



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS  
DE CONCRETO UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y REHABILITACIÓN DE  
PAVIMENTOS RÍGIDOS

**TESIS**

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA

**ING. IRVING CASADOS MAYO**

EXPEDIENTE 207699

DIRIGIDO POR

**DR. J. JESÚS ALONSO MOTA**

C.U., QUERÉTARO, QRO., AGOSTO 2012



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE  
MEZCLAS DE CONCRETO UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y  
REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta:

Ing. Irving Casados Mayo

Dirigido por:

Dr. J. Jesús Alonso Mota

SINODALES

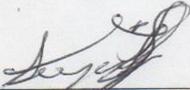
Dr. J. Jesús Alonso Mota  
Presidente

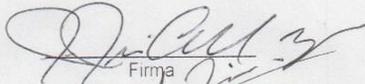
Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Secretario

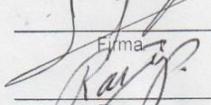
M. en I. Rubén Ramírez Jiménez  
Vocal

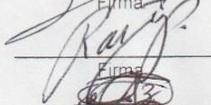
M. en C. Elda Montes Zarazúa  
Vocal

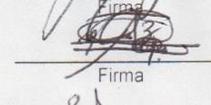
M. en C. Ramiro Guillermo Paz Cruz  
Vocal

  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Dr. Ingrid Lortés Pacheco  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto 2012  
México

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en los pavimentos rígidos en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga; y dar respuesta a la interrogante de qué agregados son los que cumplen con la normatividad nacional e internacional de un pavimento de concreto con cemento Portland. Se clasificó a las diferentes plantas de concreto en la zona metropolitana de Querétaro, obteniendo muestras de agregados para conocer sus propiedades, las cuales tienen una influencia en la calidad del concreto y son de gran interés para el diseño de mezclas. Las propiedades de los agregados dependen de la roca madre, pero hay propiedades que están ausentes de ella como son la forma, tamaño y textura.

Lo anterior permitió deducir y evaluar el grado de calidad de las características de los concretos y su posible comportamiento; pero se le dio más énfasis a los agregados debido a que la elección de materiales apropiados tiene la mayor importancia en el aspecto técnico y económico; representando aproximadamente del 60% al 75% del volumen y del 70% al 85% en peso del concreto.

Finalmente el estudio permitió realizar una propuesta metodológica para evaluar la calidad de dicho concreto, que aunada a la correcta toma de decisiones sobre la selección de los bancos de agregados; podría incidir favorablemente en la reducción del costo de producción en la mezcla de los agregados del concreto.

(Palabras clave: **pavimento, cemento, concreto, agregados y calidad**)

## SUMMARY

This investigation had as main objective to determine the physic and mechanic properties of the materials used in rigid pavement of the metropolitan zone of Queretaro city; and to give answer to the question of what aggregates fulfill the national and international normativity of concrete pavement with Portland cement. Various concrete plants of the metropolitan zone of Queretaro city were classified, obtaining samples of the aggregates to know their properties, which have an influence in the quality of concrete and are subject of great interest for designing mixes. The propertied of aggregates depends on the mother rock, but there are some properties absent of it like shape, size and texture

this permitted decide and evaluate the level of quality of the characteristics of concretes and its possible behavior; but the aggregates have been emphasized because choosing proper materials it is more relevant in technic and economic aspects; representing from 60% to 75% of the volume and from 70% to 85% in weight of concrete.

Finally, the study permitted realize a methodology proposal to evaluate the quality of the concrete, that joined to choosing correct decisions in selecting banks of adds, it could be favorable in the reduction of the costs of production in the mixing of concrete adds.

(Key words: **pavement, cement, concrete, aggregates and quality**)

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. J. Jesús Alonso Mota, por sus aportaciones y su apoyo incondicional en esta investigación, fue un verdadero honor haber trabajado bajo su dirección.

A mis maestros que me brindaron sus conocimientos, experiencias y orientaciones, en especial: Dr. Omar Chávez Alegría, M. en I. Aldo Alfaro González, M. en C. Juan Fernando Mendoza Sánchez, M. en I. Rubén Ramírez Jiménez, Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca, M. en C. Domingo G. Valencia Vallejo y M. en C. José Antonio Gómez López.

Al técnico laboratorista Víctor Hugo de Santiago de la Cruz por su invaluable colaboración y asesoramiento técnico para la realización de las pruebas de los agregados.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la confianza y apoyo brindado.

Al M. en C. Rodolfo Mayo Oropeza por sus comentarios técnicos de pruebas y normativas.

A la Dra. María Lyssette Mazó Quevedo por las observaciones metodológicas realizadas al trabajo de investigación.

A Nayeli Mora Carmona por apoyarme en mi tesis con sus consejos.

## **DEDICATORIAS**

A mi madre Silvia Estela Mayo Oropeza por su apoyo y consejo para estudiar la maestría.

A mi padre Víctor Casados Castellanos por ayudarme a alcanzar mis metas.

A mis Hermanos Víctor y Panchy que me apoyaron en todo momento.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>i</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Justificación .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Descripción del problema.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Hipótesis .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Objetivo general .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Objetivos particulares.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Estado del Arte .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.1 Historia del cemento.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.1.1 La composición del cemento Portland.....</b>	<b>11</b>

2.1.1.2 Tipos de Cemento .....	13
2.1.1.2 Propiedades del cemento.....	17
2.1.2 Agregados.....	19
2.1.2.1 Clasificación de los agregados:.....	26
2.1.2.1.1 Por su origen: .....	26
2.1.2.1.2 Por su modo de obtención y/o fragmentación: .....	28
2.1.2.1.3 Por su tamaño de partícula (graduación) .....	29
2.1.2.1.4. Por su forma y textura. ....	30
2.1.2.1.5 Por su peso. ....	31
2.1.2.1.6 Por su color .....	31
2.1.2.2 Agregado grueso.....	32
2.1.2.3 Agregado Fino.....	33
2.1.2.4 Propiedades de los agregados en el concreto .....	35
2.1.2.5 Sustancias dañinas o nocivas .....	36
2.1.3 Agua.....	38
2.1.3.1 Diferentes tipos de agua.....	43
2.1.4 Aditivos.....	44
2.1.5 Concreto.....	47
2.1.5.1 Definición del concreto .....	48
2.1.5.2 Propiedades del Concreto .....	50
2.1.5.2.1 Trabajabilidad.....	50
2.1.5.2.2 Peso Unitario.....	51
2.1.5.2.3 Sangrado.....	51
2.1.5.2.4 Consolidación.....	51
2.1.5.2.5 Plasticidad .....	52
2.1.5.2.6 Hidratación .....	52
2.1.5.2.7 Tiempo de fraguado .....	52
2.1.5.2.8 Curado.....	52
2.1.5.2.9 Velocidad de secado del concreto.....	53
2.1.5.2.10 Contracción .....	54

2.1.5.2.11 Flujo plástico .....	56
2.1.5.2.12 Resistencia al desgaste.....	56
2.1.5.2.13 Resistencia a congelación y deshielo.....	57
2.1.5.2.14 Permeabilidad y Hermeticidad.....	57
2.1.5.2.15 Estabilidad Volumétrica .....	58
2.1.6 Resistencia del concreto .....	58
2.1.6.1 Resistencia a compresión. ....	59
2.1.6.2 Resistencia a flexión .....	60
2.1.6.3 Relación de resistencia de compresión a flexión.....	61
2.1.7 Pavimentos.....	63
2.1.7.1 Definición de pavimento .....	64
2.1.7.2 Desempeño y evaluación de un pavimento.....	65
2.1.7.2.1 Rugosidad .....	67
2.1.7.2.2 Deterioros de la superficie.....	67
2.1.7.2.3 Resistencia a la fricción.....	68
2.1.7.2.4 Evaluación de la capacidad estructural .....	68
2.1.7.3 Tipos de pavimento .....	68
2.1.7.3.1 Pavimento flexible .....	69
2.1.7.3.1.1 Funciones de un pavimento flexible .....	73
2.1.7.3.1.2 Ventajas de los pavimentos flexibles.....	74
2.1.7.3.2 Pavimento rígido o de concreto con cemento Portland .....	75
2.1.7.3.2.1 Funciones de un pavimento rígido o de concreto con cemento Portland .....	80
2.1.7.3.2.2 Tipos de pavimentos de concreto con cemento Portland.....	82
2.1.7.3.2.2.1 Losas de concreto simple vibrado .....	82
2.1.7.3.2.2.2 Losas de concreto reforzado .....	82
2.1.7.3.2.2.3 Losas de concreto presforzado y postensado .....	82
2.1.7.3.2.2.4 Losas de concreto fibroso .....	83
2.1.7.3.2.2.5 Losas de concreto compactado con rodillo .....	83
2.1.7.3.2.2.6 Sobrelosas de concreto hidráulico.....	84

2.1.7.3.2.3 Esfuerzos en pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland	84
2.1.7.3.2.3.1 Esfuerzos debido al tránsito.	85
2.1.7.3.2.3.2 Esfuerzos debido a la temperatura.	85
2.1.7.3.2.3.3 Esfuerzos debido al apoyo	86
2.1.7.3.2.4 Ventajas de los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland	87
2.1.7.3.2.5 Juntas en los pavimentos rígidos	87
2.1.7.3.2.5.1 Tipos de juntas	88
2.1.7.3.2.5.1.1 Juntas longitudinales	88
2.1.7.3.2.5.1.2 Juntas transversales	88
2.1.7.3.2.5.1.3 Juntas de contracción	89
2.1.7.3.2.5.1.4 Juntas de Construcción	89
2.1.7.3.2.5.1.5 Juntas de Dilatación o Aislamiento	89
2.1.7.3.2.5.1.6 Juntas especiales	90
2.1.7.3.2.6 Fallas en los pavimentos rígidos	90
2.1.7.3.2.6.1 Fallas por fracturamiento por fatiga.	91
2.1.7.3.2.6.2 Fallas por bombeo o erosión	91
2.1.7.3.2.6.3 Otras fallas	91
2.1.7.3.2.7 Construcción de pavimentos	92
2.1.7.3.2.7.1 Colado del concreto	92
2.1.7.3.2.7.2 Compactación	92
2.1.7.3.2.7.3 Comprobación de superficie	93
2.1.7.3.2.7.4 Acabado superficial.	93
2.1.7.3.2.7.5 Curado del concreto	93
2.1.7.3.2.7.6 Cimbra	94
2.1.7.3.2.7.7 Defectos de construcción de pavimentos	94
2.1.7.3.3 Pavimento combinado o mixto	97
2.1.7.3.4 Pavimento articulado	97
2.1.7.4 Estado actual y futuro de los pavimentos	98

2.1.7.5 Pavimentos reciclados .....	101
2.1.7.6 Optimización de mezclas.....	105
2.1.7.6.1 Diseño de mezcla .....	105
2.1.7.6.2 Optimización del diseño de mezcla .....	106
<b>CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA.....</b>	<b>108</b>
<b>3.1 Pruebas realizadas a los agregados y al concreto.....</b>	<b>108</b>
3.1.1 Muestreo .....	108
3.1.2 Densidad relativa o masa específica .....	110
3.1.3 Absorción .....	111
3.1.4 Pérdida por lavado .....	113
3.1.5 Módulo de finura.....	113
3.1.6 Contenido de materia orgánica .....	115
3.1.7 Granulometría .....	116
3.1.8 Peso volumétrico seco suelto y compacto.....	119
3.1.9 Desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles) .....	121
3.1.10 Coeficiente de forma .....	125
3.1.11 Partículas alargadas y lajeadas (planas).....	125
3.1.12 Equivalente de arena.....	128
3.1.13 Sanidad (intemperismo acelerado).....	129
3.1.14 Humedad.....	131
3.1.15 Límites de consistencia .....	132
3.1.16 Contracción lineal.....	133
3.1.17 Revenimiento .....	135
3.1.18 Temperatura del concreto .....	136
3.1.19 Masa unitaria del concreto .....	138
3.1.20 Tiempos de fraguado.....	139
3.1.21 Contenido de aire .....	140
3.1.22 Resistencia a la flexión.....	140
3.1.23 Resistencia a compresión .....	141

3.1.24 Módulos de elasticidad y de Poisson.....	142
3.1.24.1 Módulo de elasticidad.....	142
3.1.24.2 Módulo de Poisson.....	144
<b>3.2 Análisis de las plantas y métodos de estudio .....</b>	<b>144</b>
3.2.1 Recopilación de información en campo.....	145
3.2.2 Procedimiento de muestreo.....	146
3.2.3 Identificación del agregado.....	147
3.2.4 Transporte y almacenamiento .....	148
3.2.5 Características Físico-Mecánicas.....	148
3.2.6 Diseño y especificaciones de mezclas de concreto .....	149
3.2.7 Cementos .....	151
3.2.8 Agregados.....	153
<b>CAPÍTULO IV.- RESULTADOS Y COMENTARIOS.....</b>	<b>158</b>
<b>4.1 Resultados agregado fino .....</b>	<b>159</b>
4.1.1 Granulometría .....	160
4.1.2 Módulo de finura.....	168
4.1.3 Peso Volumétrico .....	170
4.1.4 Pérdida por lavado .....	172
4.1.5 Densidad relativa o masa específica. ....	174
4.1.6 Absorción .....	175
4.1.7 Equivalente de Arena .....	177
4.1.8 Contenido de materia orgánica .....	178
4.1.9 Plasticidad.....	180
4.1.10 Humedad.....	181
<b>4.2 Resultados del agregado grueso.....</b>	<b>183</b>
4.2.1 Granulometría .....	184
4.2.2 Módulo de finura.....	191
4.2.3 Contaminación de arena en grava .....	192

4.2.4 Densidad relativa o masa específica .....	193
4.2.5 Absorción .....	194
4.2.6 Partículas alargadas y lajeadas (planas).....	195
4.2.7 Desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles) .....	197
4.2.8 Peso volumétrico.....	200
4.2.9 Coeficiente de forma .....	201
4.2.10 Sanidad (Intemperismo acelerado) .....	203
4.2.11 Humedad.....	205
<b>4.3 Resultados Concreto .....</b>	<b>206</b>
4.3.1 Revenimiento .....	206
4.3.2 Temperatura del concreto .....	207
4.3.3 Masa unitaria del concreto .....	208
4.3.4 Tiempos de fraguado.....	209
4.3.5 Contenido de aire .....	210
4.3.6 Resistencia a la compresión.....	211
4.3.7 Resistencia a la flexión.....	212
4.3.8 Módulo de elasticidad.....	213
4.3.9 Correlación de resistencia de compresión a flexión .....	215
<b>CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>217</b>
<b>CAPÍTULO VI.- BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>225</b>
<b>CAPÍTULO VII.- ANEXOS .....</b>	<b>234</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
2.1	Tipos de cemento.	13
2.2	Especificaciones mecánicas y físicas del cemento.	15
2.3	Cementos con características especiales.	15
2.4	Tipos de cemento para usos especiales.	16
2.5	Propiedades del cemento.	18
2.6	Influencia de los agregados en concreto fresco.	24
2.7	Influencia de los agregados en concreto endurecido.	25
2.8	Sustancias dañinas en los agregados.	38
2.9	Sustancias perjudiciales en el agua.	42
2.10	Tipos de agua.	43
2.11	Modelos para relacionar la resistencia a la compresión con la resistencia a flexión.	62
2.12	Características fundamentales de un pavimento flexible.	72
2.13	Esfuerzos en pavimentos rígidos.	86
2.14	Defectos de construcción en pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland.	94
2.15	Materiales perjudiciales para los agregados.	103
2.16	Optimización de mezclas.	107
3.1	Clasificación de las plantas de concreto.	145
3.2	Cementos y aditivos utilizados en las 12 plantas de concreto.	152

3.3	Arena #1 utilizada en la fabricación de concreto.	154
3.4	Arena #2 utilizada en la fabricación de concreto.	155
3.5	Grava #1 utilizada en la fabricación de concreto.	156
3.6	Grava #2 utilizada en la fabricación de concreto.	157
4.1	Limites granulométricos establecidos para el agregado fino utilizado en mezclas de concreto.	160
4.1.1	Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 1 y 2.	161
4.1.2	Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 3 y 4.	162
4.1.3	Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 5 y 6.	163
4.1.4	Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 7 y 8.	164
4.1.5	Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 9 y 10.	165
4.1.6	Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 11 y 12.	166
4.1.7	Módulo de finura de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	169
4.1.8	Peso volumétrico seco suelto y compacto de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	171
4.1.9	Pérdida por lavado de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	172
4.1.10	Densidad relativa o masa específica de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	174
4.1.11	Absorción de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	176
4.1.12	Equivalente de arena de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	177
4.1.13	Contenido de materia orgánica de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	179
4.1.14	Límite líquido, índice plástico y contracción lineal de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	180
4.1.15	Humedad de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.	182
4.2.1	Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 20 mm utilizados en las plantas de concreto 1,2 y 4 en estudio.	185

4.2.2	Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 20 mm utilizados en las plantas de concreto 5, 6 y 7 en estudio.	186
4.2.3	Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 20 mm utilizados en las plantas de concretos 8, 10, 11 y 12 en estudio.	187
4.2.4	Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 40 mm utilizados en las plantas de concretos 2, 3 y 4 en estudio.	188
4.2.5	Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 40 mm utilizados en las plantas de concretos 9, 10, 11 y 12 en estudio.	189
4.2.6	Módulo de finura de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	191
4.2.7	Contaminación de arena en grava de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	192
4.2.8	Densidad relativa o masa específica de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	193
4.2.9	Absorción de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	195
4.2.10	Partículas alargadas y lajeadas (planas) de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	197
4.2.11	Desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles) de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	199
4.2.12	Peso volumétrico seco suelto y compacto de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	200
4.2.13	Coeficiente de forma de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	202
4.2.14	Sanidad (Intemperismo acelerado) de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	204
4.2.15	Humedad de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.	205
4.3.1	Revenimiento alcanzado en las plantas de concreto.	207
4.3.2	Temperatura del concreto obtenido en las plantas.	208
4.3.3	Masa unitaria del concreto en las diferentes plantas.	209
4.3.4	Tiempos de fraguado del concreto en las diferentes plantas.	210

4.3.5	Contenido de aire del concreto en las diferentes plantas.	211
4.3.6	Resistencia del concreto a compresión.	212
4.3.7	Resistencia del concreto a flexión.	213
4.3.8	Módulos de elasticidad del concreto.	214
4.3.9	Correlación de resistencias de compresión a flexión.	215
A-1	Resultados de la planta 1 arena 1.	234
A-2	Resultados de la planta 1 arena 2.	235
A-3	Resultados de la planta 2 arena 1.	236
A-4	Resultados de la planta 3 arena 1.	237
A-5	Resultados de la planta 4 arena 1.	238
A-6	Resultados de la planta 4 arena 2	239
A-7	Resultados de la planta 5 arena 1.	240
A-8	Resultados de la planta 6 arena 1.	241
A-9	Resultados de la planta 6 arena 2.	242
A-10	Resultados de la planta 7 arena 1.	243
A-11	Resultados de la planta 7 arena 2.	244
A-12	Resultados de la planta 8 arena 1.	245
A-13	Resultados de la planta 8 arena 2.	246
A-14	Resultados de la planta 9 arena 1.	247
A-15	Resultados de la planta 9 arena 2.	248
A-16	Resultados de la planta 10 arena 1.	249
A-17	Resultados de la planta 10 arena 2.	250
A-18	Resultados de la planta 11 arena 1.	251
A-19	Resultados de la planta 11 arena 2.	252

A-20	Resultados de la planta 12 arena 1.	253
A-21	Resultados de la planta 12 arena 2.	254
A-22	Resultados de la grava en la planta 1 banco 1.	255
A-23	Resultados de la grava en la planta 2 banco 1.	256
A-24	Resultados de la grava en la planta 2 banco 2.	257
A-25	Resultados de la grava en la planta 3 banco 1.	258
A-26	Resultados de la grava en la planta 4 banco 1.	259
A-27	Resultados de la grava en la planta 4 banco 2.	260
A-28	Resultados de la grava en la planta 5 banco 1.	261
A-29	Resultados de la grava en la planta 6 banco 1.	262
A-30	Resultados de la grava en la planta 7 banco 1.	263
A-31	Resultados de la grava en la planta 8 banco 1.	264
A-32	Resultados de la grava en la planta 9 banco 1.	265
A-33	Resultados de la grava en la planta 10 banco 1.	266
A-34	Resultados de la grava en la planta 10 banco 2.	267
A-35	Resultados de la grava en la planta 11 banco 1.	268
A-36	Resultados de la grava en la planta 11 banco 2.	269
A-37	Resultados de la grava en la planta 12 banco 1.	270
A-38	Resultados de la grava en la planta 12 banco 2.	271
A-39	Resumen de los resultados del agregado fino o arena.	272
A-40	Resumen de los resultados del agregado grueso o grava.	273

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Mecanismo de funcionamiento de un pavimento flexible	71
2.2	Estructura de un pavimento flexible	72
2.3	Estructura típica de un pavimento rígido	77
2.4	Efectos de la temperatura a en las losas de concreto con Cemento Portland	85
2.5	Sección típica de un pavimento articulado	98
3.1	Cuarteo del material	110
3.2	Juego de Mallas	114
3.3	Prueba de materia orgánica	115
3.4	Granulometría en el concreto	118
3.5	Granulometría de finos en el concreto	118
3.6	Peso volumétrico de la grava	120
3.7	Peso volumétrico de la arena	121
3.8	Esferas de hierro fundido	122
3.9	Máquina de los Ángeles	123
3.10	Calibrador de espesores	126
3.11	Calibrador de longitudes	127
3.12	Partículas alargadas y lajeadas (planas)	127
3.13	Prueba de equivalente de arena	128
3.14	Prueba de sanidad (intemperismo acelerado)	130
3.15	Humedad del agregado	131

3.16	Copa Casagrande	133
3.17	Llenado de moldes	134
3.18	Etiqueta de identificación del material	147
4.1	Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 1 y 2 en comparación con los límites de la normativa.	161
4.2	Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 3 y 4 en comparación con los límites de la normativa.	162
4.3	Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 5 y 6 en comparación con los límites de la normativa	163
4.4	Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 7 y 8 en comparación con los límites de la normativa.	164
4.5	Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 9 y 10 en comparación con los límites de la normativa.	165
4.6	Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 11 y 12 en comparación con los límites de la normativa.	166
4.7	Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 1, 2 y 4 en comparación con los límites de la normativa.	185
4.8	Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 5, 6 y 7 en comparación con los límites de la normativa.	186
4.9	Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 8, 10, 11 y 12 en comparación con los límites de la normativa.	187
4.10	Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 2, 3 y 4 en comparación con los límites de la normativa.	188

4.11	Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 9, 10, 11 y 12 en comparación con los límites de la normativa.	189
4.12	Correlación de la resistencia de compresión a tensión.	216

## **CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN**

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad (Neville, 1999). Los autores Kosmatka y Panarese, (1992) dicen que el concreto es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta por cemento Portland y agua, une a los agregados para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua. El concreto se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistente al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco o nulo mantenimiento. Es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones.

Los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland tienen muchas ventajas como son: mayor duración que los de asfalto, la superficie no se deforma ni con calor ni con el paso o frenado de vehículos, los vehículos de carga pesada consumen menos combustible, mejoran la visión nocturna, requiere menor estructura de soporte, requieren un mantenimiento mínimo y tiene una mayor vida útil.

Los agregados para pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland, tienen propiedades que afectan el costo y las características de una mezcla de concreto. El hecho de que los agregados cumplan los requisitos de calidad, los hace aptos para el desarrollo de resistencias altas a compresión en los concretos, por consiguiente la resistencia intrínseca de los agregados adquiere mayor relevancia y sus requisitos se vuelven más estrictos, no sólo en resistencia sino también en los

aspectos de adherencia con la pasta de cemento (Comisión Federal de Electricidad, sección 3, 1994). Se señala que la resistencia intrínseca de los agregados es una característica que dificultosamente puede corregirse, por ello sus propiedades deben ser analizadas con el objetivo de aceptarlas o rechazarlas.

En los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland se requieren agregados que posean una resistencia para evitar el desgaste, la degradación o el deterioro causado por la abrasión. Durante la vida útil la acción del tráfico puede desgastar y deteriorar las superficies si el agregado no es lo suficientemente resistente.

Se debe definir el concepto de propiedades físicas y mecánicas, para lo cual se citará al autor Mamlouk *et al.*, (2009), las propiedades mecánicas de un material se definen como la respuesta del mismo a las cargas externas. Todos los materiales se deforman como respuesta a las cargas. Por ejemplo un pavimento puede fallar debido a una rugosidad excesiva de la superficie, incluso aunque los niveles de resistencia necesarios se encuentren dentro de las capacidades del material. Por su parte las propiedades físicas hacen referencia a las características del material, distintas de la respuesta a la carga, que afectan a la selección, el uso y el comportamiento del material.

Las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, tienen una influencia directa en la resistencia del concreto tanto en su etapa de fraguado, de resistencia y de durabilidad. Uribe (2004) afirma que la industria de agregados para concreto en México, puede ilustrarse mediante ejemplos de cruda realidad, oscilando entre la aplicación depurada de la tecnología y el empleo de técnicas artesanales de utilización ancestral.

Uno de los organismos que existen para asegurar la calidad del concreto son las normas nacionales como son: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (NMX-C-ONNCE) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Para el caso de normas internacionales se utilizaron las siguientes: *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *American Concrete Institute (ACI)* y *Portland Cement Association (PCA)*.

Los materiales adecuados para la construcción de pavimentos, dependen en gran parte, de sus propiedades que los hacen mantenerse estables y soportar las cargas a que son sometidos. Por tal motivo el estudio de estas propiedades, permite distinguir los materiales más satisfactorios de los que no lo son.

La principal aportación de esta investigación fue catalogar los agregados utilizados por las diferentes plantas de concreto localizadas en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga y conocer las propiedades y el comportamiento de los agregados como componentes del concreto utilizados para la construcción y rehabilitación de pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland. Las aportaciones secundarias fueron: determinar una correlación entre la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto; el análisis de las características de dichos agregados y en el cumplimiento de la normatividad nacional e internacional en el proceso de la mezcla del concreto para pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland; y una propuesta para la evaluación de la calidad de los agregados y mejoras de la mezcla de concreto.

## **1.1 Justificación**

Esta investigación pretende cubrir el estudio de los diferentes agregados para la fabricación de concreto, que se utiliza en los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, para ello

se realizaron las siguientes pruebas como son: densidad relativa o masa específica, absorción, pérdida por lavado, módulo de finura, contenido de materia orgánica, granulometría, peso volumétrico suelto y compacto, desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles), coeficiente de forma, partículas alargadas y lajeadas (planas), equivalente de arena, sanidad (Intemperismo acelerado), humedad, límites de consistencia y contracción lineal. Así mismo al concreto se le harán ensayos de revenimiento, temperatura, masa unitaria, tiempos de fraguado, contenido de aire, resistencia a compresión, flexión y módulos de elasticidad.

La aplicación de estas pruebas dará a conocer la influencia de los agregados (grava y arena) utilizados en la fabricación de concretos para pavimentos rígidos o de cemento Portland en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga. Esta información podrá ser utilizada para conocer los datos reales y actuales de los agregados utilizados por las 12 diferentes plantas de concreto, los beneficios que se obtendrán serán los siguientes:

1. Una propuesta de un método de pruebas para inspeccionar la calidad del concreto de los pavimentos rígidos o con cemento Portland.
2. Disminuir los costos de fabricación del concreto al reducir las cantidades de cemento, utilizando agregados con características ideales.
3. Obtener concretos más durables para el beneficio de los ciudadanos.

## **1.2 Descripción del problema**

Se reporta en la literatura que en muchos países, se han utilizado por muchos años los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland tanto para proyectos carreteros como para vías de comunicación urbanas, tal es el caso de Estados Unidos, Canadá, Alemania, España, Francia, Italia, Bulgaria y México,

entre otros han contribuido para que los métodos de diseño se hayan ido perfeccionando en base a los estudios realizados con el tiempo, y evolucionado en las técnicas de construcción y la evaluación de los pavimentos. En América Latina se han utilizado los pavimentos de concreto, principalmente para vialidades urbanas. Sin embargo, las tecnologías de diseño y construcción utilizadas normalmente no han sido las más actualizadas (Cemex Concretos, 2001).

La evolución de los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland ha aumentado de una manera que resulta muy favorable para el país, por las ventajas que los mismos representan, lo que ha propiciado que la demanda de estos caminos continúe en aumento.

Los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland están expuestos a condiciones muy severas. Además del tráfico que circula, se presentan otros factores que tienden a destruirlos: los cambios bruscos de temperatura, la abrasión, ambiente salino y condiciones de apoyo inestable del suelo de cimentación durante todas sus etapas. Sin embargo la desventaja principal de construir este tipo de pavimentos es el alto costo del cemento en comparación con el asfalto. Por lo que el costo de construcción es elevado pero los beneficios a largo plazo son muy altos. Se espera que tengan una vida larga, un mantenimiento bajo y una buena durabilidad para resistir condiciones de exposición anticipadas, debido a que están sujetos al desgaste y por lo tanto deben tener una resistencia elevada a la abrasión, la cual está estrechamente relacionada con la resistencia a compresión del concreto. Por otra parte poseen una resistencia considerable a la flexión y son afectados por los cambios de temperatura, tienen un gran módulo de elasticidad y distribuyen las cargas sobre un área grande, la consideración más importante es la resistencia estructural del concreto. Uno de los principales objetivos de un concreto para pavimento, es reducir los costos de fabricación utilizando los materiales adecuados, con el fin de proporcionar durabilidad, minimizar reparaciones y costos de mantenimiento.

En este sentido, las avenidas principales de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, así como en muchas ciudades de la república mexicana, han sufrido un deterioro notable en sus vialidades, ocasionando malestar entre los usuarios, en virtud de que la mayoría fueron construidos de pavimentos flexibles o asfaltados y empedrados. En el caso de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, que es ciudad colonial sus pavimentos de asfaltos y de piedra, actualmente sus parámetros de diseño han sido rebasados, ocasionando mantenimientos más frecuentes, molestias por los usuarios y gastos mayores a las dependencias en los tres niveles de gobierno.

Uno de los factores que afectan a los pavimentos rígidos o de concreto con cemento portland es el clima templado a cálido imperante en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga que puede ocasionar problemas en el mezclado, vaciado y curado del concreto teniendo efectos adversos en las propiedades físicas y su vida útil. Los problemas asociados con este clima son:

- Demanda de agua
- Pérdida de revenimiento
- Velocidad de fraguado
- Dificultad de manejo, vaciado y compactación
- Reducción de resistencias de compresión y flexión.

El uso de agregados inapropiados, no duraderos, se convierte en la aparición de grietas que comienzan por ser capilares, muy próximas y progresivas, y suelen terminar con la desintegración total de la losa. Por estas razones y las económicas, se considera justificado el tener un cuidado excesivo en el proporcionamiento y la calidad de los agregados. En este sentido, el único valor revisado por las dependencias en los tres niveles de gobierno federal, estatal y municipal

(supervisión) al momento de la construcción de un pavimento rígido o de concreto con cemento Portland es el MR (módulo de ruptura) o la resistencia final del concreto sometido a una carga a tensión, pero existen otros factores que intervienen con la durabilidad del concreto; tal es el caso de la calidad de los agregados.

Las plantas proveedoras de concreto de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga debieran cumplir con la normatividad nacional e internacional de la calidad de los agregados. Sin embargo, se ha reducido esta importante verificación, a nivel de la administración interna de cada una de las doce plantas de concreto que operan en la zona metropolitana de la ciudad de Querétaro y exclusivamente a algunas pruebas y por motivos de calidad.

### **1.3 Hipótesis**

Las características físicas y mecánicas de los agregados utilizados en las plantas productoras de concreto de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, influyen en su estado fresco y endurecido en pavimentos de concreto con cemento Portland.

### **1.4 Objetivo general**

Catalogar los agregados del concreto y verificar su calidad, en las diferentes plantas en la zona metropolitana de Querétaro y realizar una propuesta metodológica de pruebas basadas en las normas nacionales e internacionales para mejorar la selección de los agregados con mejores características y reducir los consumos de cemento, para disminuir los costos de producción y mejorar la calidad de los pavimentos.

## 1.5 Objetivos particulares

- Verificar las características físicas y mecánicas de los agregados para pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland y su cumplimiento con las normas nacionales e internacionales en las 12 plantas de concreto ubicadas en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga.
- Evaluar las mezclas de concreto para pavimentos rígidos o de cemento Portland, de las 12 diferentes plantas de concreto en la zona metropolitana de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga.
- Evaluar la correlación entre la resistencia de compresión y la resistencia a flexión de las 12 plantas de concreto en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga.

## **CAPÍTULO II.- REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Estado del Arte**

#### **2.1.1 Historia del cemento**

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo, los egipcios utilizaban yeso impuro calcinado como material cementante que sirvió para unir los bloques de piedra en la construcción de las pirámides, los griegos y los romanos utilizaban caliza calcinada, posteriormente, mezclaron cal con agua, arena y piedra triturada considerado el primer concreto de la historia (Neville, 1999). Así el papel del imperio Romano fue importante en el desarrollo de nuevas técnicas de construcción sin embargo con la caída del mismo declinó el uso del concreto y muchos de los conocimientos adquiridos con su construcción y uso desaparecieron completamente, el secreto de la durabilidad del cemento se perdió y en la Edad Media tan solo fue posible fabricar cemento de mediana calidad (Lay, 1992).

La técnica comenzó a ser recobrada en Inglaterra y se tienen evidencias, de que hacia el año 700 D.C. se construyeron en Saxon artificios mezcladores del concreto en forma de recipientes en la roca, con diámetro de 2 y 3 m, encontrándose que empleaban en la fabricación del concreto y el mortero una caliza como agregado y una cal quemada como cemento. Los normandos emplearon concreto como material llenante en muros que luego eran recubiertos con piedra. Esta técnica da fe la abadía de Reading en la región de Berkshire, donde el recubrimiento de piedra cayó totalmente, dejando al descubierto un esqueleto en concreto. En el siglo XVIII John Smeaton construye la cimentación de un faro en el acantilado de Edystone, en la costa Cornwall, Inglaterra, empleando un producto que endurecía a pesar de la humedad constante y del embate de las olas del mar y aun de su inmersión prolongada en agua salada utilizando un mortero de cal calcinada. En el

siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el Cemento Portland, denominado así por un material molido que amasado con el agua y con arena se endurecía formando un conglomerante de aspecto similar a la piedra caliza de la isla de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura (Gómez, 1994).

A mediados del siglo pasado se manufacturaban cementos naturales en Rosendale, Nueva York. El primer embarque de cemento Portland a los Estados Unidos del que se tengan registros fue hecho en 1868 y el primer cemento Portland fabricado en los Estados Unidos se produjo en una planta en Coplay, Pennsylvania, en 1871 (Mehta y Monteiro, 1998).

En el siglo XX surge el auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar concreto fresco ideados por Juergen Hinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907 (Gómez, 1994).

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, diques, etc., en la segunda mitad del siglo XIX, da una importancia enorme al cemento y las fábricas de éste, especialmente las de cemento natural, empiezan a extenderse por doquier. Puede decirse que el prototipo del cemento moderno fue producido a escala industrial por Isaac Johnson, quien en 1845 logra conseguir temperaturas suficientemente altas para clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima. Es a partir de 1900 cuando los cementos Portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz del consumo de cementos naturales (Neville, 1999).

### **2.1.1.1 La composición del cemento Portland**

El cemento Portland es producido por el hombre y proviene de la calcinación de las rocas calizas y arcillas (Sánchez, 2006). El cemento es un material que pertenece al grupo de los aglutinantes hidráulicos, tiene la propiedad de endurecer, no solamente al aire, sino también debajo del agua. Actualmente, el cemento Portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo, se puede decir que el cemento es el alma del concreto, y su participación es de enlazar piedras para crear el material que conocemos como concreto hidráulico, pero que su definición más adecuada debe ser concreto con cemento Portland.

Dice Mehta y Monteiro (1998) que las propiedades del concreto que contienen cemento Portland se desarrollan como un resultado de las reacciones químicas entre los compuestos del cemento Portland y el agua, puesto que estas reacciones de hidratación son acompañadas con cambios de materia y energía.

El cemento no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos minerales. Cuatro de ellos conforman el 90 % o más del peso del cemento y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el alúmino ferrito tetracálcico. Estos principales componentes realizan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los diversos tipos de cemento contienen los mismo cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes. Los dos silicatos de calcio, constituyen cerca del 75% del peso del cemento, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, (fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional) principalmente dependen del gel del hidrato de silicato de calcio. Es la médula del concreto. La composición química del silicato

de calcio hidratado es en cierto modo variable, contiene Cal (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. Las partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en un microscopio electrónico. Ya endurecidas, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo un conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de la resistencia. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas. Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto (Kosmatka y Panarese, 1992).

La Comisión Federal de Electricidad, sección 3, (1994), afirma que La propiedad de liga de la pasta de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua. La resistencia mecánica de la pasta de cemento es consecuencia del proceso de hidratación de los granos de cemento. En la etapa de fraguado se inicia en la periferia de los granos de cemento la formación de un tejido filamentoso, constituido por los productos de hidratación denominados genéricamente “gel de cemento”. En ocasiones los cementos no satisfacen todas las exigencias de las especificaciones de construcción; para formalizar dichas necesidades se desarrollan cementos especiales.

La resistencia del mortero de cemento es apenas un indicador aproximado de la contribución de un determinado cemento a la resistencia de una mezcla de concreto. El desempeño del cemento en ensayos de mortero puede ser diferente a su desempeño real en mezclas de concreto (Torrent, 2004).

De acuerdo con Helene (2008) la historia reciente ha demostrado que vale la pena investigar, proyectar, dosificar y construir, buscando siempre obtener más

provecho del cemento como material de construcción, explorando su elevado desempeño y emplearlo correctamente desde el punto de vista de la protección ambiental y sustentabilidad; Terán (2010), dice que se deben preparar ingenieros capaces de diseñar estructuras de concreto más económicas y seguras que incorporen nuevas tecnologías que permitan ahorro de energía.

### 2.1.1.2 Tipos de Cemento

Debido a la diversa gama de cementos disponibles es importante distinguir los de uso general y especial. La diferencia está en función de la resistencia mecánica y la durabilidad que presenta cada uno con respecto al tiempo y los diferentes agentes agresivos (García, 2006). Se fabrican diversos tipos de cemento Portland para satisfacer las necesidades químicas y físicas, y para propósitos específicos. La norma NMX-C-414-ONNCCE-2010, los designa de acuerdo al tipo de cemento, resistencia especificada y característica especial. Los cementos se designan por un símbolo formado por letras, que representan la naturaleza del cemento y algunos de sus componentes secundarios como se observa en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Tipos de cemento**

<b>Tipo</b>	<b>Denominación</b>	<b>Descripción</b>
CPO	Cemento Portland ordinario	Es el cemento producido a base de la molienda de Clinker Portland y sulfato de calcio.
CPP	Cemento Portland puzolánico	Conglomerante hidráulico, resulta de la molienda de Clinker Portland, materiales puzolánico y sulfato de calcio.

CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno	Conglomerante hidráulico, resulta de la molienda de Clinker Portland, escoria de alto horno y sulfato de calcio.
CPC	Cemento Portland compuesto	Conglomerante hidráulico, resulta de la molienda de Clinker Portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánico, escoria de alto horno y caliza.
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	Conglomerante hidráulico, resulta de la molienda conjunta de Clinker Portland, humo de sílice y sulfato de calcio.
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	Conglomerante hidráulico, resulta de la molienda conjunta de Clinker Portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2010

A estas letras se les añade un número que indica la resistencia a compresión a los 3 o 28 días, de una probeta de mortero creada con cemento. Como se observa en la tabla 2.2 y se considera de acuerdo a su resistencia de la siguiente forma:

- **La resistencia normal:** es la resistencia mecánica a la compresión a 28 días. No se añade letra.
- **La resistencia rápida:** es la resistencia a compresión a 3 días. Si el cemento tiene una resistencia rápida se añade la letra “R”.

**Tabla 2.2 Especificaciones mecánicas y físicas del cemento**

<b>Clase Resistente</b>
20
30
30 R
40
40 R

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2010

Cuando un cemento tiene características especiales su designación se complementa con las siguientes siglas mencionadas en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Cementos con características especiales**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Característica Especial</b>
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2010

En la tabla 2.4 se mencionan otros tipos de cemento que no están incluidos en la normativa NMX-C-414-ONNCCE-2010, y es importante conocer la gran variedad de cementos que existen.

**Tabla 2.4 Tipos de cemento para usos especiales**

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Cemento blanco</b>	El cemento blanco es un cemento Portland que difiere del cemento gris exclusivamente en cuanto a su color. El cemento Portland blanco es fabricado con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxidos de hierro y de manganeso. Se recomienda su uso para fines arquitectónicos y decorativos, debido a que su costo es parcialmente alto.
<b>Cementos mezclados</b>	Los cementos mezclados se producen al mezclar de manera íntima y uniforme dos tipos de materiales finos. Los principales materiales son el cemento Portland, escorias de alto horno, cenizas volantes y puzolanas, cal hidratada, y combinaciones previamente mezcladas de cemento.
<b>Cemento de escoria de alto horno</b>	Se puede emplear en las construcciones de concreto en general. La escoria de alto horno granulada de calidad seleccionada se muele junto con el clínker de cemento Portland, o separadamente y se mezcla, o se produce por una combinación de molienda y mezclado. El contenido de escoria varía entre el 25% y el 70% en peso.
<b>Cemento puzolana</b>	El cemento de puzolana, puede ser empleado en construcciones en general y donde no sean necesarias resistencias altas a edades tempranas. Se utilizan normalmente en estructuras masivas. Se fabrican moliendo el clínker de cemento Portland con una puzolana apropiada. El contenido de puzolana se encuentra entre el 15% y 40% en peso.
<b>Cemento escoria</b>	El cemento de escoria, se usa comúnmente en donde se requieran resistencias inferiores. Se fabrica por medio de mezclando escoria molida de alto horno, cemento Portland y cal hidratada. El contenido mínimo de escoria es del 70% del peso del cemento de escoria.
<b>Cemento de albañilería</b>	Se componen de alguno o varios compuestos: cemento Portland, puzolana, escoria de alto horno, escoria y cal; además contienen materiales como caliza, creta, conchas calcáreas, talco y arcilla. Los materiales se seleccionan de acuerdo a su capacidad para impartir trabajabilidad, plasticidad y retención de agua a los morteros.

<b>Cemento expansivo</b>	Es un cemento que se expande ligeramente durante el período de endurecimiento a edad temprana después del fraguado. La principal ventaja del cemento expansivo en el concreto consiste en controlar y reducir las grietas de contracción por secado.
<b>Cementos especiales</b>	Existen cementos que no están especificados necesariamente en normativas.
<b>Cemento para pozos petroleros</b>	Se emplean en trabajos de perforación y mantenimiento de pozos petroleros y geotérmicos, deben tener un fraguado lento y deben ser resistentes a temperaturas y presiones elevadas.
<b>Cemento impermeabilizado</b>	Usualmente se hace añadiendo una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua como el estearato al clínker de cemento en la molienda final. Reduce la transmisión capilar de agua a presiones bajas o nulas, sin embargo no detiene la transmisión de vapor de agua.
<b>Cemento plástico</b>	Se hacen añadiendo agentes plastificantes, en una cantidad no mayor del 12% del volumen total. Son empleados para hacer morteros y aplanados.
<b>Cemento de fraguado regulado</b>	Es un cemento hidráulico que se puede formular y controlar para producir concreto con tiempos de fraguado que varíen desde unos cuantos minutos hasta una hora y con un desarrollo de resistencia a edad temprana. Las propiedades físicas resultantes son en muchos aspectos comparables a las de concretos de fraguado regular.

Fuente: Mehta y Monteiro, 1998.

### 2.1.1.2 Propiedades del cemento

Las propiedades del cemento se limitan a su composición química y sus propiedades físicas. El significado de sus propiedades físicas es útil para interpretar los resultados de las pruebas que se efectúan al cemento. Las pruebas de las propiedades físicas deben ser utilizadas exclusivamente para evaluar las propiedades del cemento más que para el concreto (Kosmatka y Panarese, 1992). Las propiedades se describen a continuación en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Propiedades del cemento**

<p><b>Finura</b></p>	<p>La finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura de cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia (Mehta y Monteiro, 1998). Los efectos que en una mayor finura provoca sobre la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días. La finura se mide por medio del ensaye del turbidometro de Wagner (ASTM C 115, 2010).</p>
<p><b>Sanidad</b></p>	<p>Es la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. (Mehta y Monteiro, 1998). La expansión destructiva retardada o falta sanidad es provocada por un exceso de las cantidades de cal libre o de magnesia. Casi todas las especificaciones para el cemento portland limitan los contenidos de magnesia, así como la expansión registrada en la prueba de autoclave. Desde que en 1943 se adoptó la prueba de expansión en autoclave, prácticamente no han ocurrido casos de expansión normal que puedan atribuirse a falta de sanidad (ASTM C 151, 2009).</p>
<p><b>Consistencia</b></p>	<p>Se refiere a la movilidad relativa de una pasta de cemento o mortero recién mezclado o a su capacidad de fluir (Mehta y Monteiro, 1998). Durante el ensaye de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal, la fluidez determina en una mesa de fluidez tal y como se describe en la norma ASTM C 230 (2013). Ambos métodos el de la consistencia normal y el de la prueba de fluidez sirven para regular los contenidos de agua de las pastas y morteros respectivamente, que serán empleados en pruebas subsecuentes. Ambos permiten comparar distintos ingredientes con la misma penetración y fluidez.</p>
<p><b>Tiempo de fraguado</b></p>	<p>Indican si la pasta está desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El fraguado inicial de la pasta de cemento no debe ocurrir demasiado pronto; el fraguado final tampoco debe ocurrir demasiado tarde. Los tiempos de fraguado de los concretos no están relacionados directamente con los tiempos de fraguado de las pastas debido a la pérdida de agua en el aire y a las diferencias de temperatura en la obra en comparación con la temperatura controlada que existe en el laboratorio (Mehta y Monteiro, 1998). Para determinar si un cemento fragua de acuerdo con los tiempos especificados en la norma ASTM C 150 (2012), se efectúan pruebas usando el aparato de Vicat (ASTM C 191, 2008) o la aguja de Gilmore. El yeso regula el tiempo de fraguado en el cemento. También influyen sobre el tiempo de fraguado la finura del cemento la relación Agua – Cemento, y los aditivos usados. (Neville, 1999).</p>

<b>Calor de hidratación</b>	El calor de hidratación, es el calor que se genera cuando reaccionan el agua y el cemento. La cantidad de calor depende principalmente de la composición química, siendo el aluminato tricálcico y el silicato tricálcico los compuestos responsables del elevado desarrollo de calor (Mehta y Monteiro, 1998).
<b>Pérdida por ignición</b>	Es la pérdida de peso calentado el cemento de 900° C o 1000° C. Una pérdida por ignición elevada indica prehidratación y carbonatación, que pueden ser causadas por un almacenamiento prolongado e inadecuado o por adulteraciones durante el transporte y la descarga (Mehta y Monteiro, 1998). El ensaye para la pérdida por ignición se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM C 114 (2013).
<b>Almacenamiento del cemento</b>	El cemento Portland es un material sensible a la humedad; si se mantiene seco, mantendrá indefinidamente su calidad. Un cemento Portland que durante su almacenamiento haya estado en contacto con aire húmedo o con humedad, fraguará más lentamente y tendrá menor resistencia que un cemento que se hubiera mantenido seco. La humedad relativa dentro del lugar para almacenar el cemento debe ser la menor posible (Mehta y Monteiro, 1998).

Siempre que se tenga dudas en cuanto a la calidad de algún cemento, deberá practicársele pruebas de resistencia o de pérdida por ignición. El cemento a granel se debe almacenar en silos o depósitos de acero o concreto impermeables. (Neville, 1999).

### 2.1.2 Agregados

La mayoría de las rocas están compuestas por varios minerales. Un mineral se define como una sustancia inorgánica que se encuentra en la naturaleza, con una composición química más o menos definida y generalmente con una estructura específicamente cristalina (Mehta y Monteiro, 1998).

Las características de los agregados se derivan de la composición mineralógica de la roca original, las condiciones de exposición a que la roca ha

estado expuesta, antes de formar el agregado y el tipo de procedimiento y equipo que se utilizó para producirlo (Neville, 1999).

Los aspectos de la formación de la roca, la clasificación y los minerales, es esencial para entender por qué algunos materiales son más utilizados que otros, y para entender las relaciones microestructura-propiedades, en el agregado. Los agregados para concreto están compuestos por arena, grava y roca triturada, derivadas de fuentes naturales y por lo tanto son llamados agregados naturales, además los materiales producidos térmicamente (arcilla y pizarra expandidas) y agregados hechos de subproductos industriales (escoria de alto horno y ceniza volante) son llamados agregados sintéticos (Mehta y Monteiro, 1998).

Las características de los agregados influyen principalmente en la resistencia del concreto, el requisito más importante de un agregado, es que debe ser durable y químicamente inerte bajo las condiciones a las cuales estará expuesto. Es claro que las características del agregado proporcionen gran valor para la ciencia del concreto y provienen de la microestructura del material, formada por la naturaleza de exposición y los factores del proceso.

El agregado no actúa, en principio, de forma activa en el desarrollo microestructural de la pasta de cemento a edades cortas, siendo su interface con la pasta lo que resulta crucial (Zabaleta, 1992).

El problema más importante que pueden presentar los agregados es su posible reactividad con los componentes de la pasta, ya sea por su presencia de sílice reactiva, sulfuros u otros compuestos que puedan inducir la formación de productos expansivos que crean tensiones internas desencadenantes de fisuras (García y Huerta, 2004).

Los materiales pétreos son materiales seleccionados que pueden utilizarse en su estado natural o requerir uno o varios tratamientos de los indicados a continuación: disgregación, criba, trituración, lavado. O pueden estar constituidos por mezclas de dos o más materiales de los mencionados (Covarrubias, 1985).

La correcta selección del equipo de trituración es uno de los factores, que influyen más en el buen resultado técnico y económico de las obras, tales como caminos aeropuertos, vías férreas, etc. Es muy importante contar con toda la información necesaria para poder plantear correctamente el problema de selección del equipo de trituración y así elegir las máquinas que a partir de un material natural, serán capaces de producir en el tiempo requerido, los agregados pétreos necesarios para la ejecución de la obra en cantidad suficiente y con la calidad adecuada. La materia prima para la producción de agregados pétreos, se obtienen de bancos de roca o de yacimientos de agregados naturales de río o de depósitos de aluvión, conglomerados, etc.

La norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, establece que los agregados son materiales pétreos naturales seleccionados; materiales sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente, que se mezclan con cemento Portland y agua, para formar concreto hidráulico (N-CMT-2-02-002/02, 2002).

Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada a la tensión y compresión, así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudiera causar deterioro del concreto (Kosmatka y Panarese, 1992).

Los agregados representan el 75 al 85% del volumen en una mezcla para pavimentos, por lo tanto afectan significativamente tanto las propiedades del

concreto fresco como del endurecido. Por tal razón la importancia de los mismos, bajo esta condición, las características de los materiales que forman la mezcla se estudiara a mayor detalle, de tal forma que se pueda producir un concreto con mejores características (Cemex Concretos, 2001).

Los agregados son relativamente económicos y no entran en reacciones químicas complejas con el agua sin embargo determinan muchas propiedades importantes del concreto. Los agregados son fragmentos duros y resistentes, libres de materiales contaminantes, conforme a las especificaciones granulométricas.

Los agregados no solo pueden limitar la resistencia del concreto, sino que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto (Huerta, 2005).

Los agregados son más baratos que el cemento, sin embargo proporcionan al concreto enormes ventajas técnicas, al darle mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad, juegan un papel importante para determinar el costo y trabajabilidad de las mezclas y no es pertinente tratarlos con menos respeto que a los cementos. Por su parte y de acuerdo con el autor Mena Ferrer, aunque la incorporación de los agregados produce una reducción de costo porque son más económicos que el cemento, sus funciones varían de acuerdo con su calidad. Cuando los agregados están constituidos por rocas de buena calidad son dimensionalmente más estables que la pasta de cemento, de modo que su incorporación restringe los pronunciados cambios volumétricos de ésta y propicia una adecuada estabilidad dimensional en el concreto. Cuando los agregados son de calidad deficiente, sus deficiencias se transmiten al concreto y pueden afectar diversas propiedades tales como su resistencia mecánica, deformabilidad y permeabilidad (Uribe, 2004).

Está demostrado que el uso de agregados de buena calidad con niveles aceptables de módulo elástico, si reducen significativamente los niveles de contracción en la mezcla de concreto (Vidaud, 2011).

Los agregados se deben manejar y almacenar de tal manera que se minimice la segregación, degradación, contaminación o mezcla con diferentes clases o tamaños de material, que mantenga la granulometría deseada, pesándose todos los materiales a las tolerancias aceptables para mantenerse homogéneos para la mezcla propuesta del diseño de pavimentos y deben satisfacer determinadas condiciones de dureza, estabilidad o durabilidad y resistencia (Esqueda y Huerta, 2002).

Los agregados deben ser manejados y almacenados de tal forma que la segregación y la degradación sean mínimas y que se evite la contaminación del agregado con sustancias dañinas. Los productores de agregados deben seguir de cerca la evolución de especificaciones de los agregados, debiendo adaptarse con los equipos para producir agregados de calidad exigidos.

Por su parte, Mehta y Monteiro (1998), señala que las propiedades del agregado se analizan en dos partes sobre la base de los aspectos que afectan:

- Las proporciones de la mezcla.
- El comportamiento del concreto fresco y endurecido.

Para finalizar Uribe (2004), menciona que los agregados en la mezcla de concreto le confiere una gran influencia sobre las características de la misma, a tal grado que muchas de las propiedades del concreto se ven controladas o gobernadas casi en su totalidad por estos materiales (tabla 2.6 y 2.7 ), de hecho en

forma particular, se puede decir con relación al costo del concreto, que aunque como producto individual los agregados tienen un bajo costo, su valor en la mezcla de concreto es diferente, ya que tiene una fuerte influencia sobre los componentes de mayor costo. Por esta razón conocer sus características físicas y mecánicas resulta de gran utilidad en la fabricación del concreto.

**Tabla 2.6 Influencia de los agregados en concreto fresco**

<b>Propiedad del concreto</b>	<b>Característica de los agregados que la influye</b>
Peso unitario	Densidad relativa o masa específica Granulometría
Manejabilidad	Granulometría Forma de la partícula Textura superficial
Contracción plástica	Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y finos indeseables) Partículas friables Absorción
Requerimiento de agua	Granulometría Sanidad Limpieza (materia orgánica, limo, arcilla y finos indeseables)
Sangrado	Granulometría Forma de la partícula
Pérdida de revenimiento	Absorción Porosidad
Segregación	Granulometría

Fuente: Cemex Concretos (2001).

**Tabla 2.7 Influencia de los agregados en concreto endurecido**

<b>Propiedad del concreto</b>	<b>Característica de los agregados que la influye</b>
Durabilidad	Limpieza Textura superficial Sanidad Absorción Porosidad Reactividad con los álcalis Resistencia a la abrasión
Resistencia a compresión	Limpieza Granulometría Forma de la partícula Resistencia mecánica Partículas friables Textura superficial
Cambios volumétricos	Granulometría Forma de la partícula Limpieza Presencia de arcilla Módulo de elasticidad
Costos	Granulometría Forma de la partícula Textura superficial Limpieza
Resistencia a la abrasión	Resistencia a la abrasión
Peso unitario	Densidad relativa o masa específica
Permeabilidad	Porosidad
Irregularidades superficiales	Partículas friables Terrones de arcilla

Fuente: Cemex Concretos (2001).

### **2.1.2.1 Clasificación de los agregados:**

Los agregados se pueden clasificar por su:

- Origen.
- Forma de obtención.
- Tamaño.
- Forma y textura.
- Peso.
- Color

#### **2.1.2.1.1 Por su origen:**

Las rocas que se encuentran en la naturaleza tienen un sinnúmero de aplicaciones en la construcción de carreteras. Con el término de roca, se comprende las especies geológicas cuyo conjunto forman la corteza terrestre. Se refiere al distinto origen de las rocas que los constituyen. La naturaleza del material que los forma es útil y necesaria, porque deducir ciertos aspectos relacionados con el comportamiento al emplearse como agregados en el concreto.

Esta clasificación tiene como base la procedencia u origen natural de las rocas y los procesos físico-químicos y hasta biológicos involucrados en su formación (Uribe, 2004)

La Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), menciona que por su génesis geológica, las rocas se dividen en ígneas, sedimentarias y metamórficas,

las que a su vez se subdividen y clasifican en diversos tipos de acuerdo con sus características mineralógicas.

Rocas ígneas.- son aquellas rocas que se forman por la solidificación del magma al enfriarse abajo o cerca de la superficie de la tierra. El grado de cristalinidad y el tamaño del grano de las rocas, varían según la rapidez a la cual fue enfriado el magma al momento de la formación de la roca. El tamaño del grano tiene un efecto significativo en las características de la roca; teniendo la misma composición química, pero diferente tamaño del grano, pueden comportarse en forma diferente bajo las mismas condiciones de exposición. Las clasificaciones de las rocas ígneas con base en su estructura de cristales y contenido de sílica son útiles, por consiguiente la combinación del carácter ácido y la textura de grano fino o vidrioso de la roca determinan si un agregado es vulnerable al ataque de álcalis.

Rocas sedimentarias.- son producto del intemperismo y de la erosión. Por consiguiente son rocas estratificadas que generalmente fueron depositadas por acción del agua y acumuladas por el viento y por acción glacial. Dependiendo de la forma de depósito y consolidación se subdividen en tres grupos:

- Mecánicamente depositadas en estado no consolidado o físicamente consolidado.
- Depositadas mecánicamente y consolidadas.
- Depositadas químicamente.

La diferencia más notable se basa en el tamaño de sus partículas, debido a que en general se aprecia una diferencia en la composición mineral. Pueden variar ampliamente en sus características, tales como la forma, la textura, la porosidad, la resistencia y la pureza; debido a las condiciones bajo las cuales fueron

consolidadas. Las rocas tienden a ser porosas y débiles cuando se forman bajo presiones bajas y resistentes en presiones altas.

Rocas metamórficas.- estas se forman a grandes profundidades, bajo presiones y temperaturas muy altas también son rocas ígneas o sedimentarias pero que han cambiado su textura original, su estructura cristalina o su composición debido a condiciones físicas y químicas bajo la superficie de la tierra.

Se subdividen de acuerdo con su composición mineral y química, textura o tamaño de granos y estructura de los cristales. Algunas son reactivas con los álcalis del cemento.

#### **2.1.2.1.2 Por su modo de obtención y/o fragmentación:**

Los agregados para concreto proceden de rocas comunes, cuya fragmentación pudo ser ocasionada por fenómenos naturales o inducida por medios artificiales. Se pueden clasificar de acuerdo con su obtención en:

- Naturales.- en el proceso de beneficio no se incluye la trituración, numerosas fuerzas y eventos de la naturaleza capaces de ocasionar la fragmentación de las rocas, suelen presentar variadas características como consecuencia de distintas formas de actuar de las fuerzas y eventos causantes. El producto resultante son los aluviones, morrenas, depósitos marinos, piroclásticos y eólicos.
- Manufacturados y/o Artificiales.- son los que requieren una fragmentación apropiada de sus tamaños, para darles las propiedades que se desean. Dependen de las características del proceso y de los equipos que se utilizan. El material es totalmente triturado mediante métodos mecánicos.

