dado, produce en el transductor de recepción una señal que tiene una amplitud de sólo alrededor del 2% al 3% de la producida por transmisión directa. Además, esta disposición

proporciona las velocidades de pulso que suelen estar influidas por el concreto superficial. Esta región es a menudo de composición diferente a la del concreto dentro del cuerpo de una unidad y los resultados de la prueba pueden ser no representativos.

La velocidad indirecta es invariablemente menor que la velocidad directa sobre el mismo elemento de concreto. Esta diferencia puede variar de 5% a 20%, dependiendo en gran medida de la calidad del concreto bajo prueba. Cuando sea posible las mediciones en ambas posiciones deben hacerse para determinar esta diferencia.

### 3.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL V-METER MARK IV V-C-400

- Peso del Instrumento: 6lbs. (2.75kg).
- Dimensiones: 4.5" x 8.5" x 10.5" (114.3mm x 223.5mm x 267mm).
- Rango de medición del Tiempo de Transito: desde 0.1  $\mu$ s (micro segundos) hasta 6553.5  $\mu$ s. Medir 0.1  $\mu$ s es posible ya que el equipo cuenta con un oscilador de cristal de 10 MHz.
- Rango de frecuencias de 24 to 500kHz: La frecuencia a la que operarán los transductores será elegido de acuerdo a las características de la prueba a realizar.
- Sensibilidad del receptor: 250 micros voltios, entre 30 kHz y 100 kHz.
- Precisión:  $\pm$  0,1 micro segundos.
- Sensibilidad de emisor: 250 micros voltios entre 36 kHz y 500 kHz.
- Impedancia: 2MOHMS.
- Bateria interna de Litio recargable, con capacidad para trabajo continuo de 4 a 10 horas.
- Resolución de la pantalla: 320 x 240 pixeles.
- Temperatura de trabajo: de 0°C a 50°C.

#### 3.4.1 Uso de acoplante

Para asegurar que los impulsos ultrasónicos generados en el transductor transmisor llega pasar a través del concreto para ser detectado por el transductor receptor, es esencial que exista un acoplamiento acústico adecuado entre el concreto y la cara de cada transductor.

En muchas superficies de concreto, el acabado es suficientemente liso que aseguran un contacto acústico bueno con el uso de un medio de acoplamiento y presionando el transductor contra la superficie del concreto.

Acoplantes típicos son: vaselina, grasa, jabón suave y caolín / pasta de glicerol. Es importante que sólo una capa muy fina de medio de acoplamiento separe la superficie del concreto con la cara en contacto del transductor. Por esta razón, se deben realizar lecturas repetidas del tiempo de tránsito hasta obtener un valor mínimo que ocurrirá cuando la capa del medio de acoplamiento sea finamente extendido.

Donde sea posible, los transductores deben estar en contacto con las superficies de concreto, que han sido encofrados.

Cuando la superficie de concreto es muy áspera y desigual, el área de la superficie donde el transductor se va a aplicar debe ser alisado y nivelado. Alternativamente, un medio de alisado, tal como resina epoxi rápida de ajuste o de yeso se pueden utilizar, pero una buena adhesión entre la superficie del concreto y el medio de suavizado se debe garantizar de modo que el pulso se propague correctamente en el concreto bajo prueba. Es importante asegurarse de que la capa del medio de suavizado será tan delgada como sea posible. Si es necesario hacer una capa significativamente gruesa, la velocidad de la onda del medio de alisado tiene que ser tomado en cuenta.

### 3.5 RANGO DE APLICACIÓN DEL EQUIPO

#### 3.5.1 Niveles de precisión

Puede afirmarse que existe una opinión consensuada, respecto a que el nivel de precisión que proporciona el método en los ultrasonidos para estimar la resistencia a compresión del hormigón, se sitúa entre el  $\pm 15\%$  al  $\pm 25\%$ , siendo el valor medio de este intervalo,  $\pm 20\%$ , el nivel que con mayor profusión se atribuye al método. Sin embargo, la gran mayoría de los autores destacan la diferencia que existe entre que los ajustes resistencia-velocidad se establezcan en condiciones de laboratorio, o en base a ensayos realizados sobre el hormigón in situ.

Del primer caso, se obtendrán niveles de precisión superiores, del orden de  $\pm 10\%$  al  $\pm 15\%$ , pero numerosos autores llaman la atención sobre la escasa fiabilidad

que se obtiene en la aplicación de estas correlaciones cuando se pretende estimar in situ la resistencia del hormigón.

La norma británica BS 6089, señala que la precisión de los valores estimados para la resistencia del hormigón, depende primordialmente de la validez del ajuste establecido entre  $f_c$  y  $V$ , más que del número de ensayos realizados. Confiere una precisión al método de  $\pm 20\%$ , cuando el hormigón procede de una localización determinada y la correlación entre resistencia y velocidad se ha obtenido para un concreto específico. Advierte que las correlaciones basadas en el ensayo de probetas testigo extraídas de la estructura, suelen estar basadas en un número de resultados muy limitado, obteniéndose intervalos de validez ajustados que redundarán en una disminución de la precisión en la estimación de resistencia, si se obtienen los valores estimados fuera del campo de validez.

### 3.6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Debemos tener en cuenta que la relación entre la velocidad de pulsación y el módulo de elasticidad dinámico de un medio elástico no es lineal, sino cuadrática, y es así mismo cuadrática la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión del hormigón.

No podremos, pues, admitir una relación lineal entre resistencias a compresión y velocidades de pulsación ni siquiera con intervalos reducidos de variación de la resistencia. Por ello, deberemos utilizar otro tipo de regresión, por ejemplo la regresión potencial.

El problema radica en que el concreto no constituye un medio homogéneo, y además su módulo de elasticidad dinámico y su módulo de deformación estático no están relacionados por una función de validez universal. Por otra parte, los instrumentos de medida no determinan directamente la velocidad de pulsación, sino el tiempo de paso entre el emisor y el receptor, y la distancia entre ambos, en línea recta, puede no coincidir con la trayectoria real de la onda, especialmente si esta se ve obligada a contornear micro fisuras, poros o cangrejeras en su recorrido.

## CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ULTRASONIDO

Este método de prueba fue desarrollado para su uso en el concreto y las investigaciones publicadas de su aplicación tienen que ver principalmente con este material.

Un volumen considerable de la literatura que se ha publicado durante los últimos 60 años que describen los resultados de la investigación sobre el uso de pruebas de ultrasonido en el concreto.

El método fue desarrollado por primera vez en Canadá por Leslie y Cheesman entre 1945 y 1949, y también de forma independiente en Gran Bretaña casi al mismo tiempo por Jones y Gatfield. El aparato desarrollado en ese momento utilizaba un osciloscopio de rayos catódicos para la medición del tiempo de tránsito. Formas modificadas de este equipo han sido ampliamente utilizadas en muchos países. El equipo era particularmente útil en laboratorio, pero era complicado utilizar en condiciones de campo.

El aparato utilizado en esta tesis ha sido diseñado especialmente para las pruebas de campo, siendo ligero, portátil y fácil de usar. Se puede operar independientemente de la fuente de alimentación, cuando se utiliza en el campo y directamente de la alimentación de Corriente Alterna para uso en laboratorio.

En el ámbito normativo existen la especificación ASTM C-597 "**Método de prueba estándar para determinar la velocidad del pulso a través del concreto**" desde 1967 y el British Standards Institution ha emitido las "Recomendaciones para la medición de la velocidad de los impulsos ultrasónicos en concreto" B.S. 1881: Parte 203 - 1986.

Las pruebas con ultrasonido, han sido utilizadas ampliamente en todo el mundo y está claro las ventajas de este método, frente a los métodos tradicionales de pruebas ya sean destructivas o no destructivos. Es probable que en nuestro país aumente aún más su aplicación. En particular, su aptitud para examinar el estado del concreto en profundidad es inigualable.

### **Aplicación de las Pruebas de velocidad de pulso**

El método de la velocidad del pulso ultrasónico se ha demostrado que proporcionan un medio confiable para la estimación de la fuerza de resistencia y se ha utilizado para probar varios tipos de productos de madera y concreto. Está en uso para la detección de la pudrición en postes de madera para electricidad y proporciona un método muy económico para la inspección de estos postes, mientras están en servicio.

El mismo equipo puede ser utilizado para probar los estratos de roca y para proporcionar datos útiles para el trabajo geológico de reconocimiento. El método también se ha utilizado para las pruebas de grafito, cerámica y materiales con granos de cuarzo y es probable que sea de utilidad para probar otros materiales no metálicos. Sin embargo, en adelante nos centraremos al concreto.

#### **4.1 HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO**

El método utilizando ultrasonido es adecuado para el estudio de la homogeneidad del concreto, y, por lo tanto, para la evaluación relativa de la calidad del concreto. La heterogeneidad podría manifestarse con agrietamiento interior, deterioro, fisuración, y las variaciones en las proporciones de mezcla. Heterogeneidades en un miembro de concreto causarían variaciones en la velocidad del pulso. Por ejemplo, la difracción de un pulso de onda alrededor de un vacío de aire interno causará un aumento en el tiempo de propagación. Así, la velocidad aparente disminuirá.

El concreto, por naturaleza, es un material **heterogéneo**, en el que, dependiendo de la naturaleza de sus componentes y pequeñas variaciones en la dosificación de los mismos pueden acarrear cambios sustanciales en el valor de su resistencia a compresión.

Este efecto de la variabilidad se materializa incluso antes de colocar el hormigón en la estructura, ya que por ejemplo, en la toma de las muestras de este material (procedente de un mixer), de una u otra porción de la descarga, conduce, a que, si el concreto transportado no está suficientemente homogeneizado, la muestra tomada tenga una relación agua/cemento ( $a/c$ ) y dosificación de los materiales que no sean representativos del conjunto.

Si a esto añadimos los efectos de las diferencias de colocación, compactación y curado del hormigón en la estructura, se entiende fácilmente el por qué son de esperar las variaciones de resistencia en y entre elementos estructurales diferentes. Por ello mismo, es importante poder considerar como afectan esas variaciones de resistencia a determinados tipos de pieza de la estructura en cuestión.

Abordaremos los factores que afectan a la resistencia a compresión en muros de concreto endurecido, que dependen más directamente de la calidad de la estructura interna del hormigón que se investiga, del tipo de pieza y la posición del testigo en la misma pueden considerarse ciertamente relevantes.

La norma BS 6089(6) *Guía de evaluación de la resistencia del hormigón en estructuras existentes (BSI 1981)* y el informe de The Concrete Society (37), al referirse a las inherentes variaciones de la resistencia del concreto en la estructura, comentan lo siguiente:

- La resistencia del concreto in situ puede variar dentro de un mismo elemento estructural de dos formas, ocasional y siguiendo unas pautas determinadas (variación sistemática)
- La magnitud de las variaciones de la resistencia a compresión del concreto in situ, entre elementos estructurales de un mismo tipo, varía de un elemento a otro de forma ocasional.
- En el perfil vertical, de un elemento estructural determinado, la resistencia in situ del concreto desciende en las partes altas de las piezas, incluso en losas, y puede llegar a ser un 25% inferior en las zonas superiores de las piezas. El hormigón de menor resistencia a compresión está situado a menudo en los 300mm superiores o 20% de la altura, según cuál de estas dos magnitudes sea menor.

El incremento de resistencia para zonas medias e inferiores, con respecto a las zonas superiores, es similar para diferentes tipos de piezas. Ha de observarse que el descenso del valor de la resistencia se posiciona en las zonas altas de las piezas, mientras que la resistencia, en esas zonas, es relativamente constante u homogénea.

Además, un proceso de curado inadecuado puede incrementar esas diferencias, siendo mayores a medida que el nivel de resistencia del concreto es superior.

En resumen, los datos disponibles de las investigaciones experimentales realizadas por diversos autores indican que, efectivamente, existe una reducción de la resistencia a compresión del hormigón en las partes más altas de los elementos estructurales que estaría cuantificada entre 0 y 30%, aunque no existe un consenso general respecto a los factores que gobiernan la magnitud de ese descenso de las resistencias.

En ese sentido, el concreto no representativo del conjunto de la pieza puede estar situado en los 300mm superiores (más arriba) de las piezas si su altura es superior a 1.50m (para el caso de muros).

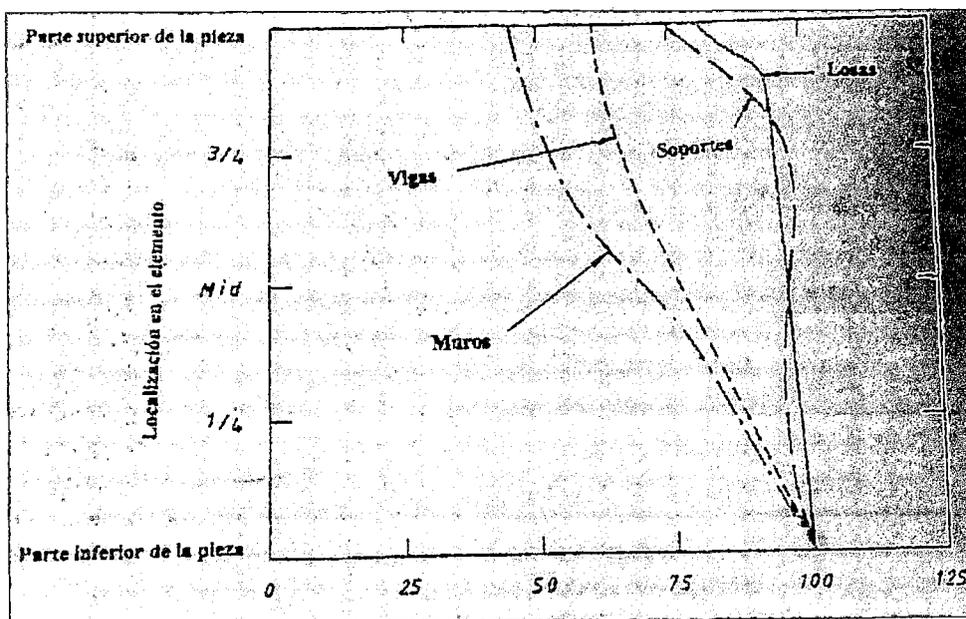


Figura 4.1 Variación de la Resistencia a compresión en varios tipos de pieza.  
 Fuente: (Jonh Henry Bungey).

La Figura 4.1 tomada de John Henry Bungey, muestra las variaciones típicas de resistencia a compresión del hormigón en elementos estructurales tipo columna (soportes), muro, viga y losa.

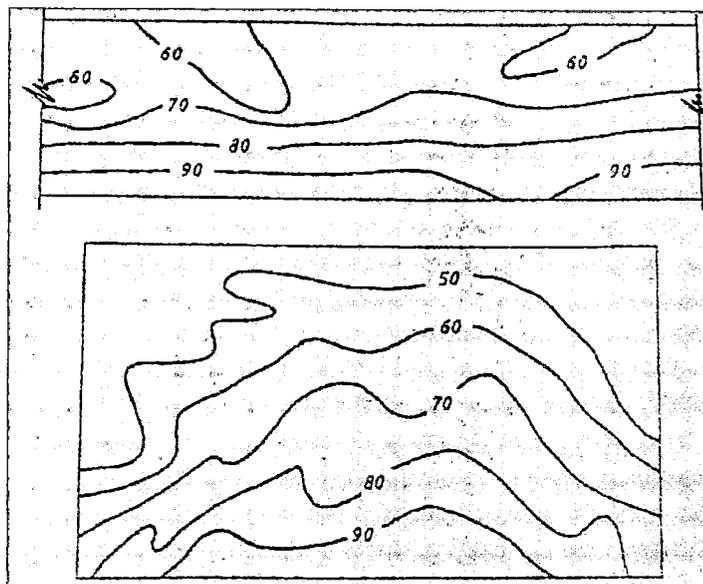


Figura 4.2. Contorneos típicos de resistencia a compresión del concreto para una viga y un muro.  
Fuente: (Jonh Henry Bungey).

Para vigas y muros, el gradiente de resistencias es razonablemente uniforme, aunque variaciones en la compactación o en el suministro, pueden causar el tipo de variaciones indicadas en la Figura 4.2 a modo de curvas de nivel de zonas de resistencias similares.

Para elementos tipo losa, la reducción esperada de resistencia del 25% puede estar concentrada en los 50mm superiores.

#### 4.1.1 Trabajo de Campo para determinación de la Homogeneidad

Para utilizar el equipo V-meter en la determinación de la homogeneidad del concreto, se realizará investigaciones en dos (02) muros estructurales de concreto armado, del Proyecto de Mejoramiento de la Infraestructura del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la FIC – UNI, ver Figura 4.3. Se realizaron pruebas con el equipo de ultrasonido V- Meter MK IV, a lo largo y ancho de ejes horizontales y verticales, esta información permitirá realizar el desarrollo de curvas de iso-velocidades en toda el área del muro analizado, siguiendo el criterio topográfico de curvas de nivel.

Materiales y equipos utilizados para conocer la homogeneidad de un elemento de concreto, se utilizó:

V-Meter MK IV

Equipo Detector de acero

2 escaleras de 3m

Lijas

Lápiz o tiza, wincha, escuadra y nivel.

Cuadernillo de apuntes

Personal necesario

2 operarios

1 operador del equipo detector de acero

1 operador del equipo V-meter MK IV

#### 4.1.2 Procedimiento

1. Utilizando el equipo detector de Acero se ubican ejes (horizontales y verticales) donde **no exista** presencia de acero de refuerzo.
2. Con mucho cuidado y utilizando un nivel, se marcan y posicionan los ejes en ambos caras de los muros de concreto reforzado.
3. Se marcan círculos de 2" con centro en las intersecciones de los ejes, para controlar y tener fijado la posición de los transductores.
4. Se mide el espesor del muro que es la distancia que recorrerá la onda, dato que será ingresado al V-meter MK.
5. Utilizando el equipo V-meter se realiza el ensayo, el output será la velocidad de la onda alcanzada en cada punto de muestreo, esta información será aproximada al múltiplo de 100 más cercano, por ejemplo: si velocidad de onda 3436m/s, se registra 3400m/s.



