

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO Y CARACTERIZACION MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDO DE MATERIALES COMPUESTOS CONCRETO - RASPADURA DE CAUCHO (RIPIO)

**Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para Optar al Título de Ingeniero Químico
Por el Br. Luis Alberto Vásquez Coraspe**

Caracas, Diciembre de 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO Y CARACTERIZACION MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDO DE MATERIALES COMPUESTOS CONCRETO - RASPADURA DE CAUCHO (RIPIO)

Tutores:

Ing. Carmen Albano (UCV)

Ing. Jacobo Reyes (UCV)

**Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para Optar al Título de Ingeniero Químico
Por el Br. Luis Alberto Vásquez Coraspe**

Caracas, Diciembre de 2003

INDICE

INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	X
INTRODUCCION	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
OBJETIVOS.....	4
CAPITULO I.....	5
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.- CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS DE CONTROL Y ENSAYO DEL CONCRETO.	5
2.- RESEÑA HISTÓRICA DEL MÉTODO ULTRASÓNICO.	9
3.- ULTRASONIDO	10
3.1.- <i>Tipos de ondas elásticas.</i>	11
3.2.- <i>Características de los sistemas ultrasónicos.</i>	12
3.3- <i>Conceptos fundamentales.</i>	13
3.4- <i>Atenuación Ultrasónica.</i>	18
4.- MÉTODOS ULTRASÓNICOS: PULSO.....	19
4.1- <i>Generalidades</i>	19
4.2- <i>Principio del método:</i>	21
4.3- <i>Procesos de generación de las ondas.</i>	23
5.- PARÁMETROS QUE INFLUENCIA LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN EL CONCRETO.	26
6.- INFLUENCIA EN LAS CONDICIONES DE ENSAYO	28
6.1.- <i>Longitud de la trayectoria del pulso.</i>	28
6.2.- <i>Dimensiones del elemento a ensayar.</i>	28
6.3.- <i>Contenido de humedad.</i>	29
6.4- <i>Edad del concreto.</i>	29
6.5.- <i>Relación agua cemento.</i>	29
6.6- <i>Relación agregado cemento.</i>	30
7.- GENERACIÓN DE PULSOS ULTRASÓNICOS. PIEZOELECTRICIDAD.	30
7.1.- <i>Los palpadores o transductores.</i>	32
8.- TÉCNICAS DE MEDICIÓN.....	34
8.1- <i>Transmisión Directa.</i>	35
8.2- <i>Transmisión Semidirecta</i>	35

8.3- <i>Transmisión indirecta o superficial</i>	36
9.- GENERALIDADES DEL CONCRETO.	37
9.1- <i>Relación entre la velocidad de propagación y la resistencia del concreto</i>	39
10.- NEUMÁTICOS.....	43
10.1- <i>El Caucho</i>	43
10.2- <i>Aditivos del caucho</i>	44
10.3.- <i>Polvo de raspa (ripio)</i>	45
CAPITULO II	46
ANTECEDENTES	46
CAPITULO III	52
METODOLOGÍA	52
1.- MATERIALES DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.	52
1.1- <i>Agregados</i>	52
1.2- <i>Cemento</i>	54
1.3- <i>Adiciones</i>	55
1.4- <i>Tratamiento del caucho</i>	55
2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS	56
3.- DISEÑO DE MEZCLAS.	57
4.- MEZCLADO.....	59
5.- ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS.	59
6.- ENSAYOS ULTRASÓNICOS.	60
7.- DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.	61
CAPITULO IV	65
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
1.- GENERALIDADES	65
2.- ANÁLISIS SEGÚN EL PORCENTAJE DE CAUCHO PRESENTE EN LA MUESTRA.....	68
2.1.- <i>Concreto con caucho reciclado, retenido en el tamiz #30</i>	68
2.2.- <i>Concreto con caucho reciclado, retenido en el tamiz #50</i>	77
3.- ANÁLISIS SEGÚN EL AGENTE DE ACOPLAMIENTO UTILIZADO.	82
4.- ANÁLISIS SEGÚN EL TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	88
5.- RESISTENCIA ACÚSTICA Y COEFICIENTE DE ATENUACIÓN.	92
6.- ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.....	96
6.1.- <i>Módulo de Elasticidad dinámico</i>	96
6.2.- <i>Resistencia a la compresión</i>	104
CONCLUSIONES	109
RECOMENDACIONES	112

BIBLIOGRAFIA	114
ANEXOS.....	117
APÉNDICE A. NORMAS Y MÉTODO DE ENSAYO.	117
1.- MÉTODO PARA MEZCLADO DE CONCRETO EN EL LABORATORIO (NORMA COVENIN N° 354, ASTM: C 192-69).....	117
1.1- Alcance.....	117
1.2- Aparatos.....	117
1.3.- Mezclado de concreto.	118
2.- MÉTODO PARA LA ELABORACIÓN, CURADO Y ENSAYO DE PROBETAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO (NORMA COVENIN N° 338, ASTM: CON 1-63).....	118
2.1.- Alcance.....	119
2.2.-Aparatos.....	119
2.3.- Preparación del molde.....	119
2.4.- Elaboración de las probetas.....	119
2.5.- Curado de las probetas.....	120
3.- MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL CONCRETO (NORMA COVENIN N° 1681-80, ASTM: C-597-79).....	120
3.1.- Alcance.....	120
3.2.- Aparatos.....	121
3.4.- Determinación de la velocidad de propagación de ondas en el concreto....	121
APÉNDICE B. CÁLCULOS	122
APÉNDICE C. GRÁFICOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS.....	124
APÉNDICE D. DATA EXPERIMENTAL	127
APÉNDICE E. GRÁFICAS DE VELOCIDAD DE PULSO VS. EDAD DEL MATERIAL.....	134
APÉNDICE F. DATOS DE DENSIDAD Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EMPLEADOS.....	141
APÉNDICE G. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA	142
APÉNDICE H. PROPIEDADES DEL MATERIAL MODELADAS POR EL PROGRAMA.....	149
APÉNDICE I. GRÁFICAS DE RESISTENCIA ACÚSTICA VS. EDAD DEL MATERIAL.....	156
APÉNDICE J. COEFICIENTE DE ATENUACIÓN	159

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Clasificación según la rama de la física.....	6
Figura N° 2 Clasificación según las propiedades del material bajo estudio.....	7
Figura N° 3 Ensayos no destructivos.....	8
Figura N° 4 Incidencia oblicua de una onda ultrasónica.....	15
Figura N° 5 Elemento de longitud L . Variación de la presión.....	19
Figura N° 6 Principio de medida de la velocidad ultrasónica en el concreto.....	23
Figura N° 7: Ángulo de divergencia del ultrasonido.....	24
Figura N° 8 Campo cercano l_0 y campo lejano.....	25
Figura N° 9 Esquema simplificado del concreto.....	27
Figura N° 10 Transductor.....	32
Figura N° 11: Ubicación de los transductores en las diversas técnicas de medición. Transmisión directa. Transmisión semi directa. Transmisión indirecta.....	34
Figura N° 12 Técnica de medición indirecta.....	36
Figura N° 13 Gráfico de distancia vs. velocidad de pulso ultrasónico. Transmisión indirecta.....	37
Figura N° 14 Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico; para un concreto de relación árido/cemento de 8.....	40
Figura N° 15 Relaciones entre: a) módulo elástico y velocidad de propagación del ultrasonido; b) módulo elástico, velocidad y densidad; c) relación entre el Módulo de elasticidad dinámico y estático.....	42
Figura N16: Agregado fino.....	53
Figura N17: Agregado grueso.....	53
Figura N18: Cemento tipo Portland.....	54
Figura N19: Mezcladora de eje vertical.....	59
Figura N° 20 Moldes cilíndricos.....	60
Figura N° 21: Equipo ultrasónico.....	61
Figura N° 22 Diagrama del equipo.....	62
Figura N° 23 Elemento de calibración.....	64
Figura N° 24 Transductores de 54 KHz.....	64
Figura N° 25: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, sin agente acoplante.....	71
Figura N° 26: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con agente acoplante: NaOH.....	73
Figura N° 27: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con agente acoplante: Silano.....	74
Figura N° 28: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, sin agente acoplante.....	79

Figura N° 29: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con agente acoplante: NaOH.	80
Figura N° 30: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con agente acoplante: Silano.	81
Figura N° 31: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con 5% de porcentaje de caucho.	82
Figura N° 32: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con 10% de porcentaje de caucho.	84
Figura N° 33: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con 5% de porcentaje de caucho.	85
Figura N° 34: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con 10% de porcentaje de caucho.	87
Figura N° 35: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado sin tratar.	89
Figura N° 36: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado tratadas con NaOH.	90
Figura N° 37: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado tratadas con Silano.	91
Figura N° 38: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.	101
Figura N° 39: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.	101
Figura N° 40: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: NaOH.	102
Figura N° 41: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: NaOH.	102
Figura N° 42: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: Silano.	103
Figura N° 43: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: Silano.	103
Figura N° 44: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.	105
Figura N° 45: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.	105
Figura N° 46: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: NaOH.	106
Figura N° 47: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: NaOH.	106
Figura N° 48: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: Silano.	107

Figura N° 49: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: Silano.	107
Figura N° 50 Ley de Abrams.....	124
Figura N° 51 Relación Arena/Aragado Grueso	125
Figura N° 52 Relación Triangular.....	126
Figura N° 53: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto normal.....	134
Figura N° 54: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #30.	135
Figura N° 55: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #30.	135
Figura N° 56: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #50.	136
Figura N° 57: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #50.	136
Figura N° 58: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: NaOH.	137
Figura N° 59: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: NaOH.	137
Figura N° 60: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: NaOH.	138
Figura N° 61: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: NaOH.	138
Figura N° 62: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: Silano.	139
Figura N° 63: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: Silano.	139
Figura N° 64: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: Silano.	140
Figura N° 65: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: Silano.	140
Figura N° 66: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Entrada de datos.	142
Figura N° 67: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Primera iteración.	143

Figura N° 68: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Segunda iteración.....	144
Figura N° 69: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Procedimiento final.....	145
Figura N° 70: Diagrama de flujo del programa. Fase de modelado de las propiedades. Entrada de datos.....	146
Figura N° 71: Diagrama de flujo del programa. Fase de modelado de las propiedades. Primera iteración.....	147
Figura N° 72: Diagrama de flujo del programa. Fase de modelado de las propiedades. Segunda iteración y salida de data.....	148
Figura N° 73: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.	156
Figura N° 74: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.	156
Figura N° 75: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: NaOH.	157
Figura N° 76: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: NaOH.	157
Figura N° 77: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: Silano.	158
Figura N° 78: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: Silano.	158
Figura N° 79: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.....	159
Figura N° 80: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.....	160
Figura N° 81: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente acoplante: Silano.....	160
Figura N° 82: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.....	161
Figura N° 83: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.....	161
Figura N° 84: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente acoplante: silano.....	162

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Propiedades mecánicas y acústicas de algunos materiales.....	17
Tabla N° 2. Ensayos químicos del cemento.	54
Tabla N° 3. Ensayos físicos del cemento.....	55
Tabla N° 4. Diseño para preparar 50 litros de mezcla de concreto tradicional.	58
Tabla N° 5. Diseño para preparar 50 litros de mezcla de concreto al 5% en peso de caucho reciclado.....	58
Tabla N° 6. Diseño para preparar 50 litros de mezcla de concreto al 10% en peso de caucho reciclado.....	58
Tabla N° 7: Velocidad final de pulso ultrasónico de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.....	69
Tabla N° 8: Velocidad final de pulso ultrasónico de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.....	77
Tabla N° 9: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.	92
Tabla N° 10: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.....	93
Tabla N° 11: Coeficiente de atenuación (α) y correlación de la curva exponencial (R^2).....	95
Tabla N° 12: Módulo de elasticidad dinámico y valores de las constantes para cada mezcla.....	99
Tabla N° 13: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto normal.	127
Tabla N° 14: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #30.	128
Tabla N° 15: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #30.	128
Tabla N° 16: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #50.	129
Tabla N° 17: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #50.	129
Tabla N° 18: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.	130
Tabla N° 19: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.	130
Tabla N° 20: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.	131
Tabla N° 21: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.	131

Tabla N°22: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: Silano.	132
Tabla N°23: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: Silano.	132
Tabla N°24: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: Silano.	133
Tabla N°25: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: Silano.	133
Tabla N°26: Relación peso sobre volumen de las mezclas.....	141
Tabla N°27: Resistencia a la compresión de las mezclas.	141
Tabla N°28: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional.....	149
Tabla N°29: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #30.	150
Tabla N°30: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #30.	150
Tabla N°31: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #50.	151
Tabla N°32: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #50.	151
Tabla N°33: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.....	152
Tabla N°34: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.....	152
Tabla N°35: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.....	153
Tabla N°36: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.....	153
Tabla N°37: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: Silano.....	154
Tabla N°38: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: Silano.....	154
Tabla N°39: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: Silano.....	155
Tabla N°40: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: Silano.....	155

INTRODUCCION

Existe en la actualidad un creciente interés en la disposición y/o utilización de los elastómeros de desecho, esto se debe a los problemas ambientales que ocasionan debido al volumen que ocupan, así como las dificultades de colocación en los sitios de desecho. Una posible aplicación es la utilización de polímeros en la elaboración de materiales de construcción (concreto-polímero).

En vista del constante incremento de las necesidades del mundo en las áreas de la vivienda, transporte e industrias, es posible que el consumo de los cauchos de reciclado en productos a base de concreto, se encuentre también en aumento.

Si bien el cemento-concreto Portland es uno de los materiales más versátiles y útiles, se pueden modificar sus propiedades, tales como tenacidad y ductilidad, combinándolo con tecnologías de polímeros, en este caso elastómeros de desecho.

La caracterización de materiales a través de ensayos destructivos y no destructivos, se utiliza generalmente para calificar el material sobre la base de estándares predefinidos por diseño o de especificaciones particulares de calidad. El ensayo destructivo se distingue por un muestreo y la destrucción del producto a fin de valorar el nivel de calidad del proceso desarrollado en él. Por otro lado, los ensayos no destructivos se distinguen por calificar el sistema sin destruirlo.

El objetivo de este trabajo es estudiar y caracterizar, a través de técnicas no destructivas ultrasónicas, compuestos de concreto con caucho de reciclado (ripió), provenientes de las bandas de rodamiento de los neumáticos, cuando éstos son sometidos al proceso de reencauche.

Para la elaboración de las mezclas concreto-caucho, se utilizará caucho reciclado (ripió) de distintas granulometrías y de diferentes composiciones 5% y 10%.

Asimismo se realizarán otras mezclas en donde el caucho reciclado es tratado previamente con silano y con hidróxido de sodio (NaOH) como agentes de acoplamiento, estudiando de esta manera la influencia que tienen cada una de estas variables, sobre los cambios en la velocidad del pulso ultrasónico en el desarrollo de la resistencia, durante el proceso de envejecimiento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el fin de evitar los problemas ambientales relacionados con el creciente volumen de los elastómeros de desecho, es necesario convertirlos a través de medios muy sofisticados, por lo que se han estudiado varios métodos de colocación y/o reutilización de los mismos.

Existen diferentes métodos a través de los cuales el caucho reciclado es dispuesto. Se pueden emplear rellenos sanitarios, pero éstos presentan una serie de inconvenientes. El caucho reciclado, cuando es descargado en un relleno sanitario, queda flotando en el tope causando problemas de contaminación ambiental.

Por otra parte se tiene la incineración del caucho, en la cual se pueden aprovechar los residuos de caucho como fuente de energía, debido a su alto valor calórico. Asimismo los desechos elastoméricos pueden ser transformados en aceites y carbón mediante la pirólisis.

El reciclaje por su parte, parece ser una buena selección para la disposición final de los desechos de caucho y se perfila como un método prometedor para el futuro. Los elastómeros de reciclaje son utilizados en mezclas con asfalto para mejorar la ductilidad de los mismos, incrementando la temperatura de reblandecimiento del asfalto. De esta forma se mejoran las propiedades del material y se da un uso para estos elastómeros.

Como consecuencia de esto, surge la posibilidad de combinar el concreto a base de cemento Portland con caucho de desecho, con el fin de modificar sus propiedades, tales como la dureza, tracción, ductilidad y durabilidad.

Así la caracterización de estos materiales mediante tecnología de punta, tales como ensayos no destructivos de materiales, toma una vital importancia para evaluar el desempeño de los mismos durante su elaboración y utilización.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar y caracterizar a través de técnicas no destructivas compuestos de concreto con cauchos de reciclado (ripio) con y sin tratamiento de la superficie.

Objetivo específicos

Analizar la uniformidad y la calidad relativa de los compuestos mediante la medición de la velocidad ultrasónica.

Estudiar el comportamiento del material al envejecimiento mediante ensayos no destructivos ultrasónicos.

Estudiar el módulo dinámico de Young mediante la determinación de la velocidad ultrasónica de propagación de las ondas compresionales longitudinales.

Estudiar la influencia del relleno (ripio) y tamaño del mismo a través de la variación de la atenuación de la onda ultrasónica longitudinal mediante la técnica de transmisión directa y su correlación con diferentes propiedades mecánicas.

Estudio de la influencia de dos diferentes agentes de acoplamiento en la mezcla concreto-caucho a través de la velocidad y atenuación de las ondas ultrasónicas, analizando lo indicado en los objetivos anteriores.

Analizar la impedancia acústica en cada uno de los compuestos bajo estudio y su variación a través del proceso de curado del material.

CAPITULO I

Revisión Bibliográfica

1.- Clasificación de los métodos no destructivos de control y ensayo del concreto.

Existen muchos métodos no destructivos de ensayo y control del concreto y del concreto armado y de sus compuestos. En consecuencia es útil sistematizarlos para ello se utilizan dos criterios de clasificación:

- 1) De acuerdo a la rama de la física a la que pertenece el método.

- 2) De acuerdo a las propiedades del material bajo estudio.

La primera clasificación se muestra en la figura N°1, observándose que los métodos no destructivos expuestos pertenecen a diferentes ramas de la física: mecánica, acústica, electromagnetismo y física atómica y nuclear (1).

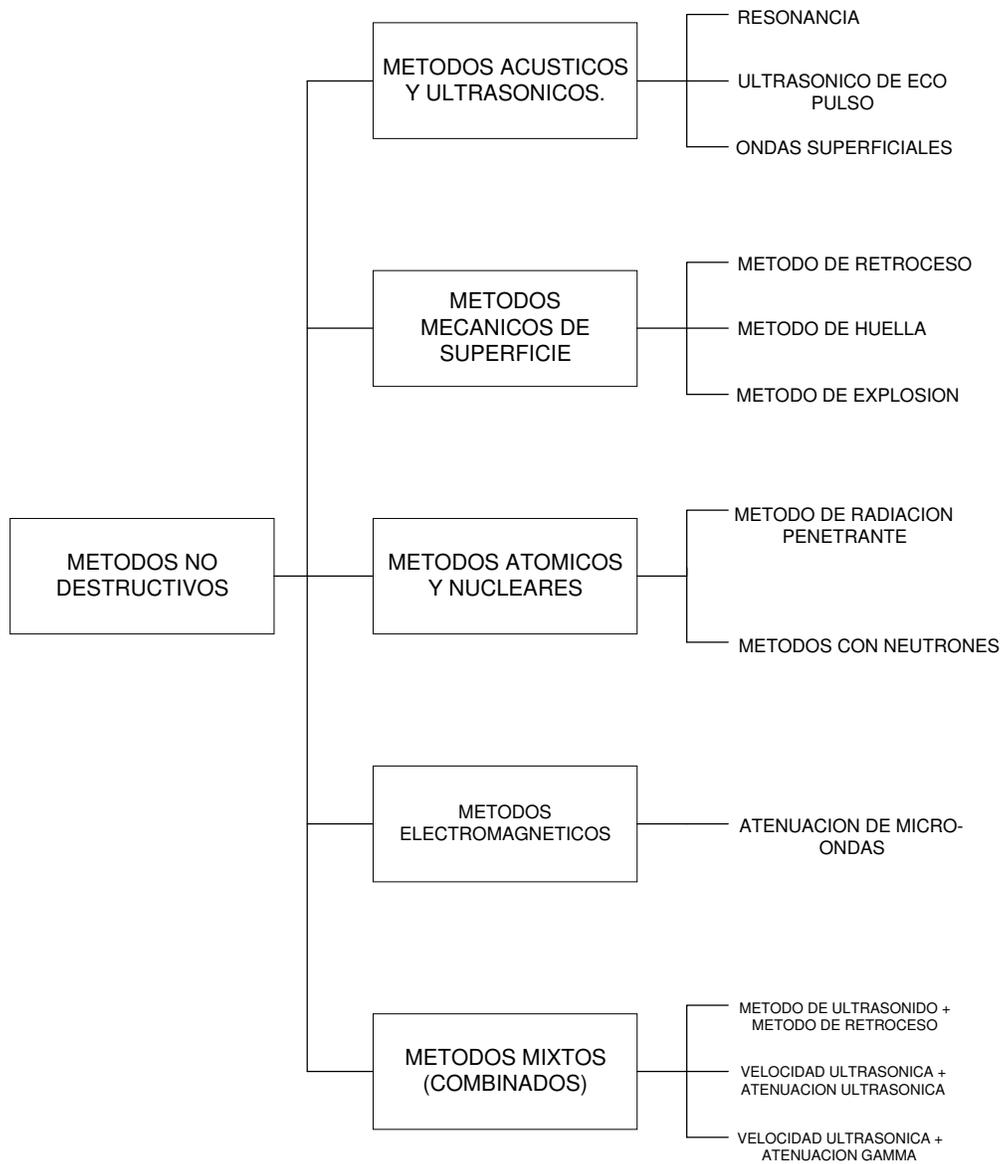


Figura N°1: Clasificación según la rama de la física

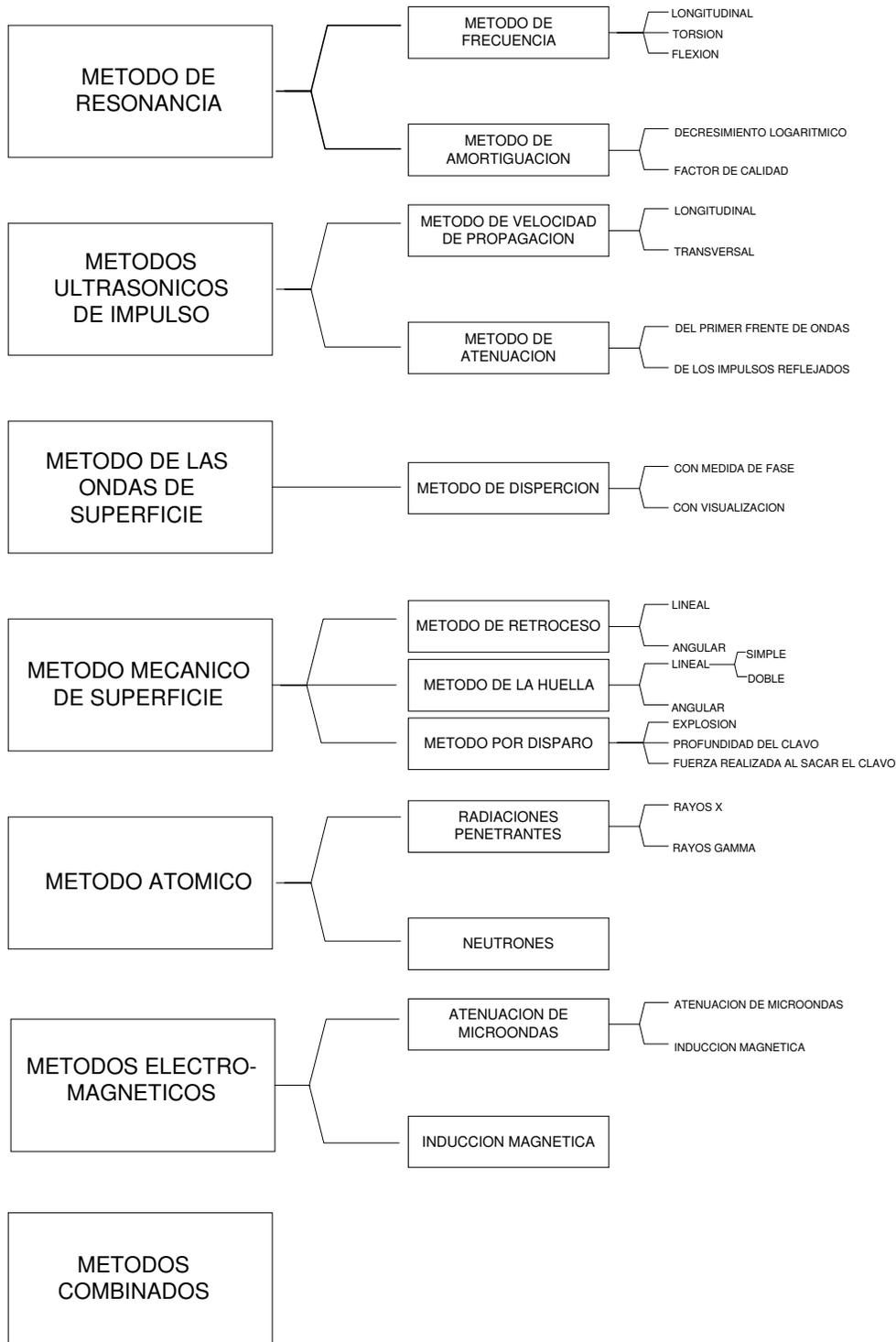


Figura N°2 Clasificación según las propiedades del material bajo estudio.

En la práctica, el especialista llamado a aplicar estos métodos está muchas veces interesado en conocer cuáles son todos los métodos que se pueden utilizar, con el fin de determinar ciertas propiedades del concreto y sus compuestos, para posteriormente hacer una selección entre los mismos. En tales casos se recomienda utilizar la clasificación general basada en las propiedades del material y que se muestra en la figura N°2. Las clasificaciones mostradas en las figuras 1 y 2 se dan a un nivel general (1).

En la figura N°3 se muestran detalladamente los métodos utilizados en los END del concreto.

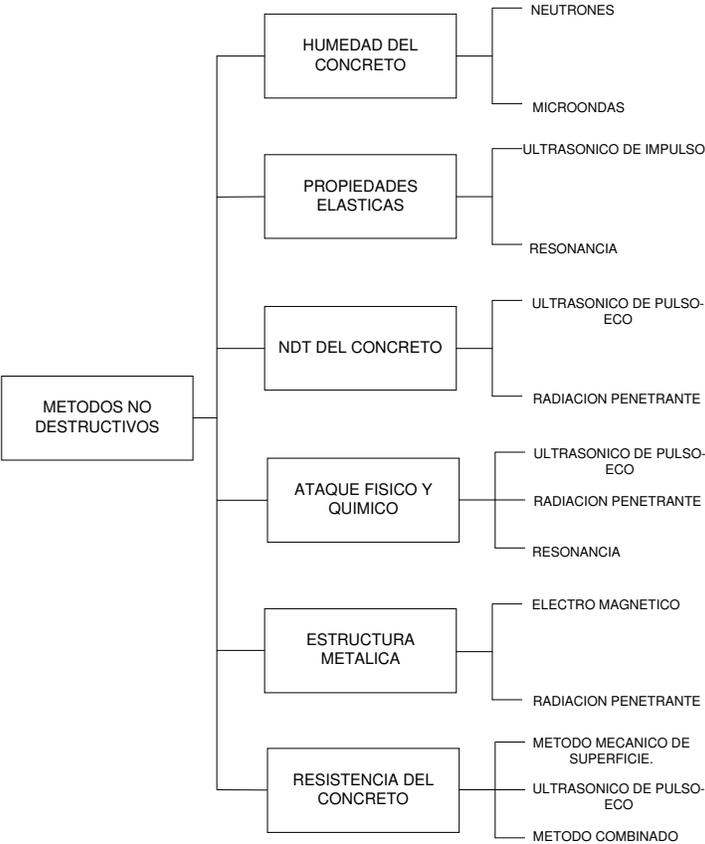


Figura N°3 Ensayos no destructivos.

En este trabajo se particulariza en un ensayo no destructivo, con base en el ultrasonido como método de inspección en el concreto y sus compuestos como material a estudiar.

2.- Reseña histórica del método ultrasónico.

Anterior a la segunda guerra mundial el sonar, técnica en la que se envía ondas sonoras a través del agua y se observa los ecos que regresan para caracterizar objetos sumergidos, fue el precursor de la técnica de medición de la velocidad del pulso ultrasónico para el ensayo de estructuras de concreto.

En 1929 y 1935, Sokolov estudio el uso de ondas ultrasónicas en la detección de objetos metálicos. Mulhauser, en 1931, obtenía una patente por usar ondas ultrasónicas, mediante el uso de dos transductores para detectar fallas en sólidos.

En 1940 Firestone y luego Simons en 1945 desarrollaron métodos de test ultrasónico usando la técnica de pulso/eco (2).

Poco después de la segunda guerra mundial, investigadores en Japón empezaron a explorar las posibilidades del ultrasonido en el diagnostico medico.

Entre los años 1946 y 1950 se inicio en Canadá la experimentación original del método ultrasónico aplicado al concreto por J.R. Leslie y W.J. Cheesman en la Ontario Hydro, y aproximadamente al mismo tiempo en Inglaterra por R. Jones en la Road Research Laboratory .

Estos trabajos mostraron que se podía aplicar el método ultrasónico al concreto, así como que existía una tendencia a la correlación entre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico (2).

Mas tarde pruebas mas detalladas realizadas en Inglaterra (3-4) así como una recopilación bastante extensa de investigaciones realizada por la Asociación del Cemento Portland, mostraron que la relación velocidad de pulso-resistencia, dependía de factores tales como el curado, tipo de agregado, contenido de humedad y composición del concreto.

A principio de los años setenta se desarrollan tanto en Holanda como en Inglaterra los primeros aparatos portátiles para la medición de la velocidad de pulso ultrasónico, siendo uno de estos instrumentos el “Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicator Tester” conocido también por sus siglas como “PUNDIT”. Dicho instrumento fue diseñado para ser usado en ensayos en obra, por lo que es de fácil uso y fácil de transportar.

3.- Ultrasonido

El espectro acústico divide el sonido en niveles de frecuencia, Sub sónico (0 Hz- 20 Hz), audible (20 Hz- 20 KHz), ultrasónico (20 KHz- 500 MHz) e hipersónico (500 MHz- GHz), de igual forma el nivel ultrasónico se divide a su vez en ultrasonido de baja frecuencia, el convencional y el de alta frecuencia (5).

Aunque el ultrasonido se comporta de manera similar al sonido audible, por ser una onda elástica, este tiene una longitud de onda (λ) mucho menor. Esto significa que el ultrasonido puede ser reflejado por superficies muy pequeñas.

Adicionalmente, las velocidades ultrasónicas tienen un valor único, a temperatura y presión fijas en sustancias perfectamente elásticas. Estas propiedades son las que permiten que el ultrasonido sea utilizado en ensayos no destructivos, tanto para caracterizar los materiales como para la detección de defectos y/o discontinuidades (5).

El nivel de frecuencia normalmente utilizado en los ensayos, no destructivos ultrasónicos y medidas de espesores es de 20 KHz a 25 MHz.

En metales se trabaja normalmente con frecuencias comprendidas entre 0,5 MHz- 25 MHz, en contacto directo entre 0,5 MHz- 15 MHz y a mayores de 15 MHz para

inmersión. En el caso del concreto, se utilizan frecuencias entre 20 KHz y 200 KHz, siendo el intervalo de 40 KHz a 150 KHz el mayormente utilizado (5).

3.1.- Tipos de ondas elásticas.

Los métodos mas comunes de examen ultrasónico utilizan tanto ondas longitudinales como ondas transversales. Adicionalmente se utilizan las ondas superficiales y las llamadas ondas de Lamb.

La onda longitudinal es esencialmente una onda de compresión-dilatación, en donde el movimiento de las partículas se da en la misma dirección que la propagación de la onda. Estas ondas se propagan en todas las sustancias: líquidos, sólidos y gases (6).

Las partículas se desplazan de su posición de equilibrio con movimiento senoidal atenuado por la fricción viscosa según:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (0.1)$$

Donde el termino exponencial, representa la envolvente de estas oscilaciones, siendo (λ) la longitud de la onda, (t) el tiempo, (ω) la velocidad angular, (ϕ) el ángulo y (A) la amplitud de la oscilación de las partículas, la cual comienza a decrecer a partir de (A_0), que es la amplitud inicial de oscilación, hasta tender a cero, cuando las partículas recuperan la posición de equilibrio (5).

La onda transversal es una onda en donde el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, propagándose solo en los sólidos y en líquidos muy viscosos.

Las ondas de superficie (Rayleigh) viajan a través de superficies sólidas muy gruesas, planas o curvas. Estas ondas muestran un movimiento longitudinal y transversal, donde cada molécula ejecuta una elipse conforme la onda se desplaza. La longitud de onda, λ_s , de estas ondas es muy corta comparada al espesor del material a través del cual viaja (5).

La relación de velocidades de estas ondas es $V_L > V_T > V_S$, siendo la velocidad de la onda superficial V_S , un 90 a un 95 % de la velocidad de la onda transversal (V_T) y esta última aproximadamente la mitad de la onda longitudinal (V_L) en el mismo material.

3.2.- Características de los sistemas ultrasónicos.

En los sistemas ultrasónicos, se tienen una serie de características de interés, relacionadas con la capacidad del sistema para caracterizar materiales.

La sensibilidad del sistema es la habilidad de una señal ultrasónica para detectar discontinuidades o defectos a una profundidad dada en un material bajo ensayo. Mientras mayor sea la señal producida por los defectos, se dice que el sistema ultrasónico es más sensible (1).

Por otro lado, la resolución axial es la habilidad de un sistema ultrasónico de manejar señales simultáneas producidas por distintos defectos, que se encuentran cercanos entre sí, dentro del haz ultrasónico (1).

La resolución de superficie es capacidad de un sistema ultrasónico de detectar discontinuidades localizadas cerca de la superficie de la pieza bajo ensayo.

3.3- Conceptos fundamentales.

Es necesario definir y explicar conceptos fundamentales, como la presión acústica, la impedancia acústica y la intensidad del sonido, así como establecer los distintos factores que se deben tomar en consideración, debido a su influencia en el tránsito de las ondas ultrasónicas, tales como la presencia de discontinuidades y la selección del medio de acoplamiento.

La propagación de ondas longitudinales está relacionada a la formación de zonas de dilatación y compresión en un material. Se puede decir que a través del material se propagan zonas de alta y baja presión (1).

Esta presión oscila con cierta amplitud alrededor del valor 0, esta amplitud de oscilación es lo que se denomina presión acústica (P).

Para las ondas longitudinales, la presión acústica resulta ser una fuerza por unidad de superficie, mientras que para las ondas transversales, la presión acústica es una fuerza de empuje por unidad de superficie, perpendicular a la dirección de propagación (1).

La impedancia acústica (Z) es una magnitud compleja, definida como el cociente entre la presión acústica (P) y la velocidad de la partícula (u) que emite una onda sonora y representa la oposición que presentan las partículas de un material a ser desplazadas por el sonido (1).

$$Z = \frac{P}{u} \quad (0.2)$$

Según esto, para determinar la impedancia acústica de un material, se debería medir la presión acústica (P) y la velocidad de la partícula en vibración (u), algo muy difícil de realizar. Por esto, se usa para el cálculo de la impedancia acústica una fórmula resultante de la teoría de las ondas elásticas:

$$Z \approx \rho \cdot v = R_a \quad (0.3)$$

Donde ρ es la densidad del medio, v la velocidad de fase y R_a es la resistencia acústica específica, la cual es una constante del material ya que depende de las propiedades características del medio, por eso se le llama también impedancia característica del medio y se mide en: $[Z] = \text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (1).

El sonido al igual que el ultrasonido transporta una cantidad de energía que utilizan las partículas del medio para ponerse en movimiento. Una magnitud acústica característica relacionada directamente con este transporte de energía es la intensidad del sonido (I), que se define como la cantidad total media de energía que pasa por la unidad de superficie por unidad de tiempo (1).

Por otra parte, se llama interfase acústica el limite entre dos materiales de diferentes impedancias acústicas.

En la incidencia normal de la onda ultrasónica sobre una interfase acústica, una cantidad de energía es reflejada y otra transmitida a través de la interfase (6).

Si la incidencia es oblicua, se forman dos ondas reflejadas, una longitudinal con velocidad (C_1) y otra transversal con velocidad (C_T) y también dos ondas elásticas refractadas, longitudinal y transversal con velocidades (C_2) y (C_T), respectivamente, tal como se muestra en la figura N°4. Estas velocidades se

relacionan entre sí y con los respectivos ángulos de incidencia (ψ), reflexión (ψ , para la onda longitudinal reflejada y ψ' para la onda transversal) y refracción (r , para la onda longitudinal y r' para la onda transversal) de acuerdo a la Ley de Snell (6):

$$\frac{\sin \psi}{C_1} = \frac{\sin \psi'}{C_T'} = \frac{\sin r}{C_2} = \frac{\sin r'}{C_T''} \quad (0.4)$$

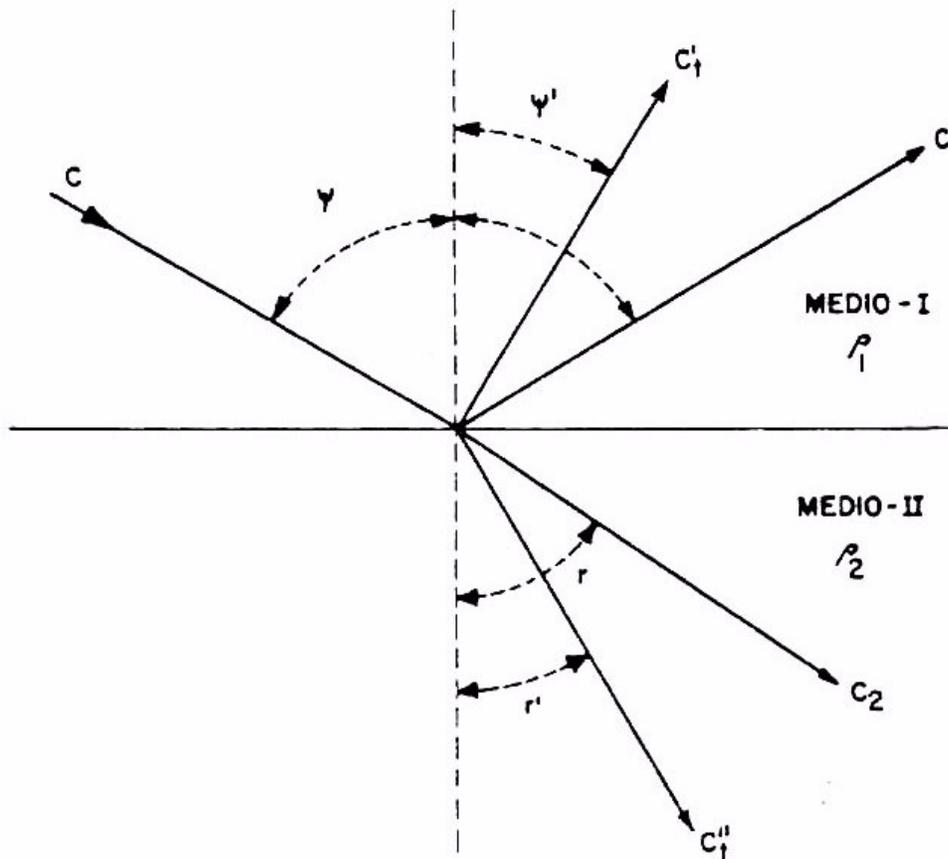


Figura N°4 Incidencia oblicua de una onda ultrasónica.

Con una distribución de energía entre los diferentes impulsos, donde e_i es la energía del haz incidente y e_r es la energía reflejada, que depende de las velocidades relativas de las diferentes ondas, de las densidades relativas de ambos medios ρ_1 y ρ_2 , así como del ángulo de incidencia del haz principal (6):

$$\frac{e_r}{e_i} = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 = \left(\frac{A_r}{A_i} \right)^2 \quad (0.5)$$

Donde A_r/A_i es la relación de amplitudes de las ondas elásticas longitudinales, reflejada e incidente.

Asumiendo que no existen reflexiones provenientes de discontinuidades o defectos en el material, el ultrasonido se atenúa a medida que viaja a través del mismo. Existen dos causas que originan la atenuación: dispersión y absorción. La cantidad de atenuación dentro de un material puede jugar un papel muy importante en la selección de un transductor en una determinada aplicación (1).

Adicionalmente, se debe tomar en consideración, que al realizar las medidas con el transductor, se forma una capa de aire entre este y el material al que se están realizando las medidas, entonces se tiene que, como el aire posee una impedancia acústica muy baja (tabla N°1), es un fuerte atenuador de las ondas ultrasónicas a altas frecuencias (6). En consecuencia, es necesario emplear un medio de acoplamiento con una impedancia acústica que no difiera demasiado de la del material a ensayar.

Entre los medios de acoplamiento mas usados se destacan, agua, aceite, glicerina, vaselina, pegamentos y algunos cauchos.

Tabla N° 1: Propiedades mecánicas y acústicas de algunos materiales.