- **Mixtos.**- ciertos agregados naturales que requieren una trituración parcial. La fragmentación inicial de la roca es de origen natural y la subsecuente es inducida por medios artificiales. Resulta de una mezcla de un producto natural y uno manufacturado.

La importancia del tamaño adecuado del agregado en el costo del concreto está en la actualidad bien establecida en las plantas productoras de agregados, que tienen el equipo necesario para realizar operaciones de triturado, limpieza, separación de tamaños y combinación de dos o más fracciones para cumplir con las especificaciones del cliente.

#### **2.1.2.1.3 Por su tamaño de partícula (graduación)**

El tamaño de las partículas del agregado es de mayor importancia en la manufactura del concreto. La serie de grupos de partículas correspondientes a distintos tamaños y el porcentaje, en peso o en volumen, de cada grupo, en relación al total se conoce como granulometría, ya sea en los agregados gruesos o en los finos (Neymet, 1965).

La graduación o distribución de los tamaños de las partículas de los agregados se determina por medio de un análisis por mallas (granulometría) (ASTM C 136, 2006).

- **Gravas.**- Son aquellas partículas cuyos tamaños son retenidos en la malla No. #4 (4.75 mm) y pasan totalmente la malla de 3" (75 mm).
- **Arenas.**- Son aquellas partículas que pasa la malla No. #4 (4.75 mm) y que retienen la malla No. #200 (0.075 mm).

Las arenas muy finas son frecuentemente antieconómicas. Las más gruesas pueden producir una mezcla de difícil acabado y poco manejable. Los agregados finos que pasan las mallas No. #50 (0.30 mm) y No. #100 (0.15 mm) afectan la manejabilidad. Las especificaciones recomiendan de un 10 a 30 % de material pasado por la malla No. #50 (0.30 mm).

#### **2.1.2.1.4. Por su forma y textura.**

De acuerdo con Mehta y Monteiro, (1998) la forma se refiere a características geométricas tales como redonda, angular y alargadas. Ahora bien, la textura de la superficie del agregado es tersa o áspera, se basa en un juicio visual. La textura de la superficie depende de la dureza, tamaño del grano y porosidad de la roca madre, y de su subsecuente exposición a las fuerzas abrasivas.

La forma y la textura de los agregados afecta tanto a las propiedades del concreto fresco como la del concreto endurecido. Los agregados en forma de laja y alargados necesitarán más agua para hacerlos manejables, que los agregados redondeados en forma cubica.

Las partículas alargadas, resbalosas y lisas deben ser evitadas o limitadas a un 15% por peso del total de los agregados. El agregado fino triturado, la arena hecha por medio de trituración de la roca suele tener demasiadas partículas planas y alargadas.

Neymet, (1965) menciona que la forma esférica (relativa) de las partículas de grava y arena es la que proporciona morteros más manejables y resistentes y mezclas más económicas, debido a que las partículas alargadas tienen mayor área

para el mismo volumen y se requiere más lechada para recubrirlos que en los primeros, además de que presentan dificultad para deslizarse unos entre otros.

#### **2.1.2.1.5 Por su peso.**

Según el origen de los agregados tienen una gran variedad de pesos unitarios. Se subdividen en:

- Ligeros.- son partículas que proporcionan una baja densidad a los concretos.
- Normales.- son partículas empleadas en la mayoría de los concretos estructurales de densidad normal o media.
- Densos.- son aquellos cuyas partículas tienen una alta densidad.

Esta clasificación de agregados valora la correspondiente aptitud de los mismos para producir concretos con diferentes pesos unitarios, pero no considera sus características físicas y químicas.

#### **2.1.2.1.6 Por su color**

Tal vez sea la clasificación más común que existe y la más fácil de generar o utilizar, ya que sólo considera el color superficial del material. El color en las rocas es una expresión superficial que depende, entre otros, de la composición química, la combinación mineralógica presente, el tamaño de los componentes y el grado de alteración (factor progresivo). La combinación de estos factores puede proporcionar en primera instancia una gama muy rica de colores o variaciones de tonos, esto significa que materiales de muy diversa condición y origen pueden tener el mismo

color o colores diametralmente opuestos, condición que también se puede cumplir para materiales del mismo origen y composición mineralógica (Uribe, 2004).

Uribe, (2004) menciona que, “La única contribución de la clasificación, con base al color para los agregados para concreto, es la generación de confusiones en los conceptos básicos de identificación de un material y los criterios de aceptación o evaluación de los materiales que se piensan destinar a este uso”.

#### **2.1.2.2 Agregado grueso**

Es deseable que el agregado grueso posea continuidad de tamaños en su composición granulométrica, los efectos de la granulometría de la grava produce sobre la manejabilidad no son tan notables como los de la arena (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

Los agregados se pueden calificar por su forma, en base a su grado de redondez y esfericidad, obteniéndose una medida relativa de carácter comparativo y descriptivo. La manera como esta característica puede influir en el concreto fresco es variable (Chan *et al.*, 2003). La esfericidad es muy importante en el diseño de mezclas, mientras que la redondez es menos relevante.

La esfericidad, que se define como la función de la relación del área de superficie de la partícula a su volumen (superficie específica). La esfericidad se relaciona con la estratificación y la división de la roca original. Se relaciona también con el tipo de equipo de trituración, cuando el tamaño de las partículas se ha reducido artificialmente. Las partículas con una alta proporción de área de superficie con respecto al volumen son de particular interés, ya que disminuyen la trabajabilidad de la mezcla. Las partículas alargadas y escamosas son de este tipo.

Las últimas pueden afectar negativamente la durabilidad del concreto, pues tienden a orientarse en un plano, en cuya parte inferior se forman huecos de aire y agua (Guevara, 2011). Los agregados de baja esfericidad hacen que las mezclas sean más costosas y de poca trabajabilidad.

La redondez mide la angulosidad o agudeza relativa de los vértices y las esquinas de una partícula. La redondez real es consecuencia de la resistencia al desgaste y a la abrasión de la roca de origen, y al grado de desgaste a que ha sido sometida la partícula. En el caso del agregado triturado, la forma dependerá de la naturaleza del material de origen y del tipo de triturador y su proporción de reducción; es decir, la relación del tamaño inicial respecto al del producto triturado (Guevara, 2011). La práctica indica que las mezclas buenas y económicas pueden ser diseñadas con agregados redondeados.

Para los concretos en los que la resistencia a la flexión es más importante que la resistencia a la compresión (como en los pavimentos), los agregados triturados funcionan mejor debido al efecto de adherencia es más crucial por la fractura a la tensión que por compresión (Torrent, 2004).

### **2.1.2.3 Agregado Fino**

La cantidad de finos presente en los agregados juega un papel importante en el diseño de mezclas, debido a que incluye materiales de tamaños y características diferentes.

Por otra parte nos dice Neymet (1965) que las arenas están constituidas por granos sueltos, que provienen de la disgregación de las rocas naturales, son arrastradas por el agua o el viento y quedan al fin acumuladas en depósitos

subterráneos, en las márgenes de los ríos, en las playas, y sobre las superficies de las llanuras desérticas. Artificialmente se obtienen por trituración de las piedras más grandes. Las arenas según su origen, pueden ser silicosas o cuarzosas, calizas, graníticas, basálticas y arcillosas. Las mejores son las silicosas. Las peores son las arcillosas que pueden alterar el fraguado.

Se sugiere que si la cantidad de finos en el total de agregados es menor al 2% del contenido de arena, el efecto en la demanda de agua es insignificante, pero cuando exceden el 2%, la demanda de agua aumenta.

Se deberá evitar la presencia de grandes cantidades de finos en los agregados y si contiene material predominantemente arcilloso, debe ser desechado. Contrariamente, algunos finos de trituración que provienen de ciertos agregados calcáreos tienen un efecto positivo en la trabajabilidad de las mezclas de concreto, sin impacto negativo en la demanda de agua (Torrent, 2004).

Es perfectamente posible diseñar mezclas con arena triturada, al igual que con arena natural; sin embargo esta última tiene un efecto muy positivo en la trabajabilidad de la mezcla.

La selección del agregado fino en sus proporciones tiene un impacto crucial en el costo de las mezclas de concreto. Los principales factores a considerar en el suministro de agregados son: granulometría, forma, contenido de finos y costo (Torrent, 2004).

#### **2.1.2.4 Propiedades de los agregados en el concreto**

La Comisión Federal de Electricidad, sección 3 (1994), considera que el trabajo en conjunto de los agregados y la pasta de cemento en el concreto endurecido pueden suponerse que, si las resistencias individuales de los agregados y la pasta no son restrictivas, la resistencia última del concreto debe depender sensiblemente de la adherencia entre ambos componentes.

Mehta y Monteiro (1998), existe actualmente evidencia de que al menos durante sus edades tempranas, la resistencia del concreto, particularmente la resistencia a la flexión, puede ser afectada por la textura del agregado; una textura más áspera parece ayudar a la formación de una adherencia física más fuerte entre la pasta de cemento y el agregado; por ello en edades posteriores, que hay una adherencia química más fuerte entre la pasta y el agregado, este efecto puede no ser tan importante.

Existen agregados que en contacto con la pasta de cemento, desarrollan reacciones químicas cuyos efectos son adversos a la durabilidad del concreto. Se producen entre ciertas rocas y minerales, que en ocasiones forman parte de los agregados, y los álcalis (óxidos de sodio y potasio) que habitualmente provienen del cemento, aunque también por algunos agregados y aditivos minerales (Cemex Concretos, 2001).

Se debe tener cuidado en que los agregados estén libres de sustancias dañinas, así como de su manipulación y apilamiento. Debido a que las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes, pueden ser impurezas orgánicas, limos, arcillas, carbón, lignitos y ciertas partículas suaves y livianas.

La resistencia, angulosidad y textura superficial de los agregados también afecta el modo y la relación del desarrollo de grietas y la propagación del concreto. La relación agua-cemento es el factor más importante que afecta la resistencia de un concreto, las propiedades de los agregados tales como forma, textura y tamaño del agregado no pueden ser ignoradas (Garnica *et al.*, 2002).

El uso de agregados inapropiados, no duraderos se traduce en la aparición de grietas que comienzan por ser capilares, muy próximas y que se desarrollan con trayectorias semicirculares en torno a juntas o a los bordes de las losas del pavimento; el fenómeno es progresivo y suele terminar con la desintegración total de la losa (Covarrubias, 1985).

Sin embargo la Comisión Federal de Electricidad, sección 3 (1994), argumenta que la resistencia propia de los agregados no sea la que determine la resistencia mecánica del concreto endurecido, sino que ésta depende de la resistencia de la pasta de cemento endurecida y/o de la adherencia pasta-agregado, siendo ambos aspectos susceptibles de maniobra.

#### **2.1.2.5 Sustancias dañinas o nocivas**

Las sustancias nocivas son aquellas que están presentes como constituyentes menores, ya sea del agregado fino o del agregado grueso, pero que son capaces de afectar adversamente la trabajabilidad, el fraguado y endurecimiento y las características de durabilidad del concreto. Otras sustancias pueden ser de efectos nocivos, produciendo reacciones químicas en el concreto (Mehta y Monteiro, 1998).

Diverso materiales que acompañan a los agregados, y cuya presencia es inconveniente por los efectos que producen en el concreto. Los más comunes son los finos indeseables (limo y arcilla), materia orgánica, el carbón y el lignito, las partículas ligeras y los terrones de arcillas y otras partículas desmenuzables. Lo deseable es disponer de agregados libres de materias perjudiciales, en la práctica esto no es factible, por lo cual se hace necesario tolerarlas en proporciones suficientes reducidas para sus efectos nocivos resulten poco significativos. Las sales inorgánicas que pueden hallarse en los agregados de origen natural las cuales son los sulfatos y los cloruros. La presencia excesiva de estas sales pueden ocasionar daños indeseables en el concreto, difieren de actuar y en la manifestación e intensidad de sus efectos (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

Si bien las partículas suaves son perjudiciales debido a que pueden afectar la durabilidad y la resistencia a la abrasión del concreto también los terrones de arcilla que estén presentes en el concreto pueden absorber una parte del agua de la mezcla, o formar huecos en el concreto endurecido.

El carbón y el lignito u otro material liviano como la madera o los materiales fibrosos, afectan la durabilidad del concreto. Si estas impurezas aparecen en o cerca de la superficie el concreto se verá afectado seriamente por la formación de cavidades o huecos y ocasionaran manchas.

Las impurezas orgánicas en el agregado pueden causar problemas en el fraguado y el endurecimiento del concreto (Mehta y Monteiro, 1998). En la tabla 2.8 se describen las sustancias y el efecto que tiene en el concreto.

**Tabla 2.8 Sustancias dañinas en los agregados**

<b>Sustancia</b>	<b>Efecto en el concreto</b>
Impurezas Orgánicas	Afecta el tiempo de fraguado y puede ocasionar deterioro.
Materiales más finos que la malla No. #200	Afecta la adherencia, y aumenta los requerimientos de agua.
Carbón, lignito u otro material liviano	Afecta durabilidad y puede ocasionar manchas o huecos superficiales.
Partículas frágiles	Afecta durabilidad
Partículas suaves	Afecta trabajabilidad y durabilidad y puede ocasionar huecos superficiales.

Fuente: Mehta y Monteiro, 1998.

### **2.1.3 Agua**

En 1918, el Dr. Abrahams sustentó una teoría diferente relativa a la compacidad máxima. Sostuvo que lo importante era determinar la resistencia que podría obtenerse al endurecer el agua y cemento, unidos en forma de pegamento. Este pegamento es más resistente conforme contiene más aglutinante, pero debe ser suficientemente fluido para que pueda cumplir con su misión de envolver las gravas y las arenas que son los otros constituyentes del concreto. El ligante, constituido por cemento y agua tiene que estar libre de materias orgánicas y algunas otras sustancias químicas que pudieran interferir en el buen funcionamiento de la lechada (Neymet, 1965).

El agua tiene dos funciones principales la primera como agua de mezcla y la segunda como agua de curado; el agua en el mezclado de concreto se estima que ocupa entre el 10 y 25 por ciento del concreto.

La Oficina de los Estados Unidos de Reclamación (*U.S. Bureau of Reclamation*) es una agencia federal, que supervisa la gestión de los recursos hídricos, específicamente en lo que se aplica a la supervisión y operación de proyectos que se ha construido a lo largo del oeste de Estados Unidos para el riego, abastecimiento de agua, y el asistente de hidroeléctricas de generación de energía (U.S. Bureau of Reclamation, 2013)

*La U.S. Bureau of Reclamation*, considera que si el agua es clara, y no tiene sabor dulce, amargo o salada, puede ser usada como agua de mezclado o de curado para concreto. Es conveniente contar con agua de buena calidad libre de impurezas, que sea potable o químicamente pura (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994). El agua debe ser limpia, potable y estar libre de cualquier basura, de sustancias químicas indeseables o de residuos que puedan afectar el concreto. Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto. El agua que contiene menos de 2,000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales generalmente pueden ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar concreto. El agua que contenga más de 2,000 ppm de sólidos disueltos deberá ser ensayada para investigar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado (Mehta y Monteiro, 1998).

Las aguas en algunas ciudades por lo general están tratadas con cloros, por tal motivo pueden ocasionar variaciones en el tiempo de fraguado. De esta manera los cloruros de calcio con la cales libres el cemento aumentan la temperatura de la mezcla, otorgando una consistencia pastosa y menos trabajable.

El agua pura y potable se está transformando en un recurso cada vez más escaso, debido al crecimiento de la población y a la contaminación de fuentes de agua por la eliminación no controlada de desechos industriales o por otras razones; en la industria del concreto tiene un doble efecto. Primero, el acceso al agua potable es más limitado o más costoso. Segundo existe una presión de protección ambiental para limitar o prohibir la eliminación de agua con cemento de las plantas.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en la relación con la cantidad de Cemento.

Ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- Se logra una mejor unión entre capas sucesivas entre el concreto y el esfuerzo.
- Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto con la condición que se pueda consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua se obtienen mezclas más resistentes.

La importancia de estudiar el agua en el cemento radica que puede presentar impurezas, como azúcar, ácidos, materia vegetal y aceites que impidan o retardan

la hidratación. Las impurezas excesivas en el agua no solo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, si no también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

El efecto de las sustancias orgánicas presentes en las agua tiene un problema considerable en los tiempos de fraguado o en la resistencia final del concreto. Por lo que se refiere a la cantidad de azúcar en el agua una pequeña cantidad de sacarosa, retarda el fraguado. Además, cada tipo de azúcar afecta el tiempo de fraguado y a la resistencia de manera distinta. De igual forma los sedimentos en el agua influyen en las propiedades del concreto, se recomienda que antes de ser empleada, cualquier agua lodosa deberá pasar a través de estanques de sedimentación o deberá ser clarificada por cualquier otro medio para reducir la cantidad de sedimentos y de arcilla agregadas (Kosmatka y Panarese, 1992).

Ocasionalmente se encuentran presentes varios tipos de aceite en el agua. El aceite mineral no mezclado con aceites animales o vegetales tiene probablemente un menor efecto en el desarrollo de la resistencia que otros aceites.

Las aguas que estén muy coloreadas, con un olor notable o aquellas en que sean visibles algas verdes o cafés deberán ser vistas con desconfianza y en consecuencia deberán ser analizadas. Escriben Kosmatka y Panarese (1992), que el agua que contiene algas no es adecuada para producir concreto porque las algas pueden causar una mayor reducción en la resistencia. Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad determina el tiempo de fraguado y de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. En la tabla 2.9 se presentan las sustancias perjudiciales y su efecto en el concreto.

**Tabla 2.9 Sustancias perjudiciales en el agua**

<b>Producto Químico</b>	<b>Efecto en el concreto</b>
Carbonatos y bicarbonatos alcalinos	Tiene diferentes efectos en los tiempos de fraguado de cementos distintos. El carbonato de sodio acelera el fraguado. Los bicarbonatos aceleran o retardan el fraguado. Reducen de manera significativa la resistencia del concreto. Existe la posibilidad de reacciones álcali-agregado.
Cloruros	Posible efecto de los iones de cloruro pudieran tener en la corrosión del acero de refuerzo. Los iones de cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino.
Sulfatos	Posibles reacciones expansivas. Deterioro por ataque de sulfatos.
Sales de hierro	Las aguas de mina ácidas pueden contener cantidades muy grandes de hierro, normalmente no afectan el desarrollo de resistencia.
Diversas sales inorgánicas	Las sales de manganeso, estaño, zinc, cobre y plomo presentes en el agua provocan una reducción considerable en la resistencia y también grandes variaciones en el tiempo de fraguado.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994).

### 2.1.3.1 Diferentes tipos de agua

La norma NMX-C-122-ONNCCE-2004 establece una clasificación de los diversos tipos de agua que existen con sus efectos y limitaciones para ser usadas en el concreto (tabla 2.10):

**Tabla 2.10 Tipos de agua**

<b>Tipo de agua</b>	<b>Efectos en el concreto</b>
Aguas fuertemente salinas	Interrumpe las reacciones del fraguado del cemento en el curado, disolución de los componentes cálcicos del concreto (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Agua de mar	Un concreto hecho con agua de mar puede tener una resistencia temprana mayor que un concreto normal, sus resistencias a edades mayores pueden ser inferiores. El agua de mar no es adecuada para producir concretos reforzado con acero y no deberá usarse en concretos presforzados debido al riesgo de corrosión del refuerzo, particularmente en ambientes cálidos y húmedos (Kosmatka y Panarese, 1992). Produce eflorescencia. Incrementa la posibilidad de generar corrosión del acero de refuerzo (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas sulfatadas	Son agresivas para concretos fabricados con cemento Portland (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas cloruradas	Produce una alta disolución de la cal (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas acidas	Las aguas acidas no tienen un efecto adverso en la resistencia, sin embargo pueden ocasionar problemas de manejo y se deben evitar en la medida posible (Kosmatka y Panarese, 1992). Disolución rápida de los compuestos del cemento (NMX-C-122-ONNCCE-2004).

Aguas magnesianas	Tienen a fijar la cal, formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble. En la mezcla, inhibe el proceso de fraguado del cemento (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas alcalinas	No afectan en gran medida a la resistencia, en mayores concentraciones pueden reducir la resistencia al concreto y tiene la posibilidad de una mayor reacción álcali- agregado (Kosmatka y Panarese, 1992). Produce acciones nocivas para cementos diferentes al aluminoso (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas recicladas	Es permitido reusar el agua de enjuague como agua en el concreto si satisface los límites de la normativa (Kosmatka y Panarese, 1992). El concreto puede atribuir los defectos propios del exceso de finos (NMX-C-122-ONNCCE-2004).
Aguas de desperdicios industriales	El uso de estas agua como agua de mezclado, reduce la resistencia a la compresión entre un 10% a 15%. Las aguas de desperdicios industriales pueden contener impurezas nocivas, lo recomendable es realizar pruebas a cualquier agua de desperdicio (Kosmatka y Panarese, 1992).
Aguas negras	Las aguas negras típicas pueden contener materia orgánica. Estas aguas si se realiza un buen tratamiento, la concentración se reduce y de igual forma el efecto en la resistencia (Kosmatka y Panarese, 1992). Efectos imprevisibles (NMX-C-122-ONNCCE-2004).

#### 2.1.4 Aditivos

Los antecedentes más remotos de los aditivos químicos se encuentran en los concretos romanos, se mataban toros para utilizar la hemoglobina de la sangre y adicinarla a los componentes de los concretos y darles mayor plasticidad. También se utilizaba claras de huevo en la mezcla, en la construcción de los muros de cal durante la colonia y en concretos de cemento artificial y se les agregaba sal común, alumbre y jabón, con el objeto de darles mayor plasticidad e impermeabilidad (Neymet, 1965).

En 1945 el Instituto Americano del Concreto (ACI) publicó el primer reporte sobre los estudios e investigaciones de productos que se encontraban en el mercado de los Estados Unidos y los agrupó según las propiedades que se le atribuían. Diez años después, ya se precisaba la composición de los diferentes tipos de aditivos, con lo que se redujo considerablemente la variedad de productos que se ofrecían; por último en 1963 se publica un reporte más completo, donde los aditivos se clasificaron según el tipo de sustancias que los constituyen o los efectos característicos que producen en el concreto (Neymet, 1965).

La norma de la ASTM C 494 (2013), lo define como una sustancia química, distinta de los agregados, del cemento y del agua, que interviene en una forma directa en la manufactura del concreto y sirve para modificar sus propiedades y cualidades particulares.

No basta conocer las propiedades de un aditivo. Se necesita también saber cuál es el proceso para dosificarlo, adicionarlo y controlarlo, para que realmente se pueda obtener buenos resultados. Existen en el mercado diferentes marcas de aditivos y se debe conocer el tipo de aditivo. Para producir un buen concreto se necesitan buenos agregados, buen cemento y buena mano de obra; no hay que imaginar que un aditivo es un elemento mágico que genere buenas cualidades.

Los aditivos son usados para:

- Ajustar el tiempo de fraguado.
- Reducir la demanda de agua.
- Aumentar la trabajabilidad
- Incluir intencionalmente aire.
- Ajustar otras propiedades del concreto.

Las características de los aditivos más utilizados se orientan a modificar las velocidades del tiempo de fraguado, acelerándolo o retardándolo, y a buscar mayor plasticidad en la mezcla. El mecanismo mediante el cual se logra mayor plasticidad es a través de procesos físico-químicos que permiten la reducción de parte del agua de mezclado, lo que en muchos casos acelera la ganancia de resistencia luego de producirse el fraguado inicial (Puertas, 2005).

Los aditivos para concreto son componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones (Sanjuán y Castro, 2001).

Existe una amplia variedad de aditivos químicos disponibles en la actualidad, con efectos de reducción de agua que tienen un claro impacto en la optimización de mezclas. Los retardadores o acelerantes solo modifican la dinámica de las reacciones químicas sin tener impacto directo en los costos del concreto (Torrent, 2004).

La reducción de agua se produce porque el aditivo crea fuerzas intermoleculares que facilitan tanto la reacción sobre las partículas de cemento, como su menor apelmazamiento y mayor fluidez. En igualdad de condiciones, esta nueva mezcla requiere menor cantidad de agua para obtener el mismo asentamiento. Por eso mismo conduce a menores relaciones agua/cemento, y con ello, a mayores resistencias mecánicas, mayor compacidad y menor porosidad (Neymet, 1965).

Existen reductores convencionales (plastificantes) y reductores de agua de alto rango (súper-plastificantes), ambos difieren de su química y desempeño, producen básicamente el mismo efecto: permitir una reducción del contenido de

agua en la mezcla de concreto manteniendo la misma consistencia. Los reductores de agua de alto rango pueden mejorar la cohesión de la mezcla y se recomienda para concretos fluidos, bajo peso volumétrico y autocompactable (Torrent, 2004).

La reducción de agua está acompañada por una reducción en el contenido de cemento y la elección del aditivo, es un elemento importante pero la decisión sobre su rendimiento se elegirá en base a pruebas de laboratorio.

El uso de aditivos en el concreto permite reducir defectos de los agregados, sin embargo Nawy (2005) afirma que los aditivos son materiales indispensables para mejorar las características y propiedades del concreto, pero no sustituyen a una mala práctica constructiva ni a un mal diseño de mezcla.

De acuerdo con Neymet (1965), no basta conocer las propiedades de un aditivo. Se necesita también saber cuál es el proceso para dosificarlo, adicionarlo y controlarlo, para que realmente se puedan obtener buenos resultados.

### **2.1.5 Concreto**

Dice Neymet (1965), que los concretos fabricados tienen su origen, desde la más remota antigüedad, entre los egipcios. Más tarde los romanos y después los españoles lo pusieron en práctica en la Nueva España, donde todavía ahora podemos contemplar monumentos ejemplares, como son los puentes, los acueductos y las iglesias de la época colonial.

### **2.1.5.1 Definición del concreto**

El concreto como lo entendemos, es una mezcla de agregados pétreos, cemento, agua y aditivos, que permite ser colocada en moldes para formar piezas estructurales, que al endurecer podrá resistir las fuerzas que estará sometido (Salazar, 2009).

El concreto como masa constituida por materiales heterogéneos, está sujeto a la influencia de numerosas variables. Las variables de las características de cada uno de los componentes del concreto pueden ocasionar cambios en su resistencia y en otras propiedades. Entre estas, se tiene presente diferencias en la dosificación, mezclado, colocación, curado, entre otras (Neville, 1999).

Se debe conocer ciertas características de los agregados, para el proporcionamiento de las mezclas de concreto y determinar las propiedades en estado fresco, se deben analizar en dos partes debido a los aspectos que los afectan.

La Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), define que el concreto produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde características y adquiere el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido. El comportamiento mecánico y su durabilidad dependen de tres aspectos básicos:

- Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento.
- La calidad de los agregados.
- La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

Por su parte, Terán (2010) señala que el diseño de las estructuras de concreto cambiará significativamente en los próximos años. Una de las razones para ello es la percepción dentro de las sociedades civiles en cuestiones ambientales.

Dicen Tárano y Howlan (2010), que el concreto constituye una solución constructiva fundamental para la creación de estructuras. Aun en nuestro siglo, con el avance de la ciencia y la técnica, sigue siendo un material que ostenta dos cualidades importantes versatilidad y economía.

Existen dos características principales del cemento que juegan un rol importante en las propiedades y el costo de las mezclas de concreto: la demanda de agua y la resistencia.

Los componentes básicos del concreto son:

- Cemento.
- Agua.
- Agregado fino.
- Agregado grueso.
- Aire.
- Aditivos.

Para asegurarse que estén combinados en una mezcla homogénea se requiere de esfuerzo y cuidado. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado. Sin embargo, se puede variar esa secuencia y aun así producir concreto

de calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el tiempo de adicionamiento del agua, en el número total de revoluciones de la mezcladora y en la velocidad de revolución (Kosmatka y Panarese, 1992).

Por mi parte defino al concreto como un material que cambia de estado semi-líquido a un estado sólido, tiene la capacidad de resistir grandes esfuerzos y deformaciones, es un material moldeable y práctico para la construcción de diferentes estructuras.

### **2.1.5.2 Propiedades del Concreto**

Son muchas las características del concreto que conciernen; pero algunas de ellas se hacen críticas en determinadas circunstancias. Las características del concreto pueden variar en un grado considerable, mediante el control de sus ingredientes (Merritt *et al.*, 2001).

#### **2.1.5.2.1 Trabajabilidad**

Es la facilidad con que se puede mezclar los ingredientes en la mezcla y, además la capacidad de colocarse, manejarse, consolidarse, transportarse y acabado del concreto recién mezclado. Se mide la consistencia o fluidez con la obtención del revenimiento (Merritt *et al.*, 2001). Kosmatka y Panarese (1992), escriben, el concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni sangrar excesivamente.

### **2.1.5.2.2 Peso Unitario**

El concreto convencional en pavimentos y otras estructuras tiene un peso unitario en el rango de 2,240 kg/m<sup>3</sup> a 2,400 kg/m<sup>3</sup> (NMX-C-403-ONNCCE-1999). El peso unitario del concreto varía, de acuerdo a la cantidad y densidad relativa o masa específica del agregado (Merritt *et al.*, 2001).

### **2.1.5.2.3 Sangrado**

El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos (cemento, arena y grava). El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad (Kosmatka y Panarese, 1992).

### **2.1.5.2.4 Consolidación**

La vibración pone en movimiento a las partículas en el concreto recién mezclado, reduciendo la fricción entre ellas y dándole a la mezcla las cualidades móviles de un fluido denso. La acción vibratoria permite el uso de una mezcla más dura que contenga una mayor proporción de agregado grueso y una menor proporción de agregado fino (Kosmatka y Panarese, 1992). Si una mezcla de concreto es lo bastante trabajable para ser consolidada de forma apropiada por varillado manual, puede que no exista ninguna ventaja vibrarla.

#### **2.1.5.2.5 Plasticidad**

El concreto debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado en estado fresco. El concreto de consistencia plástica no se desmorona, si no que fluye como líquido viscoso sin segregarse. Se necesita una mezcla plástica para tener resistencia y para mantener su homogeneidad durante el manejo y la colocación.

#### **2.1.5.2.6 Hidratación**

La hidratación es la reacción química entre el cemento y el agua, produciendo la ligazón de la pasta de cemento.

#### **2.1.5.2.7 Tiempo de fraguado**

El yeso, que es adicionado en el molino de cemento, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de la molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento de mezclado (Kosmatka y Panarese, 1992).

#### **2.1.5.2.8 Curado**

El aumento de resistencia continuará con la edad mientras esté presente algo de cemento sin hidratar, a condición que el concreto permanezca húmedo o tenga una humedad relativa superior a aproximadamente el 80% y permanezca favorable la temperatura del concreto. Además que el concreto ni endurece ni se cura con el secado. Requiere de humedad para hidratarse y endurecer. El secado está

relacionado con la hidratación y el endurecimiento de manera indirecta. Al secarse el concreto, deja de ganar resistencia; y no es indicación que haya experimentado la suficiente hidratación para lograr las propiedades físicas deseadas (Kosmatka y Panarese, 1992).

#### **2.1.5.2.9 Velocidad de secado del concreto**

El conocimiento de la velocidad de secado es útil para comprender las propiedades o la condición física del concreto. El concreto recién colado tiene agua abundante, pero a medida que el secado progresa desde la superficie hacia el interior, el aumento de resistencia continuará a cada profundidad únicamente mientras la humedad relativa en ese punto se mantenga por encima del 80%. El tamaño y la forma de un miembro de concreto mantienen una relación importante con la velocidad de secado. Los elementos de concreto de gran área superficial en relación a su volumen (pavimentos) se secan con mucha mayor rapidez que los grandes volúmenes de concreto con áreas superficiales relativamente pequeñas (estribos de puentes). Otras propiedades del concreto se ven afectadas por su contenido de humedad como son: la elasticidad, flujo plástico, valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica y durabilidad (Kosmatka y Panarese, 1992).

Por ejemplo se menciona el caso que la superficie de un pavimento de concreto que no tiene suficiente curado, la losa se seca rápidamente, el concreto de la parte superior es débil produciendo que se descascaré en partículas finas provocadas por el tránsito.

#### **2.1.5.2.10 Contracción**

El concreto se contrae al secarse del mismo modo que lo hacen la madera, el papel y la arcilla afirman Kosmatka y Panarese (1992), las dos causas básicas por las que se producen grietas en el concreto son los esfuerzos debidos a cargas aplicadas y esfuerzos debidos a contracción por secado o a cambios de temperatura.

Uno de los problemas que más afecta al correcto desempeño de pavimentos, es el fenómeno de la contracción por secado, no es más que la retracción del concreto a corto y mediano plazo debido a la combinación de las contracciones por pérdida de la humedad interna, por cambio del estado del agua de la mezcla al interactuar químicamente con el cemento, así como la interacción del agua con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) medioambiental. Esta combinación de contracciones, induce alteraciones volumétricas en el elemento del concreto que, dada las restricciones del terreno de apoyo y de posibles niveles de armado de refuerzo, podrían repercutir en el desarrollo de grietas en la losa de concreto (Vidaud, 2011).

La magnitud de la contracción también depende de otros factores, como las cantidades y propiedades del agregado empleado, tamaño y forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación, y el tiempo; el contenido de cemento tiene un efecto mínimo a nulo sobre la contracción por secado. En ese sentido, el agua de mezclado tiene una mayor influencia en el desarrollo de grietas debido a que al colocarle más agua que la requerida, los niveles de contracciones serán mayores y por supuesto también los daños. El agua adicional que se usó en el mezclado empieza a surgir a la superficie, donde se evapora y el concreto se contrae y se agrieta. Las grietas resultantes pueden reducir la resistencia de los miembros, dañar la apariencia de la estructura y permiten que el refuerzo quede expuesto a la atmósfera, con lo que se

puede incrementar la corrosión. La contracción continúa durante muchos años pero bajo condiciones ordinarias probablemente el 90% se da durante el primer año.

Vidaud (2011), sostiene que el componente de una mezcla de concreto que mayor incidencia tiene en la reducción de los problemas de contracción que se desarrollan durante su proceso de fraguado es el agregado grueso. Justamente es el agregado grueso el que se opone a las contracciones, cuando el concreto se tiende a contraer debido a su normal cambio de volumen. Además dice que es recomendable el uso de concretos cuya relación grava/arena sea igual o mayor a 1.2; es decir, es deseable el uso de concretos gravosos y no arenosos.

La contracción es una propiedad inherente e inevitable del concreto, por lo que se utiliza acero de refuerzo colocado en una posición adecuada para reducir los anchos de la grieta, o bien juntas que predetermine y controlen la ubicación de las grietas, es importante entender que si bien el deterioro del concreto y la corrosión del acero de refuerzo están íntimamente unidos con la porosidad y agrietamiento del concreto, no es conveniente ignorar la interacción química que existe entre el concreto y el medio ambiente.

La cantidad de contracción depende mucho del tipo de exposición, si el concreto se ve sometido a mucho viento durante el curado, su contracción será mayor. Igualmente, una atmósfera húmeda implica menos contracción, mientras que una seca implica mayor contracción.

En la actualidad ya se emplean concretos de baja contracción y de contracción compensada; sin embargo existe el paradigma de los costos relativos de éstos, respecto al material convencional (Vidaud, 2011). Agregando además que la literatura no reconoce con claridad las ventajas del uso de agregado grueso de

mayor tamaño, es una realidad que el usarlo reduce también los volúmenes de pasta y con ello de agua libre.

#### **2.1.5.2.11 Flujo plástico**

Bajo cargas de compresión sostenidas, el concreto continuará deformándose durante largos periodos. Esta deformación adicional se llama “flujo o escurrimiento plástico”. Si se aplica una carga de compresión a un miembro de concreto, se presenta un acortamiento inmediato o elástico. Si la carga permanece actuando durante largo tiempo el miembro continuará acortándose durante varios años y la deformación final será igual o aproximadamente 2 o 3 veces la deformación inicial. Generalmente el 75% del flujo plástico total ocurre durante el primer año.

#### **2.1.5.2.12 Resistencia al desgaste**

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste; por lo que el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión. La resistencia a la abrasión o desgaste está estrechamente vinculada con la resistencia a la compresión del concreto. Un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia baja. Una relación agua/cemento baja, y un curado adecuado son necesarios para una buena resistencia al desgaste. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento utilizado tienen fuerte influencia en la resistencia al desgaste. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando (Mehta y Monteiro, 1998).

Las relaciones bajas de agua-cemento son útiles para mantener la calidad de la resistencia al derrapamiento de las superficies de pavimentos de concreto.

Algunos agregados son más susceptibles que otros al desgaste, se debe tomar en cuenta la experiencia local en las áreas de tráfico pesado (Salazar, 2009).

#### **2.1.5.2.13 Resistencia a congelación y deshielo**

Los autores Mehta y Monteiro (1998), señalan que el concreto utilizado en pavimentos, se espera que tengan una vida larga y un mantenimiento bajo. Debe tener buena durabilidad para resistir condiciones de exposición anticipadas. El factor de intemperismo más destructivo es la congelación y el deshielo. El deterioro es provocado por el congelamiento del agua en la pasta, en las partículas del agregado o en ambos.

#### **2.1.5.2.14 Permeabilidad y Hermeticidad**

La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias. La hermeticidad se define como la capacidad del concreto de retener el agua sin escapes visibles. Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven más hermético. La permeabilidad del concreto al agua es una función de la pasta de cemento y la granulometría del agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto. La permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque recubre a todos los componentes del concreto y depende de la relación agua/cemento y del agregado. Las relaciones de agua/cemento bajas también reducen la segregación y el sangrado, contribuyendo adicionalmente a la hermeticidad. Para ser hermético, el concreto también debe estar libre de agrietamientos y cavidades (Mehta y Monteiro, 1998). Los mismos autores mencionan el ejemplo del concreto poroso, un concreto sin finos que permite fácilmente el flujo de agua a través de sí mismo; se diseña para aplicaciones

especiales, ha sido utilizado para pavimentos, estacionamientos y estructuras de drenaje.

#### **2.1.5.2.15 Estabilidad Volumétrica**

El concreto endurecido presenta ligeros cambios de volumen debido a variaciones en la temperatura, en la humedad y en los esfuerzos aplicados.

El concreto que se mantiene continuamente húmedo se dilatará ligeramente. Cuando se permite que seque, el concreto se contrae. El principal factor que influye en la magnitud de la contracción por secado es el contenido de agua del concreto recién mezclado. La contracción aumenta directamente con los incrementos de este contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de las cantidades de agregado empleado, las propiedades del agregado, tamaño y forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación, y tiempo (Mehta y Monteiro, 1998).

#### **2.1.6 Resistencia del concreto**

La resistencia es una propiedad del concreto que, casi siempre, es motivo de preocupación. Por lo general, se determina por la resistencia final de un cilindro en compresión; pero, en ocasiones por la capacidad de flexión o tensión. Como el concreto suele aumentar su resistencia en un periodo largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad (Kosmatka y Panarese, 1992).

Por otra parte, la existencia de vacíos es un parámetro que tiene una gran influencia en la resistencia del concreto y que puede ser relacionada con el

mecanismo de falla, para establecer esta relación se considera el concreto un material frágil, aunque presente una cantidad de acciones plásticas, ya que la fractura bajo cargas estáticas ocurre a una deformación moderadamente baja (Merritt *et al.*, 2001)

La resistencia que desarrolla el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales (Comisión Federal de Electricidad, sección 3, 1994)

#### **2.1.6.1 Resistencia a compresión.**

La resistencia mecánica del concreto se identifica con su resistencia a compresión, porque representa la condición de carga en que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos. Existe la ventaja de que la resistencia a compresión es la característica más fácil y confiablemente determinable en el concreto endurecido, aunque no es una propiedad tan precisamente definida debido a un cierto número de factores y condiciones que intervienen en su determinación.

La resistencia a compresión del concreto se efectúa mediante el ensaye de especímenes representativos, con tres finalidades principalmente:

- Comprobar si al diseñar una mezcla son adecuadas para cumplir con la resistencia del proyecto.
- Controlar la uniformidad de las resistencias y ajustarlas al nivel requerido.
- Verificar la resistencia del concreto en la estructura.

Los dos primeros casos, los especímenes se elaboran tomando muestras del concreto en estado fresco, el último caso los especímenes se obtienen del concreto ya endurecido en la estructura. (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

La resistencia a la compresión la defino como la medida universal máxima y la resistencia a carga axial medida en un espécimen de concreto y se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y estableciendo el símbolo  $f'c$ .

#### **2.1.6.2 Resistencia a flexión**

El concreto diseñado para pavimentos está concebido para que funcione adecuadamente frente a los esfuerzos de flexión al que están sometidos. Es por eso que se utiliza el módulo de ruptura y no la resistencia a la compresión, para la medición de su resistencia. En su elaboración se emplea cemento Portland, agregados seleccionados (tamaño y forma), agua y aditivos químicos (Huerta, 2005).

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tensión del concreto y puede ser definido como el esfuerzo máximo a tensión para que ocurra la ruptura durante un ensaye a flexión de una viga de concreto simplemente apoyada (Garnica *et al.*, 2002). Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Ruptura (MR). La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno.

Módulo de ruptura: Es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga (NMX-C-191-ONNCCE-2004).

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos. La resistencia a la compresión se utiliza como índice de la resistencia a la flexión, entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión (Kosmatka y Panarese, 1992).

Los diseñadores de pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland utilizan la teoría basada en la resistencia a la flexión, por lo tanto, es requerido en el diseño de la mezcla en el laboratorio, Se utiliza también el módulo de ruptura para el control de campo y de aceptación de los pavimentos; rara vez el ensayo a flexión es utilizado para el concreto estructural.

#### **2.1.6.3 Relación de resistencia de compresión a flexión.**

La resistencia a la flexión es proporcional a la resistencia a la compresión, mientras más grande sea la resistencia a la compresión, mayor será también la resistencia a la flexión y a pesar que existen correlaciones entre una y otra siempre será más recomendable el hacer pruebas de laboratorio para tener la mayor confiabilidad (Cemex Concretos, 2002).

De acuerdo con los materiales pétreos y el cemento que se use en la obra determinada, se puede ajustar la correlación; debido a que la prueba de tensión por flexión es más elaborada y consume mayor volumen de concreto, es posible realizar el control reduciendo el número de vigas y completar la verificación por medio de cilindros, para probarlos a la compresión (Olivera, 2004).

Las pruebas de resistencia a la flexión y módulos de elasticidad, pueden ser incómodas, consumidoras de tiempo y caras. Una prueba de resistencia de compresión es rápida, conveniente y una medida fácil de la resistencia de

materiales. La resistencia a compresión puede ser utilizada para estimar otras características del material tales como la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad (Garnica *et al.*, 2002).

En las obras es deseable usar pruebas de resistencia a la compresión como base de control de obra, se deberán hacer cilindros de compresión; estos deberán ser moldeados y curados y aprobados de acuerdo a la norma, para así establecer la relación entre la resistencia a la flexión y a la compresión (Olivera, 2004).

La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de  $1.99\sqrt{f'c}$  a  $2.65\sqrt{f'c}$  de la resistencia a compresión. El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente del 8 al 12 % de su resistencia a compresión (Kosmatka y Panarese, 1992).

Existen diversos modelos que relacionan la resistencia a compresión con la resistencia a flexión. Los modelos observados son convenientes para convertir datos de resistencia a compresión en resistencia a flexión obtenida para mezclas con componentes e historial de curado similares (Garnica *et al.*, 2002). De acuerdo a la tabla 2.11.

**Tabla 2.11 Modelos para relacionar la resistencia a la compresión con la resistencia a flexión.**

<b>Modelo</b>	<b>Fuente</b>
MR= $9.5(f'c)^{0.5}$ (esfuerzo en psi)	Modelo de la PCA (1985)

$MR = 0.62 (f'c)^{0.5}$ (esfuerzo en MPa)	ACI (1995)
$MR = 8.3 (f'c)^{0.5}$ (esfuerzo en psi)	Teychenne (1954)
$MR = 0.3 (f'c)^{0.66}$ (esfuerzo en MPa)	Comité Européen du Beton (1953)
$MR = k_2 (f'c)^{k_1}$ ( $k_2$ oscila de 3 a 6, $k_1$ de 0.3 a 0.8, esfuerzo en psi)	Neville (1951)
$MR = 8.3 / (4 + 12000/f'c)$ (esfuerzo en psi)	Zozen, et al. (1959)

*MR es la resistencia a la flexión del concreto en MPa o psi y  $f'c$  es la resistencia a la compresión del concreto en MPa o psi.*

Fuente: Garnica *et al.*, 2002.

La resistencia a la tensión del concreto es mucho menor que la resistencia a la compresión y, cualquiera que sea el tipo de prueba, tiene una correlación incorrecta con  $f'c$  (Merritt *et al.*, 2001).

### 2.1.7 Pavimentos

Las naciones aumentan su red de comunicaciones terrestres como indicador del grado de desarrollo de las mismas. Las vías terrestres se relacionan con la economía, la sociedad y la naturaleza. Las crecientes necesidades de desarrollo, la búsqueda de soluciones perdurables y la demanda de contar con más y mejores vialidades han contribuido para lograr que la modernización y ampliación de la red carretera en México y sus metrópolis, se especifique el uso de pavimentos del concreto con cemento Portland bajo estándares internacionales de calidad.

La capacidad de soporte de los pavimentos para carga pesada ha tenido un incremento del 50% respecto a lo previsto cuarenta años atrás (Celis, 2011). Cabe mencionar que los pavimentos deben ofrecer condiciones de rodamiento apropiado y confortable al volumen creciente de vehículos cada vez más rápidos y pesados.

El conocimiento y la interpretación adecuada de los factores que conllevan en la falla de los pavimentos, contribuye a un mejor aprendizaje de los mecanismos de deterioro de las distintas capas del pavimento. El conocimiento de las características físicas y mecánicas en las mezclas de concreto, establecen procedimientos eficientes de diseño, fabricación y colocación; que cumplan con las exigencias del tránsito actual.

Los pavimentos constituyen la parte principal de las carreteras, sirven y son el único contacto físico con el usuario y su condición o estado la afecta de diversas formas: económicamente, seguridad y escala social. Su condición impacta el desarrollo económico de un país o cierta área geográfica.

Los pavimentos son una estructura, que está conformada por diferentes capas de espesores de suelos, con propiedades diferentes.

#### **2.1.7.1 Definición de pavimento**

Un pavimento es una estructura con una capa o conjunto de capas de materiales adecuados, cuya función es proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, del intemperismo y de agentes perjudiciales, así como de transmitir adecuadamente los esfuerzos producidos a las capas inferiores. El pavimento es la superestructura de la obra vial. La estructura que lo constituyen; las características de los materiales empleados ofrecen gran variedad de posibilidades, que puede estar formado por una sola capa o de varias y dichas capas pueden ser de materiales seleccionados. Su superficie de rodamiento puede ser una carpeta asfáltica o una losa de concreto hidráulico.

En palabras de Covarrubias (1985), el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos por el proyecto. La estructura de los elementos que lo constituyen, las características de los materiales empleados en su construcción, ofrecen una gran variedad, que pueden estar formado por una sola capa o, más comúnmente, dichas capas pueden ser de materiales naturales seleccionados, sometidos a muy diversos tratamientos; su superficie de rodamiento puede ser una carpeta asfáltica, una losa de concreto. Así mismo dice el autor que el tránsito es la carga que ha de soportar el pavimento y cuyos efectos, junto con los climáticos, deben quedar en niveles no destructivos. El tránsito varía en intensidad y número de vehículos, en calidad y peso de los mismos y es una carga móvil, repetida, causante de esfuerzos, deformaciones y efectos poco conocidos, como la fatiga, el rebote elástico, etc.

Montejo (2008), enuncia que un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados.

Citando y de acuerdo con Matthew W. Witczak “ingeniería de pavimentos es el arte de utilizar materiales que no entendemos completamente, en formas que no podemos analizar con precisión, para que soporten cargas que no sabemos predecir, de tal forma que nadie sospeche de nuestra ignorancia”.

#### **2.1.7.2 Desempeño y evaluación de un pavimento**

El ingeniero dedica mayor atención técnica a las grandes autopistas que a los caminos modestos, sin considerar que se puede jugar con los espesores de las diferentes capas un mayor espesor de un material barato de peor calidad puede

substituir a un menor espesor de un material más costoso. Los límites de calidad a considerar varían de una capa a otra, de un clima a otro, de una topografía a otra.

La evaluación es esencial para una buena administración de pavimentos, ya que está íntimamente ligada con todas las fases:

- Inversión
- Diseño
- Construcción
- Mantenimiento e investigación

El desempeño de un pavimento es una función de su relativa habilidad para servir al tránsito sobre un periodo de tiempo. La habilidad para servir es determinada de manera subjetiva a través de inspecciones visuales y por la experiencia, y es difícil de transferir de una persona a otra, debido a que datos similares a menudo suelen ser inconsistentes.

Los factores económicos de costos, vida útil a considerar, condiciones de servicio que ameriten la reparación o reconstrucción constituyen un complejo trasfondo en todo el panorama de decisión conectado con el proyecto y la construcción de pavimentos.

El desempeño de un pavimento se determina mediante la evaluación de:

- Rugosidad
- Deterioro de la superficie
- Resistencia a la fricción

- Evaluación de la capacidad estructural

### **2.1.7.2.1 Rugosidad**

Es definida como una expresión de irregularidades en la superficie del pavimento que afecta la calidad de manejo de un vehículo.

### **2.1.7.2.2 Deterioros de la superficie**

Es cualquier indicación de lo pobre o desfavorable desempeño del pavimento o señales de inminente daño. Desempeño insatisfactorio del pavimento próximo a la fatiga. Las formas de deterioro pueden ser clasificadas en tres grupos:

- *Fractura*. Puede ser en la forma de agrietamiento o despostillamiento como resultado de cargas excesivas, fatiga, cambios térmicos, daños por humedad, derrapamiento o contracción.
- *Distorsión*. Se presenta en la forma de deformación, puede ser el resultado de cargas excesivas, desplazamientos, densificación, consolidación, ondulaciones y acción de ciclos de deshielo.
- *Desintegración*. Se presenta en forma de: pérdida de agregado, desprendimiento de agregado o despostillamiento, pérdida de adherencia, reactividad química, abrasión del tránsito, degradación de los agregados, deficiente compactación.

Los deterioros de la superficie están relacionados con la rugosidad y se deriva como una señal de problemas estructurales.

### **2.1.7.2.3 Resistencia a la fricción**

La resistencia a la fricción es la fuerza desarrollada cuando una llanta que es impedida de rotar es deslizada a lo largo de la superficie del pavimento. La resistencia a la fricción depende de la microtextura y macrotextura de una superficie del pavimento.

La AASHTO (1976), dice que la microtextura se refiere a la escala pequeña de la textura del componente del agregado del pavimento y la macrotextura se refiere a la escala grande del pavimento como un todo adecuado a la disposición de la partícula del agregado.

### **2.1.7.2.4 Evaluación de la capacidad estructural**

Según la metodología de la AASHTO. El nuevo Sistema de Evaluación de Pavimentos toma como medida obligatoria el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), medida con aparatos o equipos apropiados, este valor se puede modificar de acuerdo al usuario hacia abajo si se quiere ser muy estricto o hacia arriba si se desea ser más tolerante.

### **2.1.7.3 Tipos de pavimento**

Los pavimentos se definen en función de los materiales que está constituido y su estructuración, es por eso que se dividen en:

- Pavimento flexible.
- Pavimento rígido o de concreto con cemento Portland.

- Pavimento combinado o mixto.
- Pavimento articulado.

En este sentido, es sobresaliente resaltar que de un modo bastante arbitrario y con fines fundamentalmente prácticos, dividir los pavimentos en flexibles y rígidos, no son del todo adecuados. No obstante, no hay que olvidar que la rigidez o flexibilidad que un pavimento ostenta, y no es fácil de definir tan adecuadamente como para permitir una diferencia precisa entre uno y otro; es hasta cierto punto materia de juicio al precisar que tan rígido puede ser un pavimento flexible o que tan flexible puede llegar a ser un pavimento rígido. Los pavimentos se diferencian y definen en términos de los materiales de que están constituidos y como se estructuran esos materiales y no por la forma de cómo distribuyen los esfuerzos y las deformaciones producidas por los vehículos a las capas inferiores, lo que constituiría un criterio de clasificación más acertado.

Covarrubias (1985), concluye que los términos empleados para distinguir un pavimento de otro no son del todo adecuados, su uso ha sido tan ampliamente difundido que se considera conveniente conservarlos.

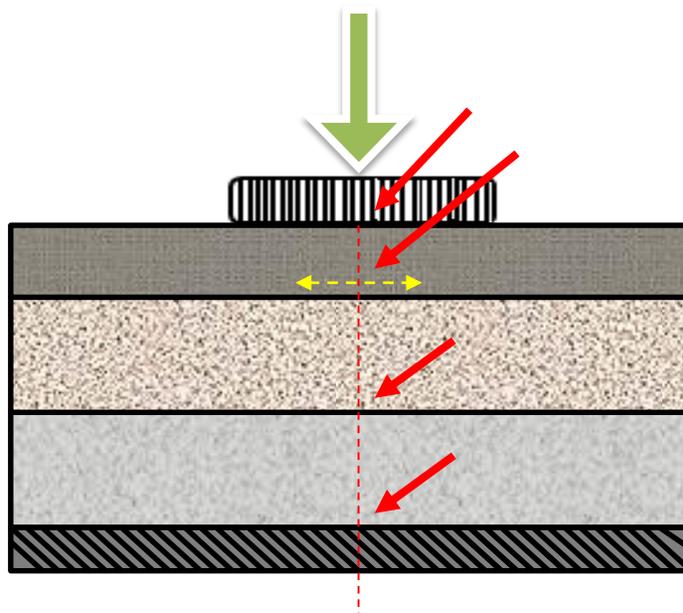
#### **2.1.7.3.1 Pavimento flexible**

Los pavimentos flexibles comúnmente llamados así porque deben ser capaces de soportar un claro nivel de deformación elástica sin romperse. Zarate (2003) define, a los pavimentos flexibles que están formados por capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones de las cargas vehiculares transmitidas desde la superficie. Cuentan con una capa de rodamiento constituida por mezcla asfáltica, por los que también se les denomina pavimentos asfálticos.

Por su parte Crespo (2002), menciona que los pavimentos flexibles presentan poca resistencia a la flexión y deben de estar constituidos de tal manera que las cargas que sobre él se apliquen no provoquen deformaciones permanentes y perjudiciales (Figura 2.1). Un pavimento flexible o de asfalto debe tener el espesor necesario para soportar y distribuir las cargas del tránsito.

Olivera (2004), escribe sobre los pavimentos flexibles, que una carpeta asfáltica proporciona la superficie de rodamiento; las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores se distribuyen por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales; las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y sub-base, se construyen sobre la capa subrasante. El tránsito es la carga que ha de soportar el pavimento y cuyos efectos, junto con los ambientales, deben ser niveles no destructivos. El tránsito varía en intensidad y número de vehículos, en calidad y peso de los mismos y es una carga móvil, repetida, causante de esfuerzos transitorios, deformaciones transitorias y permanentes, de efectos especiales relativamente poco conocidos, como la fatiga, el rebote elástico, etc.

Un pavimento puede definirse como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendida(s) entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, a la del intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito. En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos en el proyecto (Rico y Del Castillo, 1990).

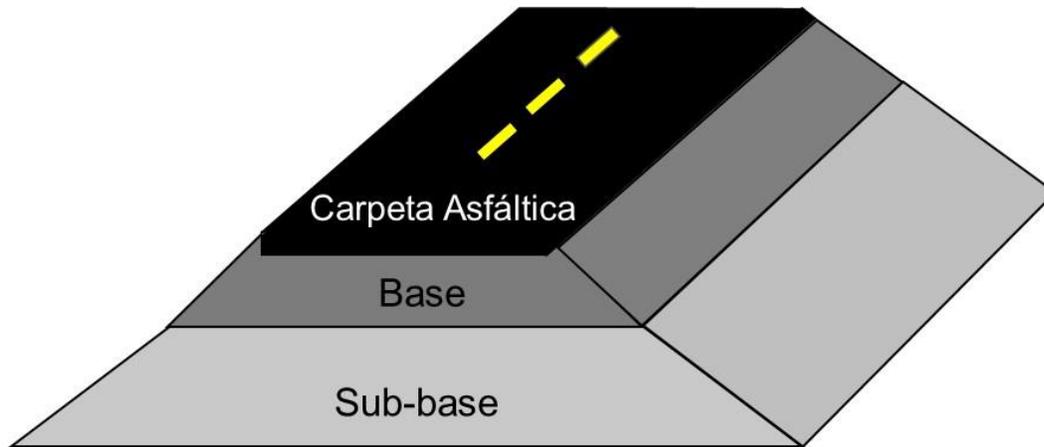


Fuente: Sánchez, 2005.

- a) Deformación por compresión = Deformación de la carpeta asfáltica.
- b) Deformación por tensión = Agrietamiento por fatiga en las carpeta asfáltica.
- c) Deformación por compresión = Deformación de la base y sub-base granular.
- d) Deformación por compresión = Deformación en la subrasante.

Figura 2.1 Mecanismo de funcionamiento de un pavimento flexible

Montejo (2008), escribe que el pavimento flexible es el tipo de pavimentos que está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base (Figura 2.2).



Fuente: Sánchez, 2005.

Figura 2.2 Estructura de un pavimento flexible

Las siguientes pueden considerarse las características fundamentales de un pavimento flexible, considerado como conjunto (tabla 2.12):

**Tabla 2.12 Características fundamentales de un pavimento flexible**

<b>La resistencia estructural</b>	La primera condición que debe cumplir un pavimento es soportar las cargas impuestas por el tránsito dentro del nivel de deterioro y paulatina destrucción previstos por el proyecto.
<b>La deformabilidad</b>	Las deformaciones excesivas están asociadas a estados de falla y un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.
<b>Capas de transición</b>	Deben impedir la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y también actuar como filtro de la base,

	impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen y perjudiquen su calidad.
<b>Drenaje</b>	Afecta la seguridad de los usuarios, puede dañar la carpeta asfáltica e inclusive capas inferiores.
<b>La durabilidad</b>	Las incertidumbres prácticas ligadas a la durabilidad de un pavimento son grandes y difíciles de tratar. Está ligada a una serie de factores económicos y sociales. Los pavimentos pueden estar expuestos a circunstancias extraordinarias, como lluvia, inundaciones o terremotos.
<b>El costo</b>	Los pavimentos flexibles requieren una menor inversión inicial, pero una conservación más costosa.
<b>Los requerimientos de conservación</b>	Los pavimentos sufren falta de conservación sistemática, con lo que su vida se acorta imprevisiblemente.
<b>La comodidad</b>	Dentro de este requisito se ve afectado la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto.

Fuente: Rico y Del Castillo (1990).