Figura 4.3 Muros Tipo C-1, del proyecto de Ampliación y Mejoramiento del LEM.  
Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2 DETECCIÓN DE CANGREJERAS E IMPERFECCIONES

Cuando un impulso ultrasónico, que viaja a través del concreto encuentra una interfaz de aire o vacío, hay una transmisión insignificante de energía (a través de esta interfaz), de modo que, cualquier grieta llena de aire o de vacío que se extiende directamente entre los transductores, obstruirá a los pulsos ultrasónicos, cuando el vacío o cangrejera ocupa una área proyectado mayor que el área de las caras de los transductores. El primer pulso para llegar al transductor receptor habrá sido difractada, alrededor de la periferia del defecto y el tiempo de tránsito será más largo que en el concreto similar con ningún defecto.

A veces es posible hacer uso de este efecto para la localización de defectos, cavidades, etc., pero debe apreciarse que los defectos pequeños a menudo tienen poco o ningún efecto sobre los tiempos de transmisión de las ondas ultrasónicas.

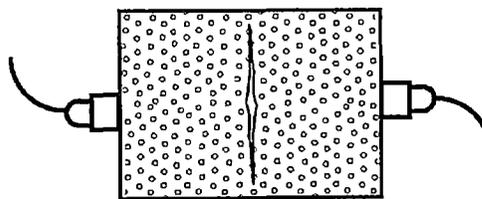
Cuando un pulso de onda se propaga en un medio que tiene propiedades de materiales distintas, una parte de la energía de la onda se dispersa fuera de la ruta original. Por ejemplo: huecos, grietas y partículas del agregado dispersan parte de la energía inicial del pulso de onda de compresión de la ruta original de transmisión. La magnitud de la dispersión es especialmente intensa si la longitud de onda de los pulsos que se propagan es del mismo tamaño o más pequeño que el tamaño del medio distorsionador, lo que resulta en la rápida atenuación de la onda.

Para concreto, el límite superior de frecuencia útil es de aproximadamente 500 kHz con una longitud de onda asociada de aproximadamente 10 mm, que está en el rango de tamaño de las partículas de agregado grueso.

#### **La detección de huecos o cavidades grandes**

Una gran cavidad puede ser detectada mediante la medición de los tiempos de tránsito de impulsos que pasan entre los transductores cuando se colocan en posiciones adecuadas de manera que la cavidad se encuentra en la trayectoria directa entre ellos, tal como se puede ver en la Figura 4.4. El tamaño y la posición de dichas cavidades pueden ser estimadas asumiendo que los pulsos pasan a lo largo del camino más corto entre los transductores y alrededor de la cavidad. Estas estimaciones son más fiables si la cavidad tiene un límite bien definido rodeado de hormigón uniformemente denso.

Si el área proyectada de la cavidad es menor que el diámetro de los transductores, la cavidad no puede ser detectado solo por medición del tiempo de tránsito.



*Figura 4.4. Esquema para detección de cavidades y cangrejeras.  
Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.*

#### 4.2.1 Trabajo de Campo para detección de Cangrejas

Se diseñaron dos cubos de concreto de 0.5m de lado, 1) los que fueron analizados con Ultrasonido en su estado inicial y posteriormente los perforamos, 2) para crear el efecto de una grieta o cavidad interior, con diámetros de broca de taladro de 5/8", 3/4" y con 3) extractor de diamantinas de 3".

Materiales y equipos utilizados para determinar la presencia de cavidades se utilizó:

- V-meter MK IV
- Lijas
- Lápiz o tiza, wincha, escuadra y nivel.
- Cuadernillo de apuntes
- Cubos de concreto de L=50cm

Personal necesario

1 operador del equipo V-meter MK IV

#### 4.2.2 Procedimiento

1. Lijar y alisar las caras donde se colocaron los transductores.
2. Medir la longitud entre las caras del cubo donde se colocaron los transductores
3. Medir la velocidad alcanzada por la onda en el cubo.
4. Perforar con brocas de 5/8", 3/4" y 3" a la mitad de camino entre los transductores.
5. Medir las velocidades correspondientes para las 3 dimensiones de huecos (que representan cangrejas o grietas)

#### 4.3 VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

Los cambios que ocurren en la estructura de hormigón con el tiempo, ya sea causada por la hidratación (que aumenta la resistencia) o por un entorno agresivo, como heladas, o sulfatos, se pueden detectar por mediciones repetidas de la velocidad de pulso en momentos diferentes y en las mismas posiciones. Los cambios en la velocidad del pulso son indicativos de cambios

en la fuerza y su medición se puede hacer durante períodos prolongados de tiempo y sobre la misma pieza de prueba de la estructura que se requiere monitorear.

Esta aplicación es útil para realizar el seguimiento al endurecimiento del concreto durante los dos primeros días después de vaciado y a veces es posible tomar medidas sobre el encofrado antes de que se decida desencofrar en edades tempranas. Esto tiene una aplicación muy interesante porque permite decidir el momento adecuado para el desencofrado y del pretensado, cualquiera sea el caso.

De la Figura 4.5 se muestra las curvas de comportamiento de la velocidad del pulso ultrasónico del elemento de concreto ensayado a temperaturas de 5°C, 18 °C y 30°C a medida que va endureciendo al pasar el tiempo.

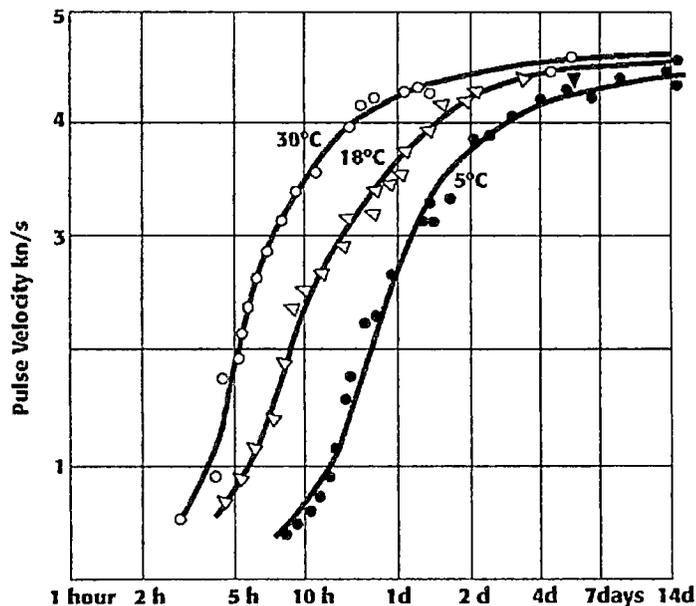


Figura 4.5. Curvas del comportamiento de la Velocidad de la Onda en el tiempo.

Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

#### 4.3.1 Trabajo de Campo

Se realizaron probetas de concreto armado, las cuales fueron monitoreados en estado humedecido en los primero 7, 14 y 28 días, en diferentes momentos.

Materiales y equipos utilizados para monitorear el concreto en los primeros 28 días:

V-Meter MK IV

Lijas

Dos probetas de concreto

Lápiz o tiza, wincha, escuadra y nivel.

Cuadernillo de apuntes

Personal necesario

1 operador del equipo V-meter MK IV

#### 4.3.2 Procedimiento

Lijar y alisar las caras donde se colocaron los transductores.

Medir la longitud entre las caras de la viga donde se colocaron los transductores

Medir la velocidad alcanzada por la onda en la viga en los primeros 28 días.

#### 4.4 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS GRIETAS

La estimación de la profundidad de una grieta visible en la superficie puede obtenerse mediante la medición de los tiempos de tránsito a través de la grieta en dos disposiciones diferentes de los transductores colocados en la superficie.

La disposición para realizar la medición de la profundidad de las grietas se muestra en la Figura 4.6, donde los transductores (emisor y receptor) están colocados en lados opuestos de la grieta y equidistantes de la misma. Los valores de  $x$  son elegidos tantas veces como sea necesario. Se realizará la medición del tiempo de viaje en estas dos posiciones. En la segunda medición la distancia entre transductores será el doble de la primera, y se miden los tiempos de tránsito correspondientes a estos.

Existe dos formas de estimar la profundidad de la grieta, para este trabajo se abordará el primer caso.

A continuación explicaremos los dos (02) casos.

##### a. Primer Caso

La siguiente ecuación, propuesta en el manual de usuario del equipo y en la norma **BSI 1881, Parte 2003 Recomendaciones para la medición de la Velocidad del pulso ultrasónico en estructuras de concreto** se obtiene suponiendo que el plano de la grieta es perpendicular a la superficie del concreto y que en las proximidades de la grieta la calidad del concreto es razonablemente uniforme.

$$C = X_1 \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$$

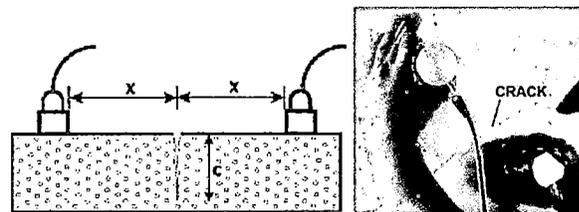


Figura 4.6 Esquema para calcular la profundidad de grietas.  
 Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

Asuma el primer valor de  $x$  igual a  $X_1$ , entonces el segundo valor será  $2 \cdot X_1$  y los tiempos de tránsito correspondientes a éstos sean  $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente.

Para conocer la inclinación de la grieta tal como lo muestra la Figura 4.7 mueva uno de ellos fuera de la grieta. Si el tiempo de tránsito disminuye esto indica que la grieta se inclina hacia la dirección en que se mueve el transductor.

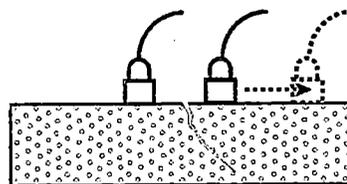


Figura 4.7. Esquema para conocer la orientación de la grieta  
 Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

#### b. Segundo Caso

Un control podrá efectuarse para evaluar si la grieta se ha quedado en un plano perpendicular a la superficie mediante la colocación de ambos transductores cerca de la grieta y gradualmente se va alejando uno de ellos, se va midiendo el desplazamiento juntamente con el tiempo de transito de la onda en cada posición, la Figura 4.8 muestra el procedimiento a seguir para determinar la profundidad de la grieta. En la Figura 4.8 se muestra la forma de graficar los resultados obtenidos, esto

permite la evaluación y detección del lugar donde se ubica la grieta a partir de un punto fijo.

$$h = \frac{L}{2} \left( \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

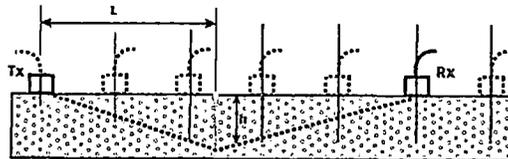


Figura 4.8 Esquema para determinación de la profundidad de grietas (Segundo Caso)  
Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

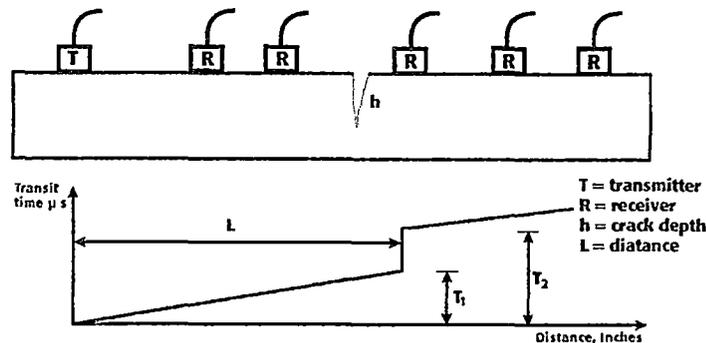


Figura 4.9 Gráfico de los resultados para determinar la profundidad de Grieta.  
Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

En ambos casos es importante que la distancia X y L se puedan medir con precisión y que exista buen acoplamiento entre los transductores y la superficie de concreto del elemento ensayado. El método es válido siempre que la grieta no esté llena de agua. Con la finalidad de enriquecer este trabajo de investigación se realizó el ensayo sobre grietas verticales e inclinadas (las más comunes en campo).

#### 4.4.1 Trabajo de Laboratorio

Se requiere comparar los resultados de medir la profundidad de una grieta con Vernier y aplicando la metodología utilizando ultrasonido de acuerdo a **BSI 1881, Parte 2003 Recomendaciones para la medición de la Velocidad del pulso ultrasónico en estructuras de concreto.**

Materiales y equipos utilizados para monitorear el concreto en los primeros 28 días:

V-meter MK IV

Vernier

Lijas

Cuatro vigas estándar de concreto

Lápiz o tiza, wincha, escuadra y nivel.

Cuadernillo de apuntes

Personal necesario

1 operador de la cizalla

1 operador del equipo V-meter MK IV

#### 4.4.2 Procedimiento

1. Se realizaron cuatro (04) vigas estándar de concreto, las mismas que se utilizan para ensayar a flexión.
2. Se realizaron cortes verticales e inclinados utilizando cizalla, las profundidades de cortes fueron controladas.
3. Se midió la profundidad (en el eje vertical) de las grietas utilizando Vernier.
4. Se midió dos ubicaciones equidistantes, una el doble de la otra, a una distancia **X** para ubicar los transductores.
5. Se utilizó el equipo V-Meter MK IV para medir los tiempos T1 y T2 de tránsito de la onda en las dos posiciones equidistantes desde la grieta.
6. Se calculó la profundidad de la grieta aplicando la fórmula propuesta por el fabricante y por **BSI 1881, Parte 2003 Recomendaciones para la medición de la Velocidad del pulso ultrasónico en estructuras de concreto.**

#### 4.5 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

La calidad del concreto se evalúa generalmente mediante la medición de la resistencia de un cilindro (o cubo) a la compresión. Investigadores han encontrado que no existe ninguna correlación simple entre la fuerza del cilindro y la velocidad de pulso de ondas ultrasónicas, principalmente porque la correlación se ve afectado por:

- Tipo de agregado
- Relación Agua/cemento

- Edad de concreto
- Tamaño y gradación del agregado
- Condiciones de curado

Estos factores son determinantes a la hora de realizar una correlación entre la velocidad de la onda y la resistencia de los elementos de concreto ensayados.

El rango de resistencias puede obtenerse, (i) bien mediante la variación de la edad del concreto en prueba o (ii) mediante la introducción de una gama de relaciones agua-cemento. La curva que relaciona la resistencia del concreto del cilindro con la velocidad de pulso es probable que no sea el mismo para estos dos métodos explicados, pero el método elegido debe ser adecuado a la finalidad de ensayo.

La Figura 4.9 de correlación, propuesto por el manual de usuario del fabricante, realizado mediante la medición de la velocidad del pulso y la resistencia en cubos de concreto.

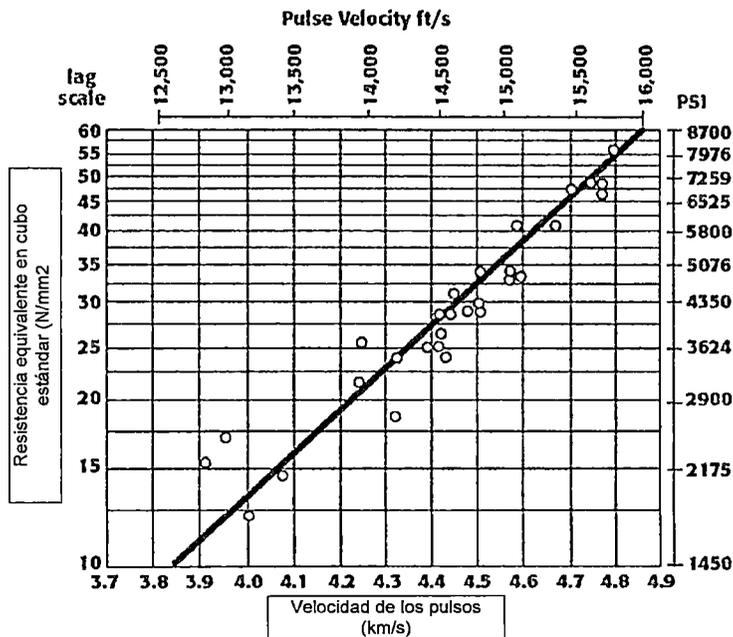


Figura 4.9 Correlación típica entre velocidad de los pulsos ultrasónicos y resistencia del concreto.  
Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

La figura anterior muestra una curva típica obtenida para concretos hechos con agregado gravoso de río.

#### 4.5.1 Trabajo de laboratorio

Materiales y equipos utilizados para estimar la resistencia del concreto:

V-Meter MK IV

Lijas

Probetas cilíndricas estándar

Vernier o wincha

Cuadernillo de apuntes

Personal necesario

1 operador del equipo V-meter MK IV

#### 4.5.2 Procedimiento

Se determinó la longitud entre las dos caras planas de las probetas cilíndricas.

Se indicó la longitud anteriormente medido en el equipo V-Meter MK IV

Se determina y anota en el cuadernillo de apuntes la velocidad de los pulsos ultrasónicos de cada la ensayada

Se realiza este procedimiento para todas las probetas.

#### 4.6 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG/ POISSON

La relación entre las constantes elásticas y la velocidad de un pulso de onda de compresión ultrasónica en un medio elástico isótropo de dimensión infinita está dada por:

$$E_d = \rho * V^2 * \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

$E_d$ : Modulo de elasticidad dinámico

$V$ : Velocidad de la Onda (m/s)

$\mu$ : Relación de Poisson Dinámico.

$\rho$ : Densidad del concreto ( $kg/m^3$ )

La Figura 4.11 muestra las curvas que pueden ser utilizados para determinar el módulo de elasticidad estático y dinámico a partir de mediciones de velocidad de pulso.

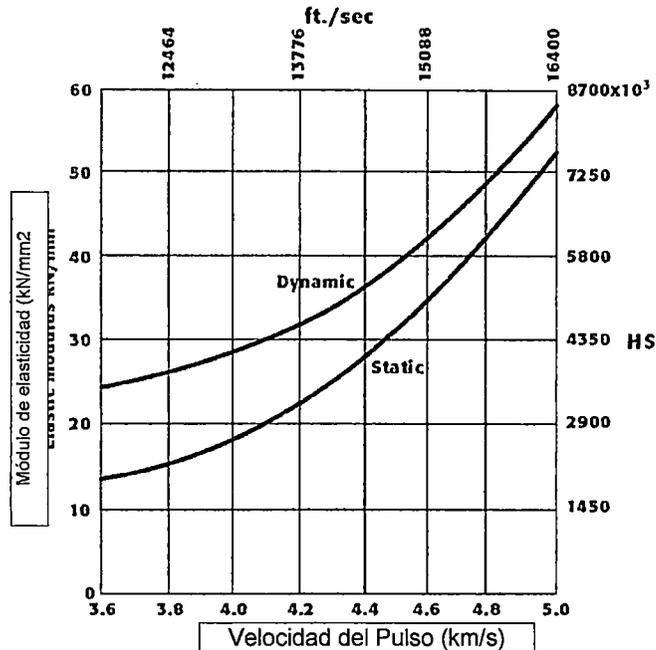


Figura 4.11 Curvas de correlación entre la velocidad de onda y los módulos de elasticidad estático y dinámico. Fuente: Manual de Usuario del Fabricante.