MATERIAL	P. E. (g/cm ³)	Módulos (kg/cm ² × 10 ³)		Velocidades (m/s)			Impedancia acústica (10 ⁶ u. c. g. s.)	Coeffi- ciente de Poisson
		E	E _t	c _l	c _t	c _s		
Aluminio ...	2,70	730	273	6.250	3.100	2.800	1,68	0,35
Latón	8,44	1.050	385	4.700	2.130	1.950	3,96	0,37
Cobre	8,89	1.140	410	4.620	2.130	1.950	4,09	0,37
Plomo	11,34	168	58	1.950	635	584	2,22	0,43
Mercurio ...	13,55	—	—	1.450	—	—	1,95	—
Acero	7,91	1.990	768	5.730	3.100	2.800	6,45	0,30
Aire	0,0013	—	—	330	—	—	0,0000432	—
Vidrio	2,32	—	—	5.640	3.380	2.950	1,305	—
Plexiglás ...	1,18	33,6	14,0	2.670	1.090	990	0,315	0,40
Nylon	1,11	36,4	12,4	2.615	1.065	965	0,29	0,40
Cuarzo... ..	2,65	812	—	5.750	—	—	1,52	—
Agua	1,00	—	—	1.500	—	—	0,15	—
Hormigón:								
Malo... ..	2,00	180	68	3.000	1.600	1.400	0,9	0,33
Dudoso ...	2,21	300	115	3.500	1.940	1.780	1,0	0,28
Excelente.	2,40	400	175	4.000	2.600	2.370	1,2	0,15
Madera... ..	—	—	—	3.000 a 4.000	—	—	—	—
Suelos	—	—	—	600-1.500	—	—	—	—

Donde: E y E_t son los módulos de elasticidad dinámico y estático; c_l, c_t, c_s son las velocidades de pulso longitudinal, transversal y de superficie.

Es importante, además, tomar en cuenta el estado terminal de la superficie de la muestra, la temperatura de la muestra, posibilidad de reacciones químicas entre la superficie y la unión y, finalmente, los requerimientos de limpieza (5).

3.4- Atenuación Ultrasónica.

No se a podido establecer hasta el presente una teoría general sobre la atenuación ultrasónica en medios policristalinos, debido al gran número de parámetros que intervienen, sin embargo, de los estudios realizados se puede decir que existen dos causas principales en los procesos de atenuación ultrasónicas, a saber: la dispersión y la absorción (5).

La dispersión ultrasónica puede ser por difusión y por difracción, ésta se realiza en la estructura discreta del medio, en discontinuidades tales como poros, inclusiones, etcétera.

Durante la propagación de una onda ultrasónica a través de un medio, ocurre una transformación de energía acústica a energía calórica, entonces se dice que ocurre una pérdida de energía en forma de calor (5).

La absorción se produce a través de una serie de fenómenos tales como: pérdida energía por roce interno (viscosidad), conductividad térmica, radiación térmica, fenómenos de relajación, variación de las energías cinéticas de las moléculas, variaciones de densidad, difusión debido a las diferencias de presión, termodifusión, etc (5).

En el caso de que la atenuación se produzca uniformemente en el campo ultraacústico, puede ser caracterizada mediante un coeficiente (α) llamado coeficiente de atenuación.

La variación de la presión ultrasónica es proporcional a la distancia recorrida por la onda:

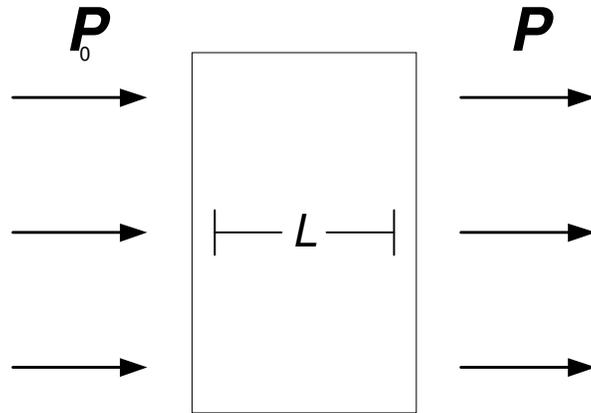


Figura N°5 Elemento de longitud L . Variación de la presión.

$$dP = -\alpha \cdot P_0 \cdot dL \quad (0.6)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad (0.7)$$

Donde P_0 es la presión inicial y P la presión final de la distancia L . El exponencial αL se mide en Neper o en decibels, por lo que las unidades de α son $[dB/cm]$ o $[Neper/cm]$ (5).

4.- Métodos ultrasónicos: Pulso

4.1- Generalidades

La esencia del método se basa en la medición de velocidades, lo cual se fundamenta en la determinación del tiempo que tarda una onda ultrasónica en atravesar el concreto y a partir de esto, se calcula la velocidad del pulso (1).

A través de correlaciones de velocidad se infieren valores de la resistencia o de la calidad, o ambos, en el concreto y sus compuestos.

En muchos países se ha normalizado (normas) este procedimiento. Entre los estándares mas destacados se tienen los británicos (BS), americanos (ASTM), alemanes (DIN), rusos (GOST) y eslovacos (STN) (1).

Los métodos ultrasónicos de pulso son, probablemente, los más utilizadas entre los NDT del concreto, esto se debe a lo siguiente:

1. Se pueden utilizar prácticamente sobre cualquier forma de elemento o de estructura.
2. Se pueden utilizar sobre cualquier espesor.
3. Se pueden utilizar en el ensayo de elementos con una sola cara accesible.
4. Provee información relativa a la calidad del concreto.
5. Las medidas experimentales se realizan rápidamente.
6. Los resultados obtenidos son representativos para la totalidad de la distancia recorrida por el ultrasonido.
7. El precio del instrumental es relativamente bajo.
8. Se pueden localizar zonas defectuosas en un elemento o una estructura.

Las correlaciones y el manejo de la data obtenida por este método presenta riesgos debido a su dependencia de un gran número de parámetros entre los cuales se destacan:

- a) Técnica de medida
- b) Frecuencia de la señal
- c) Dimensiones geométricas
- d) Dirección del ensayo relacionado a la dirección del vaciado
- e) Humedad y tratamiento térmico aplicado al concreto en el secado
- f) Composición.

Actualmente, la validez del método se reconoce para las siguientes aplicaciones:

- a) Localización de las zonas con defectos durante el vaciado.
- B) Determinación de los espesores de las capas degradadas por acciones físicas (fuego, congelamiento) o químicas (corrosión)
- c) Homogeneidad en la calidad del concreto.
- d) Determinación de unas constantes elastodinámicas del concreto.
- e) Determinación de la eficiencia de los diferentes equipos usados en la compactación del concreto.

4.2- Principio del método:

El método ultrasónico se fundamenta en la propagación de un pulso de ondas elásticas amortiguadas a través del material.

La frecuencia de las oscilaciones debe ser lo suficientemente grande para que el frente de ondas permita una medida suficientemente exacta y al mismo tiempo debe ser suficientemente baja para que el pulso se pueda propagar a distancias considerables en el concreto (1).

El crecimiento excesivo de la frecuencia de los ultrasonidos utilizados puede conducir a la aparición del fenómeno de atenuación mediante reflexión dispersiva, la cual se manifiesta cuando la longitud de ondas λ es comparable al grano del agregado Φ (1) :

$$\lambda = \frac{v}{f} \approx \Phi \quad (0.8)$$

Donde v es la velocidad del pulso ultrasónico y f la frecuencia.

En el concreto con agregados hasta 30 mm el fenómeno comienza a aparecer a frecuencias de 150 kHz.

Estas condiciones definen el rango de frecuencias de los ultrasonidos usados en la caracterización del concreto entre 20 KHZ y 200 KHZ (1).

La transmisión del pulso ultrasónico requiere de un acoplamiento mecánico, el cual se realiza a través de un medio de acoplamiento. Una vez alcanzado el concreto la onda elástica se propaga transmitiendo la mayor parte de su energía al concreto a través de las ondas longitudinales, siguiendo la normal a la superficie del emisor (1). (figura N° 6).

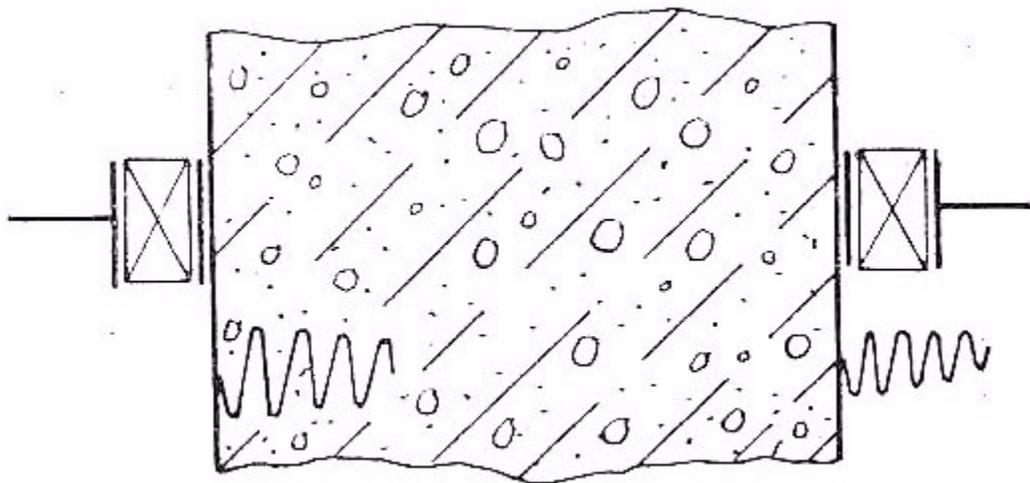


Figura N°6 Principio de medida de la velocidad ultrasónica en el concreto

Los métodos ultrasónico existentes hoy en día, pueden basarse para la caracterización del material, tanto en el tiempo de propagación de la onda ultrasónica, como en la atenuación del pulso.

4.3- Procesos de generación de las ondas.

Un pulso puede generarse de diferentes maneras:

- a) Por explosión
- b) Mediante un golpe realizado con un martillo.
- b) Mediante un transductor electro-acústico.

En los ensayos realizados a distancias cortas, el mejor resultado se obtiene utilizando transductores ultrasónicos debido a que puede generar oscilaciones con cierta frecuencia predominante, lo cual asegura una mayor direccionalidad del pulso así como una mejor concentración de la energía en el modo de vibración preferido, comúnmente el longitudinal, lo que se logra mediante la elección conveniente del transductor (1).

En las ondas emitidas por el transductor, la energía principal, en las condiciones de campo lejano es (cero) nula para un ángulo de divergencia θ (figura N° 7) dado por la siguiente expresión (1):

$$\sin \theta \approx \frac{1,22\lambda}{D} \quad (0.9)$$

En donde λ es la longitud de onda y D el diámetro del transductor.

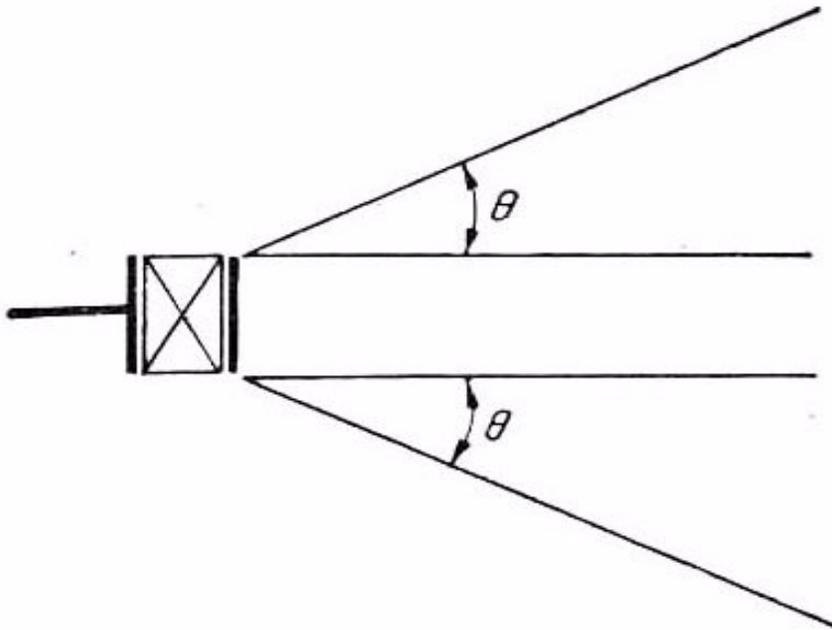


Figura N° 7:Ángulo de divergencia del ultrasonido.

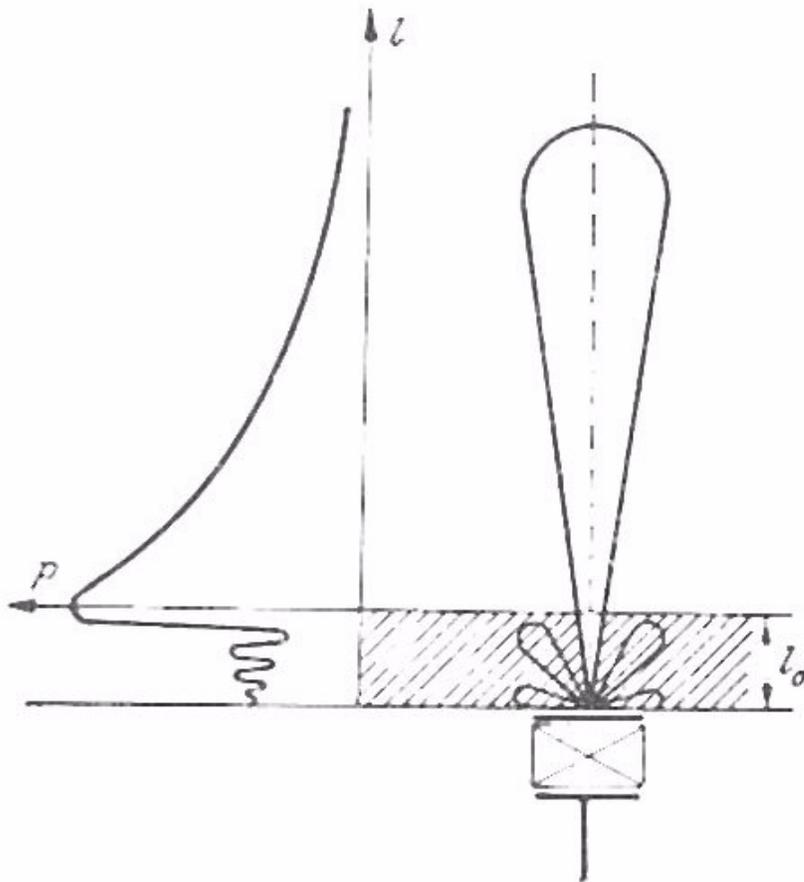


Figura N°8 Campo cercano l_0 y campo lejano

El campo lejano o zona Fraunhofer (figura N°8) comienza en el límite en el cual la presión ultrasónica disminuye inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia (1). Este límite l_0 viene dado aproximadamente por:

$$l_0 \approx \frac{D^2}{4\lambda}$$

(0.10)

Al ensayar el concreto, θ es prácticamente 90° . En conclusión, para ensayos a distancias < 1 m se utilizan transductores ultracústicos y para >1 m se usan emisores del tipo martillo (1).

5.- Parámetros que influencia la propagación de las ondas ultrasónicas en el concreto.

Entre los parámetros que tienen influencia sobre la propagación de la onda ultrasónica se encuentran la falta de homogeneidad del material, influencia que se ejerce en igual medida en la amplitud de la onda así como en el tiempo de viaje de la onda.

Un modelo de discusión de este parámetro sería admitir el concreto formado por dos fases principales: una fase inerte formada por el agregado y una fase activa formada por la pasta de cemento incluso poros, huecos con aire o agua (1).

Si se admite que los agregados se caracterizan por tener una velocidad de propagación (v_a) indiferente del tamaño del grano y el cemento mas poros y huecos, una velocidad (v_m), entonces sumando los volúmenes de las dos fases en un volumen unitario del concreto (figura N°9) se tiene:

$$\frac{1}{v_b} = \frac{V_a}{v_a} + \frac{1-V_a}{v_m} \quad (0.11)$$

En donde V_a es el volumen porcentual de los agregados y v_b la velocidad medida en el concreto (1).

Resulta,

$$v_m = \frac{1-V_a}{\frac{1}{v_b} - \frac{V_a}{v_a}} \quad (0.12)$$

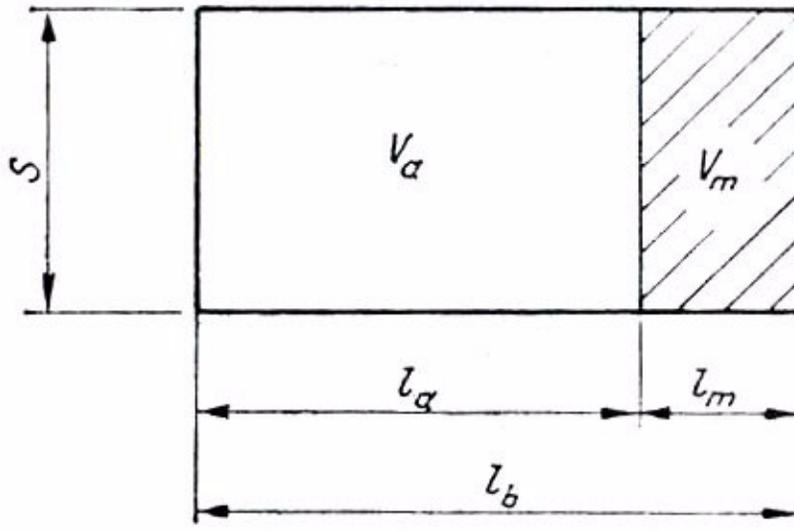


Figura N°9 Esquema simplificado del concreto.

La ecuación (1.12) muestra que la velocidad v_m para un valor v_b medida es mayor cuando V_a y v_a son menores. En consecuencia dos concretos en los cuales se midió la misma velocidad de propagación de caracterizan por velocidades v_m diferentes y por lo tanto resistencias diferentes si el volumen del agregado o la naturaleza de los agregados son diferentes (5).

6.- Influencia en las condiciones de ensayo

6.1.- Longitud de la trayectoria del pulso.

La longitud de la trayectoria recorrida por el pulso ultrasónico va a depender del tamaño del agregado utilizado en el diseño de mezcla.

En la medida en la que el tamaño del agregado es mayor, mayor será la distancia que recorre el pulso ultrasónico, por lo que debe ser mayor la longitud del elemento a ensayar (7).

6.2.- Dimensiones del elemento a ensayar

Las dimensiones laterales del elemento a ensayar únicamente tienen influencia en la transmisión de las ondas ultrasónicas, solo si son menores que la longitud de onda de las vibraciones del pulso.

Entonces se tiene que para pulsos de 50 kHz el elemento a ensayar debe tener una dimensión mínima lateral de 8 cm (8).

6.3.- Contenido de humedad.

Se ha demostrado que el contenido de humedad en el concreto tiene una influencia en la velocidad del pulso ultrasónico, esta se incrementa si aumenta el contenido de humedad.

En general se puede decir que la velocidad del pulso ultrasónico de un concreto saturado puede ser mayor en más de 2% que la velocidad del pulso en el concreto seco de la misma composición y calidad (8).

6.4- Edad del concreto.

La velocidad del pulso ultrasónico aumenta conforme aumenta la edad del concreto, ya que también se incrementa la densidad del mismo. Esto se debe a que, conforme pasa el tiempo, una mayor cantidad de cemento se hidrata, lo que aumenta la resistencia del concreto, con lo que se hace más fácil el desplazamiento del pulso ultrasónico.

6.5.- Relación agua cemento.

La relación agua/cemento, no solamente tienen influencia sobre la resistencia del concreto, sino que también afecta la velocidad del pulso ultrasónico. Esto se debe a que una relación baja implica un peso específico alto en la mezcla, debido a que al incrementarse la cantidad de cemento se incrementa la densidad, con lo cual se obtienen menores tiempos de viaje de la onda en el concreto y rápidos desarrollos de resistencia. Así al aumentarse la relación agua cemento, se tiene una disminución de la velocidad de pulso ultrasónico, así como de la resistencia a la compresión del concreto (9).

6.6- Relación agregado cemento.

La velocidad del pulso ultrasónico en el agregado, es mayor que la velocidad en el cemento, así que al aumentar la cantidad de pasta en el volumen de la muestra, se presenta una importante reducción de la velocidad ultrasónica, sin embargo la resistencia no se reduce en la misma proporción.

7.- Generación de pulsos ultrasónicos. Piezoelectricidad.

En 1880 J. y P. Curie (10), descubrieron el fenómeno piezoeléctrico, donde si a ciertos materiales (materiales piezoeléctricos) se les deforma mediante la aplicación de una presión mecánica externa, dan origen a cargas eléctricas en su superficie.

El fenómeno inverso también se verifica, es decir, si a un material piezoeléctrico, se le coloca entre dos electrodos, sufre deformaciones si se le aplica un potencial eléctrico. Dicho fenómeno fue descubierto por G. Lippmann en 1881(11).

El primero de los fenómenos es denominado efecto piezoeléctrico directo y es utilizado para la medida de presiones, el segundo, denominado efecto piezoeléctrico recíproco, se emplea para generar presiones, deformaciones y oscilaciones.

Para generar los pulsos ultrasónicos se puede emplear el efecto piezoeléctrico, para lo cual se hace uso de transductores, que son dispositivos capaces de convertir un tipo de energía en otro.

Mediante la inducción por resonancia, al aplicar un campo eléctrico externo a un transductor electroacústico de cristal de cuarzo o cerámico, se puede producir una

vibración elástica del mismo, la cual puede dar origen a un pulso ultrasónico. Entonces se convierte energía eléctrica en mecánica.

El tipo de ondas elásticas que se producen mediante este método son compresionales, o longitudinales, es decir, las partículas adquieren un movimiento paralelo a la dirección en que se propagan las ondas.

En los ensayos no destructivos con ultrasonido, se sitúan sobre el elemento a analizar dos transductores, un transductor emisor, con un efecto piezoeléctrico recíproco, y otro transductor receptor, con un efecto piezoeléctrico directo. El primero produce las vibraciones, que atraviesan el material como impulsos ultrasónicos, que luego son detectados por el transductor receptor, que convierte dichos impulsos vibratorios en señales eléctricas, que luego son amplificadas y registradas en un instrumento que contabiliza el tiempo.

Conocida la longitud del elemento de ensayo, se puede calcular la velocidad del pulso ultrasónico a través del material haciendo uso de la ecuación:

$$\text{Velocidad de Pulso (m/seg)} = \frac{\text{Distancia entre transductores (cm)} * 10^4}{\text{Lectura de tiempo (microseg)}} \quad (0.13)$$

Se debe estar atento en realizar la correspondiente conversión de unidades, debido a que el tiempo registrado en el instrumento contador viene dado en microsegundos (μ seg).

7.1.- Los palpadores o transductores.

El palpador es aquel elemento que conteniendo un transductor ultrasónico, al ser conectado a un aparato ultrasónico de control, es capaz emitir y recibir energía ultrasónica.

Los principales componentes de un palpador ultrasónico son:

1 Una pastilla piezoeléctrica, que puede ser de titanato de bario, niobato de plomo, zirconato de plomo, de cuarzo o una piezocerámica del tipo PZT[®] o PXE[®].

2 Un bloque de amortiguación o de atenuación.

3 Una bobina de adaptación para determinar la frecuencia de trabajo.

4 Carcasa metálica de protección.

5 Capa de protección, la cual está presente generalmente en los palpadores normales y angulares utilizados en la técnica de contacto, y que está ausente en los palpadores que se utilizan en inmersión.

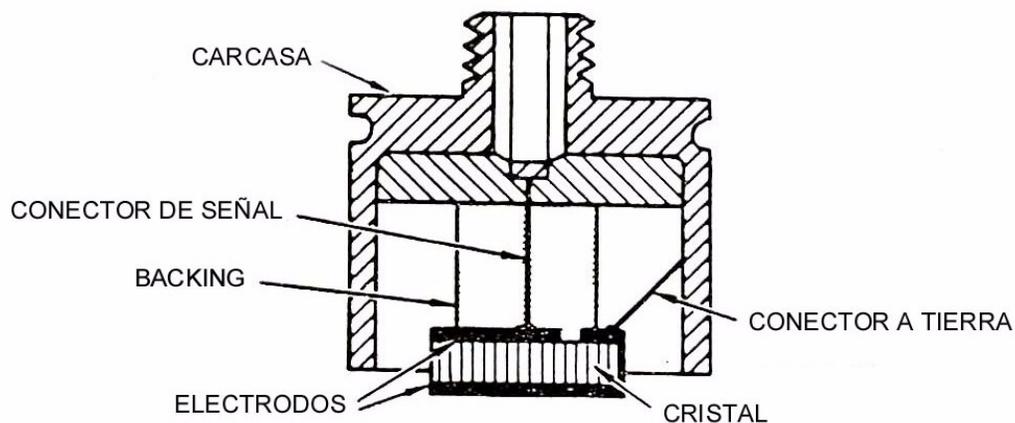


Figura N° 10 Transductor

La pastilla piezoeléctrica es el elemento más importante del palpador, debido a que es el dispositivo físico, que se encarga de transformar la energía eléctrica en mecánica (ultrasonido) y viceversa.

Las pastillas de cuarzo, tienen la ventaja de que poseen una excelente estabilidad química, eléctrica y térmica, es duro y resistente al uso y al envejecimiento. Sin embargo tienen la desventaja de que, entre todos los materiales, es éste el que genera la más débil energía acústica, por lo que requiere una alta tensión, mucho mayor que la de los otros materiales.

Materiales cerámicos tipo PZT[®] o PXE[®], si bien son buenos generadores de energía, tienen desventajas tales como la fragilidad a altas temperaturas y solubilidad en el agua.

Se dice que el palpador es recto o normal, si la superficie de la pastilla piezoeléctrica es montada paralelamente a la superficie de la pieza bajo examen, por lo que las ondas ultrasónicas emitidas o captadas, son ondas longitudinales.

Si por el contrario la pastilla piezoeléctrica, tiene cierta inclinación en relación a la pieza bajo ensayo, entonces, se dice que se tiene un palpador inclinado, de ondas superficiales o angular. En este caso las ondas ultrasónicas emitidas o captadas son ondas transversales o superficiales.

En la parte posterior del palpador, se encuentran el cuerpo de amortiguación, también llamado atenuador o backing. Tiene como función amortiguar la vibración remanente de la pastilla piezoeléctrica, una vez que el pulso ultrasónico ha sido emitido, con el objeto de captar adecuadamente los ecos que provienen de la pieza. Generalmente están constituidos de caucho o de resinas sintéticas que engloban partículas de tungsteno.

Existen tres características que son fundamentales para un palpador:

La sensibilidad: que es la habilidad que tiene el palpador, para detectar pequeñas discontinuidades.

La resolución: que es la habilidad que tiene el palpador, para separar ecos que provienen de dos discontinuidades que se encuentran muy cerca en profundidad y en tiempo.

La eficiencia: este parámetro se refiere a la efectividad del palpador, en la conversión de la energía.

8.- Técnicas de medición

Existen varias técnicas para la evaluación de la calidad del concreto mediante el método ultrasónico, estas técnicas varían dependiendo de la posición de los transductores en el elemento a ensayar.

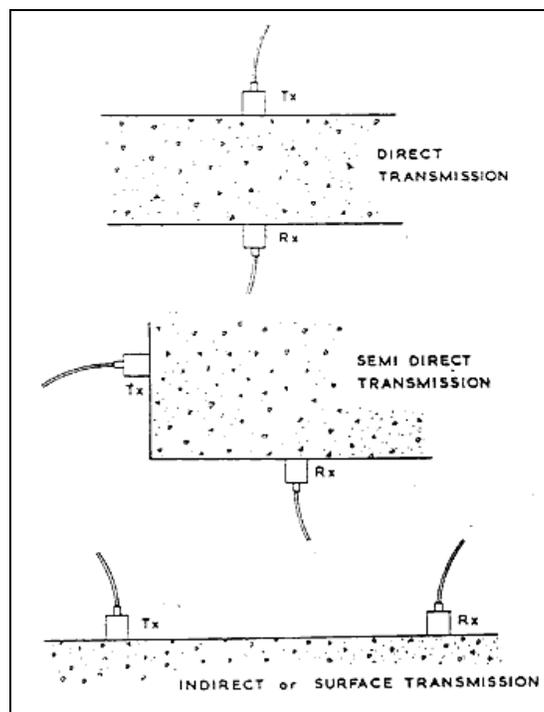


Figura N° 11: Ubicación de los transductores en las diversas técnicas de medición. Transmisión directa. Transmisión semi directa. Transmisión indirecta.

De manera que van a existir tres tipos de transmisión, a saber, transmisión directa, semidirecta o indirecta (figura N° 11).

8.1- Transmisión Directa

Es el método que ofrece la manera más eficiente de controlar el tiempo de viaje de los pulsos, debido a que ofrece el máximo de sensibilidad al tiempo que se tiene un recorrido del pulso ultrasónico bien definido, así que se debe utilizar la transmisión directa siempre que sea posible hacerlo.

Este tipo de transmisión es logrado haciendo partir el pulso longitudinal desde el transductor transmisor hacia el material de manera que la onda elástica sea propagada en una dirección normal a la cara del transmisor, ubicándose el receptor igualmente en dirección normal en la cara opuesta del elemento a ensayar.

8.2- Transmisión Semidirecta

En algunas ocasiones es necesario el uso de trayectorias diagonales para el análisis del concreto, en estos casos se emplea la transmisión semidirecta.

Este tipo de transmisión se realiza ubicando los transductores en superficies contiguas y perpendiculares del elemento de ensayo. Debe tomarse en cuenta que la distancia del recorrido será ahora la diagonal medida centro a centro de los transductores aplicando el Teorema de Pitágoras.

Este método ofrece la desventaja de que la medida del tiempo en elementos pequeños puede estar influenciada por las capas de concreto de la superficie, y además es un método que depende de la forma del elemento de ensayo.

8.3- Transmisión indirecta o superficial.

De todas las técnicas de medición es la menos recomendable, debido a que además de su relativa insensibilidad, ofrece medidas de tiempo de viaje que por lo general están influenciados por la capa de concreto más cercana a la superficie. Esas capas no son representativas de las condiciones del concreto en estratos inferiores (12).

En el método de transmisión indirecta no está bien definida la longitud de la trayectoria del pulso, y no es recomendable tomar la longitud media de centro a centro de los transductores.

Para determinar la velocidad del pulso es necesario fijar el transductor emisor e ir desplazando el transductor receptor sobre la misma superficie en posiciones sucesivas a lo largo de una línea recta (como muestra la figura N°12), la distancia centra a centro, así como el tiempo de propagación respectivo se obtiene directamente para cada punto.

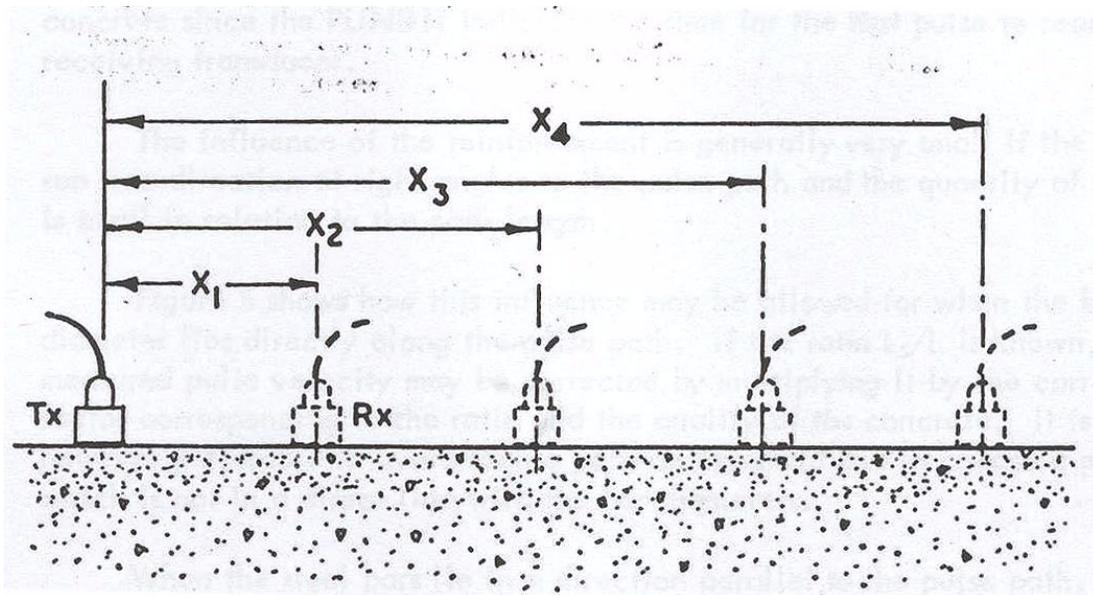


Figura N°12 Técnica de medición indirecta.

De esta manera se puede graficar la distancia contra el tiempo de transito del pulso, la línea resultante tiene una pendiente cuyo inverso da el valor de la velocidad promedio con la que se propagan los pulsos en la superficie del concreto (figura N°13).

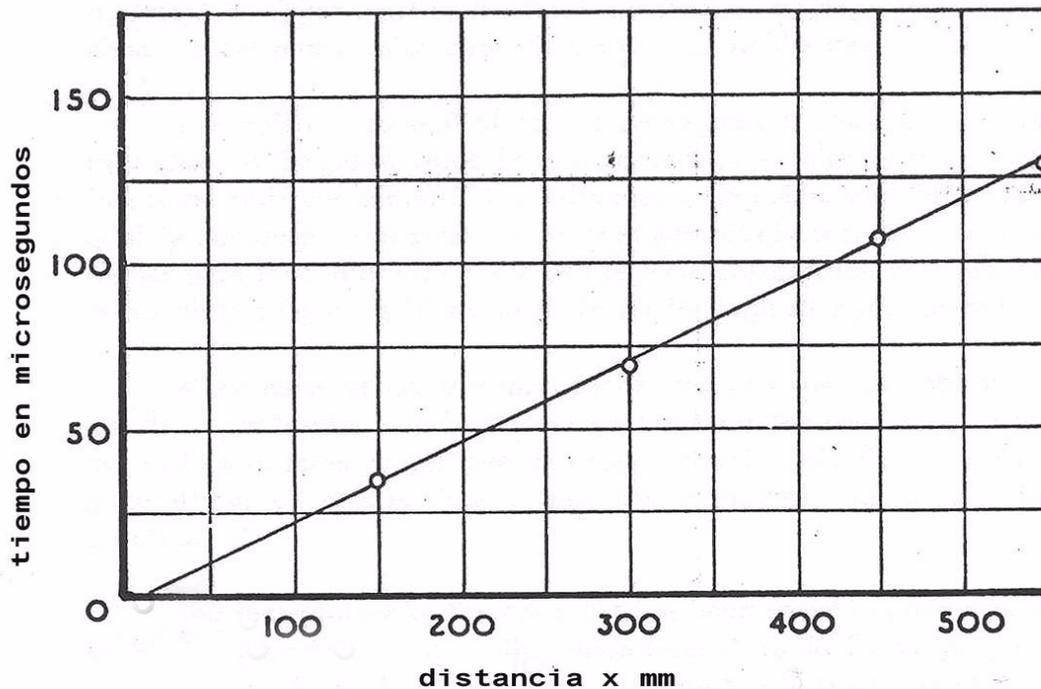


Figura N°13 Gráfico de distancia vs. velocidad de pulso ultrasónico. Transmisión indirecta

Generalmente se encuentra que la velocidad de pulso que se determina por el método indirecto es menor que la que se obtiene del empleo del método directo.

9.- Generalidades del concreto.

El concreto u hormigón es un material compuesto por partículas de origen pétreo de diferentes tamaños denominados agregados, los cuales representan aproximadamente de un 75% a un 80% del peso del material, y que se encuentran

englobados por un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo.

Esta pasta está constituida por agua y un material aglomerante que es el cemento, así el agua, da fluidez a la mezcla, al tiempo que reacciona químicamente con el cemento dando lugar así, al eventual endurecimiento de la mezcla.

El cemento es el componente activo del concreto y tiene especial influencia en la ganancia de resistencia tanto a la tracción, como a la compresión en el material, sin embargo constituye aproximadamente sólo de un 10% a un 20% del peso del concreto (13).

El cemento que se utiliza con mayor frecuencia es el cemento Portland, el cual es una especie de cal hidráulica perfeccionada que se obtiene de la combinación química de las materias primas: sílice y alúmina (arcilla de carácter ácido) y cal (calizas de carácter básico), reacción que se lleva a cabo entre las materias primas finamente molidas, en hornos a temperaturas de semifusión. El producto resultante es una mezcla compleja de minerales artificiales (14).

Los agregados, también denominados áridos o inertes, tienen la finalidad de abaratar los costos de las mezclas, al tiempo que le confieren características favorables al material relacionadas con el desarrollo de resistencias mecánicas. Los agregados se pueden clasificar en agregados gruesos, compuestos por piedra picada, canto rodado natural o picado, y en agregados finos, que consta de arena natural u obtenida por trituración.

Los agregados deben consistir en partículas limpias, duras, libres de productos químicos absorbidos, recubrimiento de arcillas u otros materiales finos, que pudiesen afectar tanto la hidratación como la adherencia de la pasta de cemento.

El agua es el elemento responsable de las reacciones químicas que experimenta el cemento, las cuales le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados (14). Las reacciones con el agua puede ocurrir de dos formas distintas o bien una adición directa de algunas moléculas de agua, la cual constituye una reacción hidratación real, o mediante una reacción de hidrólisis, sin embargo para ambos casos se suele aplicar el término de hidratación del cemento.

En algunos casos, se añaden a las mezclas de concreto productos químicos en pequeñas proporciones, que tiene la finalidad de modificar el tiempo ha fraguado, acelerándolo o retardándolo o para buscar una mayor plasticidad en las mezclas.

El concreto es un material que tiene muchas características de interés, sin embargo existen dos que son de particular importancia, la primera es la manejabilidad, que se relaciona con el grado de fluidez del material en estado fresco, la segunda características es la resistencia, la cual se mide a través de ensayos mecánicos de compresión.

9.1- Relación entre la velocidad de propagación y la resistencia del concreto.

El concreto, una vez fraguado, va endureciendo con el tiempo y van a ir aumentando tanto la resistencia mecánica a compresión y tracción, como la velocidad de propagación ultrasónica. Sin embargo la relación entre ambas magnitudes no es lineal, sino que siguen curvas tales como la que se presenta en la figura N° 14.

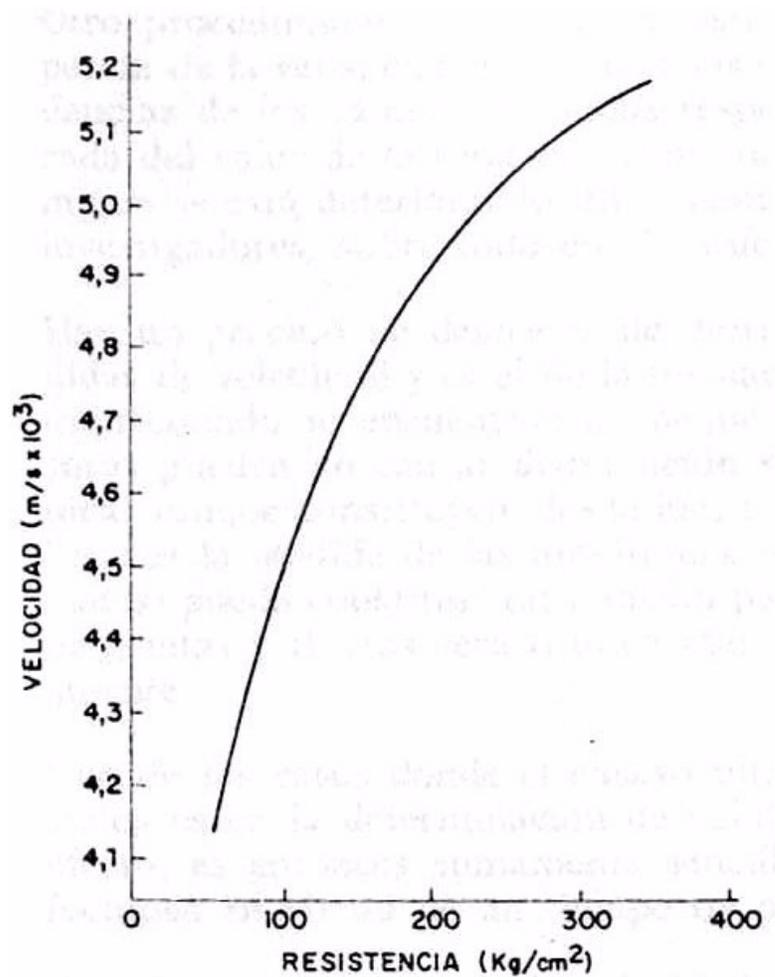


Figura N° 14 Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico; para un concreto de relación árido/cemento de 8.

El aspecto de las curvas será diferente para distintas clases de concreto y vendrá influido por ciertas características, tales como la relación agua/cemento, la relación árido/cemento, las condiciones de curado del hormigón, el contenido de humedad, la granulometría, el tipo de cemento, la presencia o ausencia de aireantes y otros aditivos, etc

No existe una fórmula teórica, que permita relacionar directamente entre sí, la velocidad de propagación y la resistencia. Sin embargo puede determinarse el módulo elástico mediante la expresión (0.14) y tratar posteriormente de relacionar este módulo con la resistencia a la compresión o flexión.

$$Ed = \frac{c^2 [w(1 + \mu)(1 - 2\mu)]}{g(1 - \mu)} \quad (0.14)$$

Donde Ed es el módulo de elasticidad dinámico, w es el peso volumétrico del concreto seco, g la gravedad, c es la velocidad de pulso ultrasónico y μ es el coeficiente de Poisson.