#### 2.1.7.3.1.1 Funciones de un pavimento flexible

##### **Carpeta asfáltica:**

- Proporcionar una superficie de rodamiento cómoda y segura, en todo tiempo.
- Soportar las cargas y transmitir las adecuadamente a la base.
- Servir como capa impermeable, constituyendo una protección para la base.

**Base:**

- Soportar los esfuerzos impuestos por las cargas aplicadas en la superficie del pavimento y distribuirlos adecuadamente, de manera que las capas inferiores puedan resistir.
- Proporcionar subdrenaje al pavimento.

**Sub-base:**

- Sus funciones son similares a las de la base.
- Abaratar los costos de la base.

**2.1.7.3.1.2 Ventajas de los pavimentos flexibles****Las ventajas de los pavimentos flexibles son:**

- Menor costo de construcción.
- Mayor comodidad en el tránsito.
- Es posible lograr acabados muy tersos.
- Resistencia al derrapamiento y drenaje superficial.
- Reutilización de mezclas asfálticas.

### **2.1.7.3.2 Pavimento rígido o de concreto con cemento Portland**

El pavimento rígido es utilizado en el mundo entero como sinónimo de desarrollo y progreso por las muchas ventajas que este ofrece sobre otros métodos de pavimentación. Los pavimentos de concreto han demostrado ser una solución duradera, económica y apropiada en la ejecución de obras tanto de nuevas vías como en la rehabilitación de obras de las vías existentes (Cemex Concretos, 1993).

En los Estados Unidos de Norteamérica, aún existe la primera calle que fue pavimentada con concreto en 1891, en Bellefontaine, Ohio (Celis, 2011).

En 1925, el gobierno de México creó la Comisión Nacional de Caminos presidida por el Ing. León Salinas, en las primeras carreteras auspiciadas por la citada Comisión fueron proyectadas por la compañía Byrne Brothers Construction, de Chicago, empresa que contrato a ingenieros mexicanos. En la Ciudad de México tenemos uno de los casos excepcionales de construcción de una carretera de concreto en la primera mitad del siglo XX: la que atraviesa el Parque Nacional del Desierto de los Leones, misma que fue inaugurada en la década de los treinta y que sigue brindando un excelente servicio (Celis, 2011).

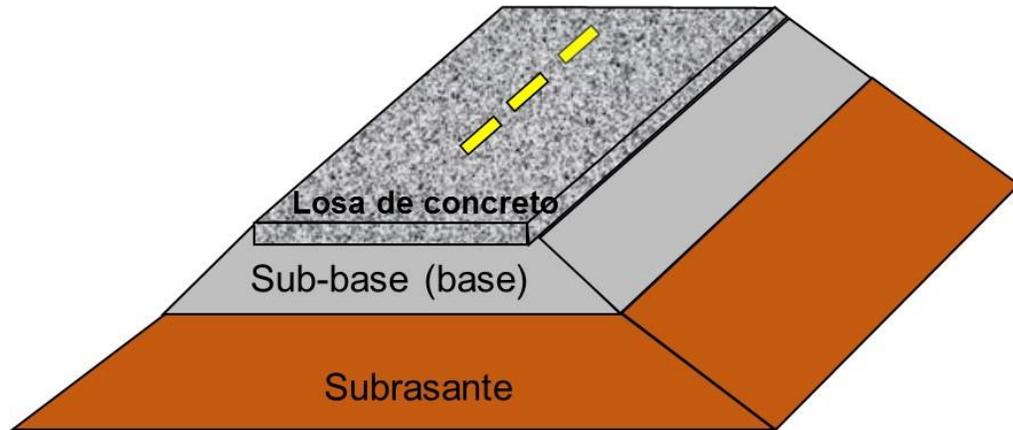
En México hasta 1993, la especificación y construcción de pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland para carreteras es relativamente escaso. Se considera que esto se debió principalmente a que nuestro país siendo un importante productor de petróleo y por consiguiente de asfalto con subsidio al precio del asfalto, los pavimentos asfálticos resultaban en costo muy inferiores a los rígidos o de concreto con cemento Portland. Adicionalmente existía una gran desinformación y desconocimiento sobre el diseño y construcción con nuevas tecnologías de los concretos para pavimentos. Otro factor importante es que cuando se diseñaron los caminos de México para el tránsito que se pensaba tenían que soportar, los

pavimentos de asfalto parecían ser una alternativa suficiente. En ese mismo año, la SCT con el apoyo de Cementos Mexicanos construyó la primera carretera de concreto hidráulico en el libramiento Ticumán con una longitud de 8.5 km, utilizando especificaciones internacionales y nuevas tecnologías de pavimentación, siguiendo estrictas normas de calidad tanto en la producción como en el tendido del concreto y contemplando una serie de alternativas en las especificaciones que permitirían establecer posteriormente situaciones comparativas que permitirían establecer adecuadamente las características ideales en las especificaciones de los pavimentos de concreto hidráulico.

Un pavimento rígido distribuye las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Este pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que presente la falla estructural (Olivera, 2004).

Las carreteras así como cualquier tipo de vía de comunicación exigen cubrir altos volúmenes de tránsito, así como resistir las cargas pesadas. Por este motivo los pavimentos rígidos se vuelven una alternativa en la era de la modernización (Salazar, 2009).

Los pavimentos rígidos están formados por una losa de concreto hidráulico y la sub-base (base) que sirve de apoyo y se construye sobre la capa subrasante (Figura 2.3), (Olivera, 2004). La capa sub-base eventualmente se le denomina base, por su posición inmediatamente bajo la losa. Sin embargo, se le designa como sub-base debido a que en general los requerimientos de calidad de los materiales no son tan estrictos como los de una base en un pavimento flexible (Zarate *et al.*, 2002).



Fuente: Sánchez, 2005

Figura 2.3 Estructura típica de un pavimento rígido

Desde su surgimiento hasta la actualidad, los pavimentos de concreto hidráulico, se han transformado, con el objetivo de mejorar su comportamiento y consolidarlos como las estructuras de mayor ciclo de vida y conservación (Lepe, 1977).

El comportamiento de los pavimentos de concreto depende del diseño de la estructura, de la composición y de la calidad de los materiales que constituyen el concreto, del cuidado con el que es colado, consolidado y terminado y de su correcto curado. La importancia de esta área se explica por los altos costos que implican, las actividades de rehabilitación y reconstrucción de pavimentos. Todavía no se ha desarrollado ningún proyecto e investigación para mejorar el entendimiento del comportamiento de los pavimentos a largo plazo desde la realización del tramo experimental AASHO en 1960.

La inversión en pavimentos de concreto se debe analizar por su durabilidad, ya que en su conservación y mantenimiento se encuentra la bondad y el beneficio de la inversión inicial (Salazar, 2009).

El pavimento rígido o de concreto con cemento Portland se ve afectado por los esfuerzos al contraerse o expandirse por cambios de temperatura. Para su diseño se consideran parámetros como: volumen; tipo y peso de los vehículos; resistencia al concreto y condiciones climáticas.

Los impactos ambientales generados por la construcción y conservación de superficies de rodamiento en pavimentos rígidos son bajos, ya que no emplean ni se generan sustancias tóxicas (Garnica *et al.*, 2002).

Cuando los niveles de tránsito empiezan a tener importancia se hace inevitable tomar en cuenta la losa de concreto que cumpla con las siguientes características:

- Ser estable ante los agentes de intemperismo.
- Ser resistente a la acción de cargas impuestas por el tránsito.
- Tener textura apropiada al rodamiento.
- Ser durable.
- Tener condiciones adecuadas en lo referente a la permeabilidad.
- Ser económica

Una patología común en los pavimentos rígidos es el asentamiento plástico, se caracteriza por el agrietamiento superficial del pavimento.

Los esfuerzos provocados por los cambios de temperatura pueden causar agrietamientos, especialmente en edades tempranas. Las grietas por contracción

en los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland ocurren debido a restricciones. La contracción por secado siempre es mayor cerca de la superficie del concreto; las causas de restricción son el acero de refuerzo en el concreto, las partes de una estructura interconectadas entre sí, y la fricción de la subrasante sobre la cual va colocado el concreto.

Las fallas en los pavimentos rígidos se deben a dos causas principales. La primera es deficiencia de la propia losa y comprende defectos del concreto, tales como utilización de materiales y agregados no adecuados, desintegración por reacción de los agregados con los álcalis del cemento, problemas derivados del uso de sales para proteger al concreto de los fríos extremos en zonas de clima severo, y por otro lado, defectos de construcción o de insuficiencia estructural en la losa.

Las juntas son el método más efectivo para controlar agrietamientos. Si una extensión considerable de concreto (una pared, losa de pavimento) no contiene juntas convenientemente espaciadas que alivien la contracción por secado y por temperatura, el concreto se agrietara de manera aleatoria.

Actualmente, existen materiales muy diversos para la fabricación de pavimento rígido o de concreto con cemento Portland, desde mezclas con un revenimiento muy bajo compactadas con rodillo vibratorio hasta concretos muy fluidos con revenimientos altos.

### **2.1.7.3.2.1 Funciones de un pavimento rígido o de concreto con cemento Portland**

Las funciones que desempeña cada uno de los elementos estructurales de un pavimento de concreto deben estar en completa armonía para cumplir con el objetivo que cada capa tiene (Garnica *et al.*, 2002)

#### **Losa de concreto:**

- Proporcionar una superficie de rodamiento segura y cómoda.
- Soportar las cargas aplicadas por el tránsito y transmitir a la capa de apoyo esfuerzos cuya magnitud no exceda su capacidad de soporte.
- Resiste los efectos abrasivos del tránsito.
- Impedir la penetración del agua superficial.
- Propiedades de deflexión luminosa, importante para la conducción nocturna.
- Desagüe superficial rápido para limitar el espesor de la película de agua.

#### **Sub-base (base):**

- Proporcionar a la losa una superficie de apoyo continuo y resistente.
- Prevenir el fenómeno del bombeo.
- No cubre funciones de tipo estructural
- Facilitar la construcción de la losa.
- Proporcionar subdrenaje al pavimento.

- Reduce los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores.
- Ayuda a controlar los cambios volumétricos de la subrasante e incrementa su módulo de reacción.
- Reduce la expansión diferencial excesiva por congelamiento.

### **Subrasante:**

- Constituye la capa superior de la terracería.
- Absorber las cargas que le transmiten la sub-base (base) y transmitir las a un nivel adecuado al cuerpo del terraplén.
- Absorber cambios volumétricos de las capas inferiores.
- Constituye el elemento de apoyo del pavimento.
- Resiste los esfuerzos transmitidos, en condiciones severas de humedad.

### **Cuerpo del terraplén:**

- Proporciona los niveles que requiere la estructura.
- Es de espesor variable y en muchos casos se construye con material del terreno natural.
- Resiste las cargas del tránsito transmitidas por las capas superiores y distribuir los esfuerzos.

#### **2.1.7.3.2.2 Tipos de pavimentos de concreto con cemento Portland**

Los tipos de pavimento rígido o de concreto con cemento Portland se dividen en los siguientes tipos:

##### **2.1.7.3.2.2.1 Losas de concreto simple vibrado**

Son los pavimentos más comúnmente empleados y están constituidos por concreto hidráulico vibrado en masa, divididos mediante juntas longitudinales y transversales para formar elementos cuadrados.

##### **2.1.7.3.2.2.2 Losas de concreto reforzado**

Cuentan con un refuerzo metálico a base de malla de alambre electrosoldado o de varilla corrugada, colocada preferentemente en el tercio superior del espesor de la losa. Su costo es muy elevado, se utiliza ampliamente en autopistas con tránsito muy pesado, donde se desea una conservación prácticamente nula. El refuerzo proporcionado puede reducir ligeramente el espesor del pavimento.

##### **2.1.7.3.2.2.3 Losas de concreto presforzado y postensado**

Existen varios sistemas de presfuerzo y postensado con el propósito de llegar a soluciones de pavimentos de espesor reducido, gran elasticidad y capacidad de soporte, y reducción de juntas. Sin embargo los esfuerzos para desarrollar esta técnica, han presentado más dificultades que ventajas. Tiene más aplicación en aeropuertos tanto en pistas como en plataformas.

#### **2.1.7.3.2.2.4 Losas de concreto fibroso**

Son losas que el armado consiste en fibras de acero, de productos plásticos, o de fibra de vidrio, se obtienen ventajas como el aumento de resistencia a la tensión y fatiga, fisuración controlada, resistencia al impacto y durabilidad. Puede resultar atractivo su uso en ciertos casos, a pesar de su costo. La dispersión al azar de fibras de acero produce un material que se comporta como un material dúctil. El grado de mejoramiento está regido por la cantidad y forma (longitud y diámetro) de las fibras incorporadas. La proporción óptima y las dimensiones de las fibras varían dependiendo de su aplicación.

Con la incorporación de fibras de acero sus propiedades y características mejoran como son: resistencia al esfuerzo y choques térmicos, resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, resistencia al esfuerzo cortante y resistencia a la tensión. Las propiedades del concreto no se modifican significativamente por la incorporación de fibras como es el coeficiente de dilatación y el módulo de elasticidad. La alta resistencia a la flexión y el límite de fatiga del concreto con fibra lo constituyen como el material ideal para la construcción de pavimentos.

#### **2.1.7.3.2.2.5 Losas de concreto compactado con rodillo**

Es un concreto hidráulico con bajo contenido de agua, aunque su contenido de cemento es similar al concreto vibrado. Puede colocarse con extendedoras de concreto asfáltico y debe compactarse enérgicamente con rodillos vibratorios y neumáticos.

#### **2.1.7.3.2.2.6 Sobrelosas de concreto hidráulico**

Consiste en una aplicación en la rehabilitación de pavimentos, para prolongar su vida de servicio, actuando como refuerzo estructural y proporcionando una adecuada superficie de rodamiento. Se presenta en los siguientes casos:

- Construidas directamente sobre un pavimento rígido existente trabajando monolíticamente.
- Construidas sobre un pavimento rígido existente, con una capa separadora intermedia.
- Construidas sobre un pavimento flexible existente.

#### **2.1.7.3.2.3 Esfuerzos en pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland**

Escribe Olivera (2004) que el espesor de las losas se calcula por medio de nomogramas que elaboran las asociaciones de productores de cemento Portland, tomando en cuenta los esfuerzos siguientes a que están sometidas:

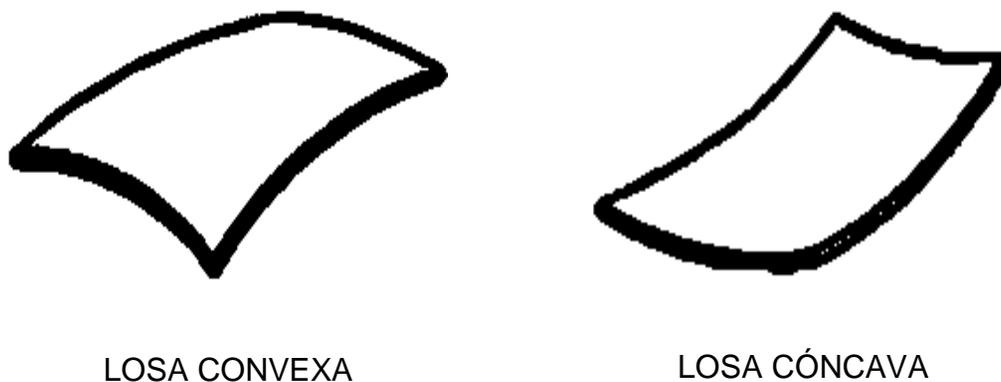
- Esfuerzos debidos al tránsito.
- Esfuerzos debido a la temperatura.
- Esfuerzos debidos al apoyo.

### 2.1.7.3.2.3.1 Esfuerzos debido al tránsito.

Los esfuerzos debidos al tránsito se han estudiado en tres posiciones de las llantas. La primera se da cuando la huella de una llanta es tangente en forma simultánea a dos orillas; o sea, la llanta está en una esquina. La siguiente posición estudiada se presenta cuando la huella de la llanta es tangente sólo a una orilla de la losa. Por último, los esfuerzos de la losa de concreto hidráulico cuando la llanta está en el centro de ella.

### 2.1.7.3.2.3.2 Esfuerzos debido a la temperatura.

Dice Crespo (2002), que no solo las cargas producen esfuerzos en las losas de concreto hidráulico, también, el combado debido a cambios de temperatura. Cuando en la parte superior de una losa de concreto hidráulico está a una temperatura más alta que la parte inferior la losa tiende a ponerse convexa. Si el gradiente de temperatura es inverso, se pone cóncava y las esquinas pueden separarse de la capa que los soporta (Figura 2.4).



Fuente: Crespo V. C., 2002.

Figura 2.4 Efectos de la temperatura en las losas de concreto con Cemento Portland

Escribe Olivera (2004), cuando la temperatura es igual en la parte superior y en la parte inferior de la losa, se presentan los fenómenos de dilatación y contracción; pero si se encuentra en forma simultánea a diferentes temperaturas, hay un gradiente que provoca la presencia de alabeos.

### 2.1.7.3.2.3.3 Esfuerzos debido al apoyo

Dice Olivera (2004), que los esfuerzos debidos al apoyo pueden resultar de la fricción desarrollada entre la losa y la sub-base, y se presentan al disminuir la libertad de movimiento de la losa, y haber esfuerzos de tensión. Se pueden desarrollar esfuerzos en la losa cuando hay expansiones diferenciales en las capas de apoyo. Se evitan con materiales de baja plasticidad y lo más homogéneos posible; además, el peso de la losa y de la sub-base también ayudan a tener menores expansiones de las terracerías. Los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland están sujetos a los esfuerzos que se muestran en la tabla 2.13.

**Tabla 2.13 Esfuerzos en pavimentos rígidos**

<b>Esfuerzo</b>	<b>Causa</b>
Esfuerzos abrasivos	Llanta de los vehículos.
Esfuerzos de compresión y cortante	Cargas de las ruedas.
Esfuerzos de compresión y tensión	Deflexión de las losas bajo cargas de las ruedas.
	Expansión y contracción del concreto.
	Combadura del pavimento por efectos de los cambios de temperatura.

Fuente: Crespo V. C., 2002.

#### **2.1.7.3.2.4 Ventajas de los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland**

Se pensaba que construir un pavimento rígido, representaba largos tiempos de ejecución, en México se cuenta con distintas alternativas de pavimentación que cubren las necesidades específicas de la población, brindando seguridad, comodidad y ahorros importantes en costos de mantenimiento (Cemex Concretos, 1993).

##### **Las ventajas de los pavimentos rígidos son:**

- Tienen mayor duración que los de asfalto.
- La superficie no se deforma ni con calor, ni con el paso o frenado de vehículos.
- Los vehículos de carga pesada consumen menos combustible.
- Mejoran la visión nocturna.
- Requiere menor estructura de soporte.
- Requieren un mantenimiento mínimo.
- Mayor vida útil.

#### **2.1.7.3.2.5 Juntas en los pavimentos rígidos**

Los sistemas adecuados de junteo para pavimentos de concreto aseguran la capacidad estructural y calidad de conducción, la losa de pavimento está restringida por la base y su propio peso. Los cambios en la humedad y volumétricos en la base, así como el bombeo (eyección de agua y materiales) ocasionan esfuerzos

adicionales que producen agrietamiento. Para minimizar y controlar estos problemas se utilizan juntas longitudinales y transversales.

El requisito de construir juntas en los pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland evita la presencia de grietas a intervalos bastante irregulares debido a la contracción y dilatación del concreto. Las juntas son puntos débiles de la superficie de rodamiento, pueden presentar desperfectos debido al aumento del tránsito. Ocasionando despostillarse provocando aumento en los costos de conservación.

#### **2.1.7.3.2.5.1 Tipos de juntas**

##### **2.1.7.3.2.5.1.1 Juntas longitudinales**

Son aquellas que se construyen paralelas al eje del camino con el fin de permitir los movimientos relativos de las diversas losas. La cantidad de juntas longitudinales depende del ancho de la corona, en forma tal que ellas dividan a la corona en el número de vías necesarias para la circulación. Las juntas longitudinales son proyectadas y construidas de diferente manera, es muy común emplear el tipo macho y hembra (Huerta, 2002).

##### **2.1.7.3.2.5.1.2 Juntas transversales**

Tienen por objeto el evitar el agrietamiento debido a esfuerzo por la contracción y alabeo de las losas. Son de varias clases: de contracción, de construcción y de dilatación (Huerta, 2002).

#### **2.1.7.3.2.5.1.3 Juntas de contracción**

Las juntas transversales de contracción evitan los esfuerzos debidos a la disminución de volumen. Su función es aliviar los efectos de tensión debido a la contracción y alabeo del concreto, el concreto en los pavimentos no se expande a un volumen mayor que cuando se coloca, estas juntas pueden absorber los movimientos requeridos (Huerta, 2002).

#### **2.1.7.3.2.5.1.4 Juntas de Construcción**

Las juntas de construcción de extremo anclado son más comunes con transferencia de carga a lo largo de la junta. Se utilizan en interrupciones planeadas o no planeadas en la construcción, como al término del colado del día. Las cuñas no ancladas originan muchas fallas y por lo tanto no son recomendadas para su uso en pavimentos de carreteras o aeropuertos (Huerta, 2002).

#### **2.1.7.3.2.5.1.5 Juntas de Dilatación o Aislamiento**

Se construyen con un espacio a través del espesor de la losa para permitir el movimiento. Estas juntas no se usan en pavimentos de líneas principales. Las juntas de aislamiento se usan en estructuras fijas, como registros y coladeras de drenaje, y en intersecciones. La suficiencia estructural, es determinada por su mecanismo de transferencia, si cuenta con una transferencia de carga adecuada, la deflexión de las losas es minimizada, y la acción de bombeo reducida. Para pavimentos de aeropuertos, las juntas deberán colocarse entre losas de concreto nuevo y el viejo, y entre formas diferentes de pavimentos (Huerta, 2002).

#### **2.1.7.3.2.5.1.6 Juntas especiales**

Los estacionamientos son tratados como un caso especial de pavimentos de concreto junto con los pisos debido al tránsito pesado, funcionan en forma similar a los pavimentos sin embargo existen diferencias importantes. Los estacionamientos de concreto se construyen para servir a un tipo especial de vehículos, más que una amplia gama de tráfico. El espaciado adecuado de las juntas en los estacionamientos depende del espesor del pavimento, la resistencia del concreto, las propiedades del agregado, las condiciones climáticas y la utilización de refuerzo. Las juntas cercanamente espaciadas generan aberturas de juntas más pequeñas y en un engranaje del agregado incrementado entre los paneles (Huerta, 2002).

#### **2.1.7.3.2.6 Fallas en los pavimentos rígidos**

Las fallas en los pavimentos rígidos se deben a dos causas principales. La primera a deficiencias de la propia losa y comprende los defectos del concreto, tales como utilización de materiales y agregados no adecuados, desintegración por reacción de los agregados con los álcalis del cemento, problemas derivados del uso de sales para proteger al concreto de los fríos extremos en zonas de clima severo; y por otra parte por los defectos de construcción o de insuficiencia estructural en la losa, como colocación y falta de elementos de transmisión de carga, insuficiente resistencia de restricciones de fricción a los movimientos de la losa por la sub-base, alabeo de las losas o mal comportamiento de las juntas de contracción y expansión (Covarrubias, 1985).

Otra causa de falla es el inadecuado comportamiento estructural del conjunto losa, sub-base, subrasante y terracería. De este tipo son las fallas por bombeo, la distorsión general, la ruptura de esquinas, falta de apoyos necesarios y otras del mismo estilo.

El fracturamiento por fatiga es extenso y suele ser considerado como el mayor o único criterio para el diseño de pavimentos de concreto, recientemente sólo se han considerado bombeo y erosión (Garnica *et al.*, 2002).

Es importante tener siempre presente que con el nivel tecnológico más elevado posible si se continúa con las soluciones baratas, los pavimentos quedan menos protegidos y forman parte de costos elevados de reparación.

#### **2.1.7.3.2.6.1 Fallas por fracturamiento por fatiga.**

El fracturamiento por fatiga es causado probablemente por los esfuerzos que se inducen en el borde y en la mitad de la losa. El número permisible de repeticiones de carga para causar el fracturamiento por fatiga depende de la relación de esfuerzos entre el esfuerzo a flexo-tensión y el módulo de ruptura del concreto (Garnica *et al.*, 2002).

#### **2.1.7.3.2.6.2 Fallas por bombeo o erosión**

La deformación permanente no es considerada en el diseño de pavimentos de concreto, la deformación resiliente bajo cargas por rueda repetida induce al bombeo en las losas de concreto (Garnica *et al.*, 2002).

#### **2.1.7.3.2.6.3 Otras fallas**

Otros tipos de deterioros en los pavimentos de concreto incluye la falta de transferencia de carga y deterioro en las juntas. Estos son difíciles de analizar

mecánicamente y un gran esfuerzo se ha llevado a cabo desarrollando un modelo de regresión para predecirlos (Garnica *et al.*, 2002).

#### **2.1.7.3.2.7 Construcción de pavimentos**

Un pavimento de concreto, construido, cumpliendo con especificaciones prácticamente no tienen costos adicionales de conservación durante su vida de proyecto. De esta manera estableciendo métodos adecuados de trabajo para pavimentos de concreto, se obtendrá resultados óptimos de calidad, costos y duración.

##### **2.1.7.3.2.7.1 Colado del concreto**

El equipo de colocación, tiene que ser apto para depositar el concreto a su posición final con un mínimo de segregación y sin dañar la sub-base (García y Huerta, 2004).

##### **2.1.7.3.2.7.2 Compactación**

Se logra mediante el uso de vibradores de alta frecuencia. Se colocan sobre una barra con separación de 75 cm. centro a centro a todo el ancho de la losa de concreto, y trabajan cuando están sumergidos en el concreto, y nunca fuera de él (Neville, 1999).

#### **2.1.7.3.2.7.3 Comprobación de superficie**

Al dar el acabado superficial se procede a comprobar si la superficie está dentro de tolerancia en niveles. Esto se hace colocando una regla metálica en el sentido longitudinal de la losa observando depresiones, cabe mencionar que este procedimiento no ofrece la seguridad de obtener resultados satisfactorios en el perfil de la losa. Es preferible usar el perfilógrafo que puede dar un resultado de perfil más exacto y corregir el tendido y acabado del concreto ajustando la máquina pavimentadora (Salazar, 2011).

#### **2.1.7.3.2.7.4 Acabado superficial.**

El objetivo del acabado es el de lograr una superficie antiderrapante. Se acostumbra dar un acabado superficial con llana de madera, y no debe usarse ya que cualquier trabajo hecho a mano deforma la superficie dejando mayores depresiones, es preferible en todo caso no usar ningún acabado adicional superficial y dejarlo tal como lo deja la máquina acabadora (Salazar, 2011).

#### **2.1.7.3.2.7.5 Curado del concreto**

Una vez desaparecida la película de humedad sobre el pavimento fresco, la superficie deberá ser cubierta con una membrana de curado. Su aplicación deberá ser con un espesor y textura uniforme, en las laterales de la losa deberá aplicarse una capa antes de que transcurra una hora de haber retirado la cimbra (Salazar, 2011).

### 2.1.7.3.2.7.6 Cimbra

Deberá permanecer en su lugar de 6 a 8 horas después del colado. Se pueden tener variaciones de acuerdo con las condiciones de temperatura, humedad, y viento. Al remover la, hay que tener mucho cuidado en no dañar las esquinas de la losa (Salazar, 2011).

### 2.1.7.3.2.7.7 Defectos de construcción de pavimentos

Las falla en los pavimentos rígidos pueden deberse a dos causas principales. La primera se refiere a deficiencias de la propia losa y comprende por un lado defectos de concreto y por otro lado defectos de construcción o de insuficiencia estructural. La otra causa principal de falla se refiere al inadecuado comportamiento estructural del conjunto losa, sub-base subrasante (Rico y Del Castillo, 1990). Los defectos más comunes se muestran en la tabla 2.14.

**Tabla 2.14 Defectos de construcción en pavimentos rígidos o de concreto con cemento Portland.**

<b>Revenimiento</b>	Los revenimientos bajos, es muy difícil colocar el concreto, retrasando el avance, además no se consigue tener suficientes finos en la superficie por lo que el acabado queda defectuoso y generalmente fuera de especificaciones en niveles terminados. Pasando a los revenimientos altos pueden causar agrietamientos indeseables, se corre el peligro de bajas resistencias. Es preferible desechar estos concretos por estar fuera de especificaciones (Neville, 1999).
---------------------	---

<p><b>Colocación</b></p>	<p>Cuando se coloca el concreto con volumen escaso habrá que rellenarlo después del vibrado profundo, manualmente y distribuirlo provocando retrasos en la obra. Por otra parte cuando se coloca exceso de concreto se tiene que retirar el volumen, esta operación dificulta la colocación debido a que el concreto ya se encuentra vibrado, estando en forma densa y compacta. En los dos casos habrá que tener especial cuidado de colocar el concreto en cantidad exacta para evitar esta clase de problema (García y Huerta, 2004).</p>
<p><b>Deterioro del concreto</b></p>	<p>Salazar (2009), dice que el contratista debe proteger el pavimento del tráfico público y del tráfico causado por sus propios empleados y agentes. Cualquier daño en el pavimento que ocurra previo a la apertura al público, se deberá reparar o remplazar. Debe evitarse aplastar el concreto fresco cuando está terminado de colar, para lo cual se deben tener, en la obra, plataformas de trabajo.</p>
<p><b>Deficiencia en la cimbra</b></p>	<p>Salazar (2009), afirma que se deben emplear cimbras que sean capaces de soportar las cargas a las que se someterán por el equipo de construcción. Es esencial que la cimentación en donde se apoyarán las cimbras, se compacte y se nivele de manera que cuando se coloquen las cimbras, estas se apoyen uniformemente en toda su longitud y a la altura adecuada. Las cimbras deben ser colocadas con suficiente anticipación a la colocación del concreto de manera que permitan su revisión. Las cimbras deben permanecer en su lugar por lo menos 8 horas después de la colocación del concreto. Por consiguiente el problema es por el aspecto de las losas. Se corrige recortando con discos (diamante) alineando las juntas de concreto, pero es una operación muy costosa.</p>
<p><b>Lluvias inesperadas</b></p>	<p>La lluvia puede deslavar la capa terminada o dejar huellas de gotas, dando mal aspecto, aunque no afecte considerablemente la resistencia del concreto. Otra preocupación es suspender el colado y colocar una junta de construcción. Por otra parte Salazar (2009) sugiere que el concreto debe estar protegido contra los efectos de la lluvia antes de que endurezca lo suficiente, el contratista debe asegurarse de contar siempre con materiales de protección del concreto en estado fresco. Cuando la lluvia sea inminente, se deben suspender todas las operaciones de pavimentación y tomar los pasos necesarios para una protección completa (García y Huerta, 2004).</p>

<p><b>Agua atrapada</b></p>	<p>Puede quedar agua sobre la sub-base por no tener salida natural o haber sido tapada. Esto puede deteriorar la sub-base por filtración de agua, perdiendo compactación y formar baches. Para proteger la sub-base se deberá cubrir con un producto asfáltico que impida el paso del agua y evitar en lo posible tener áreas que no tengan salidas naturales. Todo defecto en la sub-base deberá repararse de inmediato (Covarrubias, 1985).</p>
<p><b>Niveles de la sub-base</b></p>	<p>La superficie de la capa sub-base debe ser construida con suficiente anticipación a la colocación del concreto, de tal manera que ambas operaciones no se interfieran (Salazar, 2009), por otra parte es un problema muy común y serio que se presenta en el trabajo de construcción de losas de concreto. La solución es usar equipos especializados para el nivel de la subrasante y sub-base controladas por sistemas de guías previamente nivelados y alineados.</p>
<p><b>Vientos y Temperatura ambiente</b></p>	<p>Exceso de temperatura y fuertes vientos, causan agrietamiento prematuro por la rápida pérdida de humedad en la superficie del concreto. Lo más recomendable es cambiar los turnos de colado, suspendiéndolo en las horas más críticas de temperatura o viento (García y Huerta, 2004).</p>
<p><b>Grietas longitudinales</b></p>	<p>Pueden presentarse cuando el corte longitudinal no se hace oportunamente en caso de colar con equipos de colocación muy anchos (Cemex Concretos, 2002).</p>
<p><b>Curado defectuoso</b></p>	<p>Si la membrana de curado se aplica fuera de tiempo, o en cantidad deficiente se producen grietas pequeñas, que no tienen gran profundidad, e indican que el concreto superficial no logro la resistencia requerida. Se corrige aplicando la membrana a tiempo y en cantidad suficiente y cumpliendo las especificaciones de calidad (Covarrubias, 1985).</p>

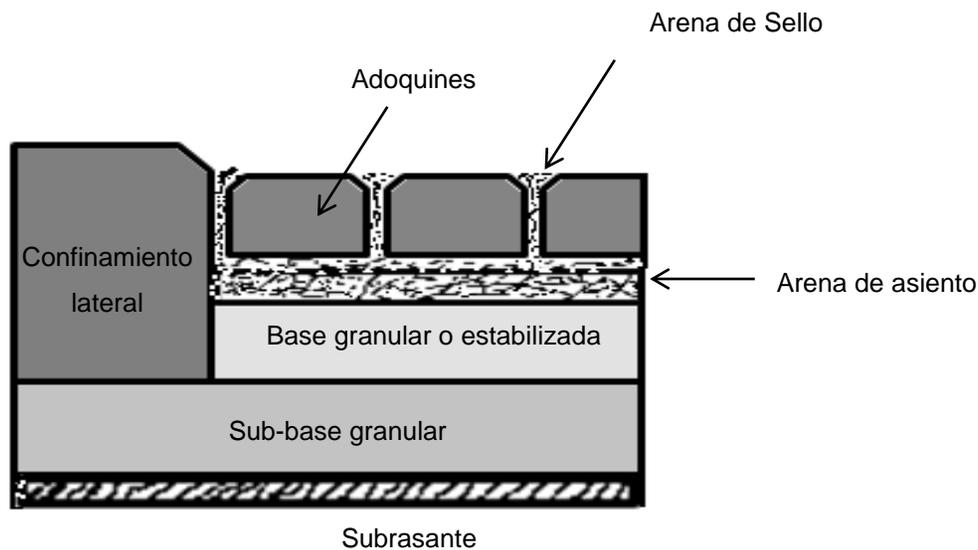
### **2.1.7.3.3 Pavimento combinado o mixto**

Son una combinación de pavimentos rígidos y flexibles, algunos autores los nombran semirrígidos o semiflexibles (Serment, 2012), pero la principal característica de este pavimento es que la superficie de rodadura está constituida por una carpeta asfáltica o una de concreto con cemento Portland

Su justificación se basa en la presencia de redes y servicios bajo la vialidad, que han de protegerse de la acción del tránsito o que su posición impide efectuar excavaciones de mayor profundidad para alojar una estructura de pavimento. Pueden tener una mayor capacidad estructural y, por lo tanto, un mejor desempeño, bajo el efecto de tránsito pesado e intenso (Zarate, 2003).

### **2.1.7.3.4 Pavimento articulado**

Los pavimentos articulados están compuestos por una capa de rodadura que está elaborada con bloques de concreto prefabricados, llamados adoquines, de espesor uniforme e iguales entre sí (Montejo, 2008). Por su parte Sánchez (2005), lo define como una capa de rodadura que está constituida por un conjunto de pequeños bloques prismáticos que se ensamblan de manera que forman una superficie continua, los cuales se apoyan sobre una capa de arena que, a su vez, se encuentra sobre una capa de base (granular o estabilizada) y sobre una capa de sub-base, generalmente granular (Figura 2.5).



Fuente: Sánchez, 2005

Figura 2.5 Sección típica de un pavimento articulado

#### 2.1.7.4 Estado actual y futuro de los pavimentos

El estado actual y futuro de los pavimentos se enfrenta a grandes retos debido a que se están presentando nuevas condiciones y necesidades, derivadas de las características impuestas por los escenarios sociales, económicas y tecnológicos en que se desarrolla la vida moderna (Zarate, 2003).

Los pavimentos que se construyen en la actualidad deben satisfacer múltiples y complejas necesidades socioeconómicas, lo que implica que el daño a sus elementos estructurales y no estructurales, debe ser cuidadosamente y claramente controlado.

Los importantes incrementos en el número y peso de los vehículos han desarrollado una nueva línea de investigación introduciendo nuevos materiales,

más resistentes y durables, además de nuevas estructuras o tipos de pavimentos y mejorando los modelos matemáticos. De igual manera los materiales deberán estar sujetos a mejores controles y estándares de calidad. El incremento del tránsito pesado en el sistema carretero, hará necesario reforzar los pavimentos existentes.

Actualmente en algunos caminos en México se presentan un alto TDPA (Transito Diario Promedio Anual) y un gran porcentaje de vehículos con carga pesada, que los pavimentos de concreto asfáltico no pueden soportar; por otro lado, al estar la producción de asfalto en manos de un solo fabricante, la calidad no siempre ha sido la óptima para la construcción de carreteras de altas especificaciones (Hernández, *et al.*, 2001).

Por consiguiente en la actualidad, el uso de concreto en pavimentos está muy avanzado entre todas las áreas de la ingeniería, debido a su manejo, y su adaptabilidad es sencilla, se abusa en los procedimientos de colocación y muchas veces no se cumple con los requisitos que señalan las especificaciones en demérito de la calidad y duración del pavimento.

A medida que los vehículos evolucionaron en peso, velocidad, comodidad y autonomía se fue creando la necesidad de proporcionales una vía de circulación con unas condiciones de curvatura, pendiente, visibilidad, sección transversal, uniformidad, textura, etc., apropiadas a una demanda de operación cada vez más exigente.

Se hace mención que en comparación con los pavimentos flexibles, la ventaja más notable de los pavimentos rígidos, es que no se emplean ni se generan sustancias tóxicas como solventes, residuos de asfaltos y gases generados durante el calentamiento de los cementos asfálticos (Hernández, *et al* 2001).

Por su parte el Ing. Felipe Flores Soto señala que el concreto hidráulico debería estar presente en todas las carreteras que se construyan en México, y también en aquellas que hayan sido construidas con asfalto. El costo beneficio es muy alto, ya que una pista de concreto puede tener una duración de hasta 50 años, sin que haya necesidad de meterle una nueva capa. Quizá “a los 20 años podría requerir un fresado que le devuelva su rugosidad original, lo que sería un mantenimiento preventivo para evitar que la superficie se haga lisa y atente contra la seguridad de los usuarios” (González, 2010).

Por supuesto que las técnicas de construcción de caminos y autopistas, ha conducido a establecer la utilización de agregados pétreos con costos mucho más elevados, con controles de calidad más estrictos que los que se utilizaban anteriormente, situación que se ha reflejado particularmente en los materiales de base y de carpeta, que tienen hoy en día especificaciones muy rigurosas. Las normas que establecen especificaciones y métodos adecuados en la construcción de pavimentos, y si se aplicaran, seguramente se obtendrán resultados en economía y calidad a corto y largo plazo.

En términos de durabilidad es importante tener en cuenta que los pavimentos construidas en el futuro deben contemplar horizontes de vida mucho más largos que los actuales, y la posibilidad de modernización periódica de operación y durabilidad, las condiciones planteadas para un desarrollo sustentable harán que muy pronto se incrementa la expectativa actual de vida útil, lo que implica eliminar un monitoreo periódico de su agrietamiento, y minimizar las medidas para su mantenimiento. Paradójicamente varias pavimentos, construidos por los romanos han resistido el paso del tiempo en excelentes condiciones, varias pavimentos importantes construidas durante el siglo XX se han deteriorado con una rapidez sin precedentes (Terán, 2010).

Como conclusión Serment (2012), menciona que ambos pavimentos (flexible y rígido) tienen múltiples virtudes y ejemplos de buen funcionamiento y, dependiendo quién haga el análisis, es innegable que ambos tienen algunos inconvenientes y que existen ejemplos donde el desempeño que se logra con ellos no ha sido el esperado.

#### **2.1.7.5 Pavimentos reciclados**

El sector de la construcción es uno de los que genera mayor impacto ambiental; sin embargo dentro de la ingeniería, existen oportunidades para lograr un verdadero equilibrio y sustentabilidad. En términos de innovación, puede decirse que todo lo involucrado en la fabricación y uso de materiales de construcción está sujeto a reinventarse.

Se realizan investigaciones del comportamiento de los materiales a largo plazo, lo que da lugar a la elaboración de especificaciones que toman en cuenta esta propiedad. Ante la carencia de buenos materiales, se investiga también sobre la utilización de materiales fuera de especificaciones, materiales alternativos y técnicas de reciclado (Zarate *et al.*, 2002).

Después del agua, el concreto es el material más usado del planeta. Se estima que cada año se fabrica un metro cúbico de concreto por cada una de los siete billones que lo habitan. La industria de la construcción utiliza regionalmente del 25 al 50 % de los recursos naturales vírgenes que anualmente consume la humanidad. Lo anterior ha resultado a nivel internacional en el agotamiento y degradación de importantes bancos de materiales, y ha contribuido de manera

definitoria en la crisis relacionada con la administración, almacenado y procesado de materiales de desecho (Terán, 2010).

Un obstáculo mayor de utilizar agregado para concreto es el costo de triturar, graduar, controlar el polvo y separar los componentes indeseables (Mehta y Monteiro, 1998).

Se demuestra que el producto derivado del residuo de demoliciones de concreto provoca fragmentos en los que el agregado es contaminado con pasta de cemento hidratado, yeso y menores cantidades de otras sustancias.

Ahora bien las partículas que afectan el agregado fino contienen en su mayoría pasta de cemento hidratada y yeso, y por lo tanto son inadecuadas para producir nuevas mezclas de concreto. Por otra parte, las partículas que afectan al agregado grueso, pese a que estén cubiertas con pasta con pasta de cemento, han sido utilizadas con éxito en diferentes estudios de laboratorio, campo y en construcción de pavimentos de concreto.

Ante la carencia de calidad en los materiales, el desarrollo sustentable investiga sobre la utilización de especificaciones y técnicas de reciclado. Las investigaciones relacionadas con el reciclado de materiales para pavimentos para un desempeño óptimo indican que se debe utilizar un 70% en el agregado grueso y un 30% en el agregado fino de material reciclado.

Los materiales perjudiciales en los agregados para concreto se enseñan en la tabla 2.15.

**Tabla 2.15 Materiales perjudiciales para los agregados.**

<b>Material</b>	<b>Consecuencia</b>
Vidrio	Tiende a producir mezclas de concreto no trabajables y, debido a su alto contenido de álcalis, afecta la durabilidad a largo plazo y la resistencia.
Metales	Reaccionan con las soluciones alcalinas y causan una expansión excesiva (aluminio).
Papel y Desperdicios Orgánicos	Causan problemas de fraguado y de endurecimiento en el concreto.

Fuente: Mehta K. y Monteiro P, 1998

El concreto que contiene un agregado natural en comparación con un concreto de agregado reciclado tendría al menos dos tercios de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad del primero, y una trabajabilidad y durabilidad satisfactorias. El concreto reciclado de desperdicio que se ha triturado puede ser una fuente económicamente factible de agregado, donde los buenos agregados sean escasos (Mehta y Monteiro, 1998).

Los resultados experimentales obtenidos en México por Martínez y Mendoza (2006), han demostrado que los agregados producto del reciclaje de concreto premezclado, producen concreto reciclados que pueden utilizarse como concretos clase dos, de acuerdo con el Reglamento de Construcción del Distrito Federal.

Aunque bajo ciertas circunstancias, el menor módulo de elasticidad que exhibe un concreto tipo dos limitaría su uso estructural; dentro del contexto de estructuras tolerantes a daños.

En Inglaterra generalmente se acepta que el contenido de finos del agua reciclada usada en el concreto no exceda el 10% por masa del agua reciclada. Por otro lado, las exigencias de algunos clientes y organismos son cada vez más estrictas (Torrent, 2004).

En España el empleo en agregados reciclados para concreto, puede ser empleado en terraplenes para carreteras, bordillos, adoquines, siempre y cuando estos elementos no sean estructurales. Los desechos resultantes de la actividad constructiva, empleándolos en este caso como agregados reciclados en prefabricados de concreto lo que supone ampliar la vida útil de éstos, dándoles un nuevo provecho, y contribuyendo de esta forma a un desarrollo sostenible de la actividad de la construcción en España. Este avance significa que este tipo de desechos podrán ser utilizados por empresas constructoras o de prefabricados para crear nuevos productos que contengan porcentajes variables de agregados reciclados (IMCYC, 2011).

Finalmente por su parte, Mehta y Monteiro (1998) señalan que la obra más grande de concreto reciclado para pavimentos que se haya realizado, es del Departamento de Transporte del estado de Michigan, informo que reciclar concreto de un viejo pavimento triturándolo, fue más económico que utilizar un material nuevo.

### **2.1.7.6 Optimización de mezclas**

A través de la optimización de mezclas es posible alcanzar una reducción de costos de materiales componentes dependiendo de las condiciones locales.

#### **2.1.7.6.1 Diseño de mezcla**

Es el proceso de selección de ingredientes adecuados y de las proporciones entre ellos, es producir una mezcla que satisfaga los requerimientos técnicos especificados y los del mercado. El proporcionamiento debe ser fijado y controlado por un laboratorio, y variará de acuerdo con las características de los agregados.

Nos dice el investigador Sánchez 2006, que el diseño de mezclas, es indispensable romper con la costumbre de utilizar “recetas únicas” dosificadas por volumen, debido a que los métodos de diseño se han refinado y están disponibles para dosificar el concreto por peso. El proporcionamiento de mezclas de concreto, depende de las propiedades y características de los ingredientes usados.

Por otra parte y totalmente de acuerdo con el Fernández (1992), el diseño de una mezcla de concreto es similar a la hechura de un platillo por un cocinero, conociendo las características de los ingredientes va añadiéndolos y probando hasta lograr el platillo de sabor y apariencia que le satisfagan, pero para esto se ayuda con recetas propias o ajenas. Para hacer el diseño, necesitamos conocer las características de los materiales con que contamos, en ocasiones de los que hemos tenido que predecir las características del concreto que se necesitan.

### **2.1.7.6.2 Optimización del diseño de mezcla**

La optimización de mezclas es una actividad sistemática que apunta a todas las mezclas, o la más vendida, con el menor costo posible en materias primas, satisfaciendo al mismo tiempo los requerimientos técnicos (exigencias de normas y del mercado). El método para determinar las proporciones de un determinado grupo de materiales con un costo mínimo. Dicha tarea debería ser realizada por los productores o por los contratistas involucrados. El motivo principal es los grandes volúmenes de concreto compensan los esfuerzos dedicados a optimizar las mezclas. La optimización del diseño de mezclas se lleva acabo ocasionalmente cuando ocurren cambios significativos en el mercado de materiales, en su calidad y/o precio. La elección del tipo de cemento puede tener un efecto importante en el costo de la mezclas de concreto. La elección no debe basarse solamente en el precio, sino también en la relación eficiencia/precio. La eficiencia debe medirse en ensayos de mezclas de concreto. La mezcla de cementos puede resultar una solución en ciertos casos específicos. En la producción del concreto, se deben tomar en cuenta el “síndrome de verano”, que se manifiesta como una tendencia de todas las mezclas a presentar menor resistencia durante la época de calor. Las medidas para superar el problema son aumentar el contenido de cemento lo que implica un aumento en los costos. El enfriamiento del concreto en zonas con el “síndrome de verano”, permite una reducción en el contenido de cemento y aditivos, que a menudo compensa los gastos e inversiones requeridas además que el concreto enfriado, tiene un potencial para obras de pavimentos y pisos industriales que son muy afectados por la fisuración por retracción. (Torrent, 2004).

Los aspectos más relevantes en la optimización de mezclas y ajuste de mezclas, se señalan en la tabla 2.16.

**Tabla 2.16 Optimización de mezclas**

<b>Característica</b>	<b>Optimización de Mezclas</b>	<b>Ajuste de Mezclas</b>
Objetivo Principal	Minimizar los costos de materias primas	Mantener un desempeño técnico/ económico estable.
Frecuencia	Anual (1-2 veces)	Semanal
Efecto sobre los Costos	Reducción	Reducción / Aumento
Cambios Resultantes en el Diseño	Significativos	Menores
Relación con el Control de Calidad	Débil	Muy directo.

Fuente: Torrent R., 2004.

## CAPÍTULO III.- METODOLOGÍA

### 3.1 Pruebas realizadas a los agregados y al concreto

La metodología realizada fue experimental, se basó en la medición directa de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados y del concreto en estado fresco y endurecido, en un periodo a corto y mediano plazo utilizados en la construcción de pavimentos rígidos, en muestras de cilindros y vigas; realizando las pruebas de los agregados en el laboratorio de mecánica de suelos y resistencia de materiales de la Universidad Autónoma de Querétaro; las pruebas del concreto se realizaron en los laboratorios internos de cada planta, debido a que cada una de las plantas tiene su control interno de calidad además de contar con equipos calibrados para las pruebas de compresión y tensión.

El procedimiento utilizado en la realización de pruebas está basado en las normas nacionales como son: el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (NMX-C-ONNCE) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); y las normas Internacionales: *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *American Concrete Institute* (ACI) y *Portland Cement Association* (PCA).

#### 3.1.1 Muestreo

Los métodos para reducir las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas y que se conserven representativas como la muestra de campo son aplicables a muestras más o menos homogéneas; en caso contrario o de duda, la muestra completa de campo debe ser estudiada (NMX-C-170-ONNCE-1997). Se contempló la norma anterior en el procedimiento de

muestreo para la obtención de las muestras de agregados en las diferentes plantas de concreto.

El procedimiento de cuarteo fue el siguiente:

- Se mezcló todo el material de la muestra hasta alcanzar un aspecto homogéneo, traspaleando de un lugar a otro y aproximadamente cuatro veces, sobre una superficie limpia y lisa.
- Una vez homogeneizada la muestra, se formó un cono, depositando con la pala el material, para que se acomode por sí solo y procurando que la distribución se haga uniforme.
- Se formó un cono truncado, encajando la pala en el vértice del cono original y haciéndola girar alrededor de su eje con el fin de ir desalojando el material hacia la periferia.
- El cono truncado se separa en cuadrantes aproximadamente iguales, con la ayuda de una regla.
- En una charola se junta el material de dos cuadrantes opuestos, se levanta con un cucharón y se cuida de no perder material, se apoya con una brocha para no perder el material fino (Figura 3.1).



Figura 3.1 Cuarteo del material

### 3.1.2 Densidad relativa o masa específica

Neymet (1965), indica que la densidad relativa o masa específica tiene una importancia directa, pues es un dato útil y rápido que señala, si se trata de materiales porosos y débiles; es determinante para que el material sea aceptado o rechazado. Aunque de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), menciona que el resultado se utilice más como un dato de orientación general que debe complementarse con los resultados de otras pruebas en los propios agregados y en el concreto elaborado.

La densidad relativa o masa específica es una de las propiedades físicas más importantes de los agregados que debemos de tomar en cuenta para determinar si los materiales son adecuados para utilizar en una mezcla de concreto.

En el caso de los agregados, la determinación que se emplea para evaluar el atributo de densidad relativa o masa específica, corresponde al denominado en

los Estados Unidos como gravedad específica en masa (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

La norma NMX-C-164-ONNCCE-2002 lo define como la relación de masa - volumen considerando la masa de las partículas secas y el volumen sólido que incluye los volúmenes de los poros dentro de las mismas. Las masas específicas pueden expresarse como masa específica seca (Mes).

Son determinados en agregados gruesos (ASTM C 127, 2012) y agregados finos (ASTM C 128, 2012). La norma ASTM la define como la densidad relativa o masa específica es utilizada para calcular el volumen absoluto ocupado por el agregado en la mezcla de concreto y puede ser calculado para agregados en condición saturados superficialmente secos o secos.

En los trabajos con concreto, el término masa específica se refiere a la densidad relativa o masa específica de la partícula individual y no a la masa de agregado como un entero. La densidad relativa o masa específica de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para el ajuste de mezclas.

### **3.1.3 Absorción**

De acuerdo con Neymet (1965), la absorción de un agregado es de primera importancia, ya que fija la cantidad de agua en la dosificación.

Es el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un tiempo determinado a temperatura ambiente; este aumento de

masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca y es el índice de la porosidad del material (NMX-C-164-ONNCCE-2002).

La absorción de los agregados se obtiene generalmente después de haber sometido al material a una saturación durante 24 horas, cuando ésta termina se procede a secar superficialmente el material, y por diferencias de masa se logra obtener el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material. El agregado en condición seca se sumerge en agua, comienza a penetrar rápidamente los poros permeables, desplazando el aire a ser expulsado. Sin embargo, el agua no alcanza a llenar completamente los poros, debido a una cierta cantidad de aire que permanece atrapado y que solamente se comprime conforme avanza la penetración de agua a ritmo más lento. Resultado que el agregado no se sature totalmente y continúe ganando peso en el curso del tiempo, justificando porque la absorción no puede ser una medida justa de la porosidad (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

La cantidad de agua absorbida estima la porosidad de las partículas de agregado. Conocer la cantidad de agua que puede ser alojada por el agregado siempre resulta de mucha utilidad, en ocasiones se emplea como un valor que se especifica para aprobar o rechazar el agregado en una cierta aplicación. La absorción es utilizada para el control del contenido neto de agua de la mezcla de concreto.

Una absorción demasiado alta en los agregados, no es una característica penalizada por sí misma, pero indica un desempeño inadecuado en el concreto (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994). Además el exceso de absorción en los agregados puede ser una situación de la roca madre, o inducido por la presencia de partículas de baja calidad o material contaminante.

### **3.1.4 Pérdida por lavado**

Los materiales más finos, que pasan por la malla No. #200, especialmente el limo y la arcilla, pueden estar presentes en forma de polvo o bien pueden formar un recubrimiento de las partículas de los agregados; formando recubrimientos muy delgados de limo y arcilla, que pueden afectar la adherencia entre estos y la pasta de cemento.

La Norma Mexicana detalla el método de prueba para determinar el contenido de partículas más finas de la malla No. #200 (0.075 mm) por medio de lavado. Durante esta prueba, las partículas de arcilla y otras que se disuelven por el agua de lavado, y las que son solubles en el agua, son separadas. La muestra de agregados se lava por agitación, mientras que el agua que contiene los materiales disueltos y en suspensión, se separa por decantación y se pasa por la malla No. #200 (0.075 mm). La pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como el porcentaje de la masa de la muestra original y se informa como el porcentaje del material más fino que la malla No. #200 (0.075 mm) obtenida por lavado (NMX-C-084-ONNCCE-2006).

La mayoría de las especificaciones limitan las cantidades permisibles de limos y arcillas en los agregados. El contenido de polvo de arcilla, hace la mezcla menos plástica.

### **3.1.5 Módulo de finura**

El método del ACI indica que el módulo de finura se utiliza a menudo como un índice de la fineza de un agregado que cuando más alto es el módulo de finura, más grueso será el agregado fino, afectando también la cantidad de agregado grueso en el proporcionamiento de mezclas.

El módulo de finura (FM) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas (Figura 3.2), (al agregado grueso se le suma 500 al total) y dividiendo la suma entre 100. El módulo de finura es un índice de la finura del agregado entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado (ASTM C 136, 2006).



Figura 3.2 Juego de Mallas

El análisis granulométrico del agregado fino se complementa calculando su módulo de finura, y es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la malla No. #4 (4.75 mm) hasta la malla No. #100 (0.150 mm), divididos entre 100. De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994): el agregado fino presenta un módulo de finura adecuado para el concreto, si no es menor de 2.30 ni mayor de 3.10; las arenas cuyo módulo de finura es inferior a 2.30 se consideran demasiado finas e inconvenientes, porque suelen requerir mayores consumos de pasta de cemento, que repercute en los cambios volumétricos y costos del concreto. Las arenas con módulo de finura mayor de 3.10 resultan demasiado gruesas e inadecuadas porque producen mezclas de concreto ásperas, segregables y proclives al sangrado. Para el agregado grueso o gravas, se puede

estimar el valor del módulo de finura entre los valores 6.5 y 7.5, pero se permiten tener variaciones amplias.

### 3.1.6 Contenido de materia orgánica

Las impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del concreto y ser la causa de deterioro en ciertos casos. La determinación de impurezas orgánicas proporciona datos suficientes para aceptar el agregado debido a que pueden causar serios problemas en los concretos.



Figura 3.3 Prueba de materia orgánica

Por otra parte Uribe (2004), menciona varios motivos por el cual en los agregados existen diversos tipos de contaminación orgánica la cual puede ser representada por humus, azúcar, fragmentos de madera, algunas raíces de planta, carbón y lignito; en ocasiones es parte sustancial de los sedimentos en los agregados que se obtienen de la trituración de un banco de roca estos pueden deberse a la fracción vegetal que cubre el depósito.

La Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994) describe la prueba materia orgánica (colorimétrica) en la que se mezcla una pequeña cantidad de arena con una solución de hidróxido de sodio al 3 por ciento (Figura 3.3), y se compara a las 24 horas el color resultante en la solución contra un color estándar de referencia. Si el color de la solución resulta más oscuro que el de referencia, se interpreta como síntoma de contaminación excesiva y como causa de rechazo de la arena.

Los agregados finos deben estar libres de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas. Los agregados después de efectuar la prueba, que den un color más oscuro que la coloración No. 3, deben rechazarse, excepto, si se demuestra que la coloración es debida a la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito o partículas semejantes, o bien, si se demuestra que el efecto de las impurezas orgánicas en morteros ensayados a la edad de 7 días, dan resistencias calculadas no menores del 95 %, conforme al método que establece la norma (NMX-C-076-ONNCCE-2002).

Por los motivos anteriores es una característica de los agregados que limita el contenido del producto con base a la norma, y se considera que un tono más oscuro que el color de referencia sea motivo de rechazo del material.

### **3.1.7 Granulometría**

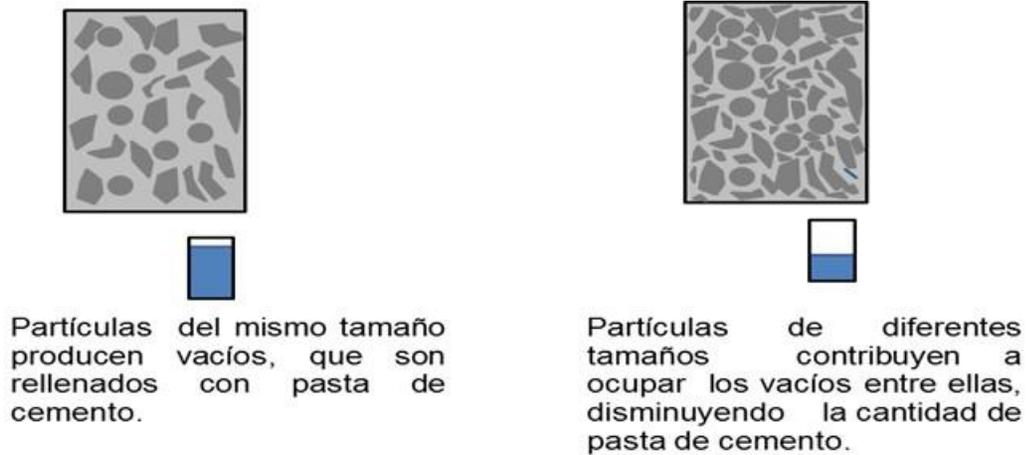
La granulometría es la distribución de las partículas de los materiales granulares de los diferentes tamaños, que generalmente se expresa en términos de porcentajes acumulados mayores o menores que cada una de las series de tamaño o de aberturas de mallas, o los porcentajes entre ciertos rangos de abertura de mallas (Mehta y Monteiro, 1998).