Para determinar el módulo de elasticidad, se deberá conocer la velocidad de la onda.

#### 4.6.1 Trabajo de laboratorio

La finalidad de esta aplicación es comparar los módulos de Young/Poisson estáticos aplicando el método de ultrasonido y utilizando el método destructivo de acuerdo a la norma ASTM C-469.

Materiales y equipos utilizados para determinar el módulo de Young/Poisson:

V-meter MK IV

Lijas

Probetas cilíndricas estándar

Vernier o wincha

Deformímetros longitudinales y rotacionales

Cuadernillo de apuntes

Balanza

Personal necesario

### 1 operador del equipo V-meter MK IV

#### 4.6.2 Procedimiento

1. Determinación de la densidad de las probetas:

Se mide la longitud y diámetro del cilindro para determinar el volumen

Se pesa y se calcula la densidad de la probeta

2. Determinación de los módulos de Young/Poisson con Ultrasonido

Se configura el equipo de ultrasonido y se introduce la longitud y densidad de la probeta

Se realiza el ensayo y se determina el módulo de Young y la velocidad de la onda.

3. Determinación del módulo de Young aplicando la Norma ASTM C-469

Las mismas probetas ensayadas con ultrasonido son ensayados aplicando el método ASTM C-469.

Realizar el mismo procedimiento para todas las probetas.

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

### 5.1 HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO

Se determinó la velocidad de los pulsos de onda ultrasónica en nueve (09) puntos sobre tres (03) ejes horizontales y tres (03) ejes verticales.

La ubicación relativa y la velocidad en cada punto de los Elementos Monitoreados 1 y 2 se encuentran en el Cuadro 5.1 y Cuadro 5.2 respectivamente. En cada elemento monitoreado se realizaron mediciones en las intersecciones de tres ejes horizontales y verticales.

*Cuadro 5.1 Resumen de la información recopilada en el Elemento Monitoreado 1.*

ID	X (m)	Z (m)	Velocidad (m/s)
1	0.15	0.55	3600
2	0.60	0.55	3500
3	1.13	0.55	3500
4	0.15	1.25	3800
5	0.60	1.25	3700
6	1.13	1.25	3800
7	0.15	2.15	3800
8	0.60	2.15	3500
9	1.13	2.15	3600

*Fuente: Elaboración Propia.*

Cuadro 5.2 Resumen de la información recopilada en el Elemento Monitoreado 2

ID	X (m)	Z (m)	Velocidad (m/s)
1	0.15	0.55	3900
2	0.6	0.55	3700
3	1.13	0.55	3800
4	0.15	1.25	3600
5	0.6	1.25	3500
6	1.13	1.25	3600
7	0.15	2.15	3600
8	0.6	2.15	3700
9	1.13	2.15	3600

Fuente: Elaboración Propia.

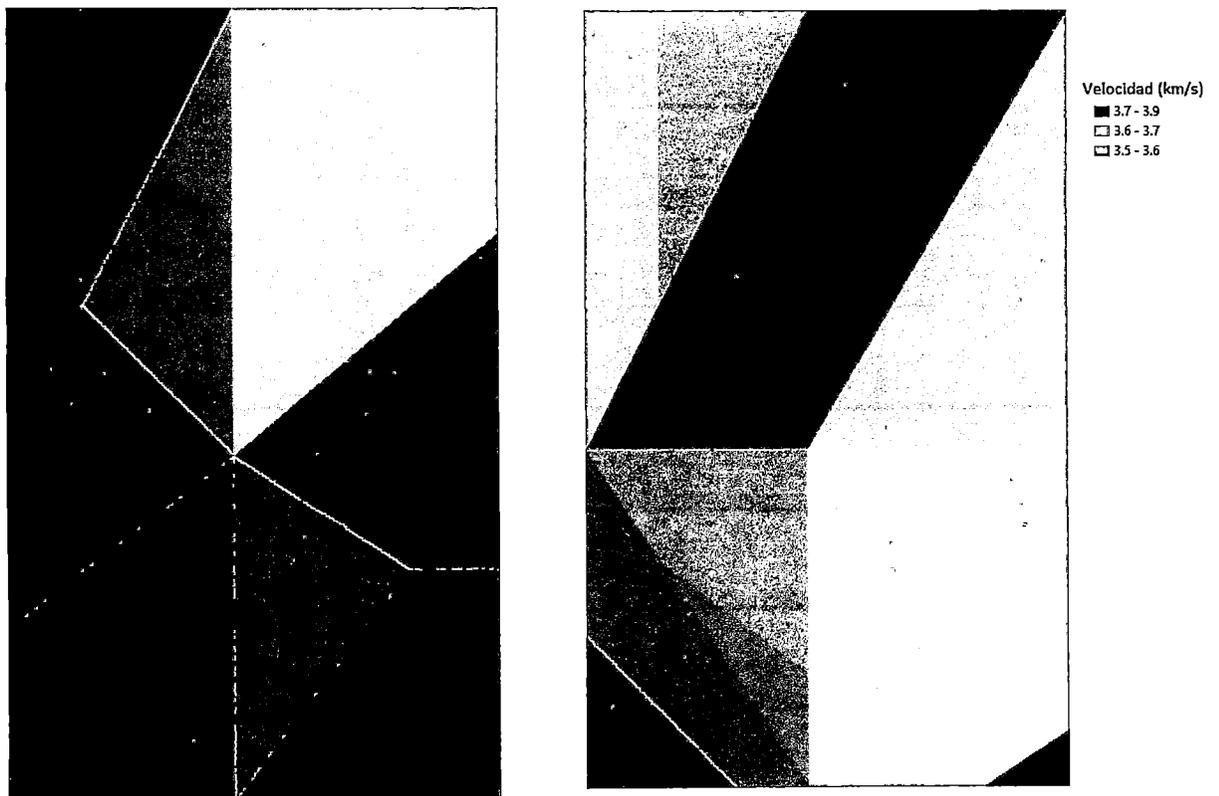


Figura 5.1 Mapa de iso-velocidades del Muro 1 (izquierda) y Muro 2 (derecha) analizado.

Fuente: Elaboración Propia, utilizando el software Arc Gis v10.1

Utilizando el software Arc Gis v10.1, se graficó la información y se determinaron las curvas de "iso-velocidades". Con fines didácticos se presenta en la Figura 5.1 el mapa de "iso-velocidades", en ella se muestra que el color verde representa la velocidad del concreto entre 3.5 y 3.6 km/s y de forma análoga para los colores cian (3.6 – 3.7km/s) y azul (3.7 – 3.9km/s)

También se realizó la evaluación de dos columnas de 4m de altura. En estos elementos la metodología consistió en determinar la velocidad de la onda en las vecindades de la parte baja, media y alta.

Los puntos evaluados están en un eje vertical a 26 cm de la cara interior de la columna. En el Cuadro 5.13 se encuentran los valores promedios de la velocidad de la onda evaluados a diferentes alturas en el eje vertical de las Columnas 1 y 2.

La Figura 5.2 representa la nube de puntos de velocidades de onda versus la altura (lugar donde se realizó la medición de velocidad de onda) para las dos columnas evaluadas.

Cuadro 5.3 Ubicación y velocidades en el eje Vertical a 26cm de la cara interior de las Columnas 1 y 2.

ZONA	ALTURA (cm)	VELOCIDAD DE ONDA (m/s)	
		COLUMNA 1	COLUMNA 2
ALTA	403.8	3730	3610.0
	394.5	3795	3920.0
	386.0	3755	3410.0
	373.0	3715	3850.0
	353.5	3575	3885.0
MEDIA	247.5	3790	3735.0
	233.5	3860	3650.0
	221.0	3850	3860.0
	207.2	3905	3800.0
	196.6	3760	4065.0
BAJA	62.0	3440	3515.0
	51.5	3290	3430.0
	41.0	3330	3420.0
	31.6	3080	3505.0
	23.8	3085	3595.0

Fuente: Elaboración propia.

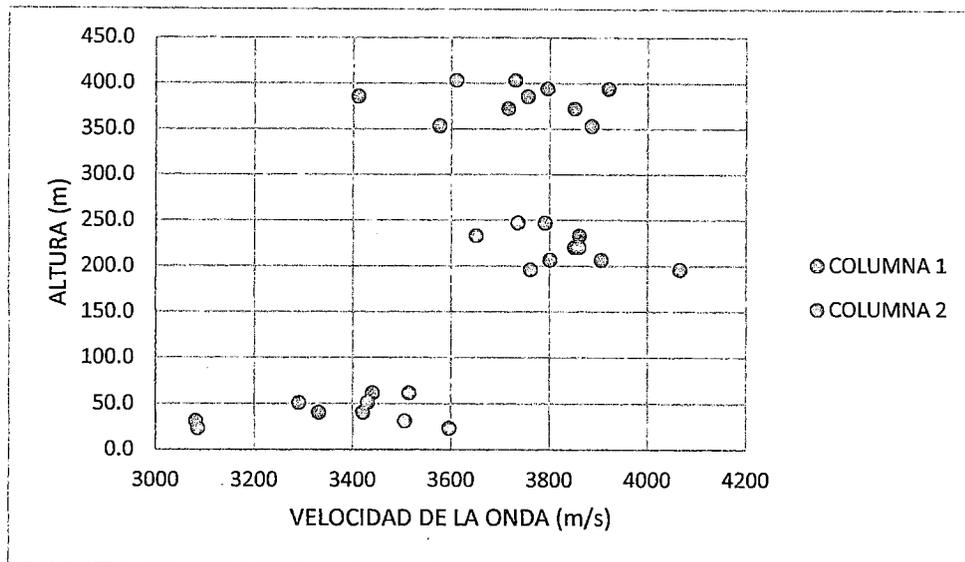


Figura 5.2 Nube de puntos correspondientes a la velocidad de onda en las Columnas 1 y 2.  
Fuente: Elaboración Propia

## 5.2 DETECCIÓN DE CANGREJERAS E IMPERFECCIONES

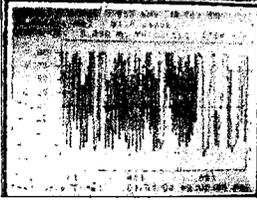
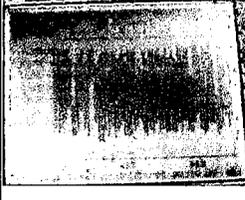
Se determinó las velocidades de la onda en los cubos sin perforaciones y con perforación de 5/8", 3/4" y 3", obteniendo los resultados del Cuadro 5.4, Cuadro 5.5 y Cuadro 5.6. En estos cuadros también pueden visualizar el comportamiento de la onda al transitar a través de cada uno de los cubos.

Cuadro 5.4 Velocidad de la Onda en el CUBO 1 de Concreto sin hueco, perforación de 5/8", 3/4" y 3".

CUBO 1 (LONGITUD=0.308m)			
SIN HUECO	HUECO DE 5/8	HUECO DE 3/4	HUECO DE 3"
VELOCIDAD de ONDA: 3883 m/s	VELOCIDAD de ONDA: 3844 m/s	VELOCIDAD de ONDA: 3913m/s	VELOCIDAD de ONDA: 3541 m/s

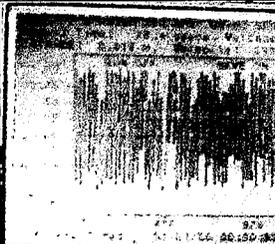
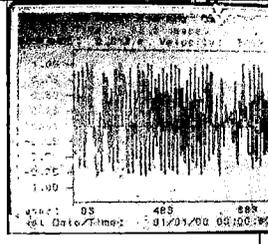
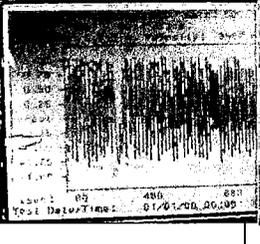
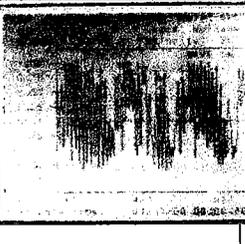
Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 5.5 Velocidad de la Onda en el CUBO 2 de Concreto sin hueco, perforación de 5/8", 3/4" y 3".

<b>CUBO 2 (LONGITUD=0.310m)</b>			
			
<b>SIN HUECO</b>	<b>HUECO DE 5/8</b>	<b>HUECO DE 3/4</b>	<b>HUECO DE 3"</b>
<b>VELOCIDAD de ONDA: 3784 m/s</b>	<b>VELOCIDAD de ONDA: 3716 m/s</b>	<b>VELOCIDAD de ONDA: 3718 m/s</b>	<b>VELOCIDAD de ONDA: 3523 m/s</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 5.6 Velocidad de la Onda en el CUBO 3 de Concreto sin hueco, perforación de 5/8", 3/4" y 3".

<b>CUBO 3 (LONGITUD=0.313m)</b>			
			
<b>SIN HUECO</b>	<b>HUECO DE 5/8</b>	<b>HUECO DE 3/4</b>	<b>HUECO DE 3"</b>
<b>VELOCIDAD de ONDA: 3986m/s</b>	<b>VELOCIDAD de ONDA: 3752m/s</b>	<b>VELOCIDAD de ONDA: 3887 m/s</b>	<b>VELOCIDAD de ONDA: 3594 m/s</b>

Fuente: Elaboración Propia.

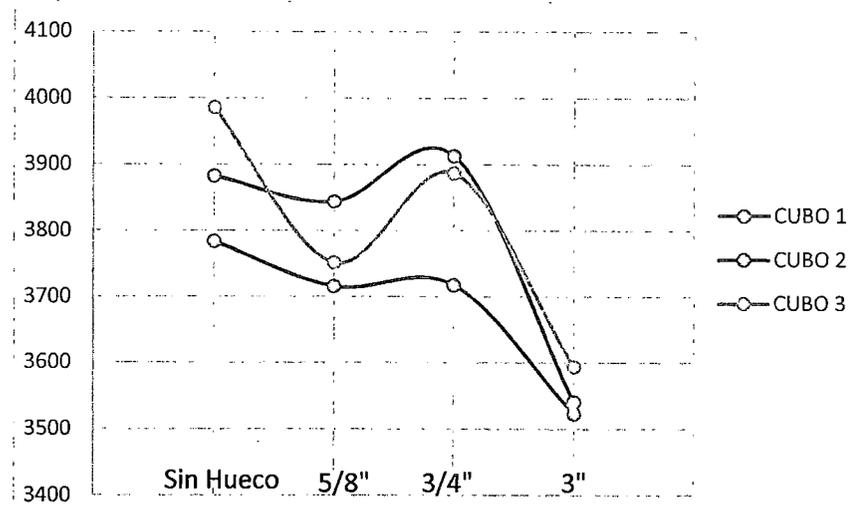


Figura 5.3 Variación de la Velocidad de la onda por efecto de Perforaciones.  
Fuente: Elaboración Propia.

El Figura 5.3, resume el comportamiento de la onda en diferentes condiciones sobre los Cubos 1, 2 y 3 de acuerdo a la información presentada en los Cuadro 5.7, Cuadro 5.8 y Cuadro 5.9; habiendo una notable variación en el comportamiento de la onda cuando la perforación supera 3".

Cuadro 5.7 Longitud de onda y comparación con diámetro de interferencia en el CUBO 1.

Parámetro	SIN				Unidades
	HUECO	5/8"	3/4"	3"	
Velocidad de Onda: V=	3883.0	3844.0	3913.0	3641.0	m/s
Variación de la Velocidad=		-1.00	+0.77	-6.23	(%)
frecuencia de Onda: f=	54.0	54.0	54.0	54.0	kHz
Long de Onda: y=	71.9	71.2	72.5	67.4	mm
<b>COMPARACION:</b>	mayor	mayor	mayor	menor	
Dimensión de la Perforación	0	15.9	19.1	76.2	mm

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede deducir esta disminución de la velocidad debido a que la longitud de la onda (67.4mm) es menor al diámetro de la perforación de 3" (76.2mm), para el caso del CUBO 1, provocando que la onda de menor buscará otro camino "más largo" y por ende mayor tiempo y menor velocidad.

Para el caso de los CUBOS 2 y 3, se hizo de la misma forma que el CUBO 1.

Cuadro 5.8 Longitud de onda y comparación con diámetro de interferencia en el CUBO 2.

Parámetro	SIN				Unidades
	HUECO	5/8"	3/4"	3"	
Velocidad de Onda: V=	3784.0	3716.0	3718.0	3523.0	m/s
Variación de la Velocidad=		-1.80	-1.74	-6.90	(%)
frecuencia de Onda: f=	54.0	54.0	54.0	54.0	kHz
Long de Onda: y=	70.1	68.8	68.9	65.2	mm
<b>COMPARACION</b>	mayor	mayor	mayor	menor	
Dimensión de la Perforación	0	15.9	19.1	76.2	mm

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 5.9 Longitud de onda y comparación con diámetro de interferencia en el CUBO 3.

Parámetro	SIN				Unidades
	HUECO	5/8"	3/4"	3"	
Velocidad de Onda: V=	3986.0	3752.0	3887.0	3594.0	m/s
Variación de la Velocidad=		-5.87	-2.48	-9.83	(%)
frecuencia de Onda: f=	54.0	54.0	54.0	54.0	kHz
Long de Onda: y=	73.8	69.5	72.0	66.6	mm
<b>COMPARACION:</b>	mayor	mayor	mayor	menor	
Dimensión de la Perforación	0	15.9	19.1	76.2	mm

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.3 VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

Se monitorearon 3 tandas de probetas. Estas, fueron ensayadas a los 7, 14 y 28 días con ultrasonido y compresión. Se obtuvieron los resultados de la Cuadro 5.10 donde se indica el día de muestreo y los resultados de velocidad de onda (m/s) y resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>) para cada una de las tandas de concreto identificados como A, B y C.

Cuadro 5.10 Resultados de la evaluación de la resistencia y velocidad de la onda con la edad del concreto.