También existen relaciones empíricas para obtener el módulo dinámico a partir de la velocidad de pulso, cuando no se cuenta con el valor del coeficiente de Poisson (6), a saber:

$$Ed = 1.02(c^2)(w)(10^{-5}) \quad (0.15)$$

La relación entre el módulo dinámico, el coeficiente Poisson y la resistencia del hormigón, es uno de los aspectos de mayor interés en lo que se refiere a las medidas dinámicas, debido a que condiciona la posibilidad de determinar la resistencia mecánica en función de ensayos no destructivos.

La expresión de L'Hermite, ecuación (0.16), permite relacionar el modulo de elasticidad dinámico (Ed), con la resistencia a la compresión (R).

$$Ed = K(R)^{\frac{1}{2}} \quad (0.16)$$

En donde el valor de la constante K puede deducirse rompiendo probetas, pero si esto no es posible, puede emplearse el valor medio de 22000 (6).

Existen también curvas empíricas que relacionan las distintas características del concreto, como las que se presentan en la figura N° 15:

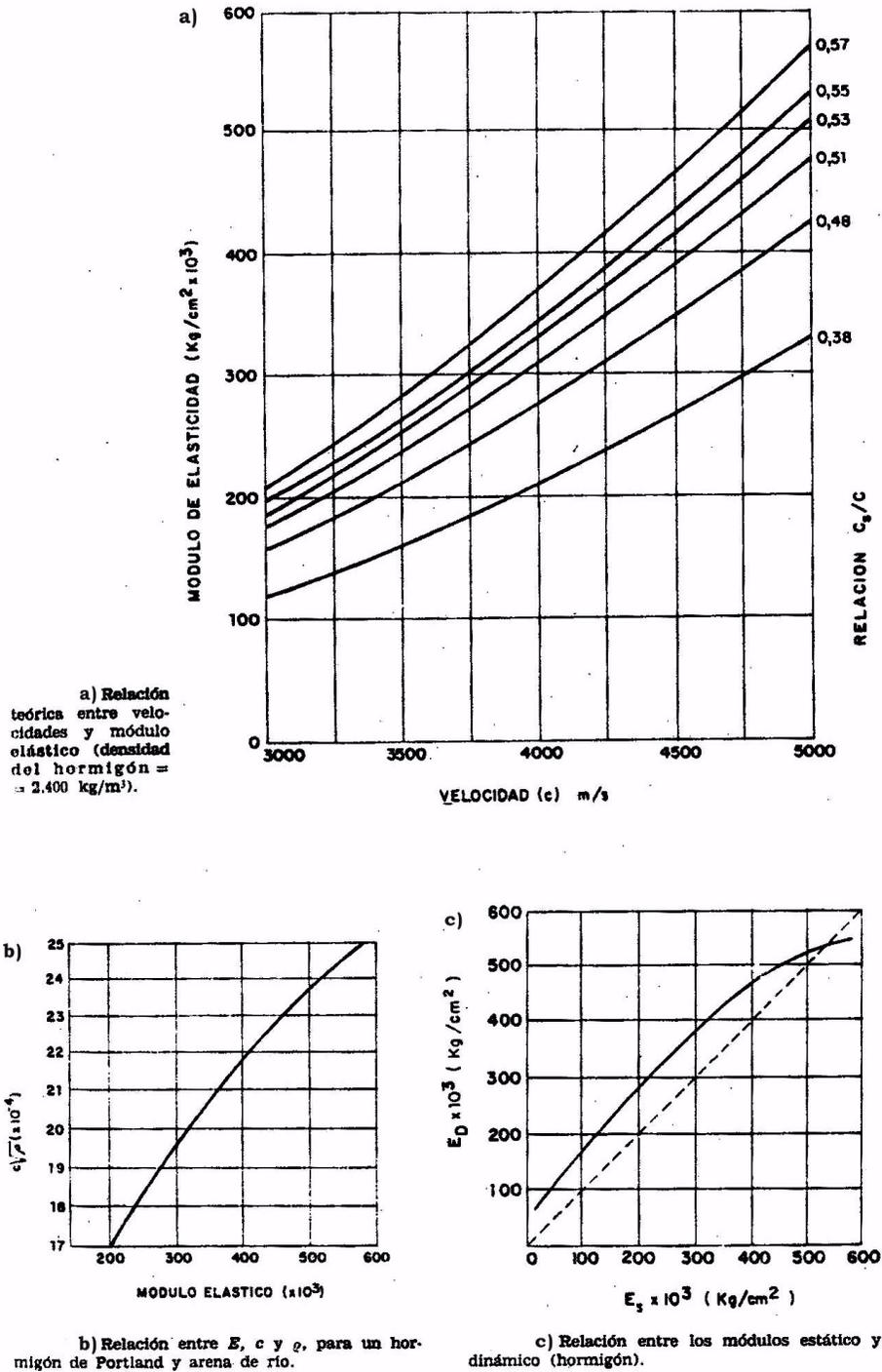


Figura N°15: Relaciones entre: a) módulo elástico y velocidad de propagación del ultrasonido; b) módulo elástico, velocidad y densidad; c) relación entre el Módulo de elasticidad dinámico y estático.

10.- Neumáticos.

La industria de los neumáticos, ocupa el primer lugar entre todos los artículos de goma que son fabricados. Una rueda neumática consiste en un volumen teórico de aire a sobrepresión, el cual tiene la función de absorber las irregularidades del pavimento, este volumen de aire está encerrado en una cámara de goma, que se encuentra montada sobre una llanta metálica (15).

La cámara a su vez está protegida por la cubierta, en la cual se distinguen cuatro partes principales:

La carcasa, que es una estructura textil, poco extensible, cuyo objetivo es el de impedir la expansión de la cámara debido a la sobrepresión del aire (15).

La banda de rodamiento, tiene la función de evitar la fricción de la carcasa sobre pavimento, así como soporta y contrarresta las fuerzas laterales producidas en las curvas por efecto de la inercia y la fuerza centrífuga. De igual forma, debido al elevado coeficiente de fricción de la goma sobre pavimento, es el elemento responsable de transmitir el par de tracción que hace avanzar el vehículo, así como el par de frenado pero detiene.

Los francos, sirven de unión entre la banda rodamiento y los talones, al tiempo que protegen a la carcasa de los efectos de la intemperie y contra eventuales laceraciones mecánicas.

Los talones, tienen la función de impedir que la cubierta pueda ser desalojada de la llanta y constituyen un soporte rígido que se adapta a las pestañas de la llanta.

10.1- El Caucho

Aproximadamente la mitad del caucho producido en todo el mundo se destina actualmente tanto a la industria automotriz, como a la del neumático. En los

automóviles se utiliza caucho en los sistemas de absorción de vibraciones y de suspensión así como los asientos y alfombras entre otras.

El caucho natural es un polímero de isopreno (2-metilbutadieno) en forma cis, mientras que la gutapercha es su isomero en la forma trans (16). Sin embargo la mayoría del caucho utilizado en la industria de los neumáticos es sintético.

Entre los cauchos sintéticos más empleados se encuentra el caucho Estireno Butadieno (SBR), el cual es un copolímero de Estireno y Butadieno, que se usa con propósitos generales debido a su buena procesabilidad y propiedades mecánicas aceptables, asimismo tiene mejor resistencia al envejecimiento que el caucho natural (17).

El caucho Acrilo Nitrilo (NBR), el cual es un polímero de Butadieno y Acrilonitrilo tiene propiedades similares al SBR su composición representa analogía con mezclas a base de caucho natural y SBR. Tiene una excelente resistencia a solventes, grasas y aceites y puede ser mezclado con PVC para mejorar su resistencia al ozono.

El caucho Polibutadieno (BR) es el que tiene mayor temperatura de transición vítrea (-85 C) de todos los caucho conocidos, tiene una excelente resistencia a la flexión, así como una excelente resistencia al desgaste por fricción. Al igual que el caucho SBR y el NBR el caucho Polibutadieno tiene una mejor resistencia al envejecimiento que el caucho natural.

10.2- Aditivos del caucho.

Los cauchos que se emplean en la industria contienen gran cantidad aditivos, tales como, los acelerantes, que son sustancias que se añaden en pequeñas cantidades a la mezcla de caucho con el fin de aumentar la rapidez de

vulcanización, o los antioxidantes los cuales se emplean con el fin de retardar el deterioro causado por la oxidación en el caucho natural. Asimismo, usualmente se emplean los acelerantes en combinación con activadores, para que ejerzan por completo su efecto, tales como el óxido de zinc y ácido esteárico (15).

De igual forma existen otro tipo de aditivos tales como los plastificantes químicos, que son sustancias que aceleran la reducción de la viscosidad del caucho durante la masticación. Tiene su mayor uso con el caucho natural el cual cuando se encuentra en estado bruto es demasiado viscoso y requiere el reblandecimiento previo.

Asimismo a los cauchos se le añaden cargas, cuyo efecto varía un amplio margen entre dos situaciones extremas: las cargas reforzantes, que se usan para aumentar la resistencia mecánica del vulcanizado; y las cargas diluyentes, que se emplean por razones económicas. Las cargas más utilizadas son el negro de humo, cargas claras de origen orgánico e inorgánico (15).

10.3.- Polvo de raspa (ripio).

Durante el proceso de reencauche, que es la renovación de la banda de rodadura de una llanta, se obtiene el polvo de raspa o ripio. Éste consiste en pequeños pedazos de caucho en forma de polvo, que constituyen el residuo obtenido del raspado al que son sometidas las bandas de rodadura de los neumáticos, con el fin de remover las heridas que no son muy profundas o el diseño de banda que aún queda en la llanta (18).

CAPITULO II

Antecedentes

Durante el transcurso de las últimas décadas, se han venido realizando gran cantidad de investigaciones en el área de la tecnología de los materiales, con el objetivo de combinar el cemento-concreto con la tecnología de los polímeros. Los compuestos a base de concreto-polímero pueden ser clasificados en tres formas:

Concreto impregnado con un polímero (PIC), el cual es un material en el que el concreto es impregnado con un monómero, y la polimerización se realiza in situ.

Concreto-cemento-polímero (PCC), consiste en un premezclado de partes de cemento con agregados, a los cuales los monómeros son adicionados previamente, produciéndose la polimerización in situ.

Concreto-polímero (PC), consiste en un agregado de concreto con un polímero como enlazante. Este compuesto es llamado concreto por definición, debido a que consiste en un agregado ligado con un enlazante.

Por lo tanto, el compuesto concreto-elastomero se clasifica como un Concreto-polímero (PC).

Topcu et al. (1994), investigaron sobre la influencia del tamaño y la cantidad de las partículas de caucho reciclado, sobre las propiedades de los compuestos concreto-polímero (PC). Para el desarrollo del experimento usaron cemento Portland tipo I, piedra picada de 1425 kg/cm de peso unitario y de 2681 de gravedad específica, arena de río de 4 mm de tamaño máximo, con un peso unitario de 1640 kg/cm, una gravedad específica de 2640 y 1% de absorción de agua. Se usó caucho reciclado obtenido de la trituración de la superficie exterior de caucho de desecho, del cual fue separado en dos tamaños de grano 0/1 (fino) y de 1/4 mm (grueso). Se utilizó 0,6 de relación agua/cemento, el caucho reciclado

se adiciono en una relación de volúmenes de 15%, 30% y 45% empleándose moldes cilindros y cúbicos. Las prueba de compresión se realizaron para las mezclas de concreto-caucho, en 7,28 y 180 días. Encontraron una reducción de las propiedades tanto físicas como mecánicas del concreto engomado, conforme se aumenta el volumen de caucho reciclado. Asimismo los resultados también indicaron que los agregado de caucho grueso adheridos al concreto, tiene un influencia más negativas en las mezclas de concreto que los agregados finos. De igual forma se encontró, que como el caucho es un material elástico, al adicionarse al concreto éste exhibe un comportamiento más dúctil, y comienza a comportarse como una estructura elástica de resistencia inferior y con una alta capacidad de energía plástica.

Svec & Veizer et. al (1995), realizaron investigaciones sobre la resistencia estructural de caucho-asfalto. Emplearon un diseño de mezcla desarrollado hace 25 años en Alemania, denominado Splittmastixasphalt (SMA). Se elaboraron cinco mezclas, con 0% (mezcla control), 5%, 10%, 15% 20% de contenido de polvo de caucho (Ripiu), en base a la carga de asfalto. Se usó una densidad relativa de 2.67 para el agregado grueso, mientras que para el agregado fino se usó una densidad relativa de 2.658. La densidad de la carga pasante fue de 2.36. Se empleó arena de aproximadamente 0.09 mm de diámetro. Encontraron que la presencia de polvo de caucho en el asfalto incrementan la flexibilidad del material. Se encontró que no existe una marcada diferencia entre los distintos porcentaje de polvo de caucho en las mezclas. Es posible que está flexibilidad incrementada, pueda reducir el resquebrajamiento de las carreteras de asfalto durante el invierno, ocasionado por el congelamiento.

Chung & Hong et al. (1999), realizaron estudios con llantas de caucho reciclado pulverizadas, las cuales representan la matriz de caucho. En este estudio la matriz se prepara por el método seco, donde los desperdicios de caucho son mezclados con aceite de pino. Otra manera de preparar el matriz es disolver el caucho de

desperdicio en una mezcla de solvente basado en 1,1,2,2 de tetracloroheptano (método húmedo). Encontraron que cuando los agregados son tratados con silano, aumentan las propiedades físicas del concreto-caucho reciclado. Asimismo, determinaron que la adhesión entre la matriz de caucho reciclado y los agregados, es un factor fundamental para mejorar las propiedades mecánicas del material, por otra parte encontraron que el volumen de los agregados no constituye un factor crítico sobre la fuerza de compresión. Finalmente concluyeron en este estudio que las propiedades del concreto-caucho reciclado son mejores, en cuanto a lo que se refiere a la resistencia a la compresión y a la relación de Poisson, que las del concreto-cemento convencional.

Dessouki & Taher et al. (1999), se prepararon moldes poliméricos, usando látex de caucho natural (NRL), cemento Portland (PC), en composiciones basadas en un mecanismo de efecto retardado. Estudiaron la influencia, en el proceso de preparación de NRL-PC, de factores tales como la concentración, el porcentaje de mezclado, los aditivos y otros elementos, en combinación con efectos retardadores. El material lo prepararon en dos mezclas separadas, una primera consistente de cemento Portland ordinario (65 partes) con agua destilada (27 partes) y una segunda mezcla consistente en 5 partes de anhídrido de metasilicato de sodio y 40 partes de una solución de celulosa hidroxietil (HEC) por cada 100 partes del látex de caucho natural. La solución de celulosa hidroxietil fue compuesta por (2 HEC:38 H₂O), y tuvo por finalidad prevenir la coagulación que pueda ocasionar el metasilicato de sodio, el cual actuó como retardador. La primera mezcla se añadió a la segunda, agitando aproximadamente durante dos minutos. Se estudiaron algunas propiedades mecánicas de los moldes de cemento-caucho. Así encontraron que un incremento del caucho reduce la resistencia a la compresión, sin embargo incrementa la resistencia a la tracción. El aumento de agua en la mezcla disminuye tanto la resistencia a la compresión, como a la tracción. Finalmente concluyeron que es posible usar moldes de cemento-caucho, en el campo de la construcción, como material para rellenar grietas, rellenos de unión de expansión, y se sugiere su uso para la inyección de suelos.

Segre & Joeques et al. (2000), realizaron investigaciones para aumentar la adhesión superficial entre el polvo de caucho reciclado y el cemento en pasta. Para ello utilizan cemento Portland tipo I, polvo de caucho reciclado de malla #35 como valor máximo, hidróxido de sodio, silicato de sodio comercial tipo H300 NDL. Posteriormente, sometieron la superficie de las partículas de caucho reciclado en una solución acuosa de NaOH, durante 20 minutos. Emplearon una relación agua cemento de 0.36, y prepararon dos mezclas con 10% en masa de caucho reciclado, una tratada previamente con NaOH, y la otra sin tratar. Finalmente llevaron a cabo pruebas de densidad, absorción de agua, exploración microscópica, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y resistencia a la abrasión. Encontraron que caucho tratado con NaOH tiene la mejor adhesión superficial con la pasta de cemento que el caucho sin tratar. La adición de caucho ocasiona una disminución en la resistencia a la compresión, mientras que, tanto la resistencia a la flexión como el módulo de elasticidad se incrementan cuando son añadidas partículas de caucho a la pasta de cemento. De esta manera concluyeron que algunas propiedades mecánicas del material, mejoran con el uso de partículas de caucho reciclado, asimismo concluyeron que el tratamiento con NaOH de las partículas de caucho reciclado, pueden adecuar al material para su uso con fines de ingeniería, cuando no se necesitan de altas resistencias.

Kozievith & Pino et al. (2001), estudiaron el comportamiento del caucho pulverizado proveniente de llantas con el cemento Portland. Utilizaron cemento Portland comercial tipo II, se utilizó polvo de caucho proveniente de llantas trituradas, con tamaño de fragmentos de 0.4 mm y de 1.0 mm. Con el caucho pulverizado mediano (1.0 mm), llevaron a cabo dos mezclas con volumen de agua del 40%, con variaciones de caucho en un 5% y 10% y para el caucho pulverizado (0.4mm) realizaron tres mezclas, con volúmenes del 25% y 10%, con variaciones en el volumen de agua de 66%, 50% y 40%. Analizaron la densidad aparente, la resistencia a la compresión y la porosidad. Concluyeron que no existía una disminución significativa de los valores de resistencia a la compresión y porosidad,

comparado con el cemento puro, para mezclas de 5% de polvo de caucho en base de cemento seco en pasta, con una relación agua cemento de 0.5. Asimismo encontraron que a medida que se aumenta el porcentaje de caucho en las mezclas, la porosidad se incrementa. También encontraron una disminución en la resistencia a la compresión y la densidad, a medida que se aumentan las cantidades de agua. De igual forma encontraron, que la resistencia a la compresión presenta una disminución en la medida en que se aumenta el tamaño de las partículas.

Con respecto a la aplicación de técnicas no destructivas, se han realizado diversas investigaciones sobre la caracterización del concreto Subramaniam, & Popovics et al. (2000). Haciendo uso de técnicas no destructivas para el monitoreo del concreto, presentaron un procedimiento para un análisis preciso tridimensional de las vibraciones en un cilindro y desarrollaron un procedimiento que permite el cálculo, tanto de la constante de elasticidad del material, así como del coeficiente de Poisson, a partir de los resultados del análisis de vibraciones. Para su estudio emplearon probetas de concreto de (18in x 2in x 4in) y cilindros estandarizados de (4in x 8in), hechos de la misma mezcla concreto. Las proporciones en peso, para los constituyentes de la mezcla fueron: agregado grueso: agregado fino: cemento: agua = 2,0:2,0:1,0:0,5. Con una resistencia a la compresión a los 28 días de 35 MPa. Para la medida de la frecuencia resonancia longitudinales se empleó un acelerómetro, 1 osciloscopio digital y una computadora. Las vibraciones fueron producidas por una bola de metal. Los resultados que obtuvieron indican la utilidad de los ensayos no destructivos para estructuras de concreto, para determinar las condiciones del material en sus primeras etapas. Encontraron una técnica simple y precisas para determinar la constante elástica del concreto, a partir de las frecuencias naturales de vibración longitudinal. Concluyeron que los valores de las constantes obtenidos por la técnica propuesta son comparables con los valores experimentales.

Con relación a la aplicación del ultrasonido, para la evaluación de estructuras de concreto, se han realizado numerosas experiencias Beauperthuy & Rodriguez (1984). Estudiaron la aplicación de la medida de la velocidad del pulso ultrasónico para la evaluación de estructuras de concreto armado atacadas por el fuego. Para su estudio realizaron experiencias tanto en especímenes de laboratorio (vigas de 40 x 50), como en estructuras. Encontraron que la velocidad del pulso ultrasónico representativo del concreto quemado nunca excede el valor de 2 Km/seg, el cual corresponde a concretos de muy mala calidad, con resistencias bajas, no aprovechables bajo las condiciones de trabajo de una estructura. De igual forma encontraron que la velocidad del pulso ultrasónico aumenta con la profundidad, llegando a una zona donde permanece constante, encontrándose el concreto de esta parte en buen estado.

Strafella & Rengel et al. (1991), estudiaron la influencia de diversos factores que inciden en la evaluación del concreto mediante el método ultrasónico, tales como relación agua/cemento, edad, agregados y contenido de humedad. Para tal fin realizaron una serie de probetas cilíndricas, para las cuales emplearon: cemento Portland tipo I, arena del río y piedra picada de tamaño máximo 1 pulg. Emplearon un equipo ultrasónico marca PUNDIT para las mediciones ultrasónicas. Con los datos que obtuvieron establecieron relaciones gráficas y correlaciones numéricas, donde quedó en evidencia la influencia que tienen la edad del concreto, la humedad, la relación agua/cemento y los agregados, en la variación de la velocidad del pulso ultrasónico en el concreto, asimismo desarrollaron una relación para estimar la velocidad del pulso ultrasónico a los 28 días cuando se conoce la velocidad a los siete días.

CAPITULO III

Metodología.

Se presenta continuación la metodología experimental a seguirse, para la elaboración de las mezclas de concreto-caucho reciclado.

1.- Materiales de las mezclas de concreto.

Las mezclas de concreto están constituidas principalmente por los agregados, los cuales se deben tanto a razones económicas, como para el mejoramiento de la resistencia. De igual forma las adiciones tiene el objetivo de mejorar las propiedad del concreto. Para la realización de las mezclas, se usará como adición polvo de raspa.

A continuación se describen las características de cada uno de los materiales a utilizar:

1.1- Agregados.

Se empleará como agregado fino arena silicica con impurezas de mica (figura N° 16), provenientes del río Tuy, recolectadas en la zona de Aragüita, y trasladada luego a la compañía PREMEX, que se encuentra en la urbanización El Valle Caracas.



Figura N16: Agregado fino

Se emplearán rocas calizas picadas de tamaño máximo de 1", como agregado grueso (figura N°17). En cuales almacenada por la compañía PREMEX, ubicada en la urbanización El Valle Caracas.



Figura N17: Agregado grueso

1.2- Cemento.

Se utilizará cemento Portland tipo I, marca LAFARGE CEMENTOS LA VEGA (figura N°18). En las tablas N°2 y N°3 se presentan las características físico químicas del cemento, facilitadas por el fabricante:



Figura N18: Cemento tipo Portland.

Tabla N°2. Ensayos químicos del cemento.

Compuesto	(%)
<i>SiO₂</i>	20,580
<i>AlO₃</i>	4,710
<i>Fe₂O₃</i>	2,540
<i>CaO</i>	63,440
<i>CaO</i>	1,430
<i>MgO</i>	1,430
<i>K₂O</i>	0,460
<i>Na₂O</i>	0,190
<i>SO₃</i>	2,470
<i>TiO₂</i>	0,270
<i>P₂O₅</i>	0,120
<i>P.F.</i>	3,190
TOTAL	99,410

Compuesto	(%)
<i>R.Ins</i>	1,030
<i>Alcalis</i>	0,499
<i>CaO libre</i>	2,080
<i>C₃S</i>	34,50
<i>C₂S</i>	33,00
<i>C₃A</i>	8,20
<i>C₄AF</i>	7,70

Fuente: Unidad de control de calidad LAFARGE.

Tabla N°3. Ensayos físicos del cemento

<i>Finura 100 (%)</i>	<i>0,2</i>
<i>Finura 200 (%)</i>	<i>4,2</i>
<i>Finura 325 (%)</i>	<i>14,2</i>
<i>Sup. Dyckerhoff (m²/Kg)</i>	<i>339</i>
<i>Cons. Normal (ml)</i>	<i>152</i>
<i>Cons. Normal (%)</i>	<i>23,4</i>
<i>Frag. Vicat inicial (min)</i>	<i>145</i>
<i>Frag. Vicat final (min)</i>	<i>240</i>
<i>Expansion (%)</i>	<i>0,62</i>
<i>Resistencia 1 Dia (Mpa)</i>	<i>3,7</i>
<i>Resistencia 3 Dia (Mpa)</i>	<i>18,1</i>
<i>Resistencia 7 Dia (Mpa)</i>	<i>30,7</i>

Fuente: Unidad de control de calidad LAFARGE.

1.3- Adiciones.

La adición que se empleará es raspadura de caucho (Ripiu), donada por la empresa de Covencaucho en Barquisimeto estado Lara, proveniente del desecho de las bandas de rodamiento de los neumáticos, cuando son sometidos al proceso de reencauche.

Se utilizará caucho reciclado de tamaño 0.59 mm (Tamiz #30) y 0.29 mm (Tamiz #50), que se seleccionarán a través de un ensayo de granulometría. La raspadura de caucho será caracterizada través de un ensayo de infrarrojos.

1.4- Tratamiento del caucho.

El caucho será tratado con dos tipos diferentes de agentes de acoplamiento, parte del caucho será tratado con hidróxido de sodio (NaOH) y otra con silano.

Para el tratamiento con hidróxido de sodio, se utilizará NaOH tipo comercial al 98%, distribuido por Científica Miranda. El polvo de caucho es rociado, a temperatura ambiente y con agitación constante durante 20 minutos con una solución acuosa de hidróxido de sodio al 10%. Luego la mezcla es filtrada, se procede al lavado del caucho con agua y a su posterior secado a temperatura ambiente.

Para el tratamiento con agente de acoplamiento se va a utilizar silano comercial tipo A-174. La raspadura de caucho es rociada con una solución silano-tolueno, en una relación 1:1, en un mezclador giratorio, durante 30 minutos, cambiando de dirección cada 5 minutos de manera que se pueda garantizar una distribución uniforme al caucho. La finalidad de la solución con tolueno, es reducir la viscosidad del silano a una composición del 0,7% en peso, con respecto al peso total del polvo de caucho. El secado se realiza a 40 °C durante 24 horas (19-20).

2.- Características de las mezclas

Se van a realizar varios tipos de mezclas, cuyas características se presenta continuación:

1. Una mezcla de concreto tradicional, empleando solamente cemento, agua y agregados.
2. Dos mezclas de concreto-caucho reciclado, con tamaño de partículas de 0,59 mm (tamiz #30), donde se variará el porcentaje de masa de caucho en 5% y 10%.
3. Dos mezclas de concreto-caucho reciclado, con tamaño de partículas de 0,29 mm (tamiz #50), donde se variará el porcentaje de masa de caucho en 5% y 10%.

4. Cuatro mezclas de concreto-caucho reciclado, en donde el caucho va ser tratado previamente con una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH), el tamaño de partículas y el porcentaje de caucho en las mezclas, es igual al que se describe en los puntos uno y dos.

5. Cuatro mezclas de concreto-caucho reciclado, en donde el caucho va ser tratado previamente con una solución de silano, el tamaño de partículas y el porcentaje de caucho en las mezclas, es igual al que se describe en los puntos uno y dos.

3.- Diseño de mezclas.

Las cantidades de cada uno de los componentes que constituyen las mezclas de concreto son calculadas en el diseño de la mezcla. Para la elaboración de las mismas se tomará un diseño tradicional para elaborar los cilindros, en donde el valor de asentamiento es fijado entre 6 y 11cm y la resistencia a la compresión se fija en un valor de 280 Kg/cm² a los 28 días.

Haciendo uso de la ley de Abrams, con la resistencia fijada se determina la relación de agua cemento. Luego empleando la relación triangular, y con la relación agua cemento previamente determinada, se obtiene la dosis de cemento necesaria para las mezclas, la cantidad de agua y la cantidad agregados por metros cúbicos de mezcla.

NOTA: Tanto los diseños de mezcla, como el tratamiento previo del caucho con NaOH y con silano, serán realizados por los bachilleres: Lisette C. Briceño S. y De Oliveira V. Adrián J. con motivo de su trabajo especial de grado: Análisis de las mezclas concreto-caucho reciclado.

Los diseños para elaborar las diferentes mezclas se muestran de las tablas siguientes:

Tabla N° 4. Diseño para preparar 50 litros de mezcla de concreto tradicional.

<i>Materiales</i>	<i>Dosis (Kg)</i>
<i>Cemento</i>	<i>18,7</i>
<i>Agua</i>	<i>9,94</i>
<i>Arena</i>	<i>53,6</i>
<i>Piedra</i>	<i>35,7</i>

Tabla N° 5. Diseño para preparar 50 litros de mezcla de concreto al 5% en peso de caucho reciclado.

<i>Materiales</i>	<i>Dosis (Kg)</i>
<i>Cemento</i>	<i>18,8</i>
<i>Agua</i>	<i>9,94</i>
<i>Arena</i>	<i>47,7</i>
<i>Piedra</i>	<i>35,7</i>
<i>Caucho reciclado</i>	<i>11,8</i>

Tabla N° 6. Diseño para preparar 50 litros de mezcla de concreto al 10% en peso de caucho reciclado.

<i>Materiales</i>	<i>Dosis (Kg)</i>
<i>Cemento</i>	<i>18,8</i>
<i>Agua</i>	<i>9,94</i>
<i>Arena</i>	<i>41,8</i>
<i>Piedra</i>	<i>35,7</i>
<i>Caucho reciclado</i>	<i>11,8</i>

4.- Mezclado.

El procedimiento de mezclado será llevado a cabo de acuerdo a la Norma COVENIN N°354, “método de mezclado de concreto en el laboratorio”, Ver Apéndice) empleándose para ello una mezcladora de eje vertical de capacidad nominal de 60 litros (figura N°19).



Figura N19: Mezcladora de eje vertical.

5.- Elaboración de los cilindros.

Los cilindros para los ensayos serán modelados en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (figura N°20), de superficie interior no reactiva al concreto, no absorbente y lisa, según lo establecido por el “método para la elaboración, curado y ensayo de probetas cilíndricas de concreto” Norma COVENIN N°338 (ver Apéndice)



Figura N° 20 Moldes cilíndricos.

6.- Ensayos ultrasónicos.

Una vez desencofradas las probetas, se procede a la medición de los tiempos de viaje del pulso ultrasónico. Se calibrará el equipo, haciendo uso del elemento de calibración antes de cada medición y se realizarán diez mediciones de tiempo sobre cada probeta. Los ensayos se llevarán a cabo durante 28 días, siete días consecutivos y el resto espaciados en intervalos de dos a cuatro días, con el objeto de estudiar el envejecimiento del material compuesto. Los ensayos se llevarán a cabo de acuerdo al “método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto” Norma COVENIN N°1681-80 (ver Apéndice).

7.- Descripción del equipo.

Se empleará para la medición de la velocidad de ultrasonido, un equipo marca PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Tester), con una apreciación de 0,1 y 1 microsegundos (figura N°21). Se emplearán transductores de 52 Khz, con una exactitud en el tiempo de tránsito de $\pm 1\%$ y de $\pm 2\%$ en el recorrido.

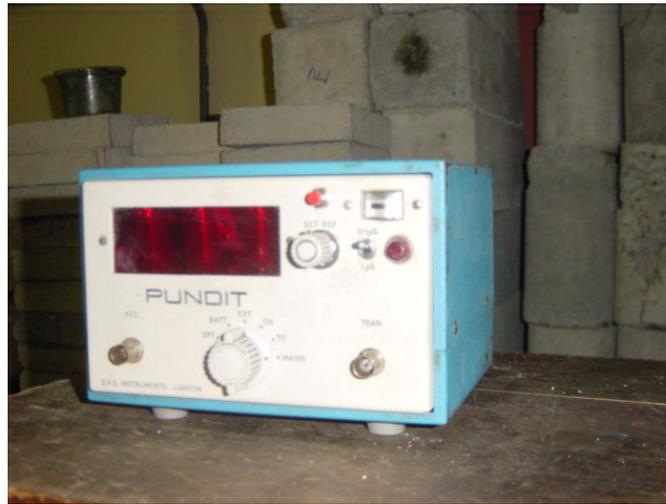


Figura N° 21: Equipo ultrasónico.

Un diagrama simplificado el sistema se muestra en la figura N°22, en donde sistema puede ser dividido en cuatro partes principales: generador de disparo, base de tiempos con retraso de referencia, amplificador receptor y el oscilador contador de pulso.

La capacitancia del transductor transmisor es cargada hasta un potencial de 800 volts. Esta capacitancia es luego descargada a través del generador de disparo, el cual produce un pulso con una frecuencia de recurrencia de aproximadamente 10 p.p.s.

La descarga de la capacitancia, causa la excitación del transmisor lo que produce un tren de vibraciones elásticas longitudinales, que oscilan en su propia frecuencia natural y que son introducidas en el material a ensayar.

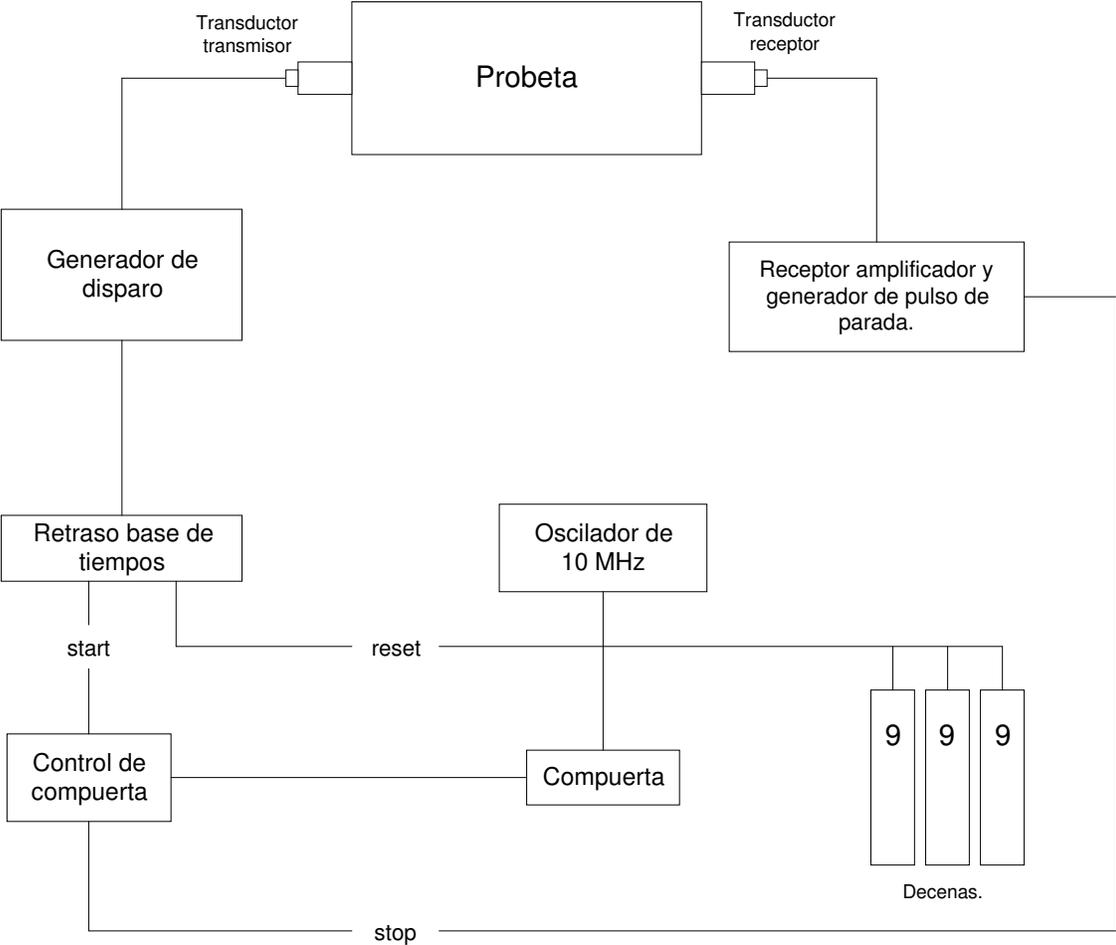


Figura N° 22 Diagrama del equipo.

Al mismo tiempo que el transmisor es excitado, el pulso dispara la base de tiempos con retraso. Esto genera un pulso “re-set” para las décadas y un pulso “start” para la compuerta de control biestable.

Se tiene un pequeño retraso en el tiempo, típicamente de tres micro segundos, entre el pulso aplicado al transductor transmisor y la señal de salida del transductor receptor, cuando los dos transductor están en contacto directo entre sí. Este retraso ocurre, mientras el impulso pasa través de las caras de metal de los traductores, el acoplante y el material transductor. Para eliminar este retraso, la longitud del pulso “re-set” se igualan al retraso y las decenas son llevadas a 0 para el período de retraso.

Después de la transmisión a través del material bajo estudio, el pulso ultrasónico es convertido en una señal eléctrica, en el transductor receptor. La señal recibida es amplificada y modelada para producir un pulso “stop” discreto y creciente, el cual es coincidente con la llegada del frente de ondas principal de la señal recibida.

10 Mhz de pulso de conteo, son derivados de 10 Mhz de un oscilador de cristal de cuarzo de onda senoidal. Después de la conversión a onda cuadrada, los impulso de tiempos son aplicados, vía un switch de rango, a un lado de la compuerta.

Los pulsos de 10 Mhz son también aplicados al divisor de decenas para producir pulso de conteo de 1 Mhz.

Un circuito biestable es utilizado para controlar la compuerta. Cuando el pulso “start” es recibido la compuerta se abre, y el pulso de conteo pasa través de la compuerta, hacia las unidades contadoras de decenas. La compuerta se cierra cuando el pulso “Stop” del amplificador receptor, es aplicado al otro lado de la compuerta de control biestable. El indicador numérico mantiene la cuenta, hasta que el pulso “reset” es aplicado.

Para la calibración del equipo se utilizará una barra de calibración normalizada de 26,3 micro segundos (figura N° 23).



Figura N°23 Elemento de calibración.

Para la generación del pulso ultrasónico se emplearan transductores normales de 54 KHz de frecuencia (figura N° 24).



Figura N°24 Transductores de 54 KHz..

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1.- Generalidades

Los resultados se obtuvieron a partir de los ensayos, tanto destructivos como no destructivos con ultrasonido, realizados sobre cada uno de los cilindros normalizados, procedentes de las diferentes mezclas elaboradas.

Habiendo sido conducidos los ensayos destructivos por los bachilleres: Briceño S. Lisette C. y De Oliveira V. Adrián J. con motivo de su trabajo especial de grado: Análisis de las mezclas concreto-caucho reciclado. De donde se tomaron los datos tanto de densidad, como de resistencia a la compresión de las mezclas.

A los valores de la velocidad de propagación de pulso ultrasónico, obtenidos durante el proceso de curado del material, para una edad del concreto comprendida entre 24 horas y 667 horas, se le determinó la velocidad media y su desviación standard (ver tablas en el apéndice D).

La desviación standard presentó valores bastante bajos con respecto a la velocidad media, indicando así la consistencia de los datos experimentales y su baja dispersión.

Se encontró que la desviación standard es mayor, para mayores porcentajes de caucho.

Posteriormente, haciendo uso de los datos de densidad de la mezcla en estado fresco, de velocidad de pulso ultrasónico durante el proceso de curado y de resistencia a la compresión de los cilindros; se estimaron valores para el desarrollo de la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad dinámico y resistencia acústica a través del tiempo. Para esto se elaboró un programa cuyo diagrama de flujo es descrito en el apéndice G.

Con el valor final de resistencia acústica se calculó el coeficiente de atenuación (α), con respecto al porcentaje de caucho presente en la mezcla [dB/x%] al ajustarse los datos obtenidos a una curva exponencial.

Los datos de velocidad de pulso ultrasónico, se analizaron bajo tres criterios comparativos diferentes, a saber: por el porcentaje de caucho presente en las muestras (0%, 5% o 10%), por el agente de acoplamiento empleado (NaOH o silano) y por el tamaño de partícula de caucho (tamiz #30: 0,59 mm o tamiz #50: 0.29 mm). Para lo cual se graficaron los datos de velocidad de pulso durante el proceso de curado, con respecto al tiempo.

Los ensayos no destructivos se realizaron en probetas cilíndricas normalizadas como se indica en el apéndice A.

Los ensayos no destructivos sobre las losas fueron descartados, debido a que estas probetas tienen un grosor que se encuentra en el límite del establecido por la normativa para ensayos ultrasónicos.

Estas probetas cuando fueron ensayadas, arrojaron valores sumamente ambiguos que variaban fuertemente ante ubicaciones ligeramente diferentes del palpador en la probeta.

Esto se debe a que el tamaño del agregado grueso es comparable con el grosor de las losas, con lo cual se obtienen valores fluctuantes de velocidad de pulso dependiendo de la distribución del agregado en la probeta, haciéndose así imposible la obtención de valores representativos de la velocidad de pulso ultrasónico en el material.

De igual forma se descartaron los ensayos no destructivos en las vigas, ya que debido a la cantidad de material disponible solo se elaboró una probeta para cada

mezcla. Esto no está en concordancia con lo exigido por la normativa para ensayos no destructivos con ultrasonido, la cual establece un mínimo de tres probetas para poder tener una certeza estadística de los resultados.

Al realizarse los ensayos sobre algunas de estas vigas, se encontró que mostraban variaciones en la velocidad de pulso, que podían atribuirse a la presencia de grietas o de cangrejeras, ocasionadas quizás por un mal compactamiento debido a las dimensiones de la probeta. De cualquier manera al no contarse con otras vigas para comparar los datos estos resultados no fueron confiables.

Como medio de acoplamiento entre los transductores y la probeta se empleó vaselina. Se encontró que al aplicar una capa fina se obtienen valores de tiempo de tránsito más estables que al aplicar una capa gruesa, con la cual los valores fluctúan notablemente.

Esto puede deberse a que una capa más gruesa es más susceptible a las variaciones de presión del operador, además de introducir un factor de error al tenerse una mayor cantidad de un material que no es el que se desea medir.