Los límites de tamaño de las partículas que constituyen un suelo, ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo. Tal criterio fue utilizado en mecánica de suelos desde un principio e incluso antes de la etapa moderna de esta ciencia. Posteriormente con el advenimiento de la técnica de cribado, fue posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de las partículas del suelo en mayor número de tamaños diferentes (Juárez y Rico, 2006).

La composición granulométrica representa gráfica o numéricamente la distribución de los diferentes tamaños de las partículas que componen el material. La mayor estabilidad de un material se alcanza cuando se reduce al mínimo la cantidad de vacíos y para que esto pueda lograrse, se requieren una sucesión adecuada de tamaños que permita que los huecos dejados por las partículas mayores sean ocupados por partículas de menor tamaño y que los huecos de estos últimos, se acomoden partículas más finas y así sucesivamente (Covarrubias, 1985)

La granulometría de los agregados (Figura 3.4 y 3.5) juega un papel importante en el diseño de las mezclas y las propiedades del concreto fresco y endurecido. Con un agregado bien graduado se producirá la resistencia máxima posible con la mínima cantidad de cemento, debido a que se tendrá la superficie mínima de partículas que habrá de cubrir con pasta. Las razones para especificar los límites de granulometría y el tamaño máximo del agregado, es debido a la importancia de la trabajabilidad y el costo.

Los motivos para especificar límites en las granulometrías y el tamaño máximo de los agregados. Afectan las proporciones relativas de los agregados. Las variaciones de la gradación pueden afectar la uniformidad del concreto de una mezcla a otra.



Fuente: García, 2006.

Figura 3.4 Granulometría en el concreto



Fuente: García, 2006

Figura 3.5 Granulometría de finos en el concreto

La Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994) dice que el empleo de agregados con granulometría continua en las mezclas de concreto de consistencia

plástica, es conveniente por economía y con el fin de lograr en tales mezclas una adecuada manejabilidad acorde a los procedimientos y equipos usuales de trabajo, pues la experiencia ha demostrado que a igualdad de consumos de pasta de cemento, con granulometrías continuas se obtienen mezclas de concreto más manejables que cuando existe discontinuidad en la granulometría de los agregados.

### **3.1.8 Peso volumétrico seco suelto y compacto**

Uribe (2004), lo define como una propiedad fundamental, que incluso ha servido para generar un sistema de clasificación de los agregados, en donde su importancia radica en el control que tiene sobre el peso unitario del concreto. Por su parte Mehta y Monteiro, (1998), escriben que el peso volumétrico se define como el peso de los fragmentos del agregado que llenarían una unidad de volumen

La norma ASTM C 29 (2009), lo describe como el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario conocido. Puede ser seco suelto en el cual las partículas se acomodan por sí mismas (grava y arena) o seco compacto donde a través de varillado se busca reducir los espacios entre las partículas.

La norma (NMX-C-073-ONNCCE-2004), la determinación de la masa volumétrica compactada. Aplicable a agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 40 mm o menor. El recipiente se llena hasta la tercera parte de su volumen y la superficie se nivela con los dedos (Fig. 3.6). El material se compacta con la varilla, dándole 25 penetraciones, distribuidas uniformemente sobre la superficie, con una fuerza tal que no triture las partículas del agregado. A continuación, se agrega material hasta las dos terceras partes de su volumen y nuevamente se compacta con 25 penetraciones. El recipiente se llena totalmente hasta que el material sobrepase el borde superior, y se vuelve a compactar con 25

penetraciones. El enrase cuando se trata de agregado fino, se hace con el enrasador o regla metálica, mediante operaciones de corte horizontal. Cuando se trata del agregado grueso, se hace visualmente, quitando y poniendo partículas, de tal manera que los salientes sobre la superficie del borde compensen las depresiones por debajo de él. Se determina la masa total del recipiente con el material. Se calcula la masa neta del material en el recipiente. La masa volumétrica del agregado, se obtiene multiplicando la masa neta del agregado en kilogramos (kg), por el factor determinado en la sección “Calibración del recipiente”.



Figura 3.6 Peso volumétrico de la grava

Con base en la misma norma NMX-C-073-ONNCCE-2004, describe su procedimiento de la siguiente manera: Determinación de la masa volumétrica suelta aplicable a los agregados que tengan un tamaño máximo nominal de 100 mm o menor. El recipiente se llena hasta que el material sobrepase el borde sin derramarse, por medio de una pala o cucharón, dejando caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el borde del recipiente distribuyéndolo uniformemente, para evitar la segregación. El enrase (Figura. 3.7) se hace de la misma forma que se indicó en “Compactación con varilla o con impactos”. Se calcula la masa neta del agregado en kg, contenida en el recipiente. La masa volumétrica

del agregado se obtiene multiplicando la masa neta del agregado en kilogramos (kg), por el factor determinado en la calibración del recipiente. La masa volumétrica obtenida en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), determinada por estos métodos de prueba, es para agregados secos.



Figura 3.7 Peso volumétrico de la arena

El peso volumétrico es utilizado en la estimación de cantidades del material y en el de proporcionamiento de mezclas, depende principalmente de los agregados pétreos que se empleen. Están afectados por varios factores como la humedad, densidad en masa, textura y forma de la partícula.

### **3.1.9 Desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles)**

Determina la dureza de los materiales pétreos que se emplean en mezclas de concreto con cemento Portland, sirve para estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, planos de debilitamiento, planos de cristalización, forma de las partículas, etc.

La resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, es una característica que se considera un índice de su calidad en general, y en particular de su capacidad para producir concretos durables en condiciones de servicio donde intervienen acciones de deterioro de carácter abrasivo. Se considera un buen indicio de su aptitud para soportar sin daño, las acciones de quebrantamiento que frecuentemente recibe el agregado grueso en el curso de su manejo previo a la fabricación del concreto. Las dos principales condiciones de servicio en que se produce abrasión sobre el concreto, con cierta frecuencia son: las acciones abrasivas de índole mecánica, se manifiesta en pavimentos y pisos industriales, y de origen hidráulico se generan a causa de las partículas arrastradas por el agua que fluye velozmente en contacto con el concreto (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).



Figura 3.8 Esferas de hierro fundido

La prueba con la máquina de los Ángeles (Figura 3.9) es una medida de la degradación de agregados minerales, con una granulometría normalizada, resultante de la combinación de la acción de molienda por impacto y abrasión que se produce en un tambor de acero giratorio que contiene un número especificado de esferas de acero (Figura 3.8); este número depende de la granulometría de la muestra. A medida que el tambor gira, una aspa interior acumula la muestra y las

esferas de acero, las eleva y deja caer, dando lugar a un efecto de molienda por impacto, en el resto del giro el material rueda creando el efecto de molienda por abrasión. Este proceso constituye un ciclo, que se repite cada revolución. Después del número prescrito de revoluciones, se saca el contenido y se criba para medir la degradación como pérdida porcentual (NMX-C-196-ONNCCE-2010).



Figura 3.9 Máquina de los Ángeles

La prueba con la máquina de los Ángeles (Figura 3.9) se ha empleado ampliamente como un indicador respecto a la calidad comparativa de varias fuentes de agregados que tengan composición mineral semejante. Los resultados no permiten realizar comparaciones válidas entre fuentes de materiales de estructura, composición u origen diferentes. La especificación de los límites basados en esta prueba debe asignarse con mucho cuidado teniendo en cuenta los tipos de agregados que se puedan obtener y su historial en empleos específicos (NMX-C-196-ONNCCE-2010).

En lo que concierne a la durabilidad del concreto endurecido, existen en él características físicas que controlan su desempeño cuando es expuesto a procesos abrasivos de cualquier tipo y procedencia; éstas son su resistencia al desgaste y al pulido dichas propiedades dependen en gran medida de la calidad de los agregados, cuyas características físicas influyen de manera definitiva en el comportamiento del concreto una vez que ha sido puesto en servicio, se sabe que la resistencia al desgaste y al pulido está dada en el concreto por la calidad de la pasta, la calidad del agregado fino expuesto y la porción de agregado grueso que se ubica en la superficie expuesta del concreto (Uribe *et al.*, 1999)

Los agregados con altas pérdidas en estas pruebas se degradan fácilmente y resulta difícil mantener su curva granulométrica intacta durante los procesos de manejo de material (producción, transporte, almacenamiento, mezclado, entre otros). Este tipo de agregados también pueden desintegrarse rápidamente cuando se exponen al tráfico y al ambiente, por lo que esta prueba es un buen indicador del comportamiento real del agregado (Uribe, 2004).

Mamlouk *et al* (2009), mencionan que los pavimentos deben diseñarse para ser capaces de resistir el desgaste y la acción de pulido provocados por las ruedas de los vehículos, para así proporcionar una adecuada resistencia al derrape en caso de frenado. La resistencia a la abrasión y al desgaste es, por lo tanto, una propiedad importante de los agregados utilizados en los pavimentos. Sin embargo, la comparación de los resultados de las pruebas de desgaste de los agregados con las hechas para determinar la resistencia al desgaste del concreto no muestra una correlación directa. La resistencia al desgaste del concreto puede determinarse con más precisión mediante pruebas de desgaste en el mismo concreto.

### **3.1.10 Coeficiente de forma**

Se define como coeficiente volumétrico o también conocido como factor de forma o coeficiente de forma. La norma NMX-C-436-ONNCCE-2004 la define como la relación que existe entre la suma de los volúmenes de las partículas representativas del agregado grueso que componen una muestra con la suma de los volúmenes de las esferas que circunscriben a cada partícula de dicha muestra.

El coeficiente de forma, que es igual a la relación entre el volumen de la partícula y el volumen de esfera en que resulta inscrita y cuya determinación es aplicable a las partículas mayores de 6.3 mm (1/4"). El procedimiento consiste en medir la dimensión máxima de las partículas, individualmente; poner las partículas medidas en condición saturada y superficialmente seca, determinarles su volumen aparente y obtener el peso específico; y calcular el coeficiente volumétrico medio (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

Los agregados gruesos deben tener un coeficiente volumétrico mayor o igual de 0,20. En caso de utilizar agregados con coeficiente volumétrico menor que 0,20, debe realizarse un estudio que muestre el impacto de su uso, y hacer los ajustes correspondientes en las mezclas de concreto, para satisfacer los requisitos de cohesión, trabajabilidad, módulo de elasticidad y contracción requeridos (NMX-C-436-ONNCCE-2004).

### **3.1.11 Partículas alargadas y lajeadas (planas)**

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de forma alargada y lajeada, presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas. La prueba consiste en separar el retenido de la malla No. #4 (4.75 mm) de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando

calibradores de espesor (Figura 3.10) y longitud (Figura 3.11) (M-MMP-4-04-005/08, 2008). Las partículas de superficie planas y alargadas requieren más agua para producir un concreto manejable que los agregados redondeados.

La presencia de partículas lajeadas (planas) y alargadas, en los agregados naturales como en los manufacturados, se considera indeseable porque reduce la manejabilidad de las mezclas, dificulta el acomodo y la compactación del concreto fresco y afecta la resistencia mecánica del concreto endurecido (Figura 3.12). El comité ACI 207 recomienda no exceder de 20% en la proporción de partículas en los agregados gruesos (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).



Figura 3.10 Calibrador de espesores



Figura 3.11 Calibrador de longitudes

Partículas Alargadas y Lajeadas (Planas)			
Partículas planas (lajeadas)	Partículas alargadas (oblongadas)	Partículas planas y alargadas (tabulares)	Partículas equidimensionales (cúbicas o esféricas)
$\frac{a}{e} > 3$  $\frac{l}{a} < 3$	$\frac{l}{a} > 3$  $\frac{a}{e} < 3$	$\frac{a}{e} > 3$  $\frac{l}{a} > 3$	$l \approx a \approx e$  $\frac{a}{e} < 3$  $\frac{l}{a} < 3$

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994.

Figura 3.12 Partículas alargadas y lajeadas (planas)

### 3.1.12 Equivalente de arena

Determina la calidad del agregado fino (arena), porque es necesario conocer la cantidad de arcilla contenida; la prueba de equivalente de arena, sirve para determinar la calidad desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica y la presencia de cantidades perjudiciales de arcilla en los materiales. Indica bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcillas, finos plásticos y polvo presente en suelos granulares y agregados finos que pasan la malla No. #4 (4.75 mm). Se utiliza por su rapidez en la determinación de un índice representativo de la proporción y características de los finos que contiene un agregado. Se fundamenta en liberar de la muestra de ensayo los posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena mediante la adición de una solución coagulante que favorece la suspensión de las partículas finas (Figura 3.13) sobre la arena, determinando su contenido respecto de las partículas de mayor tamaño (NMX-C-416-ONNCCE-2003).



Figura 3.13 Prueba de equivalente de arena

En la mayoría de los casos las arcillas perjudican la estabilidad de los materiales y la arcilla húmeda tiene un efecto de lubricación que disminuye la resistencia natural debido a la fricción si no se tuviera presente la arcilla en el material de estudio. Resulta indispensable conocer la cantidad de arcilla contenida en los materiales para pavimentos, así como su influencia en las propiedades de dichos materiales (Covarrubias, 1985).

### **3.1.13 Sanidad (intemperismo acelerado)**

Se determina la susceptibilidad del material pétreo a los agentes del intemperismo, como es la lluvia, las heladas, cambios de temperatura, etc. La prueba permite estimar la alteración que pueden sufrir los materiales pétreos al estar expuestos a la acción del intemperismo.

Los efectos del intemperismo se traducen en cambios volumétricos como la expansión y contracción que disminuyen la resistencia de los agregados hasta desintegrarlos.

La sanidad de los agregados: Es la característica de los agregados para resistir la acción del medio ambiente. Materiales auxiliares: La solución de sulfato de sodio saturada para la inmersión de las muestras, puede ser del grado de pureza de la farmacopea nacional, en agua, a una temperatura comprendida entre 298 K a 303 K (25 °C a 30 °C), se agrega suficiente sal ya sea en forma anhidra ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) o en forma de sal decahidratada ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) para asegurar no solamente la saturación sino la presencia de exceso de cristales (NMX-C-075-ONNCCE-2006).

La Comisión Federal de Electricidad, sección 1, (1994) explica que la prueba consiste en someter muestras del agregado en distintos ciclos sucesivos de saturación (en una solución saturada de sulfato de sodio o sulfato de magnesio)

(Figura 3.14) y de secado acelerado en horno a 110° C. La acción del sulfato de magnesio es más enérgica que la del sulfato de sodio, motivo que se tolera una pérdida más alta cuando se utiliza magnesio. La ASTM fija una pérdida permisible para el agregado fino del 10% con sulfato de sodio y 15% si se emplea sulfato de magnesio. Para el agregado grueso la pérdida máxima permisible de 18% con sulfato de magnesio y 12% con sulfato de sodio. El *U.S. Bureau of Reclamation*, los límites permitidos con sulfato de sodio es de 8% para el agregado fino y 10% para el grueso.

Dice Mehta y Monteiro (1998), que el agregado es considerado in-sano cuando los cambios de su volumen causados por el clima, como los ciclos alternados de mojado y secado, o de congelamiento y descongelamiento, resultan en el deterioro del concreto. La falta de sanidad se muestra generalmente en las rocas que tienen una estructura característica de poros. Por consiguiente la falta de sanidad está relacionada por lo tanto con la distribución del tamaño de los poros, más que con la porosidad total del agregado.

La sanidad define la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos y fisuras. Esta propiedad tiene mucha importancia porque es un buen índice del desempeño predecible del agregado al ser usado en concreto (Cemex Concretos, 2001).



Figura 3.14 Prueba de sanidad (intemperismo acelerado)

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), los resultado de la prueba de sanidad se consideran útiles para estimar el comportamiento de los agregados al formar parte de concretos expuestos a toda clase de condiciones que ponen en riesgo su durabilidad.

### **3.1.14 Humedad**

Los agregados pueden estar en cualquier condición de humedad lo que afecta la cantidad de agua que se debe usar, con el fin de mantener las proporciones reales del diseño

En los agregados existen poros, los cuales encuentran en la intemperie y pueden estar llenos con agua, estos poseen un grado de humedad, el cual es de gran importancia ya que con él podríamos saber si nos aporta agua a la mezcla.



Figura 3.15 Humedad del agregado

En la investigación se utilizó agregados que están parcialmente secos (al aire libre) para la determinación del contenido de humedad total de los agregados. Este método consiste en someter una muestra de agregado a un proceso de secado

(Figura 3.15) y comparar su masa antes y después del mismo para determinar su porcentaje de humedad total. Este método es lo suficientemente exacto para los fines usuales, tales como el ajuste de la masa en una mezcla de concreto (Merritt *et al.*, 2001)

### **3.1.15 Límites de consistencia**

El objetivo de estas pruebas permite conocer las características de plasticidad, cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas consisten en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2.45 kPa (25 g/cm<sup>2</sup>); éste se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico. El límite plástico o el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm; este se considera como la frontera entre los estados plásticos y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico (M-MMP-1-07/07, 2007).

Determinan la plasticidad de la porción de material que pasa por la malla No. #40 (0.425 mm), y que forma parte de los agregados. La plasticidad es una propiedad de los suelos que les permite cambiar su forma sin agrietarse cuando se les sujeta a una presión, reteniendo su nueva forma cuando desaparece el esfuerzo aplicado. La porción de material que pasa por las cribas referidas, presenta una consistencia plástica para una humedad comprendida entre dos límites: el límite plástico y el límite líquido. Su amplitud es medida como su índice plástico (NMX-C-416-ONNCCE-2003).

Antes de cada prueba se verificará que la altura de caída de la copa de Casagrande (Figura 3.16) sea de 1 cm, utilizando para ello el mango calibrado del ranurador, que tiene precisamente esa dimensión. Si la altura de caída es diferente, el aparato debe corregirse mediante los tornillos de ajuste.



Figura 3.16 Copa Casagrande

### 3.1.16 Contracción lineal

Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad. La relación de contracción da una indicación de cuánto cambio de volumen puede presentarse por cambios de la humedad de los suelos. La relación de contracción se define como la relación de longitud del espécimen o muestra de suelo como un porcentaje de su volumen seco al cambio correspondiente en humedad por encima del límite de contracción expresado como un porcentaje del suelo seco obtenido luego de ser secado al horno (NMX-C-416-ONNCCE-2003).

Por encima del límite de contracción todos los cambios de humedad producen cambios de volumen en el suelo. También puede conocerse la contracción lineal, cuyo concepto se apoya en el decrecimiento de la longitud del suelo a medida que disminuye el contenido de agua desde un contenido de agua inicial hasta el límite de contracción. La contracción lineal se obtiene moldeando una barra de suelo en un molde rectangular. Este parámetro ha ganado popularidad porque se puede ver inmediatamente que cuando un suelo tiene grandes deformaciones es muy

susceptible a cambios volumétricos. De manera cotidiana en los laboratorios de vías terrestres es común la determinación de contracción lineal que ha diferencia de los dos anteriores límites no es un contenido de agua, sino la deformación lineal que experimenta un suelo a partir de un proceso de secado (Juárez y Rico, 2006).

El procedimiento para determinar la contracción se deberá realizar en el momento en que el suelo se encuentra en su límite líquido, o lo que es igual, cuando el suelo tenga la consistencia correspondiente a los 25 golpes con la copa de Casagrande. Se comienza tomando el molde de contracción lineal, se mide su longitud inicial ( $L_0$ ), se pesa y se engrasa perfectamente con vaselina, grasa o similar. El molde se llena con la muestra de suelo (Figura 3.17) en tres capas, golpeando en cada capa el molde sobre la mesa con la finalidad de expulsar el aire atrapado. Una vez lleno y engrasado el molde se procede a tomar el peso del mismo. El proceso de secado iniciará dejando el molde con la muestra al aire libre, cubierto únicamente con una franela húmeda durante dos días, y un día solamente al aire libre; después se colocará la muestra dentro del horno con todo y molde y se secará a una temperatura aproximada de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante un periodo de 12 a 16 horas. Después de esto se extrae la muestra del horno se mide su longitud final ( $L_f$ ) y se pesa (Universidad Autónoma de Querétaro, 2012).



Figura 3.17 Llenado de moldes

Los agregados tienen un efecto restrictivo en la contracción y algunos tipos si se contraen más que la pasta de cemento, incrementan la contracción del concreto significativamente. El efecto del agregado en la restricción de la contracción por secado del concreto está regido por:

- La fracción del volumen del agregado.
- El módulo de elasticidad del agregado.
- **La contracción del agregado al secarse.**

### **3.1.17 Revenimiento**

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado. El revenimiento se utiliza como medida de la consistencia del concreto. El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas a los parámetros solicitados. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto; la consistencia es la facultad del concreto fresco para fluir; la plasticidad determina la facilidad de moldear al concreto.

El propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Esta es una medida de la fluidez o movilidad relativa de la mezcla de concreto. El revenimiento no mide el contenido de agua o la trabajabilidad del concreto. Es verdad que el incremento o disminución en el contenido de agua causará el correspondiente aumento o disminución en el revenimiento del concreto, siempre y cuando todos los otros materiales y condiciones permanezcan constantes. Sin embargo, muchos factores pueden causar que el revenimiento del concreto cambie sin que varíe el contenido de agua. Además, el contenido de agua puede aumentar o disminuir sin mostrar un cambio aparente en el revenimiento del

concreto. Ciertos factores como la modificación de las propiedades de los agregados o granulometría, proporciones de la mezcla, contenido de aire, temperatura del concreto o el uso de aditivos especiales pueden influir en el revenimiento del concreto, o inversamente, pueden resultar en un cambio en el requerimiento de contenido de agua para mantener un revenimiento dado (NMX-C-156-ONNCCE-2010).

### **3.1.18 Temperatura del concreto**

La temperatura es uno de los factores más importantes que influyen en la calidad, tiempo de fraguado y resistencia del concreto; sin el control de la temperatura del concreto, predecir su comportamiento es muy difícil, si no imposible. Un concreto con una temperatura inicial alta, probablemente tendrá una resistencia superior a lo normal a edades tempranas y más baja de lo normal a edades tardías. La calidad final del concreto probablemente se verá también disminuida. Por el contrario, el concreto colado y curado a temperaturas bajas desarrollará su resistencia a una tasa más lenta, pero finalmente tendrá una resistencia más alta y será de mayor calidad. La temperatura del concreto se usa para indicar el tipo de curado y protección que se necesitará, así como el lapso de tiempo en que deben mantenerse el curado y la protección. Al controlar la temperatura del concreto dentro de los límites aceptables se podrán evitar problemas tanto inmediatos como futuros. Cuando hay que evaluar diferentes tipos de concreto, la temperatura de las mezclas de cada concreto debe ser tan idéntica como sea posible. La temperatura del concreto afecta el comportamiento de los aditivos químicos, los aditivos inclusores de aire, los materiales puzolánico y otros tipos de aditivos y adicionantes (NMX-C-435-ONNCCE-2010).

La temperatura del concreto recién mezclado juega un papel importante en el desempeño técnico y económico. Los principales efectos de altas temperaturas en el concreto fresco son:

- Aumento en la demanda de agua para alcanzar una cierta consistencia.
- Reducción de la resistencia a compresión para la misma relación agua/cemento.
- Pérdida de asentamiento.
- Aumento de riesgo de fisuración por retracción plástica (micro-fisuras).
- Aceleración de fraguado y de desarrollo de resistencia inicial.

Para evitar los problemas mencionados, algunas normas recomiendan o especifican que la temperatura máxima del concreto fresco no debe exceder los 32° C. Las temperaturas del agua de mezclado y de los agregados desempeñan un papel mucho más importante al determinar la temperatura del concreto que el cemento caliente en las mezclas de concreto.

La alternativa para evitar altas temperaturas en el concreto es bajando su temperatura lo cual puede hacerse aplicando las siguientes medidas:

- Mantener el agregado en la sombra.
- Rociar los agregados con agua.
- Pintar de blanco los silos, tanques de agua, recipientes y tambores de camiones.
- Enfriar el agua.
- Enterrar o aislar los tanques de agua.
- Evitar el uso de cemento caliente.

Otras medidas como el hielo o el uso de nitrógeno líquido para enfriar los camiones; no se recomiendan desde el punto de vista económico, excepto para casos especiales.

### **3.1.19 Masa unitaria del concreto**

La prueba de la masa volumétrica es una herramienta importante utilizada para controlar la calidad del concreto recién mezclado. Después de que se ha establecido un proporcionamiento para la mezcla de concreto, un cambio en la masa volumétrica indicará un cambio en uno o más de los otros requisitos del desempeño del concreto.

Una masa volumétrica más baja puede indicar:

- Que los materiales han cambiado
- Un mayor contenido de aire.
- Un mayor contenido de agua.
- Un cambio en las proporciones de los materiales.
- Un menor contenido de cemento.

Contrariamente una masa volumétrica más alta indicará lo contrario de las características del concreto antes mencionadas. Una masa volumétrica más baja que las proporciones de la mezcla de concreto establecidas, en general indicará un “sobre-rendimiento”; esto significa que el contenido de cemento requerido para un metro cúbico disminuye para producir un mayor volumen de concreto. Por lo tanto, son de esperarse resistencias más bajas así como una reducción de las otras cualidades deseables del concreto. Si la reducción de la masa unitaria del concreto

se debe a un incremento en el contenido de aire, posiblemente el concreto será más durable en su resistencia a ciclos de congelación y deshielo, pero las cualidades de resistencia a la compresión, a la abrasión, al ataque de químicos, a la contracción y al agrietamiento del concreto, se verán adversamente afectadas. La prueba de masa volumétrica se debe usar para controlar concretos ligeros y pesados. Un cambio en la masa unitaria podría afectar inversamente la bombeabilidad, colocación, acabado y resistencia de todos los tipos de concreto.

La prueba de la masa volumétrica es tan importante para regular la calidad del concreto, es fundamental que la prueba se realice de acuerdo con los procedimientos estándar especificados. Se debe conocer el volumen exacto del contenedor; después de que la muestra de concreto se enrase al nivel del recipiente, todo el concreto adherido a la parte exterior del recipiente debe removerse antes de pesar la muestra. Masa seca: El agregado es considerado seco cuando se ha mantenido a una temperatura de  $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$  ( $110^\circ\text{ C} \pm 5^\circ\text{ C}$ ) durante el tiempo necesario para lograr masa constante. Asimismo, el material es considerado seco cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas es igual o menor que 0,1 % de la masa de material. Masa volumétrica: Es la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE-2004).

### **3.1.20 Tiempos de fraguado**

Puede emplearse para determinar los efectos de variables, tales como temperatura, cemento, diseño de mezclas, aditivos, modificadores del tiempo de fraguado y características del endurecimiento del concreto. También puede emplearse para verificar el cumplimiento de especificaciones en lo relativo al tiempo de fraguado (NMX-C-177-1997-ONNCCE).

### **3.1.21 Contenido de aire**

La inclusión de aire es necesaria en el concreto que estará expuesto a ciclos de congelación y deshielo y a químicos descongelantes. Los vacíos microscópicos de aire incluido aportan una fuente de alivio a la presión interna dentro del concreto para acomodar las presiones que se desarrollan cuando se forman los cristales de hielo en los poros y en los capilares del concreto. Sin el contenido de aire apropiado en el mortero del concreto, el concreto normal que está expuesto a ciclos de congelación y deshielo, se escamará y/o astillará, dando como resultado una falla en su durabilidad. Sin embargo, debemos ser cuidadosos de no tener demasiado aire incluido en el concreto. En concretos diseñados para alcanzar 20 MPa (203.94 kg/cm<sup>2</sup>) a 35 MPa (356.90 kg/cm<sup>2</sup>), conforme se incrementa el contenido de aire en más de un 5%, habrá una reducción correspondiente en la resistencia del concreto. Típicamente, esta reducción de resistencia será del orden del 3 al 5% por cada 1% de contenido de aire por arriba del valor de diseño. Por ejemplo, un concreto proporcionado para 5% de aire será aproximadamente de 15 al 25% menor en resistencia si el contenido de aire se eleva al 10% (NMX-C-157-ONNCCE-2006).

### **3.1.22 Resistencia a la flexión**

Se determina con frecuencia ensayando un prisma de concreto libremente apoyado, sujeto a una o dos cargas concentradas. La falla es brusca, con una grieta única que fractura al espécimen.

El módulo de ruptura tiene un profundo efecto sobre el potencial de agrietamiento por fatiga de las losas de concreto para cualquier magnitud dada de esfuerzo repetido a la flexión o tensión (Garnica *et al.*, 2002).

### 3.1.23 Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se puede diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad, que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura. La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide ensayando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en megapascales (MPa) en unidades SI, en el caso de México se utiliza las unidades kilogramos por centímetro ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ). Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 17 MPa ( $173.34 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ) para concreto residencial hasta 28 MPa ( $285.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ) y más para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores de 70 MPa ( $713.77 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ). Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada,  $f'_c$  del proyecto. Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros moldeados se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, para programar las operaciones de construcción, tales como remoción de cimbras o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura (ASTM C 31, 2012 y ASTM C 39, 2012).

### **3.1.24 Módulos de elasticidad y de Poisson**

#### **3.1.24.1 Módulo de elasticidad**

Las propiedades elásticas del agregado grueso, son características que interesan en la medida que afectan las correspondientes del concreto endurecido, en particular su módulo de elasticidad y su relación de Poisson. Existe una evidente dependencia del módulo de elasticidad del concreto endurecido del correspondiente módulo de las rocas que constituyen el agregado grueso, su relación no siempre es consistente (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994). Para estimar deformaciones debido a cargas de corta duración, se puede admitir un comportamiento elástico se define un valor de módulo de elasticidad.

El módulo elástico nos mide la relación existente entre el esfuerzo y la deformación unitaria de un material. Debido a que la deformación unitaria no tiene unidades, las unidades del módulo de elasticidad son las mismas que las del esfuerzo  $\text{kg/cm}^2$ , para el concreto varía entre  $E_c = 140,000$  a  $300,000 \text{ kg/cm}^2$ . El módulo de elasticidad es usado por el calculista para determinar las deformaciones de los elementos de las estructuras y para determinar que parte del esfuerzo toma cada material en aquellos elementos que están constituidos por dos materiales diferentes (Fernández, 1992).

Módulos de elasticidad estático o secante es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica. Relación de Poisson es la relación entre las deformaciones transversal y longitudinal al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico (NMX-C-128-ONNCCE-1997)

El concreto tiene una zona elástica aunque no corresponde a una recta por lo que no sigue exactamente la ley de Hooke, pero en los valores que generalmente trabaja se acerca a la recta, por lo que el valor del módulo de elasticidad se toma como la cuerda de dos puntos de la gráfica (Fernández, 1992).

En el análisis mecanicista de pavimentos, el módulo de elasticidad del concreto tiene un fuerte efecto sobre la deflexión del pavimento y los esfuerzos en toda la estructura de pavimento (Garnica *et al.*, 2002).

El módulo de elasticidad del concreto es un parámetro complejo que está influenciado significativamente por el diseño de mezclas, las propiedades del agregado y el modo de prueba. Los parámetros de diseños de mezclas que influyen más fuertemente sobre el módulo de elasticidad incluyen (Mindess *et al.*, 2003):

- Número de aplicaciones de carga
- Frecuencia de carga
- Relación agua cemento
- Propiedades de los agregados
- Tiempo de curado
- Aditivos
- Tipo de ensaye
- Contenido de humedad en el concreto
- Temperatura

Por consiguiente en este trabajo de investigación solo abarco el punto relacionado a las propiedades de los agregados.

Las características de los agregados son importantes en la determinación del módulo de elasticidad del concreto debido a su módulo de elasticidad y su control de la estabilidad volumétrica del concreto (Garnica *et al.*, 2002).

El contenido y el módulo de los agregados están relacionados con los valores de módulos de elasticidad del concreto.

### **3.1.24.2 Módulo de Poisson**

Al someter un cilindro de concreto a cargas de compresión, éste no solo se acorta a lo largo sino que también se expande lateralmente. La proporción de ésta expansión lateral respecto al acortamiento longitudinal se denomina Módulo de Poisson. Su valor varía de aproximadamente 0.11 para concretos de alta resistencia hasta 0.21 para concretos de baja resistencia. En la mayoría de los diseños de concreto reforzado, no se le da ninguna consideración al llamado efecto Poisson. Sin embargo, debería ser considerado en el análisis de diseño de presas de arco, de túneles y de otras estructuras estáticamente indeterminadas.

## **3.2 Análisis de las plantas y métodos de estudio**

Durante el programa de trabajo de la investigación se obtuvieron muestras representativas de cada uno de los agregados fino (arena) y grueso (grava), y del concreto de las 12 plantas en la zona metropolitana de Querétaro. También se realizó una encuesta recopilando los siguientes datos:

- Tipo de cemento utilizado en la planta
- Marca del cemento

- Proveedor del agregado fino
- Banco de procedencia del agregado fino
- Proveedor del agregado grueso
- Banco de procedencia del agregado grueso
- Proveedor del aditivo
- Tipo de aditivo utilizado

### 3.2.1 Recopilación de información en campo

El agregado que se obtuvo se clasificó de acuerdo a la secuencia correspondiente a cada planta y se le asignó un número al agregado (tabla 3.1), debido al alcance de la investigación no se utilizaron los nombres reales de las plantas porque no era el fin de la investigación y solo se deseaba conocer las propiedades físicas y mecánicas de los agregados utilizados así como de su concreto.

**Tabla 3.1 Clasificación de las plantas de concreto**

Planta # 1
Planta # 2
Planta # 3
Planta # 4
Planta # 4
Planta # 6
Planta # 7

Planta # 8
Planta # 9
Planta # 10
Planta # 11
Planta # 12

### **3.2.2 Procedimiento de muestreo**

El muestreo es una fracción representativa del volumen del material pétreo en estudio. Se realizó directamente del material almacenado en la planta. Se tomó al azar porciones aproximadamente iguales de diferentes niveles y directrices. Las muestras simples obtenidas se mezclaron para formar una mezcla compuesta, que fue representativa del material total almacenado. El muestreo correcto es de gran importancia. La reducción de grandes muestras a pequeñas cantidades para las pruebas individuales se realizó cuidando, que las muestras finales sean representativas.

Se ha detectado que los costales que utilizan alguno proveedores de agregados, fueron utilizados para almacenar azúcar por lo cual quedan residuos dentro de ellos. Estas pequeñas cantidades de azúcar se mezclan con la arena y después en el concreto o mortero. La azúcar provoca que los tiempos de fraguado no sean normales, dependiendo de la cantidad de azúcar pueden retrasarse o acelerarse el fraguado (Cemex Concretos, 1993). Por tal motivo se utilizaron costales limpios para su transportación al laboratorio y se evitaron los costales de azúcar.

El equipo necesario para realizar el muestreo de los materiales fue:

- Pala cuadrada de lámina galvanizada.
- Costales de polietileno reforzado con nylon, limpios y resistentes para soportar el contenido y transporte.
- Etiquetas, para la identificación de las muestras obtenidas.
- Guantes de carnaza y botas con casquillo, por seguridad.

### 3.2.3 Identificación del agregado

Las muestras se identificaron mediante etiquetas, cada una engrapada al costal donde se almaceno el material (Figura 3.18). Estas etiquetas contenían la siguiente información:

- Banco de procedencia.
- Proveedor.
- Planta.



Figura 3.18 Etiqueta de identificación del material

### **3.2.4 Transporte y almacenamiento**

Las muestras se transportaron de las plantas de concreto al laboratorio, cuidando su acomodo para evitar golpes, perforaciones, roturas, contaminación, alteración o pérdida de material.

En el laboratorio las muestras, se almacenan acomodando los costales de manera que no puedan sufrir caídas y contaminarse.

### **3.2.5 Características Físico-Mecánicas**

Para conocer las propiedades de cada uno de los agregados muestreados de las diferentes plantas de concreto se realizaron ensayos en el laboratorio. Como primer paso se realizaron pruebas para conocer sus propiedades físicas como son: densidad relativa o masa específica, absorción, pérdida por lavado, módulo de finura, contenido de materia orgánica, granulometría, peso volumétrico seco suelto y compacto, desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles), coeficiente de forma, partículas alargadas y lajeadas (planas), equivalente de arena, sanidad (Intemperismo acelerado) y humedad. De igual manera se realizaron pruebas mecánicas como son: límites líquido, límite plástico (índice plástico) y contracción lineal. Todas estas pruebas ayudaran a conocer el comportamiento de cada uno de los agregados. Las pruebas de los agregados se realizaron en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma de Querétaro y las pruebas de los concretos se realizaron en las plantas de los fabricantes con su equipo de trabajo.

### 3.2.6 Diseño y especificaciones de mezclas de concreto

Los concretos se fabricaron cada uno, con las características de los agregados de las 12 plantas de concreto en la zona metropolitana de Querétaro. La dosificación se realizó con un diseño de mezcla de concreto con los agregados de cada una. Las plantas tienen sus fórmulas de la mezcla de concreto con las características de los agregados.

El diseño de la mezcla estuvo a cargo de cada una de las 12 plantas de concreto, respetando sus fórmulas sin conocer las cantidades utilizadas debido a que se consideran secreto empresarial.

El concreto que se solicitó a las plantas fue el siguiente:

- Elemento: Pavimento.
- Módulo de Ruptura =  $45 \text{ kg/cm}^2$ .
- Resistencia normal a 28 días.
- Tamaño máximo del agregado = Varía en función de la fórmula de cada planta.
- Revenimiento = 10 cm.

El procedimiento de mezclado se realizó de dos diferentes formas, para garantizar la uniformidad en la fabricación de las bachadas y cumplir con las especificaciones:

La 1ª en revolvedora.

- Se humedece la revolvedora.

- Se coloca toda la grava y se añade una parte del agua de mezclado, se hace girar la revolvedora durante un minuto aproximadamente para que se revuelva el agregado.
- Después se coloca el agregado fino y se agrega otra cantidad del agua de mezclado.
- Después se coloca el cemento y se agrega la cantidad restante del agua de mezclado.
- Se mezcla todo durante 3 minutos aproximadamente.
- Se deja reposar la mezcla durante 2 minutos
- Se hace girar la revolvedora durante 2 minutos más.
- Al terminar este último tiempo se vierte el concreto.

La 2ª directamente del camión de la olla revolvedora.

- Se humedece la carretilla
- Se humedece la canaleta de la olla revolvedora
- Se mezcla el concreto durante 5 minutos
- Se vacía el concreto y se proceden a realizar las pruebas.

Posteriormente se realizaron las pruebas al concreto en estado fresco como son: revenimiento, temperatura del concreto, masa unitaria, tiempos de fraguado, contenido de aire y también en estado endurecido como son: resistencia a la flexión, resistencia a compresión y módulos de elasticidad. Las pruebas del concreto se realizaron siguiendo el procedimiento de las normas NMX-ONNCCE, establecidas para cada tipo de pruebas antes mencionadas y en algunos casos se apoyó en las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), además de

normas internacionales como son: *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *American Concrete Institute* (ACI) y *Portland Cement Association* (PCA). Todas las pruebas anteriores serán necesarias para obtener valores de referencia que funcionen de comparativo para evaluar las propiedades del concreto diseñado.

### **3.2.7 Cementos**

Los fabricantes de cemento garantizan que cumplen con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010. La selección del cemento la realizan las plantas de concreto pensando en el precio y la contribución a la resistencia. Para mezclas de concreto de pavimentos, es aconsejable un cemento de alta resistencia, para poder mantener el contenido de cemento en un nivel razonable, disminuyendo los problemas de fisuración térmica por retracción. En el caso para la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga cuentan con un cemento CPC-40, el cual es el adecuado para pavimentos. El cemento es el material más costoso en una mezcla de concreto.

A continuación se muestran los datos obtenidos de la encuesta realizada de las 12 plantas de concreto del tipo y marca del cemento, además los diferentes tipos de aditivos que utilizan.

**Tabla 3.2 Cementos y aditivos utilizados en las 12 plantas de concreto**

<b>Planta No.</b>	<b>Tipo de cemento</b>	<b>Marca del cemento</b>	<b>Proveedor de aditivos</b>	<b>Tipo de aditivo</b>
1	CPC-40	Apasco	Grace	Reductor de agua
2	CPC-40	Cruz Azul	Sika	Reductor de agua de mediano rango
3	CPC-40	Cemex	Sika	Reductor de agua
4	CPC-40	Moctezuma	Grace	Reductor de agua
5	CPC-40	Cemex	Sika	Reductor de agua
6	CPC-40	Cemex	Sika	Reductor de agua
7	CPC-40 RS	Moctezuma	Eucomex y Admix Tech	Reductor de agua y Retardante
8	CPC-40	Apasco	Admix Tech	Reductor de agua
9	CPC-40	Cruz Azul	Admix Tech	Reductor de agua
10	CPC-40	Moctezuma	Delta Master	Reductor de agua
11	CPC-40R	Moctezuma	Sika	Reductor de agua
12	CPC-40	Moctezuma y Cruz Azul	Sika	Reductor de agua

### 3.2.8 Agregados

La selección de los agregados, junto con su proporción es un paso muy crítico en la optimización de mezclas. Las características y proporciones de los agregados en el diseño de la mezcla juegan un papel importante en el contenido de cemento. Cada planta selecciona el agregado de acuerdo a sus características físicas, pero el factor costo juega un papel muy importante debido a que desconocen las ventajas que tienen los agregados de mejores características (físicas y mecánicas), por lo que tendrían reducciones de consumo de cemento y menores costos en la fabricación del concreto.

Se realizó una encuesta para conocer las características de los agregados (arenas y gravas) que utilizan las 12 plantas de concreto. Los datos solicitados fueron los siguientes:

- Proveedor
- Banco de procedencia
- Tipo de arena y grava
- Clasificación petrográfica
- Color
- Tamaño máximo del agregado(caso gravas)

En las tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 están los datos obtenidos de la encuesta realizada.

**Tabla 3.3 Arena #1 utilizada en la fabricación de concreto.**

Planta No.	Arena #1				
	Proveedor	Banco de procedencia	Tipo de Arena	Clasificación Petrográfica	Color
1	Trimcar	Hidalgo	De río	Basalto	Café
2	Los Arcos	Bernal	Triturada	Caliza	Blanco y Gris
3	Tula	Tula	De río	Basalto	Negro
4	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco
5	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Café
6	Los Arcos	Bernal	Triturada	Caliza	Blanco y Gris
7	Trituración de Mármol y Calcio	Acambaro	Triturada	Basalto	Café
8	Tama	San Juan del Río	Triturada	Caliza	Gris
9	La Loma	La Loma	Triturada	Basalto	Gris
10	Triturados Calizas	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco
11	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Negro
12	Corporación del Bajío	El Jovero	Triturada	Basalto	Negro

**Tabla 3.4 Arena #2 utilizada en la fabricación de concreto.**

Planta No.	Arena #2				
	Proveedor	Banco de procedencia	Tipo de Arena	Clasificación Petrográfica	Color
1	Trimcar	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco
2	-----	-----	-----	-----	-----
3	-----	-----	-----	-----	-----
4	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Café
5	-----	-----	-----	-----	-----
6	Los Arcos	Acambaro	Triturada	Basalto	Café
7	Trituración de Mármol y Calcio	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco
8	Tama	Dolores	Triturada	Basalto	Café
9	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Blanco
10	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Gris y Blanco
11	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Gris y Negro
12	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Gris y Blanco

**Tabla 3.5 Grava #1 utilizada en la fabricación de concreto.**

Planta No.	Grava # 1					
	Proveedor de Grava	Banco de procedencia	Tipo de Grava	Clasificación Petrográfica	Color	Tamaño Máximo
1	Trimcar	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco	3/4
2	Los Arcos	Los Arcos	Triturada	Basalto	Gris y Blanco	3/4
3	Cemex	La Loma	Triturada	Basalto	Gris	1 1/2
4	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco y Gris	1 1/2
5	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco y Gris	3/4
6	Cemex	La Loma	Triturada	Basalto	Gris y Negro	3/4
7	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Gris y Negro	3/4
8	Abraham González	La cañada	Triturada	Volcánico	Negro y Gris	3/4
9	La Loma	La Loma	Triturada	Basalto	Gris	1 1/2
10	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco y Gris	3/4
11	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Negro, Marron y Gris	1 1/2
12	Corporación del Bajío	El Jovero	Triturada	Basalto	Gris y Blanco	3/4

**Tabla 3.6 Grava #2 utilizada en la fabricación de concreto.**

Planta No.	Grava # 2					
	Proveedor de Grava	Banco de procedencia	Tipo de Grava	Clasificación Petrográfica	Color	Tamaño Máximo
1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2	Los Arcos	Los Arcos	Triturada	Basalto	Gris	1 1/2
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco y gris	3/4
5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	Vizarrón	Vizarrón	Triturada	Caliza	Blanco y Gris	1 1/2
11	Acambaro	Acambaro	Triturada	Basalto	Blanco y Gris	3/4
12	Corporación del Bajío	El Jovero	Triturada	Basalto	Gris	1 1/2

## **CAPÍTULO IV.- RESULTADOS Y COMENTARIOS**

En este capítulo se hace el análisis de las características físicas y mecánicas de los agregados finos (arena) y gruesos (grava), utilizados en cada una de las 12 plantas de concreto, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas y sus parámetros de referencia de las normativas nacionales e Internacionales.

Se analizó el concreto con cemento Portland en su estado fresco y endurecido, utilizado en pavimentos.

Las características de los materiales se compararon de acuerdo a las especificaciones de los diferentes organismos e instituciones facultadas en el área de pruebas y calidad de los materiales.

#### 4.1 Resultados agregado fino

Los reportes de los resultados de todas las pruebas realizadas a cada uno de los agregados finos se muestran en los anexos de la siguiente manera:

Tabla A-1 Resultados de la planta 1 arena 1.

Tabla A-2 Resultados de la planta 1 arena 2.

Tabla A-3 Resultados de la planta 2 arena 1.

Tabla A-4 Resultados de la planta 3 arena 1.

Tabla A-5 Resultados de la planta 4 arena 1.

Tabla A-6 Resultados de la planta 4 arena 2

Tabla A-7 Resultados de la planta 5 arena 1.

Tabla A-8 Resultados de la planta 6 arena 1.

Tabla A-9 Resultados de la planta 6 arena 2.

Tabla A-10 Resultados de la planta 7 arena 1.

Tabla A-11 Resultados de la planta 7 arena 2.

Tabla A-12 Resultados de la planta 8 arena 1.

Tabla A-13 Resultados de la planta 8 arena 2.

Tabla A-14 Resultados de la planta 9 arena 1.

Tabla A-15 Resultados de la planta 9 arena 2.

Tabla A-16 Resultados de la planta 10 arena 1.

Tabla A-17 Resultados de la planta 10 arena 2.

Tabla A-18 Resultados de la planta 11 arena 1.

Tabla A-19 Resultados de la planta 11 arena 2.

Tabla A-20 Resultados de la planta 12 arena 1.

Tabla A-21 Resultados de la planta 12 arena 2.

Tabla A-39 Resumen de los resultados del agregado fino o arena.

#### 4.1.1 Granulometría

La curva granulométrica se debe alojar dentro de los parámetros establecidos en la norma N.CMT.2.02.002/02 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), de acuerdo a la tabla 4.1:

**Tabla 4.1 Límites granulométricos establecidos en la normativa para el agregado fino en mezclas de concreto.**

Malla		N.CMT.2.02.002/02	
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado	
		Límite Inferior	Límite Superior
3/8"	9.50	0	0
No. 4	4.75	0	5
No. 8	2.36	0	20
No. 16	1.18	15	50
No. 30	0.60	40	75
No. 50	0.30	70	90
No. 100	0.15	90	98
No. 200	0.075	100	100
Pasa No. 200	-----	-----	-----

Se recomienda que el agregado fino se encuentre dentro del intervalo que marca la norma en los tamaños de las partículas, debido a que el empleo de agregados de granulometría continua en el concreto, es beneficioso por economía, trabajabilidad, contracción y durabilidad del concreto.

**Tabla 4.1.1 Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 1 y 2.**

Malla		N.CMT.2.02.002/02		% Retenido acumulado de las diferentes plantas		
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado		Planta 1		Planta 2
		Límite Inferior	Límite Superior	Arena 1	Arena 2	Arena 1
3/8"	9.50	0	0	0.42	0.00	0.00
No. 4	4.75	0	5	8.97	5.65	0.06
No. 8	2.36	0	20	18.93	29.83	19.28
No. 16	1.18	15	50	37.77	54.45	47.32
No. 30	0.60	40	75	62.82	67.97	64.32
No. 50	0.30	70	90	83.86	76.30	74.54
No. 100	0.15	90	98	92.54	82.05	82.04
No. 200	0.075	100	100	94.38	85.63	85.86
Pasa No. 200	-----	-----	-----	100.00	100.00	100.00

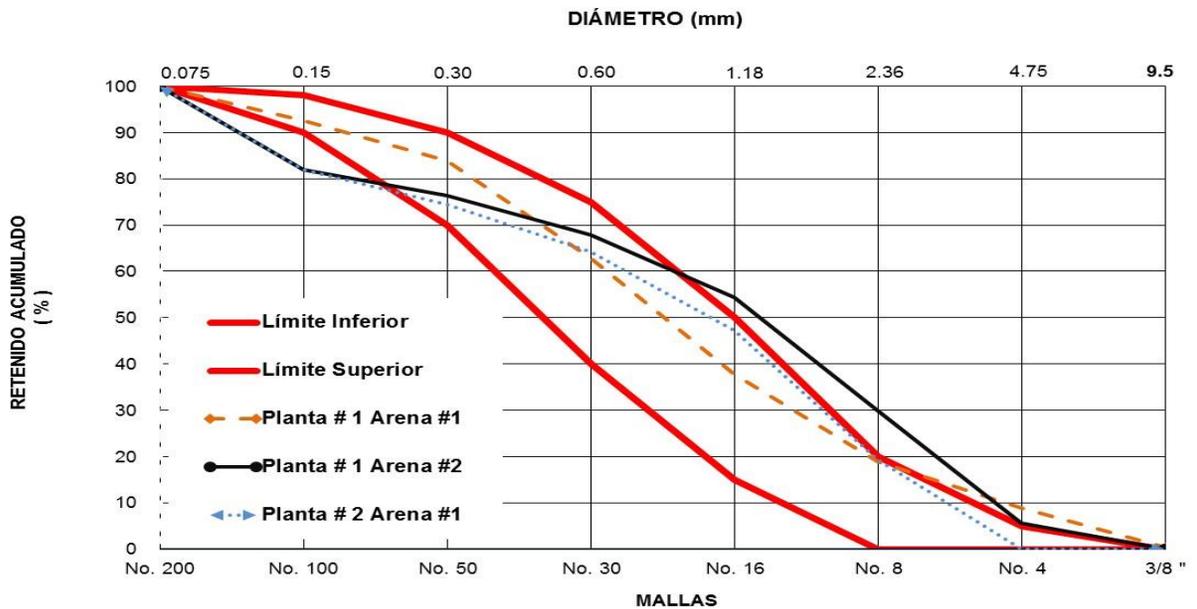
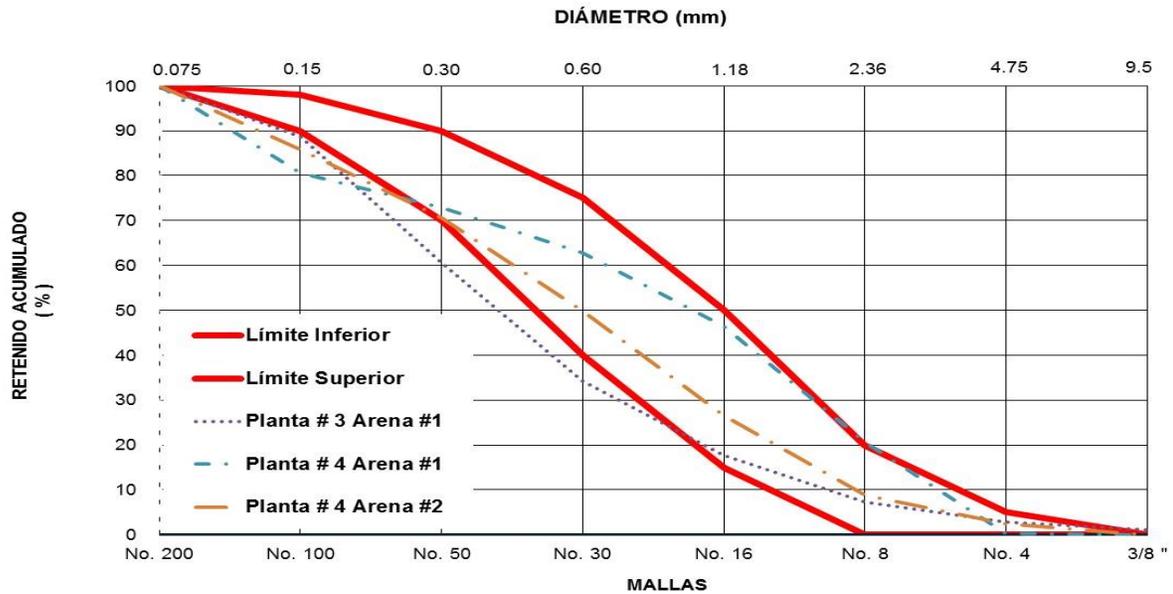


Figura 4.1 Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 1 y 2 en comparación con los límites de la normativa.

**Tabla 4.1.2 Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 3 y 4.**

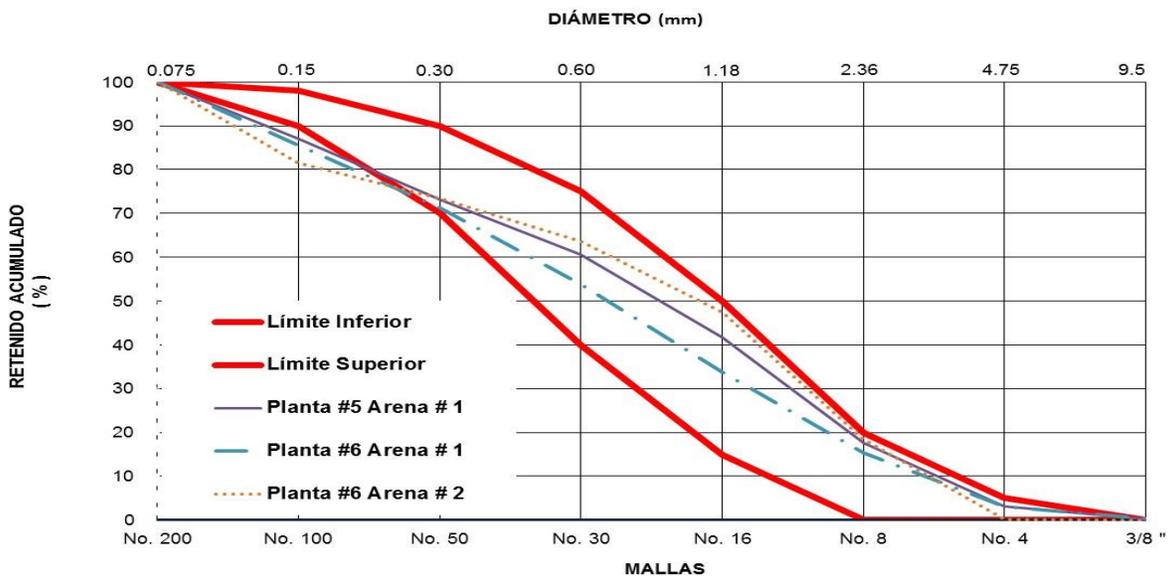
Malla		N.CMT.2.02.002/02		% Retenido acumulado de las diferentes plantas		
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado		Planta 3	Planta 4	
		Límite Inferior	Límite Superior	Arena 1	Arena 1	Arena 2
3/8"	9.50	0	0	1.16	0.00	0.00
No. 4	4.75	0	5	2.80	0.32	2.46
No. 8	2.36	0	20	7.30	20.63	8.82
No. 16	1.18	15	50	17.62	46.50	26.65
No. 30	0.60	40	75	34.22	62.76	49.95
No. 50	0.30	70	90	60.46	72.89	70.52
No. 100	0.15	90	98	88.74	80.52	85.73
No. 200	0.075	100	100	95.30	85.03	92.60
Pasa No. 200	-----	-----	-----	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.2 Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 3 y 4 en comparación con los límites de la normativa.**

**Tabla 4.1.3 Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 5 y 6.**

Malla		N.CMT.2.02.002/02		% Retenido acumulado de las diferentes plantas		
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado		Planta 5	Planta 6	
		Límite Inferior	Límite Superior	Arena 1	Arena 1	Arena 2
3/8"	9.50	0	0	0.24	0.40	0.00
No. 4	4.75	0	5	3.12	3.04	0.24
No. 8	2.36	0	20	17.62	15.40	18.40
No. 16	1.18	15	50	41.71	33.70	47.32
No. 30	0.60	40	75	60.59	53.86	63.66
No. 50	0.30	70	90	73.09	71.34	73.36
No. 100	0.15	90	98	86.97	85.52	81.48
No. 200	0.075	100	100	93.24	90.94	85.16
Pasa No. 200	-----	-----	-----	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.3 Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 5 y 6 en comparación con los límites de la normativa.**

**Tabla 4.1.4 Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 7 y 8.**

Malla		N.CMT.2.02.002/02		% Retenido acumulado de las diferentes plantas			
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado		Planta 7		Planta 8	
		Límite Inferior	Límite Superior	Arena 1	Arena 2	Arena 1	Arena 2
3/8"	9.50	0	0	0.00	0.00	0.00	3.81
No. 4	4.75	0	5	1.26	0.00	1.08	11.94
No. 8	2.36	0	20	6.26	22.46	23.63	19.77
No. 16	1.18	15	50	19.48	52.44	52.62	35.33
No. 30	0.60	40	75	42.98	70.14	66.60	57.28
No. 50	0.30	70	90	67.38	80.24	74.35	74.47
No. 100	0.15	90	98	83.00	87.30	80.60	84.19
No. 200	0.075	100	100	92.11	90.08	84.49	88.65
Pasa No. 200	-----	-----	-----	100.00	100.00	100.00	100.00

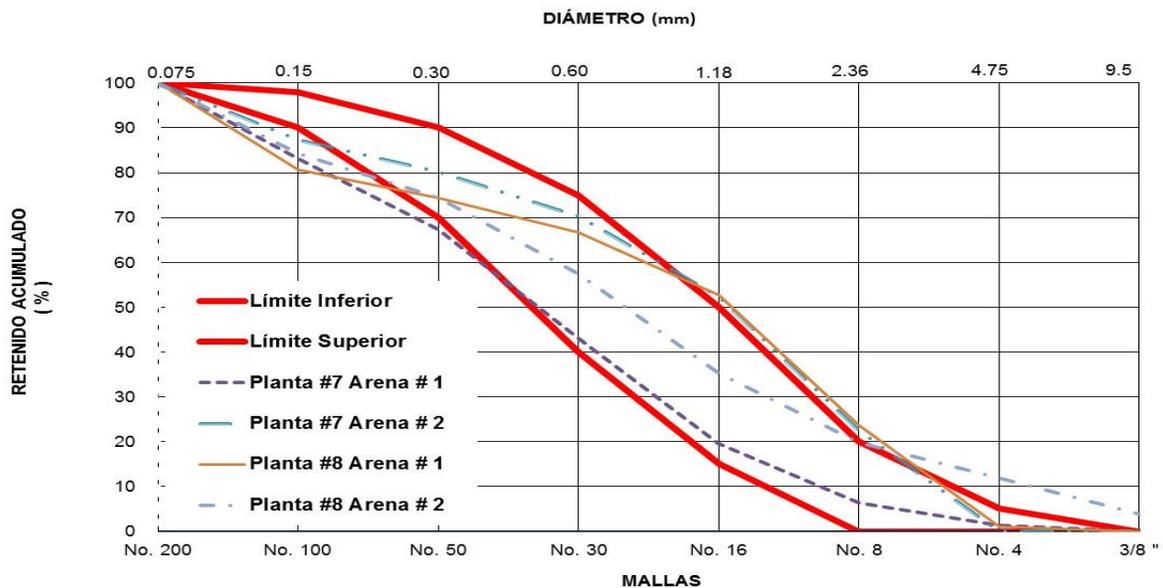


Figura 4.4 Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 7 y 8 en comparación con los límites de la normativa.