DIA DE MUESTREO	TANDA	VELOCIDAD (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	Variación Porcentual (%) de la Velocidad
7	A	4606	279.6	
	B	4311	242.3	
	C	4405	234.8	
14	A	4619	317.0	+0.28
	B	4522	264.3	+4.89
	C	4563	265.2	+3.59
21	A	4699	323.4	+2.02
	B	4632	263.8	+7.45
	C	4691	298.6	+6.49

Fuente: Elaboración Propia

Entre los 7 y 14 días existió una variación promedio de la velocidad de la onda (m/s) en las 3 tandas de +2.92% y entre los 7 y 21 días fue de +5.32%. La velocidad la onda ultrasónica incrementa a medida que va pasando el tiempo desde el vaciado del concreto.

Se graficó el comportamiento de la onda ultrasónica a los 7, 14 y 21 días, tal como se puede apreciar en la Figura 5.4 se tiene un comportamiento creciente en la velocidad de la onda ultrasónica y de igual forma la resistencia. Ver Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7.

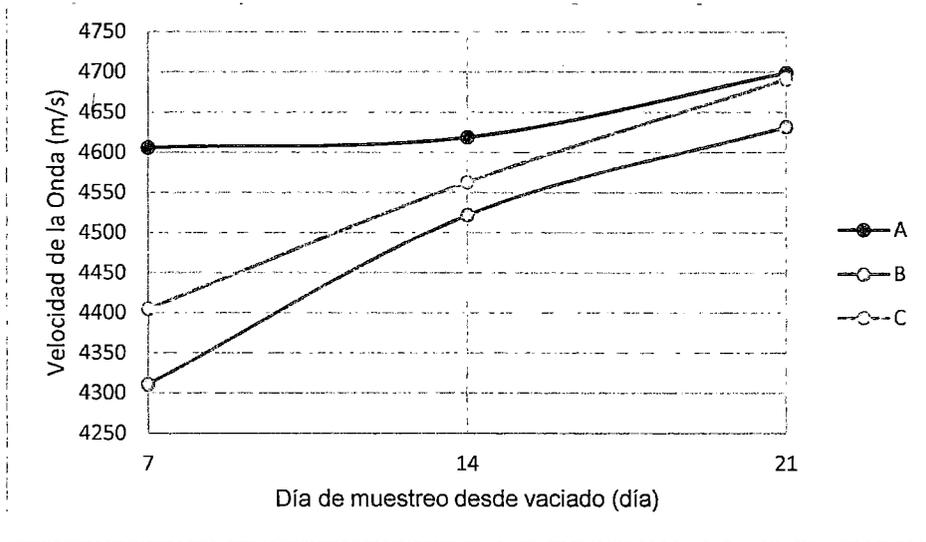


Figura 5.4 Comportamiento de la Velocidad de la onda en 7, 14 y 21 días.  
Fuente: Elaboración Propia.

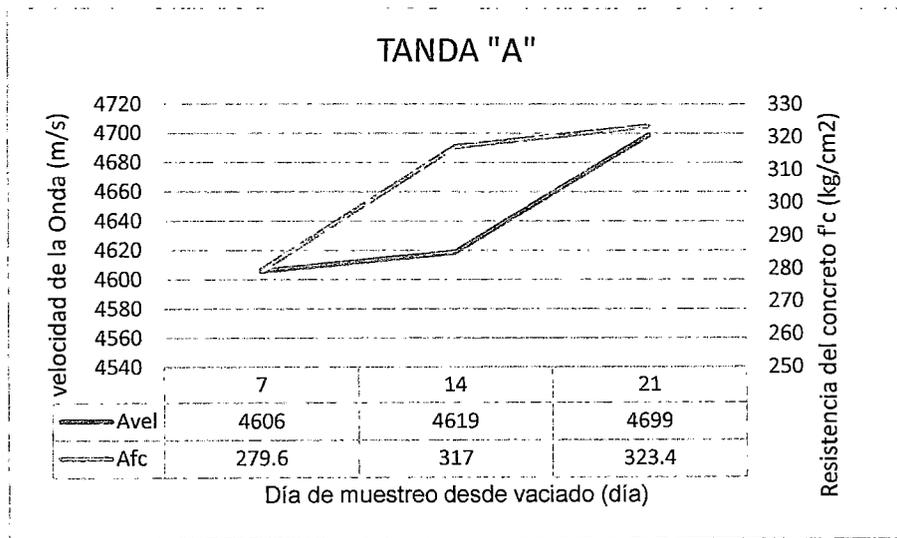


Figura 5.5 Evolución de la Velocidad de la Onda y la Resistencia del Concreto en la Tanda "A".  
Fuente: Elaboración Propia.

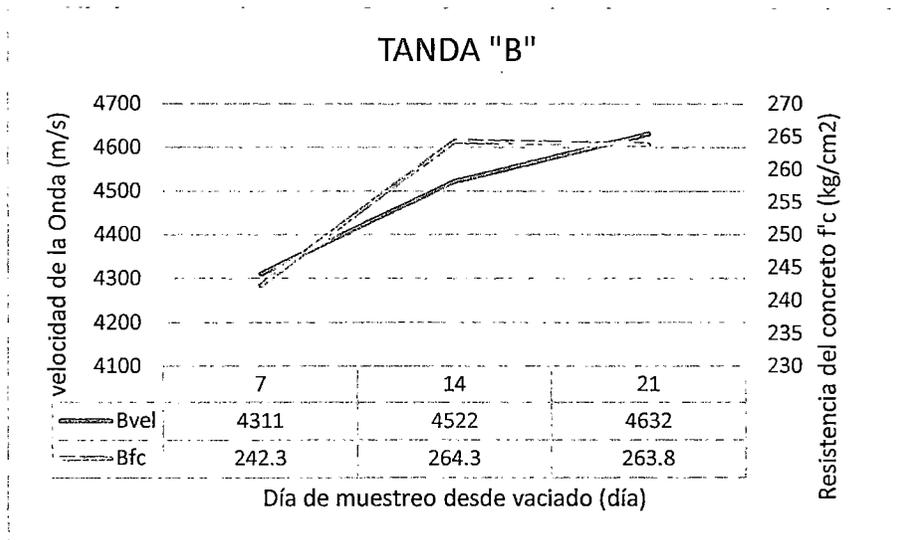


Figura 5.6 Evolución de la Velocidad de la Onda y la Resistencia del Concreto en la Tanda "B".  
Fuente: Elaboración Propia.

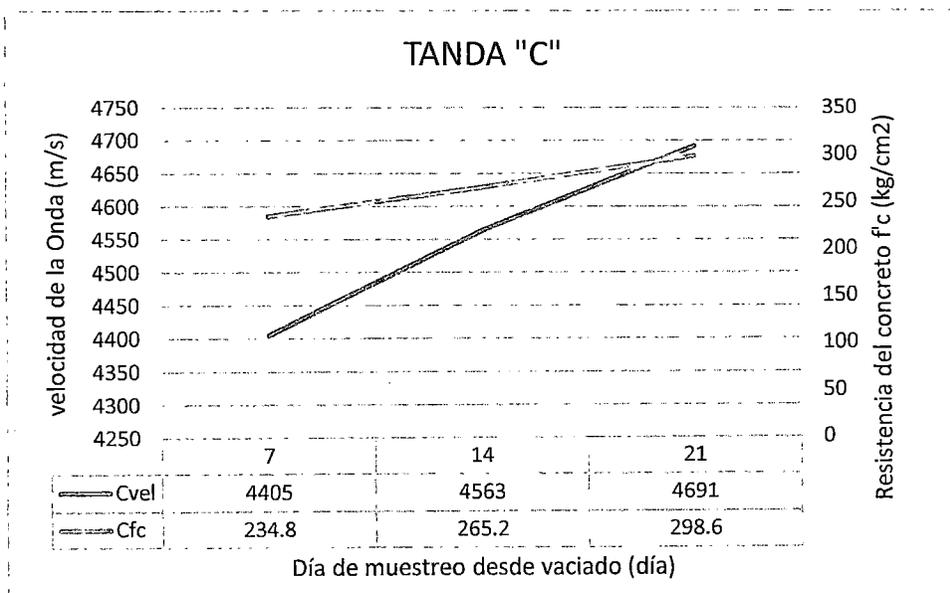


Figura 5.7 Evolución de la Velocidad de la Onda y la Resistencia del Concreto en la Tanda "C".  
Fuente: Elaboración propia.

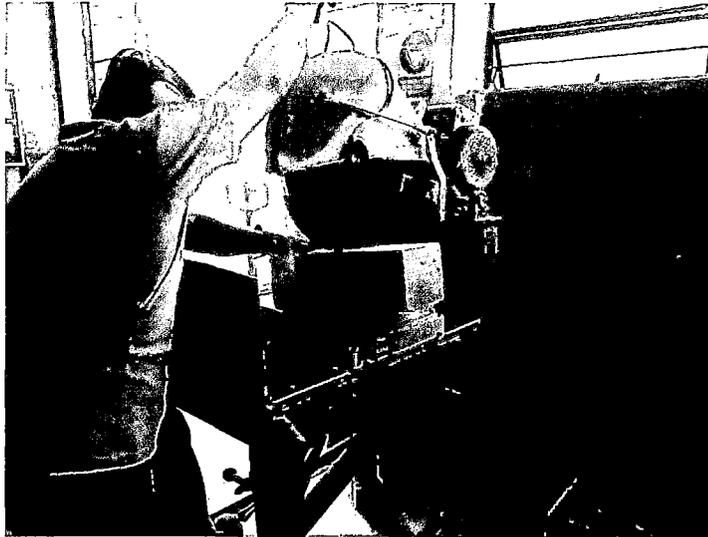
#### 5.4 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS GRIETAS

Se realizó un corte perpendicular en una cara a las dos (02) vigas (los cortes representan las grietas) tal como se puede ver en las Figura 5.8 y Figura 5.9 y se midió el tiempo de la onda en 2 posiciones diferentes y equidistantes de acuerdo al manual de usuario y a la Norma **BSI 1881, Parte 2003 Recomendaciones para la medición de la Velocidad del pulso ultrasónico en estructuras de concreto** y se utilizó la fórmula:

Se realizó el mismo procedimiento a dos vigas con grietas (cortes realizados intencionalmente) inclinadas, ver Figura 5.9.



*Figura 5.8 Corte Vertical de la viga hasta una profundidad controlada.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 5.9 Corte Inclinado de la viga hasta una profundidad controlada.  
Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados del Cuadro 5.11 Profundidad de grietas verticales medido con Vernier presentan el cálculo de la profundidad de la grieta con el método de ultrasonido y se compara con las mediciones directas con un Vernier.

Posteriormente se realizaron los cálculos en las vigas cortadas con una cizalla inclinadamente.

Los resultados del Cuadro 5.12 presentan el cálculo de la profundidad de la grieta con el método de ultrasonido y las compara con las mediciones hechas con un Vernier.

Cuadro 5.11 Profundidad de grietas verticales medido con Vernier y con el método de Velocidad de Ultrasonido.

Descripción	VIGA 1	VIGA 2	Unidades
<b>Profundidad REAL de la Grieta:</b>	<b>4.65</b>	<b>7.95</b>	cm
T1:	55.9	64.15	us
T2:	103.9	107.1	us
X1:	10	10	cm
<b>Profundidad CALCULADA de la Grieta:</b>	<b>4.71</b>	<b>8.24</b>	cm
<b>ERROR=</b>	<b>+0.06</b>	<b>+0.29</b>	cm
<b>Error Porcentual=</b>	<b>+1.36%</b>	<b>+3.61%</b>	

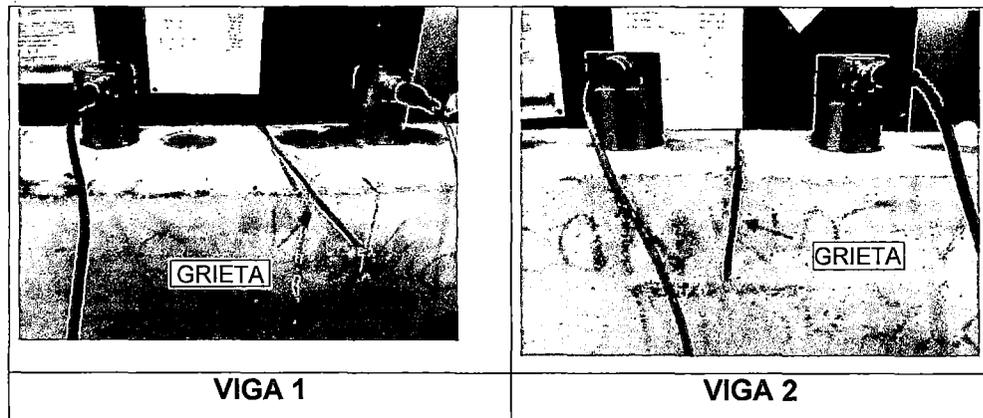
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 5.10 muestra las vigas utilizadas para la medición de la profundidad de grietas inclinadas.

Cuadro 5.12 Profundidad de grietas inclinadas medido con Vernier y con método de Velocidad de Ultrasonido.

Descripción	VIGA 3		VIGA 4	Unidades
<b>Profundidad REAL de la Grieta:</b>	<b>4</b>	<b>5.1</b>	<b>6.6</b>	cm
T1:	42.6	49.8	55	us
T2:	78.1	87.3	93.2	us
X1:	7.5	8	8	cm
<b>Profundidad CALCULADA de la Grieta:</b>	<b>3.90</b>	<b>5.35</b>	<b>6.21</b>	cm
<b>ERROR=</b>	<b>-0.10</b>	<b>+0.25</b>	<b>-0.39</b>	cm
<b>Error Porcentual=</b>	<b>-2.47%</b>	<b>+4.89%</b>	<b>-5.87%</b>	

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 5.10 Viga 1 y 2 con grietas inclinadas.  
Fuente: Elaboración propia.*

El manual de usuario del equipo V-Meter MK IV proporciona un procedimiento para determinar el lado de la inclinación de la grieta. Para ello se deberá 1) poner un transductor fijo a un lado de la grieta y el otro transductor al otro lado y a continuación de la grieta; en esta posición se determina el tiempo de viaje de la Onda ultrasónica. 2) Se moverá el segundo transductor una distancia entre 3-10cm alejándolo desde la grieta y se volverá medir el tiempo de viaje. Si el tiempo de viaje disminuye indica que la inclinación de la grieta es hacia el lado para donde se movió el transductor. La Figura 5.11 y Figura 5.12 muestran de forma detallada el proceso realizado para conocer la orientación de la grieta inclinada.

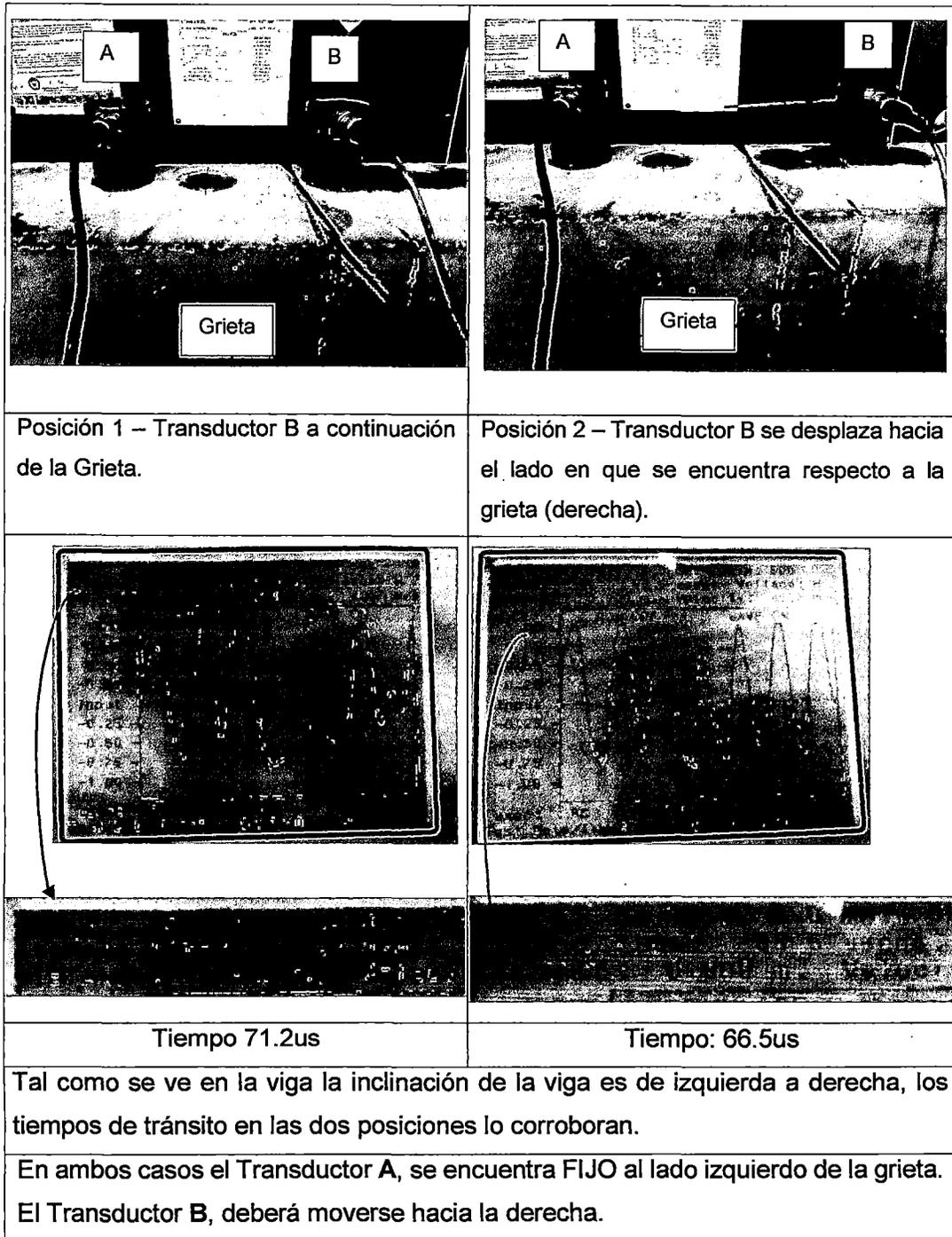


Figura 5.11 Proceso para determinar la profundidad de la grieta de la Viga 1.  
 Fuente: Elaboración propia.