Igualmente se encontró que se podían realizar un máximo de tres mediciones con la misma capa de vaselina, a partir de la cuarta o quinta medición se presenta un cambio brusco en el tiempo de tránsito del haz ultrasónico reportado por el aparato, o el acoplamiento falla por completo y no se reporta ningún valor, (caso similar al que se tiene si no se emplea un medio de acoplamiento entre cada transductor y la probeta)

Esto puede ser atribuible a que el medio de acoplamiento se ensucia con el transcurso de las mediciones, hasta que llega un punto en que el sucio acumulado interviene en la medición alterándola, o su cantidad es tal que es equivalente a no tener un medio de acoplamiento.

Los ensayos se realizaron haciendo uso de un transductor de 54 KHz debido a que éste es el mas apropiado en función del tamaño del grano del material, (el agregado grueso en este caso es el determinante), sin embargo se realizaron unos pocos ensayos con un transductor de 25 KHz obteniéndose los mismos resultados, sin una mayor desviación que la propia del experimento.

A continuación se presentan los resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos así como su respectiva discusión y análisis según los criterios comparativos anteriormente señalados:

2.- Análisis según el porcentaje de caucho presente en la muestra.

2.1.- Concreto con caucho reciclado, retenido en el tamiz #30.

En la tabla N° 7 se muestran las velocidades de pulso ultrasónico correspondientes a las 668 horas, en función de la variación del porcentaje en peso de partículas de caucho reciclado en las muestras (0%, 5% y 10%), para el tamaño de partícula de caucho de 0.59 mm (tamiz #30).

En las figuras N° 25, 26 y 27 se muestran las variaciones de la velocidad durante el proceso de curado, para diferentes porcentajes en peso de partículas, sin tratamiento y con los diferentes tratamientos (NaOH, Silano) para partículas de tamiz #30.

Tabla N°7: Velocidad final de pulso ultrasónico de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.

Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Velocidad (m/s)	4511	3658	2671	3682	2859	3561	2896

Como se observa en la tabla la velocidad de pulso ultrasónico con respecto al concreto tradicional, para las mezclas con caucho sin tratamiento disminuyó en un 18,9% para la mezcla de 5% en peso de caucho y 40,7% a para la mezcla de 10% en peso.

El incremento en el porcentaje de caucho en la mezcla conduce a una reducción en la velocidad de pulso ultrasónico, debido a la disminución de la densidad del material producto del mayor volumen ocupado por el caucho.

Para las probetas en las que las partículas de caucho reciclado fueron previamente tratadas con NaOH, se encontró una disminución de la velocidad final de pulso ultrasónico de un 18,3% para la mezcla de 5% en peso y de un 36,6% para la mezcla de 10% en peso, con respecto al concreto sin caucho. Observándose un comportamiento análogo al de las mezclas sin tratamiento.

Las muestras tratadas con NaOH presentan una menor diferencia en la velocidad de pulso con respecto a las muestras que no fueron tratadas, esto se debe a que el NaOH está actuando como agente acoplante incrementando la adherencia del caucho al material.

Observándose que el efecto del acoplante es mayor cuando se tiene un mayor porcentaje de caucho, debido a que al incrementarse éste se está empleando a su vez una mayor cantidad de caucho tratado, por lo que el efecto es más notorio.

De igual forma para las mezclas donde el caucho es tratado con Silano A-174, la velocidad final de pulso ultrasónico disminuye en un 21,0% para la mezcla de 5% en peso de caucho reciclado y en un 35,8% para la mezcla de 10%.

Se tiene entonces que para bajos porcentajes de caucho, el silano no tiene el efecto deseado, presentándose una disminución más acentuada en la velocidad de pulso. Sin embargo se observa que para mayores porcentajes se tiene una menor diferencia con respecto al caucho sin tratar.

Esto puede deberse a que quizás el tratamiento con silano produce un acoplamiento más efectivo entre las partículas de caucho, que con la pasta de cemento y los demás agregados, con los que es probable que produzca el efecto opuesto.

De esta forma solo se produce un buen acoplamiento para un 10% caucho, mientras que se presenta una disminución para una carga del 5%, debido a que cuando se tiene un mayor porcentaje de caucho, las partículas del polímero se encuentran más próximas entre sí y en mayor cantidad, prevaleciendo así el efecto de acoplamiento.

De acuerdo con los resultados obtenidos y como se presenta en las gráficas siguientes, es evidente la disminución de la velocidad de pulso ultrasónico conforme se incrementa del porcentaje de caucho en las mezclas, así como con se evidencia el desarrollo de la velocidad de pulso ultrasónico respecto a la edad del material.

En la figura N° 25 se observa como la curva que representa la velocidad de pulso ultrasónico evoluciona en el tiempo en forma análoga a las de desarrollo de resistencia en el concreto. (Ver apéndice E para apreciar con mayor detalle las curvas graficadas individualmente)

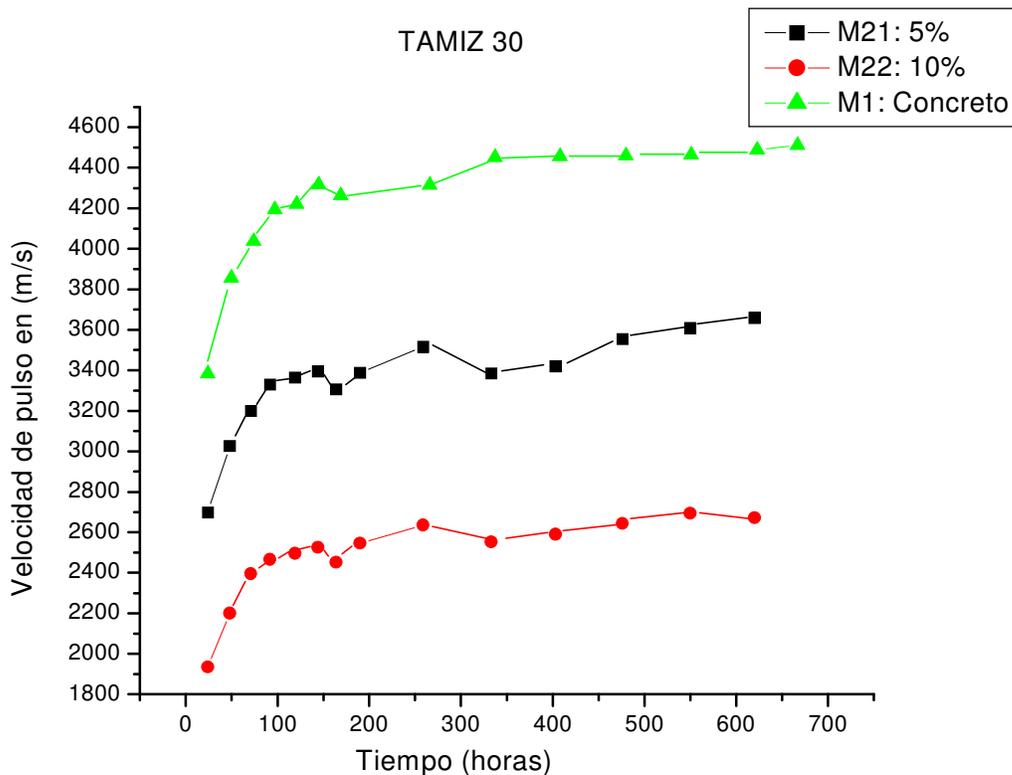


Figura N° 25: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, sin agente acoplante.

Estas gráficas empiezan con velocidades de pulso ultrasónicas bajas, las cuales presentan un crecimiento muy rápido a edades tempranas, durante las primeras 100 horas del proceso de curado, evidenciándose una disminución en el ritmo de crecimiento, una vez transcurridas las 250 horas.

Posteriormente el aumento de la velocidad de pulso con respecto a la edad tiende a hacerse más lento y finalmente, a las 668 horas del proceso de curado, el valor de la velocidad tiende a la estabilización a pesar de las fluctuaciones (fluctúa alrededor de un valor que podría considerarse asintótico).

El crecimiento de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la edad del concreto se debe, a que el agua reacciona químicamente con el cemento conforme transcurre el tiempo, incrementando progresivamente la resistencia y densidad del material, lo que favorece la propagación de la onda ultrasónica, aumentando así su velocidad. Esta reacción ocurre más rápidamente durante los primeros días del proceso de curado, lo que se evidencia en las curvas de velocidad de pulso. (Figura N° 25)

Para la mezcla de concreto tradicional se tiene que las velocidades de pulso varían en un rango comprendido entre los 3383 m/s y 4511 m/s (ver apéndice D), presentándose un incremento del 20,6% en la velocidad durante las primeras 170 horas de envejecimiento y un incremento total del 25,0% para las 668 horas.

Para la mezcla sin tratamiento (figura N° 25), con tamaño de partícula retenida por el tamiz #30 se tiene, para un 5% en peso de caucho reciclado, que la variación de las velocidades de pulso se encuentran en un rango comprendido entre los 2699 m/s y 3658 m/s, donde se obtuvo un incremento del 18,3% en la velocidad durante las primeras 170 horas y un incremento total del 26,2% para las 668 horas.

Por otra parte, para la mezcla sin tratar de 10% en peso de caucho reciclado, se tiene un rango que oscila entre los 1934 m/s y 2671 m/s, con un incremento del 21,0% en la velocidad durante la primera semana y un incremento final del 27,5% para las 668 horas.

Las curvas se encuentran desplazadas, desarrollándose en rangos menores de velocidad, conforme se incrementa el porcentaje de caucho en la mezcla. Esta reducción en el rango de velocidad de pulso ultrasónico en las curvas, se debe a la disminución de la densidad del material, que se presenta cuando se incrementa el porcentaje de caucho, a causa del mayor volumen ocupado por éste.

Se observa que en los tres casos, independientemente del porcentaje de caucho presente y de que las curvas se desenvuelven en rangos de velocidades diferentes, éstas son completamente análogas. La mayor parte del incremento en la velocidad ocurre durante los primeros días de curado, teniéndose un incremento inicial promedio de 19,9% y un incremento final promedio del 26,2%.

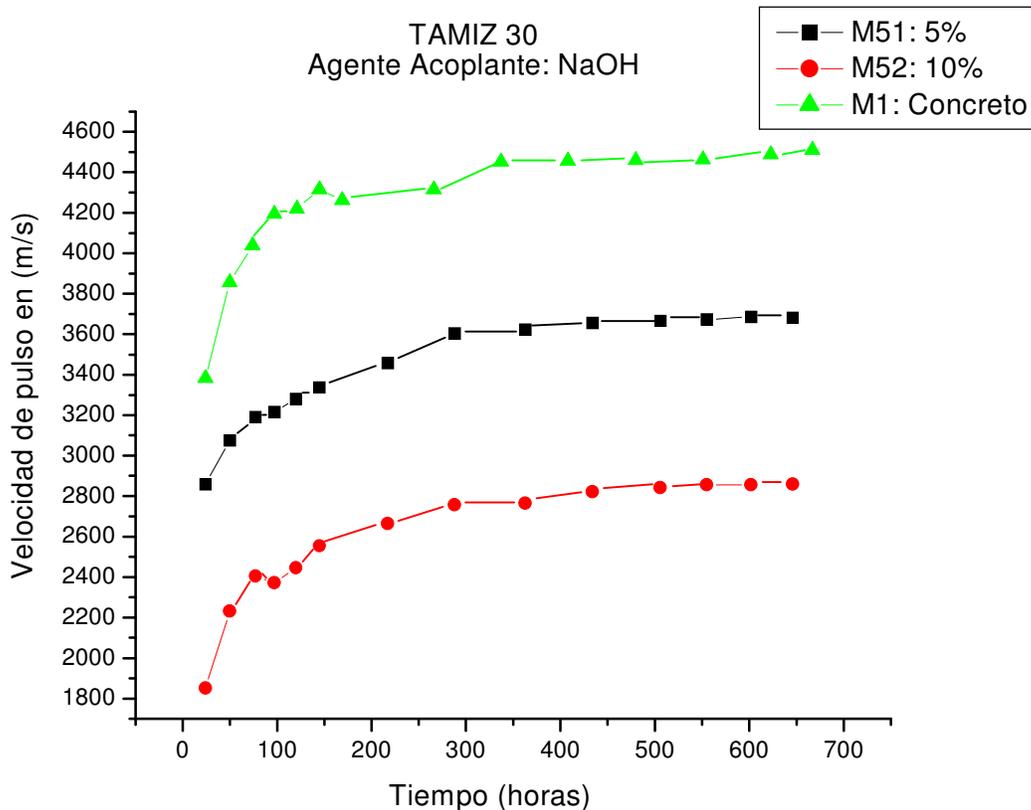


Figura N°26: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con agente acoplante: NaOH.

De igual forma para la mezcla tratada con NaOH con tamaño de partícula retenida por el tamiz #30, que se muestra en la figura N°26; se tiene, para un 5% en peso de caucho reciclado, un incremento inicial del 14,3% en la velocidad en las etapas tempranas del proceso y un incremento final del 22,3% con velocidades de pulso que van desde 2859 m/s hasta 3682 m/s. (ver anexos)

En la misma gráfica se observa la evolución de la mezcla tratada con NaOH, de 10% en peso de caucho reciclado, donde los incrementos en la velocidad fueron del 27,5% en una primera etapa y luego del 35,2% para las 668 horas, así mismo se encontró un rango para las velocidades comprendido entre los 1852 m/s y 2859 m/s.

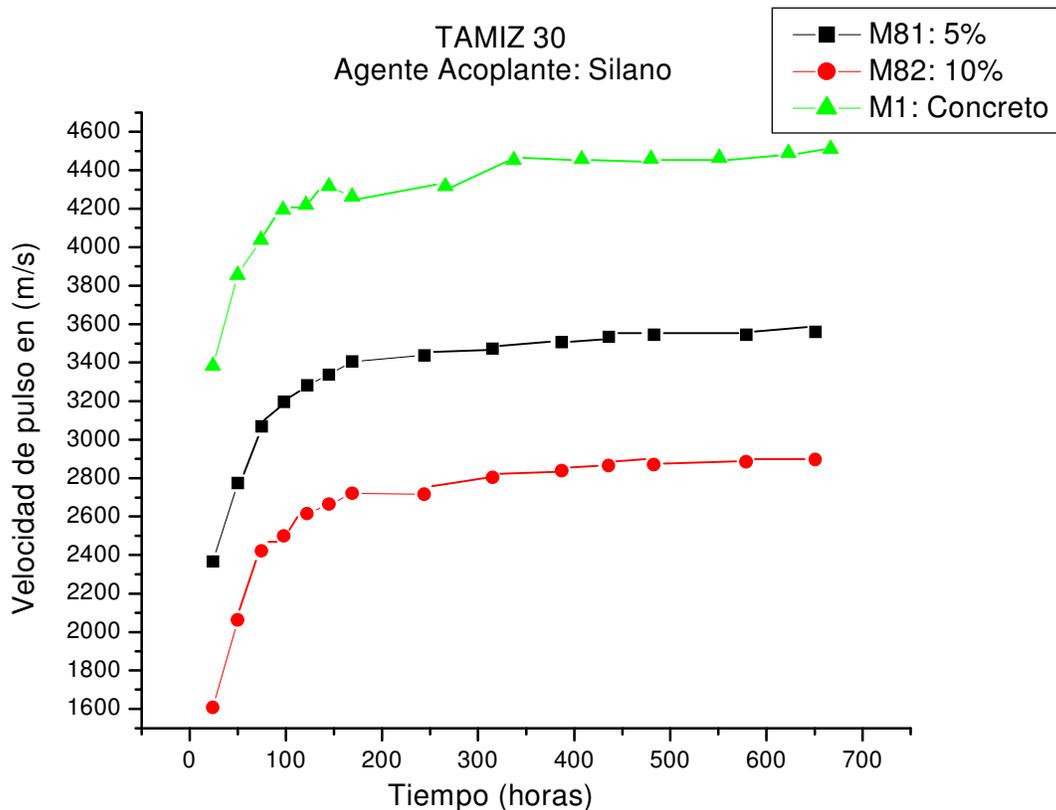


Figura N°27: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con agente acoplante: Silano.

Un comportamiento análogo corresponde a la mezcla tratada con silano y con un tamaño de partícula retenida por el tamiz #30, cuyo desarrollo se muestra en la figura N°27, donde en una primera etapa la velocidad de pulso crece rápidamente con respecto a la edad del concreto, con la posterior disminución en su ritmo de crecimiento a partir de las 170 horas.

Sin embargo se observa como en las curvas de las muestras tratadas con silano (figura N°27), la mayor parte de la velocidad se desarrolla a las 170 horas, mientras que para las muestras tratadas con NaOH (figura N°26), ocurre a las 290 horas, en cuanto que para las muestras sin tratamiento (figura N°25) ocurre a las 250 horas.

Para la mezcla de concreto tradicional, se tiene que la mayor parte de la velocidad se desarrolla a las 340 horas, alcanzándose luego un valor prácticamente estable.

Entonces se tienen tres zonas relevantes para la curva de la mezcla de concreto tradicional, la primera presenta un crecimiento rápido de la velocidad de pulso, entre las 24 horas y las 150 horas, luego le sigue una zona con un crecimiento menos pronunciado, hasta las 340 horas, momento a partir del cual la velocidad prácticamente se estabiliza, exhibiendo un crecimiento sumamente lento hasta las 668 horas.

Estas zonas se encuentran desplazadas en las curvas de las mezclas con caucho, observándose que la que más se aproxima al comportamiento de la muestra de concreto tradicional es la mezcla tratada con NaOH, seguida de la muestra sin tratar, teniéndose por último a la muestra tratada con silano, cuya curva es la que está más desplazada hacia la izquierda.

Esto puede deberse a que la presencia de caucho ocasiona que las reacciones químicas que ocurren durante el desarrollo de la resistencia terminen más rápidamente, ya que estas ocurren entre el cemento y el agua y el caucho absorbe parte del agua.

Así mismo se observa que el NaOH actúa como agente acoplante, al tiempo que posiblemente limita la cantidad de agua que es absorbida por el caucho, por lo que

esta curva es la que más se acerca a la de concreto tradicional. El silano, por el contrario, muestra el efecto opuesto.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede constatar una disminución considerable en la curva de velocidad de pulso ultrasónico, en las probetas con mezclas de concreto-caucho reciclado, en comparación a las probetas elaboradas a base de concreto tradicional. De igual forma se puede observar que esta disminución en la velocidad es mayor conforme se incrementa el porcentaje de caucho presente en la muestra.

Luego de los ensayos destructivos en las probetas, se observó que estas tenían un alto contenido de humedad en su interior, quizás agua absorbida en el proceso de curado, quedándose acumulada en cavidades en el interior de los cilindros.

Esto puede deberse a que como el caucho ocupa un alto volumen, origina que la adhesión de la pasta de cemento, no sea lo suficiente para cubrir todo el caucho lo que a su vez fomenta la formación de cavidades entre el caucho y la pasta de cemento.

Estas cavidades al saturarse de agua, originaron la alta porosidad que se evidenció en la superficie de los cilindros, encontrándose que en las mezclas con mayor contenido de caucho, la porosidad era más notable así como la humedad interior.

Estos resultados se encuentran en concordancia con los estudios realizados por Neville^[9], donde se señala que la porosidad de los agregados, su impermeabilidad y su absorción influyen en propiedades como la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. Esto afecta la resistencia del material, que como está relacionada con la velocidad de pulso ultrasónico, si la primera disminuye la segunda variable también lo hará.

2.2.- Concreto con caucho reciclado, retenido en el tamiz #50.

En la tabla N°8 se muestran las velocidades de pulso ultrasónico a las 668 horas, a medida que varía el porcentaje en peso de partículas de caucho reciclado en las muestras (0%, 5% y 10%), para el tamaño de partícula de caucho de 0.29 mm (tamiz #50).

En las figuras N°28, 29 y 30 se muestran las variaciones de la velocidad durante el proceso de curado, para diferentes porcentajes en peso de partículas, con los diferentes tratamientos (nada, NaOH, Silano) para partículas de tamiz #50.

Tabla N°8: **Velocidad final de pulso ultrasónico de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.**

Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Velocidad (m/s)	4511	3468	1987	3475	2220	3502	1985

Como se observa en la tabla la velocidad final de pulso ultrasónico con respecto al concreto tradicional, para las mezclas con caucho sin tratamiento disminuyó en un 23,1% para la mezcla de 5% en peso de caucho y 55,9% a para la mezcla de 10% en peso.

Para las probetas en las que las partículas de caucho reciclado fueron previamente tratadas con NaOH, se encontró una disminución de la velocidad final de pulso ultrasónico de un 22,9 % para la mezcla de 5% en peso y de un 50,7% para la mezcla de 10% en peso, con respecto al concreto sin caucho.

De igual forma para las mezclas donde el caucho es tratado con Silano A-174, la velocidad final de pulso ultrasónico disminuye en un 22,3% para la mezcla de 5% en peso de caucho reciclado y en un 55,9% para la mezcla de 10%.

En la figura N°28, donde se relaciona la velocidad de pulso, con respecto al tiempo de curado, para la mezcla sin tratamiento, con tamaño de partícula retenida por el tamiz #50 se observa, para un 5% en peso de caucho reciclado, que la variación de las velocidades de pulso se encuentran en un rango comprendido entre los 2591 m/s y 3464 m/s, donde se obtuvo un incremento del 20,2% en la velocidad durante las primeras 170 horas y un incremento total del 25,2% para las 668 horas.

Por otra parte, para la mezcla sin tratar de 10% en peso de caucho reciclado, con tamaño de partícula retenida por el tamiz #50, se tiene que las velocidades de pulso varían entre los 1261 m/s y 1987 m/s, con un incremento del 31,2% en la velocidad en las primeras 170 horas y un incremento final del 36,5% para las 668 horas.

En estas gráficas, al igual que a las correspondientes a partícula retenida por el tamiz #30, se observa un rápido crecimiento en la velocidad de pulso, para los primeros días del proceso de curado, con la posterior disminución del ritmo de crecimiento

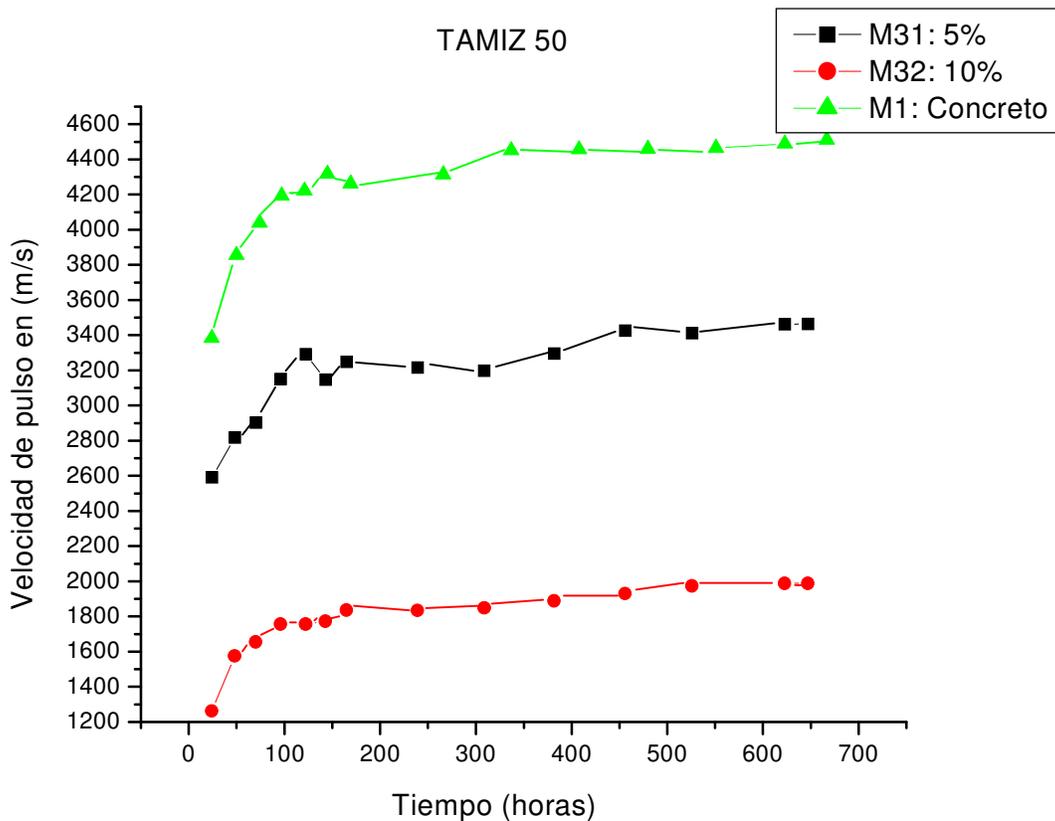


Figura N°28: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, sin agente acoplante.

Así mismo se tiene un comportamiento análogo al de las mezclas con caucho de un tamaño de partícula retenida por el tamiz #30, donde se tienen tres zonas en la curva y donde destaca el punto a partir del cual termina el crecimiento de la velocidad y se alcanza un comportamiento relativamente estable.

Sin embargo se observa como en las curvas de las muestras con tamaño de partícula retenida por el tamiz #50, las curvas se encuentran aún más desplazadas a la izquierda, esto puede deberse a que como se tiene un menor tamaño de partícula, se tiene un mayor número de las mismas por lo que las reacciones de desarrollo de resistencia se ven aún más afectadas.

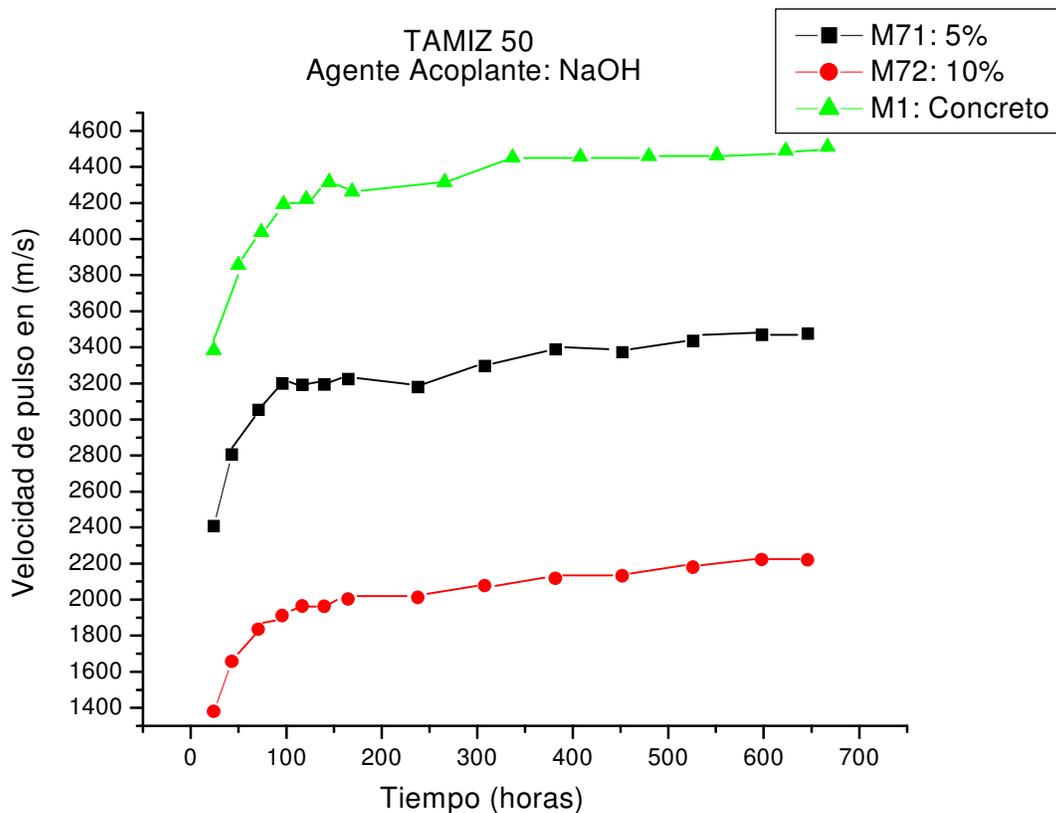


Figura N°29: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con agente acoplante: NaOH.

Para las muestras sin tratamiento con caucho reciclado retenido por el tamiz #50 (figura N°28) la velocidad se desarrolla casi completamente a las 110 horas, mientras que para las muestras tratadas con NaOH (figura N°29), ocurre a las 160 horas, al igual que para las muestras tratadas con silano (figura N°30)

Se observa como para este tamaño de partícula tanto el NaOH como el silano actúan como agentes acoplantes, desplazando la curva hacia la derecha.

Quizás el silano si tiene un efecto acoplante para este tamaño de partícula debido a que como se tiene un mayor número de éstas es más probable que se agrupen, actuando el silano como acoplante entre las mismas

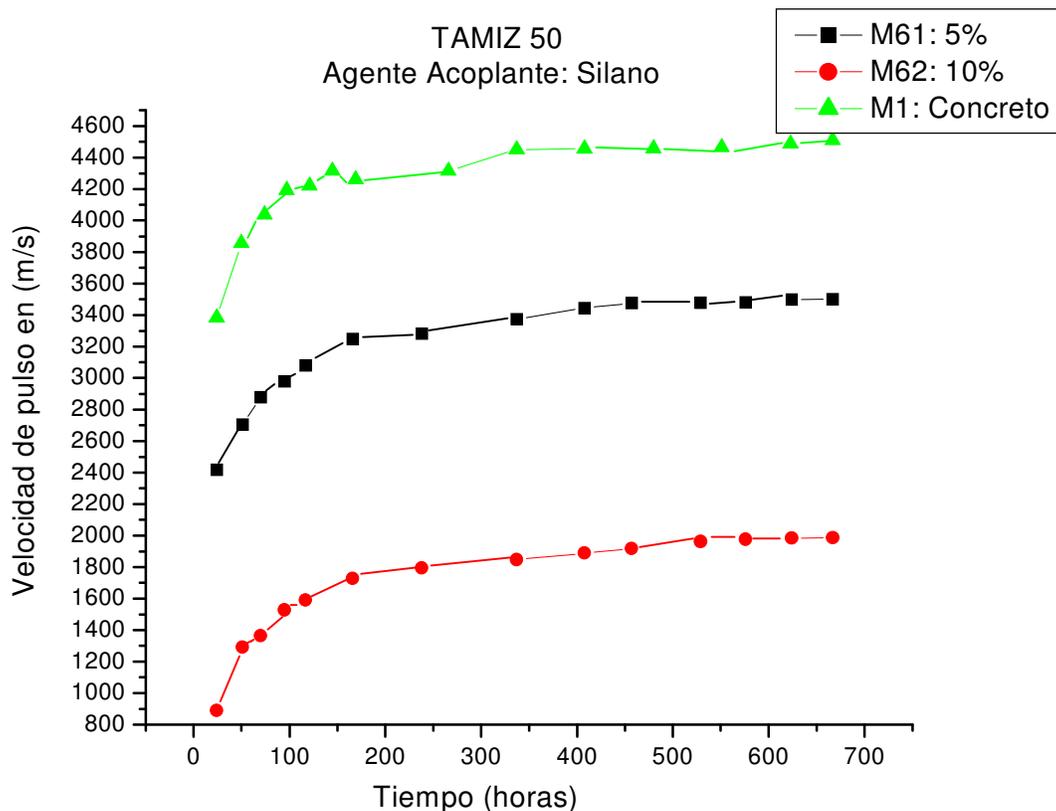


Figura N°30: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con agente acoplante: Silano.

En estos resultados se observa como el comportamiento de las curvas de velocidad de pulso, es aproximadamente el mismo independientemente del tamaño de las partículas y del agente acoplante utilizado en el caucho, observándose una reducción sistemática en la ubicación del rango de la curva de velocidad vs. edad del concreto, conforme se incrementa el porcentaje de caucho presente en la muestra.

3.- Análisis según el agente de acoplamiento utilizado.

A continuación se presentan los mismos resultados, pero se grafican y comparan en función del agente acoplante utilizado.

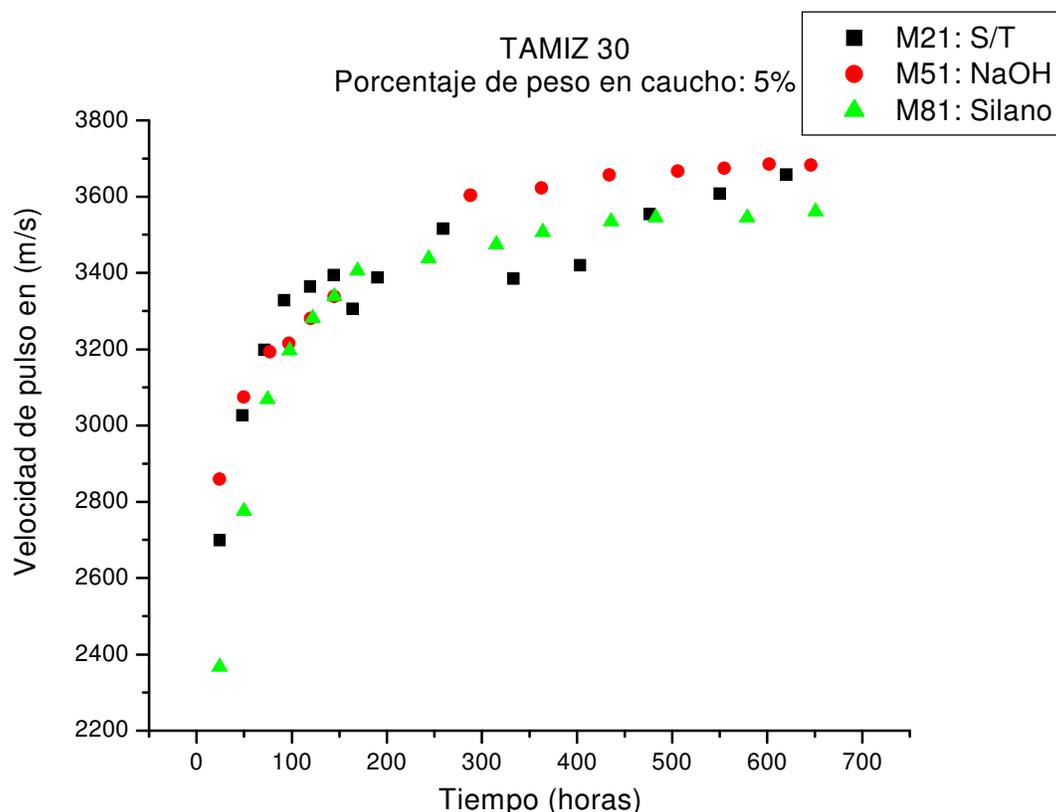


Figura N°31: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con 5% de porcentaje de caucho.

Para las mezclas con tamaño de partículas de 0,59 mm (tamiz #30) y con 5% en peso, se tiene que al emplear NaOH como agente acoplante se alcanza un incremento en la velocidad final del 0,6% con respecto al caucho sin tratar, mientras que al emplear silano como agente acoplante se observó una disminución del 2,6% con respecto al caucho sin tratar.

Así mismo en la figura N°31 se observa como, los comportamientos de las distintas curvas de velocidad vs. edad del concreto, son aproximadamente similares para una edad temprana del concreto.

Posteriormente, a partir de las 190 horas, se empiezan a diferenciar los comportamientos de estas curvas, alcanzándose los mayores valores cuando se emplea NaOH como agente acoplante y los menores al utilizar silano.

Esto se debe a que el NaOH al tener un efecto de acoplamiento, incrementa la resistencia y la densidad del material, lo que se refleja en un aumento en la velocidad de pulso ultrasónico, el silano tiene un efecto opuesto para este porcentaje de caucho.

Es de notar como el comportamiento de las curvas de las mezclas tratadas, es más estable y presenta menos fluctuaciones que el de la curva de velocidad vs. edad del concreto, correspondiente a la mezcla sin tratar.

Cuando se emplean mezclas con tamaño de partículas de 0,59 mm (tamiz #30) y con 10% en peso (figura N°32), se tiene un incremento mayor de la velocidad final de pulso con respecto al caucho sin tratar, con la utilización de silano que al emplear NaOH como agente acoplante.

Cuando se emplea silano se tiene un incremento en la velocidad final del 8.4%, mientras que al emplear NaOH como agente acoplante se observó un aumento del 7.0% con respecto al caucho sin tratar.

El comportamiento de las curvas descritas en la figura N°32 es análogo al comportamiento de las mezclas con 5% en peso de caucho reciclado, descritas anteriormente, salvo que en este caso las mayores velocidades de pulso ultrasónico se tienen con el silano.

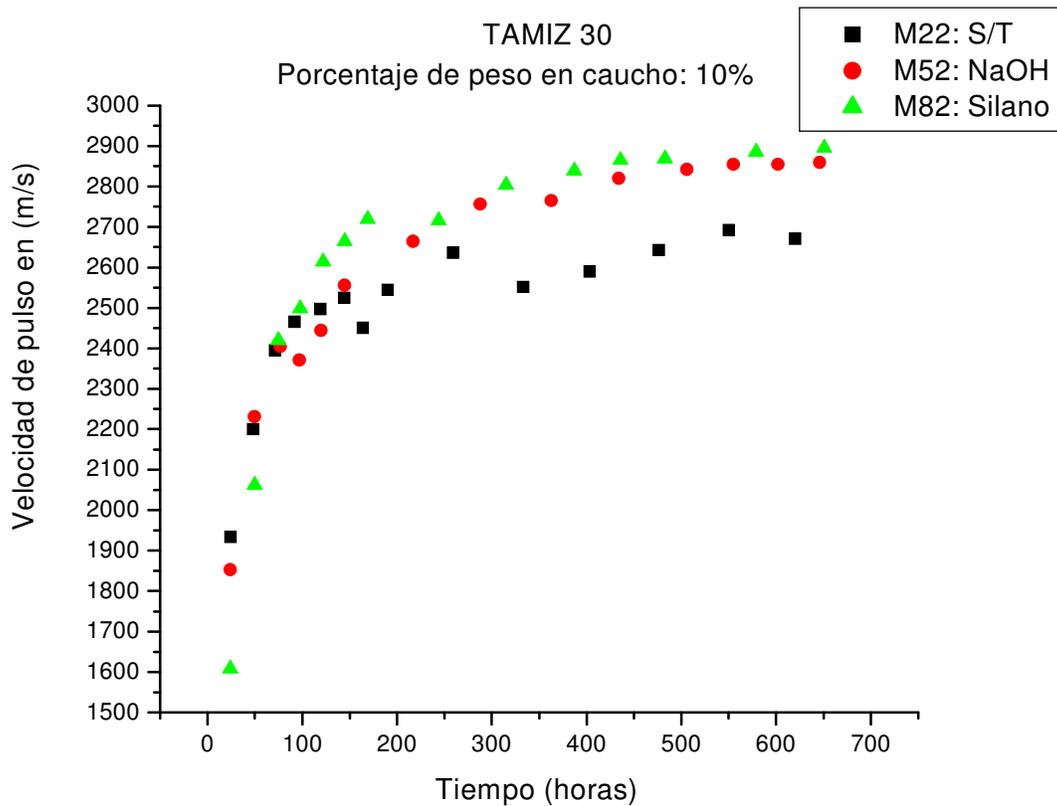


Figura N°32: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30, con 10% de porcentaje de caucho.

Esto se debe a que el silano actúa más como acoplante entre las partículas de caucho que con el concreto, por lo que al aumentarse la cantidad de caucho, se empieza a manifestar el efecto acoplante del silano.

Para las mezclas con tamaño de partículas de 0,29 mm (tamiz #50) y con 5% en peso, se tiene que al emplear silano como agente acoplante se alcanza un incremento en la velocidad final del 0,9% con respecto al caucho sin tratar, mientras que al emplear NaOH como agente acoplante se observó un incremento menor, del 0,2% con respecto al caucho sin tratar.

En la figura N°33 se observa nuevamente como, los comportamientos de las distintas curvas de velocidad vs. edad del concreto, son aproximadamente similares para una edad temprana del concreto, diferenciándose los comportamientos a partir las 190 horas.

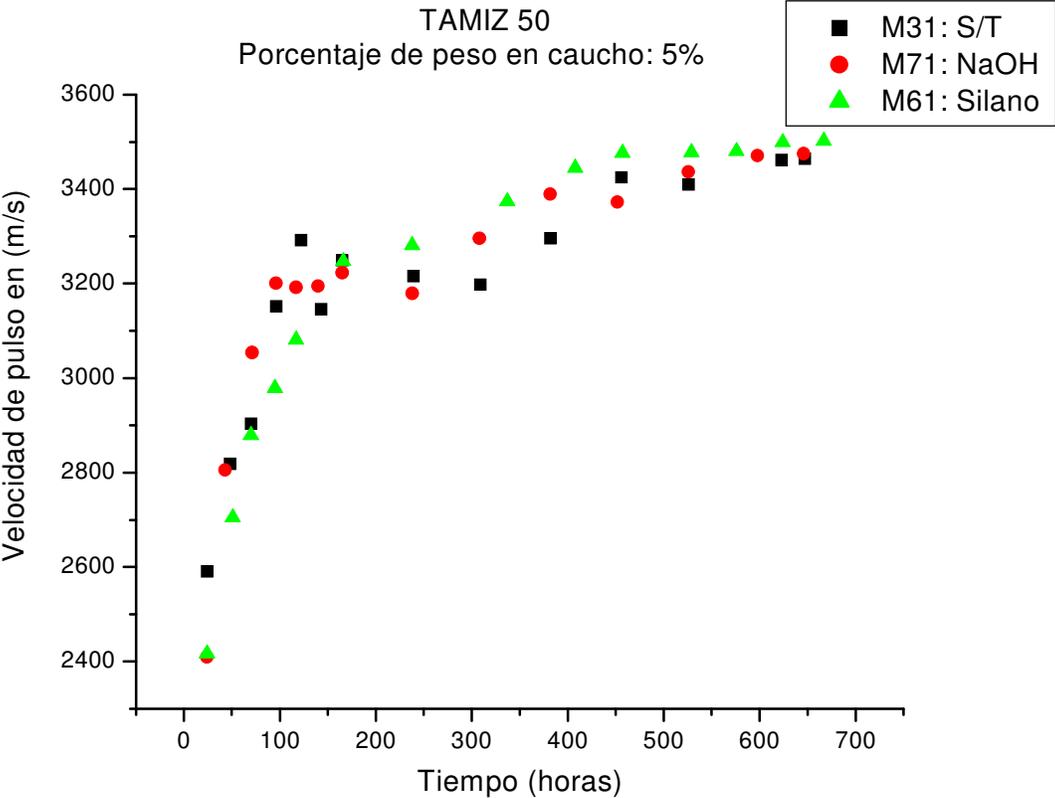


Figura N°33: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con 5% de porcentaje de caucho.