**Tabla 4.1.5 Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 9 y 10.**

Malla		N.CMT.2.02.002/02		% Retenido acumulado de las diferentes plantas			
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado		Planta 9		Planta 10	
		Límite Inferior	Límite Superior	Arena 1	Arena 2	Arena 1	Arena 2
3/8"	9.50	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
No. 4	4.75	0	5	0.90	1.36	2.74	2.75
No. 8	2.36	0	20	10.06	25.18	31.09	9.91
No. 16	1.18	15	50	28.34	51.24	58.86	26.87
No. 30	0.60	40	75	49.38	64.72	73.56	50.06
No. 50	0.30	70	90	68.90	72.34	81.61	70.83
No. 100	0.15	90	98	84.14	77.84	86.84	86.35
No. 200	0.075	100	100	89.20	81.32	89.35	93.05
Pasa No. 200	-----	-----	-----	100.00	100.00	100.00	100.00

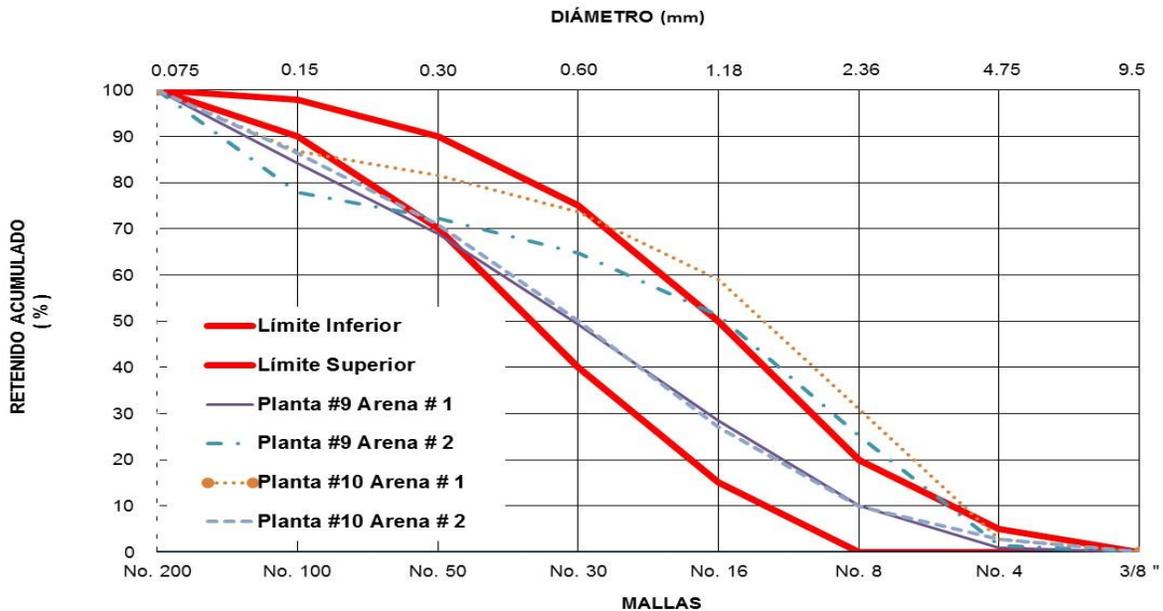


Figura 4.5 Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 9 y 10 en comparación con los límites de la normativa.

**Tabla 4.1.6 Granulometría de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto 11 y 12.**

Malla		N.CMT.2.02.002/02		% Retenido acumulado de las diferentes plantas			
Número	Diámetro (mm)	% Retenido acumulado		Planta 11		Planta 12	
		Límite Inferior	Límite Superior	Arena 1	Arena 2	Arena 1	Arena 2
3/8"	9.50	0	0	0.00	0.86	0.00	0.14
No. 4	4.75	0	5	1.64	4.12	7.21	4.03
No. 8	2.36	0	20	14.58	13.72	39.28	16.19
No. 16	1.18	15	50	37.44	32.56	66.06	40.43
No. 30	0.60	40	75	57.22	55.08	79.68	62.45
No. 50	0.30	70	90	71.78	74.74	86.60	78.82
No. 100	0.15	90	98	82.38	89.32	90.74	90.09
No. 200	0.075	100	100	86.96	93.80	92.63	94.87
Pasa No. 200	-----	-----	-----	100.00	100.00	100.00	100.00

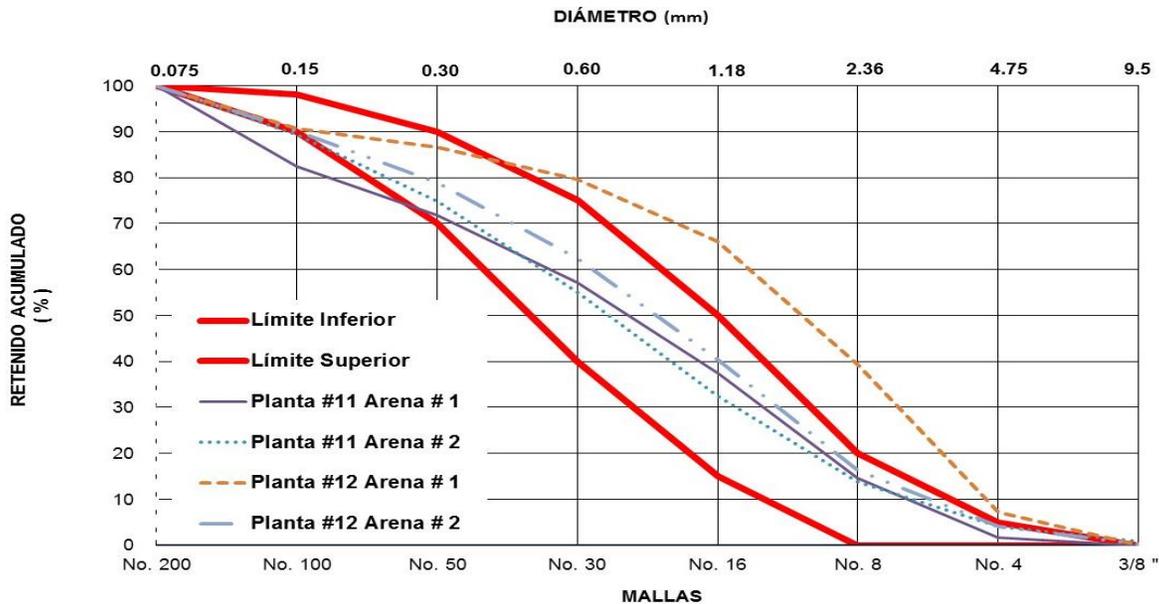


Figura 4.6 Curva granulométrica del agregado fino de las plantas 11 y 12 en comparación con los límites de la normativa.

Un requisito de la norma ASTM C 33 (2013) es que del 70% al 90% se retenga por la malla No. #50 (0.30 mm) y la No. #100 (0.15 mm) debido a que afecta la trabajabilidad, la textura superficial y el sangrado del concreto.

Se observó en la figura 4.1 la granulometría de la planta 1 arena 1, tiene un pequeño exceso de partículas en la malla No. #4 (4.75 mm), sin embargo el resto del material está dentro de los límites de la curva granulométrica; por su parte la misma planta 1 arena 2 presenta un exceso de partículas retenidas en las mallas No. #8 (2.36 mm) y No. #16 (1.18 mm) y al mismo tiempo tiene una deficiencia en la malla No. #100 (0.15 mm), y en este sentido es sobresaliente el enfatizar que la planta 1 mezcla sus dos arenas al realizar el concreto para un pavimento, por lo que se complementan una con otra. Continuando con la figura 4.1, la planta 2 arena 1, está dentro de los límites de la curva que establece la normativa SCT y solo presenta una deficiencia en la malla No. #100 (0.15 mm).

Se analizó que en la en la figura, 4.2 la planta 3 arena 1, tiene una carencia de material retenido desde la malla No. #30 (0.60 mm) hasta la malla No. #200 (0.075 mm) debido a que está fuera del límite inferior. La planta 4 arena 1 y 2, presentan una falta de material retenido después de la malla No. #50 (0.30 mm).

Se examinó en la figura 4.3 la planta 5 arena 1, planta 6 arena 1 y 2; están fuera del límite inferior de la normativa SCT, después de la malla No. #50 (0.30 mm) hasta la No. #200 (0.075 mm).

Se analizó la figura 4.4 y la planta 7 arena 1 está pegada al límite inferior de la curva de la normativa SCT, sin embargo la arena 2 está cerca al límite superior, por lo tanto la combinación de estas dos arenas se acomodan a la curva granulométrica, debido a que las deficiencias de la arena 1 están cubiertas por la arena 2 y así respectivamente. Por su parte la planta 8 arena 1 y 2 sucede el mismo

caso en que una arena es más gruesa que la otra y por consiguiente ambas son complementarias.

En la figura 4.5 se observó la planta 9 arena 1 y la planta 10 arena 2 están dentro de la curva granulométrica sin embargo tiene una pequeña deficiencia de la malla No. #50 (0.30 mm) hasta la malla No. #200 (0.075 mm). Por su parte la planta 10 arena 1 está por arriba del límite superior teniendo un excedente desde la malla No. #4 (4.75 mm) hasta la malla No. #30 (0.60 mm). Al mismo tiempo la planta 9 arena 2 está un poco arriba del límite superior desde la malla No. #4 (4.75 mm) hasta la malla No. #16 (1.18 mm).

Por último, se mostró en la figura 4.6, la planta 11 arena 1 está dentro de los parámetros pero tiene un déficit desde la malla No. #50 (0.30 mm) hasta la malla No. #200 (0.075 mm) y por el contrario la planta 12 arena 2 tiene un exceso de partículas y están fuera del límite superior, por lo que es una arena gruesa. Por otra parte la planta 11 arena 2 y la planta 12 arena 2, cumplen dentro de las curvas superior e inferior por la normativa SCT y se recomiendan para pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.1.2 Módulo de finura**

El módulo de finura es un índice de la finura del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura, en el agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto (ASTM C 125, 2013).

**Tabla 4.1.7 Módulo de finura de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Módulo de finura (Adim)	NMX-C-111-ONNCE-2004
			N.CMT.2.02.002/02
1	1	3.0	Las dos normativas SCT y NMX establecen un valor de 2.3 hasta 3.2 para el módulo de finura.
	2	3.1	
2	1	2.8	
3	1	2.1	
4	1	2.8	
	2	2.4	
5	1	2.8	
6	1	2.6	
	2	2.8	
7	1	2.2	
	2	3.1	
8	1	2.9	
	2	2.8	
9	1	2.4	
	2	2.9	
10	1	3.3	
	2	2.4	
11	1	2.6	
	2	2.7	
12	1	3.7	
	2	2.9	

El módulo de finura sirve para medir variaciones ligeras y es un posible indicador del comportamiento del agregado en la mezcla de concreto. Las normas NMX-C-111-ONNCE-2004 y la N.CMT.2.02.002/02 (2002) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), coinciden en que el módulo de finura deberá estar comprendido entre 2.30 y 3.20, con una tolerancia de variación de dos décimas 0.2 en más o en menos. El módulo de finura es un valor útil en la elaboración de pavimentos de concreto con cemento Portland, está relacionado a la granulometría pero es más significativo en las arenas porque es un parámetro

utilizado en el diseño de mezclas de concreto ya que el consumo de cemento que se emplea depende del tamaño de las arenas.

Los módulos observados en la tabla 4.1.7, muestran que la planta 12 banco 1 tiene un valor de 3.7 y está fuera del límite superior de  $3.2 \pm 0.2$  que establecen las dos normativas (SCT y NMX); demostrando que la arena es demasiado gruesa por lo que produce problemas en la mezcla de concreto como sangrado y segregación. Por lo que puede ocasionar mayores consumos de cemento e incrementar los costos del concreto.

El resto de las plantas se encuentra dentro de los rangos de las dos normativas y son agregados convenientes para ser utilizados en pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.1.3 Peso Volumétrico**

El peso volumétrico seco suelto y compacto (también llamado peso unitario o densidad en masa) aproximado de un agregado usado en concreto varía aproximadamente entre los valores de  $1200 \text{ kg/m}^3$  y  $1760 \text{ kg/m}^3$ , la normativa NMX-C-073-ONNCCE-2004 y la normativa internacional ASTM C 29 (2009), establecen los valores además que es un valor importante porque es utilizado para el diseño de la mezcla y el peso unitario del concreto.

**Tabla 4.1.8 Peso volumétrico seco suelto y compacto de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Peso volumétrico seco suelto (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso volumétrico seco compacto (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	1	1,345	1,555
	2	1,555	1,850
<b>2</b>	1	1,403	1,688
<b>3</b>	1	1,438	1623
<b>4</b>	1	1,555	1,892
	2	1,303	1,513
<b>5</b>	1	1,255	1,358
<b>6</b>	1	1,224	1,474
	2	1,581	1,831
<b>7</b>	1	1,649	1,878
	2	1,581	1,902
<b>8</b>	1	1,786	1,871
	2	1,324	1,513
<b>9</b>	1	1,295	1,474
	2	1,603	1,820
<b>10</b>	1	1,555	1,850
	2	1,282	1,513
<b>11</b>	1	1,349	1,509
	2	1,224	1,474
<b>12</b>	1	1,408	1,702
	2	1,261	1,471

Los valores del peso volumétrico seco suelto y compacto se compararon con los parámetros recomendados. Ninguna de las plantas en la tabla 4.1.8, está por debajo de los límites de los pesos volumétricos y son arenas convenientes para el uso de concretos para pavimentos con cemento Portland.

#### 4.1.4 Pérdida por lavado

La pérdida por lavado se llama así a todo aquel material consistente en arcilla, limo y polvo de trituración cuyo tamaño es menor de la malla No. #200 (0.075 mm).

**Tabla 4.1.9 Pérdida por lavado de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Pérdida por lavado (%)
1	1	5
	2	13
2	1	13
3	1	4
4	1	13
	2	6
5	1	7
6	1	8
	2	14
7	1	8
	2	9
8	1	15
	2	10
9	1	9
	2	17
10	1	9
	2	5
11	1	12
	2	5
12	1	6
	2	4

Los efectos negativos en el concreto son:

- Aumento en el consumo de agua.
- Disminución de resistencia.
- Incrementa la contracción.
- Interferencia en la adherencia entre el agregado y la pasta.

La norma NMX-C-111-ONNCCE-2004 establece los valores para la pérdida por lavado para arena triturada de 5% para concretos expuestos a la abrasión y 7% para concretos no expuestos a la abrasión. Para el caso de arena natural se utiliza un 3% para concreto expuesto y 5% para concreto no expuesto a la abrasión.

Para las arenas trituradas en la tabla 4.1.9, las siguientes plantas no cumplen con el rango de 5%: la planta 1 arena 2, planta 2 arena 1, planta 4 arena 1 y 2, planta 5 arena 1, planta 6 arena 1 y 2, planta 7 arena 1 y 2, planta 8 arena 1, planta 9 arena 1 y 2, planta 10 arena 1 y la planta 11 arena 1. La planta 9 arena 2 tiene el valor más alto con 17 % los problemas que presentarían son: retardo de fraguado debido a las cantidades tan altas de arcillas o limos presentes en la mezcla de concreto, contracción plástica, mayores requerimientos de agua lo que ocasionaría diferencias en la resistencia debido a la relación agua/cemento y un incremento en los costos de elaboración de la mezcla de concreto debido al cambio de la relación agua/cemento, por lo que se tendría que aumentar la cantidad de cemento requerida.

Para el caso de arenas naturales presentadas en la tabla 4.1.9: la planta 1 banco 1 y la planta 3 banco 1 están dentro del rango de 3% hasta 5% pero ninguna de las dos plantas cumplen con el valor de de 3% para pavimentos, pero la planta 8 banco 1 tiene el valor más alto para arenas naturales con 10%, lo que podrían ocasionar los problemas antes mencionados.

Por último, es conveniente enfatizar que la planta 3 banco 1, planta 10 banco 2 y la planta 12 banco 1 y 2; están dentro de la tolerancia que marca la normativa para la prueba y se recomiendan para el uso de pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### 4.1.5 Densidad relativa o masa específica.

La densidad relativa o masa específica de un material sólido es la razón entre su masa y la masa de un volumen igual de agua. Es una prueba muy importante para el diseño de mezclas de concreto y para el cálculo de consumo de materiales; nos proyecta un dato útil para saber si son materiales débiles y porosos. Los resultados de la densidad del agregado fino son mayores que el agregado grueso debido a la relación entre masas de los dos agregados. El agregado fino es proporcionalmente más grande que el agregado grueso debido a que tiene una mayor compactación y menos espacio de vacíos, lo cual hace que aumente su densidad. A continuación se presentan los valores de densidad relativa o masa específica de los distintos materiales en estudio en la tabla 4.1.10.

**Tabla 4.1.10 Densidad relativa o masa específica de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Densidad relativa o masa específica (kg/m <sup>3</sup> )
1	1	2,326
	2	2,183
2	1	2,500
3	1	2,381
4	1	2,232
	2	2,222
5	1	2,137
6	1	2,460
	2	2,632
7	1	2,283
	2	2,273
8	1	2,439
	2	2,520
9	1	2,564
	2	2,326
10	1	2,128
	2	2,550
11	1	2,174
	2	2,591
12	1	2,128
	2	2,500

Las densidades para los agregados dependen de la clase de roca para el caso de las **calizas** son de 2400 kg/m<sup>3</sup> hasta 2800 kg/m<sup>3</sup> y para **basaltos** es de 2500 kg/m<sup>3</sup> hasta 2900 kg/m<sup>3</sup>; para las dos clases de rocas los rangos son para un concreto normal (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994). Se tomaron estos dos valores para las clases de rocas debido a que son las que se utilizan y predominan en el estado de Querétaro.

Los agregados finos o arenas que no cumplen con el valor mínimo (2500 kg/m<sup>3</sup>) para agregados de basalto son: la planta 1 arena 1, planta 3 arena 1, planta 4 arena 2, planta 5 arena 1, planta 7 arena 1, planta 9 arena 2, planta 11 arena 1 y la planta 12 arena 1. Para el caso de agregados de caliza (2400 kg/m<sup>3</sup>) los agregados finos o arenas que no cumplieron son: planta 1 arena 2, planta 4 arena 1, planta 7 arena 2 y la planta 10 arena 1.

Los agregados finos o arenas que si cumplen para agregados de basalto son: planta 6 arena 2, planta 8 arena 2, planta 9 arena 1, planta 10 arena 2, planta 11 arena 2 y la planta 12 arena 2. En el caso de agregados de caliza, los agregados fino o arenas que cumplen son: planta 2 arena 1, planta 6 arena 1 y planta 8 arena 1.

#### **4.1.6 Absorción**

La Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), recomienda que la absorción no debe exceder el 5%, con una tolerancia de 0.3. Es un dato importante en el diseño de mezclas, determina la cantidad de agua en el concreto y se pueda determinar los pesos correctos.

Los problemas que pueden ocasionar valores altos de absorción están relacionados con la contracción plástica, pérdida de revenimiento y durabilidad;

factores muy importantes en los pavimentos de concreto. Por otra parte la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), menciona que una absorción demasiado alta en los agregados, no es una característica penalizable por sí misma, pero puede ser indicio de un desempeño inadecuado en el concreto. La tabla 4.1.11 contiene los porcentajes de absorción de los materiales estudiados:

**Tabla 4.1.11 Absorción de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Absorción (%)</b>
<b>1</b>	1	4.7
	2	5.0
<b>2</b>	1	2.9
<b>3</b>	1	4.1
<b>4</b>	1	4.8
	2	4.8
<b>5</b>	1	2.8
<b>6</b>	1	3.3
	2	1.5
<b>7</b>	1	5.2
	2	3.3
<b>8</b>	1	3.2
	2	2.6
<b>9</b>	1	2.6
	2	4.1
<b>10</b>	1	5.9
	2	2.6
<b>11</b>	1	5.7
	2	2.4
<b>12</b>	1	5.2
	2	2.8

Los agregados finos de la planta 1 banco 2, la planta 7 banco 1 y la planta 12 banco 1; están un poco altos sus valores pero dentro de la tolerancia; sin embargo la planta 10 banco 1 y la planta 11 banco 1, están fuera de la tolerancia lo que puede ocasionar mayor demanda de agua y cambiar las relaciones agua/cemento.

#### 4.1.7 Equivalente de Arena

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en el agregado fino o arena. La norma NMX-C-416-ONNCCE-2003 la define como la relación volumétrica de las partículas de tamaño mayor que el de las arcillas o polvos finos y el agregado fino que pasa por la malla No. #4 (4.74 mm). El valor mínimo para la prueba es de 80% para pavimentos y tiene una inmediata ocurrencia en la retracción del concreto; pueden provocar presencia de fisuras tanto en el interior como en la superficie. Los resultados de las pruebas de equivalente de arena obtenidos en las muestras se muestran a continuación en la tabla 4.1.12:

**Tabla 4.1.12 Equivalente de arena de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Equivalente de Arena (%)
1	1	59
	2	63
2	1	56
3	1	85
4	1	44
	2	77
5	1	70
6	1	73
	2	63
7	1	81
	2	80
8	1	64
	2	37
9	1	83
	2	46

<b>10</b>	1	67
	2	80
<b>11</b>	1	52
	2	76
<b>12</b>	1	69
	2	76

Las arenas que no cumplen con el valor mínimo de 80% son: planta 1 banco 1 y 2, planta 2 banco 1, planta 4 banco 1 y 2, planta 5 banco 1, planta 6 banco 1 y 2, planta 8 banco 1 y 2, planta 9 banco 2, planta 10 banco 1, planta 11 banco 1 y 2, y planta 12 banco 1 y 2. La mayoría de las arenas no cumplen con el mínimo, por lo que están representando una proporción de arena baja y existe una mayor proporción de finos en el total del agregado, teniendo un efecto de retracción y podrían presentarse fallas de adherencia entre la pasta de cemento y los agregados ocasionando una disminución de resistencia, entre otros efectos.

Las arenas que si cumplen son: planta 3 banco 1, planta 7 banco 1 y 2, planta 9 banco 1 y planta 10 banco 2; con el mínimo establecido y son recomendables para pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.1.8 Contenido de materia orgánica**

La materia orgánica que contamina los agregados suele hallarse principalmente en forma humus, fragmentos de raíces y plantas, y trozos de madera. La contaminación excesiva con estos materiales, básicamente en la arena, ocasiona interferencia en el proceso normal de hidratación del cemento, afectando la resistencia a la durabilidad del concreto (Comisión Federal de Electricidad, sección

1, 1994). La prueba de contenido de materia orgánica, es la mejor manera de hacer una evaluación rápida y sencilla para aceptar o rechazar un agregado fino.

La materia orgánica ocasiona problemas en el concreto como son: impide la reacción química entre el cemento y el agua, afecta el tiempo de fraguado y puede causar deterioros en la estructura (losa del pavimento).

**Tabla 4.1.13 Contenido de materia orgánica de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Colorimetría
1	1	Nula o poca presencia de materia orgánica
	2	
2	1	
3	1	
4	1	
	2	
5	1	
6	1	
	2	
7	1	
	2	
8	1	
	2	
9	1	
	2	
10	1	
	2	
11	1	
	2	
12	1	
	2	

Como se observa en la tabla 4.1.13 todos los agregados finos o arenas tienen nula o poca presencia de materia orgánica, por lo que se recomiendan para la utilización de mezclas para pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### 4.1.9 Plasticidad

En la tabla 4.1.14 se muestran los porcentajes de contracción lineal, límite líquido, índice plástico y de porcentaje de finos que pasa la malla No. #200 (0.075 mm) de las arenas estudiadas.

**Tabla 4.1.14 Límite líquido, índice plástico y contracción lineal de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Contracción lineal (%)	Límite Líquido (%)	Índice plástico (%)	Porcentaje que pasa la malla No. #200 (0.075 mm) (%)
1	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	5
	2	No presenta	12.3	No Plástico	14
2	1	No presenta	15.90	No Plástico	14
3	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	4
4	1	No presenta	18.1	No Plástico	14
	2	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	7
5	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	6
6	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	9
	2	No presenta	13.7	No Plástico	14
7	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	7
	2	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	9

<b>8</b>	1	No presenta	17.10	No Plástico	15
	2	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	11
<b>9</b>	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	10
	2	No presenta	21.3	No Plástico	18.68
<b>10</b>	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	10
	2	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	6
<b>11</b>	1	No presenta	16.2	No Plástico	13
	2	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	6
<b>12</b>	1	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	7
	2	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	5

Los valores obtenidos en las pruebas de contracción lineal e índice plástico manifiestan que los materiales no afectaran de manera directa la mezcla de concreto ante los cambios de saturación; por otra parte la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) establece un valor máximo del 3% para agregados triturados, los problemas que pueden ocasionar los valores altos del porcentaje que pasa la malla No. #200 (0.075 mm) son: contracción plástica, mayor requerimiento de agua, cambios volumétricos y bajas resistencias de compresión y tensión.

Todos los agregados finos o arenas exceden el valor del 3%, y la planta con el valor más alto es la planta 9 banco 2 con 18 %.

#### **4.1.10 Humedad**

El agregado contiene una cantidad de agua al momento de efectuar la determinación de su masa, para el diseño de la mezcla y puede estar constituida

por el agua superficial y la absorbida. Los agregados se encuentran expuestos a la intemperie, a las acciones del aire y del agua, por este motivo contienen cierta cantidad de agua en sus partículas, considerando esto último como la humedad de los agregados. Esta prueba se lleva a cabo antes de hacer una mezcla de concreto, con el fin de hacer los ajustes en la cantidad de agua de mezclado. Se debe ajustar a las condiciones de humedad los agregados. Los resultados de las humedades obtenidas se muestran en la tabla 4.1.15

**Tabla 4.1.15 Humedad de los agregados finos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Humedad del agregado fino (%)</b>
<b>1</b>	1	0.2
	2	1.2
<b>2</b>	1	3.9
<b>3</b>	1	0.6
<b>4</b>	1	1.8
	2	2.4
<b>5</b>	1	1.4
<b>6</b>	1	1.0
	2	2.8
<b>7</b>	1	2.6
	2	0.2
<b>8</b>	1	1.0
	2	0.6
<b>9</b>	1	0.8
	2	0.2
<b>10</b>	1	0.4
	2	3.7
<b>11</b>	1	2.6
	2	4.1
<b>12</b>	1	0.8
	2	0.2

La mayoría de los agregados finos presentó una humedad pequeña, por lo que la prueba solo representa un indicador para conocer la cantidad de agua que se le agregará o retendrá en el diseño de la mezcla de concreto.

## **4.2 Resultados del agregado grueso**

Los reportes de los resultados de todas las pruebas realizadas a cada uno de los agregados gruesos se muestran en los anexos de la siguiente manera:

- Tabla A-22 Resultados de la grava en la planta 1 banco 1.
- Tabla A-23 Resultados de la grava en la planta 2 banco 1.
- Tabla A-24 Resultados de la grava en la planta 2 banco 2.
- Tabla A-25 Resultados de la grava en la planta 3 banco 1.
- Tabla A-26 Resultados de la grava en la planta 4 banco 1.
- Tabla A-27 Resultados de la grava en la planta 4 banco 2.
- Tabla A-28 Resultados de la grava en la planta 5 banco 1.
- Tabla A-29 Resultados de la grava en la planta 6 banco 1.
- Tabla A-30 Resultados de la grava en la planta 7 banco 1.
- Tabla A-31 Resultados de la grava en la planta 8 banco 1.
- Tabla A-32 Resultados de la grava en la planta 9 banco 1.
- Tabla A-33 Resultados de la grava en la planta 10 banco 1.
- Tabla A-34 Resultados de la grava en la planta 10 banco 2.
- Tabla A-35 Resultados de la grava en la planta 11 banco 1.
- Tabla A-36 Resultados de la grava en la planta 11 banco 2.
- Tabla A-37 Resultados de la grava en la planta 12 banco 1.
- Tabla A-38 Resultados de la grava en la planta 12 banco 2.
- Tabla A-340 Resumen de los resultados del agregado grueso o arena.

### 4.2.1 Granulometría

La granulometría o composición granulométrica es un término usado para describir la distribución de tamaños de las partículas que constituye un agregado. Los resultados de la granulometría en el agregado grueso o grava indican:

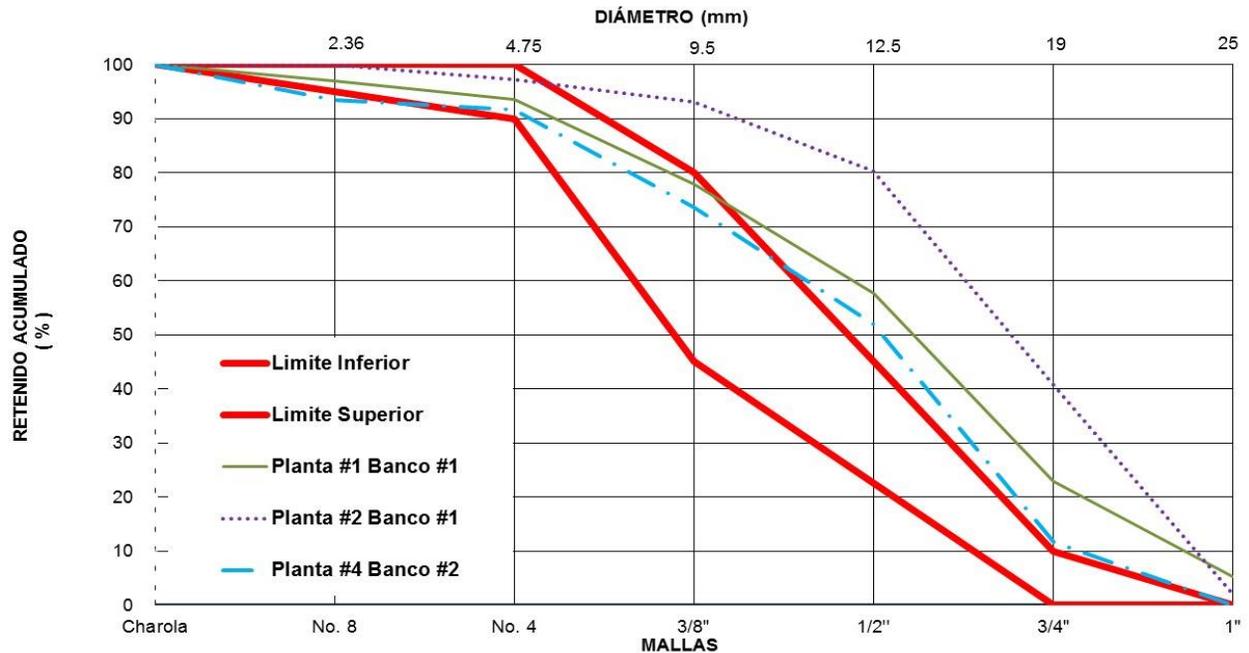
- Si los materiales cumplen con las especificaciones.
- El material más adecuado para el diseño de mezclas de concreto.
- Las variaciones en los tamaños del agregado.

El tamaño máximo del agregado que se utiliza en el concreto tiene su fundamento en la economía. En agregados de menor tamaño se necesita más agua y cemento que para agregados de tamaño mayor. El tamaño máximo del agregados que puede ser empleado depende del elemento de concreto, cantidad y distribución de acero de refuerzo.

Se realizó la prueba de granulometría en las gravas, utilizadas en las 12 plantas de concreto y se graficaron las curvas granulométricas. Se comparó con la norma N-CMT-2-02-002/02 (2002), de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004; para los tamaños de 5 mm–20 mm y se muestran en las figuras: 4.7, 4.8, 4.9 y en las las tablas: 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3. Para las gravas con tamaño de 5 mm–40 mm, se muestra en las figuras: 4.2.4 y 4.2.5; y en las tablas 4.10 y 4.11.

**Tabla 4.2.1 Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 20 mm utilizados en las plantas de concreto 1,2 y 4 en estudio.**

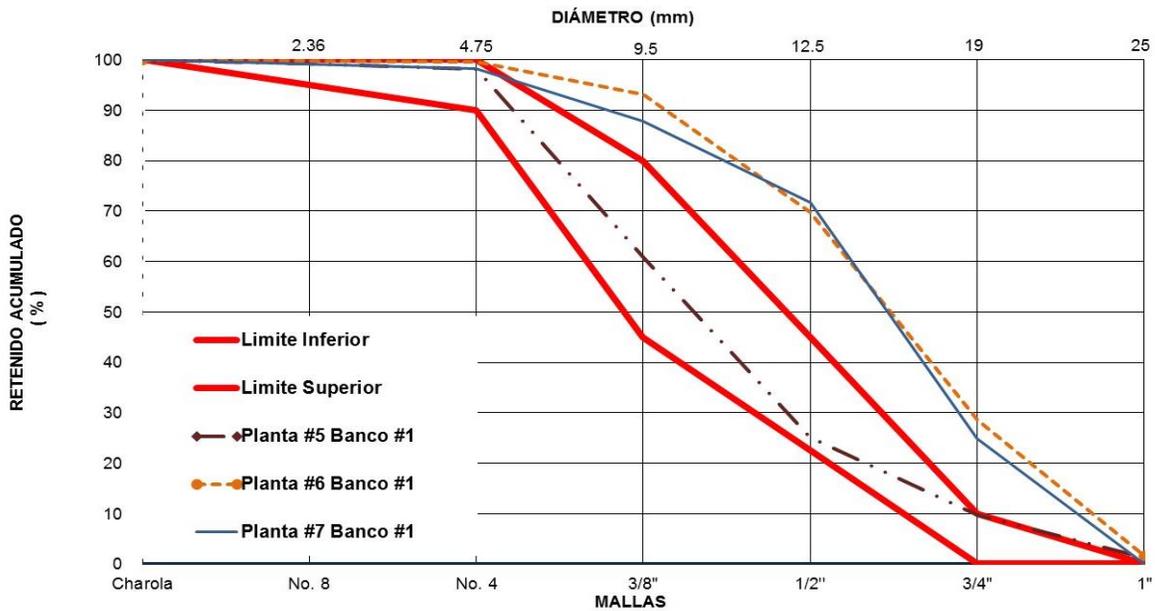
Malla		% Retenido acumulado		% Retenido acumulado de las diferentes plantas		
Número	Diámetro (mm)	Límite Inferior	Límite Superior	Planta 1	Planta 2	Planta 4
				Banco 1	Banco 1	Banco 2
1"	25	0	0	5.34	2.00	0.00
3/4"	19	0	10	22.99	40.67	11.72
1/2"	12.5	22.5	45	57.63	80.23	52.01
3/8"	9.5	45	80	77.84	93.15	73.66
No. 4	4.75	90	100	93.54	97.18	91.57
No. 8	2.36	95	100	96.91	99.92	93.43
Charola	-----	100	100	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.7 Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 1, 2 y 4 en comparación con los límites de la normativa.**

**Tabla 4.2.2 Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 20 mm utilizados en las plantas de concreto 5, 6 y 7 en estudio.**

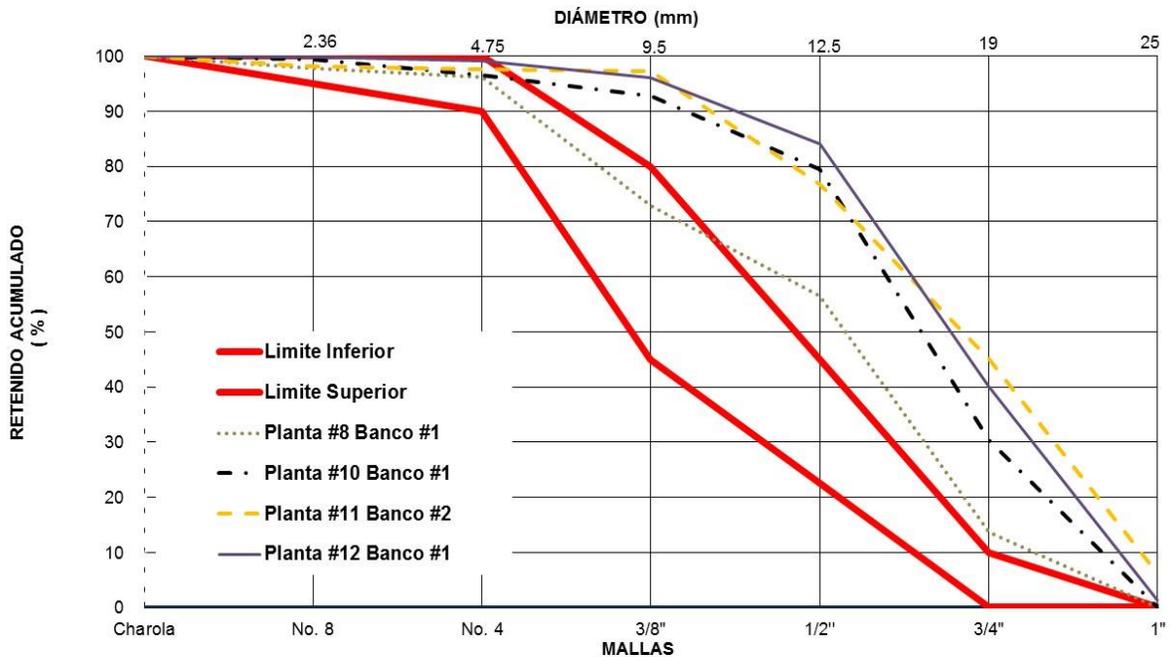
Malla		% Retenido acumulado		% Retenido acumulado de las diferentes plantas		
Número	Diámetro (mm)	Límite Inferior	Límite Superior	Planta 5	Planta 6	Planta 7
				Banco 1	Banco 1	Banco 1
1"	25	0	0	1.52	1.56	0.00
3/4"	19	0	10	30.41	28.45	24.85
1/2"	12.5	22.5	45	73.06	69.74	71.60
3/8"	9.5	45	80	90.03	93.22	87.76
No. 4	4.75	90	100	97.83	99.54	98.17
No. 8	2.36	95	100	99.04	99.80	99.17
Charola	-----	100	100	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.8 Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 5, 6 y 7 en comparación con los límites de la normativa.**

**Tabla 4.2.3 Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 20 mm utilizados en las plantas de concretos 8, 10, 11 y 12 en estudio.**

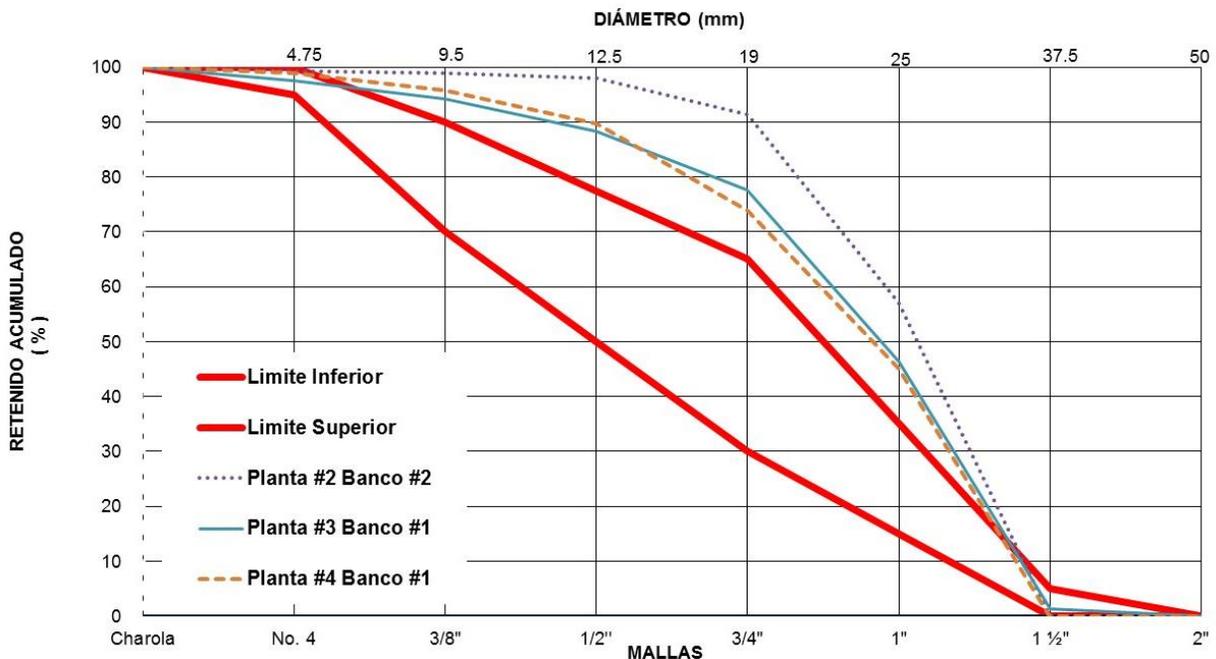
Malla		% Retenido acumulado		% Retenido acumulado de las diferentes plantas			
Número	Diámetro (mm)			Planta 8 Banco 1	Planta 10 Banco 1	Planta 11 Banco 2	Planta 12 Banco 1
		Límite Inferior	Límite Superior				
1"	25	0	0	0.00	0.00	6.17	1.37
3/4"	19	0	10	13.72	30.28	45.09	40.06
1/2"	12.5	22.5	45	56.57	79.50	76.83	84.11
3/8"	9.5	45	80	72.89	92.83	97.33	96.13
No. 4	4.75	90	100	96.12	96.50	97.55	99.11
No. 8	2.36	95	100	97.85	99.44	98.14	99.85
Charola	-----	100	100	100.00	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.9 Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 8, 10, 11 y 12 en comparación con los límites de la normativa.**

**Tabla 4.2.4 Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 40 mm utilizados en las plantas de concretos 2, 3 y 4 en estudio.**

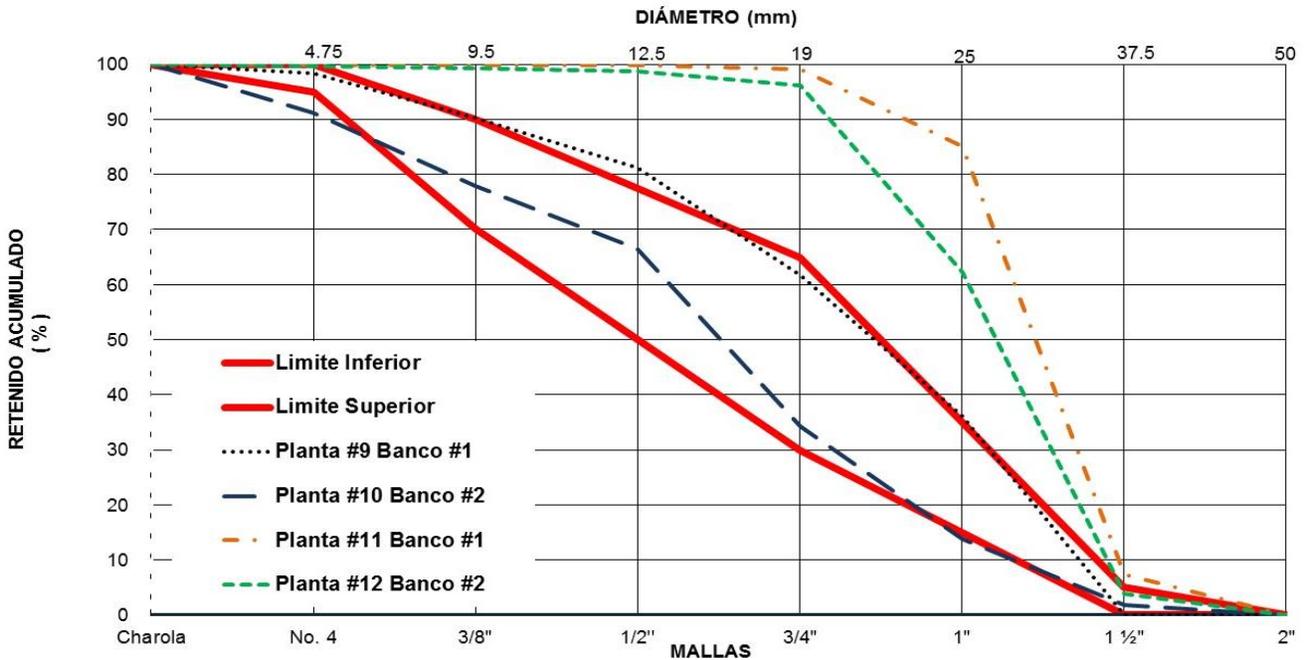
Malla		% Retenido acumulado		% Retenido acumulado de las diferentes plantas		
Número	Diámetro (mm)	Límite Inferior	Límite Superior	Planta 2	Planta 3	Planta 4
				Banco 2	Banco 1	Banco 1
2"	50	0	0	0.00	0.00	0.00
1 ½ "	37.5	5	0	0.04	1.39	0.00
1"	25	15	35	57.13	46.38	45.14
¾ "	19	30	65	91.32	77.54	73.84
½ "	12.5	50	77.5	97.97	88.39	89.71
⅜ "	9.5	70	90	98.91	94.26	95.72
No. 4	4.75	95	100	99.34	97.56	98.84
Charola	-----	100	100	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.10 Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 2, 3 y 4 en comparación con los límites de la normativa.**

**Tabla 4.2.5 Granulometría en gravas con tamaño máximo de 5 mm - 40 mm utilizados en las plantas de concretos 9, 10, 11 y 12 en estudio.**

Malla		% Retenido acumulado		% Retenido acumulado de las diferentes plantas			
Número	Diámetro (mm)	Límite Inferior	Límite Superior	Planta 9	Planta 10	Planta 11	Planta 12
				Banco 1	Banco 2	Banco 1	Banco 2
2"	50	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
1 ½ "	37.5	5	0	0.00	1.84	7.38	3.89
1"	25	15	35	36.09	13.75	85.06	62.29
¾"	19	30	65	61.70	34.31	99.03	96.22
½"	12.5	50	77.5	81.15	66.43	99.85	98.72
3/8"	9.5	70	90	90.30	77.94	99.89	99.28
No. 4	4.75	95	100	98.36	91.10	99.91	99.72
Charola	-----	100	100	100.00	100.00	100.00	100.00



**Figura 4.11 Curva granulométrica del agregado grueso de las plantas 9, 10, 11 y 12 en comparación con los límites de la normativa.**

En la figura 4.7, las gravas de la planta 1 banco 1 y la planta 4 banco 2 tienen un excedente desde la malla de 1" (25 mm) hasta la malla 3/8 (9.5 mm). Por otra parte la planta 2 banco 1 tiene un excedente desde la malla de 1" (25 mm) hasta la malla No. #4 (4.75 mm). Las tres gravas tienen un alto porcentaje de material retenido y están fuera de la frontera superior.

En la figura 4.8, las gravas de la planta 6 banco 1 y la planta 7 banco 1 están fuera de la frontera superior desde la malla de 1" (25 mm) hasta la malla No. #4 (4.75 mm). Sin embargo es notable que la planta 5 banco 1 se ubica dentro de las dos fronteras que establece la normativa y se recomienda para el uso de pavimentos de concreto con cemento Portland.

En la figura 4.9, la grava de la planta 8 banco 1 está afuera del límite superior de la curva granulométrica desde la malla de 1" (25 mm) hasta la malla de 3/8 (9.5 mm). A su vez las gravas de la planta 10 banco 1, la planta 11 banco 2 y la planta 12 banco 1 presentan un exceso de material desde la malla de 1" (25 mm) hasta la malla No. #4 (4.75 mm). Las cuatro plantas presentan un exceso de partículas y están fuera de los límites superiores.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran las curvas granulométricas de las gravas con tamaño máximo de 5 mm - 40 mm:

La figura 4.10, se observa que las gravas de la planta 2 banco 2, planta 3 banco 1 y planta 4 banco 1; tienen un exceso de partículas desde la malla de 1 1/2 (37.5 mm) hasta la malla No. #4 (4.75 mm). En la figura 4.11, se puede observar que las gravas de la planta 11 banco 1 y la planta 12 banco 2, están fuera de los límites y presentan un exceso de partículas. Sin embargo la planta 9 banco 1 y la planta 10 banco 2 están dentro del límite superior e inferior y cumplen con los límites establecidos en la normativa.

#### 4.2.2 Módulo de finura

El módulo de finura es un indicador que define que tan fino o grueso es el agregado y es útil para estimar las proporciones de agregados en la mezcla de concreto. Aunque las normativas nacionales SCT y NMX solamente lo consideran para el agregado fino o arena, la norma ASTM C 125 (2013), si lo considera para los dos agregados. La ASTM C 136 (2006) define el valor del módulo de finura de la grava entre los valores de 6.5 y 7.5, sin embargo se pueden tener variaciones amplias. Los valores de los módulos de finura de las gravas en las 12 plantas se muestran en la tabla 4.2.6.

**Tabla 4.2.6 Módulo de finura de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Tamaño del Agregado	Módulo de Finura (adim)
1	1	3/4	7.5
2	1	3/4	8.1
	2	1 ½	9.4
3	1	1 ½	9.0
4	1	1 ½	9.0
	2	3/4	7.2
5	1	3/4	6.9
6	1	3/4	7.9
7	1	3/4	7.8
8	1	3/4	7.3
9	1	1 ½	8.6
10	1	3/4	7.9
	2	1 ½	7.8
11	1	1 ½	9.9
	2	3/4	8.2
12	1	3/4	8.2
	2	1 ½	9.6

Las gravas que utilizan las siguientes plantas: planta 1 banco 1, la planta 4 banco 2, la planta 5 banco 1 y la planta 8 banco 1, están dentro de los valores del módulo de finura. El resto de las gravas están fuera de la tolerancia, sin embargo para el uso de los pavimentos de concreto con cemento Portland, es conveniente tener mezclas con un módulo de finura alto en las gravas, esto debido a que los pavimentos trabajan a tensión y poco o nada a compresión.

#### 4.2.3 Contaminación de arena en grava

El agregado grueso en ocasiones está contaminado de material que pasa la malla No. #4 (4.75 mm) debido a su manejo y almacenaje. Se recomienda no exceder un 10% del valor de contaminación de arena en grava, porque puede ocasionar problemas en el fraguado, trabajabilidad, contracción plástica, durabilidad y resistencia del concreto. La tabla 4.2.7 se observan los porcentajes de la contaminación de arena en grava.

**Tabla 4.2.7 Contaminación de arena en grava de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Tamaño del Agregado	Contaminación de arena en grava (%)
1	1	3/4	6.46
2	1	3/4	2.82
	2	1 ½	0.66
3	1	1 ½	2.44
4	1	1 ½	1.16
	2	3/4	8.43
5	1	3/4	1.89
6	1	3/4	0.46
7	1	3/4	1.83
8	1	3/4	3.88
9	1	1 ½	1.64
10	1	3/4	3.50

	2	1 ½	8.90
11	1	1 ½	0.09
	2	¾	2.45
12	1	¾	0.89
	2	1 ½	0.28

Todas las plantas cumplen con la recomendación y se consideran adecuados para el uso de pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### 4.2.4 Densidad relativa o masa específica

La densidad relativa o masa específica es un valor importante debido a que se establece la cantidad de agregado requerido para un volumen de concreto. La densidad relativa o masa específica deberá ser mayor de 2400 kg/m<sup>3</sup> de acuerdo a la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), se determina para el diseño de mezcla de concreto porque el agua que se aloja dentro de los poros no es parte del agua de mezclado.

La tabla 4.2.8 se muestran los valores obtenidos en la prueba de densidad relativa o masa específica de las gravas:

**Tabla 4.2.8 Densidad relativa o masa específica de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Tamaño del Agregado	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	1	¾	2685
2	1	¾	2632
	2	1 ½	2641
3	1	1 ½	2835
4	1	1 ½	2673

	2	3/4	2679
<b>5</b>	1	3/4	2718
<b>6</b>	1	3/4	2631
<b>7</b>	1	3/4	2727
<b>8</b>	1	3/4	2729
<b>9</b>	1	1 ½	2858
<b>10</b>	1	3/4	2697
	2	1 ½	2673
<b>11</b>	1	1 ½	2849
	2	3/4	2703
<b>12</b>	1	3/4	2614
	2	1 ½	2857

Todas las plantas cumplen con la densidad relativa o masa específica y son adecuadas para el uso en pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.2.5 Absorción**

La absorción de la grava se define de igual manera que en la arena como la capacidad que tiene esta de absorber el agua hasta quedar todas las partículas sobresaturadas. La Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), recomienda que la absorción no debe exceder del 3%, con una tolerancia de 0.3 en el agregado grueso o grava. El exceso de absorción en los agregados puede darse como una condición natural de las rocas que lo constituyen, o pueden ser provocados por la presencia de partículas de inferior calidad o de materia contaminante.

La tabla 4.2.9 se se muestran los valores obtenidos en la prueba de absorción de las gravas:

**Tabla 4.2.9 Absorción de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Tamaño del Agregado</b>	<b>Absorción (%)</b>
<b>1</b>	1	3/4	0.3
<b>2</b>	1	3/4	1.2
	2	1 ½	1.1
<b>3</b>	1	1 ½	0.7
<b>4</b>	1	1 ½	0.4
	2	3/4	0.2
<b>5</b>	1	3/4	0.7
<b>6</b>	1	3/4	1.5
<b>7</b>	1	3/4	0.3
<b>8</b>	1	3/4	1.0
<b>9</b>	1	1 ½	0.6
<b>10</b>	1	3/4	0.6
	2	1 ½	0.4
<b>11</b>	1	1 ½	0.8
	2	3/4	1.0
<b>12</b>	1	3/4	1.0
	2	1 ½	0.4

Todos los agregados gruesos o gravas cumplen con lo que especifica la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994) y tienen una absorción por debajo del 3% por lo que son convenientes para el diseño de mezclas de concreto porque absorberán una mínima dosis de agua.

#### **4.2.6 Partículas alargadas y lajeadas (planas)**

La norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) M-MMP-4-04-005/08 (2008) señala que el objetivo de la prueba permite determinar el contenido de partículas de forma alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos y no exceder el 20%. La norma ASTM D 4791 (1999), establece que el

método cubre la determinación del porcentaje de partículas alargadas y lajeadas en agregado grueso. Las partículas alargadas y lajeadas pueden afectar la compactación; por la dificultad en el acomodo en el lugar y muchas veces hasta triturarse, y considera un valor de 25% máximo. Las dos normativas están consideradas para materiales pétreos en mezclas asfálticas, para el caso de mezclas de concreto se utilizaron dos normativas internacionales la primera fue la norma CRD-C-119-91 (1991), (Method of Test for Flat and Elongated Particles and Coarse Samples) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers, Headquarters*); la cual indica un valor para agregados de 3/4 del 18% y para agregados de 1" de 15%; este valor puedes ser igual o menor en los dos casos; y la del comité ACI 207 que recomienda no exceder de 20% en la proporción de partículas en los agregados gruesos (Comisión Federal de Electricidad, sección 1, 1994).

Las gravas que se utilizan en concretos con cemento Portland y con cantidades altas de partículas alargadas y lajeadas (planas), pueden ocasionar una mezcla poco trabajable, esto se debe a que por su forma resultan ser débiles con tendencia a fracturarse. En términos generales, la tendencia es buscar que la forma de las partículas sea lo más equidimensional para lograr concretos más trabajables, y con mínimas contracciones.

La tabla 4.2.10 se muestra los resultados de la prueba de partículas alargadas y lajeadas (planas) realizadas al agregado grueso o gravas:

**Tabla 4.2.10 Partículas alargadas y lajeadas (planas) de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Tamaño del Agregado</b>	<b>Partículas alargadas (%)</b>	<b>Partículas lajeadas (planas) (%)</b>
<b>1</b>	1	3/4	79	19
<b>2</b>	1	3/4	30	21
	2	1 ½	33	24
<b>3</b>	1	1 ½	18	22
<b>4</b>	1	1 ½	35	20
	2	3/4	29	23
<b>5</b>	1	3/4	36	21
<b>6</b>	1	3/4	25	24
<b>7</b>	1	3/4	72	34
<b>8</b>	1	3/4	20	19
<b>9</b>	1	1 ½	20	10
<b>10</b>	1	3/4	32	22
	2	1 ½	32	20
<b>11</b>	1	1 ½	91	6
	2	3/4	26	32
<b>12</b>	1	3/4	34	24
	2	1 ½	34	19

Los agregados gruesos o gravas no cumplen con los requisitos por lo que se tendrían problemas para ser utilizados en mezclas de para pavimentos de concreto con cemento Portland, pudieran ocasionar sangrado, cambios volumétricos y mayores consumos de cemento.

#### **4.2.7 Desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles)**

La norma NMX-C-196-ONNCCE-2010 define la prueba con la máquina de los Ángeles como una medida de degradación de agregados minerales, con una granulometría normalizada, resultante de la combinación de la acción de molienda

por impacto y abrasión que se produce en el tambor de acero giratorio que contiene un número especificado de esferas de acero; este número depende de la granulometría de la muestra. La NMX-C-111-ONNCCE-2004 establece un valor no mayor del 50%.

La norma M-MMP-4-04-006/02, (2002) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), define el objetivo de la prueba como el determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla No. #12 (1.7 mm), antes y después de haber sido sometida este tratamiento. Esta norma es para mezclas asfálticas pero el procedimiento es el mismo y para fines de la investigación se utilizó porque establece un valor del 40% máximo, un poco más estricto que la normativa NMX-C-111-ONNCCE-2004.

Pero la norma internacional ASTM C 131 (2006), menciona que la dureza es el porcentaje perdido de un agregado sometido a abrasión en la máquina de los Ángeles. La prueba estima la resistencia del agregado grueso a la degradación mecánica durante el manejo, construcción y en su vida útil. Especifica un valor de 30% máximo.

En la tabla 4.2.11 se muestran los valores de abrasión de los materiales pétreos estudiados mediante la prueba de desgaste de los Ángeles.