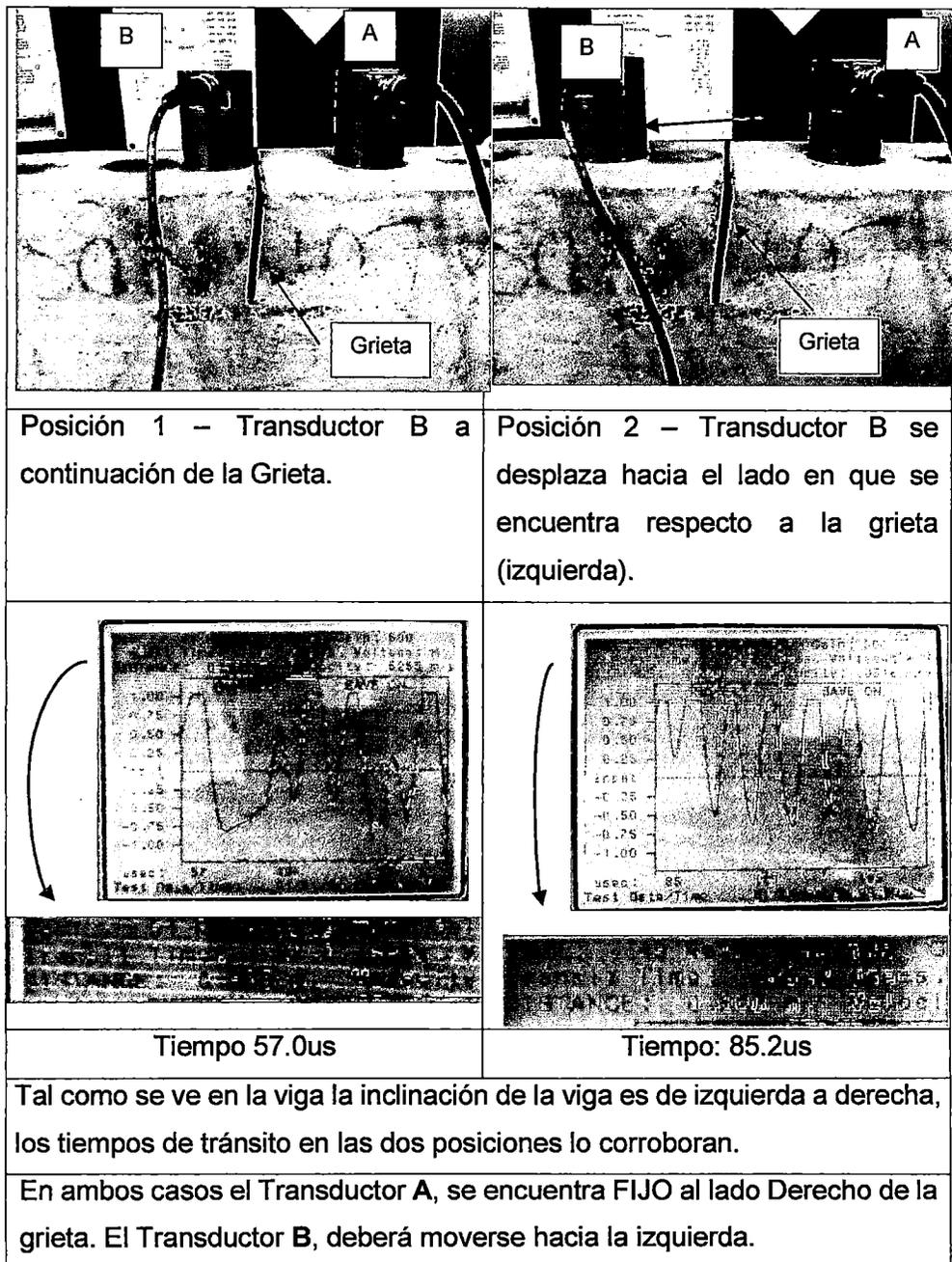


Figura 5.12 Proceso para determinar la profundidad de la grieta de la Viga 2.  
 Fuente: Elaboración propia.

### 5.5 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

Se realizó muestreo de la velocidad de la onda en probetas provenientes de diferentes empresas Contratistas, quienes acuden al Laboratorio de Ensayos de Materiales (LEM) de la UNI para la estimación de la resistencia a compresión.

Conociendo la velocidad de la onda y la resistencia del concreto se graficó utilizando el programa Excel v 2013 la nube de puntos de la Figura 5.13 y se determinó la recta de menor ajuste.

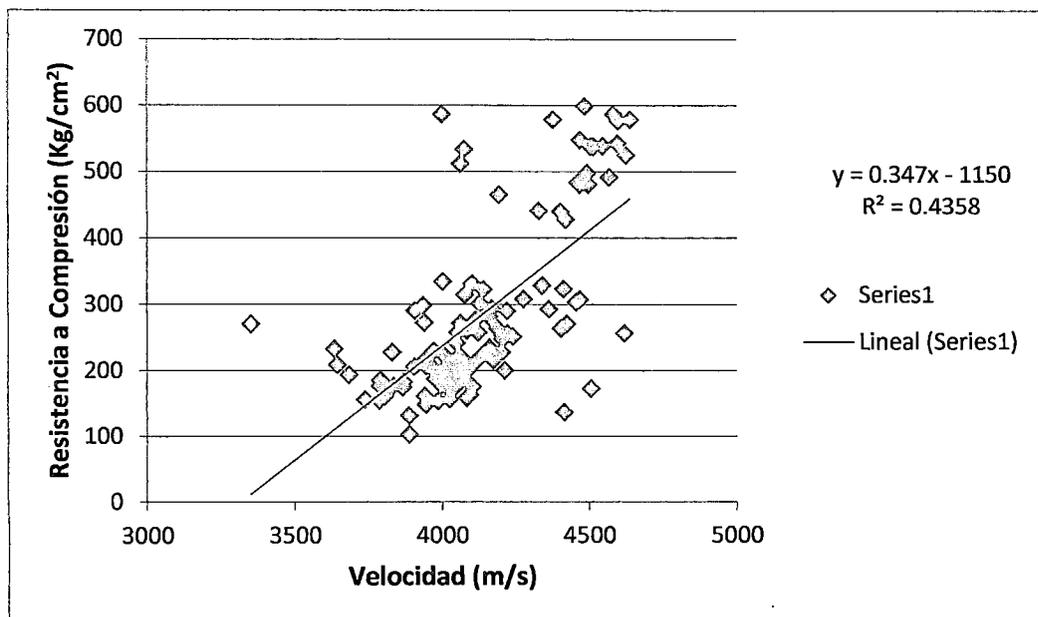


Figura 5.13 Nube de puntos y correlación de resistencia a compresión y velocidad de la Onda Ultrasónica. Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 5.13 muestra los resultados ordenados de forma ascendente de la resistencia a la compresión del concreto de 120 probetas ensayadas en el Laboratorio de Ensayo de Materiales. Este cuadro también muestra la velocidad de onda para cada probeta.

Cuadro 5.13 Resultados de 120 probetas de la velocidad de onda y su resistencia a compresión.

ID	V	f <sub>c</sub>	ID	V	f <sub>c</sub>
1	3349	271	61	4081	212
2	3633	233	62	4082	261
3	3643	209	63	4083	200
4	3684	194	64	4083	159
5	3739	156	65	4090	181
6	3788	155	66	4094	164
7	3789	177	67	4101	332
8	3790	186	68	4101	176
9	3805	162	69	4113	277
11	3829	228	71	4121	258
12	3834	177	72	4127	302
13	3867	175	73	4140	323
14	3868	183	74	4140	226
16	3886	132	76	4160	235
17	3887	103	77	4163	228
18	3904	206	78	4168	294
19	3907	291	79	4173	216
20	3934	299	80	4187	264
21	3938	273	81	4190	224
22	3940	216	82	4193	466
23	3940	162	83	4202	228
24	3942	215	84	4204	248
25	3945	149	85	4204	254
26	3945	207	86	4205	249
27	3970	230	87	4211	201
28	3970	203	88	4219	291
29	3971	200	89	4221	257
30	3975	188	90	4239	252
31	3975	200	91	4277	309
32	3986	154	92	4328	441
33	3995	193	93	4339	329
34	3996	179	94	4363	293
35	3997	587	95	4375	579
37	4001	335	97	4403	264
38	4005	203	98	4413	324
40	4006	223	100	4419	428
43	4015	199	103	4461	484
44	4017	198	104	4468	548
45	4025	172	105	4468	308
46	4025	157	106	4469	481
47	4029	184	107	4484	599
48	4041	216	108	4492	498
49	4044	176	109	4497	481
50	4048	242	110	4505	538
51	4051	258	111	4506	173
52	4053	197	112	4514	538
53	4057	195	113	4546	539
54	4059	200	114	4568	492
55	4060	272	115	4581	587
56	4060	222	116	4595	543
57	4060	512	117	4597	577
58	4068	202	118	4618	257
59	4073	534	119	4625	525
60	4076	315	120	4638	579

Fuente: Elaboración propia.

### 5.6 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG/ POISSON

Se determinó el módulo de Young/ Poisson con la Norma ASTM C-469 y con el método de ULTRASONIDO.

De acuerdo a ASTM C-469, se deberá conocer la fuerza de rotura del concreto, para ello se comprimieron dos (02) probetas, obteniendo una resistencia de compresión de rotura de 44,500kg/cm<sup>2</sup> y se prosiguió a la determinación de las deformaciones lineales y rotacionales de otras dos (02) probetas de concreto del mismo vaciado. Se realizó el cálculo de la Elasticidad con la norma ASTM y con ULTRASONIDO, obteniendo los resultados del Cuadro 5.14 y Cuadro 5.15 para cada una de las probetas.

Cuadro 5.14. Módulo de Elasticidad del concreto con ASTM C-469 y ULTRASONIDO, probeta 1.

<b>E=</b>	18.83	kN/mm2	<b>CALCULADO CON ASTM C 469</b>	<b>MÉTODO ESTATICO</b>
<b>u=</b>	0.23			
<b>E=</b>	22.000	kN/mm2	<b>CALCULADO CON ULTRASONIDO</b>	<b>MÉTODO ESTATICO</b>
<b>μ =</b>	No se puede determinar			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5.15. Módulo de Elasticidad del concreto con ASTM C-469 y ULTRASONIDO, probeta 2.

<b>E=</b>	18.87	kN/mm2	<b>CALCULADO CON ASTM C 469</b>	<b>MÉTODO ESTATICO</b>
<b>u=</b>	0.20			
<b>E=</b>	20.000	kN/mm2	<b>CALCULADO CON ULTRASONIDO</b>	<b>MÉTODO ESTATICO</b>
<b>μ =</b>	No se puede determinar			

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La humedad es un factor que altera los resultados de realizar la prueba con el Equipo V-Meter MK IV. Recordar que estas ondas generadas por ser generadas mecánicamente no se transmiten a través del vacío, por lo que buscan otros caminos para poder propagarse lo que toma más tiempo. El agua al llenar los intersticios del concreto disminuye la cantidad de vacíos con lo cual mejora las condiciones para la propagación de los pulsos ultrasónicos.

### 6.1. HOMOGENEIDAD DEL CONCRETO

Los resultados de la Figura 5.1, muestran el comportamiento de la velocidad en el cuerpo de los muros, se puede notar ligeros cambios en los colores. En el caso del Muro 1 (azul=29.4%, cyan=46.3% y verde=24.3%), el 75% del muro tienen las velocidades de medias-altas (colores azul y cyan), sin embargo en el Muro 2 (azul=3.7%, cyan=33.9% y verde=62.4%) existe un 96% de zonas con velocidades de medias a bajas (colores cyan y verde).

En lo relativo a las columnas analizadas se podrá notar que el comportamiento de la onda en las zonas baja, media y alta están en ambos casos son similares y mantienen el mismo comportamiento. En lo que respecta a la zona baja existe una notable pérdida de la velocidad con respecto a las zonas medias y altas.

### 6.2 DETECCIÓN DE CANGREJERAS E IMPERFECCIONES

Es posible determinar y ubicar cangrejeras, tal como se ve en los resultados de la Figura 5.3, donde se muestra que la velocidad de onda tiende a disminuir al ir aumentando progresivamente los diámetros de las perforaciones.

En el caso del CUBO 1 la merma en la velocidad de la onda cuando estuvo sin hueco y con perforaciones de 3" fue del -6.23 %. De igual forma en los CUBOS 2 y 3 la variación de la velocidad de la onda fue de -6.9% y -9.83% respectivamente. Con una reducción promedio de la velocidad de la onda de -7.65%.

Sin embargo, con los transductores operando a una frecuencia de 54kHz, todavía no se pueden ubicar zonas con cangrejeras muy pequeñas. En el Cuadro 6.1 se indican las dimensiones mínimas de cangrejeras en estructuras de concreto con velocidades en la vecindad desde 2000 a 5000m/s, para que sean detectables por el equipo V-Meter MK IV, el cual opera con dos transductores a una frecuencia de 54kHz.

Cuadro 6.1 Longitudes mínimas de las cangrejeras para que sean detectados con ultrasonido.

<b>Velocidad del concreto (m/s) en la Vecindad de la Cangrejera</b>	2000	3000	4000	5000
<b>Frecuencia (kHz) de transductores</b>	<b>54</b>			
<b>y= Long de Onda (mm)= dimensión mínima de cangrejera para ser detectable:</b>	37.0	55.6	74.1	92.6

Fuente: Elaboración propia.

Con fines prácticos y de acuerdo al Cuadro 5.1 una cangrejera para que sea detectado deberá tener una dimensión mínima de 37mm para concretos con velocidad de onda de 2000m/s.

### 6.3 VARIACIONES EN EL TIEMPO DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

En las primeras semanas de vaciado el concreto existe un comportamiento ascendente de las ondas ultrasónicas y también de la resistencia a la compresión para las tres (03) tantas de probetas realizadas tal como se puede ver en la Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7.

La velocidad de la onda ultrasónica se comporta de la misma forma ascendente como lo hace la resistencia del concreto en los primeros días de vaciado.

### 6.4 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS GRIETAS

La profundidad de las grietas verticales en las VIGAS 1 y 2 medido con Vernier fueron 4.65cm y 7.95cm respectivamente, los errores al realizar esta medición aplicando ultrasonido fue de 0.06cm y 0.29cm, porcentualmente igual a 1.36% y 3.61%.

La profundidad de las grietas inclinadas en la VIGA 3 medido con Vernier fueron 4.00cm y 5.10cm, los errores al realizar estas mediciones aplicando ultrasonido fue de 0.10cm y 0.25cm, porcentualmente igual a 2.47% y 4.89%.

La profundidad de las grieta inclinada en la VIGAS 4 medido con Vernier fue 6.6cm, el errores al realizar está medición aplicando ultrasonido fue de 0.39cm, porcentualmente igual a 5.87%.

La versatilidad del método no destructivo de Ondas ultrasónicas es notorio ya que los errores encontrados son en promedio igual a 3.64%. Tener en cuenta que no hay otro método para medir la profundidad de las grietas sin afectar el elemento de concreto.

#### 6.5 ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

Los resultados obtenidos al intentar correlacionar la velocidad de la onda ultrasónica con la resistencia del concreto no son favorables, el coeficiente de correlación de  $R^2=0.4358$ , de acuerdo a la Figura 5.13, es muy bajo. Se presentó una relación de propiedades que afectan la velocidad de la onda ultrasónica en el Capítulo I, allí se muestra que la velocidad de la Onda depende de muchas variables las mismas que modifican el comportamiento de la onda ultrasónica de una forma diferente a como afectan a la resistencia del concreto. Otro aspecto importante a tener en cuenta es la complejidad y heterogeneidad del concreto.

#### 6.6 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG/ POISSON

Los resultados obtenidos al medir el módulo de elasticidad del concreto aplicando el método estándar ASTM C 469 y los que se obtuvieron con el método de ultrasonido, para la probeta 1 fueron 18.83 y 22 kN/mm<sup>2</sup> respectivamente, arrastrando un error del 14.4% en la determinación de este parámetro.

En el caso de la probeta 2 los resultados fueron 18.87 y 20 kN/mm<sup>2</sup>, con un error de 5.7%.

No se pudo medir la relación de Poisson con el método de ultrasonido ya que el equipo V-Meter MK-IV requiere los transductores de Ondas S para poder realizar la medición de este parámetro y del módulo de elasticidad con mayor exactitud.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. CONCLUSIONES

#### a. Homogeneidad del concreto

1. El muro 1 evaluado es dominado por los colores cyan y azul representando el 75% del área total y de igual forma el muro 2 es dominado por los colores verde y cyan con un 96%. El muro 2 es más homogéneo que el muro 1. Las velocidades más altas se dieron en el muro 1.
2. Las dos (02) columnas evaluadas muestran una distribución similar de la velocidad de la onda en altura, sin embargo en la zona baja existe una notable pérdida de la velocidad, esto es provocado por la dificultad que ofrece la armadura al momento de hacer el vaciado y por la limitada vibración que llega a esta zona.

#### b. Detección de Cangrejeras

3. La velocidad de la onda varía ante la presencia de oquedades o perturbaciones. Las dimensiones mínimas de las cangrejeras para que sean detectables en un concreto de 2000, 3000, 4000 y 5000 m/s serán de 3.70, 5.56, 7.41 y 9.26cm respectivamente.
4. Las perforaciones de 3"(76.2mm) en concretos con velocidades de 3000-4000m/s redujeron la velocidad de la onda en 7.65% en promedio en 03 cubos de concreto de acuerdo al Cuadro 5.7, Cuadro 5.8 y Cuadro 5.9.

#### c. Variaciones en el tiempo

5. El comportamiento de la velocidad de la onda ultrasónica en el concreto se monitoreó realizando pruebas periódicas en el mismo lugar o elemento. La variación porcentual al monitorear 03 tandas de concreto entre los 7 y 14 días después del vaciado fue de +2.92% y entre los 7 y 21 días fue de +5.32%. Esta variación se debe al incremento de la resistencia del concreto, lo que demuestra la relación directamente proporcional entre la velocidad de la onda ultrasónica y la resistencia del concreto.

d. Profundidad de Grietas

6. La determinación de la profundidad de las grietas verticales e inclinadas utilizando el método de ultrasonido fue con un error absoluto promedio de 3.64% en las pruebas realizadas.

e. Resistencia del Concreto

7. No se ha podido determinar con gran exactitud la resistencia del concreto a partir de la velocidad de la onda. El nivel de correlación del método de ultrasonido y la resistencia del concreto fue de  $R^2=0.4358$ .

f. Módulo de Young / Poisson

8. Los errores porcentuales al estimar el módulo de elasticidad del concreto con el método de ultrasonido aplicando ondas P de compresión (primarias) y el método estándar ASTM C 469 en dos (02) tandas de concreto fueron de +16.8% y +6.00%. Estos resultados no garantizan la idoneidad de utilizar ondas P para estimar el módulo de elasticidad.