Esto se debe a que mientras se tiene suficiente agua en la mezcla, las reacciones entre el cemento y la ésta ocurren normalmente, sin embargo, conforme se consume el agua, se empieza a manifestar el efecto de la que ha sido absorbida por el caucho.

Se observa como la curva correspondiente al tratamiento con silano alcanza los mayores valores de velocidad de pulso, seguida de la curva correspondiente al tratamiento con NaOH como agente acoplante.

Esto se debe a que como se tiene un mayor número de partículas de caucho, debido a su menor tamaño, el efecto acoplante del silano es mayor que el del NaOH, ya que el primero pareciera actuar más sobre las partículas de caucho, mientras que el segundo pareciera tener un mayor efecto sobre la interfase concreto caucho.

De igual forma que en las gráficas anteriores, en la figura N°33 se observa como las curvas de velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas tratadas con algún agente acoplante, presenta menos fluctuaciones y en general un comportamiento más estable que el de la curva de velocidad vs. edad del concreto, correspondiente a la mezcla sin tratar.

Esta característica es también válida para las gráficas de la figura N°34, donde se comparan los distintos tratamientos aplicados en partículas de caucho de 0,29 mm (tamiz #50), con un porcentaje en peso de caucho de 10%. Allí se observa que las mayores velocidades de pulso se alcanzaron con el tratamiento con NaOH.

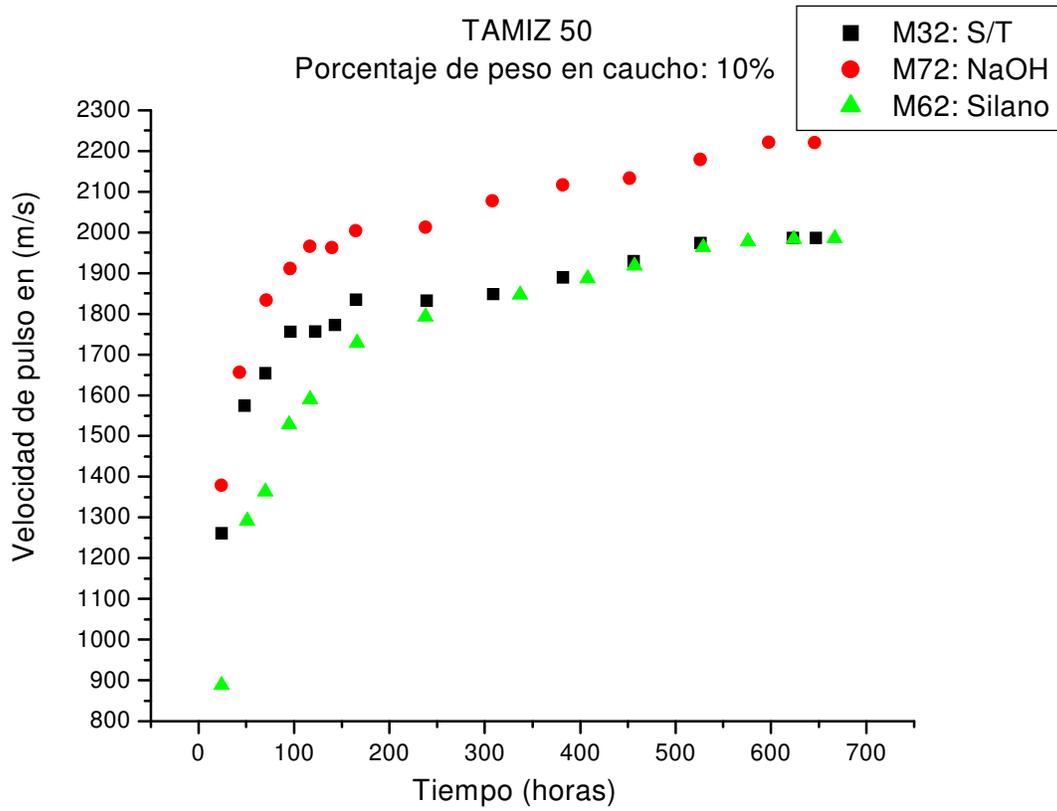


Figura N°34: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50, con 10% de porcentaje de caucho.

El comportamiento de la curva de la velocidad para el tratamiento con silano es bastante similar, al de la curva sin tratamiento, aunque con velocidades ligeramente menores, siendo notorio que el comportamiento está mas diferenciado en una primera etapa del proceso de curado del material.

Debido a que se tiene un mayor número de partículas de caucho, con lo que se incrementa el efecto de la absorción de agua.

Esto ya se había evidenciado durante el proceso de mezclado, donde se observaba que la pasta era sumamente seca.

Se tiene, entonces que al emplear NaOH como agente acoplante se tiene un incremento en la velocidad final del 11,7% con respecto al caucho sin tratar, mientras que al emplear silano como agente acoplante se observó una disminución del 0,1% con respecto al caucho sin tratar.

Es posible que el silano, si bien actúa como agente de acoplamiento entre las partículas de caucho, esté presentando el efecto opuesto entre la pasta de concreto y el caucho, por lo que al aumentarse la cantidad de caucho, por encima de cierto límite, se obtenga una reducción en la resistencia del material en lugar de un incremento con el uso de silano, lo que se evidencia en la disminución de la velocidad de pulso.

En general, de todos estos datos se puede afirmar que el silano A-174, actúa como agente de acoplamiento a una concentración del 0,7% en peso del polvo de caucho, en los casos en los que se tiene un incremento en la velocidad de pulso con respecto al caucho sin tratar, debido a la relación existente entre la velocidad de pulso y la resistencia del material. Esto pareciera depender del número de partículas y su probabilidad de encuentro.

Por otra parte el NaOH actúa como agente de acoplamiento a una concentración del 0,7% (igual que la empleada para el silano A-174), ya que en todos los casos se presentó un incremento de la velocidad con respecto al caucho sin tratar.

4.- Análisis según el tamaño de partícula.

Para las muestras sin tratamiento con agentes acoplantes, se encontró que en las de 5% en peso, la reducción en la velocidad de pulso final, con respecto al concreto tradicional, es de un 18,9% para las mezclas con caucho de 0,59 mm (tamiz 30) y de 23,1% para las de 0,29 mm (tamiz 50).

Así mismo se encontró que en las muestras de 10% en peso, la reducción en la velocidad, es de un 40,7% para las mezclas con caucho de 0,59 mm (tamiz 30) y de 55,9% para las de 0,29 mm (tamiz 50).

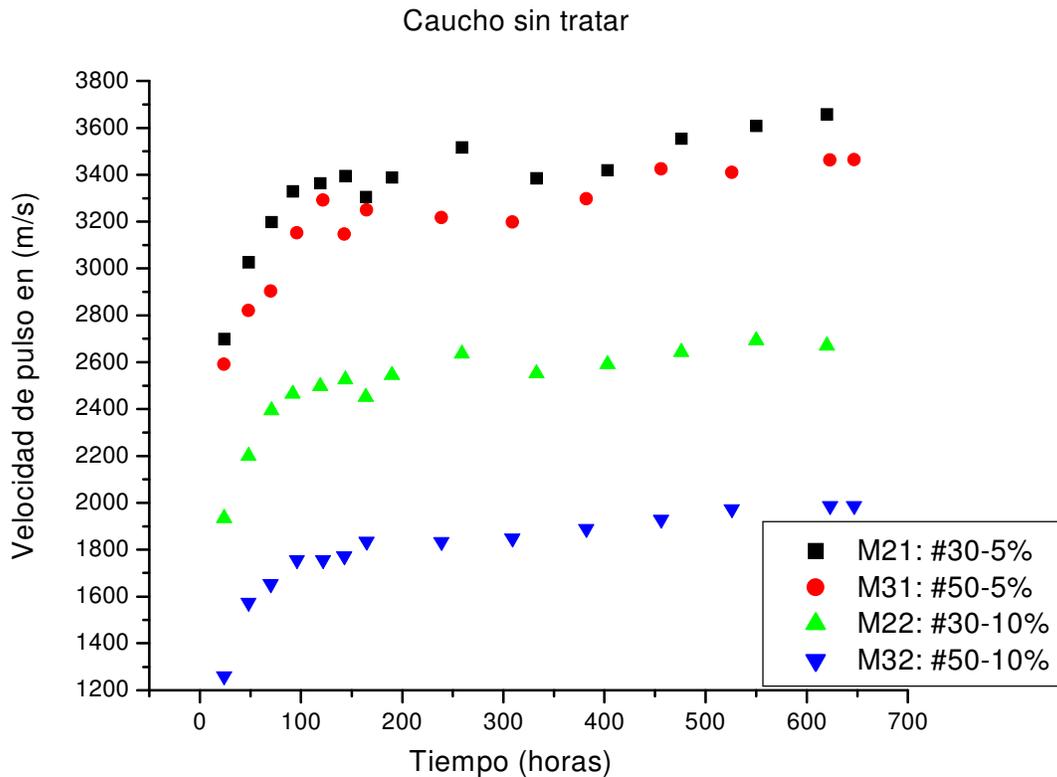


Figura N°35: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado sin tratar.

En la figura N°35, se observa como el tamaño de partícula tiene una mayor influencia sobre la velocidad, en la medida que se incrementa el porcentaje de caucho presente en las mezclas. Así mismo se observa como se alcanzan las mayores velocidades cuando se emplean mezclas con partículas de mayor tamaño: tamiz #30.

En cuanto a las muestras tratadas con NaOH como agente acoplante, se encontró que en las de 5% en peso, la reducción en la velocidad de pulso final, con

respecto al concreto tradicional, es de un 18,3% para las mezclas con caucho de 0,59 mm (tamiz 30) y de 22,9% para las de 0,29 mm (tamiz 50).

Por otra parte se encontró que en las muestras de 10% en peso, la reducción en la velocidad final, es de un 36,6% para las mezclas con caucho de 0,59 mm (tamiz 30) y de 50,7% para las de 0,29 mm (tamiz 50).

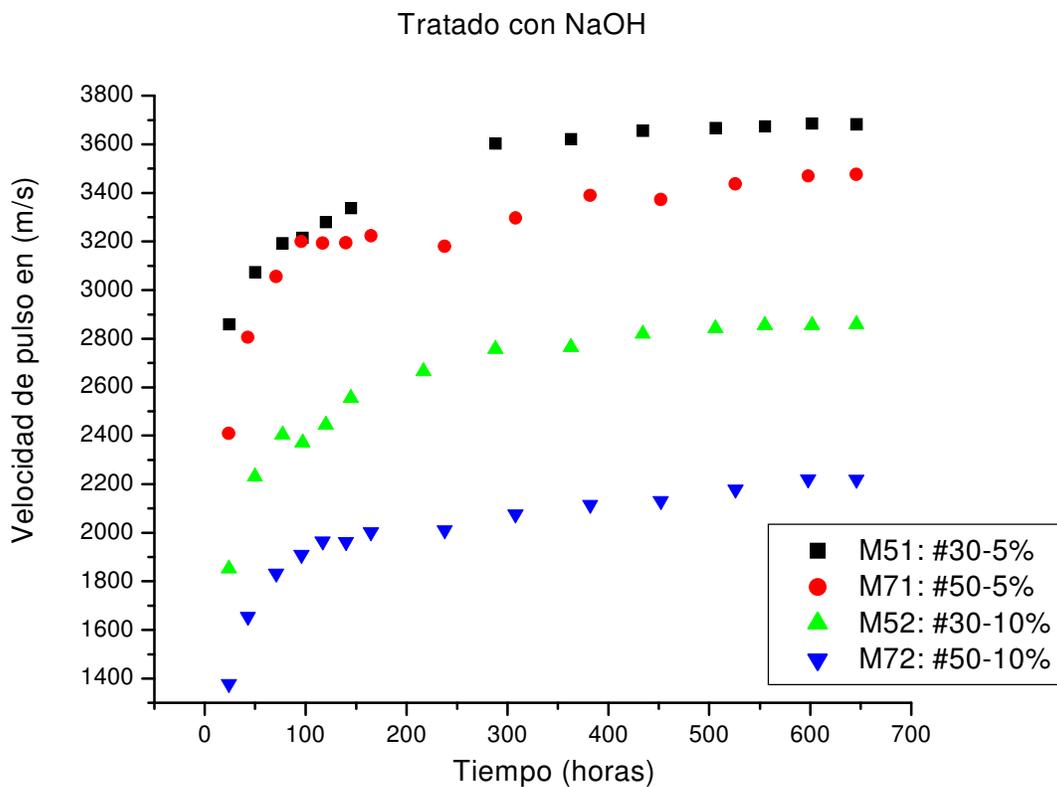


Figura N° 36: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado tratadas con NaOH.

En la figura N° 36, se observa un comportamiento análogo al de la figura N° 35, sin embargo, se tiene una mayor diferenciación entre las velocidades, para los distintos tamaños de partícula, en las muestras de 5% en peso tratadas con NaOH, con respecto a la que se tiene en el material sin tratar.

De igual forma, el mismo comportamiento se observa en la figura N°37 donde el tamaño de partícula tiene una mayor influencia sobre la velocidad, en la medida que se incrementa el porcentaje de caucho presente en las mezclas, alcanzándose las mayores velocidades con las partículas de 0.59 mm. Sin embargo, se observa una mayor diferenciación entre las velocidades, para los dos tamaños de partícula, en las muestras de 10% en peso tratadas con silano, con respecto a la que se tiene en el material sin tratar.

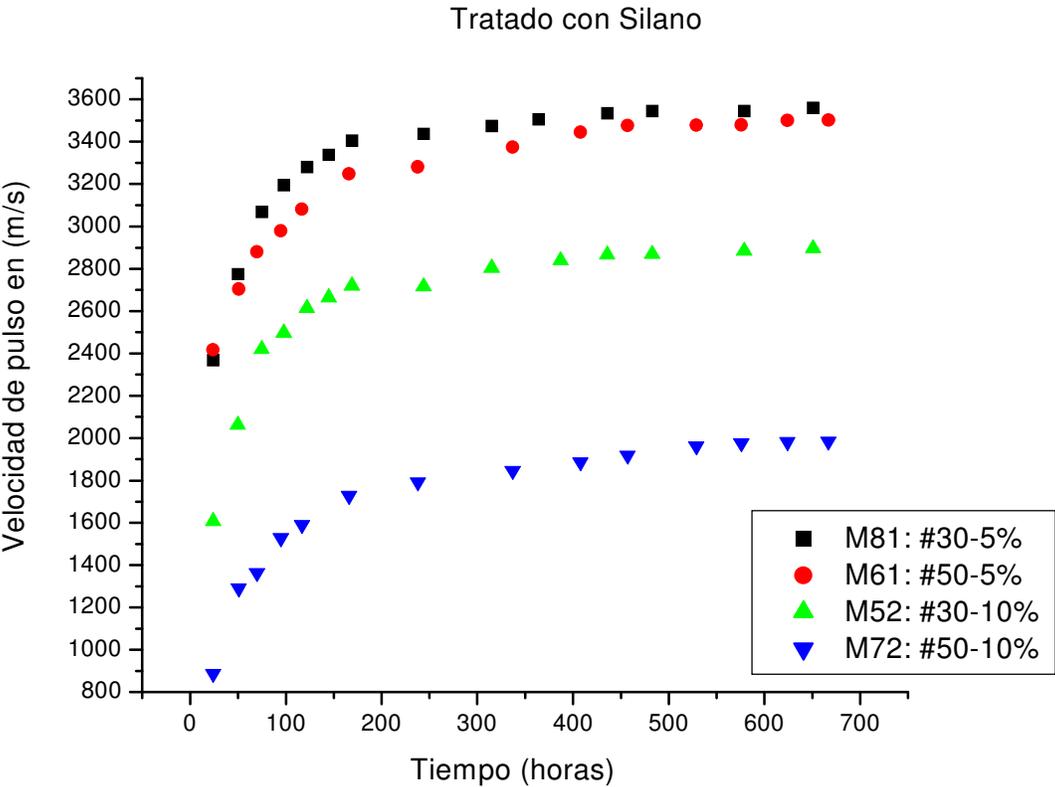


Figura N°37: Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el tiempo de curado para mezclas con caucho reciclado tratadas con Silano.

Para las muestras tratadas con silano como agente acoplante, se encontró que en las de 5% en peso, la reducción en la velocidad de pulso final, con respecto al

concreto tradicional, es de un 21,0% para las mezclas con caucho de 0,59 mm (tamiz 30) y de 22,3% para las de 0,29 mm (tamiz 50).

Así mismo se encontró que en las muestras de 10% en peso, la reducción en la velocidad, es de un 35,8% para las mezclas con caucho de 0,59 mm (tamiz 30) y de 55,9% para las de 0,29 mm (tamiz 50).

Al comparar las velocidades, de las distintas muestras, se observa una mayor disminución en la velocidad de pulso, con respecto al concreto tradicional, para las mezclas con caucho de 0,29 mm (tamiz #50) que para las muestras de mayor tamaño de partícula (0,59 mm, tamiz #30).

Esto se debe a que cuando las partículas de caucho son más pequeñas (mayor cantidad de finos), ocupan mayor cantidad de volumen en las estructuras de las mezclas, lo que ocasiona una disminución de la densidad del material, lo que implica una reducción de la velocidad del haz ultrasónico, evidenciando así pérdida de resistencia.

5.- Resistencia Acústica y coeficiente de atenuación.

En las tablas N°9 y N°10 se muestran las resistencias acústicas a medida que se varia el porcentaje en peso de partículas de caucho reciclado en las muestras, así como los distintos tratamientos, para el tamaño de partícula de caucho de 0.59 mm (tamiz #30) y 0.29 mm (tamiz #50), respectivamente.

Tabla N°9: **Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.**

Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Ra (N/sm ²)	1300972	841340	543014	827713	566367	789829	585281

Tabla N°10: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.

Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Ra (N/sm ²)	1300972	774896	354480	770755	395160	766587	391243

En estas tablas se presenta únicamente el valor final de resistencia acústica ya que este valor es el más representativo del material una vez curado. Los gráficos de su desarrollo conforme avanza la edad del concreto son completamente análogos a los de velocidad de pulso (ver apéndice I).

La mayor parte de la resistencia acústica se desarrolla rápidamente durante los primeros días del proceso de curado, para luego crecer más lentamente a partir del octavo día.

Los datos de resistencia acústica son de suma importancia porque permiten estimar el coeficiente de atenuación de un material.

Como se indica en la ecuación (0,3) la resistencia acústica específica, se puede hacer equivaler a la impedancia acústica. Esta última a su vez es proporcional a la Presión acústica, como se indica en la ecuación (0,2).

Como la variación de la presión ultrasónica es proporcional a la distancia recorrida por la onda, es posible, haciendo uso de las ecuaciones (0,6) y (0,7), relacionar estas dos variables, obteniendo el coeficiente de atenuación (α).

El coeficiente de atenuación expresa la atenuación de la onda elástica por unidad de longitud, por lo que las unidades de α son [dB/cm] o [Neper/cm].

Siendo la resistencia acústica proporcional a la presión acústica, se puede escribir en analogía a las ecuaciones (0,6) y (0,7):

$$dRa = -\alpha_x \cdot Ra_0 \cdot dx \quad (0.18)$$

$$Ra = Ra_0 \cdot e^{-\alpha_x x} \quad (0.19)$$

Donde Ra_0 es la resistencia acústica para el concreto normal (0% de caucho), Ra es la resistencia acústica para un determinado porcentaje de caucho x . El exponencial se mide en decibeles o en Neper, por lo que las unidades de α_x son [dB/x%] o [Neper/x%].

Se realizó el ajuste de una curva exponencial a los datos de resistencia acústica, con lo que se determinó, por comparación con la ecuación (0.19) el coeficiente de atenuación en función del porcentaje de caucho presente en la muestra.

Esto se debe a que la ecuación teórica a la que se están ajustando los datos experimentales determina la atenuación en función del porcentaje de caucho en el material.

En el apéndice J se tienen las curvas exponenciales obtenidas donde se observa que las correlaciones son bastante buenas (cercanas a la unidad), obteniéndose en general los mejores valores para las muestras de mayor tamaño de partícula (tamiz 30).

Sin embargo en la medida en que se disminuye el tamaño del grano, empieza a tomar importancia el fenómeno de atenuación por reflexión dispersiva, el cual se manifiesta cuando la longitud de ondas es comparable al grano del agregado.

Como se indica en la ecuación (0.8) para la frecuencia empleada de 54 KHz y para el rango de velocidades empleado, el fenómeno ya ha comenzado a aparecer con agregados de 49 mm.

Por lo que al añadirse un agregado más fino, se incrementa la posibilidad de desviaciones, al dificultarse la propagación de la onda.

Tabla N°11: Coeficiente de atenuación (α) y correlación de la curva exponencial (R^2)

Tamiz	#30 (0.59 mm)		#50 (0.29 mm)	
Propiedad	R^2	α (Neper/x%)	R^2	α (Neper/x%)
Sin Tratamiento	1	0,0874	0,9868	0,13
NaOH	0,9975	0,0832	0,9951	0,1192
Silano	0,9797	0,0799	0,9953	0,1202

De los datos obtenidos es posible observar como los mayores valores de atenuación por porcentaje de caucho se tienen con las partículas de 0,29 mm (tamiz 50), presentándose una menor atenuación en las partículas de mayor tamaño.

En la tabla se observa como la atenuación por porcentaje de caucho, es menor en la medida en que se emplea un agente acoplante.

Para las muestras con partículas de caucho retenidas por el tamiz #30, se tiene que al emplear silano se logra una menor atenuación por porcentaje de caucho.

Por el contrario para las muestras con partículas de caucho retenidas por el tamiz #50 se encontró que los menores valores de atenuación se tienen cuando se emplea NaOH como agente de acoplamiento.

La atenuación indica la cantidad de energía del haz ultrasónico que es absorbida y dispersada por el material.

6.- Estimación de las propiedades del Concreto

Haciendo uso de los datos experimentales con los que se dispone, se elaboró una estimación de propiedades del material tales como el módulo de elasticidad dinámico o módulo de Young dinámico, así como se estudió el desarrollo de la resistencia durante el proceso de curado.

6.1.- Módulo de Elasticidad dinámico.

Para el cálculo del módulo de elasticidad dinámico se empleó las ecuaciones (0.15) y (0.16), las cuales relacionan el módulo de Young, con la velocidad de pulso ultrasónico y con la resistencia a la compresión, respectivamente.

Las dos ecuaciones dependen de la densidad del material, así como de constantes, que pueden ser determinadas experimentalmente, rompiendo probetas y midiendo directamente las propiedades para relacionarlas.

Sin embargo, la bibliografía recomienda valores para las constantes en caso de que no se puedan determinar experimentalmente. Por ejemplo, para la ecuación de L´ Hermite (0.16) se recomienda el valor medio de 22000 en cuanto que para la ecuación (0,15), que relaciona el módulo de Young con la velocidad de pulso ultrasónico, se recomienda el valor de $1,02 \times 10^2$.

Para el concreto normal y haciendo uso de estas constantes, el módulo de elasticidad dinámico calculado por la ecuación (0,15) es de 599228 Kg/cm², para el valor final de velocidad de pulso ultrasónico de 4511 m/s.

Al tiempo que este módulo, calculado para el mismo material haciendo uso de la ecuación de L´ Hermite, es de 385471 Kg/cm² para un valor de resistencia a la compresión de 30,32 MPa.

Como no se puede tener certeza de la validez de los valores de las constantes, se elaboró un programa que incluyendo las ecuaciones (0.20) y (0.21), análogas a las anteriores, pero que incorporan la relación de Poisson, calcula los valores de las constantes con las que se obtiene un módulo de Young consistente. (Ver el diagrama de flujo en el apéndice G)

$$Ed = K_3 \frac{\sqrt[3]{R}}{(1-\mu)} \quad (0.20)$$

Donde Ed es el módulo de elasticidad dinámico, R es la resistencia a la compresión y μ la relación de Poisson (6).

$$Ed = K_4 \frac{\rho \cdot c^2 \cdot (1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (0.21)$$

Donde ρ es la densidad (Kg/m³) y c es la velocidad de pulso ultrasónico (m/s)(6).

Se encontró que para una relación de Poisson de 0,25 se obtienen los valores del módulo de elasticidad dinámico que más se aproximan a los datos bibliográficos. En el concreto la relación de Poisson puede variar entre 0,11 y 0,33 aproximadamente.

En la figura N° 15a, se observa como para velocidades mayores a los 4500 m/s y relaciones agua/cemento de 0,48 a 0,53 se tiene que el módulo de elasticidad varía entre los 500000 Kg/cm² y los 400000 Kg/cm², para hormigones con densidad de 2400 Kg/m³.

Como el concreto que se está estudiando tiene una densidad en estado fresco mayor (2887 Kg/m³), se espera que el módulo de elasticidad dinámico, sea un poco mayor al que se representa en la figura N° 15a.

El módulo de elasticidad obtenido por el programa para una relación de Poisson de 0,25, en el concreto tradicional es de 512756 Kg/m³, que se puede considerar un valor razonable, intermedio entre 599228 Kg/cm² y 385471 Kg/cm², que son los valores de los módulos calculados por las ecuaciones (0.15) y la de L´ Hermite (0.16) respectivamente, cuando se emplea el valor de las constantes recomendado en la bibliografía.

Adicional al valor de módulo de elasticidad que satisface simultáneamente las ecuaciones (0.15), (0.16), (0.20) y (0.21) se encontró los valores de K para que se cumpla esa condición.

Posteriormente se dejó fija la relación de Poisson en 0,25 para estimar, haciendo uso del programa, el módulo de elasticidad dinámico de las mezclas con caucho y poder compararlas con el concreto tradicional.

En la tabla N°12 se muestran los valores calculados por el programa, para las constantes de las ecuaciones, así como los valores de módulo de elasticidad que las satisfacen.

Luego, empleando el valor de estas constantes, se procedió a la determinación mediante la segunda parte del programa, de la resistencia a la compresión y del módulo de Young que satisfacen simultáneamente todas las ecuaciones, para una relación de Poisson fija de 0,25.

De esta forma, haciendo uso de los datos de velocidad de pulso a medida que envejece el material, de los valores de las constantes y del programa, se modeló el comportamiento del módulo de Young y de la resistencia a la compresión durante el proceso de curado. (Apéndice H)

Se debe hacer notar que si bien estos valores no necesariamente son los valores reales de módulo de elasticidad dinámico ni de resistencia a la compresión, nos permiten modelar el comportamiento de estas variables con respecto a la edad del material, donde es posible hallar relaciones y establecer comparaciones.

Tabla N°12: Módulo de elasticidad dinámico y valores de las constantes para cada mezcla.

Mezcla	Acoplante	Tamiz	%	K1	K2	K3	K4	K5	E
M1	-	-	-	29161,40	8,74E-06	56872,71	1,05E-05	3,49E-05	5,13E+05
M21	-	30	5%	25415,58	9,00E-06	42269,20	1,08E-05	3,60E-05	2,77E+05
M22	-	30	10%	22571,74	9,28E-06	30702,71	1,11E-05	3,71E-05	1,35E+05
M31	-	50	5%	25496,76	9,00E-06	40461,28	1,08E-05	3,60E-05	2,42E+05
M32	-	50	10%	23046,75	9,23E-06	24421,16	1,11E-05	3,69E-05	6,50E+04
M51	NaOH	30	5%	24768,93	9,06E-06	41500,05	1,09E-05	3,62E-05	2,76E+05
M52	NaOH	30	10%	23329,07	9,20E-06	32462,47	1,10E-05	3,68E-05	1,49E+05
M71	NaOH	50	5%	25010,73	9,04E-06	39977,88	1,08E-05	3,62E-05	2,42E+05
M72	NaOH	50	10%	20214,42	9,59E-06	24389,91	1,15E-05	3,84E-05	8,42E+04
M81	Silano	30	5%	23653,67	9,17E-06	39333,30	1,10E-05	3,67E-05	2,58E+05
M82	Silano	30	10%	22256,17	9,32E-06	32078,38	1,12E-05	3,73E-05	1,58E+05
M61	Silano	50	5%	25464,39	9,00E-06	40432,84	1,08E-05	3,60E-05	2,42E+05
M62	Silano	50	10%	24923,83	9,05E-06	26410,18	1,09E-05	3,62E-05	7,03E+04

Los valores de la constante K1 corresponden a la ecuación de L´ Hermite (0.16), los de K2 a la ecuación (0,15), K3 y K4 a las ecuaciones de Chefdeville (0.20) y (0.21), en las que interviene la relación de Poisson y la constante K5 corresponde a la ecuación (0.22) que relaciona el módulo de Young con la velocidad de propagación de las ondas transversales c_t (6).

$$Ed = K_5 \cdot \rho \cdot c_t \cdot (1 - \mu) \quad (0.22)$$

Haciendo uso del valor fijado de la relación de Poisson (0,25), se calculó, empleando la ecuación (0.23) (6), la velocidad de propagación de las ondas transversales c_t , que se corresponden a cada velocidad longitudinal c conforme envejece el material (ver tablas con los valores en los apéndices).

$$\mu = \frac{2c_t^2 - c^2}{2c_t^2 - 2c^2} \quad (0.23)$$

En las gráficas siguientes se modela el desarrollo del módulo de Young durante el proceso de curado, para las diferentes mezclas y se comparan con la mezcla de concreto tradicional.

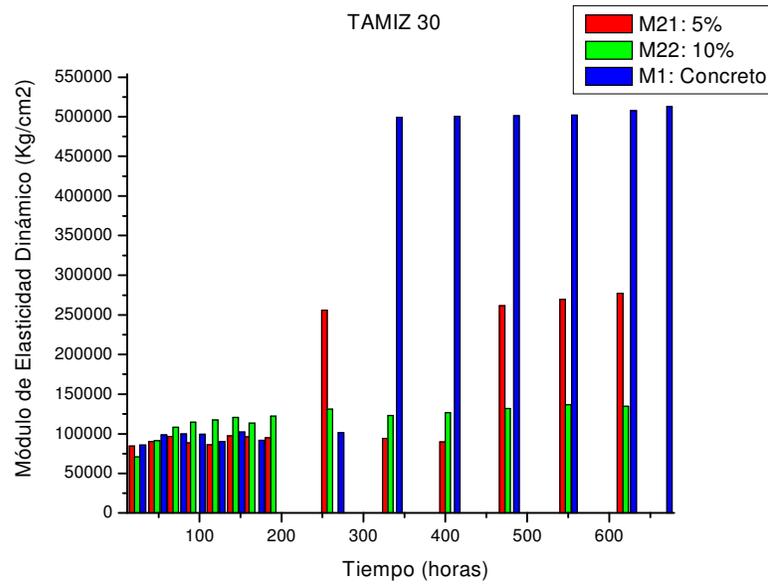


Figura N° 38: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.

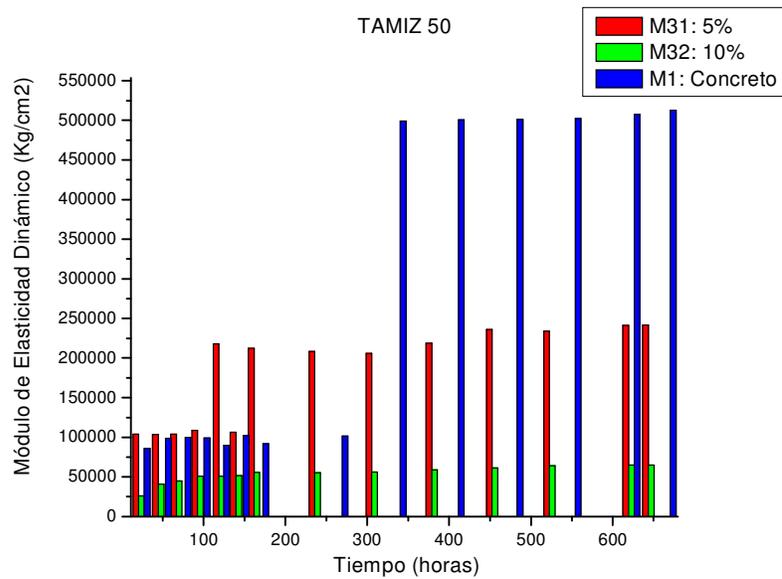


Figura N° 39: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.

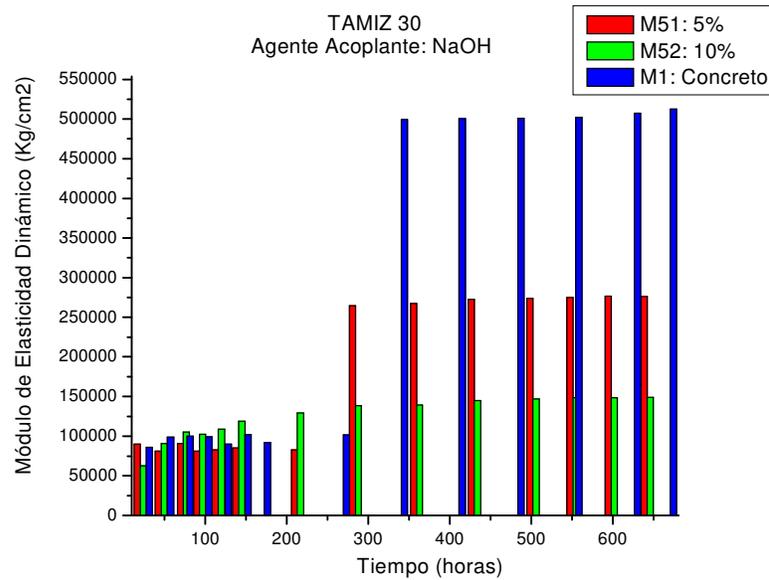


Figura N° 40: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: NaOH.

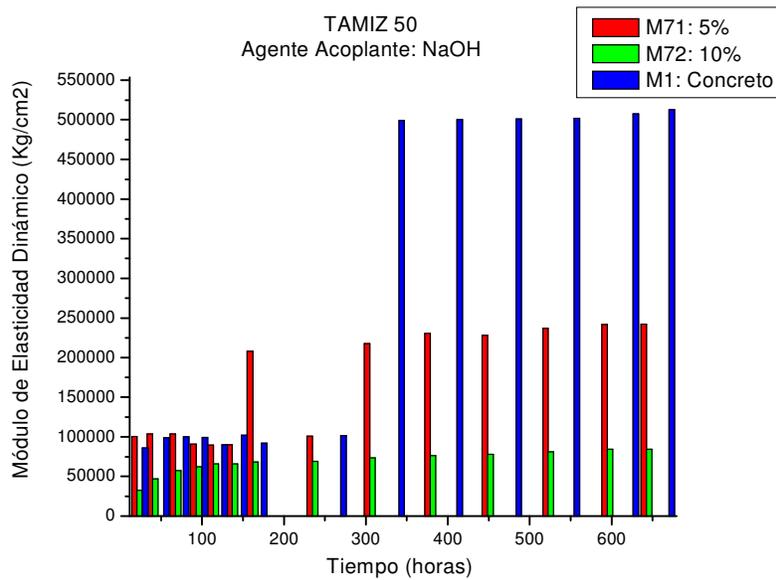


Figura N° 41: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: NaOH.

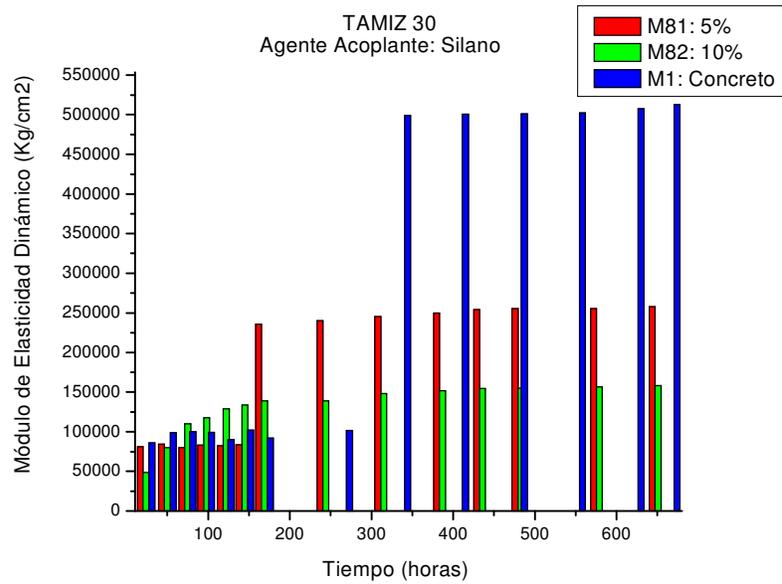


Figura N° 42: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: Silano.

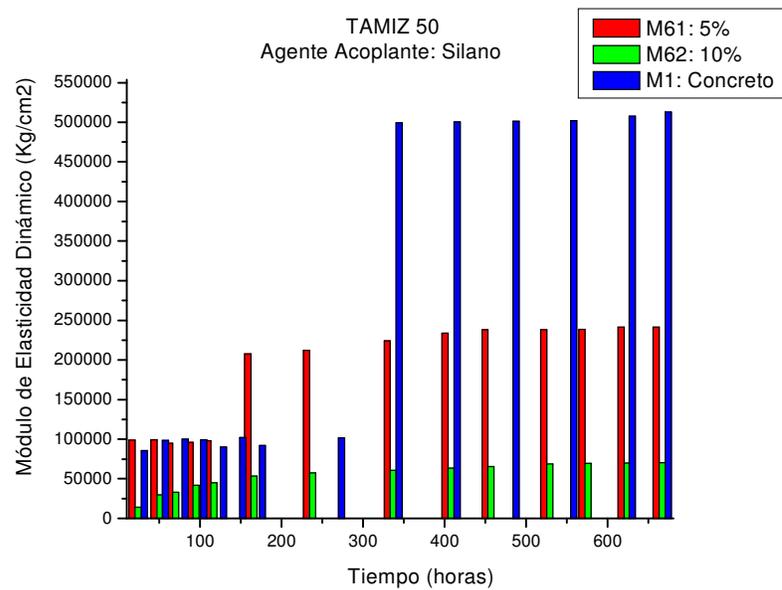


Figura N° 43: Módulo de Young para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: Silano.

En estas gráficas se observa como prácticamente todo el desarrollo del módulo de Young para el concreto tradicional ocurre violentamente el día 14 (350 horas) manteniéndose en valores bajos durante los primeros días del proceso de curado.

Así mismo se observa que conforme se aumente la cantidad de caucho en la muestra se alcanzan menores valores del módulo de Young, y la curva que modela su desarrollo en el tiempo es más suave, creciendo más lentamente.

Igualmente se observa en las gráficas, que en la medida en que se incrementa el porcentaje en peso de caucho en la mezcla, el punto donde del módulo de Young se desarrolla violentamente alcanzando prácticamente su valor final, ocurre a edades más tempranas y el incremento es menos brusco que para la mezcla de concreto tradicional.

6.2.- Resistencia a la compresión

En las gráficas siguientes se presentan los resultados de resistencia a la compresión modelados por el programa.

En estas gráficas se observa que el modelado de la resistencia a la compresión, presenta un comportamiento muy similar al del módulo de Young, donde prácticamente se alcanza el valor final en un crecimiento sumamente pronunciado, alrededor de las 350 horas de envejecimiento.

Sin embargo en el modelado del desarrollo de la resistencia a la compresión, el cambio es mucho más brusco que en el modelado del módulo de Young.

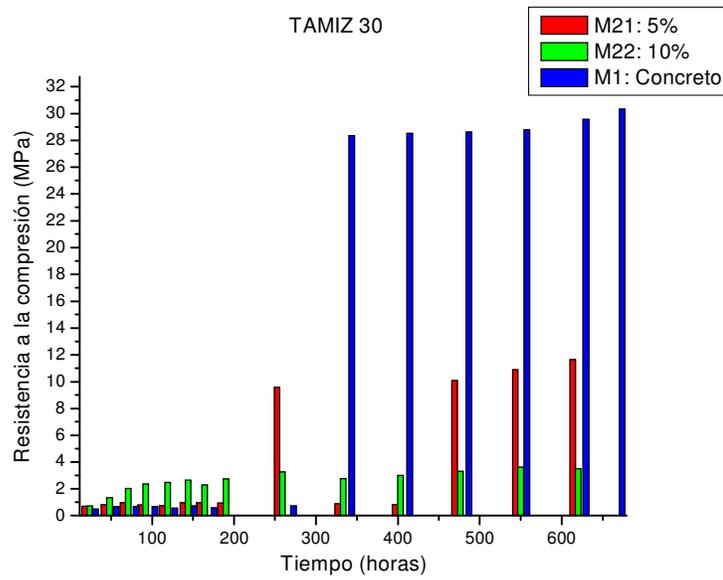


Figura N° 44: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.