**Tabla 4.2.11 Desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles) de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Tamaño del Agregado</b>	<b>Desgaste por abrasión (Prueba de los Ángeles) (%)</b>
1	1	3/4	22
2	1	3/4	21
	2	1 ½	24
3	1	1 ½	12
4	1	1 ½	21
	2	3/4	22
5	1	3/4	18
6	1	3/4	23
7	1	3/4	36
8	1	3/4	11
9	1	1 ½	11
10	1	3/4	20
	2	1 ½	22
11	1	1 ½	6
	2	3/4	13
12	1	3/4	11
	2	1 ½	10

Todos los agregados gruesos o gravas cumplen con el valor de las normativas nacionales NMX y SCT, teniendo valores menores al especificado de 50% y 40%; y son convenientes para el uso de pavimentos de concreto con cemento Portland. Pero para la normativa internacional ASTM, únicamente la planta 7 banco 1 no cumple con el valor de la normativa ASTM de 30%.

#### 4.2.8 Peso volumétrico

El peso volumétrico seco suelto y compacto (también llamado peso unitario o densidad en masa) es la masa necesaria de agregados para llenar un recipiente con un volumen especificado. Tiene como objetivo obtener la cantidad de grava en kilogramos que se puede lograr por metro cúbico, al vaciar material a un recipiente de volumen conocido y sin darle acomodo a las partículas.

La normativa SCT N-CMT-2-02-002/02 (2002), establece un valor del peso volumétrico no menor de 1120 kg/m<sup>3</sup>, para agregados ligeros.

En la tabla 4.2.12 se exponen los valores del peso volumétrico suelto y compacto para el agregado grueso o gravas:

**Tabla 4.2.12 Peso volumétrico seco suelto y compacto de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Tamaño del Agregado	Peso volumétrico suelto (kg/m <sup>3</sup> )	Peso volumétrico compacto (kg/m <sup>3</sup> )
1	1	3/4	1465	1616
2	1	3/4	1365	1570
	2	1 ½	1351	1562
3	1	1 ½	1557	1794
4	1	1 ½	1475	1668
	2	3/4	1449	1603
5	1	3/4	1430	1618
6	1	3/4	1315	1476
7	1	3/4	1364	1600
8	1	3/4	1531	1713
9	1	1 ½	1598	1733
10	1	3/4	1449	1607

	2	1 ½	1456	1651
11	1	1 ½	1366	1563
	2	¾	1382	1593
12	1	¾	1394	1576
	2	1 ½	1356	1569

Se tomó en cuenta los valores del peso volumétrico seco suelto y compacto para el análisis en comparación con los parámetros recomendados. El peso volumétrico, deberá ser mayor de 1400 kg/m<sup>3</sup>, recomendado por la Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994). Todas las gravas de las plantas cumplen con el valor establecido por Comisión Federal de Electricidad.

#### 4.2.9 Coeficiente de forma

El coeficiente de forma es el índice relativo a la esfericidad de un agregado empleado para calificar la forma de los agregados gruesos. Determina la relación entre el volumen aparente de las partículas seleccionadas respecto al volumen de las esferas que las circunscriben. Lo ideal es que la forma de las partículas sea lo más parecido a un cubo o una esfera para lograr concretos más manejables, con menores contracciones.

La norma NMX-C-111-ONNCCE-2004, establece que los agregados gruesos deben tener un coeficiente volumétrico mayor o igual de 0.20. En caso de utilizar agregados con coeficiente volumétrico menor de 0.20, debe realizarse un estudio que muestre el impacto de su uso, y hacer los ajustes correspondientes en las mezclas de concreto, para satisfacer los requisitos de cohesión, trabajabilidad, módulo de elasticidad y contracción requeridos por el cliente.

Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), menciona los valores para tener una idea de la magnitud del coeficiente de forma recomendados:

Coeficiente de forma < 0,15 (Indica una mala forma de la partícula).

Coeficiente de forma = 0,15 a 0,20 (Se considera regular).

Coeficiente de forma > 0,20 (Indica una buena forma de la partícula).

En la tabla 4.2.13 se presentan los valores del coeficiente de forma del agregado grueso o gravas:

**Tabla 4.2.13 Coeficiente de forma de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Tamaño del Agregado	Coeficiente de forma (adim)
1	1	3/4	0.19
2	1	3/4	0.17
	2	1 ½	0.19
3	1	1 ½	0.19
4	1	1 ½	0.16
	2	3/4	0.20
5	1	3/4	0.17
6	1	3/4	0.21
7	1	3/4	0.18
8	1	3/4	0.21
9	1	1 ½	0.16
10	1	3/4	0.18
	2	1 ½	0.22
11	1	1 ½	0.19
	2	3/4	0.18
12	1	3/4	0.22
	2	1 ½	0.17

Los agregados gruesos o gravas de las siguientes plantas: planta 1 banco 1, planta 2 banco 1 y 2, planta 3 banco 1, planta 4 banco 1, planta 5 banco 1, planta 7 banco 1, planta 9 banco 1, planta 10 banco 1, planta 11 banco 1 y 2, y la planta 12 banco 2; están por debajo del valor de 0.20, que establece la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004. Por lo que se pueden tener problemas de trabajabilidad, módulo de elasticidad y contracción plástica. Por otra parte la planta 4 banco 2, planta 6 banco 1, planta 8 banco 1, planta 10 banco 2 y la planta 12 banco 1; están dentro o arriba del valor indicado por la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004 y se recomiendan para mezclas de concreto en pavimentos con cemento Portland.

Si se toman los valores de Comisión Federal de Electricidad, todos los agregados tienen un coeficiente de forma regular, sin embargo la planta 6 banco 1, planta 8 banco 1, planta 10 banco 2 y planta 12 banco 1 tienen una buena forma de la partícula.

#### **4.2.10 Sanidad (Intemperismo acelerado)**

La sanidad se define como la aptitud de los agregados para resistir y permanecer inalterables bajo condiciones de servicio que generan acciones destructivas por cambios de volumen en el concreto. Estas condiciones de servicio están representadas por efectos de periodos alternos de:

- Humedad y secado.
- Variaciones extremas de temperatura.
- Congelamiento y deshielo.

Los efectos del frio se provocan por medio de soluciones salinas en los que artificialmente generan cristales en el agregado grueso y el calor por medio del

secado en horno. Causan el efecto que determina si los agregados son resistentes. La sanidad de los agregados afecta los requerimientos de agua de la mezcla de concreto y su durabilidad, dos factores importantes en los pavimentos de concreto con cemento Portland.

La norma de la SCT M-MMP-4-04-008/03 (2003), dice que el objetivo de la prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de la fracción de agregados gruesos (gravas) de una muestra de materiales pétreos, mediante el empleo de una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, y medir la diferencia de su masa antes y después de haber sido sometido a este tratamiento. No obstante la norma fue diseñada para mezclas asfálticas el procedimiento es el mismo para mezclas de concreto. Las normas nacionales NMX-C-111-ONNCCE-2004 y la N-CMT-2-02-002/02 (2002) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y la norma internacional AASHTO-T-104-94 (1994), coinciden que la prueba de sanidad no tendrá una pérdida mayor de 12 % máximo en 5 ciclos utilizando sulfato de sodio. En la tabla 4.2.14 se presentan los valores de sanidad (Intemperismo acelerado) del agregado grueso o gravas:

**Tabla 4.2.14 Sanidad (Intemperismo acelerado) de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

Planta No.	Banco	Tamaño del Agregado	Sanidad (intemperismo acelerado) (%)
1	1	3/4	3.97
2	1	3/4	6.58
	2	1 ½	16.50
3	1	1 ½	1.82
4	1	1 ½	4.39
	2	3/4	2.25
5	1	3/4	3.35

<b>6</b>	1	3/4	18.72
<b>7</b>	1	3/4	0.13
<b>8</b>	1	3/4	10.39
<b>9</b>	1	1 ½	2.25
<b>10</b>	1	3/4	3.45
	2	1 ½	6.41
<b>11</b>	1	1 ½	0.90
	2	3/4	1.33
<b>12</b>	1	3/4	5.75
	2	1 ½	2.85

Las gravas de la planta 2 banco 2 y la planta 6 banco 1, están por arriba del valor de tolerancia por lo que no son recomendados para mezclas de concreto para pavimentos con cemento Portland. El resto de los agregados gruesos o gravas están por debajo del 12% que tienen de límite las tres normativas por lo que cumplen satisfactoriamente.

#### 4.2.11 Humedad

Las humedades de los agregados, es un dato que nos sirve para agregar o retener agua en el diseño de la mezcla. Por lo tanto es una referencia muy útil ya que un error en la obtención de la humedad podría provocar una variación en la relación agua/cemento. En la tabla 4.2.15 se presentan los valores de humedad del agregado grueso o gravas:

**Tabla 4.2.15 Humedad de los agregados gruesos utilizados en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Banco</b>	<b>Tamaño del Agregado</b>	<b>Humedad (%)</b>
<b>1</b>	1	3/4	1.83
<b>2</b>	1	3/4	4.71

	2	1 ½	3.63
<b>3</b>	1	1 ½	6.38
<b>4</b>	1	1 ½	2.56
	2	¾	0.90
<b>5</b>	1	¾	3.31
<b>6</b>	1	¾	6.95
<b>7</b>	1	¾	1.01
<b>8</b>	1	¾	8.50
<b>9</b>	1	1 ½	1.73
<b>10</b>	1	¾	4.82
	2	1 ½	1.94
<b>11</b>	1	1 ½	2.71
	2	¾	2.25
<b>12</b>	1	¾	0.81
	2	1 ½	1.11

Las humedades dependes del cuidado que se tenga, es recomendable tener al agregado grueso cubierto de cualquier condición climática (lluvia y sol) que cambie su porcentaje de humedad.

### **4.3 Resultados Concreto**

#### **4.3.1 Revenimiento**

La prueba de revenimiento es esencial para la aceptación o rechazo de un concreto debido a que determina la trabajabilidad e indica una posible baja de resistencia. Es afectada por diversas características de los agregados como la absorción, forma de la partícula, granulometría y textura superficial.

**Tabla 4.3.1 Revenimiento alcanzado en las plantas de concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Revenimiento (cm)</b>
<b>1</b>	12
<b>2</b>	11
<b>3</b>	10
<b>4</b>	11
<b>5</b>	12.5
<b>6</b>	9
<b>7</b>	10
<b>8</b>	12
<b>9</b>	10
<b>10</b>	11
<b>11</b>	11.5
<b>12</b>	12

Los revenimientos que se muestran en la tabla 4.3.1 de las 12 plantas de concreto están dentro del límite que establece la normativa NMX-C-403-ONNCCE-1999, para concretos con un revenimiento de 10 cm  $\pm$  de 3.5 cm. Todas las plantas cumplen porque están dentro de la tolerancia permitida y son apropiados para el uso de pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.3.2 Temperatura del concreto**

La temperatura del concreto es otro factor importante porque interviene en los tiempos de fraguado, agrietamiento, desgaste y resistencia, por lo tanto tiene una influencia directa en el desempeño técnico y económico. La norma NMX-C-403-ONNCCE-1999, dictamina una temperatura máxima de 32° C.

**Tabla 4.3.2 Temperatura del concreto obtenido en las plantas.**

<b>Planta No.</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>1</b>	25
<b>2</b>	26
<b>3</b>	29
<b>4</b>	26
<b>5</b>	24
<b>6</b>	28
<b>7</b>	28
<b>8</b>	29
<b>9</b>	31
<b>10</b>	27
<b>11</b>	26.5
<b>12</b>	28

En la tabla 4.3.2 se observa que todas las plantas cumplen con la temperatura y están por debajo de los 32° C, y se recomiendan para el uso de pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.3.3 Masa unitaria del concreto**

La masa unitaria del concreto es una característica del concreto recién mezclado que depende principalmente de los agregados pétreos que se utilicen. Es un indicador para conocer los rendimientos del concreto para ajustes de los materiales en la mezcla de concreto. La norma NMX-C-403-ONNCCE-1999, especifica que el concreto debe tener una masa unitaria de 1,900 kg/m<sup>3</sup> y 2,400 kg/m<sup>3</sup> para concretos convencionales, para el uso de pavimentos los valores deben estar entre 2,200 kg/m<sup>3</sup> y 2,400 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 4.3.3 Masa unitaria del concreto en las diferentes plantas.**

<b>Planta No.</b>	<b>Masa Unitaria (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	2284
<b>2</b>	2297
<b>3</b>	2303
<b>4</b>	2250
<b>5</b>	2292
<b>6</b>	2265
<b>7</b>	2328
<b>8</b>	2320
<b>9</b>	2312
<b>10</b>	2275
<b>11</b>	2245
<b>12</b>	2280

Como se observa en la tabla 4.3.3 todos los concretos producidos por las plantas cumplen con los valores de masa unitaria y se recomiendan para pavimentos con cemento Portland.

#### **4.3.4 Tiempos de fraguado**

Todas las plantas utilizan aditivos para prolongar el tiempo del fraguado inicial y final en el concreto, debido a que los tiempos de traslado y el clima son factores que aceleran el proceso de fraguado inicial. Además que con el uso de aditivos pueden tener ahorros en el consumo de cemento.

**Tabla 4.3.4 Tiempos de fraguado del concreto en las diferentes plantas.**

Planta No.	Tiempos de fraguado	
	Fraguado inicial	Fraguado Final
<b>1</b>	2 h 32 min	4 h 36 min
<b>2</b>	3 h 12 min	7 h 53 min
<b>3</b>	2 h 30 min	5 h 21 min
<b>4</b>	2 h 49 min	4 h 17 min
<b>5</b>	3 h 11 min	5 h 35 min
<b>6</b>	4 h 34 min	7 h 23 min
<b>7</b>	5 h 11 min	7 h 35 min
<b>8</b>	3 h 23 min	7 h 09 min
<b>9</b>	4 h 12 min	8 h 46 min
<b>10</b>	6 h 01 min	8 h 03 min
<b>11</b>	4 h 56 min	8 h 22 min
<b>12</b>	3 h 45 min	6 h 32 min

En la tabla 4.3.4 se muestran los tiempos de fraguado del concreto y dependiendo del tipo de aditivo utilizado es el tiempo de duración del fraguado inicial y final, los tiempos de fraguado varían de acuerdo a la distancia de la planta hasta la obra.

#### **4.3.5 Contenido de aire**

El objetivo de la prueba es determinar el contenido de aire del concreto fresco, se basa en la medición del cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión. El equipo que se especifica para este ensayo es un aparato, el cual cuenta con un manómetro que registra directamente el contenido de aire, en %, con respecto al volumen de concreto.

González S. F. (2004) recomienda los parámetros del contenido de aire en el concreto de 3% hasta 5%; con una tolerancia de  $\pm 1\%$ .

**Tabla 4.3.5 Contenido de aire del concreto en las diferentes plantas.**

<b>Planta No.</b>	<b>Contenido de Aire (%)</b>
<b>1</b>	3
<b>2</b>	2
<b>3</b>	3
<b>4</b>	3
<b>5</b>	2
<b>6</b>	3
<b>7</b>	2
<b>8</b>	3
<b>9</b>	3
<b>10</b>	2
<b>11</b>	4
<b>12</b>	2

En la tabla 4.3.5 se observa que las plantas 2, 5, 7, 10 y 12 están por debajo del valor de 3%, pero sin embargo están dentro de la tolerancia permitida. El resto de las plantas están dentro del parámetro recomendado.

#### **4.3.6 Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es la capacidad de carga a compresión por unidad de área del concreto, medida de ensayos de especímenes cilíndricos elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas, generalmente expresada en  $\text{kg/cm}^2$  (NMX-C-403-ONNCCE-1999). Los agregados influyen directa o indirectamente en la resistencia final del concreto. La resistencia a compresión es uno de los valores más importantes en un concreto, pero en la investigación se realizó esta prueba para determinar una correlación entre la

resistencia a flexión con la resistencia a compresión. Los resultados de la resistencia a compresión indican un valor para poder considerar un porcentaje para conocer su resistencia a flexión.

En la tabla 4.3.6 se muestran los resultados de la resistencia a compresión:

**Tabla 4.3.6 Resistencia del concreto a compresión.**

<b>Planta No.</b>	<b>Resistencia a Compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	350
<b>2</b>	408
<b>3</b>	367
<b>4</b>	425
<b>5</b>	385
<b>6</b>	355
<b>7</b>	391
<b>8</b>	384
<b>9</b>	374
<b>10</b>	350
<b>11</b>	382
<b>12</b>	365

#### **4.3.7 Resistencia a la flexión**

La resistencia a la flexión es el indicador y se mide por el módulo de ruptura de una viga de concreto. Este valor es importante para el diseño y aceptación o rechazo de pavimentos de concreto. El concreto solicitado a las plantas fue un módulo de ruptura de 45 kg/cm<sup>2</sup> y fue el valor de referencia.

**Tabla 4.3.7 Resistencia del concreto a flexión.**

<b>Planta No.</b>	<b>Módulo de Ruptura (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	46
<b>2</b>	47
<b>3</b>	48
<b>4</b>	51
<b>5</b>	46
<b>6</b>	43
<b>7</b>	47
<b>8</b>	46
<b>9</b>	45
<b>10</b>	44
<b>11</b>	47
<b>12</b>	48

En la tabla 4.3.7 se observó que las plantas 6 y 10, no cumplieron con el módulo de ruptura indicado de 45 kg/cm<sup>2</sup>, la planta 9 apenas logró cumplir con el valor de referencia. Por otra parte las plantas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11 y 12; cumplieron con el valor establecido y se recomiendan para su uso en los pavimentos de concreto con cemento Portland.

#### **4.3.8 Módulo de elasticidad**

La elasticidad, es la propiedad mecánica que hace que los materiales sufran deformaciones reversibles por la acción de las fuerzas exteriores que actúan sobre ellos. La deformación, es la variación de forma y dimensión de un cuerpo. Un material es elástico cuando la deformación que sufre ante la acción de una fuerza, cesa al desaparecer la misma. Los materiales totalmente elásticos pueden llegar hasta cierta deformación máxima, es lo que se conoce como límite elástico. Si se sobrepasa este límite, la deformación del material es permanente y sus propiedades cambian. Si el esfuerzo que incide sobre el material supera las fuerzas internas de

cohesión, el material se fisura y termina por fallar. El módulo de elasticidad es función principalmente de la resistencia del concreto y de su peso volumétrico. La Comisión Federal de Electricidad, sección 3 (1994), establece un parámetro para los módulos de elasticidad en un rango de 200,000 kg/cm<sup>2</sup> a 300,000 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad del concreto es uno de los valores más importantes en el diseño de concreto, pues influye en las deflexiones y rigidez de una estructura.

**Tabla 4.3.8 Módulos de elasticidad del concreto.**

<b>Planta No.</b>	<b>Módulo de Elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	262,600.86
<b>2</b>	273,035.92
<b>3</b>	265,743.56
<b>4</b>	275,951.55
<b>5</b>	268,992.77
<b>6</b>	263,532.96
<b>7</b>	270,058.89
<b>8</b>	268,814.28
<b>9</b>	267,016.41
<b>10</b>	262,600.86
<b>11</b>	268,456.59
<b>12</b>	265,377.66

En la tabla 4.3.8 se muestran todas las plantas las cuales están dentro del rango que establece la comisión federal de electricidad y se recomiendan para el uso en pavimentos.

#### 4.3.9 Correlación de resistencia de compresión a flexión

**Tabla 4.3.9 Correlación de resistencias de compresión a flexión.**

Planta No.	Resistencia de Compresión $f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentajes considerados en la correlación de resistencias de compresión a flexión								Módulo de Ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
		8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%	
1	350	28	32	35	39	42	46	49	53	46
2	408	33	37	41	45	49	53	57	61	47
3	367	29	33	37	40	44	48	51	55	48
4	425	34	38	43	47	51	55	60	64	51
5	385	31	35	39	42	46	50	54	58	46
6	355	28	32	36	39	43	46	50	53	43
7	391	31	35	39	43	47	51	55	59	47
8	384	31	35	38	42	46	50	54	58	46
9	374	30	34	37	41	45	49	52	56	45
10	350	28	32	35	39	42	46	49	53	44
11	382	31	34	38	42	46	50	53	57	47
12	365	29	33	37	40	44	47	51	55	48

En la tabla 4.3.9, están los resultados de la prueba de compresión ( $f'_c$ ) del concreto de cada una de las plantas, y los módulos de ruptura del concreto (MR); entre estos dos valores se colocan los porcentajes desde el 8% al 15%, que son los valores que se recomiendan para obtener un valor del MR a partir de una  $f'_c$ .

Se observa que la tendencia del porcentaje de correlación de una resistencia de compresión ( $f'_c$ ) a una a flexión (MR) es del 12%, pero se puede considerar un rango del 11% al 13% para ser utilizado en los pavimentos de concreto con cemento Portland, para el caso de los concretos en la zona metropolitana de Querétaro se puede realizar pruebas de compresión ( $f'_c$ ) y al resultado considerar desde 11% al 13% y obtener su resistencia a flexión (MR).

En la figura 4.12 se puede estimar la relación lineal existente entre la resistencia a compresión ( $f'c$ ) y la resistencia a flexión o módulo de ruptura (MR) para las diferentes plantas de concreto.

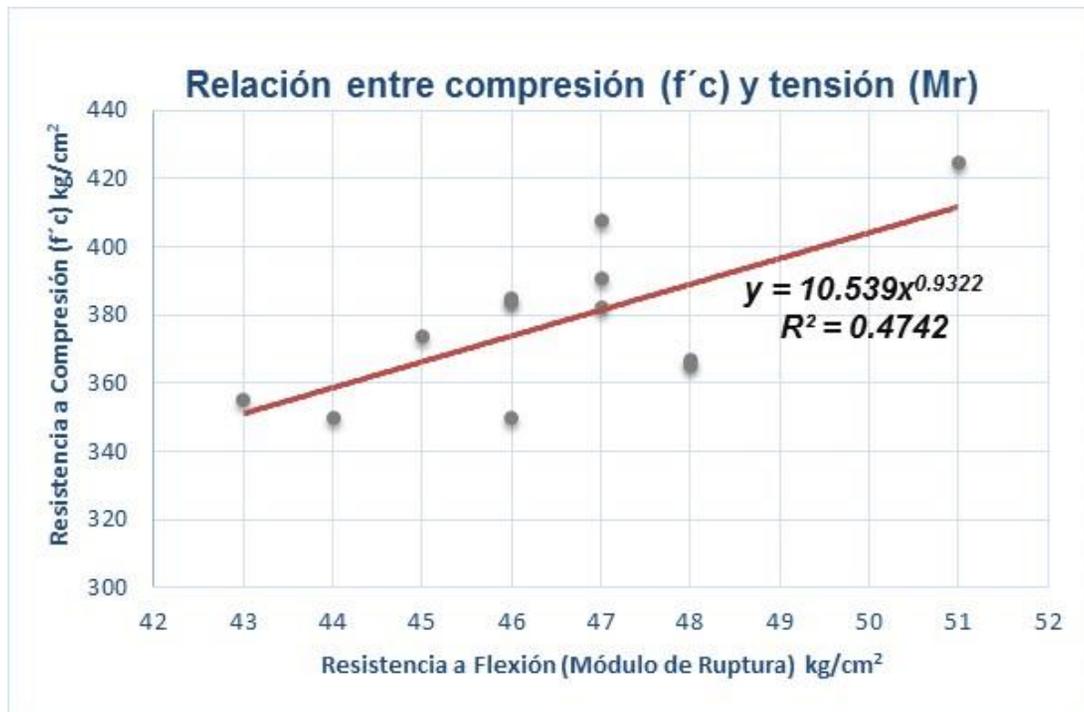


Figura 4.12 Correlación de la resistencia de compresión a tensión.

Se calculó la ecuación resultante del presente estudio la cual es  $y=10.539x^{0.9322}$ . Una línea de tendencia es más precisa cuando su valor de  $R^2$  se encuentra en 1 o cerca de él. En la figura 4.12 el  $R^2$  es de 0.4742 por lo que la correlación es baja para el caso estudiado.

## **CAPÍTULO V.- CONCLUSIONES**

Una de las aportaciones de la presente investigación es el haber generado un método para mejorar la calidad del concreto y el funcionamiento de los pavimentos rígidos, a través de la compilación de una serie de datos referentes a los agregados y concreto de las plantas en la zona metropolitana de la ciudad de Querétaro de Arteaga. También el tener la información clasificada y ordenada permite contar con una base de datos que puede servir de referencia para mejorar los diseños de mezclas. Una evaluación de los agregados utilizados en la elaboración de mezclas de concreto para pavimentos, en la que se visitó las plantas de concreto, por tal motivo se procedió a solicitar los permisos y trámites necesarios para que cada una de las plantas permitiera el acceso para la toma de muestra de sus agregados para la realización de las pruebas, aunque se tuvo la dificultad para recabar información, así como para muestrear por parte de las plantas; se consiguió realizar el muestro y las pruebas a los agregados y al concreto.

En base a los resultados obtenidos de la investigación se puede concluir:

La mayoría de las plantas de concreto tienen deficiencia en la granulometría de sus arenas y gravas, lo que ocasiona problemas de sangrado, segregación, cambios volumétricos y resistencia (requerimientos de agua), pero el problema más significativo es en los costos de la mezcla de concreto debido al aumento de cemento ya que es el elemento más costoso. Algunas plantas mezclan dos arenas para poder cumplir con la curva granulométrica de la normativa de la SCT y de la NMX, y reducir los consumos de cemento.

El módulo de finura en las arenas es satisfactorio con las normas NMX-C-111-ONNCE-2004 y la N.CMT.2.02.002/02 (2002). Para el caso de las gravas se utilizó la norma ASTM C 136 (2006) y solamente 4 plantas cumplen con los

parámetros de referencia, estas son: la planta 1 banco 1, la planta 4 banco 2, la planta 5 banco 1 y la planta 8 banco 1, están dentro de los valores del módulo de finura.

Los pesos volumétricos suelto y compacto de las arenas, cumplen ampliamente con los parámetros de referencia para las arenas, para en el caso de las gravas únicamente la planta 6 banco 1 está ligeramente bajo. La importancia de esta prueba es que reside en las cantidades de materiales, el proporcionamiento de la mezcla y el peso volumétrico del concreto.

La pérdida por lavado de los agregados finos, únicamente: la planta 3 banco 1, planta 10 banco 2 y la planta 12 banco 1 y 2; cumplen con los requerimientos de la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004. El resto de las plantas tendrán problemas en el concreto como: aumento en el consumo de agua, disminución de resistencia, incrementa la contracción plástica e interferencia en la adherencia entre el agregado y la pasta.

Las densidades relativas o masas específicas en las arenas solo cumplieron: planta 2 arena 1, planta 6 arena 1 y 2, planta 8 arena 1 y 2, planta 9 arena 1, planta 10 arena 2, planta 11 arena 2 y la planta 12 arena 2. El resto de las plantas no cumplen con el valor mínimo por lo que pueden ocasionar mayor demanda de agua y aumento de la cantidad de cemento. En el caso de las gravas todas están dentro de la tolerancia o por arriba de los valores especificados lo cual contribuye a incrementar el peso unitario del concreto. Además, al ser más densos los agregados tienden a ser menos absorbentes, lo que ayuda a mejorar la relación agua/cemento en el diseño de la mezcla de concreto.

Con respecto a la absorción en las arenas del material utilizado en cada una de las 12 plantas de concreto, se observó que la planta 10 banco 1 y la planta 11

banco 1 tienen un valor mayor al 5% lo que puede ocasionar problemas de contracción plástica, pérdida de revenimiento y durabilidad en el concreto. En el caso de las gravas todas están por debajo de la recomendación de Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), de no exceder del 3%.

El equivalente de arena las plantas que cumplen son: planta 3 banco 1, planta 7 banco 1 y 2, planta 9 banco 1 y planta 10 banco 2; porque tienen un valor de 80%. Es una prueba importante debido a que indica las proporciones de arcilla presentes en la arena, para el uso de pavimentos tiene una inmediata ocurrencia en la retracción del concreto. El resto de las plantas que no cumplen pueden provocar presencia de fisuras tanto en el interior como en la superficie del concreto.

El resultado en la prueba de colorimetría en el agregado fino, muestra que no hay presencia de materia orgánica.

En las pruebas de límite líquido, índice plástico y contracción lineal de las arenas que se utilizan no afectaron de manera directa al concreto, por otra parte el material que pasa la malla No. #200 (0.075 mm) en todas las arenas que utilizan las plantas están por arriba del 3%, por lo que puede producir retardos de fraguado.

La humedad en las gravas y arenas fue escasa, pero solo es un dato que se obtuvo, pero es importante debido a que nos dicta la cantidad de agua que se debe agregar o retener para el diseño de mezclas.

Las gravas presentan valores de menores al 10% de contaminación de arena en grava son por lo que satisfacen la mezcla de concreto.

La prueba de partículas alargadas y lajeadas para los agregados gruesos o gravas solo 7 cumplieron con los requisitos por lo que no tienen problemas para ser utilizados en mezclas de para pavimentos de concreto con cemento Portland.

El ensaye de desgaste por abrasión (prueba de los Ángeles) todas las gravas presentaron un valor menor al 50% que establece la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004, e incluso cumplen con la norma M-MMP-4-04-006/02, (2002) de la SCT con un valor de 40% máximo.

El coeficiente de forma de las siguientes plantas tienen una forma regular: la planta 1 banco 1, planta 2 banco 1 y 2, planta 3 banco 1, planta 4 banco 1, planta 5 banco 1, planta 7 banco 1, planta 9 banco 1, planta 10 banco 1, planta 11 banco 1 y 2, y la planta 12 banco 2; porque están por debajo del valor de 0.20, que establece la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004. Por lo que se pueden tener problemas de trabajabilidad, módulo de elasticidad y contracción plástica. El resto de las plantas como son: la planta 6 banco 1, planta 8 banco 1, planta 10 banco 2 y planta 12 banco 1; tienen una buena forma de la partícula.

La prueba de sanidad (intemperismo acelerado), la planta 2 banco 2 y la planta 6 banco 1, tienen valores superiores al 12 % utilizando sulfato de sodio en 5 ciclos, de acuerdo a las normas: NMX-C-111-ONNCCE-2004, N-CMT-2-02-002/02 (2002) y AASHTO-T-104-94 (1994). El resto de las gravas cumplen satisfactoriamente a las tres normativas.

Las arenas de la planta 9 banco 1 y la planta 10 banco 2, cumple con todos los parámetros de la prueba del porcentaje que pasa la malla No. #200 (0.075 mm).

El resultado de las dos arenas es debido a que proviene de un banco con un tipo de roca diferente a las otras arenas.

El revenimiento de todas las planta fue el adecuado porque cumplió con el solicitado a las plantas de concreto y estuvo dentro de las tolerancias permitidas en la normativa NMX-C-403-ONNCCE-1999.

La temperatura del concreto es una prueba importante que influye en la trabajabilidad, resistencia y durabilidad. La NMX-C-403-ONNCCE-1999, establece una temperatura máxima de 32° C, pero a los 30° C, ya se empieza a tener microfisuras. Todas las plantas están por debajo de los 32° C, aunque cumplen con la normativa existen varios motivos por lo que aumenta la temperatura del concreto como son: la distancia de las obras representa una parte importante ya que provocan que aumente la temperatura del concreto por los largos trayectos de la planta de dosificación al sitio de la obra; el descargar cemento al silo y dosificar del mismo aumenta la temperatura; el no tener los agregados protegidos por las altas temperaturas; el no utilizar un enfriador de agua.

En la masa unitaria del concreto todas las plantas cumplen con el valor recomendado de 2,200 kg/m<sup>3</sup> para pavimentos de concreto.

Los tiempos de fraguado varían debido a que los tiempos de traslado y el clima son factores que aceleran el proceso de fraguado inicial. Todas las plantas utilizan aditivos porque tienen ahorros en el consumo de cemento, por los tiempos de traslado y por el clima.

El contenido de aire de los concreto es el adecuado ya que ninguno está por arriba del 5% lo que tendría problemas debido a resistencias bajas en el concreto.

La resistencia a la compresión no es un dato que en pavimentos sea tomado en cuenta debido a que es la capacidad que tiene un cilindro de concreto al someterle una carga a compresión, pero de todos modos en la investigación se realizó esta prueba para poder encontrar una correlación de una resistencia a compresión ( $f'c$ ) a una a flexión (MR).

La resistencia a la flexión (MR) es un dato muy importante para los pavimentos, debido a que es la resistencia que se desea conocer a la cual el pavimento está trabajando a tensión. A las plantas se les solicitó un módulo de ruptura de  $45 \text{ kg/cm}^2$  y solamente dos plantas no consiguieron a cumplir con este valor la planta 6 y 10.

El módulo de elasticidad de los concretos está dentro de los rangos que especifica Comisión Federal de Electricidad y es uno de los valores más importantes en el diseño de pavimentos

La correlación de una resistencia de compresión ( $f'c$ ) a una resistencia a flexión (MR), para el caso de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, se constituye que se puede considerar un porcentaje de un 11% a un 13%. A pesar que la tendencia lineal tiene un  $R^2$  es 0.4742 la cual es baja, pero el porcentaje de correlación es pequeño y se reduce el parámetro de 12% hasta 18%.

El diagnóstico de las características de los agregados y de su acción en el comportamiento del concreto, no sólo es útil para seleccionar el más conveniente, sino para delimitar y enumerar los beneficios o deficiencias que puedan tener, y las opciones que se pueden utilizar.

En base a la hipótesis planteada: las características físicas y mecánicas de los agregados utilizados en las plantas productoras de concreto de la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, influyen en su estado fresco y endurecido en pavimentos de concreto con cemento Portland; se demuestra que los agregados utilizados en la zona metropolitana de Querétaro, tienen cierta influencia en su estado endurecido esto debido a que los módulos de ruptura de las plantas 6 y 10 no cumplieron con la resistencia solicitada. Cabe señalar en el caso de la planta 6 el agregados grueso tiene el peso volumétrico bajo y un alto porcentaje de intemperismo acelerado. Para la planta 10 su agregado fino o arena tiene una densidad baja y por consiguiente una absorción alta, además de tener un alto porcentaje de finos.

No existen soluciones generales a los problemas de selección y utilización de los materiales en los pavimentos de concreto con cemento Portland, se deben tratar cada caso por separado y tener muy en cuenta la calidad de los agregados; por consiguiente influyen en el concreto, sobre todo el nivel de control que se utilizó para seleccionarlos. En este sentido, se propone desarrollar el método seguido en la presente tesis para realizar estudios similares en pavimentos de concreto con cemento Portland en México y así poder compararlos con los de otras ciudades, puesto que los datos obtenidos en la presente tesis abarcan únicamente a la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga. Se debería implementar el método utilizado en la presente investigación para garantizar el buen funcionamiento de los pavimentos de concreto con cemento Portland.

En conclusión esta tesis ha demostrado que la mayor parte de las plantas en la zona metropolitana de Querétaro de Arteaga, no cumplen con las especificaciones de las normativas de calidad de los agregados, por lo que con la implementación de este método se tendría un mejor proceso en la selección de agregados y múltiples beneficios para las empresas fabricantes de concreto.

La aportación de la tesis es ofrecer una propuesta de pruebas para garantizar la calidad de los agregados y que cumplan con las normativas nacionales e internacionales.

Para poder cumplir con el beneficio más importante que es la durabilidad de los pavimentos de concreto con cemento Portland, se debe partir de dos condiciones:

La primera: la disposición de las plantas de concreto para aplicar este método y permitir así, mejorar la calidad de los agregados utilizados en los pavimentos de concreto.

La segunda: la determinación de una correcta selección de los bancos de materiales y así conocer sus ventajas.

En este sentido, la propuesta del método por sí sola no resuelve ningún problema, si no es aplicada por los fabricantes de concreto o es estrictamente normada por alguna dependencia de gobierno de los tres poderes. La dependencia de gobierno se debe involucrar en el diseño de la mezcla de concreto, debido a que se pueden obtener grandes ahorros y mayores beneficios en los pavimentos de concreto con cemento Portland.

## CAPÍTULO VI.- BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO-T-104-94 (1994) Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
- ACI 316 (1989) Recomendaciones para la Construcción de Pavimentos y Bases de Concreto. IMCYC. Editorial Limusa. México. D.F. ISBN: 968-18-2981-6
- ASTM C 151 (2009) Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement.
- ASTM C 29 (2009) Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate.
- ASTM C 494 (2013) Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
- ASTM C 114 (2013) Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.
- ASTM C 115 (2010) Standard Test Method for Fineness of Portland Cement by the Turbidimeter.
- ASTM C 125 (2013) Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.
- ASTM C 128 (2012) Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C 131 (2006) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM C 136 (2006) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM C 136 (2006) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ASTM C 150 (2012) Standard Specification for Portland Cement.

- ASTM C 191 (2008) Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
- ASTM C 230 (2013) Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- ASTM C 31 (2012) Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.
- ASTM C 33 (2013) Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C 39 (2012) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM C127 (2012) Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
- ASTM D 4791 (1999) Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.
- Celis N. G. (2011) *Pavimentos carreteros con concreto*. Construcción y Tecnología, V1:6, 44-47. IMCYC.
- Cemex Concretos (1993). Pavimentos de concreto, construyendo los nuevos caminos de México, México.
- Cemex Concretos (2001) Guía del Usuario de Concreto Profesional. México.
- Cemex Concretos (2002), Diseño y Construcción de Pisos Industriales. México. D.F.
- Chan Yam J.L, Solís Carcaño R. y Moreno E. (2003) *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Artículo de divulgación. Revista Ingeniería 7:2, 39-46. FIUADY.
- Checmarew L. (2010) Hiperfluidificantes a base de policarboxilato. *Construcción y Tecnología*, 270, 10. IMCYC.
- Comisión Federal de Electricidad, sección 1 (1994), Manual de Tecnología del Concreto. Limusa, Noriega Editores. México. ISBN: 968-18-1980-9

- Comisión Federal de Electricidad, sección 3 (1994), Manual de Tecnología del Concreto, Concreto en Estado Endurecido. Limusa, Noriega Editores. México. ISBN: 968-18-5036-X
- Covarrubias García G. (1985) Generalidades sobre pavimentos. Tesis licenciatura, UNAM. México. D.F.
- CRD-C-119-91 (1991) Department of the Army, Corps of Engineers. Method of Test for Flat and Elongated Particles and Coarse Samples.
- Crespo Villalaz C. (2002) Vías de Comunicación (Caminos, Ferrocarriles, Aeropuertos, Puentes y Puertos). Limusa, Noriega Editores. México. D.F. ISBN: 968-18-4869-7.
- De Neymet Leger A. (1965), Aditivos para concreto. México, D.F.
- Esqueda Huidobro H. y Huerta Martínez R. (2002) Guía Práctica para la Medición, Mezclado, Transporte y Colocación del Concreto. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-125-7
- Fernández Orozco L. (1992), Construcción 1, tomo 1 Departamento de materiales, Laboratorio de Materiales de Construcción y Control de Calidad. Universidad Autónoma Metropolitana.
- G. Nawy E. (2005) Reinforced Concrete. Pearson. U.S.A. New Jersey. ISBN: 0-13-149757-X
- García Chowell L. A. y Huerta Martínez R. (2004), Elaboración, colocación y protección del concreto en clima caluroso y frío. ACI 305 - ACI 306. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-140-0
- García Rivero J. L. (2006), Manual técnico de construcción. Holcim Apasco, México. ISBN: 968-7680-26-1
- Garnica Anguas P., Gómez López J. A., Sesma Martínez J. A. (2002), Mecánica de Materiales para pavimentos. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 197. Sanfandila, Querétaro.
- Gómez C. J. G. (1994) Historia del Cemento y el Concreto. Alcum, 15, 1-5.

- González G. J. F. (2010) Una Autopista Inteligente. *Construcción y Tecnología*, 270, 14-19. IMCYC.
- González S. F. (2004) Manual de supervisión de obras de concreto. Construcciones de concreto-Manuales. Limusa. México. ISBN: 968-18-5907-3
- Guevara Martínez L.A. (2011), Tesis “Caracterización física de agregado grueso para concreto hidráulico proveniente de bancos de la región de Xalapa en base a la normativa de la ONNCCE”. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Veracruzana región Xalapa.
- Helene P. (2008), El arte de proyectar estructuras. Memorias del Dieciseisavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.
- Hernández J.L., Sánchez V.M., Castillo I., Damián S.A., Téllez R. (2001), Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: II pavimentos rígidos. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 173. Sanfandila, Querétaro.
- Huerta Martínez R. (2002), Juntas en las construcciones de concreto. IMCYC. México. D.F. ISBN: 968-464-124-9
- Huerta Martínez R. (2005), Conceptos básicos del concreto. IMCYC. México, D.F.
- IMCYC (2011) Construcción y Tecnología en Concreto. Noticias: “Proyecto de Reciclaje”. Mayo: 2, 8., México.
- Juárez Badillo E., Rico Rodríguez. A. (2006), Mecánica de suelos, tomo 1, Editorial Limusa. México. ISBN: 13978-968-18-0069-730.3
- Kosmatka Steven H. y Panarese William C. (1992), Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-074-9
- Lay, M. G. (1992), Ways of the world, Sydney: Primavera Press. ISBN: 1-875368-05-1
- Lepe Saucedo J.L. (1977), Diseño de pavimentos de concreto para Aeropuertos, Portland Cement Association. Limusa. México.

- Mamlouk M. S., Zaniewski J.P. (2009), Materiales para ingeniería civil, 2ª edición, Pearson, Prentice Hall. ISBN: 978-84-8322-510-3.
- Martínez Soto I. E. y Mendoza Escobedo C. J. (2006) Comportamiento Mecánico de Concreto fabricado con agregados reciclados. *Investigación y Tecnología*, V 7:3, 151-164. Facultad de Ingeniería, UNAM, ISSN: 1405-7743.
- Mehta Kumar y Monteiro Paulo. (1998), Concreto, estructura, propiedades y materiales. IMCYC. México. D.F. ISBN: 968-464-083-8.
- Merritt S. Frederick, Kent Loftin M., Ricketts T. J. (2001) Manual del ingeniero civil, Tomo 1. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, D.F. ISBN: 970-10-2255-6.
- Mindess Sidney, Young J. Francis, Darwin, D. (2003), Concrete. Prentice-Hall. U.S.A. ISBN: 978-013-064-632-3.
- Ministerio de Educación Superior (2010), Manual de Pavimentos Rígidos, Instituto Universitario Politécnico. España, Barcelona.
- M-MMP-1-07/07 (2007), SCT. Método de muestreo y prueba de materiales. Suelos y materiales para terracerías. Límites de consistencia.
- M-MMP-4-04-005/08 (2008), SCT. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas.
- M-MMP-4-04-006/02 (2002), SCT. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Desgaste mediante la prueba de los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas.
- M-MMP-4-04-008/03 (2003), SCT. Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Materiales para pavimentos. Materiales pétreos para mezclas asfálticas. Intemperismo acelerado de materiales pétreos para mezclas asfálticas.

- Montejo F. A. (2008), Ingeniería de pavimentos, fundamentos, estudios básicos y diseño. Tomo 1. Universidad católica de Colombia ediciones y publicaciones. Colombia. ISBN: 958-97617-9-8
- N-CMT-2-02-002/02. (2002), SCT. Características de los materiales. Materiales para estructuras. Materiales para concreto hidráulico. Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico.
- Neville Adam M. (1999), Tecnología del concreto. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-092-7
- NMX-C-073-ONNCCE-2004 Industria de la construcción –Agregados–Masa volumétrica – Método de prueba.
- NMX-C-075-ONNCCE-2006 Industria de la construcción –Agregados– Determinación de la sanidad por medio del sulfato de sodio o del sulfato de magnesio.
- NMX-C-076-ONNCCE-2002 Industria de la construcción – Agregados – Efectos de las impurezas orgánicas en los agregados finos sobre la resistencia de los morteros – Método de prueba.
- NMX-C-084-ONNCCE-2006 Industria de la construcción –Agregados para concreto - Partículas más finas que la criba 0,075 mm (No. 200) por medio de lavado – Método de prueba.
- NMX-C-111-ONNCCE-2004 Industria de la construcción -Agregados para concreto hidráulico - Especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-C-122-ONNCCE-2004 Industria de la construcción- Agua para concreto- Especificaciones.
- NMX-C-128-ONNCCE-1997 Industria de la construcción –Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson.
- NMX-C-156-ONNCCE-2010 Industria de la construcción –Concreto hidráulico – Determinación del revenimiento en el concreto fresco.

NMX-C-157-ONNCCE-2006 Industria de la construcción –Concreto– Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.

NMX-C-164-ONNCCE-2002 Industria de la construcción –Agregados– Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.

NMX-C-170-ONNCCE-1997 Industria de la construcción – Agregados – Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas.

NMX-C-177-1997-ONNCCE Industria de la construcción –Concreto– Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración.

NMX-C-191-ONNCCE-2004 Industria de la construcción –Concreto– Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro.

NMX-C-196-ONNCCE-2010 Industria de la construcción –Agregados– Determinación de la resistencia a la degradación por abrasión e impacto de agregados gruesos usando la máquina de los Ángeles.

NMX-C-414-ONNCCE-2010, Industria de la construcción –Cementos hidráulicos– Especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-416-ONNCCE-2003 Industria de la construcción–Muestreo de estructuras térreas y métodos de prueba.

NMX-C-435-ONNCCE-2010 Industria de la construcción-Concreto hidráulico - Determinación de la temperatura del concreto fresco.

NMX-C-436-ONNCCE-2004 Industria de la construcción–Agregados para concreto–Coeficiente volumétrico (de forma) en agregado grueso–Método de prueba.

Olivera Bustamante F. (2004). Estructuración de vías terrestres, Continental. México. D.F. ISBN: 968-26-1286-1

- Puertas F. (2005), Influencia de Aditivos basados en policarboxilato sobre el fraguado y comportamiento reológico de pastas de cemento Portland. CSIC. Madrid.
- Rico R. A. y Del Castillo H. M. (1990) La Ingeniería de suelos en las vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen 2. Limusa, Noriega Editores. México. ISBN: 968-0079-6
- Rico R. A. y Del Castillo H. M. (2006) La Ingeniería de suelos en las vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen 1. Limusa, Noriega Editores. México. ISBN: 10-968-18-0054-0
- Salazar Rodríguez A. (2009) Guía para la construcción de pavimentos y bases de concretos, IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-179-2
- Salazar Rodríguez A. (2009) Pavimentos de concreto compactado con rodillos. ACI 325.10-(01). IMCYC. México. D.F. ISBN: 968-464-180-8
- Salazar Rodríguez A. (2011) Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-194-5
- Sánchez De Guzmán D. (2006) Durabilidad y patología del concreto. Asocreto. Bogotá, Colombia. ISBN: 958-96709-7-0
- Sánchez Sabogal F. (2005) Glosario de ingeniería de pavimentos. Bogotá, Colombia.
- Sanjuán Barbudo M. A. y Castro Borges P. (2001) Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. IMCYC. México. D.F. ISBN: 968-464-097-8
- Serment G. V., (2012), Pavimentos rígidos y flexibles, ventajas y desventajas. Memorias del Diecinueveavo Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres.
- Tárano León S. y Howland Alvear J. J. (2010) El Hormigonado de estructuras asistido por computadora: un reto tecnológico vigente. *Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo*, V 2:1, 44-45. IMCYC, México, D.F.

- Terán Gilmore A. (2010) El futuro del diseño sismo resistente de las edificaciones de concreto reforzado: una visión basada en la sustentabilidad. *Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo*, V 2:1, 2-11. IMCYC, México, D.F.
- Torrent R. (2004) Manual principios de optimización del diseño de mezclas. Holcim Apasco.
- U.S. Bureau of Reclamation. (2013). Recuperado Diciembre 2, 2013, de <http://www.usbr.gov/main/about/>
- Universidad Autónoma de Querétaro (2012) Práctica No. 7: Determinación de los límites de consistencia. Facultad de Ingeniería.
- Uribe A. R. (2004), Manual de identificación práctica de minerales y rocas para su uso como agregados para concreto. IMCYC. México, D. F. ISBN: 968-464-138-9.
- Uribe A. R., Álvarez Pérez S., Flores Martínez J. J. (1999), Evaluación física de agregados gruesos para pisos y pavimentos de concreto. Primer Congreso Interamericano del Cemento y del Concreto IMCYC. México, D.F.
- Vidaud E. (2011) Materiales, diseño y construcción. *Construcción y Tecnología*. 5, 20-23. IMCYC, México, D.F.
- Zabaleta, H. (1992) Compendio de Tecnología de Hormigón, Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón. Chile, Santiago.
- Zarate A. M. (2003) Diseño de pavimentos flexibles. Primera Parte. Asociación Mexicana del Asfalto A.C. México. D.F. ISBN: 978-607-8134-03-8
- Zarate A. M., Salazar Rodríguez A. y Tena Colunga J. A. (2002), Pavimentos de concreto para carreteras. IMCYC. México, D.F. ISBN: 968-464-112-5

## CAPÍTULO VII.- ANEXOS

### Tabla A-1 Resultados de la planta 1 arena 1.

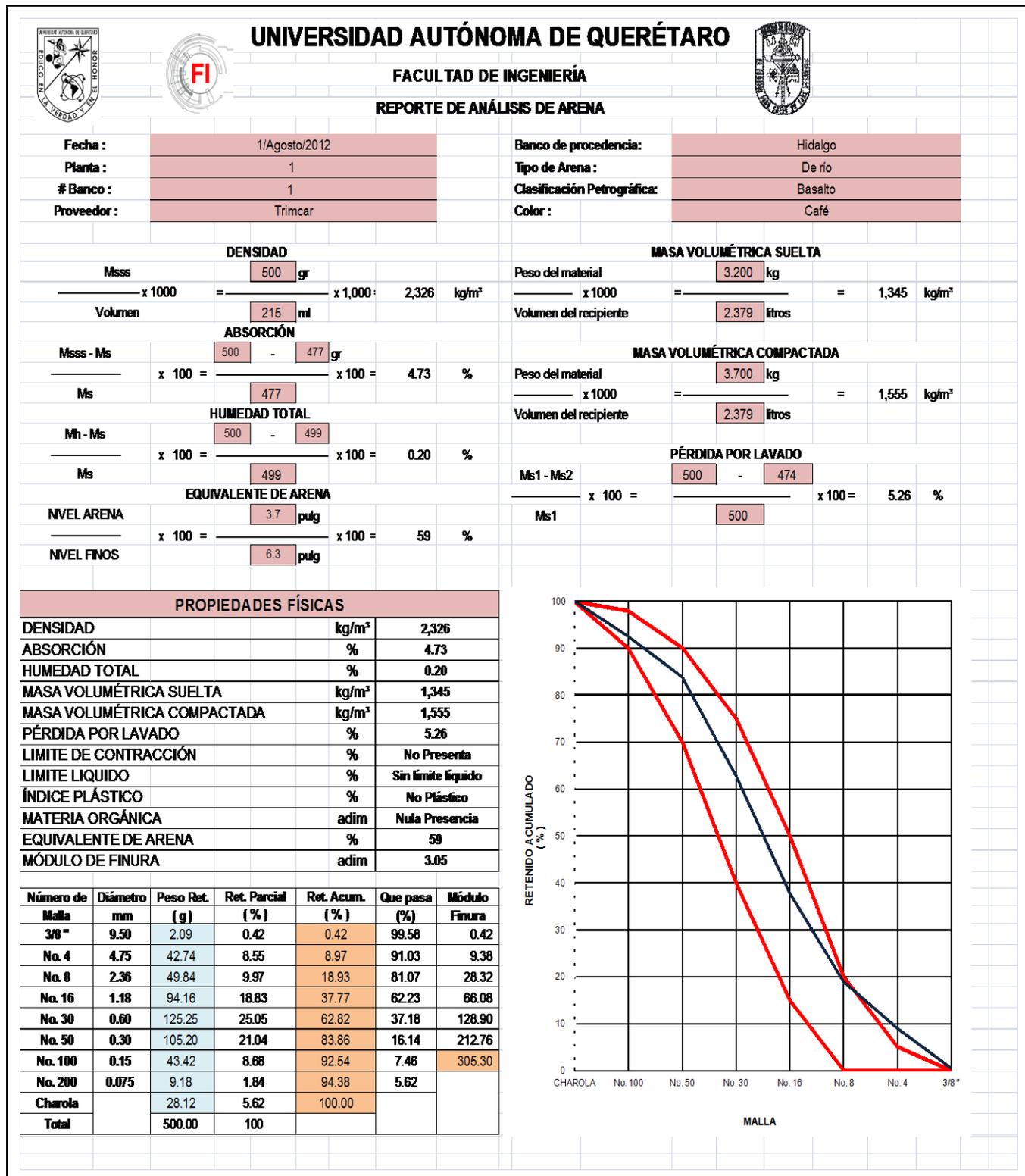


Tabla A-2 Resultados de la planta 1 arena 2.

  <b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> <b>REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA</b>						
<b>Fecha :</b>	2/Agosto/2012	<b>Banco de procedencia:</b>	Vizarrón			
<b>Planta :</b>	1	<b>Tipo de Arena :</b>	Triturada			
<b># Banco :</b>	2	<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Caliza			
<b>Proveedor :</b>	Trimcar	<b>Color :</b>	Blanco			
<b>DENSIDAD</b>						
Msss	500 gr					
$\frac{\text{Msss}}{\text{Volumen}} \times 1000$	$= \frac{500}{229} \times 1,000$	$= 2,183$	$\text{kg/m}^3$			
<b>ABSORCIÓN</b>						
Msss - Ms	500 - 476 gr					
$\frac{\text{Msss} - \text{Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 476}{476} \times 100$	$= 5.08$	$\%$			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>						
Mh - Ms	500 - 494					
$\frac{\text{Mh} - \text{Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 494}{494} \times 100$	$= 1.21$	$\%$			
<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>						
Nivel de Arena	3.6 pulg					
$\frac{\text{Nivel de Arena}}{\text{Nivel de Finos}} \times 100$	$= \frac{3.6}{5.7} \times 100$	$= 63$	$\%$			
<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>						
Peso del material	3.700 kg					
$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{3.700}{2.379} \times 1000$	$= 1,555$	$\text{kg/m}^3$			
<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>						
Peso del material	4.400 kg					
$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{4.400}{2.379} \times 1000$	$= 1,850$	$\text{kg/m}^3$			
<b>PÉRDIDA POR LAVADO</b>						
Ms1 - Ms2	500 - 434					
$\frac{\text{Ms1} - \text{Ms2}}{\text{Ms1}} \times 100$	$= \frac{500 - 434}{500} \times 100$	$= 13.29$	$\%$			
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
DENSIDAD		$\text{kg/m}^3$	2,183			
ABSORCION		$\%$	5.08			
HUMEDAD TOTAL		$\%$	1.21			
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA		$\text{kg/m}^3$	1,555			
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA		$\text{kg/m}^3$	1,850			
PÉRDIDA POR LAVADO		$\%$	13.29			
LIMITE DE CONTRACCIÓN		$\%$	No Presenta			
LIMITE LIQUIDO		$\%$	12.30			
ÍNDICE PLÁSTICO		$\%$	No Plástico			
MATERIA ORGÁNICA		adim	Nula Presencia			
EQUIVALENTE DE ARENA		$\%$	63			
MÓDULO DE FINURA		adim	3.16			
<b>Número de Malla</b>	<b>Diámetro mm</b>	<b>Peso Ret. (g)</b>	<b>Ret. Parcial (%)</b>	<b>Ret. Acum. (%)</b>	<b>Que pasa (%)</b>	<b>Módulo Finura</b>
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
No. 4	4.75	28.26	5.65	5.65	94.35	5.65
No. 8	2.36	120.90	24.18	29.83	70.17	35.48
No. 16	1.18	123.11	24.62	54.45	45.55	89.94
No. 30	0.60	67.57	13.51	67.97	32.03	157.91
No. 50	0.30	41.66	8.33	76.30	23.70	234.21
No. 100	0.15	28.77	5.75	82.05	17.95	316.26
No. 200	0.075	17.90	3.58	85.63	14.37	
Charola		71.83	14.37	100.00		
<b>Total</b>		<b>500.00</b>	<b>100</b>			

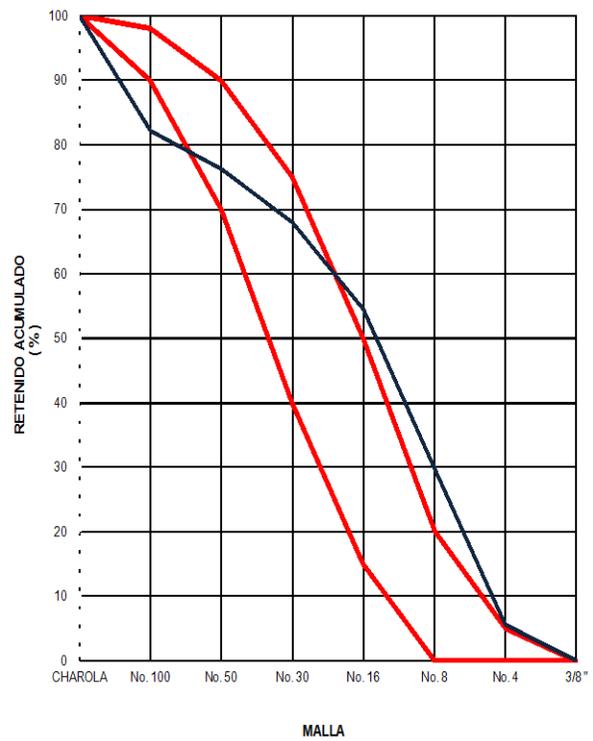


Tabla A-3 Resultados de la planta 2 arena 1.