## 7.2. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda adquirir transductores de ondas S con la finalidad de realizar pruebas para estimar el módulo de Elasticidad y el coeficiente de Poisson.
2. Se recomienda realizar estudios complementarios con el fin de plantear rangos de homogeneidad del concreto teniendo como parámetro la velocidad de la onda.
3. Deberá tomarse en cuenta las condiciones de humedad del concreto cuando se realicen pruebas. Los valores de la velocidad de onda aumentan con la presencia de agua, lo que llevaría a no representar la velocidad de la onda del concreto en condiciones normales o secas. La influencia de la humedad en la velocidad de la onda no será la misma en todos los elementos de concreto, esta influencia se ve limitada por la cantidad de poros (los que se llenarían de agua) del concreto.
4. El acoplante que viene con el Equipo V-Meter MK-IV no se comercializa en el mercado nacional, se recomienda utilizar Vick Vaporup ya que dio buenos resultados en las pruebas. También se utilizó pasta dental, pero los resultados

mostraron que no es un buen acoplante, tiende a humedecer y a pegarse en la parte superficial del concreto ensayado lo que alteraría los resultados.

5. Se recomienda que las pruebas ya sean de campo o laboratorio se realicen en un ambiente tranquilo y libre de ruidos fuertes y vibraciones con el objetivo de no alterar las mediciones con el equipo V-Meter MK-IV.
6. Se recomienda utilizar el detector de acero cuando se realicen pruebas en estructuras de concreto armado, realizar las mediciones de ser posible en zonas donde no exista acero de refuerzo.
7. Se recomienda realizar las calibraciones de los transductores cada vez que se encienda, después de un receso prolongado y cuando el equipo lo indique.
8. Cuando se realicen mediciones con el V-Meter MK-IV, deberán tomarse los valores promedios de un mínimo de 5 mediciones.
9. Se recomienda adquirir transductores que operen a mayor frecuencia, ya que solo se tiene disponible los de 54kHz, esto permitirá evaluar y detectar cangrejas más pequeñas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI 318M-89, Farmington Hills, MI, ACI, 1992.
2. American Concrete Institute, "In-Place Methods to Estimate Concrete Strength", ACI 228.1R, 1995
3. American Concrete Institute, "Métodos de ensayo no destructivos para la Evaluación de estructuras de concreto", ACI 228.2R, 1998
4. American Society of Civil Engineers, "Report Card for America's Infrastructure", ASCE, New York, 1998.
5. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens, ASTM C 215-91, West Conshohocken, PA, 1991.
6. American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for In-Place Density of Unhardened and Hardened Concrete, Including Roller Compacted Concrete, By Nuclear Methods, ASTM C 1040, West Conshohocken, PA, 2013.
7. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete, ASTM C 803, West Conshohocken, PA, 2010.
8. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM C 597, West Conshohocken, PA, 2009.
9. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM C 666-97, West Conshohocken, PA, 1997.
10. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM C 805-94, West Conshohocken, PA, 1994.
11. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete, ASTM C 1150, West Conshohocken, PA, 1996.
12. Carleton, H.R. and J.F. Muratore, "Ultrasonic Evaluation of Concrete" Proceedings of the 1986 IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 1017-1020.
13. Carlsson M., "Field Experience in the Use of Break-Off Tester", ACI, SP 8214, 1984.

14. Dahl-Jorgensen E. and Johansen R., "General and Specialized Use of the Break-Off Concrete Strength Test Method", ACI, SP 82-15, 1984.
15. Galan, A., "Combined Ultrasound Methods of Concrete Testing", Amsterdam, Elsevier, 1990.
16. Gatfield E.N., "A Method of Studying the Effect of Vibratory Stress, Including Fatigue, on Concrete in Flexure, paper presented to the RILEM Technical Committee on Nondestructive Testing of Concrete", Varna, Bulgaria, September 3-6, 1968.
17. Gorzelanczyk Tomasz, Hola Jerzy, Schabowicz Krzysztof, "Nondestructive test aimed at determining the thickness of the concrete shell of a heat carrying tunnel", 18th World Conference on Nondestructive testing, South Africa, 2012.
18. Guha S. K., Wedpathak A. V. y Tomsett, H.N., "The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality", Magazine of Concrete Research, 1980: 32 (110); 7-16, 1980.
19. James Instruments Inc., Operator's Manual V-C-400 V-Meter Mark IV, Chicago (USA), 2012.
20. Johansen R., "In-situ Strength of Concrete, the Break-off Method", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1979, 45.
21. Klieger, P., "Long-Time Study of Cement Performance in Concrete: Chapter 10, Progress Report on Strength and Elastic Properties of Concrete," ACI Journal, Proceedings, Vol. 54, December 1957, pp. 481-504.
22. Leshchinsky A.M., a, "Correlation of concrete strength and non-destructive test" The Indian concrete journal, 1991
23. Leslie J.R. and Cheesman W.J., "An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures", ACI J. Proc., 46(1), 17, 1949.
24. Malhotra, V.M. and G.G. Carrette, "In-Situ Testing: A Review," Progress in Concrete Technology, Ed., V. M. Malhotra, MOP/MEL 80-89 (TR), Ottawa, Canada, Energy, Mines and Resources, 1980, pp. 749-796.
25. Nucera Francesco y Pucinotti Raffaele, "Destructive and non-destructive testing on Reinforced concrete structure: the case study of the museum of Magna Graecia in Reggio Calabria", International Conference and NDT Exhibition 2009, 04 - 06 November 2009, Prague, Czech Republic, 2009

26. Olson, L., Sack, D. and Phelps, G., "Sonic NDE of Bridges and Other Concrete Structures", National Science Foundation Conference on Nondestructive Evaluation of Civil Structures, University of Colorado at Boulder, 1992.
27. Patil N. R. y Patil J. R., "Non Destructive testing (NDT) advantages and limitations", SRES College of Engineering, Kopargaon, Maharashtra, 2008
28. Pessiki, S.P. and N.J. Carino, "Measurement of the Setting Time and Strength of Concrete by the Impact-Echo Method," NBSIR 87-3575, Gaithersburg, MD, National Bureau of Standards, July 1987.
29. Pohl, E., Zerstorungsfreie Pruf- und Messmethoden fur Beton, Berlin, VEB Verlag fur Bauwesen, 1969.
30. Popovics, S., "Effect of Porosity on the Strength of Concrete," Journal of Materials, JMLSA, Vol. 4, No. 2, June 1969. pp. 356-371.
31. Popovics, S., "Effect of Curing Method and Final Moisture Condition on Compressive Strength of Concrete," ACI Journal, Vol. 83, No. 4, April 1986, pp. 650-657.
32. Popovics, S., Strength and Related Properties of Concrete: A Quantitative Approach, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
33. Powers T.C., "Measuring Young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations", Proc. ASTM, 38, Part II, 460, 1938.
34. Skramtajew B.G., "Determining concrete strength for control of concrete in structures", J. Am. Concr. Inst., 34, 285, 1938.
35. Teodoru George V., The Use of Simultaneous Nondestructive Tests to Predict the Compressive Strength of Concrete - Nondestructive Testing, ACI SP-112, American Concrete Institute, Detroit, 1988, pp. 137-152.
36. Whitehurst, E. A. (1951). "Soniscope Tests Concrete Structures." Journal of the American Concrete Institute, 47(6), 433-444.
37. Whitehurst E.A., "Use of soniscope for measuring setting time of concrete", Proc. ASTM, 51, 1166, 1951.

## ANEXOS

## MANUAL DE OPERADOR y APLICACIONES

### V-METER MK IV, EQUIPO ULTRASONICO

El V-Meter Mark IV, de la marca James Instruments, es un instrumento para calcular la velocidad del pulso ultrasónico derivado de la medición del tiempo de transito de los pulsos ultrasónicos. Diseñado para determinar la calidad del concreto, madera y otros materiales de grano grueso; tanto en campo como en laboratorio. Utiliza ráfagas o pulsos de ondas las que se propagan a través del elemento de prueba en un rango de frecuencias determinado por los transductores (54kHz), de allí el término "ultrasónico".

El V-Meter incorpora un microprocesador avanzado y lo mejor del estado de arte de la electrónica, por lo que es un instrumento durable y conveniente que captura datos fiables, tanto en un entorno de laboratorio o en campo (in situ). Además, este sistema está equipado para analizar la respuesta de la **onda S** (transductores de ondas de corte o S son opcionales) complementándose con los transductores que vienen de fábrica para estudiar **ondas P**, calculando así el coeficiente de Poisson a un alto nivel de precisión.

Alimentado por una batería recargable, la V-Meter ha sido diseñada teniendo en cuenta todas las consideraciones de trabajo. Es totalmente portátil, fácil de operar y precisa. Genera pulsos ultrasónicos de baja frecuencia, y mide el tiempo necesario para que se desplazan de un transductor a la otra a través del material ensayado. El tiempo se mide por un reloj de 10 MHz, proporcionando una capacidad de medición de 0 a 6,5 milisegundos con una resolución de 100 nanosegundos.

#### APLICACIONES

- Homogeneidad del concreto
- Presencia de cangrejeras, grietas u otras imperfecciones como zonas porosas, zonas en descomposición y rajaduras.
- Valoración y/o monitoreo de la variación del concreto y madera al transcurrir el tiempo, antes y después de eventos extremos como ataques químicos, incendios, temblores y sismos.

- Validación de la calidad del concreto y madera en relación a las especificaciones técnicas.
- Estimación de la resistencia
- Determinación de la profundidad de las grietas
- Calculo del módulo de Young

## CARACTERISTICAS

- Control remoto, a través del software Velocilinx el equipo V-Meter MK IV puede ser usado con una PC.
- Medición directa de ondas P, complementariamente se puede comprar transductores de ondas S.
- Medición y lectura directa del módulo de Young de Elasticidad (E).
- Medición y lectura directa de la relación de Poisson ( $\nu$ )
- Medición directa del tiempo de transito de las ondas ultrasónicas
- Simple calibración, no requiere de barra de calibración
- Portátil, ligera y con batería AC recargable
- Cable USB para descarga de información a la computadora
- Señal y activador de salida
- Maletín y carcasa robustos y resistentes
- Batería interna recargable con ion de litio
- Display de la forma de la onda en la pantalla LCD

## PARTES Y ACCESORIOS DEL EQUIPO

Cada equipo V-Mete Mk IV viene de fábrica con lo siguiente, tal como se muestra en la Figura A:

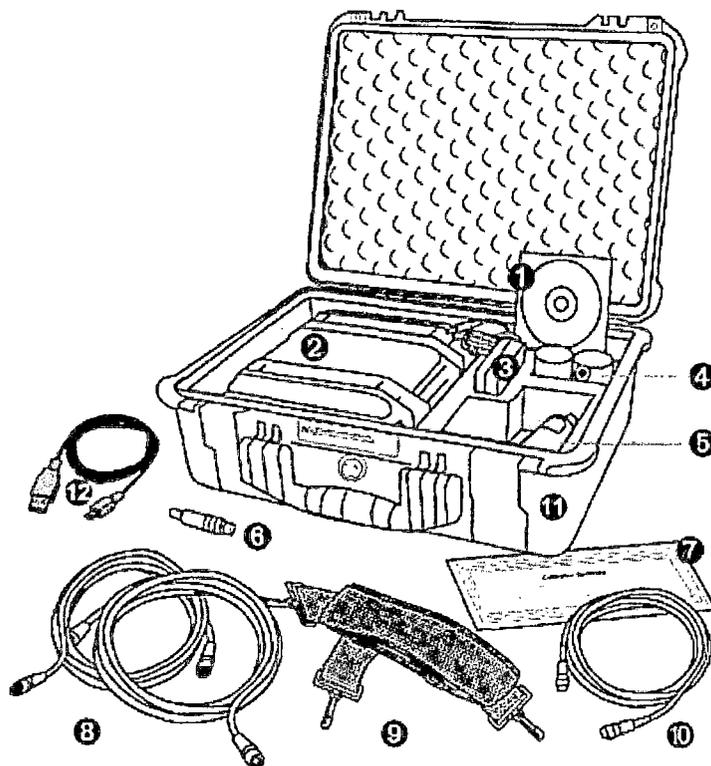


Figura A. Contenido del V- Meter MK IV de Fábrica.  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.

1. **CD – software:** CD que contiene el programa que permite subir la información a la PC.
2. **V-Meter:** Equipo probador de velocidad de pulso ultrasónico. Está dentro de una caja protectora duradera.
3. **AC / cable de Alimentación/Poder:** Es un cable eléctrico que sirve para conectar la V-Meter a la red de suministro eléctrico a través de un enchufe o conectándose a un alargador eléctrico. Se caracteriza porque forma una conexión temporal, fácil de desconectar y volver a reconectar en cualquier otro punto.
4. **Dos transductores (54kHz):** Elementos piezoeléctricos de cerámica robusta de plomo zirconato titanato montados en cajas de acero inoxidable diseñados para proporcionar una transmisión acústica altamente eficiente.
5. **Tubo de Gel Acoplante:** Se utiliza en materiales de concreto o de otro tipo que tengan superficies lisas, el uso de este gel pastoso permite asegurar el acoplamiento acústico adecuado. El equipo vino con dos tubos de gel, cuando se terminaron fueron sustituidos por pasta dental.

6. **Adaptador coaxial a cable adaptador:** este adaptador conecta al botón del receptor con el cable coaxial del transductor.
7. **Certificado de Calibración:** certificado que garantiza que el instrumento ha sido calibrado antes de salir de fábrica, el equipo ultrasónico deberá cumplir o exceder las especificaciones publicadas.
8. **Dos Cables Coaxiales de transductores:** Se utiliza para conectar los transductores estándar con la V-Meter.
9. **Correa de Soporte:** Se utiliza para fijar la V-Meter al operador durante la prueba. Es muy útil para el trabajo en altura.
10. **Cable Rec Connector:** Se utiliza para conectar el transductor con el botón interruptor a la V-Meter.
11. **Case:** Se utiliza para guardar a la V-Meter y accesorios. Permite transportar el equipo con mayor facilidad.
12. **Cable USB:** Se utiliza para conectar el V-Meter a una PC, previo a ello deberá instalarse el software incluido en el CD. Deberá tenerse mucho cuidado con la selección del Puerto COM, es importante que el número de Puerto COM que se elija coincida con el que se generó en el sistema operativo de la computadora durante la instalación.

## VISIÓN GENERAL del V-Meter

El siguiente es un resumen de todas las características externas del V-Meter.

En la Figura B se muestran todas las características del V-Meter.

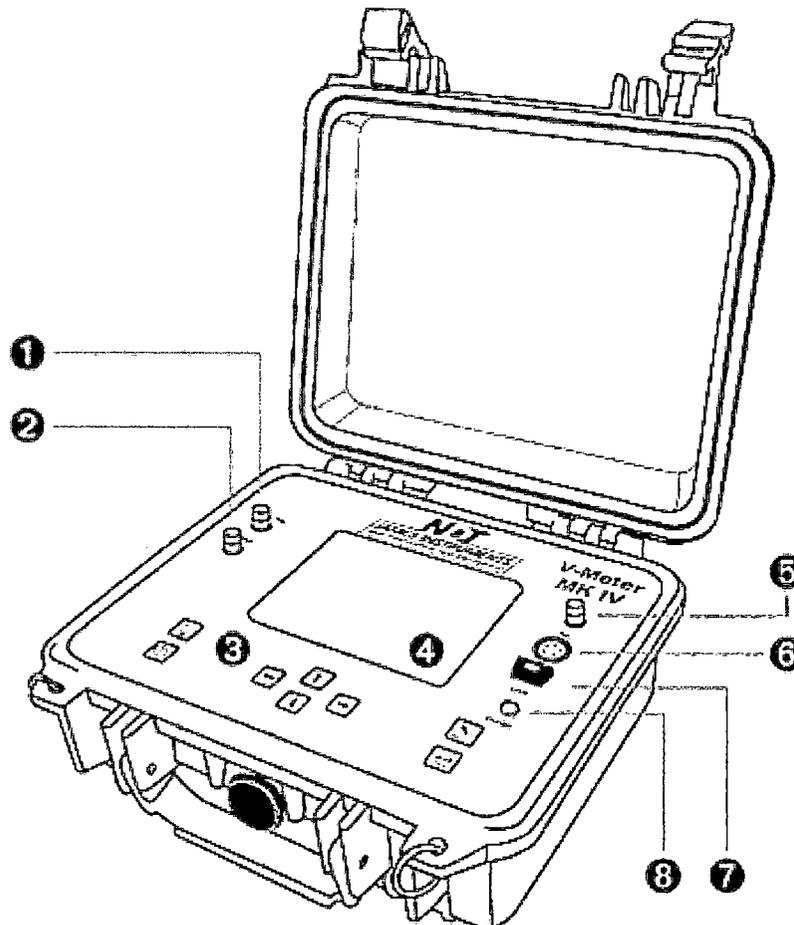


Figura B Visión general del V-Meter MK IV  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.

- 1 Osc Trig: medición del tiempo cuando se utilizada osciloscopio externos.
- 2 Trans: Salida BNC, conector para el transductor transmisor
- 3 Panel de control- Panel de control del V-Meter
- 4 Display: 320 x 240 pixel, pantalla retroalimentada
- 5 Osc: Salida BNC conector para osciloscopio externo con botón interruptor
- 6 Rec: conector del cable del transductor receptor con botón interruptor
- 7 USB: para conexión USB con la PC.

8 Charger: para conectar al punto de alimentación eléctrica

\*\*Para describir el equipo V Meter, utilizaremos los mismos términos que aparecen en el equipo, a pesar de que no tengan ningún sentido. Esto facilitará a cualquier persona poder encontrar fácilmente las conexiones y entradas.

En lo que sigue, el OPERADOR de este equipo deberá familiarizarse con 2 TRANS, 6 REC, 7 USB y 8 CHARGER, que son los conectores que más se utilizarán.

## PANEL DE CONTROL

En la Figura C aparecen en el James Instruments V-Meter. El instrumento es controlado por las teclas del panel frontal que permite al usuario navegar por los menús del sistema.