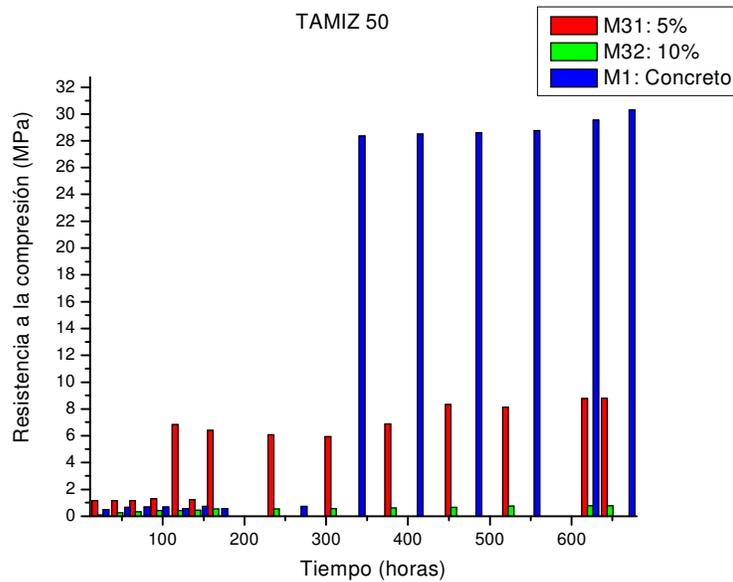


Figura N° 45: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.

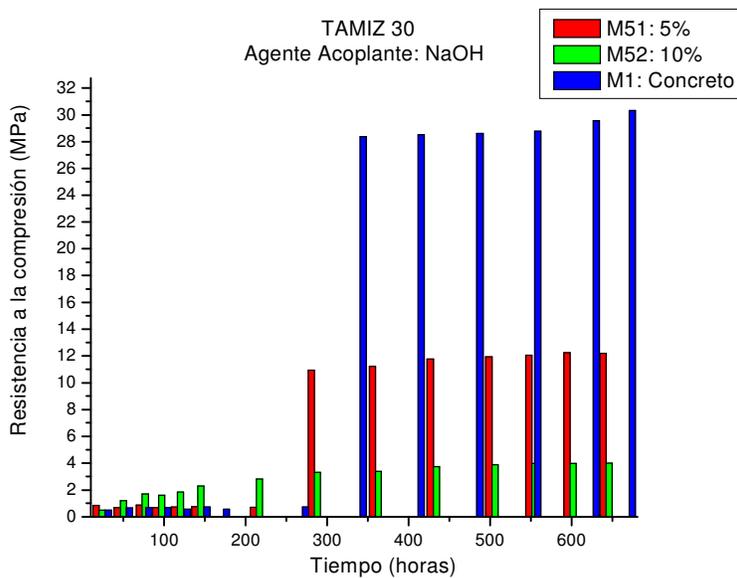


Figura N° 46: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: NaOH.

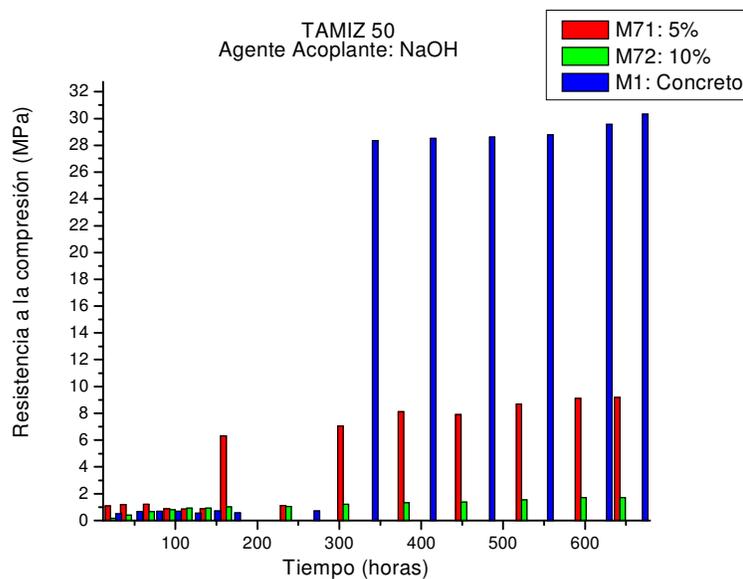


Figura N° 47: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: NaOH.

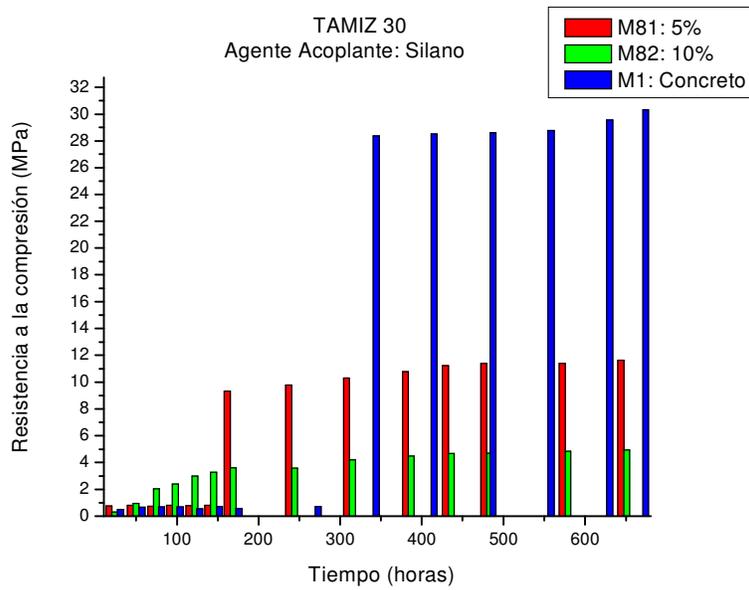


Figura N°48: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: Silano.

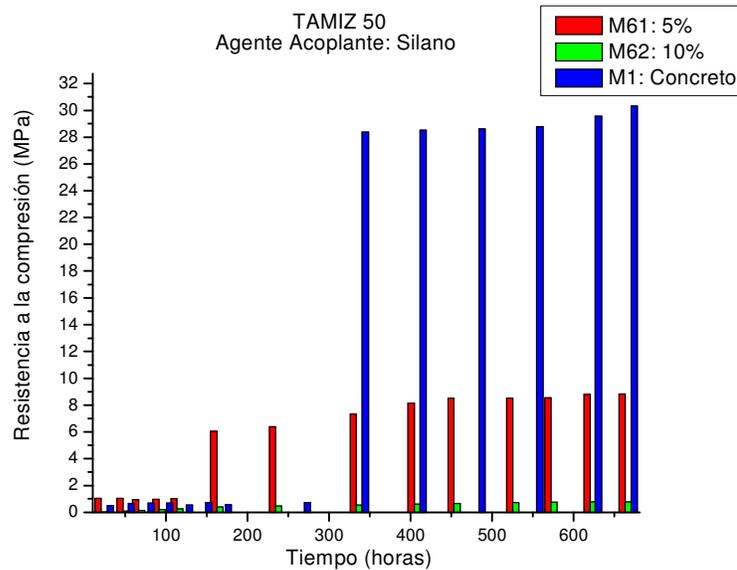


Figura N°49: Resistencia a la compresión para las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: Silano.

Para proporciones de 5% en peso de caucho, la resistencia disminuye notablemente y el incremento ocurre a las 250 horas aproximadamente para partículas de 0,59 mm (tamiz #30) y a las 150 horas para partículas de 0,29 mm (tamiz #50).

Con lo que se observa que en la medida en que la mezcla tiene una mayor resistencia, el crecimiento de la misma ocurre a edades cada vez mayores.

En el caso de la mezcla de tamiz #30, de 5% en peso de caucho, donde se empleo silano, se tiene que el incremento ocurre a las 150 horas aproximadamente, que es consistente conque para ese tamaño de partícula y para la concentración de silano empleada, este no está actuando como agente de acoplamiento, sino que por el contrario, está empeorando la calidad del material.

De igual forma se tiene que para la mezcla tratada con NaOH, de tamiz #30 y de 5% en peso de caucho se tiene que el incremento se presenta cerca de las 300 horas, lo que es consistente conque el NaOH actúa como agente de acoplamiento a las concentraciones empleadas.

Así mismo se observa como para las muestras con un 10% de caucho reciclado, no se presenta el incremento brusco que es evidente en las otras mezclas. La resistencia a la compresión cae notoriamente, siendo esta casi imperceptible en la gráfica cuando se emplean partículas de caucho de menor tamaño (tamiz #50).

CONCLUSIONES

- Conforme se incrementa el porcentaje de caucho en las muestras se obtiene una mayor dispersión de los datos experimentales.
- A edades tempranas la velocidad de propagación del pulso ultrasónico aumenta rápidamente, estabilizándose a partir de los 8 días para todas las mezclas.
- Las variaciones de la velocidad con respecto a la edad del concreto se presentan en rangos diferentes para las distintas mezclas, sin embargo sus características son muy similares.
- La velocidad de propagación en las mezclas con caucho disminuye, pronunciándose la caída a medida que se incrementa el porcentaje en peso de caucho. Una reducción en la velocidad es producida por varios factores: poca resistencia, micro fisuras y discontinuidades, baja densidad del material y presencia de aire en exceso por algún aditivo.
- El tratamiento con NaOH produjo un incremento en la velocidad de propagación del pulso ultrasónico para todos los porcentajes de caucho y todos los tamaños de partícula, con respecto las mezclas de caucho sin tratar.
- El tratamiento con silano produjo un incremento en la velocidad de propagación del pulso ultrasónico para la mezcla de concreto- caucho de tamiz #30 y 10% en peso y la de tamiz #50 y 5% en peso de caucho.

- El tratamiento con silano produjo una reducción en la velocidad de propagación del pulso ultrasónico para las mezclas de concreto - caucho de tamiz #30 y 5% en peso y la de tamiz #50 y 10% en peso.
- Se produce una mayor disminución en la velocidad de propagación del pulso ultrasónico, cuando se emplean partículas de 0,29 mm (tamiz #50) que al utilizarse partículas de caucho de 0,59 mm (tamiz #30) en la mezcla de concreto.
- La reducción de la velocidad debido al empleo de partículas de caucho de menor tamaño, se hace más pronunciada conforme se incrementa el porcentaje de caucho en las muestras.
- El coeficiente de atenuación por porcentaje de caucho aumenta, conforme se reduce el tamaño de las partículas de caucho.
- El coeficiente de atenuación por porcentaje de caucho disminuye con la utilización de los agentes acoplantes.
- Conforme se incrementa el porcentaje de caucho y se disminuye el tamaño de las partículas, la porosidad del material aumenta.
- Debido al proceso de curado y a la porosidad de las mezclas, las probetas de concreto con caucho muestran mayor cantidad de humedad interna con respecto a las de concreto tradicional.
- Conforme se incrementa el porcentaje en peso de caucho en las mezclas de concreto, se presenta una caída tanto de la resistencia a la compresión como del módulo de elasticidad dinámico.

- Cuando se disminuye el tamaño de partículas de caucho en las mezclas de concreto, tanto la resistencia a la compresión como el módulo de elasticidad dinámico disminuyen.
- En las curvas obtenidas, que modelan el comportamiento tanto de la resistencia a la compresión como del módulo de elasticidad dinámico, el crecimiento es más brusco, a medida que se reduce el porcentaje en peso de caucho.
- El punto de mayor crecimiento de las curvas que modelan el comportamiento, tanto de la resistencia a la compresión como del módulo de Young, se presenta a edades más tempranas conforme se incrementa el porcentaje en peso de caucho presente en la mezcla.
- No es posible determinar el módulo de Poisson indirectamente sin tener valores experimentales de la velocidad transversal de propagación del pulso ultrasónico.
- Las mediciones de velocidad de propagación del pulso ultrasónico en las losas dan valores sumamente dispersos. Al tener 5 cm de espesor están por debajo del límite recomendado de 8 cm como espesor mínimo para pulsos de alrededor de 50 KHz.
- En virtud de las características que se encontraron para las mezclas de concreto-caucho reciclado, estas pueden recibir la denominación de concreto poroso, el cual se emplea en áreas pavimentadas, en las que un drenaje inmediato es requerido, como en carreteras estacionamientos, pistas de aviación, pisos de invernaderos y canchas deportivas pavimentadas (tenis, fútbol de salón). Este material compuesto puede ser empleado también como concreto de relleno para nivelar pisos y techos o para las defensas en las autopistas.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de mejorar las propiedades de las mezclas de concreto caucho reciclado (ripio), se sugiere tomar en consideración lo siguiente para futuros estudios:

- Elaborar un mayor número de vigas, con el objeto de poder realizar mediciones de velocidad de propagación de las ondas transversales y poder determinar así, mediante la correlación de esos datos con las velocidades de propagación de las ondas longitudinales, la relación de Poisson.
- Elaborar un mayor número de probetas, para poder realizar ensayos destructivos a diferentes edades y correlacionar estos datos con los datos provenientes de los ensayos no destructivos con ultrasonido.
- Realizar mediciones directas no solo de la resistencia, sino también, tanto de la relación de Poisson como del módulo de elasticidad y comparar estos datos con los que se obtienen con ultra sonido, con el fin de determinar, de ser posible, las relaciones matemáticas que puedan establecerse entre estas propiedades mecánicas, la velocidad del pulso ultrasónico y el porcentaje de caucho reciclado presente en la muestra.
- Elaborar probetas cilíndricas, con diferentes longitudes, con el fin de obtener datos de la atenuación del material en términos de la longitud.
- Disminuir el contenido de caucho en las mezclas con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas del material.

- Emplear partículas de caucho de mayor tamaño, con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas del material.
- Realizar mediciones de tiempo de tránsito de la onda ultrasónica cada cuatro horas, en los intervalos comprendidos entre el quinto y el octavo día y entre el decimotercero y el decimoquinto, con el objeto de tener una imagen más detallada del comportamiento de la mezcla en los puntos más críticos.
- Estudiar la influencia que tiene en las propiedades mecánicas del material, la sustitución de una porción del agregado grueso por caucho reciclado y compararla con las propiedades que se obtienen cuando el reemplazo se hace sobre parte de la arena.
- Variar las concentraciones de los agentes acoplantes, tanto de silano A-174 como de hidróxido de sodio, para un porcentaje de caucho dado, con el objeto de encontrar la concentración óptima de acoplante para ese porcentaje de caucho.
- Repetir lo anterior para porcentajes de caucho diferentes, con el objeto de hallar una relación, si es posible, entre la concentración óptima de acoplante y el porcentaje de caucho presente en la muestra.
- Estudiar la conducción térmica del material.

BIBLIOGRAFIA

- 1- JONES, R. y FACAORAU, I., "Incearea Nedestructiva a Betonului" Editura Tehnica. Bucuresti. 1971.
- 2- JONES, R. Non-Destructive Testing of Concrete, Magazine of Concrete Research, No. 2. June, 1949.
- 3- KAPLAN, M. F. "The Relation Between Ultrasonic Pulse, Velocity and the Compressive Strength og Concrete Travin de Same Workability But Different Mix Proportions". 1960.
- 4- JONES, R. and GRAFIELD, E. N. "Deparment of Scieentific and Industrial Research" Road Research Technical Paper No. 34, (H.M. Stationery Office) 1955.
- 5- LESLIE, J. R. and CHESSMAN, W. J. "An Ultrasonic Method of Studing Determination and Cracking in Concrete Structures", Journal of the American Concrete Institute". September 1949.
- 6- TOBIO, J.M. "Ensayos no Destructivos, Métodos Aplicables a la Construcción". Instituto Eduardo Torroja de la Costrucción y del Cemento. Madrid. 1967.
- 7- CABANAS, G.P. "La Homogeneidad, Indice de Calidad del Hormigon". Revista Tecnica. Investigacion Estructural. Vol. V. No. 3. Cuba 1984.
- 8- DIAZ DE SMITTER, Maria Luisa. Resistencia Vs. Velocidad de Propagacion del Sonido en al Concreto. Boletin Tecnico del IMME No. 76, 1988.

- 9- NEVILLE, A.M., "Properties of concrete". Segunda Edición. Editorial Pitman Press. París, Tomos I y II (1973)
- 10- CURIE, J. Y P., "Comptes Rendus", Vol. 91 y Vol. 93. 1880. Paris.
- 11- LIPPMAN, G. "Principios de la Conservacion de la Electricidad". Annales Physiques Chimie. Vol. 24. 1881.
- 12- JAMES Electronic INC. "Instruccion Manual for Model C-4899" "V" Meter. May 1977.
- 13- PORRERO, J. SALAS R. "Manual del Concreto" Editorial Sidetur. Caracas. 1996.
- 14.- KOSMATKA S., PANARESE W. "Manual del Diseño y Control de Mezclas de Concreto". Editorial Industria. Mexico. 1992.
- 15- ROYO, J. "Manual de Tecnologia del Caucho". Segunda Edicion. España. 1990.
- 16- <http://www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industrial/caucho.htm>
- 17- FRIEDENTAL, E., "Seminario de Tecnologia del Caucho". Argentina 1994.
- 18- <http://www.oliveros.net/dural/givalgo/mbandag.htm>
- 19- DESSOUKI, A., TAHER, H. y EL-NAHAS "Preparation Of Composites of Natural Rubber Latex-Portland Cement for Moulds. Polymer International. Vol. 45, 4. 1998.

- 20- DIAZ, B. "Influencia del Carbonato de Caucho Tratado con Agentes de Acoplamiento sobre las Propiedades Mecánicas, Térmicas y Morfológicas de las Mezclas PP/PEAD y PP/PEAD/EPR" Universidad Central de Venezuela. Caracas. 1999.
- 21- COVENIN 1681-83. Ministerio de Fomento. "Método de Ensayo Para Determinar la Velocidad de Propagación de Ondas en el Concreto"
- 22- STRAFELLA, A., THOMAS, F. y RENGEL, H. "Influencia de Algunos Factores en la Evaluación Ultrasonica del Concreto". Trabajo Especial de Grado. Ingeniería Civil. UCV. Caracas. Junio 1991.

ANEXOS

Apéndice A. Normas y método de ensayo.

Se presenta a continuación un breve resumen de las normas COVENIN vigentes para la industria de la construcción, que serán usadas para el proceso elaboración y ensayo de las probetas de concreto-caucho reciclado.

1.- Método para mezclado de concreto en el laboratorio (norma COVENIN N° 354, ASTM: C 192-69).

1.1- Alcance.

En este método se describen los procedimientos que se recomiendan, para el mezclado del concreto en el laboratorio, destinado a la elaboración de probetas.

1.2- Aparatos.

Recipiente de mezclado: debe estar fabricado de un metal de grueso calibre, debe tener un fondo plano, debe ser impermeable y tener un altura y capacidad suficientes para permitir el mezclado de la totalidad la muestra.

Mezcladora: se debe emplear una mezcladora basculante, un tambor mezclador o una mezcladora de paleta de eje vertical, que posean la capacidad suficiente para mezclar las cantidades que requieren los ensayos y con las características apropiadas para la obtención de los asentamientos requeridos.

Herramientas pequeñas: es necesario el uso de artículos tales como baldes, palas, enrasador, guantes de goma, cucharas metálicas y de madera, cucharones y recipientes metálicos.

1.3.- Mezclado de concreto.

Generalidades: se debe mezclar una cantidad tal que quede un exceso de aproximadamente el 10% del volumen mezclado una vez que han sido moldeadas las probetas. Se recomiendan no cambiar las secuencias de mezclado, entre las diferentes mezclas, a menos que se desee estudiar el efecto de tal variación.

Aditivos: se debe mezclar con la arena, aquellos aditivos en polvo muy insolubles en agua pero que contienen sales higroscópicas, que pueden producir pelotas de cemento.

Mezclado con máquina: se debe colocar en la mezcladora primero el agregado grueso, con parte del agua de mezclado y la solución de aditivo si es requerida. Se debe echar a andar la mezcladora, y si es posible, mientras la mezcladora está girando, se debe agregar el agregado fino, el cemento y el resto de agua, si no, se puede hacer esta operación, deteniendo la mezcladora después de que ha girado con el agregado grueso y parte del agua de mezclado. Luego, una vez que todos los materiales estén dentro de la mezcladora, se procede a mezclar durante tres minutos, se deja reposar la mezcla durante tres minutos, para finalmente mezclar dos minutos. Se debe cerrar la compuerta de descarga de la mezcladora, durante el período de reposo con el fin de evitar la evaporación. Con el fin de eliminar la segregación, el concreto debe ser descargado de la mezcladora en un recipiente limpio y ligeramente húmedo, remezclando luego con la pala metálica hasta que la mezcla quede totalmente uniforme.

2.- Método para la elaboración, curado y ensayo de probetas cilíndricas de concreto (Norma COVENIN N° 338, ASTM: Con 1-63).

2.1.- Alcance.

En este método son descritos los procedimientos para la elaboración curado y ensayo de probetas cilíndricas de concreto.

2.2.-Aparatos.

Moldes metálicos cilíndricos, de $152,1 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$ de diámetro, como una altura de $305 \text{ mm} \pm 6 \text{ mm}$.

Cuchara de muestreo y cuchara de albañilería.

Barra compactadora. Una barra recta y lisa de acero de 16 mm de diámetro, de punta semiesférica y de 60 centímetros de longitud.

Base del molde de material no absorbente como el tesoro mínimo de 7 mm.

2.3.- Preparación del molde.

La superficie interior del molde debe ser cuidadosamente aceitada, para lo cual sólo se permite el uso de aceites minerales y otros productos para tal fin.

La base del molde, al igual que las superficies interiores, debe presentar un aspecto limpio y aceitado. Se deben sellar, con una mezcla de parafina y cera virgen, o algún otro material inocuo sobre las propiedades del concreto, las zonas de contacto entre molde y base, con el fin de evitar las pérdidas de agua.

2.4.- Elaboración de las probetas.

El molde, debe ser llenado con concreto fresco hasta un tercio de la altura total, procediéndose luego a la compactación, haciendo uso de la barra compactadora,

mediante 25 golpes en la misma dirección del eje de molde, repartidos uniformemente de manera tal que se abarque toda la sección. Se debe repetir este proceso con los dos tercios restantes, hasta completar la totalidad del molde. En la última capa se recomienda colocar material en exceso, con el fin de que el mismo pueda enrasarse a tope sin que se requiera que más material sea añadido.

2.5.- Curado de las probetas.

Las probetas se deben mantener dentro de su molde, durante las siguientes 24 horas. Deben estar cubiertas, de manera de que se mantengan constantemente en estado húmedo. Posteriormente, entre las 24 y 48 horas siguientes, se deben retirar de sus moldes y transportar al ambiente de curado.

El ambiente de curado debe ser uno de los siguientes: arena limpia, húmeda y saturada; bajo agua limpia en reposo; o en la cámara húmeda, controlándose la humedad relativa entre 90 y 100%.

3.- Método de ensayo para determinar la velocidad de propagación de ondas en el concreto (Norma COVENIN N° 1681-80, ASTM: C-597-79).

3.1.- Alcance.

Esta norma contempla el método de ensayo, para determinar comparativamente la calidad del concreto, mediante la medición de la velocidad de propagación de ondas elásticas en su seno. Este método ensayo puede ser empleado para la estimación del estado de agrietamiento o deterioro, en estructuras de concreto, asimismo se puede emplear, para el estudio de la homogeneidad de los concretos puestos en obra o para indicar la presencia cambios en alguna de sus características.

A menos que se disponga, de una adecuada cantidad de ensayos de resistencia mecánica y de velocidad de propagación de ondas, efectuados en la misma serie de muestras de un determinado concreto, no se deben utilizar los resultados obtenidos por este método, para calcular la resistencia o el módulo de elasticidad del concreto. De tenerse la suficiente cantidad ensayos de resistencia y de velocidad de propagación, es posible establecer una correlación que sirva para la estimación de la resistencia mecánica del mismo concreto.

3.2.- Aparatos.

Generador de pulso: consiste en un circuito electrónico para generar pulsos de alta frecuencia y en un transductor para transformar estos pulsos en impulsos mecánicos.

Circuito receptor: consiste de un transductor similar al del transmisor, en el que se transforman los impulsos mecánicos en pulsos eléctricos. El voltaje generado en el receptor es amplificado antes de ser transmitido a la unidad de lectura.

Unidad de lectura: consiste en un instrumento que permite leer tiempos comprendidos en un rango mínimo de 0,1 micro segundos a 1000 micro segundos con una aproximación del 1%.

Dispositivo calibración: consiste en una probeta previamente calibrada, para fijar la lectura de referencia en el aparato.

3.4.- Determinación de la velocidad de propagación de ondas en el concreto.

Primeramente las zonas de aplicación de los transductor deben estar limpias, lisas, secas y libres de todo revestimiento, posteriormente se debe aplicar vaselina o similar en las superficies de contacto, a menos que se utilicen transductores

puntuales, con el objeto de garantizar un buen acoplamiento entre el transductor y el concreto.

Para realizar la medición se deben presionar los transductores firmemente contra la superficie de concreto.

Si la señal recibida no es definida (baja relación señal ruido) se debe comprobar que se ha cumplido con lo indicado en los puntos anteriores, o si el aparato que se utiliza, tiene la potencia adecuada para cubrir la distancia de medición.

Se toma cuidadosamente la lectura del tiempo de paso de la ondas con aproximación del 1%.

Se mide la distancia entre los dos puntos de aplicación de los transductores (base de medición) con aproximación del 1%.

Apéndice B. Cálculos

Mediante la ecuación (0.13) y las lecturas de tiempo registradas por el equipo, se determina la velocidad de viaje de Pulso Ultrasónico.

Haciendo uso de la ecuación (0.16) y del valor de la resistencia a la compresión a los 28 días de cada uno de los materiales, obtenidos por los bachilleres Lisette C. Briceno S. y Adrian J. De Oliveira V, se calcula el valor del modulo de elasticidad dinámico.

Con este modulo, el valor del Pulso Ultrasónico y con los valores de densidad del material obtenidos, por los bachilleres Lisette C. Briceno S. y Adrian J. De Oliveira V, se puede obtener una ecuación como la expresada en (0.15), que nos permita relacionar la velocidad de Pulso Ultrasónico con el Modulo de Elasticidad Dinámico.

La Impedancia Acústica se calculara, para los diferentes materiales y durante el proceso de envejecimiento de los mismos, haciendo uso del valor de la Velocidad de Pulso Ultrasónico, la densidad de la mezcla y la ecuación (0.3)

Como la Impedancia Acústica tiene una relación directamente proporcional a la presión acústica, es posible desarrollar una ecuación análoga a la expresada por (0.7), para obtener el efecto atenuador de las diferentes composiciones de caucho en la mezcla.

Apéndice C. Gráficos Utilizados en el Diseño de Mezclas.

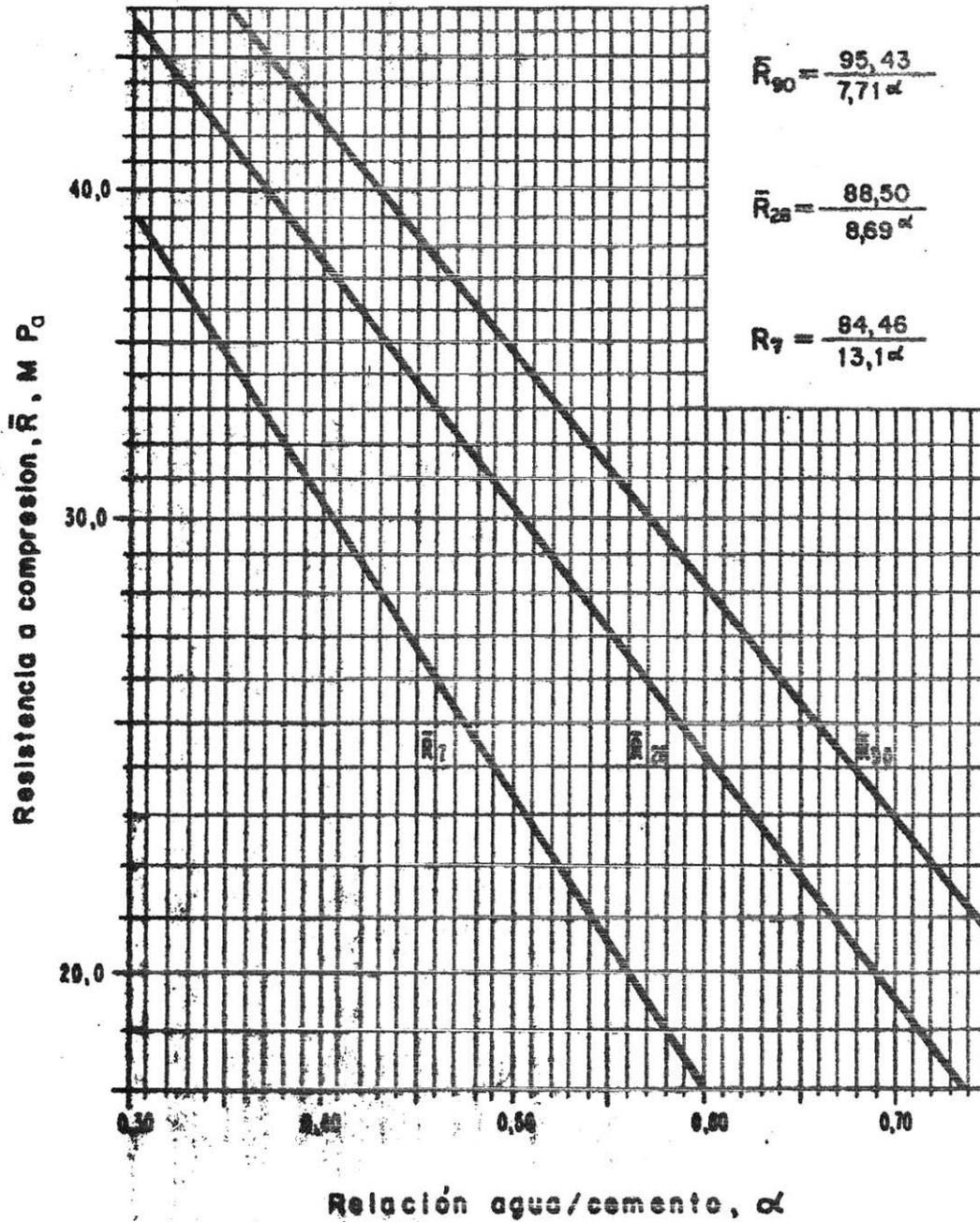


Figura N°50 Ley de Abrams

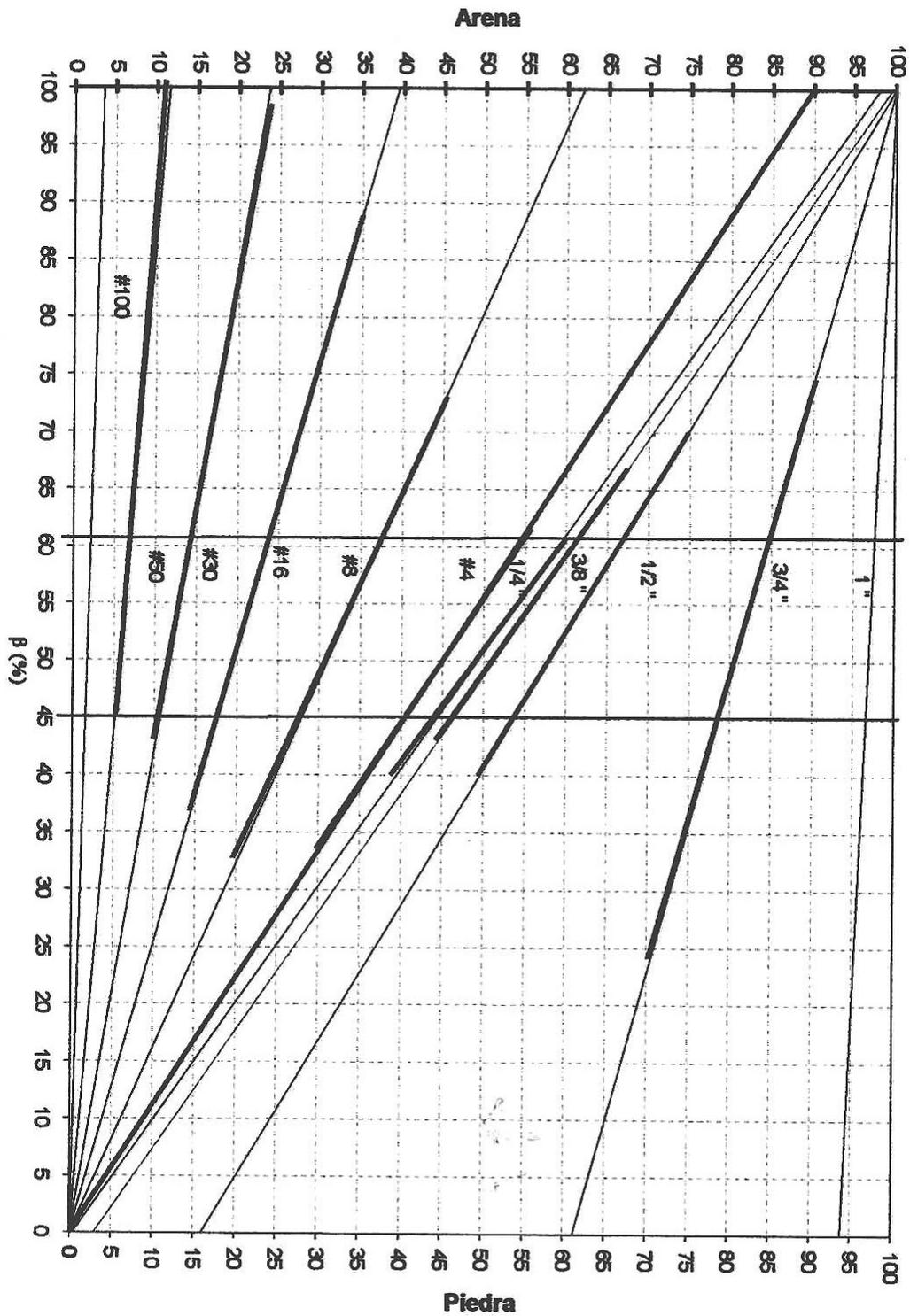


Figura N° 51 Relación Arena/Agregado Grueso

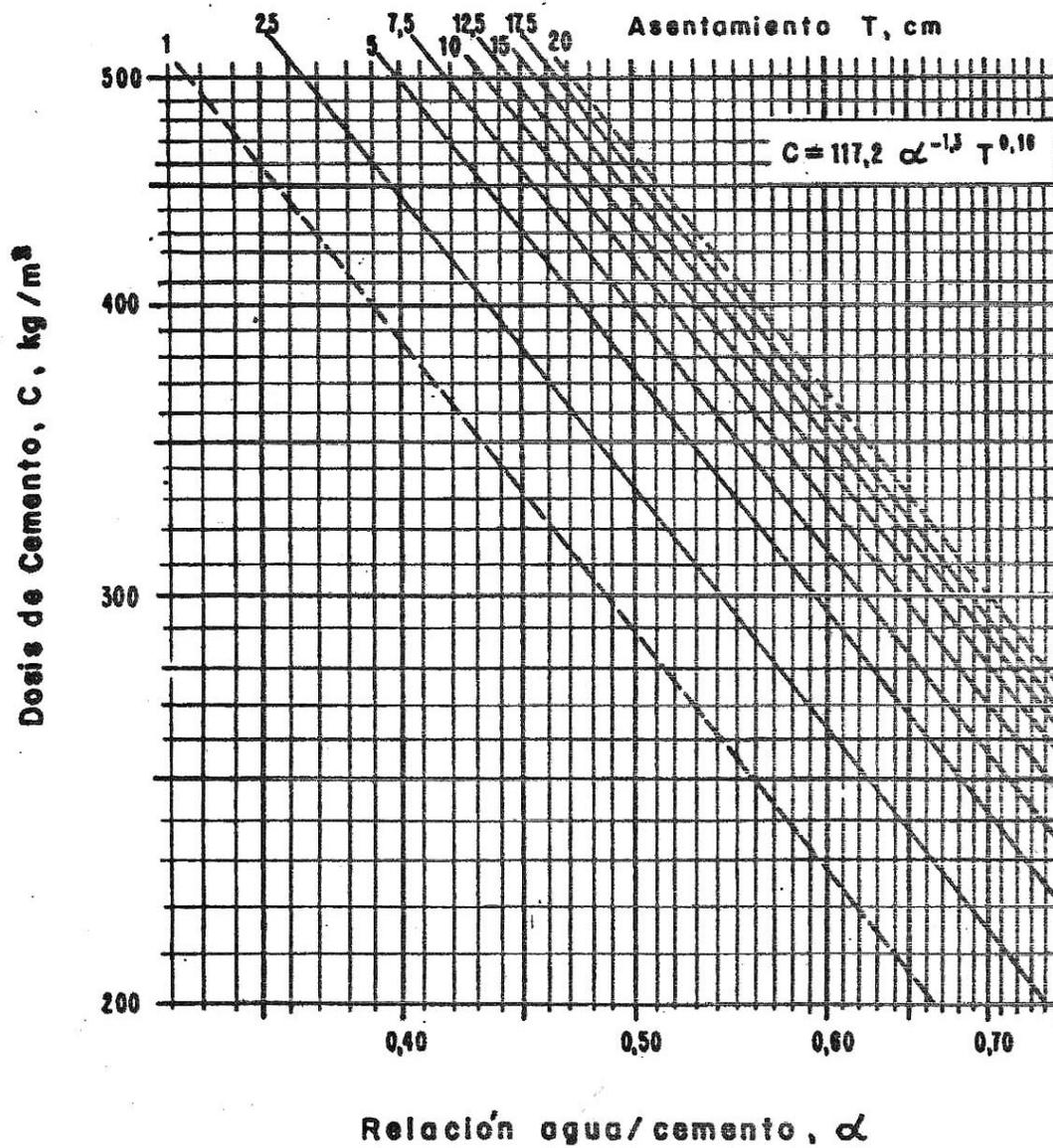


Figura N° 52 Relación Triangular

Apéndice D. Data experimental

En las tablas que se presentan a continuación, se muestra la data experimental que se obtuvo durante el desarrollo de los experimentos.

Las letras A,B,C y D representan las diferentes probetas que se utilizaron para evaluar las propiedades de cada mezcla.

Tabla N° 13: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto normal.

M1 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)				Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D		
24	3456	3417	3367	3293	3383	70,35
50	3891	3856	3807	3871	3856	35,79
74	4082	4049	3995	4027	4038	36,59
97	4231	4190	4208	4144	4193	37,08
121	4243	4231	4213	4190	4220	23,20
145	4484	4280	4255	4243	4316	113,46
169	4274	4231	4304	4237	4262	33,97
266	4280	4360	4317	4304	4315	33,86
337	4451	4458	4464	4431	4451	14,24
408	4444	4464	4471	4444	4456	13,65
480	4458	4484	4451	4444	4459	17,48
551	4464	4478	4464	4451	4464	10,85
623	4518	4491	4478	4464	4488	22,97
667	4532	4532	4505	4478	4511	25,92

M1: CONCRETO NORMAL

Tabla N°14: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #30.

M21 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D	E		
24	2688	2700	2700	2698	2710	2699	7,79
48	3049	3003	3067	2997	3021	3027	30,09
71	3128	3198	3293	3178	3198	3199	59,79
92	3322	3337	3371	3268	3348	3329	38,57
119	3352	3367	3405	3330	3367	3364	27,58
144	3390	3371	3394	3371	3444	3394	30,11
164	3330	3304	3341	3297	3261	3306	31,20
190	3401	3409	3390	3352	3390	3388	21,96
259	3517	3538	3538	3464	3521	3516	30,22
333	3390	3484	3367	3352	3330	3385	59,93
403	3378	3456	3444	3405	3417	3420	31,08
476	3567	3509	3571	3542	3580	3554	28,91
550	3597	3619	3580	3623	3619	3608	18,50
620	3667	3686	3654	3614	3667	3658	26,68

M21: TAMIZ 30; 5 % CAUCHO

Tabla N°15: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #30.

M22 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D	E		
24	1636	1938	2072	1956	2069	1934	177,93
48	1916	2240	2280	2259	2306	2200	160,86
71	2094	2471	2471	2479	2461	2395	168,80
92	2171	2519	2566	2519	2555	2466	166,44
119	2256	2555	2573	2536	2564	2497	135,50
144	2308	2593	2575	2571	2580	2525	121,87
164	2221	2508	2469	2532	2525	2451	131,08
190	2297	2667	2564	2568	2627	2545	144,83
259	2775	2620	2715	2564	2504	2636	110,01
333	2335	2620	2591	2584	2629	2552	122,86
403	2410	2653	2597	2606	2683	2590	106,63
476	2439	2700	2691	2653	2732	2643	117,48
550	2457	2755	2740	2750	2765	2693	132,39
620	2423	2708	2732	2740	2750	2671	139,09

M22: TAMIZ 30; 10 % CAUCHO

Tabla N°16: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #50.