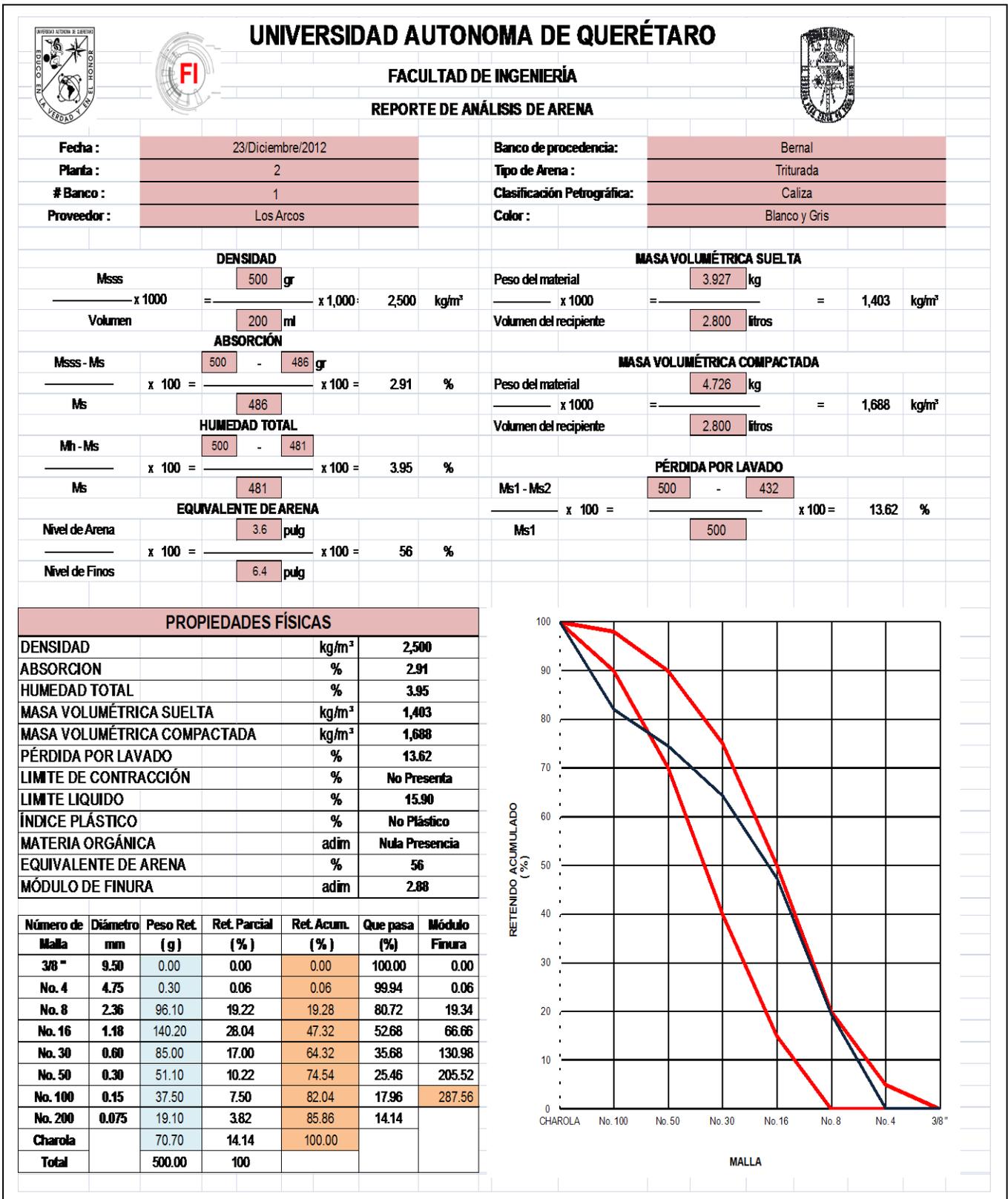


Tabla A-4 Resultados de la planta 3 arena 1.

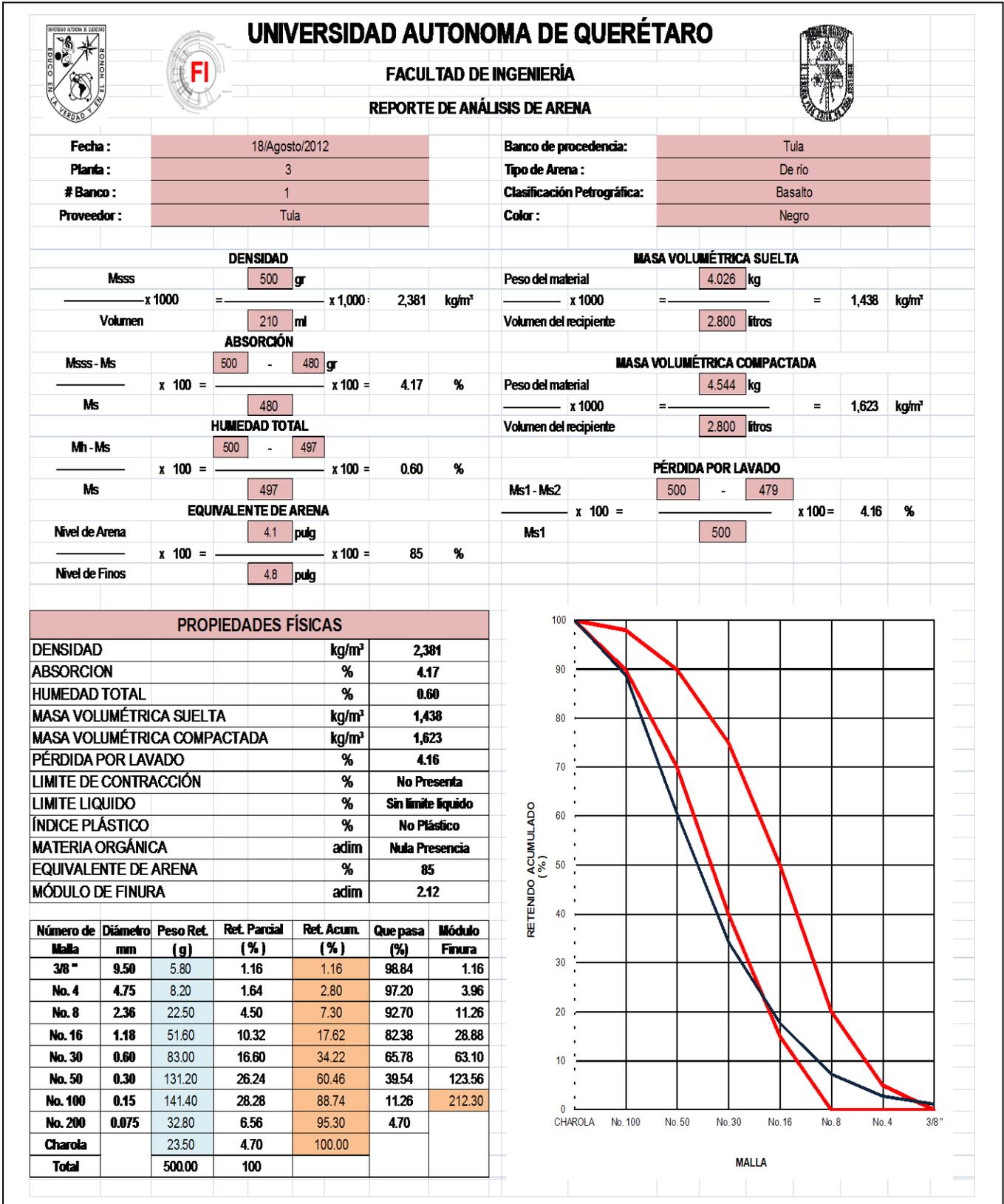


Tabla A-5 Resultados de la planta 4 arena 1.

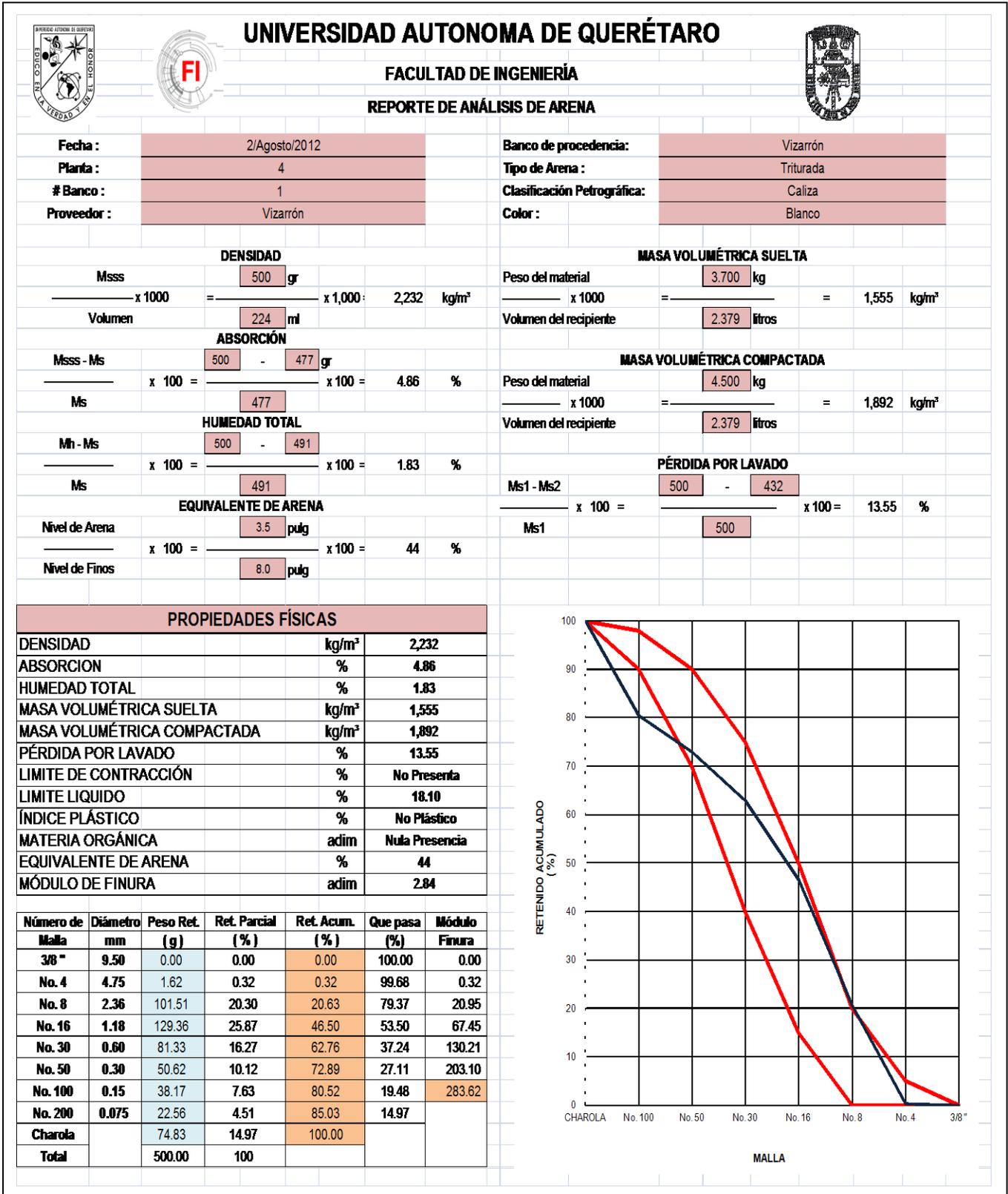


Tabla A-6 Resultados de la planta 4 arena 2.

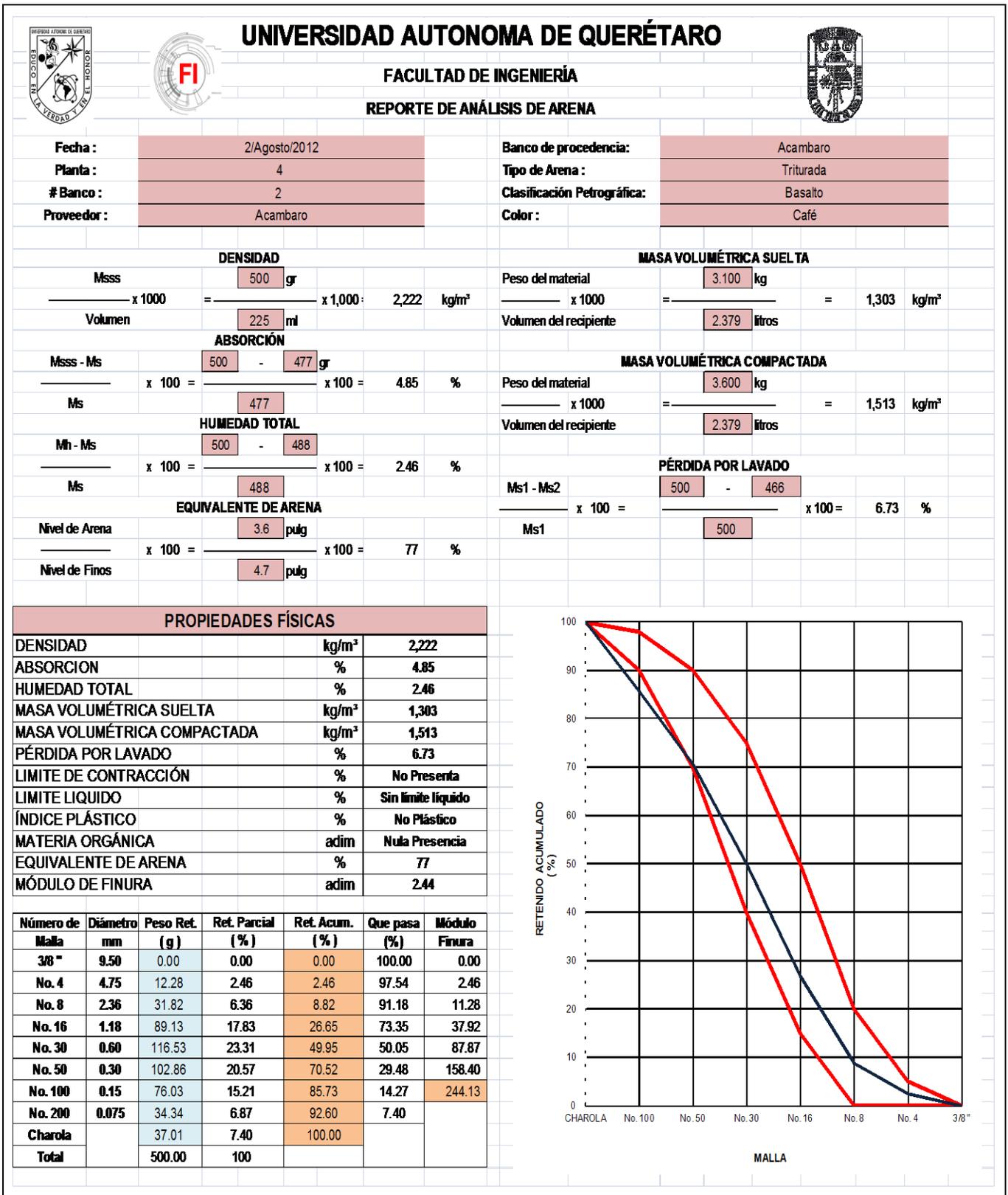


Tabla A-7 Resultados de la planta 5 arena 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO		FACULTAD DE INGENIERÍA		REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA		
Fecha :	21/Septiembre/2012	Banco de procedencia:	Acambaro			
Planta :	5	Tipo de Arena :	Triturada			
# Banco :	1	Clasificación Petrográfica:	Basalto			
Proveedor :	Acambaro	Color :	Café			
<b>DENSIDAD</b>			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>			
Msss	500 gr	Peso del material	2.985 kg			
$\frac{\text{Msss}}{\text{Volumen}} \times 1000$	$= \frac{500}{234} \times 1000$	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{2.985}{2.379} \times 1000$	$= 1,255 \text{ kg/m}^3$		
Volumen	234 ml	Volumen del recipiente	2.379 litros			
<b>ABSORCIÓN</b>			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>			
Msss - Ms	500 - 486 gr	Peso del material	3.230 kg			
$\frac{\text{Msss} - \text{Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 486}{486} \times 100$	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{3.230}{2.379} \times 1000$	$= 1,358 \text{ kg/m}^3$		
Ms	486	Volumen del recipiente	2.379 litros			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>			<b>PÉRDIDA POR LAVADO</b>			
Mh - Ms	500 - 493	Ms1 - Ms2	500 - 464			
$\frac{\text{Mh} - \text{Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 493}{493} \times 100$	$\frac{\text{Ms1} - \text{Ms2}}{\text{Ms1}} \times 100$	$= \frac{500 - 464}{500} \times 100$	$= 7.20 \%$		
Ms	493	Ms1	500			
<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>						
Nivel de Arena	3.3 pulg					
$\frac{\text{Nivel de Arena}}{\text{Nivel de Finos}} \times 100$	$= \frac{3.3}{4.7} \times 100$	$= 70 \%$				
Nivel de Finos	4.7 pulg					
PROPIEDADES FÍSICAS						
DENSIDAD		kg/m <sup>3</sup>		2,137		
ABSORCION		%		2.88		
HUMEDAD TOTAL		%		1.42		
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA		kg/m <sup>3</sup>		1,255		
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA		kg/m <sup>3</sup>		1,358		
PÉRDIDA POR LAVADO		%		7.20		
LIMITE DE CONTRACCIÓN		%		No Presenta		
LIMITE LIQUIDO		%		Sin límite liquido		
ÍNDICE PLÁSTICO		%		No Plástico		
MATERIA ORGÁNICA		adim		Nula Presencia		
EQUIVALENTE DE ARENA		%		70		
MÓDULO DE FINURA		adim		2.83		
Número de Malla	Diámetro mm	Peso Ret. (g)	Ret. Parcial (%)	Ret. Acum. (%)	Que pasa (%)	Módulo Finura
3/8"	9.50	1.30	0.24	0.24	99.76	0.24
No. 4	4.75	15.76	2.88	3.12	96.88	3.35
No. 8	2.36	79.44	14.51	17.62	82.38	20.97
No. 16	1.18	131.94	24.09	41.71	58.29	62.68
No. 30	0.60	103.40	18.88	60.59	39.41	123.28
No. 50	0.30	68.46	12.50	73.09	26.91	196.37
No. 100	0.15	76.03	13.88	86.97	13.03	283.34
No. 200	0.075	34.34	6.27	93.24	6.76	
Charola		37.01	6.76	100.00		
Total		547.68	100			

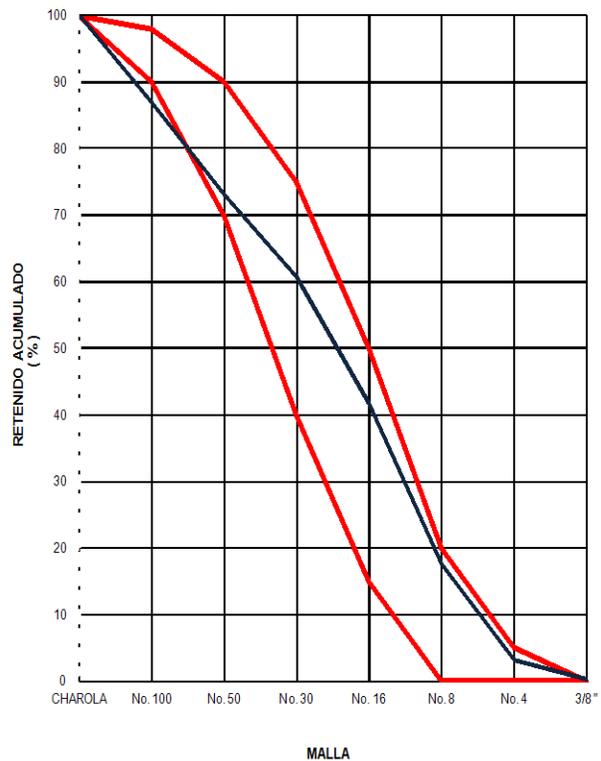


Tabla A-8 Resultados de la planta 6 arena 1.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO		FACULTAD DE INGENIERÍA		REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA		
<b>Fecha :</b>	2/Agosto/2012	<b>Banco de procedencia:</b>	Bernal			
<b>Planta :</b>	6	<b>Tipo de Arena :</b>	Triturada			
<b># Banco :</b>	1	<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Caliza			
<b>Proveedor :</b>	Los Arcos	<b>Color :</b>	Blanco y Gris			
<b>DENSIDAD</b>			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>			
Msss	500 gr		Peso del material	3.426 kg		
$\frac{\text{Msss}}{\text{Volumen}} \times 1000$	$= \frac{500}{203} \times 1,000$	2,460 kg/m <sup>3</sup>	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{3.426}{2.800}$	1,224 kg/m <sup>3</sup>	
Volumen	203 ml		Volumen del recipiente	2.800 litros		
<b>ABSORCIÓN</b>			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>			
Msss - Ms	500 - 484 gr		Peso del material	4.126 kg		
$\frac{\text{Msss - Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 484}{484} \times 100$	3.37 %	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{4.126}{2.800}$	1,474 kg/m <sup>3</sup>	
Ms	484		Volumen del recipiente	2.800 litros		
<b>HUMEDAD TOTAL</b>			<b>PÉRDIDA POR LAVADO</b>			
Mh - Ms	500 - 495		Ms1 - Ms2	500 - 459		
$\frac{\text{Mh - Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 495}{495} \times 100$	1.01 %	$\frac{\text{Ms1 - Ms2}}{\text{Ms1}} \times 100$	$= \frac{500 - 459}{500} \times 100$	8.30 %	
Ms	495		Ms1	500		
<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>						
Nivel de Arena	3.6 pulg					
$\frac{\text{Nivel de Arena}}{\text{Nivel de Finos}} \times 100$	$= \frac{3.6}{4.9} \times 100$	73 %				
Nivel de Finos	4.9 pulg					
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
DENSIDAD	kg/m <sup>3</sup>	2,460				
ABSORCION	%	3.37				
HUMEDAD TOTAL	%	1.01				
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m <sup>3</sup>	1,224				
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m <sup>3</sup>	1,474				
PÉRDIDA POR LAVADO	%	8.30				
LIMITE DE CONTRACCIÓN	%	No Presenta				
LIMITE LIQUIDO	%	Sin limite liquido				
ÍNDICE PLÁSTICO	%	No Plástico				
MATERIA ORGÁNICA	adim	Nula Presencia				
EQUIVALENTE DE ARENA	%	73				
MÓDULO DE FINURA	adim	2.63				
<b>Número de Malla</b>	<b>Diámetro mm</b>	<b>Peso Ret. (g)</b>	<b>Ret. Parcial (%)</b>	<b>Ret. Acum. (%)</b>	<b>Que pasa (%)</b>	<b>Módulo Finura</b>
3/8"	9.50	2.00	0.40	0.40	99.60	0.40
No. 4	4.75	13.20	2.64	3.04	96.96	3.44
No. 8	2.36	61.80	12.36	15.40	84.60	18.84
No. 16	1.18	91.50	18.30	33.70	66.30	52.54
No. 30	0.60	100.80	20.16	53.86	46.14	106.40
No. 50	0.30	87.40	17.48	71.34	28.66	177.74
No. 100	0.15	70.90	14.18	85.52	14.48	263.26
No. 200	0.075	27.10	5.42	90.94	9.06	
Charola		45.30	9.06	100.00		
<b>Total</b>		<b>500.00</b>	<b>100</b>			

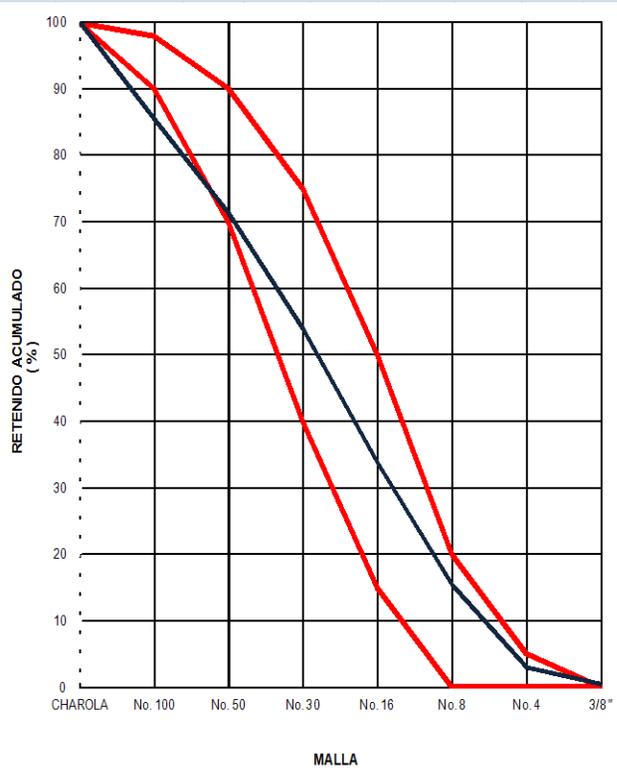


Tabla A-9 Resultados de la planta 6 arena 2.

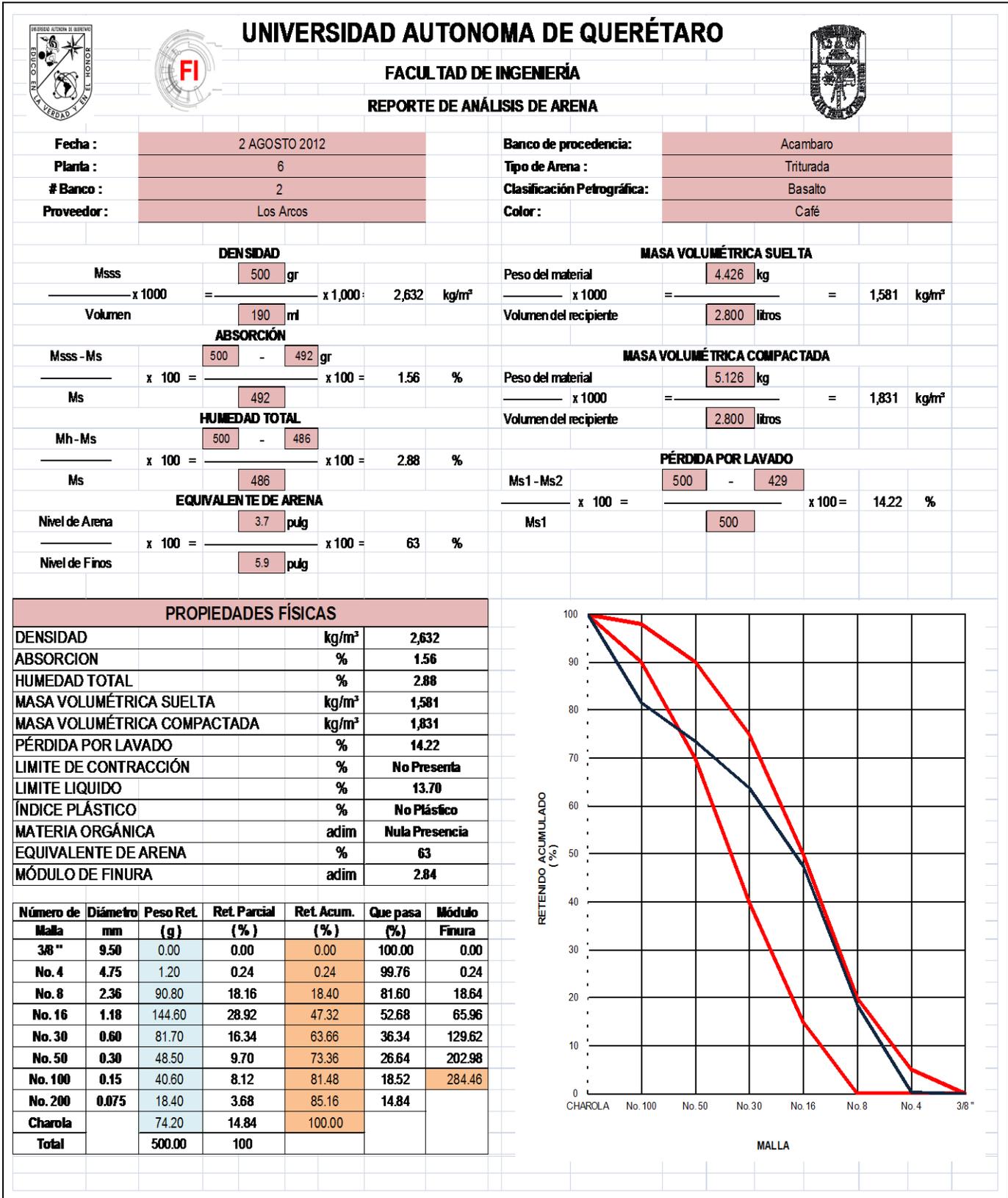


Tabla A-10 Resultados de la planta 7 arena 1.

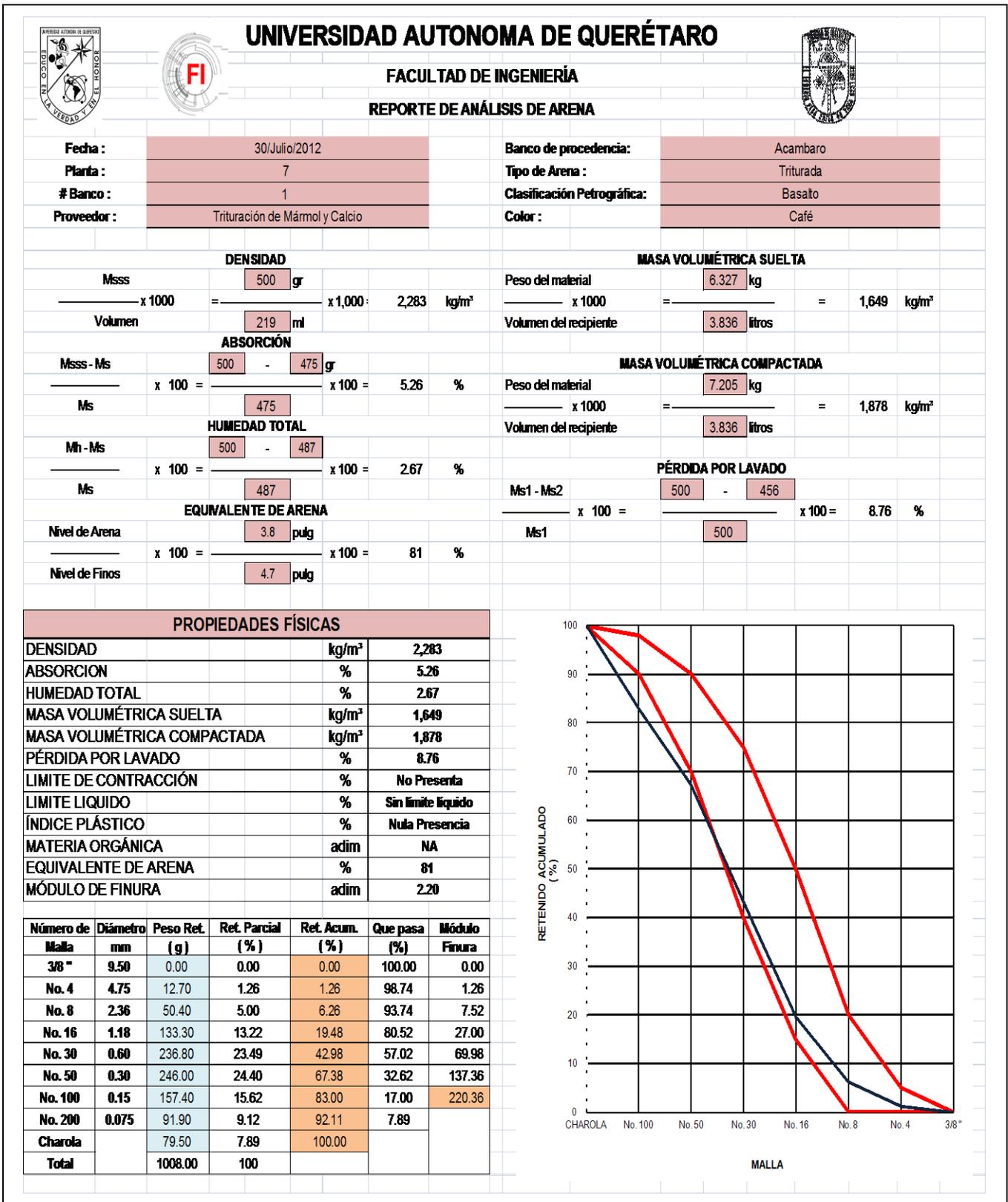


Tabla A-11 Resultados de la planta 7 arena 2.

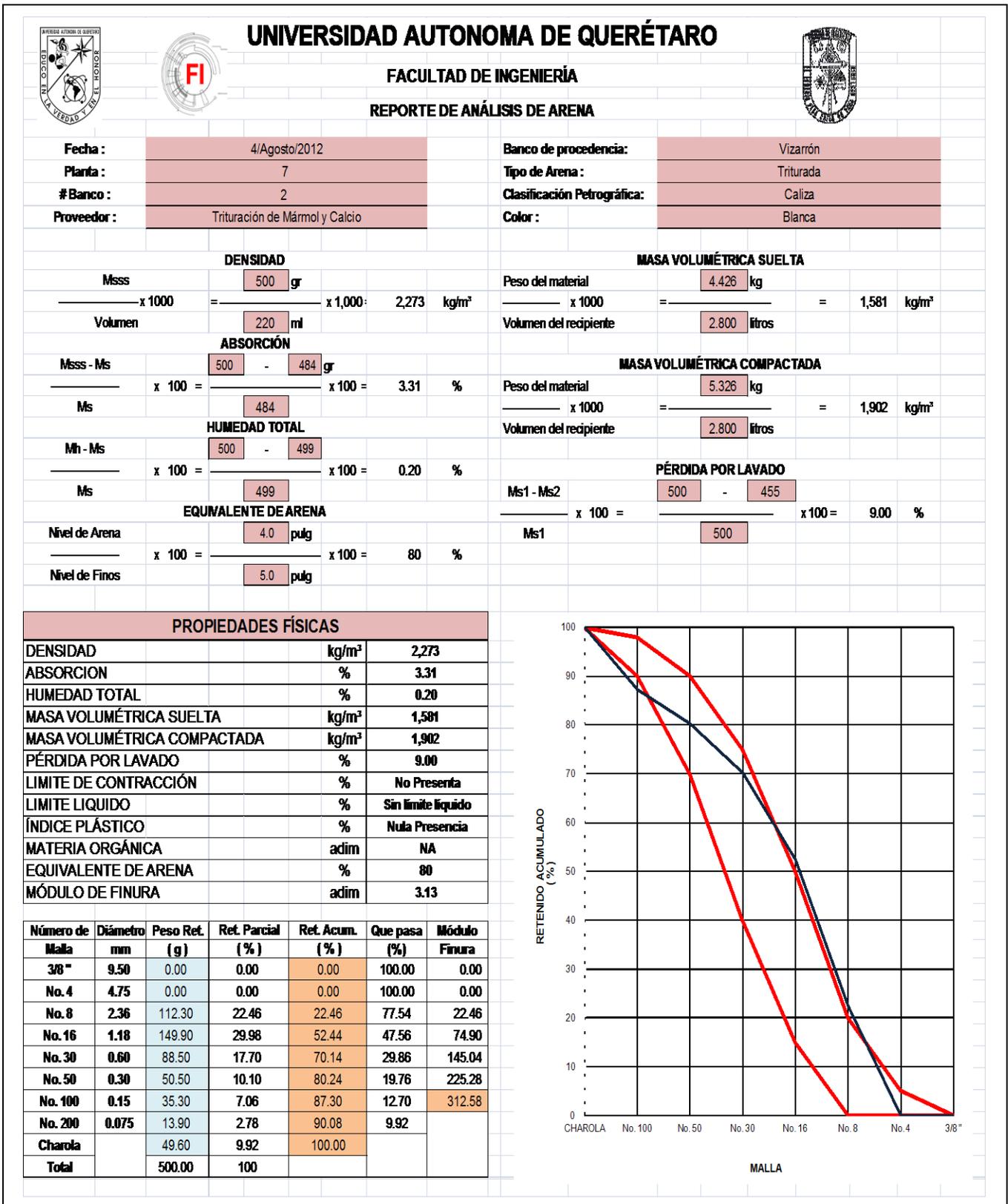


Tabla A-12 Resultados de la planta 8 arena 1.

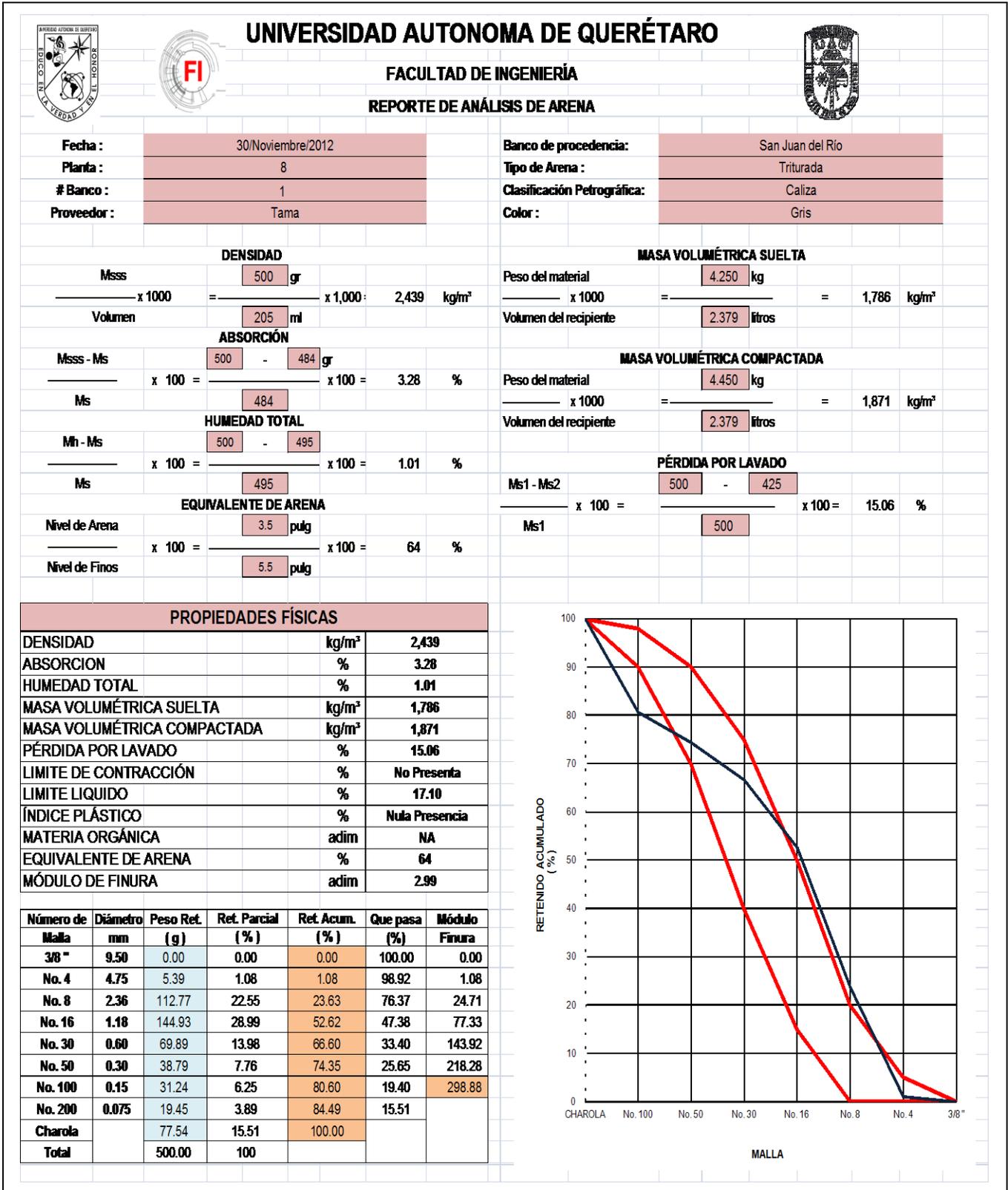


Tabla A-13 Resultados de la planta 8 arena 2.

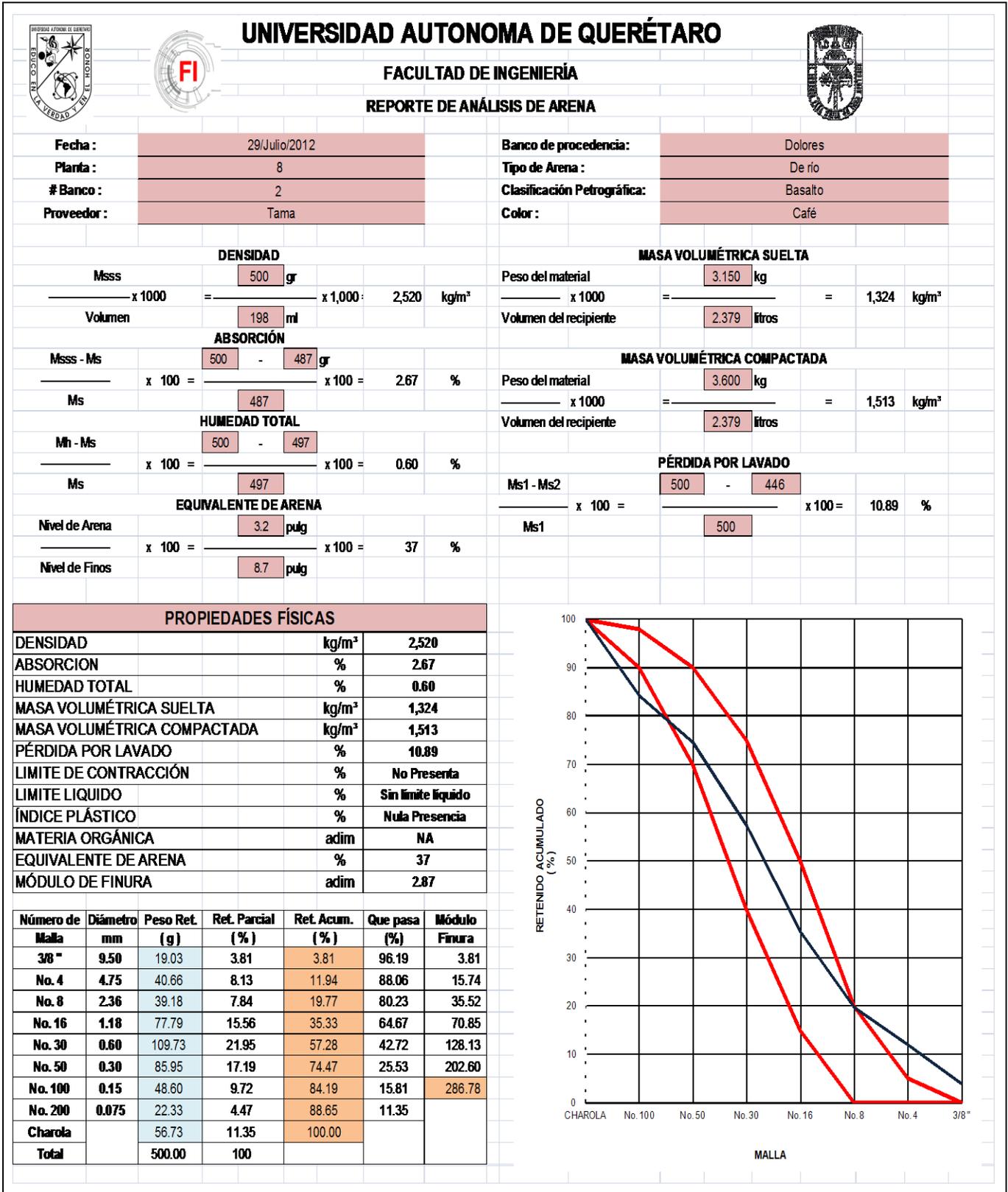


Tabla A-14 Resultados de la planta 9 arena 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO		FACULTAD DE INGENIERÍA				
REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA						
Fecha :	5/Agosto/2012	Banco de procedencia:	La Loma			
Planta :	9	Tipo de Arena :	Triturada			
# Banco :	1	Clasificación Petrográfica:	Basalto			
Proveedor :	La Loma	Color :	Gris			
<b>DENSIDAD</b>		<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>				
Msss	500 gr	Peso del material	3.627 kg			
$\frac{\text{Msss}}{\text{Volumen}} \times 1000$	$= \frac{500}{195} \times 1000 = 2,564$ kg/m <sup>3</sup>	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{3.627}{2.800} \times 1000 = 1,295$ kg/m <sup>3</sup>			
<b>ABSORCIÓN</b>		<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>				
Msss - Ms	500 - 487 gr	Peso del material	4.127 kg			
$\frac{\text{Msss - Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 487}{487} \times 100 = 2.61$ %	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	$= \frac{4.127}{2.800} \times 1000 = 1,474$ kg/m <sup>3</sup>			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>		<b>PÉRDIDA POR LAVADO</b>				
Mh - Ms	500 - 496	Ms1 - Ms2	500 - 450			
$\frac{\text{Mh - Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	$= \frac{500 - 496}{496} \times 100 = 0.81$ %	$\frac{\text{Ms1 - Ms2}}{\text{Ms1}} \times 100$	$= \frac{500 - 450}{500} \times 100 = 9.94$ %			
<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>						
Nivel de Arena	3.8 pulg	Ms1	500			
$\frac{\text{Nivel de Arena}}{\text{Nivel de Finos}} \times 100$	$= \frac{3.8}{4.6} \times 100 = 83$ %					
Nivel de Finos	4.6 pulg					
PROPIEDADES FÍSICAS						
DENSIDAD	kg/m <sup>3</sup>	2,564				
ABSORCION	%	2.61				
HUMEDAD TOTAL	%	0.81				
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m <sup>3</sup>	1,295				
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m <sup>3</sup>	1,474				
PÉRDIDA POR LAVADO	%	9.94				
LIMITE DE CONTRACCIÓN	%	No Presenta				
LIMITE LIQUIDO	%	Sin límite líquido				
ÍNDICE PLÁSTICO	%	Nula Presencia				
MATERIA ORGÁNICA	adim	NA				
EQUIVALENTE DE ARENA	%	83				
MÓDULO DE FINURA	adim	2.42				
Número de Malla	Diámetro (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Parcial (%)	Ret. Acum. (%)	Que pasa (%)	Módulo Finura
3/8 "	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
No. 4	4.75	4.50	0.90	0.90	99.10	0.90
No. 8	2.36	45.80	9.16	10.06	89.94	10.96
No. 16	1.18	91.40	18.28	28.34	71.66	39.30
No. 30	0.60	105.20	21.04	49.38	50.62	88.68
No. 50	0.30	97.60	19.52	68.90	31.10	157.58
No. 100	0.15	76.20	15.24	84.14	15.86	241.72
No. 200	0.075	25.30	5.06	89.20	10.80	
Charola		54.00	10.80	100.00		
Total		500.00	100			

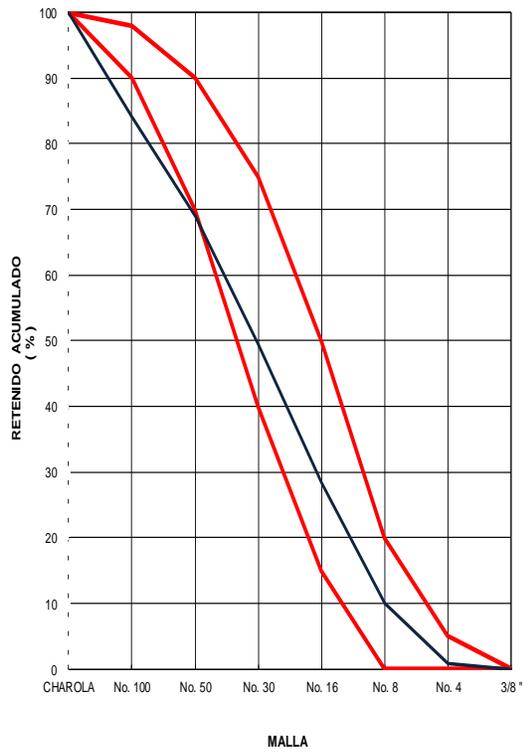


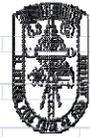
Tabla A-15 Resultados de la planta 9 arena 2.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA

Fecha :	7 AGOSTO	Banco de procedencia :	Acambaro
Planta :	9	Tipo de Arena :	Triturada
# Banco :	2	Clasificación Petrográfica :	Basalto
Proveedor :	Acambaro	Color :	Blanco

DENSIDAD			
Msss	500 gr		
_____ x 1000	=	_____ x 1,000 :	2,326 kg/m <sup>3</sup>
Volumen	215 ml		
ABSORCIÓN			
Msss - Ms	500 - 480 gr		
_____ x 100 =	_____ x 100 =		4.17 %
Ms	480		
HUMEDAD TOTAL			
Mh - Ms	500 - 499		
_____ x 100 =	_____ x 100 =		0.20 %
Ms	499		
EQUIVALENTE DE ARENA			
Nivel de Arena	3.1 pulg		
_____ x 100 =	_____ x 100 =		46 %
Nivel de Finos	6.8 pulg		

MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	
Peso del material	4.487 kg
_____ x 1000	=
Volumen del recipiente	2.800 litros
	= 1,603 kg/m <sup>3</sup>

MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	
Peso del material	5.097 kg
_____ x 1000	=
Volumen del recipiente	2.800 litros
	= 1,820 kg/m <sup>3</sup>

PÉRDIDA POR LAVADO	
Ms1 - Ms2	500 - 414
_____ x 100 =	_____ x 100 =
Ms1	500
	= 17.18 %

PROPIEDADES FÍSICAS			
DENSIDAD	kg/m <sup>3</sup>		2,326
ABSORCION	%		4.17
HUMEDAD TOTAL	%		0.20
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m <sup>3</sup>		1,603
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m <sup>3</sup>		1,820
PÉRDIDA POR LAVADO	%		17.18
LIMITE DE CONTRACCIÓN	%		No Presenta
LIMITE LIQUIDO	%		21.30
ÍNDICE PLÁSTICO	%		Nula Presencia
MATERIA ORGÁNICA	adim		NA
EQUIVALENTE DE ARENA	%		46
MÓDULO DE FINURA	adim		2.93

Número de Malla	Diametro mm	Peso Ret. (g)	Ret. Parcial (%)	Ret. Acum. (%)	Que pasa (%)	Módulo Finura
3/8 "	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
No. 4	4.75	6.80	1.36	1.36	98.64	1.36
No. 8	2.36	119.10	23.82	25.18	74.82	26.54
No. 16	1.18	130.30	26.06	51.24	48.76	77.78
No. 30	0.60	67.40	13.48	64.72	35.28	142.50
No. 50	0.30	38.10	7.62	72.34	27.66	214.84
No. 100	0.15	27.50	5.50	77.84	22.16	292.68
No. 200	0.075	17.40	3.48	81.32	18.68	
Charola		93.40	18.68	100.00		
Total		500.00	100			

Tabla A-16 Resultados de la planta 10 arena 1.

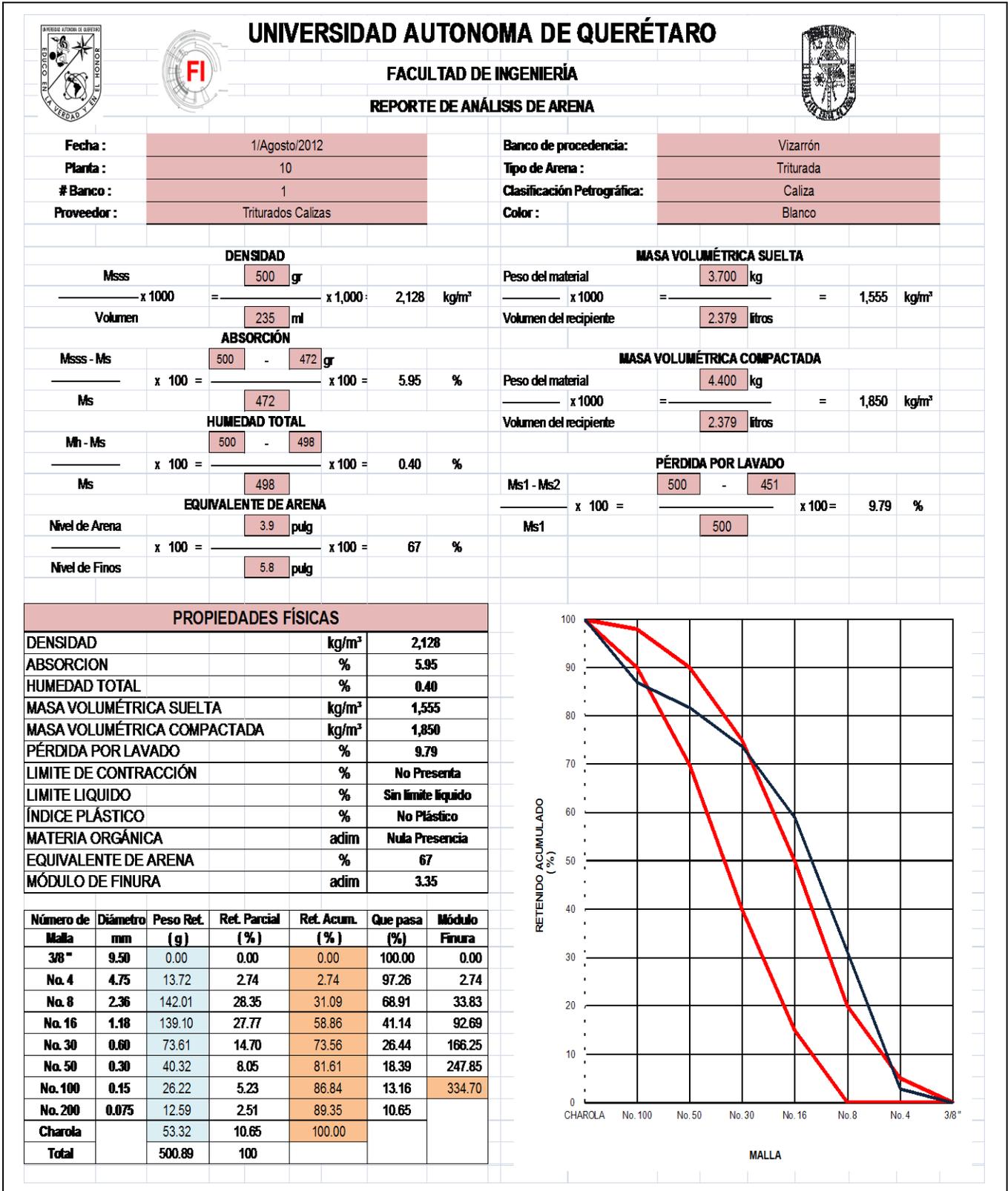


Tabla A-17 Resultados de la planta 10 arena 2.

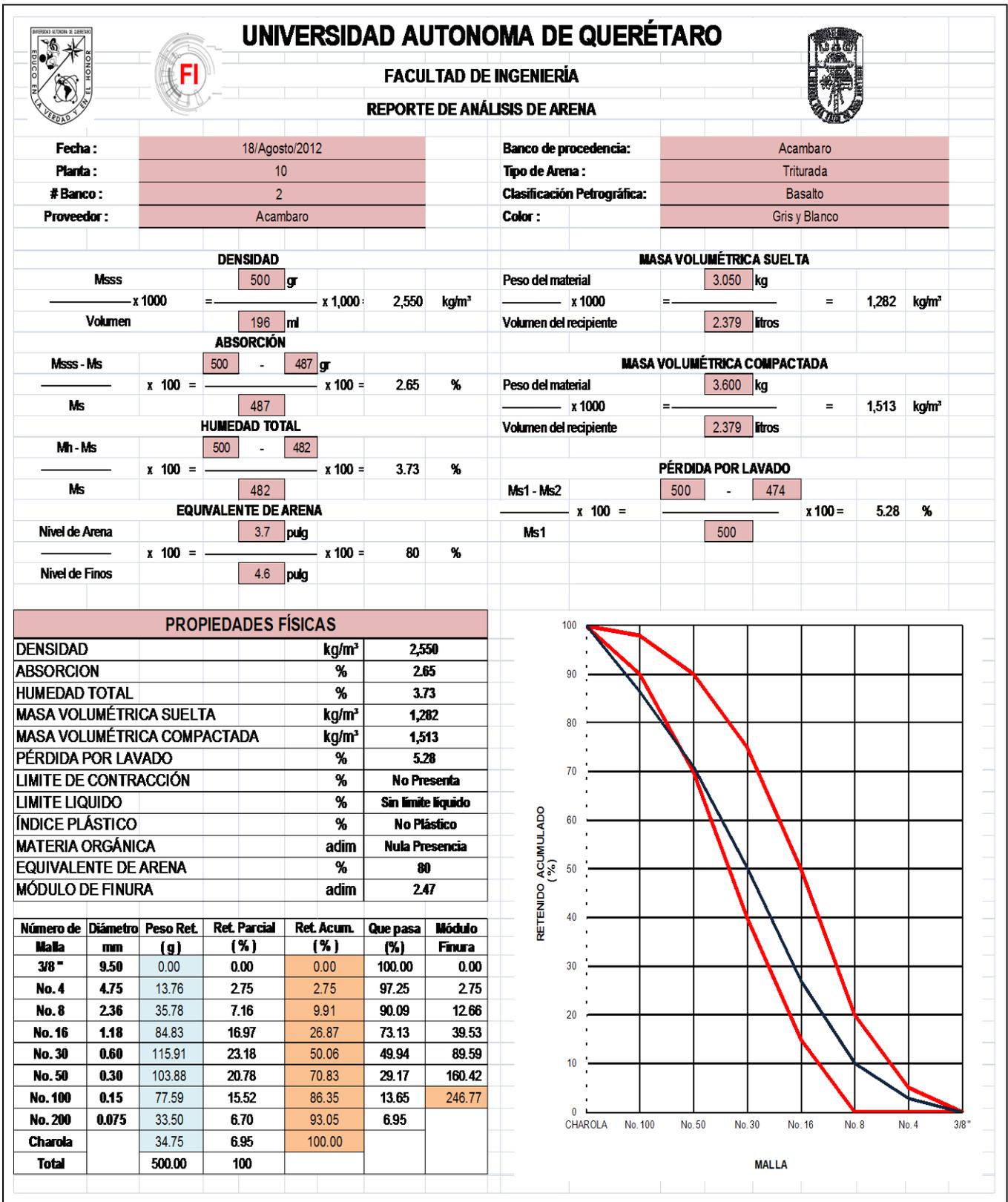


Tabla A-18 Resultados de la planta 11 arena 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO		FACULTAD DE INGENIERÍA		REPORTE DE ANÁLISIS DE ARENA	
<b>Fecha :</b>	21/Diciembre/2012	<b>Banco de procedencia:</b>	Acambaro		
<b>Planta :</b>	11	<b>Tipo de Arena :</b>	Triturada		
<b># Banco :</b>	1	<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Basalto		
<b>Proveedor :</b>	Acambaro	<b>Color :</b>	Negro		

<b>DENSIDAD</b>		<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>	
Msss	500 gr	Peso del material	3.776 kg
$\frac{\text{Msss}}{\text{Volumen}} \times 1000$	= $\frac{500}{230} \times 1,000$	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	= $\frac{3.776}{2.800} \times 1,000$ = 1,349 kg/m <sup>3</sup>
Volumen	230 ml	Volumen del recipiente	2.800 litros
<b>ABSORCIÓN</b>		<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>	
Msss - Ms	500 - 473 gr	Peso del material	4.226 kg
$\frac{\text{Msss - Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	= $\frac{500 - 473}{473} \times 100$ = 5.74 %	$\frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}} \times 1000$	= $\frac{4.226}{2.800} \times 1,000$ = 1,509 kg/m <sup>3</sup>
Ms	473	Volumen del recipiente	2.800 litros
<b>HUMEDAD TOTAL</b>		<b>PÉRDIDA POR LAVADO</b>	
Mh - Ms	500 - 487	Mss1 - Ms2	500 - 439
$\frac{\text{Mh - Ms}}{\text{Ms}} \times 100$	= $\frac{500 - 487}{487} \times 100$ = 2.67 %	$\frac{\text{Mss1 - Ms2}}{\text{Ms1}} \times 100$	= $\frac{500 - 439}{500} \times 100$ = 12.20 %
Ms	487	Ms1	500
<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>			
Nivel de Arena	3.8 pulg		
$\frac{\text{Nivel de Arena}}{\text{Nivel de Finos}} \times 100$	= $\frac{3.8}{7.3} \times 100$ = 52 %		
Nivel de Finos	7.3 pulg		

PROPIEDADES FÍSICAS			
DENSIDAD	kg/m <sup>3</sup>		2,174
ABSORCION	%		5.74
HUMEDAD TOTAL	%		2.67
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m <sup>3</sup>		1,349
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m <sup>3</sup>		1,509
PÉRDIDA POR LAVADO	%		12.20
LÍMITE DE CONTRACCIÓN	%		No Presenta
LÍMITE LIQUIDO	%		16.20
ÍNDICE PLÁSTICO	%		No Plástico
MATERIA ORGÁNICA	adim		Nula Presencia
EQUIVALENTE DE ARENA	%		52
MÓDULO DE FINURA	adim		2.65

Número de Malla	Diámetro mm	Peso Ret. (g)	Ret. Parcial (%)	Ret. Acum. (%)	Que pasa (%)	Módulo Finura
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
No. 4	4.75	8.20	1.64	1.64	98.36	1.64
No. 8	2.36	64.70	12.94	14.58	85.42	16.22
No. 16	1.18	114.30	22.86	37.44	62.56	53.66
No. 30	0.60	98.90	19.78	57.22	42.78	110.88
No. 50	0.30	72.80	14.56	71.78	28.22	182.66
No. 100	0.15	53.00	10.60	82.38	17.62	265.04
No. 200	0.075	22.90	4.58	86.96	13.04	
Charola		65.20	13.04	100.00		
<b>Total</b>		<b>500.00</b>	<b>100</b>			

RETENIDO ACUMULADO (%)

Tabla A-19 Resultados de la planta 11 arena 2.