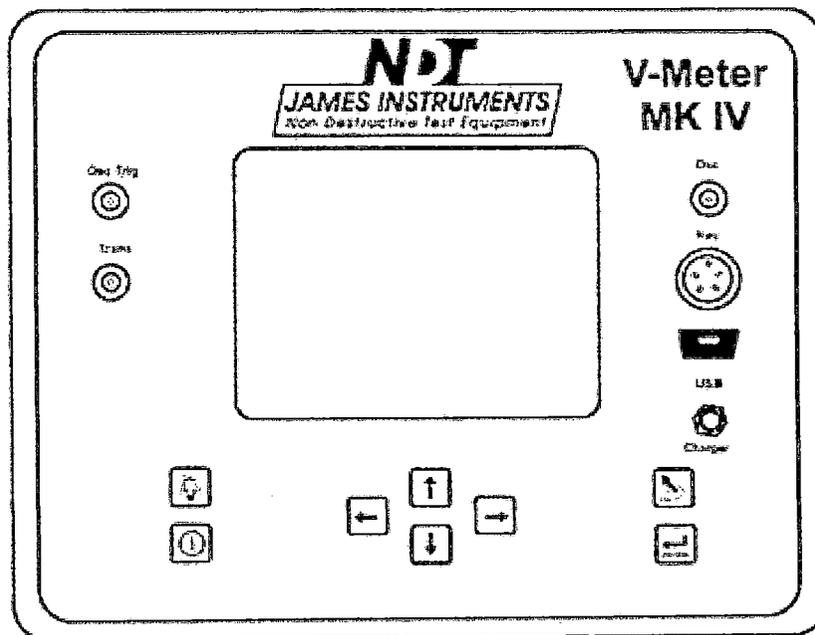


Figura C Panel de control del V-Meter.  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.

A continuación se describe las funciones de los botones del V-Meter



Botón de Poder: se utiliza para encender y apagar el instrumento de ensayo



Flecha hacia arriba: usado para desplazarse hacia arriba en los menus.



Flecha hacia abajo: usado para desplazarse hacia abajo en los menus.



Flecha hacia la izquierda: usado para desplazarse hacia la izquierda en los menus.



Flecha hacia la derecha: usado para desplazarse hacia la izquierda en los menus.

Enter, utilizado para seleccionar el menú y aceptar los valores mostrados.

ESC, utilizado para salir y cancelar una selección o función.

Botón de luz, enciende o apaga una luz de fondo para el display.

## PANTALLAS DEL INSTRUMENTO

### Menú de prueba

Cuando el V-meter se enciende, el Menú de prueba (ver Figura D) aparece en la pantalla display, esto permite al usuario realizar las pruebas inmediatamente sin pasar por el menú principal. Nota: para ir al Menú Principal del V-Meter, presionar el botón Escapar una vez.

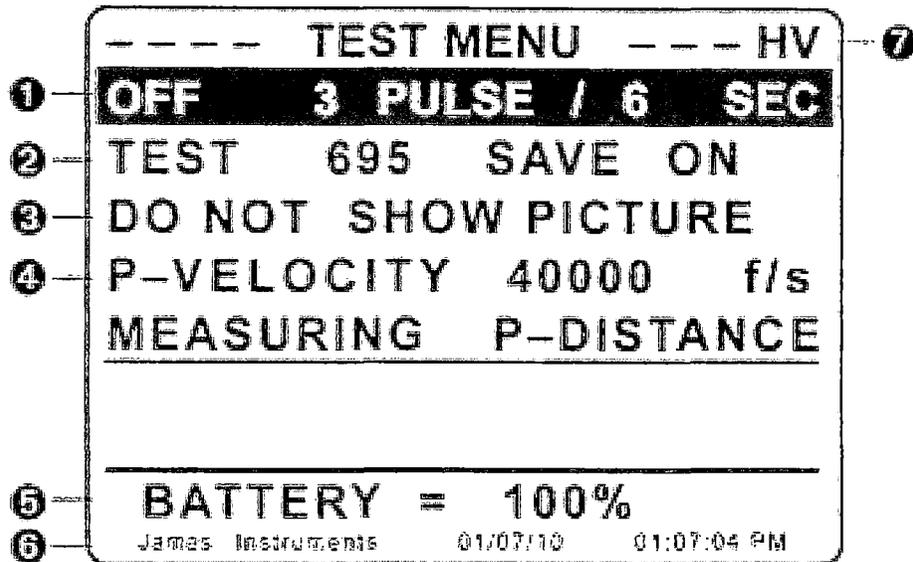


Figura D Menú de Prueba  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.

1 Muestra si el equipo está detenido o realizando una prueba y le permite elegir el número de pulsos enviados, así como la frecuencia de la prueba. Al pulsar "→" cambia la frecuencia de los impulsos, la tecla "←" cambia el número de pulsos por secuencia. Al pulsar **Enter** se ejecuta y se detiene la prueba.

2 Muestra el número de prueba y si la prueba se guarda o no. Al presionar "→" en ON se permite que los resultados de la prueba se guarden y cuando está en OFF apretando en "←" los resultados de la prueba no se guardan. Cuando la opción SAVE ON aparece en la pantalla de todas las pruebas realizadas se guardan automáticamente en la memoria.

3 Muestra el comportamiento de la señal ultrasónica cuando la opción está activada. Al presionar "→" cambia para mostrar la IMAGEN del comportamiento de la Onda y presionando "←" cambia para NO MOSTRAR IMAGEN.

4 Muestra P-Distance (distancia de la trayectoria) o el P-Velocity (velocidad de pulso). Al presionar "→" o "←" se selecciona entre P-DISTANCIA y P-VELOCIDAD. Esta opción permite al operador medir la distancia entre los transductores suponiendo un valor de la distancia o de la velocidad. Al pulsar la tecla Intro, este menú permite al operador inicializar el valor de distancia o velocidad, independientemente de la variable seleccionada para la medición. El sistema de la computadora, entonces corre algunos ciclos para medir el tiempo, y

calcula la otra variable. Para nuestro interés en todas las pruebas utilizaremos P-Velocity para ello ingresaremos la distancia entre los transductores.

5 Muestra el porcentaje de batería disponible

6 Muestra la fecha y hora

7 Muestra el voltaje de los pulsos. Las letras HV (High Voltage/ Alto Voltaje) o LV (Low Voltage/ Bajo Voltaje), esto permite seleccionar los niveles de voltaje de los pulsos. Se recomienda utilizar HV para la mayoría de los casos excepto cuando los especímenes de las muestras tengan dimensiones menores a 2" (5cm). El nivel del Voltaje puede ser modificado en el Menú Setup (Menú Configuración).

## **FRECUENCIA DE LOS PULSOS DE LOS TRANSDUCTORES**

Cuanto mayor sea la frecuencia de impulsos del transductor, más estrecho será el haz o espectro de propagación de los pulsos, pero mayor será la atenuación (o amortiguación) de las vibraciones de pulso.

La frecuencia de pulso utilizado para las pruebas de concreto o madera es mucho menor que el utilizado en las pruebas en los metales. Pruebas en metales requieren pulsos de alta frecuencia para proporcionar un haz estrecho de energía, pero esas frecuencias no son adecuadas para su uso con materiales heterogéneos con partículas de cuarzo debido a la considerable cantidad de atenuación a los que se someten los pulsos cuando pasan a través de estos materiales.

Las frecuencias adecuadas para materiales heterogéneos van desde alrededor de 20 kHz a 250 kHz. Estas frecuencias corresponden a longitudes de onda que varían desde aproximadamente 8 pulgadas (para la frecuencia más baja) hasta aproximadamente 0,6 pulgadas en la frecuencia más alta. Para las pruebas de campo en estructuras de concreto 50 kHz es la frecuencia más utilizada.

## **PULSOS y FRECUENCIA**

Esto se puede modificar dependiendo de qué material está siendo ensayado. Normalmente tres pulsos cada cuatro segundos son adecuados para las pruebas de concreto y madera. Un solo pulso es normalmente suficiente para la cerámica y materiales de grano fino. Frecuencias más largas son útiles para materiales muy

densos. Mayor número de pulsos por lectura es mejor para materiales más porosos (concreto con agregados grandes, madera severamente descompuesta).

#### **Para cambiar la frecuencia del pulso y la frecuencia:**

Utilizando las teclas Flecha Hacia Arriba o Abajo y desplácese a Test Menú y pulse Entrar.

Pulsando Flecha a la Izquierda puede cambiar el número de impulsos por secuencia. Opciones de pulso disponible son (1, 3, 10).

Pulsando Flecha a la Derecha se puede cambiar la frecuencia. Las frecuencias disponibles son (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 segundos, y manual. Esta frecuencia significa el intervalo de tiempo en el que se generan los pulsos.

Pulsando ENTER se arranca o detiene la prueba.

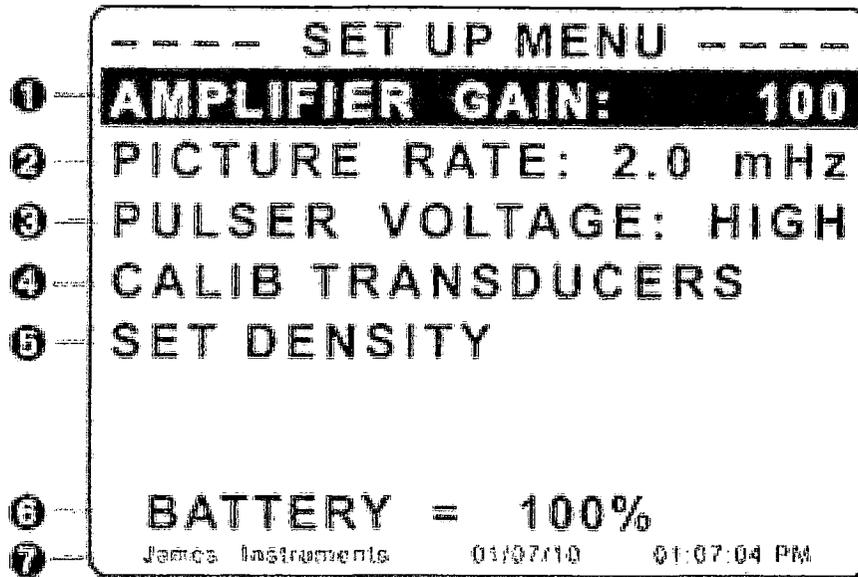
#### **INICIAR O DETENIR UNA PRUEBA**

Para iniciar/detener una prueba:

1. Conecte el instrumento V-Meter a los transductores usando el cable del transductor correspondiente suministrado por el fabricante. Asegúrese de que cada transductor está bien conectado y que está fijado en el lugar adecuado en el Instrumento V-Meter y que cada transductor está firmemente instalado en su conector.
2. Aplique acoplante en cada cara de los transductores, asegurándose de que toda la superficie del transductor está cubierto adecuadamente.
3. Utilizando las teclas, desplácese a Test Menú y pulse Entrar.
4. Acoplar los transductores a la superficie del material y pulse ENTER p presionar el botón Verde del transductor receptor.
5. A medida que cada serie de pulsos pasa desde el transductor hasta el transductor receptor aparece la señal ultrasónica en la pantalla.
6. Pulse Intro o el botón verde del transductor receptor para detener la prueba. Si no se recibe el impulso transmitido, o cuando los transductores son retirados del elemento de la prueba, la pantalla mostrará el mensaje "NO SIGNAL"

## MENÚ SETUP O DE CONFIGURACIÓN

El menú de configuración, ver Figura E, se utiliza para configurar el aumento del amplificador, la resolución de las imágenes, el voltaje de los impulsos, calibrar los transductores y establecer la densidad de los materiales.



*Figura E Menú de Configuración.  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.*

1 Muestra el nivel del amplificador. Al presionar "→" aumenta el nivel del amplificador y presionando "←" disminuye. Los siguientes niveles de los amplificadores están disponibles (1, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500). El nivel de 500 se recomienda con el fin de maximizar la cantidad de energía proporcionada por el instrumento. En caso en que la amplitud de la onda o energía de las ondas tiene que ser controlada, la ganancia o nivel del amplificador se puede establecer por parte del usuario, por lo general se selecciona la ganancia máxima que permite la visualización de la amplitud máxima de la señal en la pantalla. Se evitará interferir la señal cuando se controla la amplitud de onda.

2 Muestra la imagen Rate. Al presionar "→" aumenta la tasa de imagen y pulsando "←" disminuye la tasa de imagen. Las siguientes frecuencias de imagen están disponibles (250kHz, 500kHz, 1.0MHz, 2.0MHz). El usuario puede seleccionar la calidad de la imagen.

**3** Muestra el voltaje del generador de impulsos. Al presionar "→" cambia el voltaje de impulsos a HV, presionando "←" cambia el voltaje de impulsos a LV. HV es el valor predeterminado para el voltaje de los impulsos. Se recomienda utilizar alto para la mayoría de los casos excepto cuando se analiza muestras de menos de 2 "(5 cm) de espesor.

**4** Permite al usuario calibrar el sistema. Presionando Enter calibra el sistema para el tipo de transductores y cables que van a ser utilizados. Para hacerlo, hay que colocar los transductores en contacto utilizando agente de acoplamiento y luego presione INTRO y esperar que en pantalla se visualice "CALIBRATION IS DONE" lo que indica que la calibración fue realizada correctamente. Cuando no se obtenga este resultado se recomienda utilizar más acoplante y reiniciar la Calibración.

**5** Permite al usuario ajustar la densidad. Al pulsar ENTER en la opción SET DENSITY, se puede ajustar la densidad. La densidad se utiliza en el cálculo del módulo de Young. El valor recomendado para el hormigón normal es de 2400 kg / m<sup>3</sup> ó 150 lbs / ft<sup>3</sup>. Esto también se puede acceder desde la E /  $\mu$  Menú.

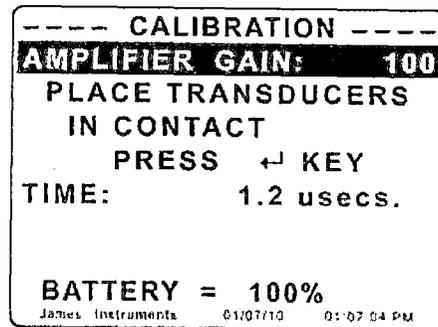
**6** Muestra la vida actual de la batería en porcentaje.

**7** Muestra la fecha y hora.

## PANTALLA DE CALIBRACIÓN

Con el fin de calibrar el instrumento para un conjunto dado de transductores y cables, es necesario determinar el tiempo mínimo para que el pulso sea detectado por el receptor, el cual debe ser cercano a cero o cero. Ver Figura F donde se muestra la pantalla de calibración.

**Nota:** No se requieren realizar calibraciones adicionales después de la calibración inicial, a menos que se cambien los transductores y cables. El sistema tiene una lectura para cada valor de los niveles del amplificador y guarda el resultado como un desplazamiento que se debe restar de todas las lecturas futuras.



*Figura F Menú de Calibración.  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.*

Se accede a la pantalla de calibración en el Menú Configuración.

#### PANTALLA DE AJUSTE DENSIDAD

La densidad se utiliza en el cálculo del módulo de Young. El valor recomendado para el concreto normal es de 2400 kg / m<sup>3</sup> ó 150 lbs / ft<sup>3</sup>. También se puede acceder desde la E /  $\mu$  Menú.

#### MENÚ REVISION DE ENSAYOS REALIZADOS (REVIEW MENU)

El menú para revisión se utiliza para revisar los resultados de las pruebas y obtener información detallada acerca de la prueba.

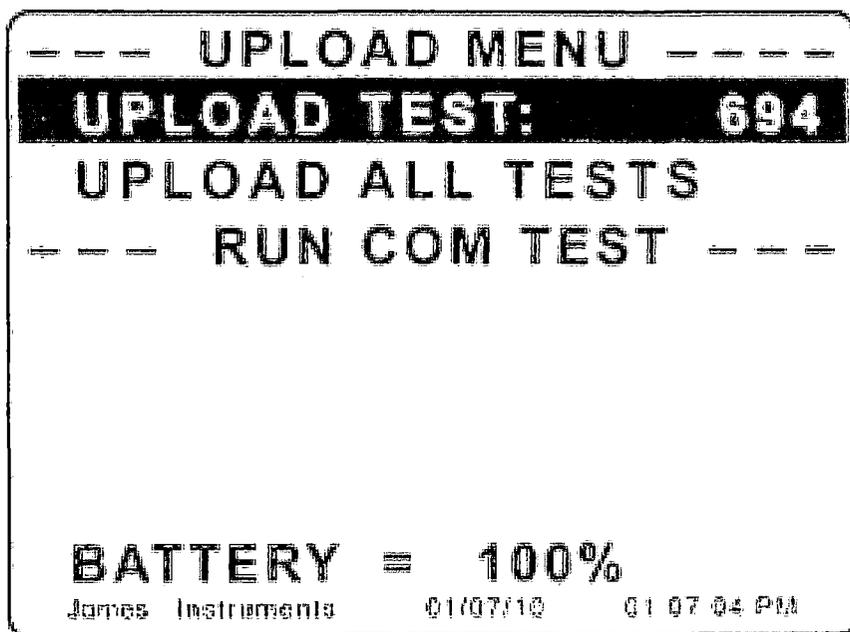
#### MENÚ DEL SISTEMA (SYSTEM MENU)

El menú del sistema se utiliza para cambiar el color de la pantalla, elegir el idioma, las unidades, la hora y la fecha, y los niveles de la batería. Cualquier dato guardado también se puede borrar desde este menú.

#### MENÚ DE DESCARGA DE INFORMACIÓN (UPLOAD MENU SCREEN)

El software para PC que ha sido desarrollado para el V-Meter es para propósitos de descarga de datos, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El V-Meter tiene la capacidad de transferir los datos guardados en la memoria V-Meter a un PC mediante un cable USB e instalando el programa que se encuentra en el CD suministrado.