M31	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	Tiempo (horas)	A	B	C	D		
24	2611	2653	2586	2591	2515	2591	50,08
48	2830	2868	2791	2804	2804	2819	30,82
70	2863	2938	2967	2863	2882	2903	47,70
96	3093	3202	3151	3165	3148	3152	39,22
122	3226	3371	3289	3279	3293	3292	51,90
143	3058	3188	3209	3106	3168	3146	62,30
165	3257	3268	3243	3226	3250	3249	15,83
239	3198	3293	3191	3222	3175	3216	46,40
309	3209	3209	3141	3233	3198	3198	34,06
382	3268	3390	3257	3268	3297	3296	54,48
456	3425	3425	3432	3460	3382	3425	27,97
526	3401	3448	3378	3472	3348	3410	50,57
623	3421	3480	3480	3480	3448	3462	26,89
647	3421	3472	3488	3492	3448	3464	29,94

M31: TAMIZ 50; 5 % CAUCHO

Tabla N°17: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #50.

M32	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	Tiempo (horas)	A	B	C	D		
24	1191	1484	1339	1326	965	1261	195,35
48	1500	1695	1689	1567	1418	1574	120,02
70	1542	1788	1780	1659	1499	1654	132,59
96	1630	1907	1889	1770	1582	1756	147,25
122	1648	1911	1763	1780	1681	1757	102,31
143	1667	1881	1794	1813	1709	1773	85,17
165	1666	1985	1960	1881	1685	1835	151,05
239	1671	1963	1942	1886	1705	1833	136,22
309	1678	1960	1999	1926	1681	1848	156,60
382	1719	2024	1989	1976	1736	1889	148,50
456	1726	2157	1989	1963	1807	1929	167,83
526	1756	2151	2126	2007	1828	1974	176,06
623	1770	2198	2086	2030	1851	1987	174,51
647	1771	2196	2083	2033	1852	1987	173,24

M32: TAMIZ 50; 10 % CAUCHO

Tabla N°18: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: NAOH.

M51	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	Tiempo (horas)	A	B	C	D		
24	2844	2962	2844	2817	2828	2859	58,62
50	3099	3132	3046	3046	3046	3074	39,83
77	3188	3233	3165	3198	3175	3192	26,32
97	3233	3222	3209	3215	3198	3215	13,12
120	3293	3304	3233	3279	3293	3280	28,06
145	3268	3304	3398	3341	3378	3338	53,01
217	3448	3497	3444	3456	3444	3458	22,11
288	3614	3628	3628	3584	3563	3603	28,70
363	3632	3641	3632	3619	3584	3622	22,29
434	3650	3650	3663	3690	3628	3656	22,90
506	3663	3672	3659	3686	3650	3666	13,68
555	3686	3672	3667	3686	3659	3674	11,73
602	3695	3690	3681	3695	3663	3685	13,31
646	3695	3681	3676	3690	3667	3682	10,78

M51: TAMIZ 30; 5 % CAUCHO; Agente Acoplante NaOH

Tabla N°19: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.

M52	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	Tiempo (horas)	A	B	C	D		
24	1791	1764	1929	1954	1824	1852	84,81
50	2161	2172	2259	2410	2151	2231	108,93
77	2390	2335	2398	2613	2281	2404	126,34
97	2390	2271	2410	2453	2329	2371	71,31
120	2457	2366	2463	2532	2404	2444	63,09
145	2532	2525	2519	2676	2525	2555	67,64
217	2613	2584	2722	2765	2636	2664	76,40
288	2715	2703	2801	2863	2700	2756	72,51
363	2691	2698	2828	2885	2725	2765	86,43
434	2801	2752	2828	2890	2828	2820	49,94
506	2817	2752	2857	2941	2844	2842	68,46
555	2817	2750	2882	2985	2844	2855	87,03
602	2820	2752	2879	2979	2846	2855	83,48
646	2822	2755	2882	2985	2849	2859	84,74

M52: TAMIZ 30; 10 % CAUCHO; Agente Acoplante NaOH

Tabla N°20: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.

M71	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	Tiempo (horas)	A	B	C	D		
24	2344	2410	2439	2455	2400	2409	42,88
43	2817	2801	2791	2809	2809	2805	9,91
71	3055	3055	3040	3106	3015	3054	33,12
96	3209	3209	3185	3198	3202	3200	9,81
117	3168	3240	3202	3188	3161	3192	31,29
140	3198	3229	3188	3185	3168	3194	22,72
165	3209	3243	3233	3222	3209	3223	15,19
238	3188	3233	3109	3198	3165	3179	46,04
308	3279	3378	3268	3257	3293	3295	48,40
382	3367	3378	3367	3390	3444	3389	32,17
452	3390	3390	3261	3425	3394	3372	63,69
526	3436	3456	3386	3468	3432	3436	31,46
598	3452	3476	3464	3501	3456	3470	19,45
646	3456	3476	3476	3497	3472	3475	14,36

M71: TAMIZ 50; 5 % CAUCHO; Agente Acoplante NaOH

Tabla N°21: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.

M72	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	Tiempo (horas)	A	B	C	D		
24	1382	1366	1406	1377	1361	1379	17,85
43	1626	1624	1707	1697	1623	1656	42,68
71	1788	1829	1929	1824	1802	1834	55,61
96	1848	1893	1911	2007	1899	1911	58,21
117	1901	1917	2048	2048	1913	1965	75,45
140	1910	1914	2055	2034	1899	1962	75,47
165	1999	1961	2058	2034	1963	2003	42,75
238	1967	1993	2076	2041	1980	2012	45,57
308	2020	2072	2141	2111	2039	2077	49,93
382	2101	2096	2177	2157	2048	2116	51,61
452	2091	2120	2166	2182	2105	2133	39,40
526	2126	2143	2239	2239	2151	2179	54,91
598	2157	2204	2281	2306	2157	2221	69,64
646	2146	2206	2280	2308	2161	2220	71,36

M72: TAMIZ 50; 10 % CAUCHO; Agente Acoplante NaOH

Tabla N°22: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: Silano.

M81 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D	E		
24	2398	2390	2342	2335	2372	2367	28,34
50	2814	2775	2765	2747	2775	2775	24,55
75	3077	3090	3058	3046	3077	3069	17,40
98	3175	3268	3198	3175	3165	3196	42,10
122	3289	3297	3279	3275	3264	3281	12,58
145	3322	3363	3333	3311	3359	3338	22,81
169	3398	3488	3386	3375	3382	3406	46,93
244	3436	3509	3409	3421	3417	3438	40,59
315	3429	3529	3460	3484	3468	3474	36,96
364	3492	3571	3492	3492	3488	3507	35,83
436	3529	3571	3476	3525	3571	3535	39,47
483	3538	3580	3472	3529	3606	3545	51,25
579	3550	3509	3529	3538	3597	3545	32,99
651	3542	3555	3538	3576	3597	3561	24,84

M81: TAMIZ 30; 5 % CAUCHO; Agente Acoplante Silano

Tabla N°23: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #30. Agente acoplante: Silano.

M82 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D	E		
24	1678	1635	1600	1542	1583	1608	51,44
50	2151	2068	2019	2012	2062	2062	55,28
75	2519	2483	2372	2366	2360	2420	75,22
98	2584	2568	2475	2449	2412	2498	75,42
122	2657	2620	2620	2602	2571	2614	31,48
145	2667	2683	2643	2667	2660	2664	14,51
169	2691	2732	2732	2700	2740	2719	22,01
244	2725	2725	2683	2715	2732	2716	19,27
315	2809	2809	2791	2817	2791	2803	11,91
387	2854	2879	2817	2857	2788	2839	36,24
436	2882	2947	2844	2863	2791	2865	56,98
483	2899	2927	2836	2868	2817	2869	44,87
579	2913	2899	2885	2871	2857	2885	21,93
651	2927	2899	2910	2882	2863	2896	24,82

M82: TAMIZ 30; 10 % CAUCHO; Agente Acoplante Silano

Tabla N°24: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 5% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: Silano.

M61 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D	E		
24	2439	2427	2449	2390	2379	2417	30,64
51	2737	2705	2691	2691	2700	2705	19,21
70	2882	2854	2879	2871	2910	2879	20,17
95	2918	2967	3046	2985	2976	2979	45,59
117	3099	3036	3090	3090	3090	3081	25,19
166	3222	3209	3279	3257	3268	3247	30,15
238	3247	3243	3341	3282	3293	3281	39,74
337	3367	3363	3386	3382	3371	3374	9,83
408	3436	3456	3448	3452	3432	3445	10,23
457	3476	3464	3488	3492	3460	3476	14,24
529	3448	3476	3501	3505	3460	3478	24,62
576	3432	3432	3509	3538	3488	3480	46,76
624	3448	3480	3529	3538	3501	3499	36,58
667	3452	3472	3525	3555	3505	3502	40,83

M61: TAMIZ 50; 5 % CAUCHO; Agente Acoplante Silano

Tabla N°25: Velocidad de pulso ultrasónico para las muestras de concreto mezclado con 10% en peso de caucho. Tamiz #50. Agente acoplante: Silano.

M62 Tiempo (horas)	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/seg)					Promedio (m/seg)	Desviación Estándar (S)
	A	B	C	D	E		
24	909	908	917	861	843	888	33,58
51	1315	1267	1348	1265	1265	1292	37,97
70	1323	1348	1390	1386	1367	1363	27,85
95	1571	1487	1589	1496	1499	1528	47,66
117	1600	1583	1623	1592	1550	1590	26,61
166	1770	1699	1791	1697	1684	1728	48,62
238	1795	1788	1832	1774	1774	1793	23,60
337	1820	1843	1929	1820	1820	1847	47,19
408	1875	1893	1935	1870	1863	1887	29,00
457	1929	1917	1963	1881	1901	1918	31,01
529	1963	1917	2072	1917	1948	1963	63,85
576	1960	1901	2096	1951	1975	1977	72,50
624	1966	1917	2096	1962	1975	1983	67,13
667	1963	1922	2095	1961	1984	1985	65,46

M62: TAMIZ 50; 10 % CAUCHO; Agente Acoplante Silano

Apéndice E. Gráficas de velocidad de pulso vs. edad del material.

A continuación se presentan las curvas que se obtuvieron de graficar la velocidad media para cada una de las mezclas.

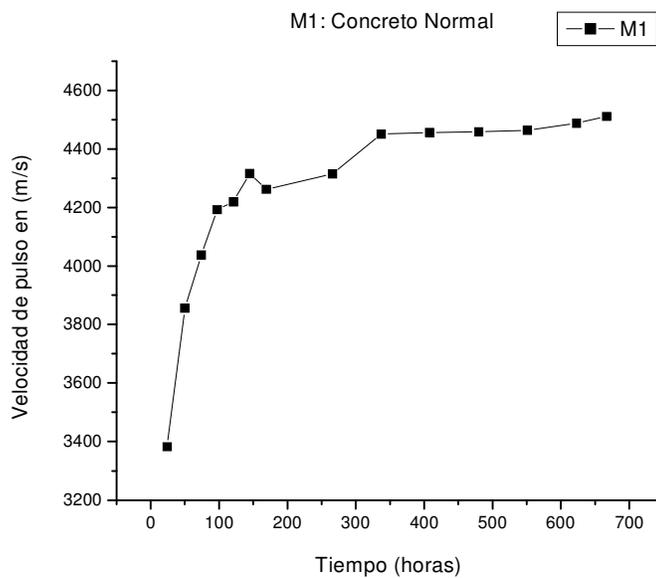


Figura N° 53: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto normal.

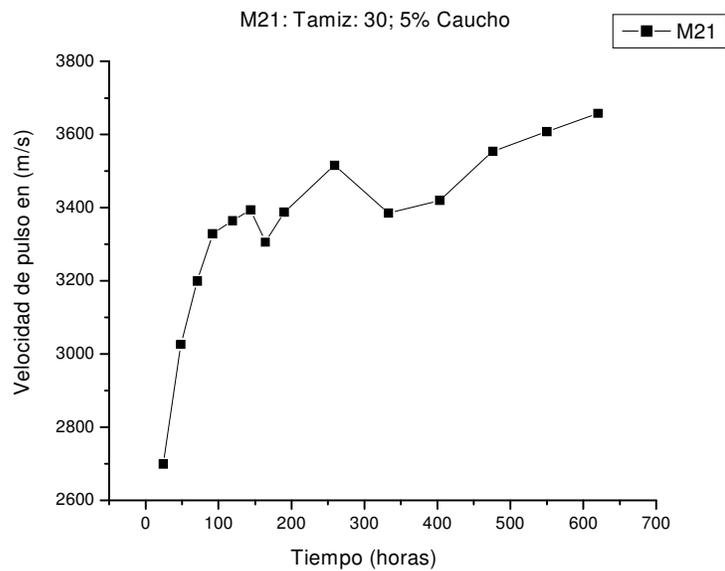


Figura N° 54: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #30.

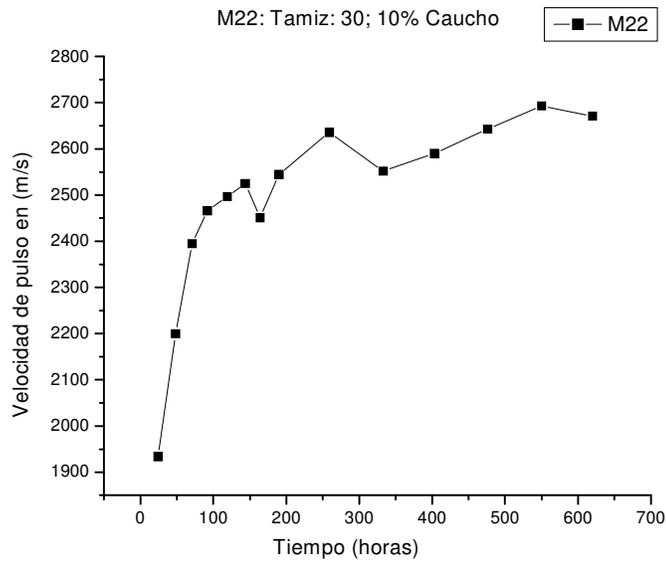


Figura N° 55: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #30.

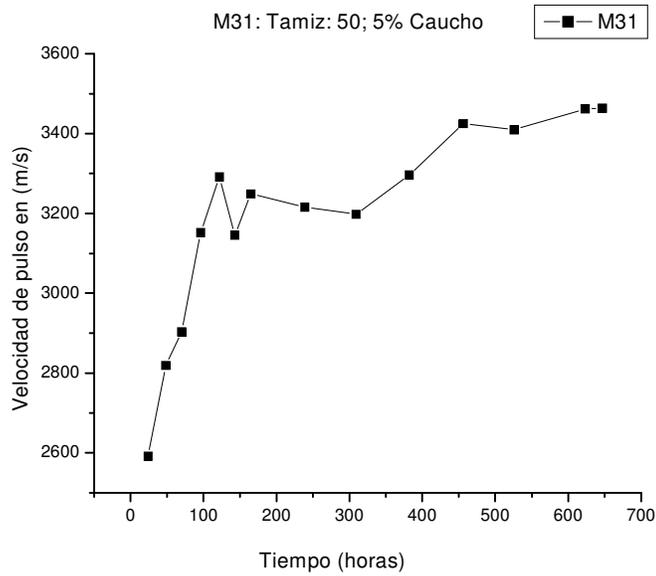


Figura N°56: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #50.

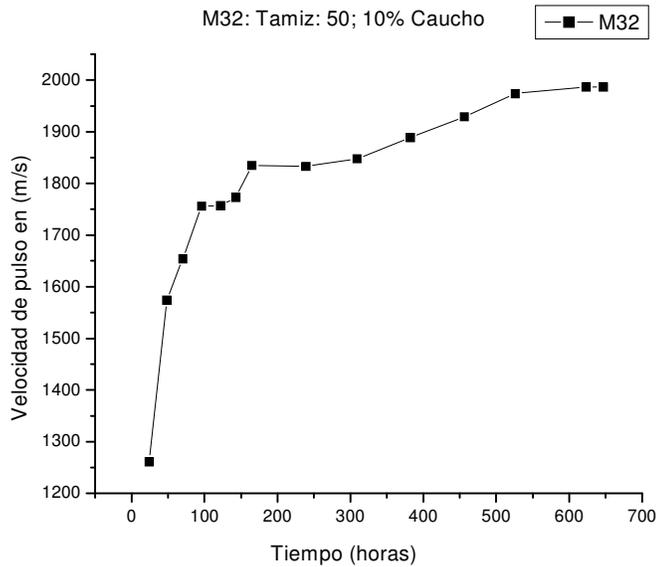


Figura N°57: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #50.

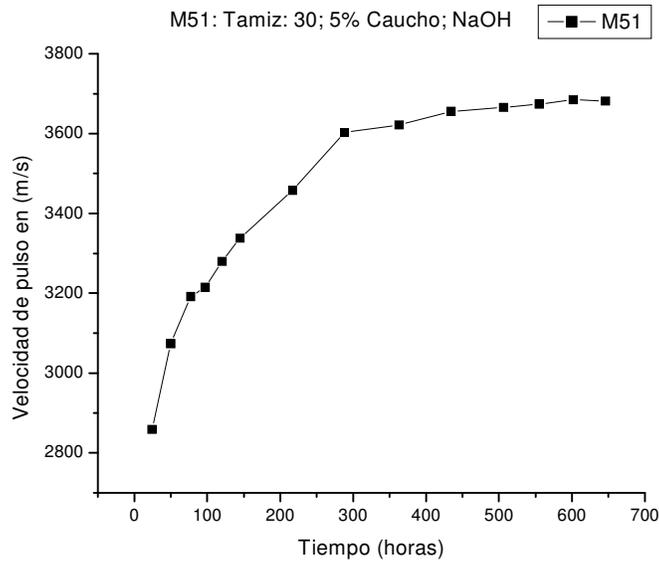


Figura N°58: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: NaOH.

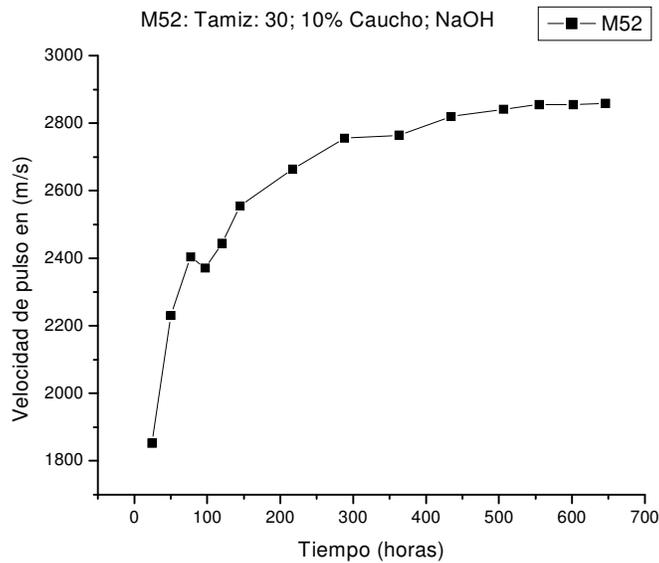


Figura N°59: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: NaOH.

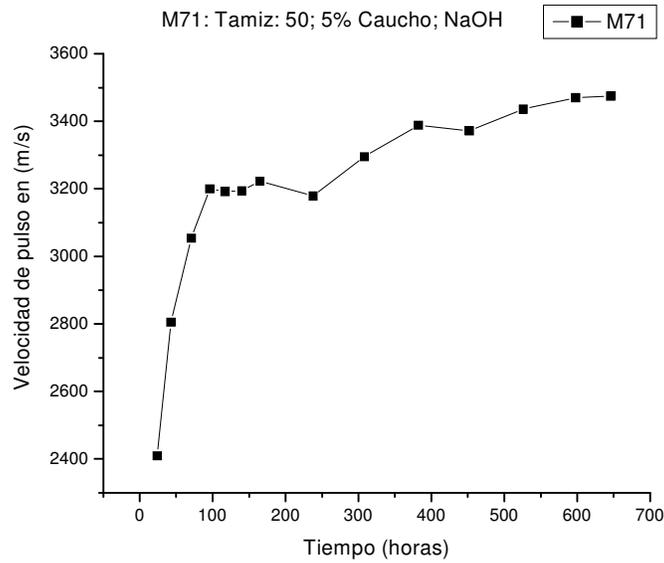


Figura N°60: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: NaOH.

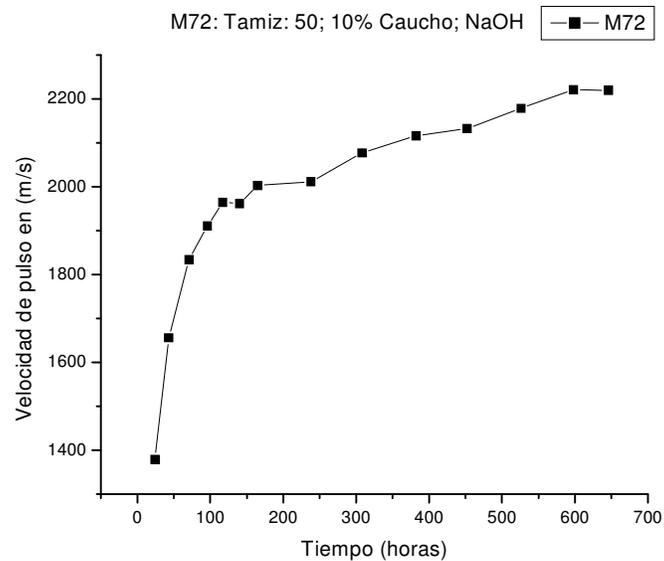


Figura N°61: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: NaOH.

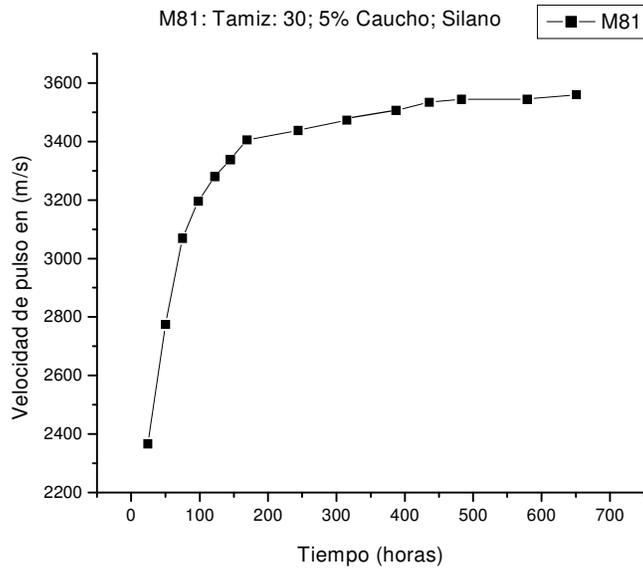


Figura N°62: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: Silano.

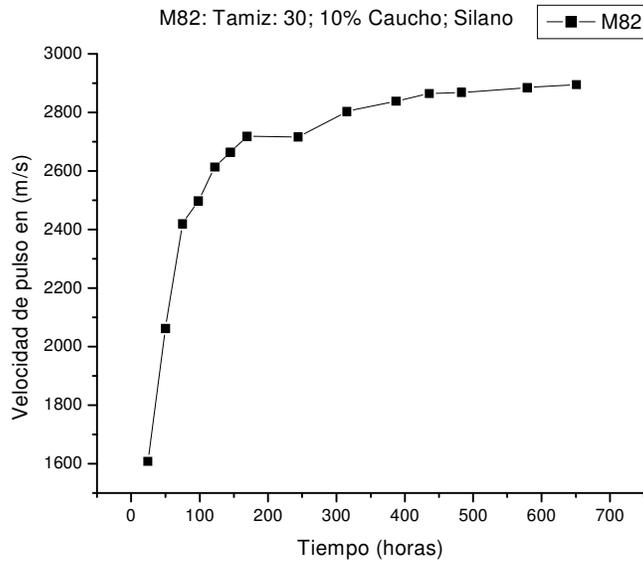


Figura N°63: Relación entra la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente de acoplamiento: Silano.

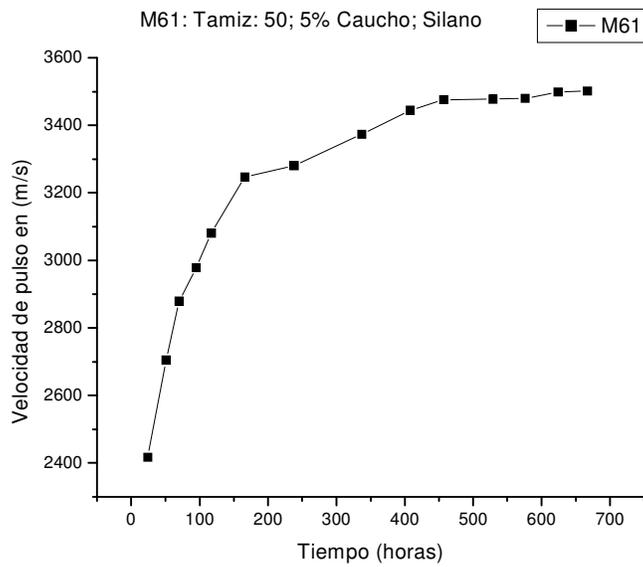


Figura N°64: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: Silano.

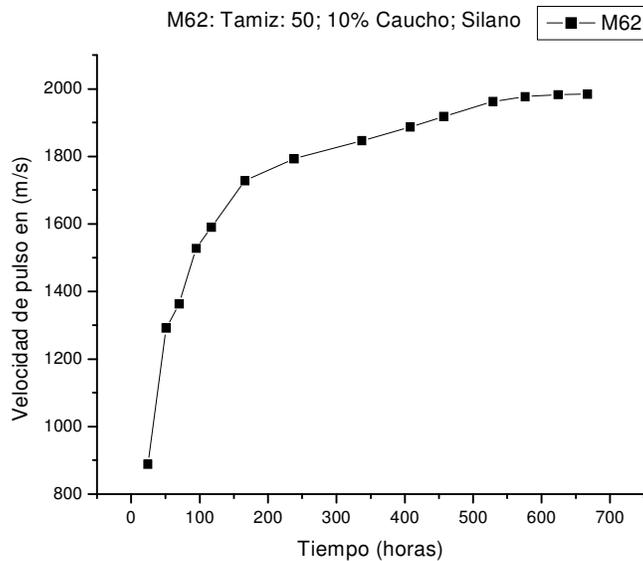


Figura N°65: Relación entre la velocidad de propagación del pulso ultrasónico y la edad del material, para muestras de concreto mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente de acoplamiento: Silano.

Apéndice F. Datos de densidad y resistencia a la compresión empleados.

En las tablas N°26 y N°27 se presentan los datos de los ensayos destructivos conducidos por los bachilleres: Briceño S. Lisette C. y De Oliveira V. Adrián J. con motivo de su trabajo especial de grado: Análisis de las mezclas concreto-caucho reciclado.

Tamiz #30							
Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Densidad (Kg/m ³)	2887	2300	2033	2248	1981	2218	2021
Tamiz #50							
Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Densidad (Kg/m ³)	2887	2237	1748	2218	1780	2189	1971

Tabla N°26: **Relación peso sobre volumen de las mezclas.**

Tamiz #30							
Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Resistencia (Mpa)	30,32	11,65	3,49	12,19	4,00	11,65	4,95
Tamiz #50							
Tratamiento	Sin caucho	Sin Tratamiento		NaOH		Silano	
Caucho %	0	5	10	5	10	5	10
Resistencia (Mpa)	30,32	8,80	0,78	9,19	1,70	8,83	0,78

Tabla N°27: **Resistencia a la compresión de las mezclas.**

Apéndice G. Diagrama de flujo del Programa

A continuación se presenta el diagrama de flujo del programa que se desarrolló:

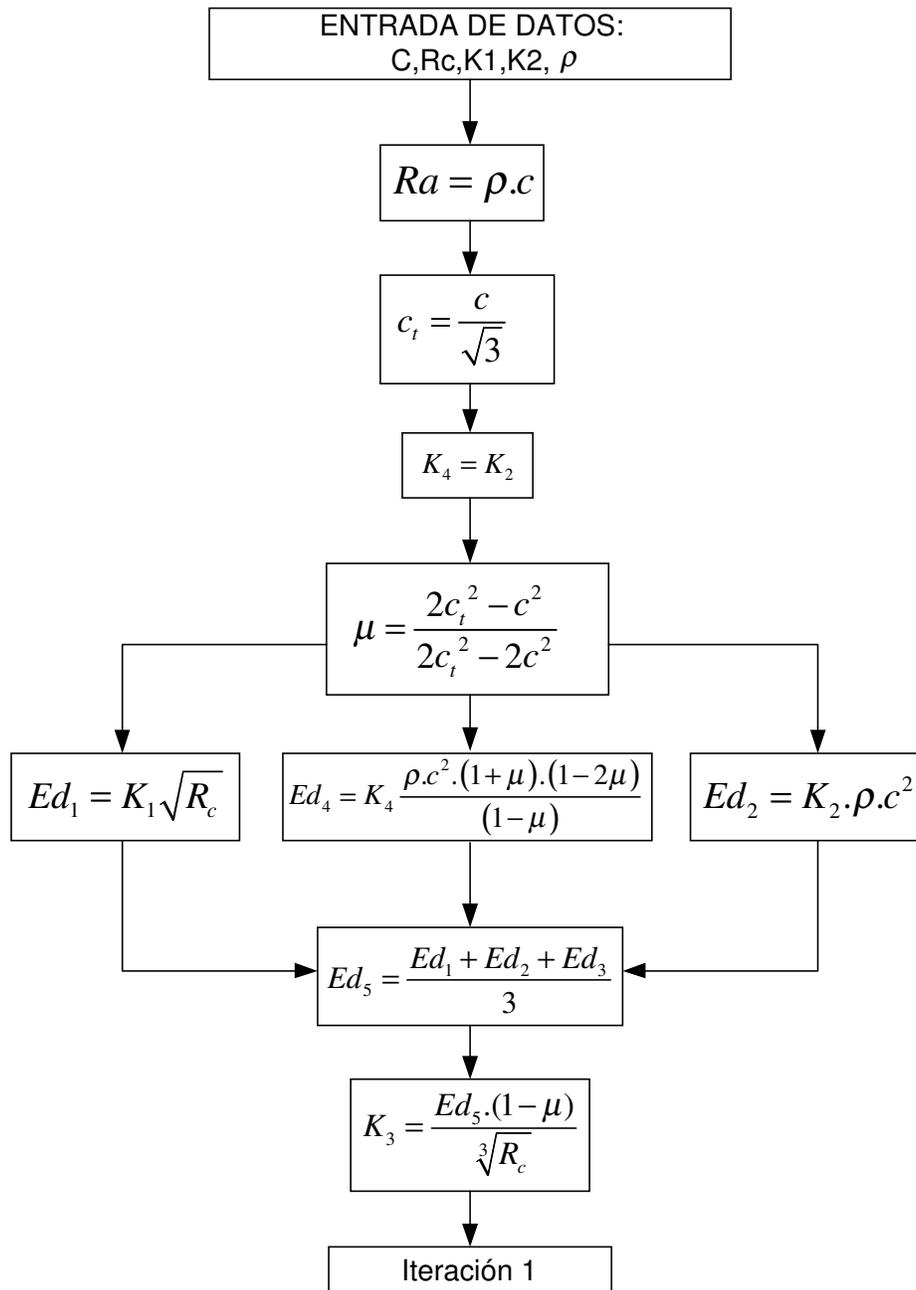


Figura N°66: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Entrada de datos.

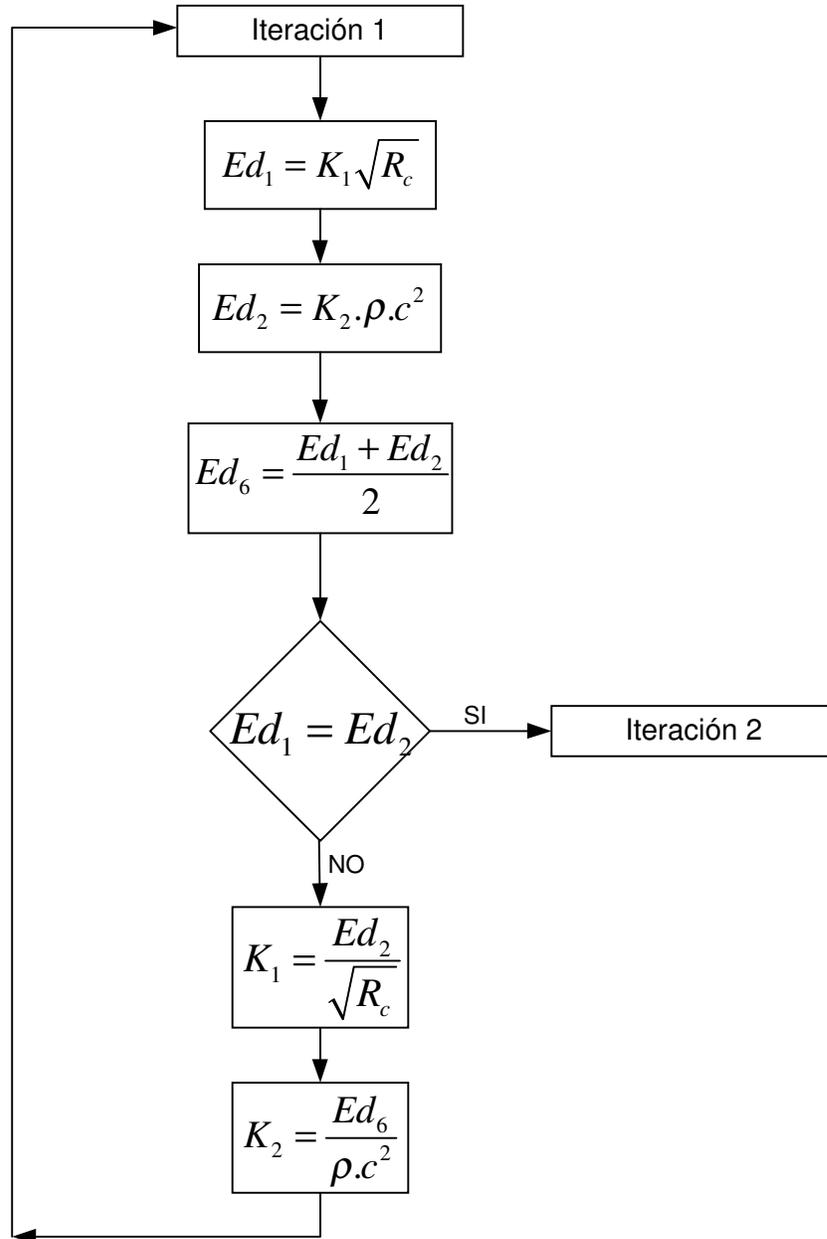


Figura N° 67: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Primera iteración.

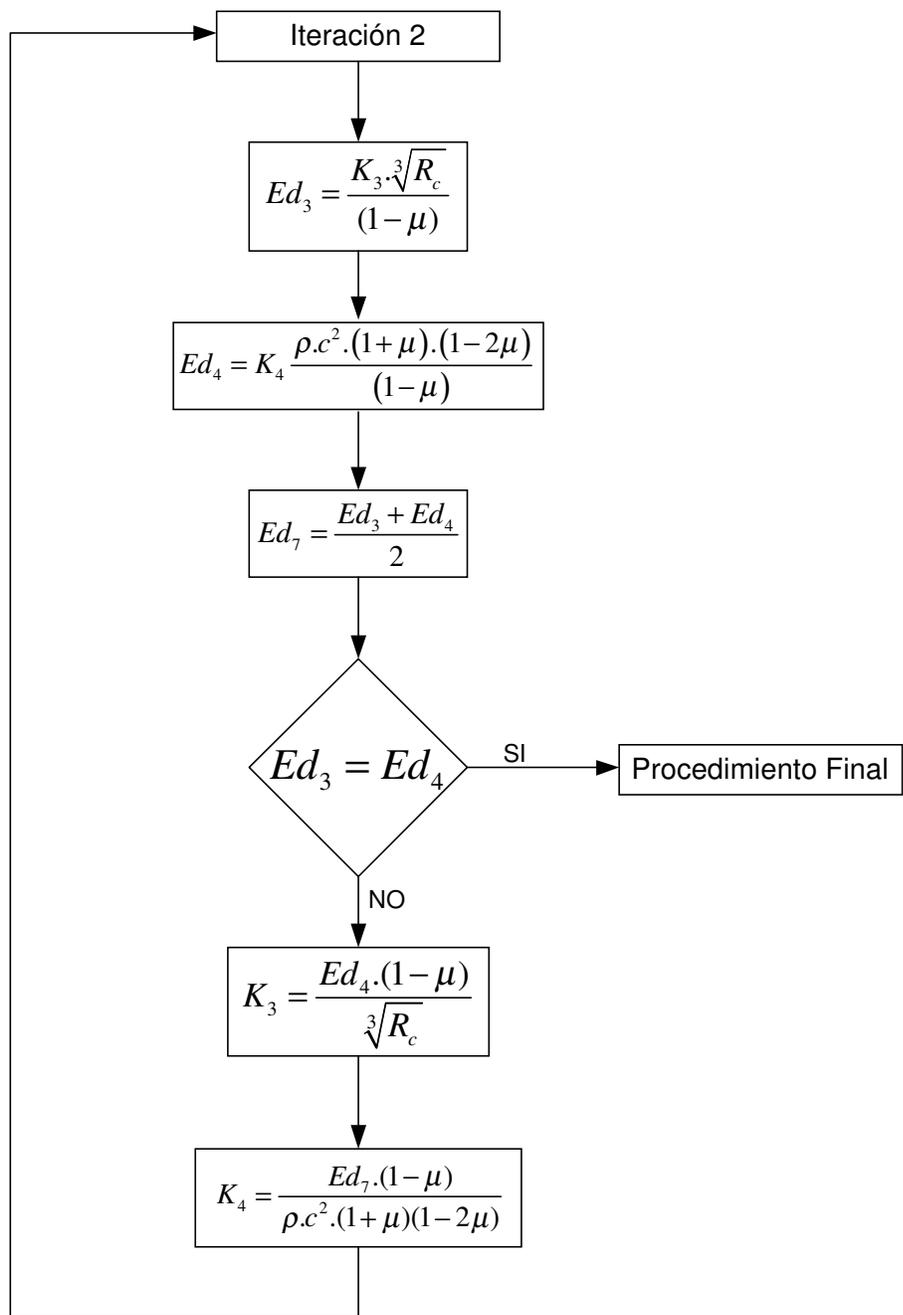


Figura N°68: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Segunda iteración.

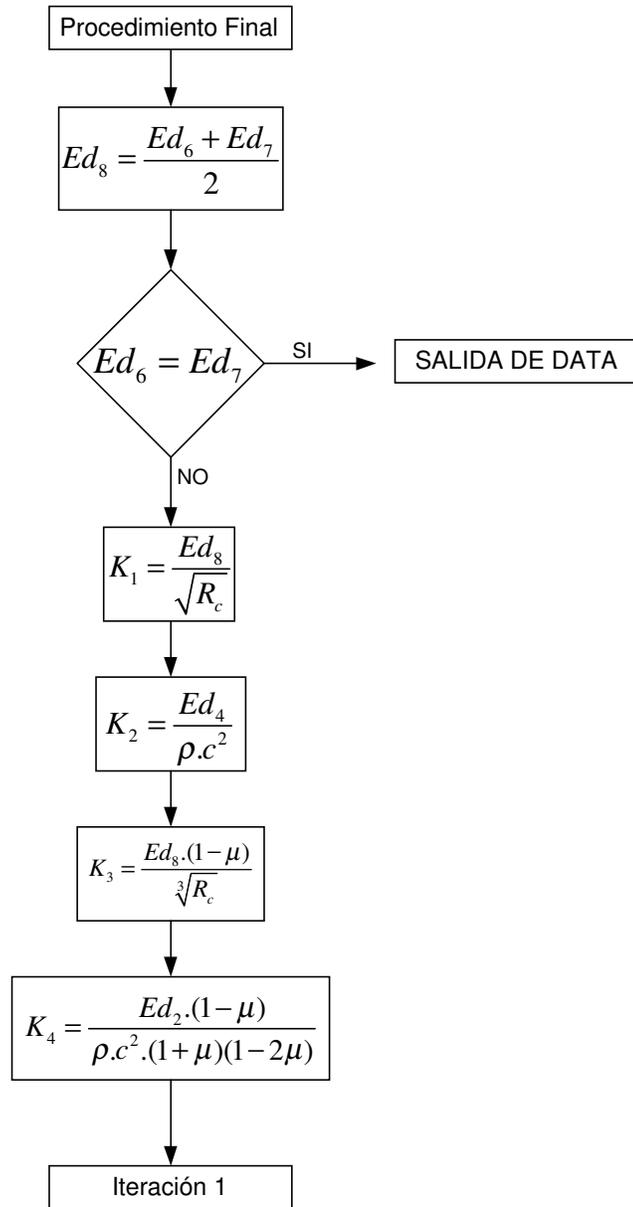


Figura N°69: Diagrama de flujo del programa. Fase de calculo de las constantes. Procedimiento final.