*Figura G. Menú de descarga de data  
Fuente: Manual de usuario del Fabricante.*

#### POSICION DE LOS TRANSDUCTORES

El transductor receptor detecta la llegada de ese componente del pulso, que llega antes que los demás. Aunque la dirección en la cual se propaga la mayor cantidad de energía es en ángulo recto a la cara del transductor transmisor, sin embargo es posible detectar pulsos, que han viajado a través del concreto en alguna otra dirección. Es posible, por lo tanto, para realizar mediciones de la velocidad de la onda mediante la colocación de los dos transductores, en las siguientes posiciones:

- Transductores en lados opuestos (transmisión directa)
- Transductores en lados adyacentes (transmisión semi-directa)
- Transductores en el mismo lado (transmisión indirecta o de superficie)

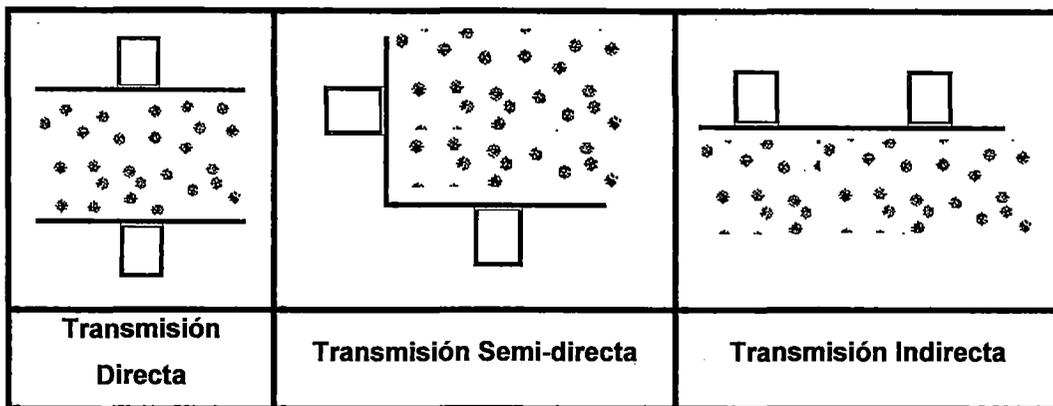


Figura G. Posición de los Transductores: directa, semi directa e indirecta.  
 Fuente: Manual de usuario del Fabricante.

### **Transmisión directa**

Donde sea posible la disposición de transmisión directa debe ser usada ya que la transferencia de energía entre los transductores es máxima, con lo cual la exactitud para determinar la velocidad de la onda se regirá principalmente por la exactitud de la medición de la longitud de la trayectoria (distancia entre las dos caras). El gel de acoplamiento utilizado debe untarse lo más homogéneo posible para evitar efectos finales resultantes de las diferentes velocidades entre acoplante y concreto.

### **Transmisión semi-directa**

La disposición de transmisión semi-directa tiene una sensibilidad intermedia entre las de los otros dos disposiciones y, aunque puede haber alguna reducción en la precisión de la medición de la longitud del camino, en general se encontró que es suficiente tomar la distancia medida de centro a centro de las caras de los transductores.

### **Transmisión indirecta**

La transmisión indirecta, se debe usar sólo cuando una cara del concreto es accesible, cuando se va a determinar la profundidad de una grieta superficial o cuando la calidad de la superficie de concreto relativa a la calidad total es de interés.

Es el menos sensible de los arreglos y, para una longitud de camino dado, produce en el transductor de recepción una señal que tiene una amplitud de sólo alrededor del 2% al 3% de la producida por transmisión directa. Además, esta disposición proporciona las velocidades de pulso que suelen estar influidas por el concreto

superficial. Esta región es a menudo de composición diferente a la del concreto dentro del cuerpo de una unidad y los resultados de la prueba pueden ser no representativos. La velocidad indirecta es invariablemente menor que la velocidad directa sobre el mismo elemento de concreto.

## APLICACIONES UTILIZANDO EL V-METER MK IV

### Medición de la velocidad de la ONDA ultrasónica

Para llevar a cabo esta prueba debe tenerse mucho cuidado en medir la distancia entre los transductores.

Es muy sencillo realizar este ensayo.

1. Instalar los transductores con los correspondientes cables, cada transductor tiene su cable (difícil equivocarse), al equipo.
2. Encender y en el Menú Setup (Ver Figura H):

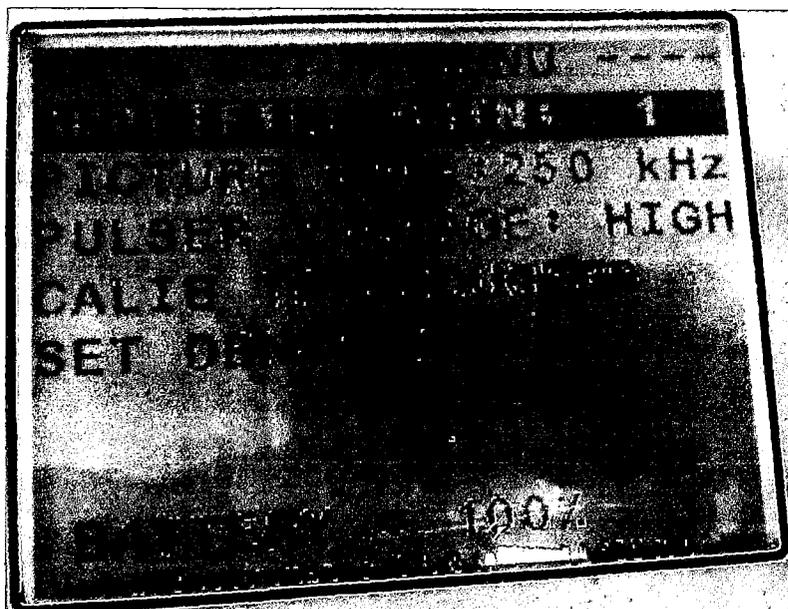
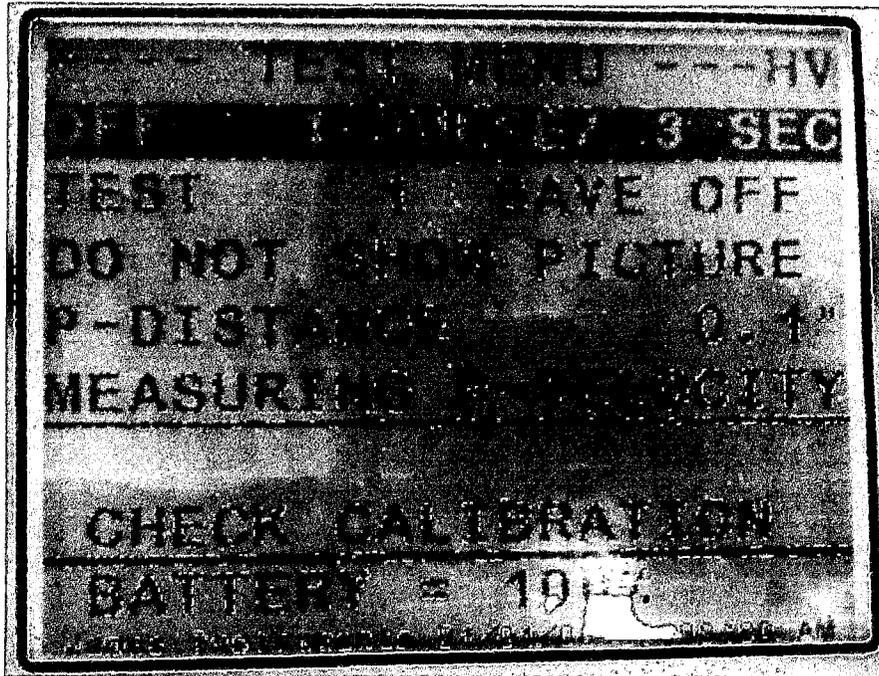


Figura H Función Amplifier Gain del Menú de Configuración.  
Fuente: Elaboración propia.

- 2.1. Posicionarse en Amplifier Gain y con la Flecha Derecha subir hasta 500.
- 2.2. Posicionarse en Picture Rate y con la Flecha Derecha subir hasta 2MHz
- 2.3. Ingresar a "CALIB TRANS" y poner en la superficie de cada transductor el Acoplante y juntarlos para dar ENTER e iniciar la calibración. Se escucharán unos chasquidos o golpes y en el display del equipo el tiempo irá disminuyendo hasta finalmente obtener "CALIBRATION IS DONE", si no fuera así, utilizar una mayor cantidad de acoplante esparcido uniformemente en la superficie de los transductores y realizar nuevamente la Calibración.

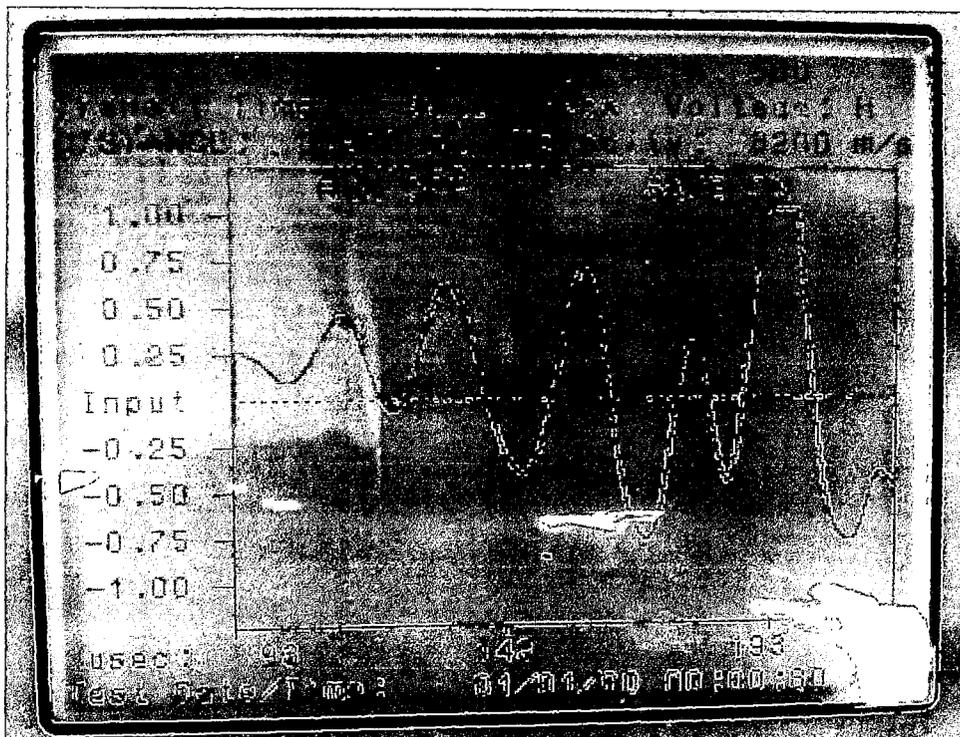
3. Ir al TEST MENU (ver Figura I):



*Figura I Menú de prueba  
Fuente: Elaboración propia.*

- 3.1. En el primer menú, presionando Flecha izquierda, poner "1 PULSE" y presionando flecha derecha poner en "Manual".
- 3.2. En el segundo menú "TEST", presionar Flecha Derecha para que aparezca "SAVE ON", esto permitirá que los resultados y gráficos de las pruebas se guarden.
- 3.3. En el tercer Menú, con la Flecha Derecha configurar "Show Picture", lo que permite visualizar la forma de la onda en el Display cuando se realice la prueba.
- 3.4. Finalmente, en el cuarto Menú, dar ENTER y en la nueva ventana ingresar la distancia entre los transductores. Utilizar ESC para regresar al Test Menú.
4. Cuando los transductores se encuentren acoplados en el elemento de prueba con suficiente GEL ACOPLANTE dar ENTER y automáticamente se escuchará el chasquido o sonido que genera los pulsos ultrasónicos.
5. Visualizar la imagen del comportamiento de la ONDA y anotar la velocidad de la onda, la misma que se visualiza en la parte superior derecha de los resultados, tal como se puede ver en la figura líneas abajo.

6. Repetir la prueba en el mismo lugar 3 a 5 veces, esto garantizará que los resultados obtenidos son convergentes a un mismo valor.
7. El operador podrá optar por utilizar el promedio de los valores obtenidos o el valor que más veces se repitió durante las pruebas en cada lugar.



*Figura J Resultados de un ensayo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

Tener bastante cuidado cuando se realiza la prueba, los transductores deberán permanecer quietos, un leve movimiento altera los resultados, la *Figura J* es un resultado típico de un ensayo utilizando el V-Meter MK IV en un elemento de concreto.

## Medición de la profundidad de la Grieta

Realizar la prueba de acuerdo al manual de usuario del fabricante y a la norma BS EN 12504-4 (2004). Ensayos en Concreto. Determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos.

Se deberá ubicar los Transductores en puntos equidistantes de la grieta a una distancia "X", de acuerdo a la imagen líneas abajo y se medirá el Tiempo (T1) de transito de la onda ultrasónica, Ver Figura K.

Realizar la medición del tiempo T2, cuando los transductores se ubican a "2 X" de la grieta.

Aplicar la Formula y calcular la profundidad de la grieta "C".

$$C = X_1 \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$$

En caso, no se pueda resolver la raíz cuadrada el OPERADOR experimentado podrá aumentar o disminuir el valor "X" hasta obtener resultados reales.

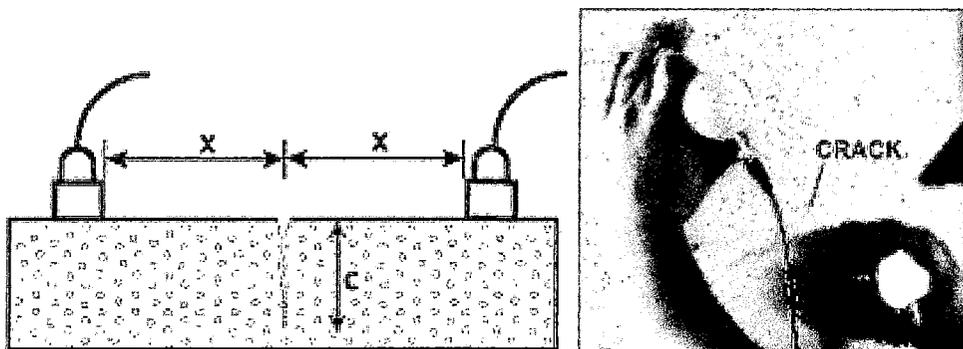


Figura K. Esquema para realizar la determinación de la profundidad de las grietas.  
Fuente: Manual de usuario del fabricante.

Para determinar el tiempo de transito de la onda en las dos posiciones:

Realizar el procedimiento PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA ONDA hasta el punto 5. No es necesario realizar el paso 3.4 en cuanto lo que se requiere en este caso es el Tiempo de transito de la onda ultrasónica y no la velocidad, por lo que no se requiere ingresar la distancia entre las caras de los transductores.

Como se darán cuenta, la medición se realiza en transmisión semi-directa.

### Medición del Módulo de Elasticidad

Es necesario conocer previamente la densidad del concreto que será materia de prueba.

Se realizará el mismo procedimiento PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA ONDA, y deberá ingresar en el paso 2. Setup Menú, la densidad del concreto. Para esto posicionarse en Set Density y dar ENTER. En la nueva pantalla ingresar el valor de la densidad del concreto y continuar con el procedimiento PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA ONDA.

Para visualizar el módulo de Elasticidad, en el Menú Principal (Main Menú) ubicarse en E /  $\mu$  Menú Screen y dar ENTER, en la Figura L se muestra el menú de los parámetros de la elasticidad del concreto.

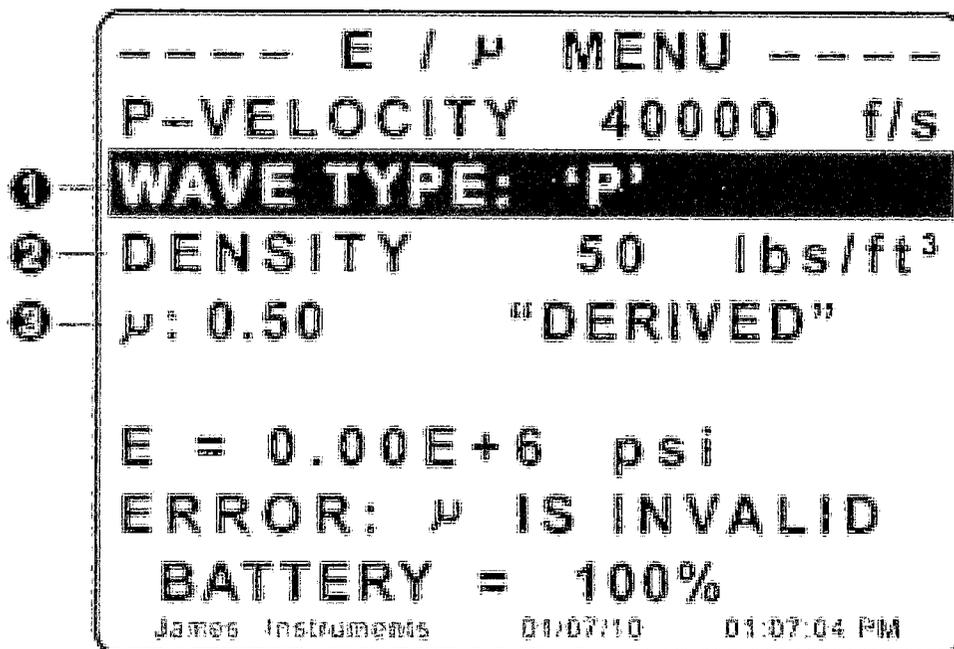


Figura L. Menú parámetros de Elasticidad.  
 Fuente: Manual de usuario del fabricante.

1 TIPO DE ONDA - Al pulsar "→" o "←" cambia el tipo de onda. El sistema permite la selección de ondas de compresión (P) y transversales (S), para ello deberá contarse con transductores que trabajen con este tipo de ondas. El sistema no puede detectar qué tipo de onda está siendo monitoreado. Es necesario, por tanto, para el operador especificar el tipo

de onda, para que las funciones  $\mu$  (Ratio de Dynamic Poisson) y E (módulo de Young de elasticidad dinámico) se calculen correctamente.

2 DENSIDAD - La densidad se utiliza en el cálculo del módulo de Young. El valor recomendado para el hormigón normal es de 2400 kg / m<sup>3</sup> ó 150 lbs / ft<sup>3</sup>. Esto también se puede acceder desde el menú de configuración.

3 E /  $\mu$ -TYPE - Este equipo le da al operador tres opciones para calcular  $\mu$ .  
E simple

Derivado  $\mu$ :  $\mu$  se calcula después de cada lectura.

Arbitraria  $\mu$ :  $\mu$  es fijado por el operador (para el concreto, se recomienda  $\mu = 0,17$ ), y se mantiene como una constante.

Dependiendo de las condiciones, el equipamiento disponible y la experiencia del OPERADOR se determinarán el módulo de elasticidad de Young y de Poisson.