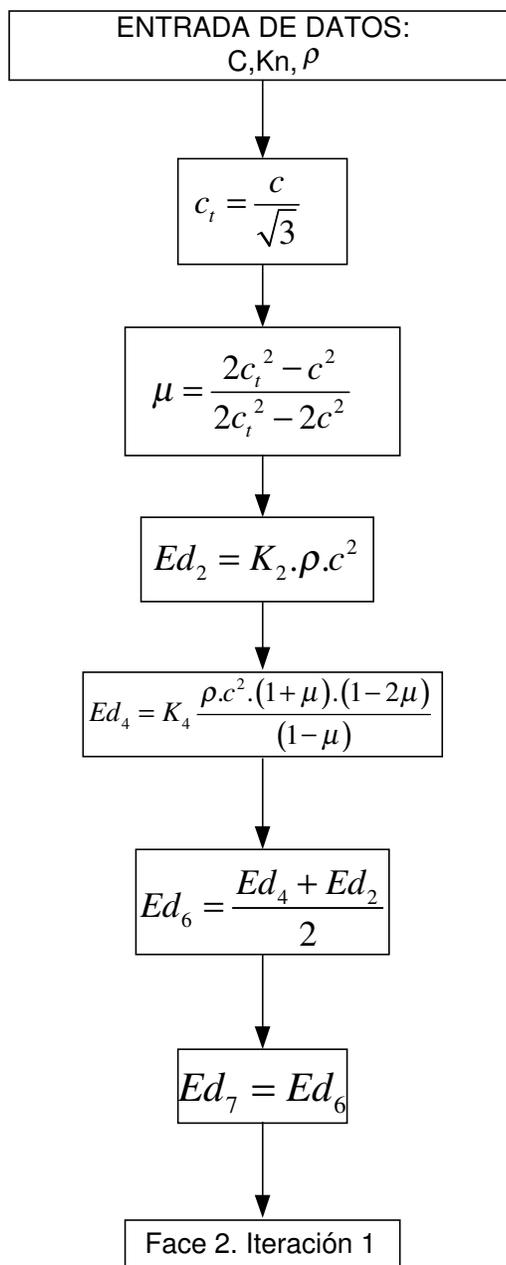


Figura N°70: Diagrama de flujo del programa. Fase de modelado de las propiedades. Entrada de datos.

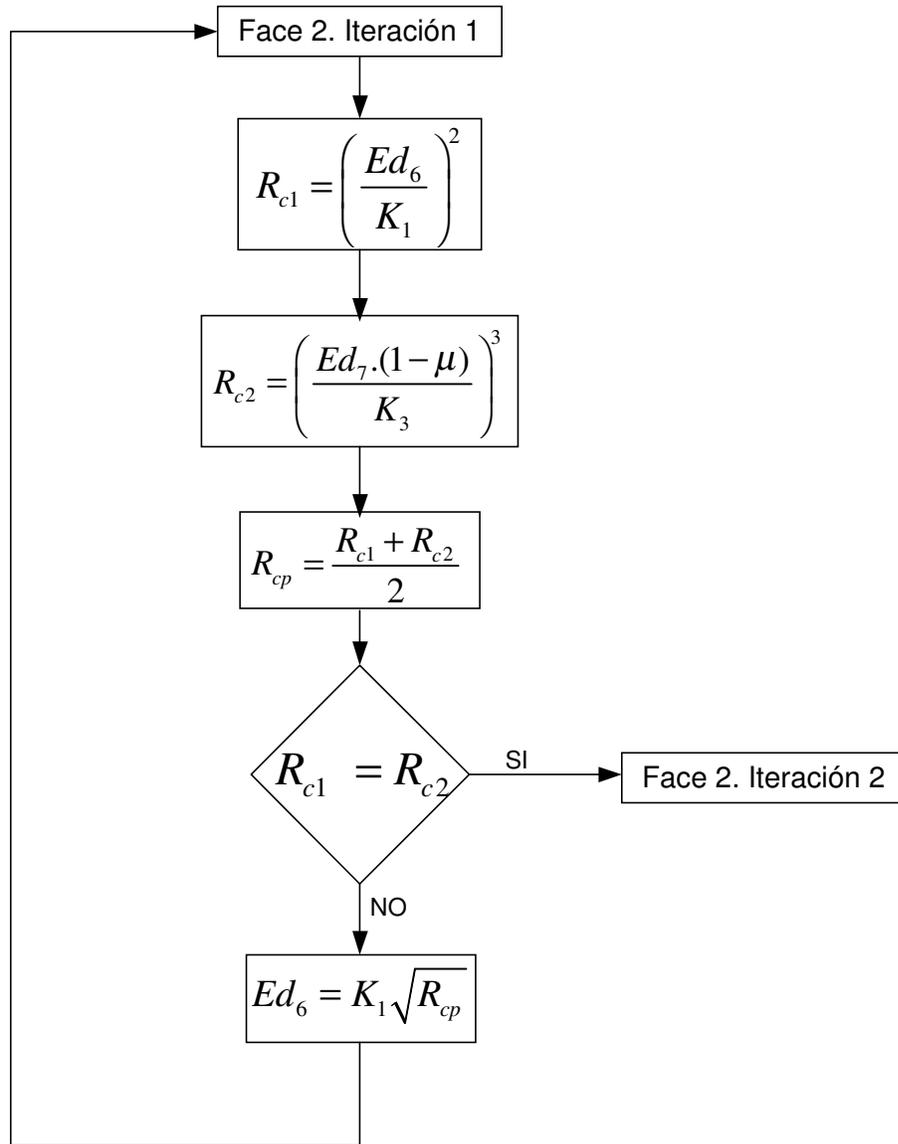


Figura N°71: Diagrama de flujo del programa. Fase de modelado de las propiedades. Primera iteración

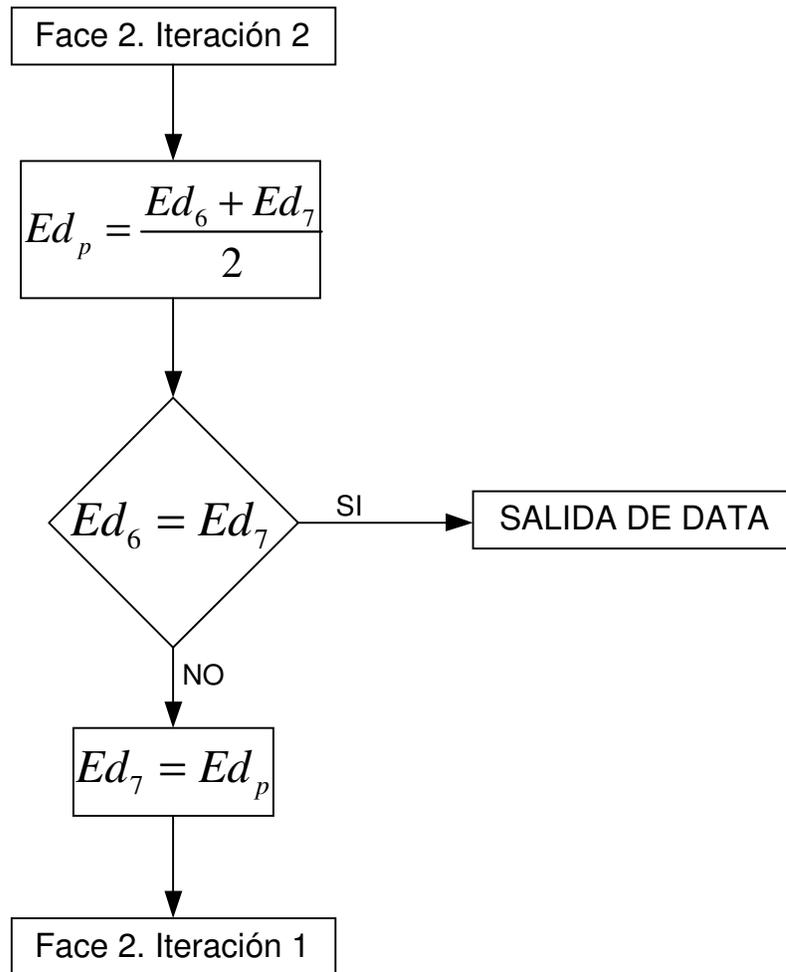


Figura N°72: Diagrama de flujo del programa. Fase de modelado de las propiedades. Segunda iteración y salida de data.

Apéndice H. Propiedades del material modeladas por el programa

Asiendo uso de este programa se obtuvo los siguientes datos:

Donde c es la velocidad de propagación del pulso ultrasónico, E es el módulo de Young, R_c es la resistencia a la compresión, C_t es la velocidad de propagación de las ondas transversales y R es la resistencia acústica.

M1	C (m/s)	E (Kg/sm ²)	R _c Mpa	C _t (m/s)	R (N/s.m ²)
	3383	85719	0,49	1953	9756572
	3856	98591	0,67	2226	11120704
	4038	99910	0,69	2331	11645592
	4193	99306	0,68	2421	12092612
	4220	90064	0,55	2436	12170480
	4316	102296	0,72	2492	12447344
	4262	91722	0,57	2461	12291608
	4315	101582	0,71	2491	12444460
	4451	499207	28,36	2570	12836684
	4456	500330	28,52	2573	12851104
	4459	501004	28,61	2574	12859756
	4464	502128	28,77	2577	12874176
	4488	507541	29,56	2591	12943392
	4511	512757	30,32	2604	13009724

Tabla N°28: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional.**

M21				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
2699	84584	0,71	1.558	6207700
3027	90099	0,82	1.748	6962100
3199	96627	0,95	1.847	7357700
3329	88750	0,79	1.922	7656700
3364	85974	0,73	1.942	7737200
3394	97195	0,97	1960	7806200
3306	96168	0,94	1909	7603800
3388	95147	0,92	1956	7792400
3516	256013	9,57	2030	8086800
3385	94142	0,90	1954	7785500
3420	89717	0,81	1975	7866000
3554	261577	10,09	2052	8174200
3608	269586	10,88	2083	8298400
3658	277110	11,65	2112	8413400

Tabla N°29: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #30.**

M22				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
1934	70596	0,73	1117	3931822
2200	91351	1,35	1270	4472600
2395	108263	2,03	1383	4869035
2466	114777	2,35	1424	5013378
2497	117681	2,50	1442	5076401
2525	120335	2,64	1458	5133325
2451	113385	2,28	1415	4982883
2545	122249	2,74	1469	5173985
2636	131147	3,27	1522	5358988
2552	122922	2,78	1473	5188216
2590	126610	2,99	1495	5265470
2643	131845	3,31	1526	5373219
2693	136880	3,64	1555	5474869
2671	134653	3,49	1542	5430143

Tabla N°30: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional ezclado con 10% de caucho, tamiz #30.**

M31				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
2591	104021	1,17	1496	5796067
2819	103334	1,15	1628	6306103
2903	103670	1,16	1676	6494011
3152	108791	1,29	1820	7051024
3292	218137	6,83	1901	7364204
3146	106222	1,23	1816	7037602
3249	212475	6,40	1876	7268013
3216	208181	6,09	1857	7194192
3198	205857	5,92	1846	7153926
3296	218667	6,87	1903	7373152
3425	236119	8,32	1977	7661725
3410	234055	8,14	1969	7628170
3462	241248	8,77	1999	7744494
3464	241527	8,80	2000	7748968

Tabla N°31: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #50.**

M32				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
1261	26178	8,87E-02	728	2249624
1574	40786	2,50E-01	909	2808016
1654	45037	3,17E-01	955	2950736
1756	50763	4,24E-01	1014	3132704
1757	50821	4,25E-01	1014	3134488
1773	51751	4,44E-01	1024	3163032
1835	55433	5,26E-01	1059	3273640
1833	55313	5,23E-01	1058	3270072
1848	56222	5,44E-01	1067	3296832
1889	58744	6,06E-01	1091	3369976
1929	61258	6,73E-01	1114	3441336
1974	64150	7,55E-01	1140	3521616
1987	64997	7,80E-01	1147	3544808
1987	64997	7,80E-01	1147	3544808

Tabla N°32: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #50.**

M51				
C (m/s)	E (Kg/sm2)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m2)
2859	89924	0,86	1651	6427032
3074	80912	0,68	1775	6910352
3192	90718	0,87	1843	7175616
3215	81191	0,68	1856	7227320
3280	82820	0,71	1894	7373440
3338	85041	0,76	1927	7503824
3458	82525	0,71	1996	7773584
3603	264429	10,94	2080	8099544
3622	267225	11,23	2091	8142256
3656	272265	11,77	2111	8218688
3666	273757	11,93	2117	8241168
3674	274953	12,06	2121	8259152
3685	276602	12,24	2128	8283880
3682	276152	12,19	2126	8277136

Tabla N°33: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.**

M52				
C (m/s)	E (Kg/sm2)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m2)
1852	62520	0,50	1069	3668812
2231	90727	1,19	1288	4419611
2404	105343	1,71	1388	4762324
2371	102471	1,60	1369	4696951
2444	108878	1,85	1411	4841564
2555	118992	2,29	1475	5061455
2664	129362	2,82	1538	5277384
2756	138451	3,33	1591	5459636
2765	139357	3,39	1596	5477465
2820	144956	3,73	1628	5586420
2842	147226	3,88	1641	5630002
2855	148576	3,97	1648	5655755
2855	148576	3,97	1648	5655755
2859	148993	4,00	1651	5663679

Tabla N°34: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: NaOH.**

M71				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
2409	100144	1,11	1391	5343162
2805	103691,5	1,20	1619	6221490
3054	103863,2	1,21	1763	6773772
3200	90731,88	0,89	1848	7097600
3192	89465,58	0,86	1843	7079856
3194	90084,34	0,87	1844	7084292
3223	208273,4	6,33	1861	7148614
3179	100872,5	1,13	1835	7051022
3295	217682,7	7,05	1902	7308310
3389	230280	8,11	1957	7516802
3372	227975,5	7,91	1947	7479096
3436	236711,5	8,69	1984	7621048
3470	241419,4	9,12	2003	7696460
3475	242115,6	9,19	2006	7707550

Tabla N°35: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.**

M72				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
1379	32475	0,18	796	2454620
1656	46832	0,41	956	2947680
1834	57440	0,67	1059	3264520
1911	62365	0,81	1103	3401580
1965	65939	0,93	1134	3497700
1962	65738	0,92	1133	3492360
2003	68514	1,02	1156	3565340
2012	69131	1,04	1162	3581360
2077	73670	1,22	1199	3697060
2116	76463	1,34	1222	3766480
2133	77696	1,39	1231	3796740
2179	81084	1,55	1258	3878620
2221	84239	1,70	1282	3953380
2220	84164	1,70	1282	3951600

Tabla N°36: **Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.**

M81				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
2367	80973	0,75	1367	5250006
2775	84198	0,82	1602	6154950
3069	80018	0,74	1772	6807042
3196	83084	0,80	1845	7088728
3281	82251	0,78	1894	7277258
3338	83441	0,81	1927	7403684
3406	235855	9,34	1966	7554508
3438	240308	9,78	1985	7625484
3474	245367	10,30	2006	7705332
3507	250051	10,79	2025	7778526
3535	254059	11,23	2041	7840630
3545	255499	11,39	2047	7862810
3545	255499	11,39	2047	7862810
3561	257810	11,65	2056	7898298

Tabla N°37: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: Silano.

M82				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
1608	48700	0,31	928	3249768
2062	80082	0,96	1190	4167302
2420	110303	2,05	1397	4890820
2498	117528	2,38	1442	5048458
2614	128696	2,98	1509	5282894
2664	133667	3,27	1538	5383944
2719	139243	3,61	1570	5495099
2716	138936	3,59	1568	5489036
2803	147980	4,20	1618	5664863
2839	151805	4,47	1639	5737619
2865	154598	4,68	1654	5790165
2869	155030	4,71	1656	5798249
2885	156764	4,85	1666	5830585
2896	157962	4,94	1672	5852816

Tabla N°38: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #30. Agente acoplante: Silano.

M61				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
2417	98922	1,04	1395	5290813
2705	99342	1,05	1562	5921245
2879	94754	0,94	1662	6302131
2979	96049	0,97	1720	6521031
3081	97842	1,02	1779	6744309
3247	207723	6,07	1875	7107683
3281	212096	6,39	1894	7182109
3374	224290	7,34	1948	7385686
3445	233829	8,14	1989	7541105
3476	238056	8,51	2007	7608964
3478	238330	8,53	2008	7613342
3480	238604	8,56	2009	7617720
3499	241217	8,79	2020	7659311
3502	241631	8,83	2022	7665878

Tabla N° 39: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 5% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: Silano.

M62				
C (m/s)	E (Kg/sm ²)	Rc Mpa	Ct (m/s)	R (N/s.m ²)
888	14067	1,87E-02	513	1750248
1292	29779	9,96E-02	746	2546532
1363	33141	1,28E-01	787	2686473
1528	41651	2,18E-01	882	3011688
1590	45100	2,64E-01	918	3133890
1728	53268	3,94E-01	998	3405888
1793	57351	4,71E-01	1035	3534003
1847	60857	5,45E-01	1066	3640437
1887	63522	6,06E-01	1089	3719277
1918	65626	6,57E-01	1107	3780378
1963	68742	7,38E-01	1133	3869073
1977	69726	7,64E-01	1141	3896667
1983	70150	7,76E-01	1145	3908493
1985	70291	7,80E-01	1146	3912435

Tabla N° 40: Propiedades de las mezclas de concreto tradicional mezclado con 10% de caucho, tamiz #50. Agente acoplante: Silano.

Apéndice I. Gráficas de Resistencia acústica vs. edad del material.

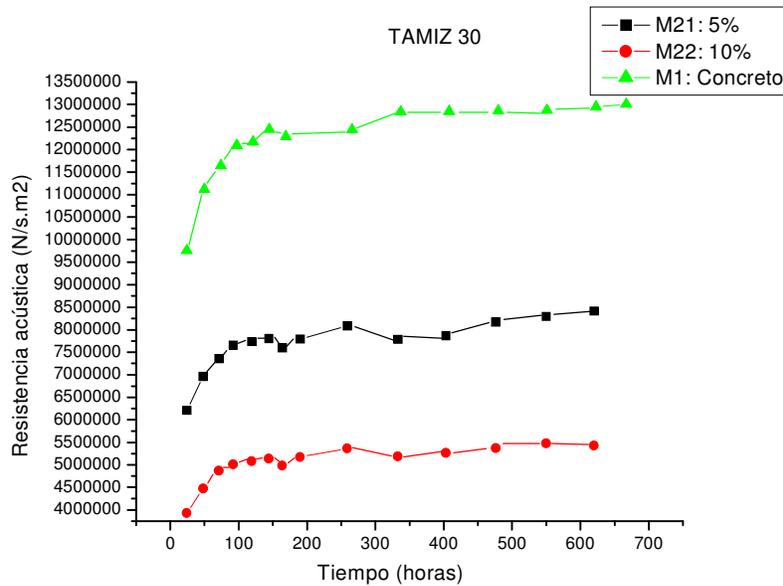


Figura N°73: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.

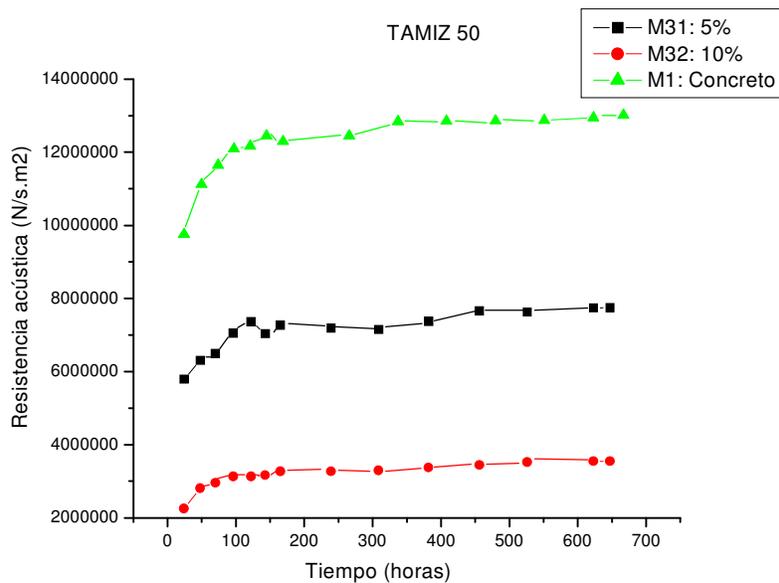


Figura N°74: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.

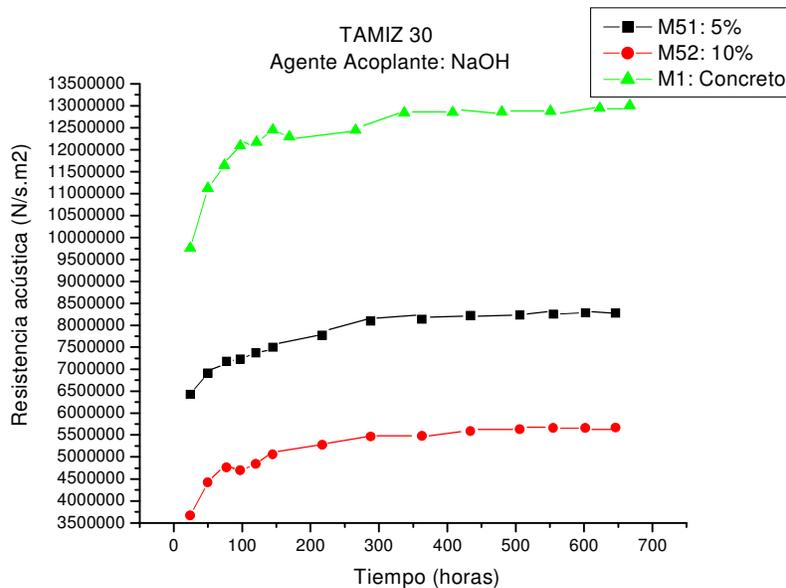


Figura N°75: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: NaOH.

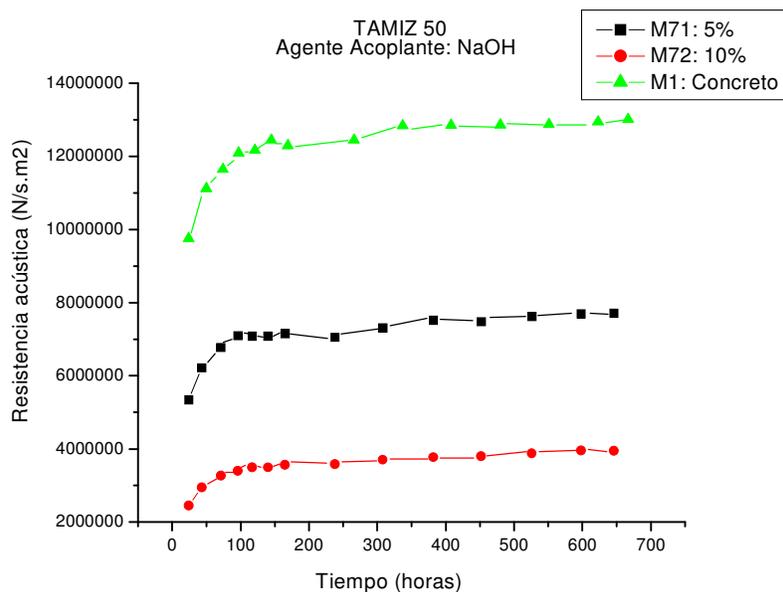


Figura N°76: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: NaOH.

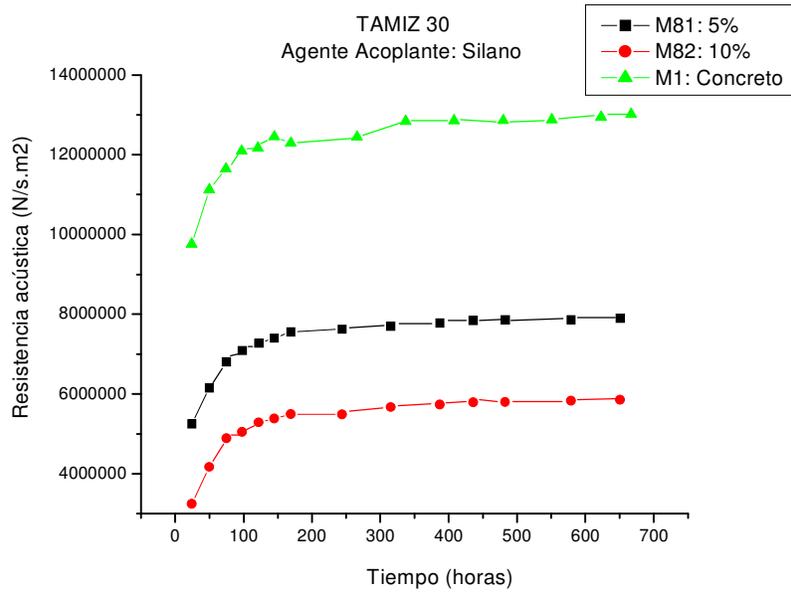


Figura N° 77: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente Acoplante: Silano.

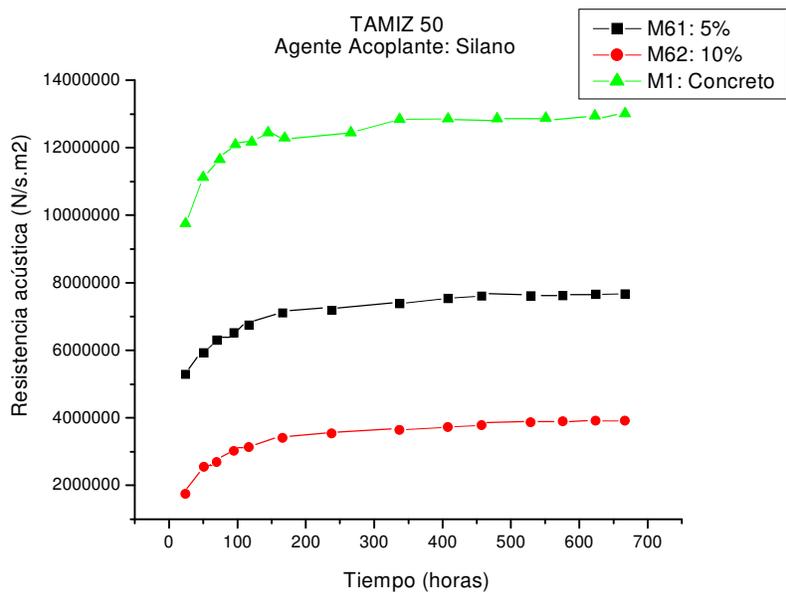


Figura N° 78: Relación entre la resistencia acústica y la edad del material para mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente Acoplante: Silano.

Apéndice J. Coeficiente de atenuación

En las gráficas siguientes se presentan las curvas exponenciales que mejor se ajustan a los datos experimentales, empleadas en la determinación del coeficiente de atenuación en función del porcentaje de caucho.

Junto con las gráficas para cada mezcla, se reportan los valores de correlación (R^2), los cuales indican el grado de ajuste de la curva, a los datos obtenidos experimentalmente. Conforme R^2 sea más cercana a 1, mejor es el ajuste.

Igualmente se muestran junto a los gráficos la ecuación exponencial resultante, donde se puede apreciar el valor de la exponencial, el cual representa la atenuación en función del porcentaje de caucho.

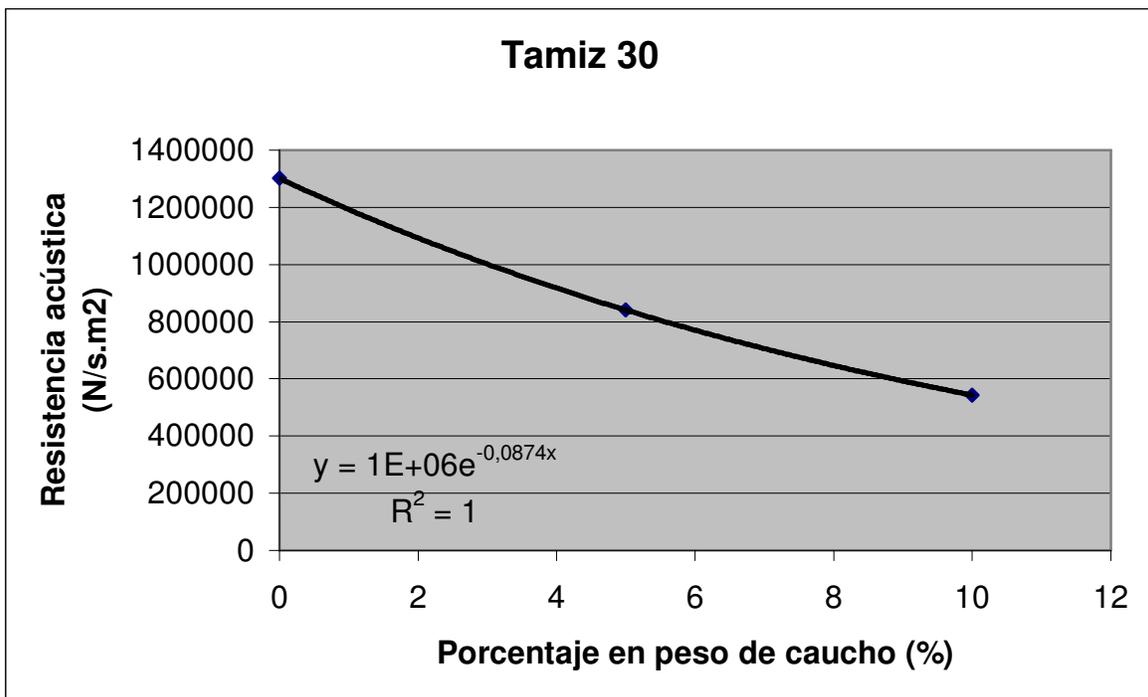


Figura N° 79: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30.

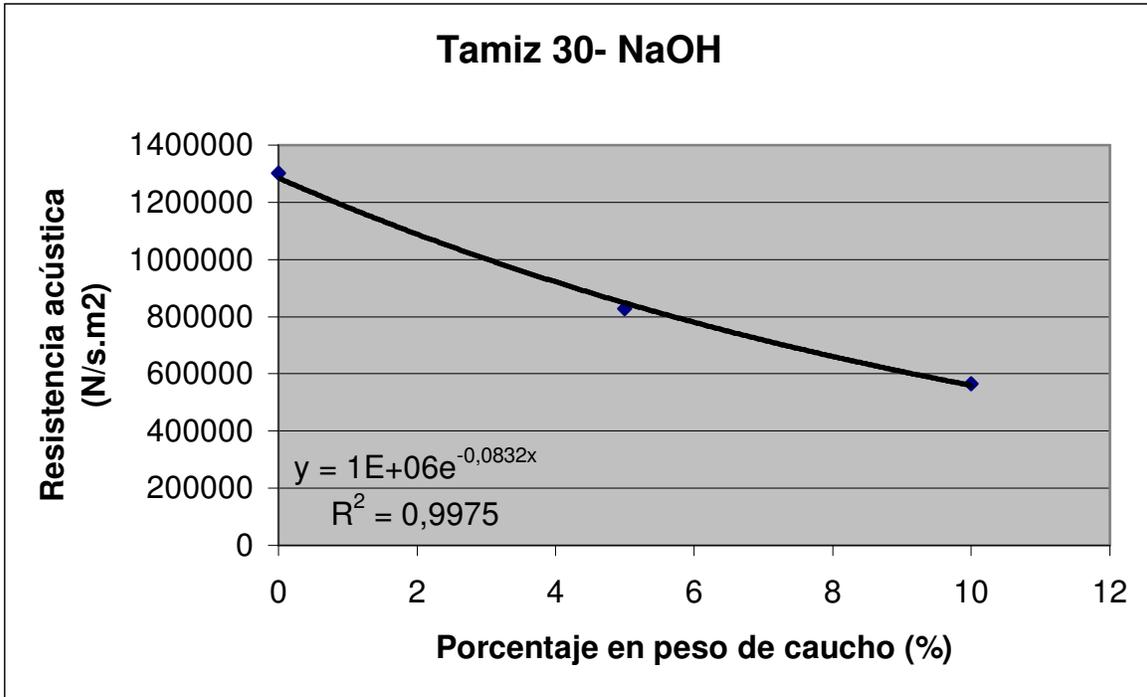


Figura N° 80: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente acoplante: NaOH

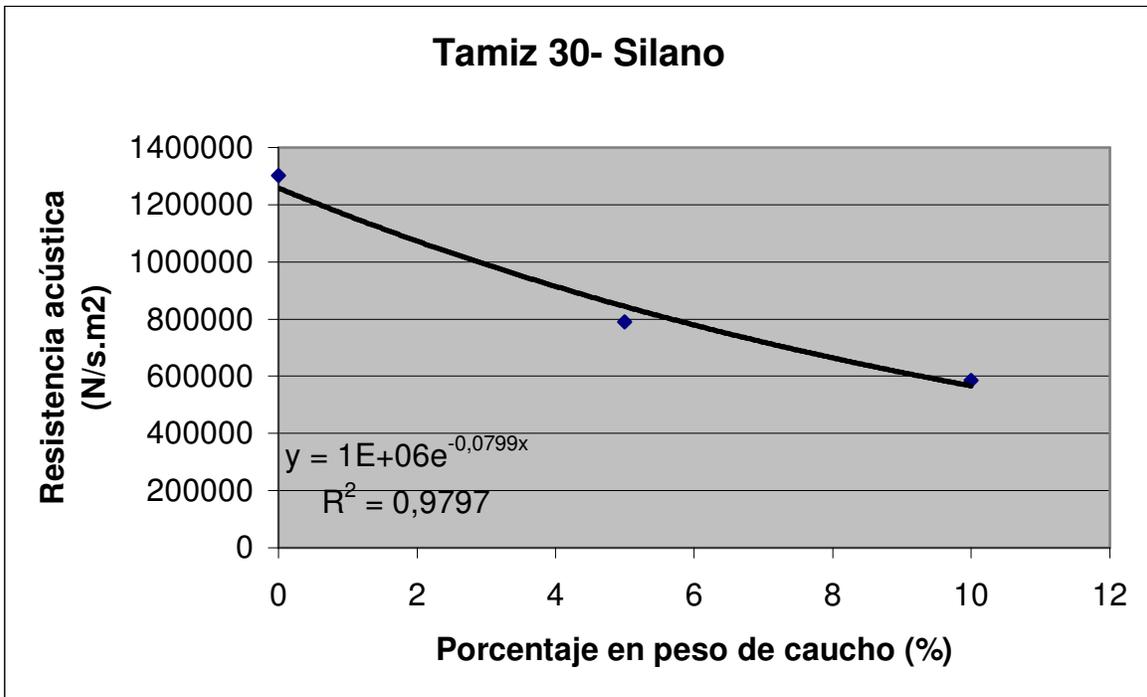


Figura N° 81: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #30. Agente acoplante: Silano

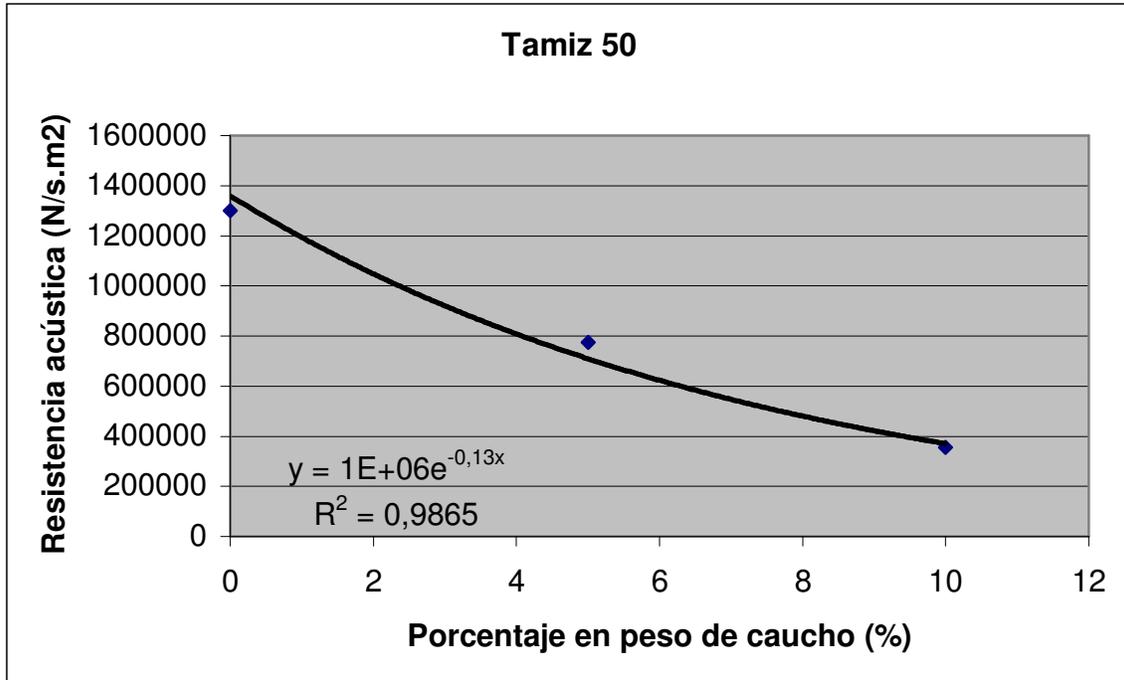


Figura N°82: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50.

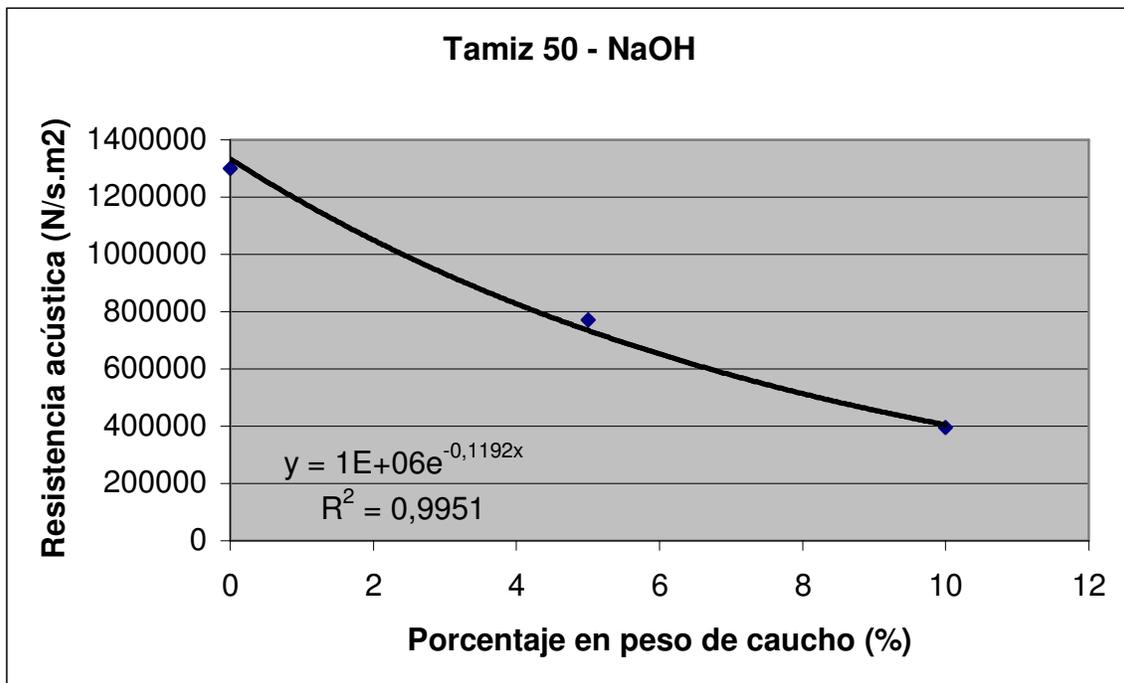


Figura N°83: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente acoplante: NaOH.

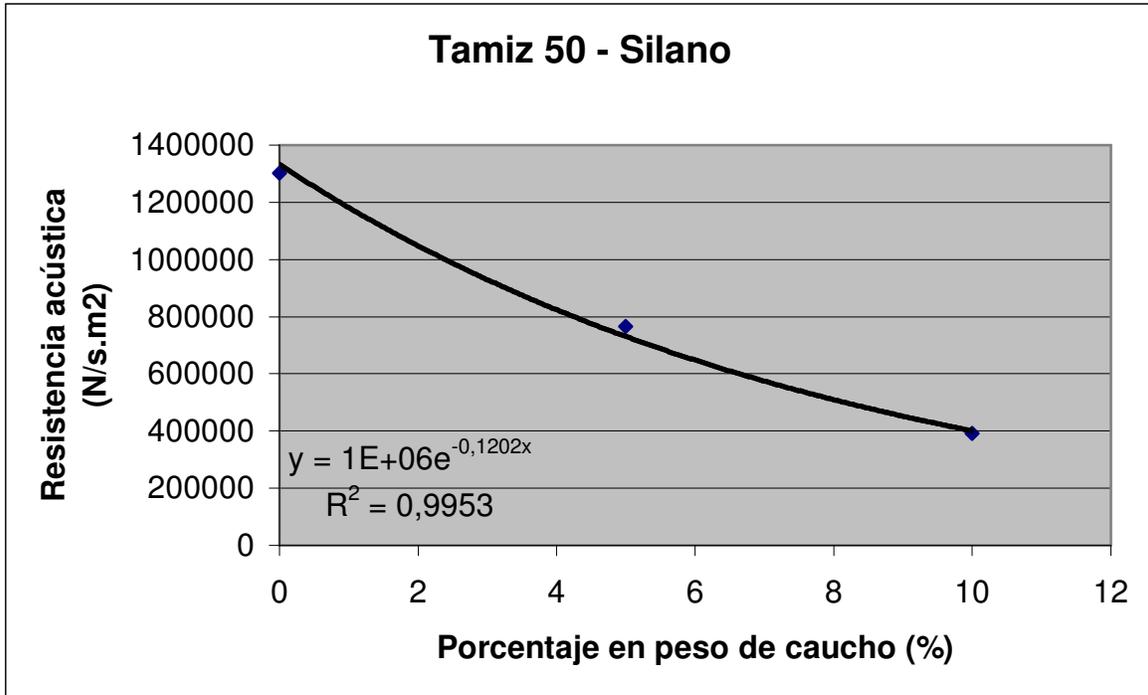


Figura N° 84: Resistencia acústica de las mezclas con caucho reciclado retenido por el tamiz #50. Agente acoplante: silano.