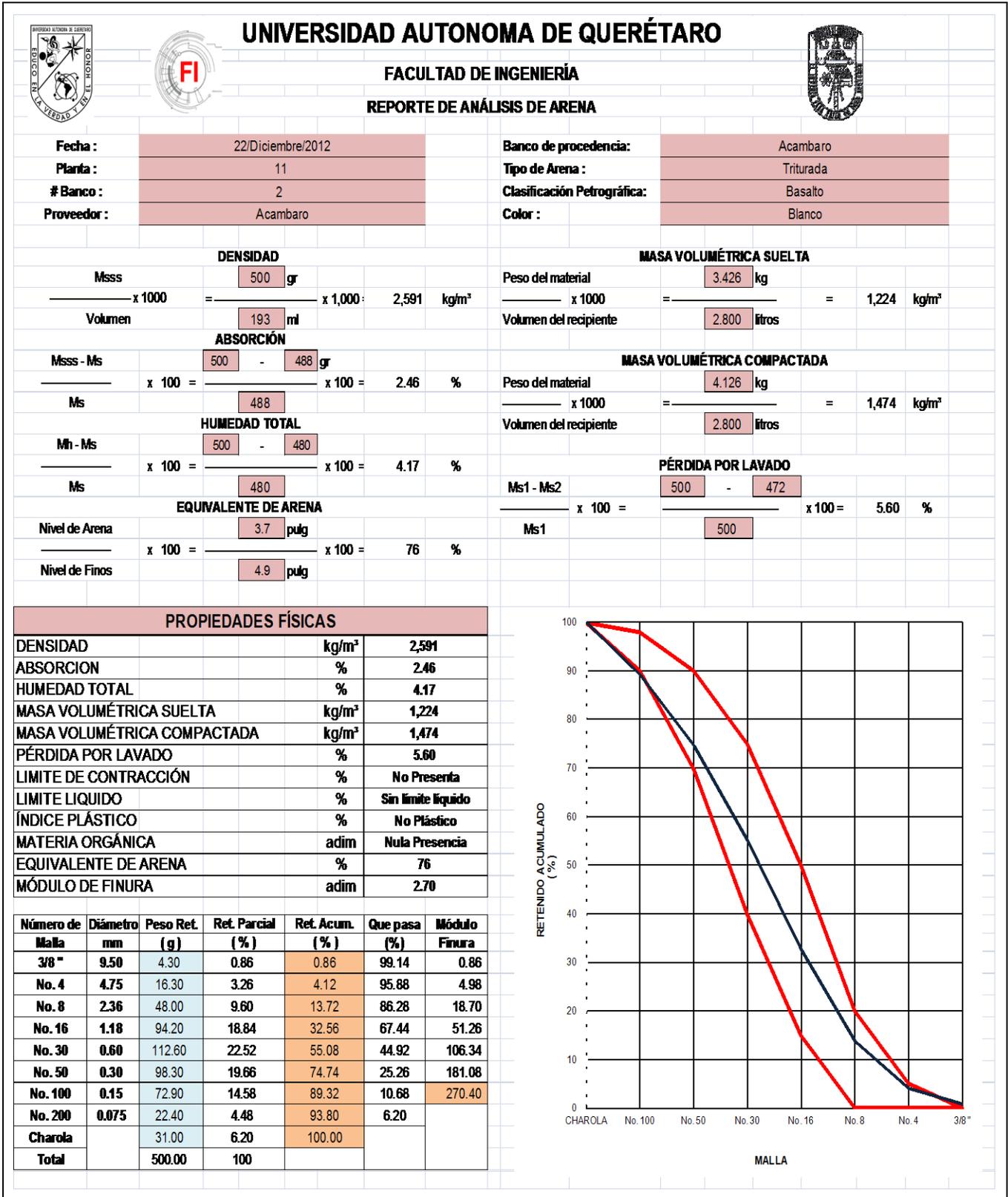


Tabla A-20 Resultados de la planta 12 arena 1.

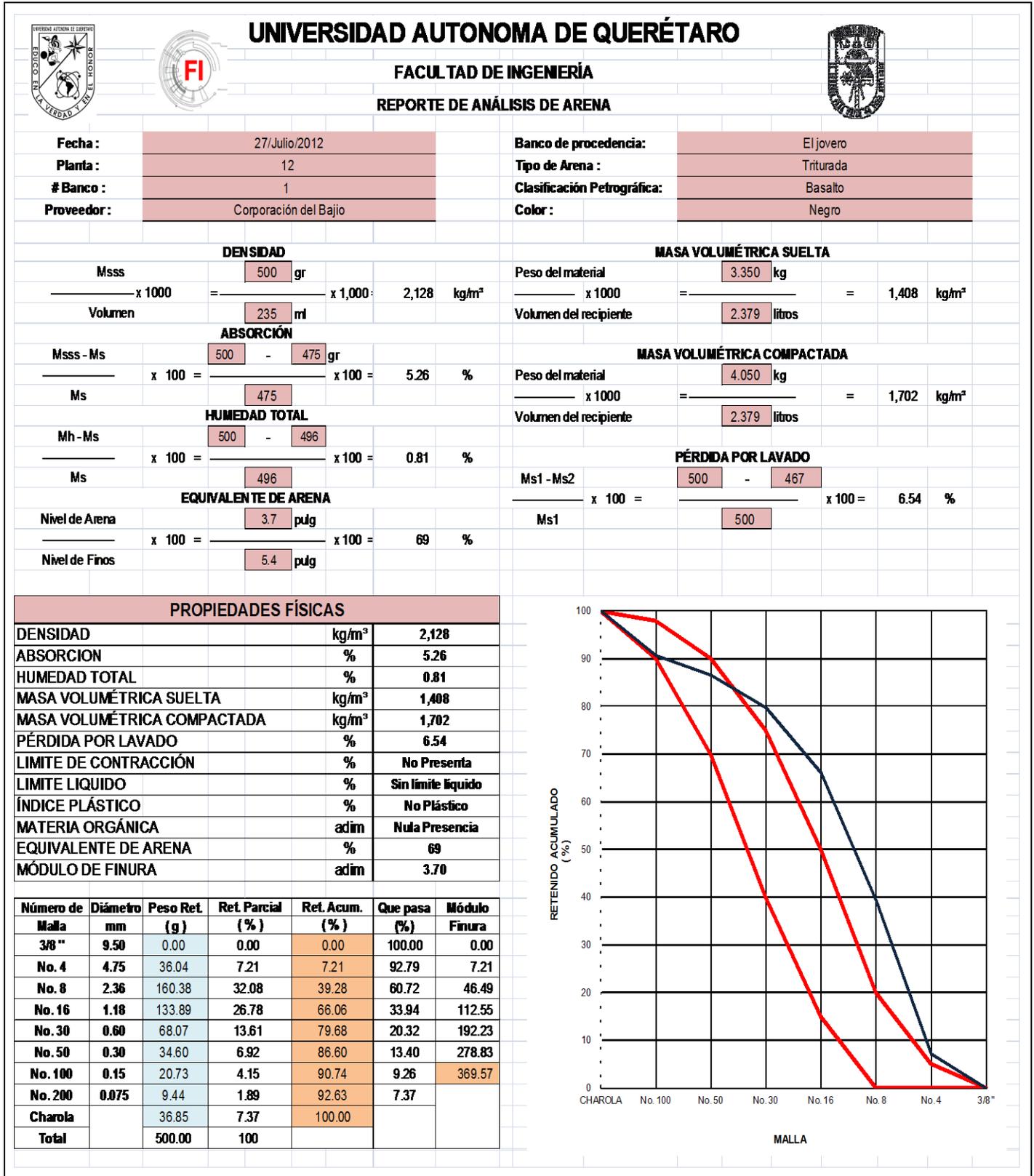


Tabla A-21 Resultados de la planta 12 arena 2.

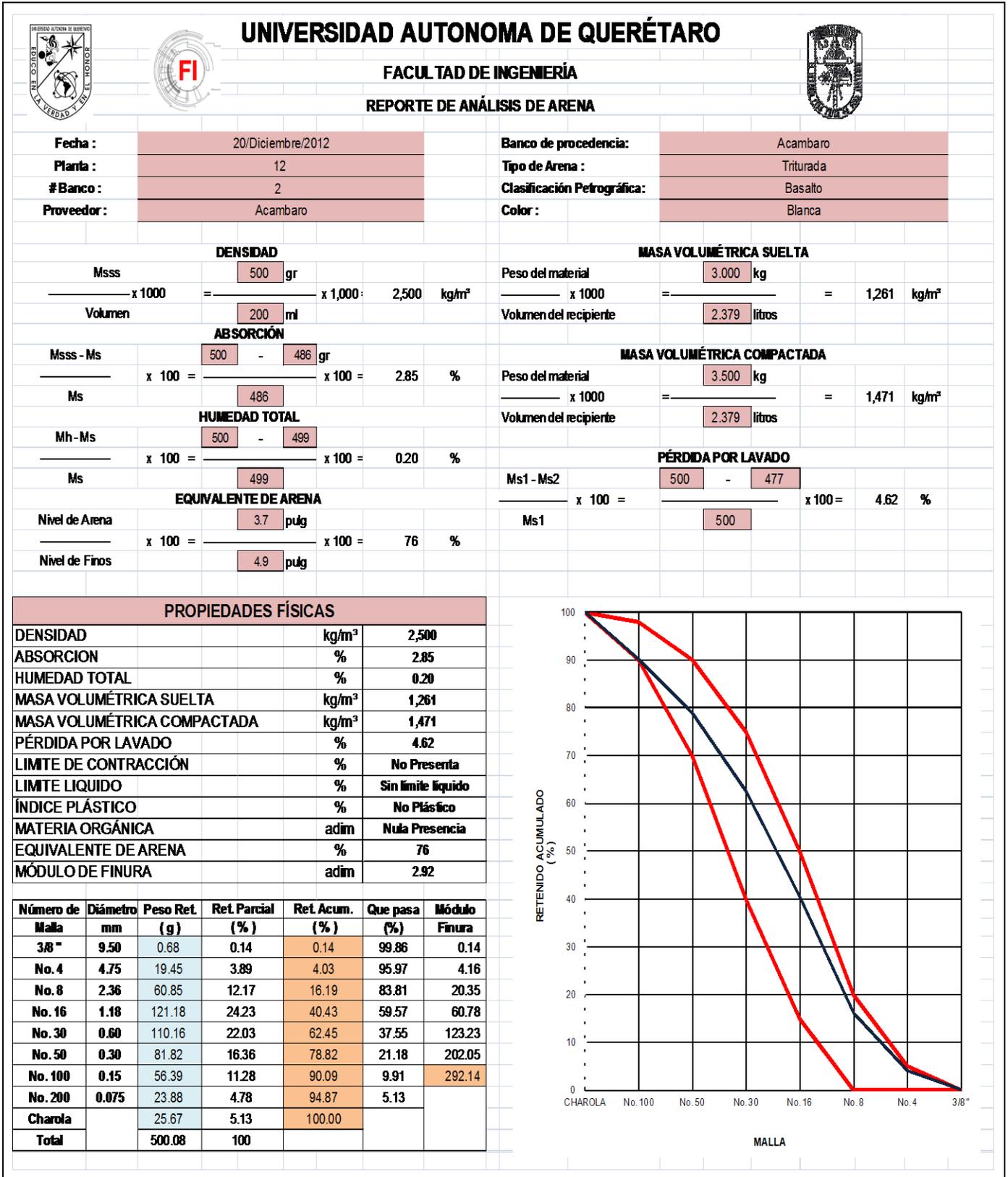


Tabla A-22 Resultados de la grava en la planta 1 banco 1.

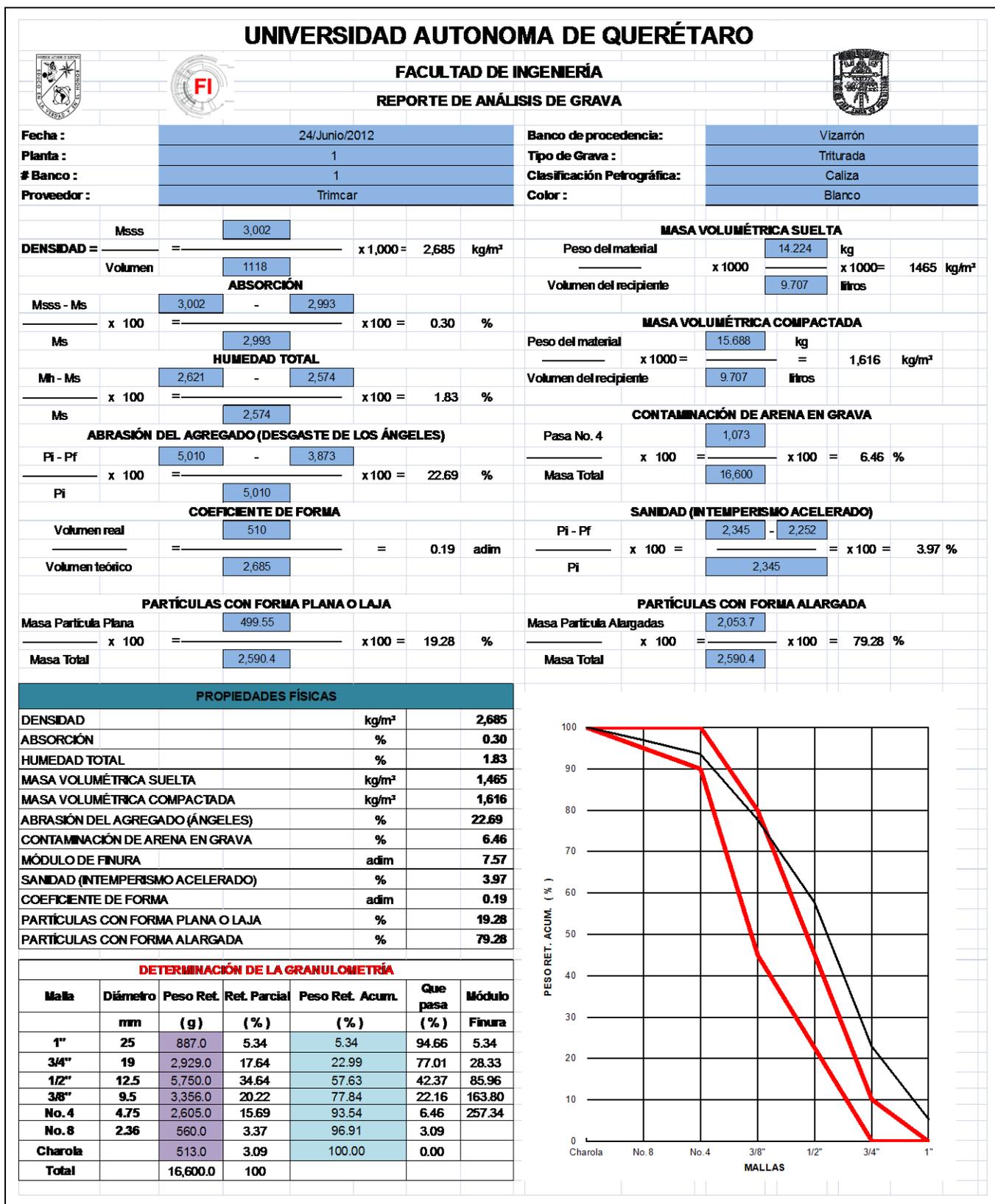


Tabla A-23 Resultados de la grava en la planta 2 banco 1.

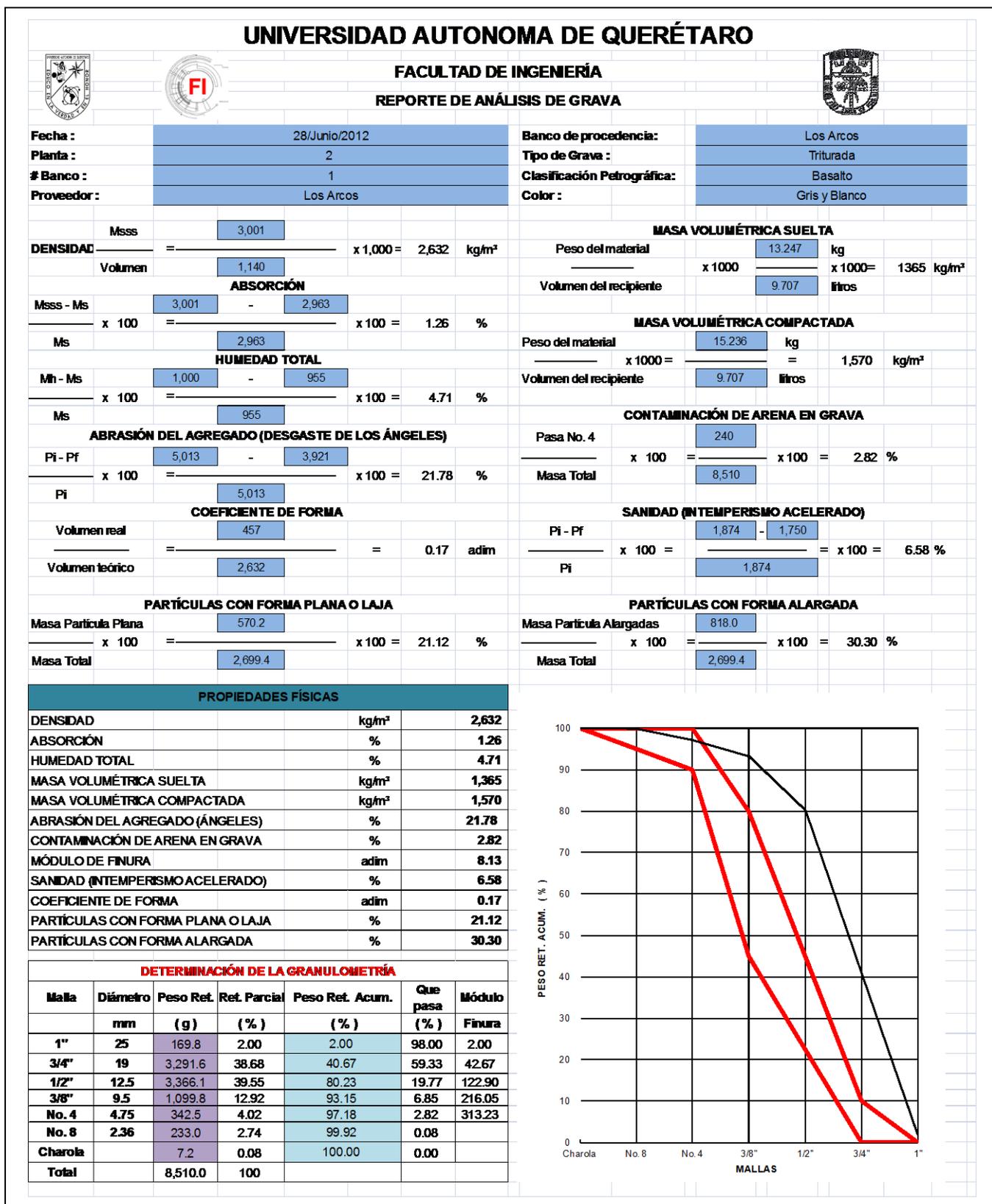


Tabla A-24 Resultados de la grava en la planta 2 banco 2.

<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b>						
						
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>						
<b>REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA</b>						
<b>Fecha :</b>	22/Agosto/2012			<b>Banco de procedencia:</b>	Los Arcos	
<b>Planta :</b>	2			<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada	
<b># Banco :</b>	2			<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Basalto	
<b>Proveedor :</b>	Los Arcos			<b>Color :</b>	Gris	
<b>Msss</b>	5,006			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>		
<b>DENSIDAD</b>	x 1,000 = 2,642 kg/m <sup>3</sup>			<b>Peso del material</b>	13,088 kg	
<b>Volumen</b>	1,895			<b>x 1000 =</b>	1351 kg/m <sup>3</sup>	
<b>ABSORCIÓN</b>						
<b>Msss - Ms</b>	5,006 - 4,949					
<b>x 100 =</b>	x 100 = 1.15 %					
<b>Ms</b>	4,949			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>		
<b>HUMEDAD TOTAL</b>						
<b>Mh - Ms</b>	1,000 - 965			<b>Peso del material</b>	15,138 kg	
<b>x 100 =</b>	x 100 = 3.63 %			<b>x 1000 =</b>	1,562 kg/m <sup>3</sup>	
<b>Ms</b>	965			<b>Volumen del recipiente</b>	9,690 litros	
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>						
<b>Pi - Pf</b>	5,001 - 3,795					
<b>x 100 =</b>	x 100 = 24.12 %					
<b>Pi</b>	5,001			<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>		
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>						
<b>Volumen real</b>	489			<b>Pasa No. 4</b>	106	
<b>Volumen teórico</b>	2,642			<b>x 100 =</b>	x 100 = 0.66 %	
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>						
<b>Masa Partícula Plana</b>	867.3			<b>Masa Total</b>	16,000	
<b>x 100 =</b>	x 100 = 24.08 %					
<b>Masa Total</b>	3,601.1			<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>		
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
<b>DENSIDAD</b>	kg/m <sup>3</sup>			2,642		
<b>ABSORCIÓN</b>	%			1.15		
<b>HUMEDAD TOTAL</b>	%			3.63		
<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>	kg/m <sup>3</sup>			0		
<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>	kg/m <sup>3</sup>			1,562		
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)</b>	%			24.12		
<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>	%			0.66		
<b>MÓDULO DE FINURA</b>	adim			9.45		
<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>	%			16.50		
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>	adim			0.19		
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>	%			24.08		
<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>	%			33.77		
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura
2"	50	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
1 1/2"	37.5	6.4	0.04	0.04	99.96	0.04
1"	25	9,135.1	57.09	57.13	42.87	57.17
3/4"	19	5,469.3	34.18	91.32	8.68	148.49
1/2"	12.5	1,064.1	6.65	97.97	2.03	246.46
3/8"	9.5	150.0	0.94	98.91	1.09	345.37
No. 4	4.75	68.8	0.43	99.34	0.66	444.70
Charola		106.3	0.66	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>16,000.0</b>	<b>100</b>			

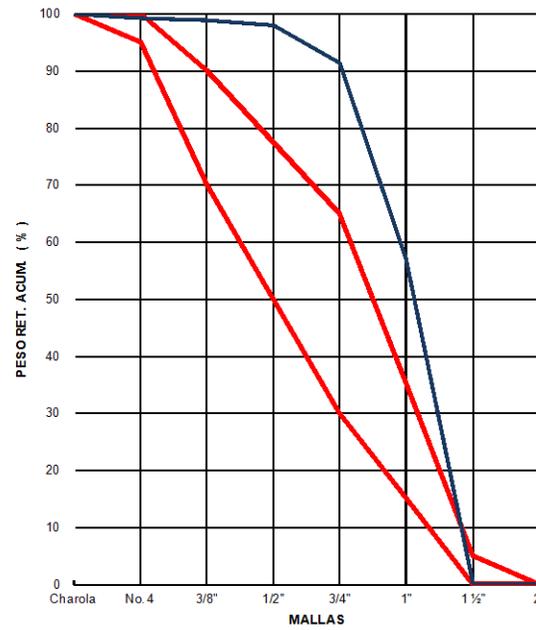
  


Tabla A-25 Resultados de la grava en la planta 3 banco 1.

<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b>						
						
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>						
<b>REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA</b>						
<b>Fecha :</b>	28/Agosto/2012			<b>Banco de procedencia:</b>	La Loma	
<b>Planta :</b>	3			<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada	
<b># Banco :</b>	1			<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Basalto	
<b>Proveedor :</b>	Cemex			<b>Color:</b>	Gris	
<b>DENSIDAD</b>	Msss	5,005				
	Volumen	1,765	x 1,000 =	2,835	kg/m <sup>3</sup>	
<b>ABSORCIÓN</b>						
Msss - Ms	5,005	-	4,968			
	x 100 =		x 100 =	0.74	%	
Ms	4,968					
<b>HUMEDAD TOTAL</b>						
Mh - Ms	1,000	-	940			
	x 100 =		x 100 =	6.38	%	
Ms	940					
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>						
Pi - Pf	5,001	-	4,375			
	x 100 =		x 100 =	12.52	%	
Pi	5,001					
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>						
Volumen real	534					
Volumen teórico	2,835			0.19	adim	
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>						
Masa Partícula Plana	791.5					
	x 100 =		x 100 =	22.14	%	
Masa Total	3,575.6					
<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>						
Peso del material	15,088	kg				
	x 1000 =			15,088	kg/m <sup>3</sup>	
Volumen del recipiente	9,690	litros				
<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>						
Peso del material	17,388	kg				
	x 1000 =			17,388	kg/m <sup>3</sup>	
Volumen del recipiente	9,690	litros				
<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>						
Pasa No. 4	391					
	x 100 =		x 100 =	2.44	%	
Masa Total	16,000					
<b>SANIDAD (IN TEMPERISMO ACELERADO)</b>						
Pi - Pf	2,161	-	2,122			
	x 100 =		x 100 =	1.82	%	
Pi	2,161					
<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>						
Masa Partícula Alargadas	661.8					
	x 100 =		x 100 =	18.51	%	
Masa Total	3,575.6					
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
DENSIDAD		kg/m <sup>3</sup>			2,835	
ABSORCIÓN		%			0.74	
HUMEDAD TOTAL		%			6.38	
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA		kg/m <sup>3</sup>			0	
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA		kg/m <sup>3</sup>			1,794	
ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)		%			12.52	
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA		%			2.44	
MÓDULO DE FINURA		adim			9.06	
SANIDAD (IN TEMPERISMO ACELERADO)		%			1.82	
COEFICIENTE DE FORMA		adim			0.19	
PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA		%			22.14	
PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA		%			18.51	
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret. (g)	Ret. Parcial (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Que pasa (%)	Módulo Finura
2"	50	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
1 1/2"	37.5	222.8	1.39	1.39	98.61	1.39
1"	25	7,198.0	44.99	46.38	53.62	47.77
3/4"	19	4,985.7	31.16	77.54	22.46	125.31
1/2"	12.5	1,736.2	10.85	88.39	11.61	213.71
3/8"	9.5	938.2	5.86	94.26	5.74	307.96
No. 4	4.75	528.1	3.30	97.56	2.44	405.52
Charola		391.0	2.44	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>16,000.0</b>	<b>100</b>			

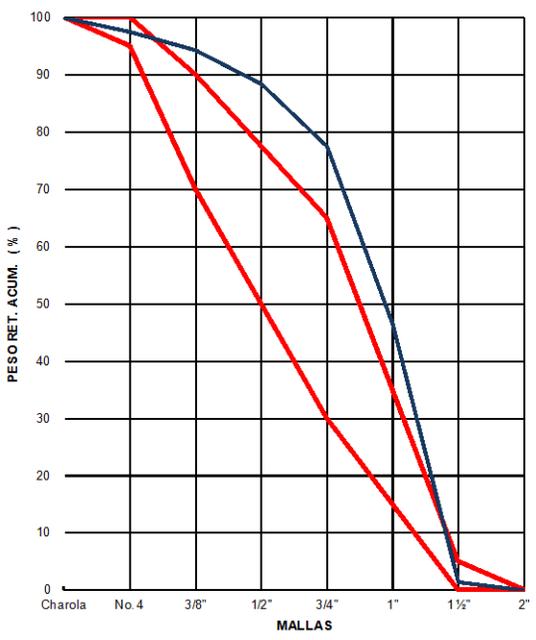




Tabla A-27 Resultados de la grava en la planta 4 banco 2.

<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b>						
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>						
<b>REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA</b>						
<b>Fecha :</b>	18/Septiembre/2012		<b>Banco de procedencia:</b>	Vizarrón		
<b>Planta :</b>	4		<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada		
<b># Banco :</b>	2		<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Caliza		
<b>Proveedor :</b>	Vizarrón		<b>Color :</b>	Blanco- Gris		
<b>Msss</b>	3,007		<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>			
<b>DENSIDAD</b>	= $\frac{3,007}{1,122} \times 1,000 = 2,680$		<b>Peso del material</b>	14,064 kg	<b>x 1000 = 1449 kg/m³</b>	
<b>Volumen</b>	1,122		<b>Volumen del recipiente</b>	9.707 litros		
<b>ABSORCIÓN</b>						
<b>Msss - Ms</b>	3,007	-	2,999			
<b>x 100</b>	= $\frac{3,007 - 2,999}{2,999} \times 100 = 0.26$		<b>%</b>			
<b>Ms</b>	2,999		<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>						
<b>Mh - Ms</b>	1,005	-	996			
<b>x 100</b>	= $\frac{1,005 - 996}{996} \times 100 = 0.90$		<b>%</b>			
<b>Ms</b>	996		<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>			
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>						
<b>Pi - Pf</b>	5,000	-	3,880			
<b>x 100</b>	= $\frac{5,000 - 3,880}{3,880} \times 100 = 22.41$		<b>%</b>			
<b>Pi</b>	5,000		<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>			
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>						
<b>Volumen real</b>	536		<b>Pi - Pf</b>	2,896	-	
<b>Volumen teórico</b>	2,680		<b>x 100</b>	= $\frac{2,896 - 2,831}{2,831} \times 100 = 2.25$		
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>						
<b>Masa Partícula Plana</b>	692.59		<b>Pi</b>	2,896		
<b>x 100</b>	= $\frac{692.59}{2,983.29} \times 100 = 23.22$		<b>%</b>			
<b>Masa Total</b>	2,983.29		<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>			
<b>Masa Partícula Alargadas</b>	882.44		<b>x 100</b>	= $\frac{882.44}{2,983.29} \times 100 = 29.58$		
<b>Masa Total</b>	2,983.29		<b>%</b>			
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
<b>DENSIDAD</b>			kg/m³	<b>2,680</b>		
<b>ABSORCIÓN</b>			%	<b>0.26</b>		
<b>HUMEDAD TOTAL</b>			%	<b>0.90</b>		
<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>			kg/m³	<b>0</b>		
<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>			kg/m³	<b>1,603</b>		
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)</b>			%	<b>22.41</b>		
<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>			%	<b>8.43</b>		
<b>MÓDULO DE FINURA</b>			adim	<b>7.29</b>		
<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>			%	<b>2.25</b>		
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>			adim	<b>0.20</b>		
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>			%	<b>23.22</b>		
<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>			%	<b>29.58</b>		
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura
1"	25	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
3/4"	19	1,570.0	11.72	11.72	88.28	11.72
1/2"	12.5	5,400.0	40.30	52.01	47.99	63.73
3/8"	9.5	2,900.0	21.64	73.66	26.34	137.39
No. 4	4.75	2,400.0	17.91	91.57	8.43	228.96
No. 8	2.36	250.0	1.87	93.43	6.57	
Charola		880.0	6.57	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>13,400.0</b>	<b>100</b>			

Tabla A-28 Resultados de la grava en la planta 5 banco 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO									
FACULTAD DE INGENIERÍA									
REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA									
<b>Fecha :</b>	26/Septiembre/2012				<b>Banco de procedencia:</b>	Vizarrón			
<b>Planta :</b>	5				<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada			
<b># Banco :</b>	1				<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Caliza			
<b>Proveedor :</b>	Vizarrón				<b>Color :</b>	Blanco- Gris			
<b>Mss</b>	3,000				<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>				
<b>DENSIDAD</b>	= $\frac{3,000}{1,104} \times 1,000 = 2,718$ kg/m <sup>3</sup>				<b>Peso del material</b>	13.877 kg			
<b>Volumen</b>	= $\frac{1,104}{2,718} \times 1,000 = 402.47$ litros				<b>Volumen del recipiente</b>	9.707 litros			
<b>ABSORCIÓN</b>									
<b>Mss - Ms</b>	3,000 - 2,977				<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>				
<b>x 100</b>	= $\frac{2,977}{3,000} \times 100 = 99.23$ %				<b>Peso del material</b>	15.710 kg			
<b>Ms</b>	2,977				<b>x 1000 =</b>	1,618 kg/m <sup>3</sup>			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>									
<b>Mh - Ms</b>	1,000 - 968				<b>Volumen del recipiente</b>	9.707 litros			
<b>x 100</b>	= $\frac{968}{1,000} \times 100 = 96.8$ %				<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>				
<b>Ms</b>	968				<b>Pasa No. 4</b>	202			
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>									
<b>Pi - Pf</b>	5,000 - 4,086				<b>x 100 =</b>	1.89 %			
<b>x 100</b>	= $\frac{4,086}{5,000} \times 100 = 81.72$ %				<b>Masa Total</b>	10,706			
<b>Pi</b>	5,000				<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>				
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>									
<b>Volumen real</b>	462				<b>Pi - Pf</b>	2,763 - 2,670			
<b>Volumen teórico</b>	2,718				<b>x 100 =</b>	3.35 %			
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>									
<b>Masa Partícula Plana</b>	890				<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>				
<b>x 100</b>	= $\frac{890}{4,120.60} \times 100 = 21.60$ %				<b>Masa Partícula Alargadas</b>	1603			
<b>Masa Total</b>	4,120.60				<b>x 100 =</b>	36.89 %			
<b>Masa Total</b>									
4,345.65									
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>									
<b>DENSIDAD</b>					kg/m <sup>3</sup>	<b>2,718</b>			
<b>ABSORCIÓN</b>					%	<b>0.77</b>			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>					%	<b>3.31</b>			
<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>					kg/m <sup>3</sup>	<b>0</b>			
<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>					kg/m <sup>3</sup>	<b>1,618</b>			
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)</b>					%	<b>18.28</b>			
<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>					%	<b>1.89</b>			
<b>MÓDULO DE FINURA</b>					adim	<b>6.95</b>			
<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>					%	<b>3.35</b>			
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>					adim	<b>0.17</b>			
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>					%	<b>21.60</b>			
<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>					%	<b>36.89</b>			
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>									
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo			
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura			
1"	25	142.9	1.33	1.33	98.67	1.33			
3/4"	19	898.9	8.40	9.73	90.27	11.07			
1/2"	12.5	1,650.8	15.42	25.15	74.85	36.21			
3/8"	9.5	3,823.8	35.72	60.87	39.13	97.08			
No. 4	4.75	3,987.9	37.25	98.11	1.89	195.19			
No. 8	2.36	123.0	1.15	99.26	0.74				
Charola		78.9	0.74	100.00	0.00				
<b>Total</b>		<b>10,706.1</b>	<b>100</b>						

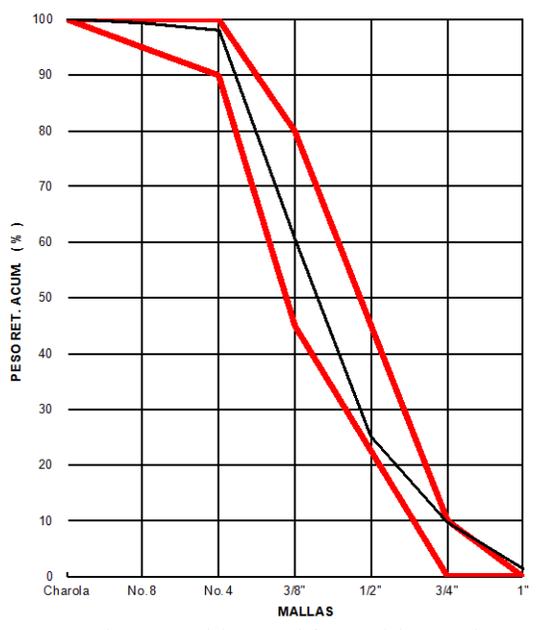


Tabla A-29 Resultados de la grava en la planta 6 banco 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA						
Fecha :	10/Octubre/2012			Banco de procedencia:	La Loma	
Planta :	6			Tipo de Grava :	Triturada	
# Banco :	1			Clasificación Petrográfica:	Basalto	
Proveedor :	Cemex			Color :	Gris y Negro	
Msss	3,000			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>		
<b>DENSIDAD =</b>	= $\frac{3,000}{1,140} \times 1,000 = 2,632$ kg/m <sup>3</sup>			Peso del material	12,761 kg	
Volumen	1,140			x 1000	x 1000 = 1315 kg/m <sup>3</sup>	
<b>ABSORCIÓN</b>				Volumen del recipiente	9.707 litros	
Msss - Ms	= $\frac{3,000 - 2,956}{2,956} \times 100 = 1.51$ %			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>		
Ms	2,956			Peso del material	14,324 kg	
<b>HUMEDAD TOTAL</b>				x 1000 =	= 1,476 kg/m <sup>3</sup>	
Mh - Ms	= $\frac{1,000 - 935}{935} \times 100 = 6.95$ %			Volumen del recipiente	9.707 litros	
Ms	935			<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>		
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>				Pasa No. 4	48	
Pi - Pf	= $\frac{5,002 - 3,843}{5,002} \times 100 = 23.18$ %			x 100 =	x 100 = 0.46 %	
Pi	5,002			Masa Total	10,317	
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>				<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>		
Volumen real	565			Pi - Pf	1,814 - 1,475	
=	= 0.21 adim			x 100 =	x 100 = 18.72 %	
Volumen teórico	2,632			Pi	1,814	
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>				<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>		
Masa Partícula Plana	984.6			Masa Partícula Alargadas	1,020.1	
x 100 =	x 100 = 24.24 %			x 100 =	x 100 = 25.11 %	
Masa Total	4,062.5			Masa Total	4,062.5	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
DENSIDAD			kg/m <sup>3</sup>	2,632		
ABSORCIÓN			%	1.51		
HUMEDAD TOTAL			%	6.95		
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA			kg/m <sup>3</sup>	0		
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA			kg/m <sup>3</sup>	1,476		
ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)			%	23.18		
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA			%	0.46		
MÓDULO DE FINURA			adim	7.93		
SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)			%	18.72		
COEFICIENTE DE FORMA			adim	0.21		
PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA			%	24.24		
PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA			%	25.11		
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura
1"	25	160.5	1.56	1.56	98.44	1.56
3/4"	19	2,774.9	26.90	28.45	71.55	30.01
1/2"	12.5	4,260.0	41.29	69.74	30.26	99.75
3/8"	9.5	2,421.9	23.48	93.22	6.78	192.97
No. 4	4.75	652.0	6.32	99.54	0.46	292.51
No. 8	2.36	26.8	0.26	99.80	0.20	
Charola		20.7	0.20	100.00	0.00	
Total		10,316.8	100			

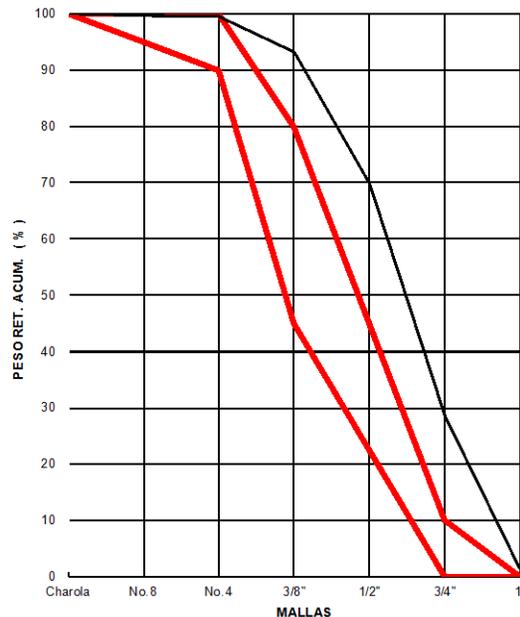


Tabla A-30 Resultados de la grava en la planta 7 banco 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA						
<b>Fecha :</b>	21/Octubre/2012			<b>Banco de procedencia:</b>	Vizarrón	
<b>Planta :</b>	7			<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada	
<b># Banco :</b>	1			<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Caliza	
<b>Proveedor :</b>	Vizarrón			<b>Color :</b>	Gris y Negro	
<b>Msss</b>	3,000			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>		
<b>DENSIDAD</b>	= $\frac{3,000}{1,100} \times 1,000 = 2,727$ kg/m <sup>3</sup>			<b>Peso del material</b>	13,242 kg	
<b>Volumen</b>	1,100			<b>Volumen del recipiente</b>	9,707 litros	
<b>ABSORCIÓN</b>						
<b>Msss - Ms</b>	3,000 - 2,990			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>		
<b>x 100 =</b>	0.33 %			<b>Peso del material</b>	15,536 kg	
<b>Ms</b>	2,990			<b>x 1000 =</b>	1,600 kg/m <sup>3</sup>	
<b>HUMEDAD TOTAL</b>						
<b>Mh - Ms</b>	1,000 - 990			<b>Volumen del recipiente</b>	9,707 litros	
<b>x 100 =</b>	1.01 %			<b>CON TAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>		
<b>Ms</b>	990			<b>Pasa No. 4</b>	183	
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>						
<b>Pi - Pf</b>	5,000 - 3,154			<b>x 100 =</b>	1.83 %	
<b>x 100 =</b>	36.92 %			<b>Masa Total</b>	10,000	
<b>Pi</b>	5,000			<b>SANIDAD (IN TEMPERISMO ACELERADO)</b>		
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>						
<b>Volumen real</b>	496			<b>Pi - Pf</b>	1,812 - 1,810	
<b>Volumen teórico</b>	2,727			<b>x 100 =</b>	0.13 %	
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>						
<b>Volumen real</b>	496			<b>Pi</b>	1,812	
<b>Volumen teórico</b>	2,727			<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>		
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>						
<b>Masa Partícula Plana</b>	1,577.7			<b>Masa Partícula Alargadas</b>	2,384.4	
<b>x 100 =</b>	34.65 %			<b>x 100 =</b>	72.49 %	
<b>Masa Total</b>	4,553.0			<b>Masa Total</b>	3,289.4	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
<b>DENSIDAD</b>				kg/m <sup>3</sup>	2,727	
<b>ABSORCIÓN</b>				%	0.33	
<b>HUMEDAD TOTAL</b>				%	1.01	
<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>				kg/m <sup>3</sup>	0	
<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>				kg/m <sup>3</sup>	1,600	
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)</b>				%	36.92	
<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>				%	1.83	
<b>MÓDULO DE FINURA</b>				adim	7.82	
<b>SANIDAD (IN TEMPERISMO ACELERADO)</b>				%	0.13	
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>				adim	0.18	
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>				%	34.65	
<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>				%	72.49	
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura
1"	25	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
3/4"	19	2,485.4	24.85	24.85	75.15	24.85
1/2"	12.5	4,674.2	46.74	71.60	28.40	96.45
3/8"	9.5	1,616.2	16.16	87.76	12.24	184.21
No. 4	4.75	1,041.2	10.41	98.17	1.83	282.38
No. 8	2.36	100.0	1.00	99.17	0.83	
Charola		83.0	0.83	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>10,000.0</b>	<b>100</b>			

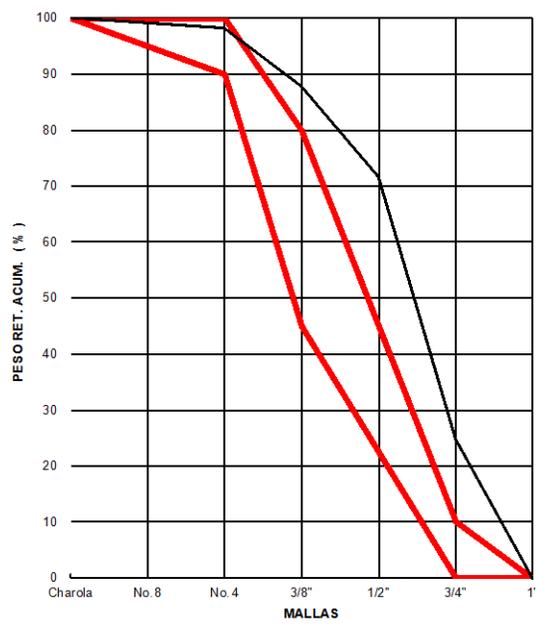


Tabla A-31 Resultados de la grava en la planta 8 banco 1.

<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b>													
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>													
<b>REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA</b>													
<b>Fecha :</b>	2/Noviembre/2012				<b>Banco de procedencia:</b>	Cañada							
<b>Planta :</b>	8				<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada							
<b># Banco :</b>	1				<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Volcánico							
<b>Proveedor :</b>	Abraham González				<b>Color :</b>	Negra y Gris							
<b>DENSIDAD</b>	Msss	3,232			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>								
	Volumen	1,184		x 1,000 =	2,730	kg/m <sup>3</sup>	Peso del material	14.864		kg			
							x 1000	=		1531	kg/m <sup>3</sup>		
							Volumen del recipiente	9.707		litros			
<b>ABSORCIÓN</b>													
<b>Msss - Ms</b>		3,232	-	3,200			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>						
	x 100			x 100 =	1.01	%	Peso del material	16.631		kg			
							x 1000 =	=		1,713	kg/m <sup>3</sup>		
							Volumen del recipiente	9.707		litros			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>													
<b>Mh - Ms</b>		1,008	-	929			<b>CON TAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>						
	x 100			x 100 =	8.50	%	Pasa No. 4	940					
							x 100 =	=		x 100 =	3.88	%	
							Masa Total	24,200					
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>													
<b>Pi - Pf</b>		5,000	-	4,440			<b>SANIDAD (IN TEMPERISMO ACELERADO)</b>						
	x 100			x 100 =	11.20	%	Pi - Pf	3,456 - 3,097					
							x 100 =	=		x 100 =	10.39	%	
							Pi	3,456					
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>													
<b>Volumen real</b>		576.00					<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>						
							Masa Partícula Plana	1,174.92					
							x 100 =	=		x 100 =	19.53	%	
<b>Volumen teórico</b>		2,730					Masa Total	6,017.27					
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>													
<b>DENSIDAD</b>							<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>						
							Masa Partícula Alargadas	1,248.55					
							x 100 =	=		x 100 =	20.75	%	
							Masa Total	6,017.27					
<b>ABSORCIÓN</b>							<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
							<b>Malla</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Peso Ret.</b>	<b>Ret. Parcial</b>	<b>Peso Ret. Acum.</b>	<b>Que pasa</b>	<b>Módulo</b>
								<b>mm</b>	<b>(g)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>Finura</b>
							<b>1"</b>	<b>25</b>	<b>0.0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>100.00</b>	<b>0.00</b>
							<b>3/4"</b>	<b>19</b>	<b>3,320.0</b>	<b>13.72</b>	<b>13.72</b>	<b>86.28</b>	<b>13.72</b>
							<b>1/2"</b>	<b>12.5</b>	<b>10,370.0</b>	<b>42.85</b>	<b>56.57</b>	<b>43.43</b>	<b>70.29</b>
							<b>3/8"</b>	<b>9.5</b>	<b>3,950.0</b>	<b>16.32</b>	<b>72.89</b>	<b>27.11</b>	<b>143.18</b>
							<b>No. 4</b>	<b>4.75</b>	<b>5,620.0</b>	<b>23.22</b>	<b>96.12</b>	<b>3.88</b>	<b>239.30</b>
							<b>No. 8</b>	<b>2.36</b>	<b>420.0</b>	<b>1.74</b>	<b>97.85</b>	<b>2.15</b>	
							<b>Charola</b>		<b>520.0</b>	<b>2.15</b>	<b>100.00</b>	<b>0.00</b>	
							<b>Total</b>		<b>24,200.0</b>	<b>100</b>			

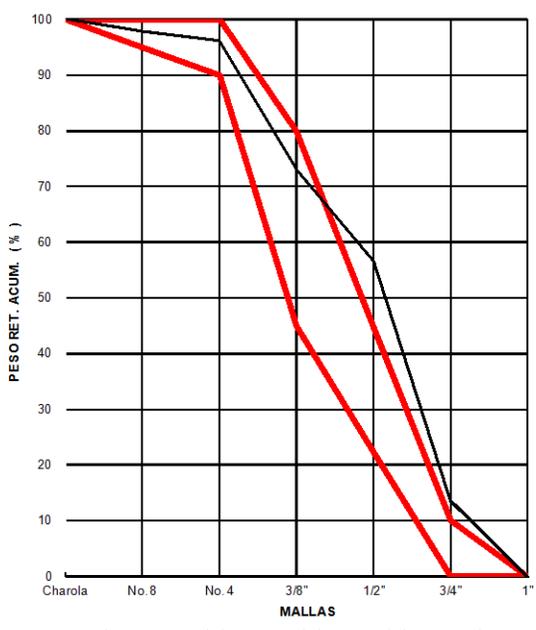


Tabla A-32 Resultados de la grava en la planta 9 banco 1.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA						
<b>Fecha :</b>	5/Noviembre/2012		<b>Banco de procedencia:</b>	La Loma		
<b>Planta :</b>	9		<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada		
<b># Banco :</b>	1		<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Basalto		
<b>Proveedor :</b>	La Loma		<b>Color :</b>	Gris		
<b>Msss</b>	5,003					
<b>DENSIDAD =</b>	$\frac{5,003}{1,750} \times 1,000 = 2,859$	<b>kg/m³</b>				
<b>Msss - Ms</b>	5,003 - 4,969 = 34					
<b>Absorción</b>	$\frac{34}{4,969} \times 100 = 0.69$	<b>%</b>				
<b>Mh - Ms</b>	1,000 - 983 = 17					
<b>Humedad Total</b>	$\frac{17}{983} \times 100 = 1.73$	<b>%</b>				
<b>Pi - Pf</b>	5,000 - 4,407 = 593					
<b>Abrasión del Agregado (Desgaste de los Ángeles)</b>	$\frac{593}{5,000} \times 100 = 11.86$	<b>%</b>				
<b>Volumen real</b>	455					
<b>Volumen teórico</b>	2,859					
<b>Coefficiente de Forma</b>	$\frac{455}{2,859} = 0.16$	<b>adim</b>				
<b>Masa Partícula Plana</b>	901.70					
<b>Masa Total</b>	8,630.70					
<b>Partículas con forma plana o laja</b>	$\frac{901.70}{8,630.70} \times 100 = 10.45$	<b>%</b>				
<b>Masa Partícula Alargada</b>	1,799.30					
<b>Masa Total</b>	8,630.70					
<b>Partículas con forma alargada</b>	$\frac{1,799.30}{8,630.70} \times 100 = 20.85$	<b>%</b>				
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
DENSIDAD	kg/m³	2,859				
ABSORCIÓN	%	0.69				
HUMEDAD TOTAL	%	1.73				
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA	kg/m³	0				
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA	kg/m³	1,733				
ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)	%	11.86				
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA	%	1.64				
MÓDULO DE FINURA	adim	8.68				
SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)	%	2.25				
COEFICIENTE DE FORMA	adim	0.16				
PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA	%	10.45				
PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA	%	20.85				
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Parcial (%)	Peso Ret. Acum. (%)	Que pasa (%)	Módulo Finura
2"	50	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
1 1/2"	37.5	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
1"	25	5,777.3	36.09	36.09	63.91	36.09
3/4"	19	4,100.6	25.61	61.70	38.30	97.79
1/2"	12.5	3,112.7	19.44	81.15	18.85	178.94
3/8"	9.5	1,465.4	9.15	90.30	9.70	269.23
No.4	4.75	1,290.0	8.06	98.36	1.64	367.59
Charola		263.0	1.64	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>16,009.0</b>	<b>100</b>			

Tabla A-33 Resultados de la grava en la planta 10 banco 1.

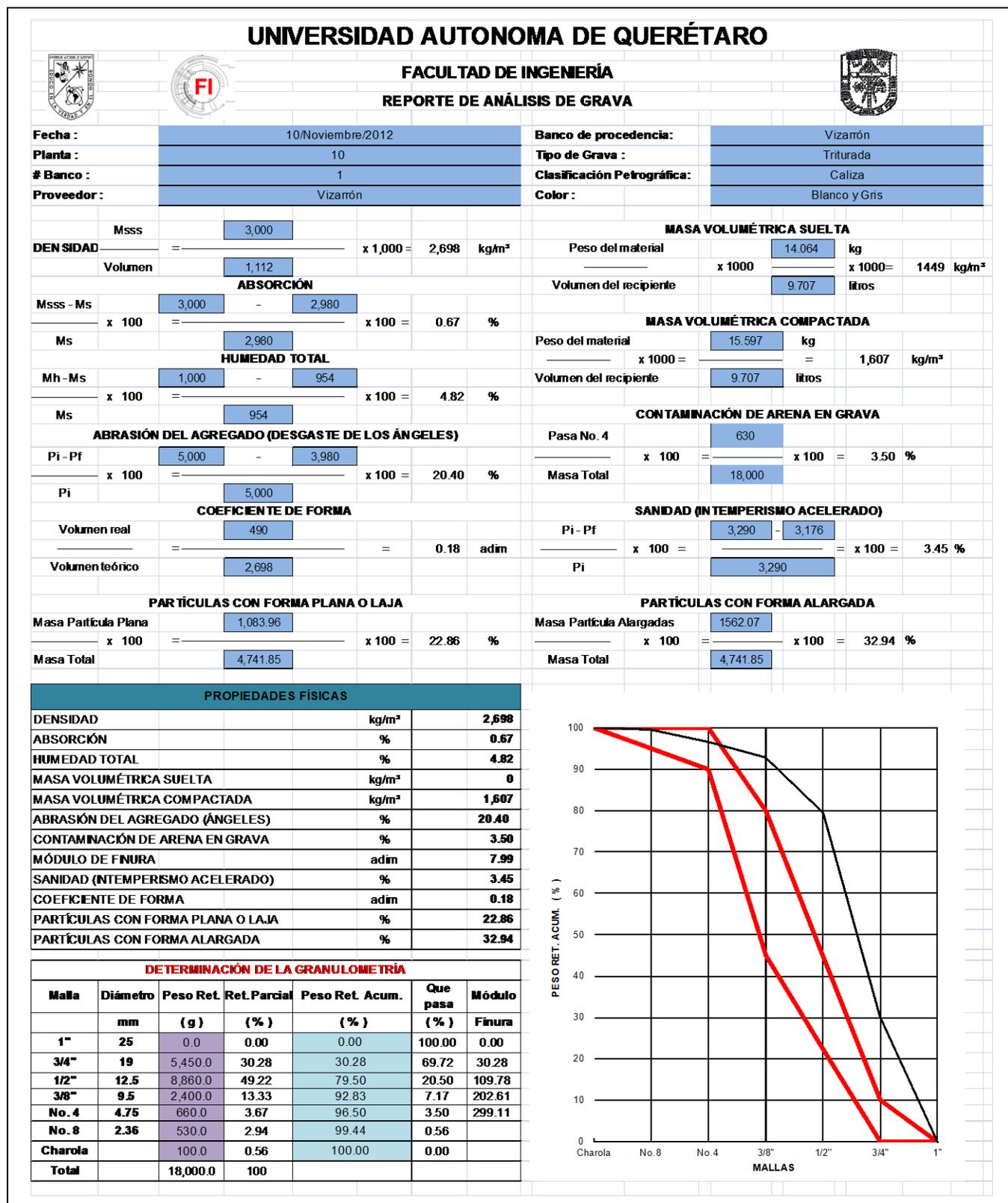


Tabla A-34 Resultados de la grava en la planta 10 banco 2.

<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b>									
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>									
<b>REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA</b>									
<b>Fecha :</b>	12/Noviembre/2012				<b>Banco de procedencia:</b>	Vizarrón			
<b>Planta :</b>	10				<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada			
<b># Banco :</b>	2				<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Caliza			
<b>Proveedor :</b>	Vizarrón				<b>Color :</b>	Blanco y Gris			
Msss	5,000				<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>				
<b>DENSIDAD</b>	= $\frac{5,000}{1,870} \times 1,000 = 2,674 \text{ kg/m}^3$				Peso del material	14.131 kg			
Volumen	1,870				x 1000	= 1456 kg/m <sup>3</sup>			
<b>ABSORCIÓN</b>									
Msss - Ms	= $\frac{5,000 - 4,980}{4,980} \times 100 = 0.40 \%$				<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>				
Ms	4,980				Peso del material	16.031 kg			
<b>HUMEDAD TOTAL</b>									
Mh - Ms	= $\frac{1,000 - 981}{981} \times 100 = 1.94 \%$				x 1000	= 1,651 kg/m <sup>3</sup>			
Ms	981				Volumen del recipiente	9.707 litros			
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>									
Pi - Pf	= $\frac{5,010 - 3,900}{5,010} \times 100 = 22.16 \%$				<b>CON TAMIACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>				
Pi	5,010				Pasa No. 4	1,450			
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>									
Volumen real	578				x 100	= 8.90 %			
Volumen teórico	2,674				Masa Total	16,295			
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>									
Masa Partícula Plana	2,150.12				<b>SANIDAD (NTEMPERISMO ACELERADO)</b>				
x 100	= 20.88 %				Pi - Pf	= $\frac{3,678 - 3,442}{3,678} \times 100 = 6.41 \%$			
Masa Total	10,298.32				Pi	3,678			
<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>									
Masa Partícula Alargadas	3,377.44				<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>				
x 100	= 32.80 %				DENSIDAD	kg/m <sup>3</sup> 2,674			
Masa Total	10,298.32				ABSORCIÓN	% 0.40			
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>									
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>									
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>									
DENSIDAD					kg/m <sup>3</sup>	2,674			
ABSORCIÓN					%	0.40			
HUMEDAD TOTAL					%	1.94			
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA					kg/m <sup>3</sup>	0			
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA					kg/m <sup>3</sup>	1,651			
ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)					%	22.16			
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA					%	8.90			
MÓDULO DE FINURA					adim	7.85			
SANIDAD (NTEMPERISMO ACELERADO)					%	6.41			
COEFICIENTE DE FORMA					adim	0.22			
PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA					%	20.88			
PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA					%	32.80			
<b>Malla</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Peso Ret. (g)</b>	<b>Ret. Parcial (%)</b>	<b>Peso Ret. Acum. (%)</b>	<b>Que pasa (%)</b>	<b>Módulo Finura</b>			
2"	50	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00			
1 1/2"	37.5	300.0	1.84	1.84	98.16	1.84			
1"	25	1,940.0	11.91	13.75	86.25	15.59			
3/4"	19	3,350.0	20.56	34.31	65.69	49.89			
1/2"	12.5	5,235.0	32.13	66.43	33.57	116.32			
3/8"	9.5	1,875.0	11.51	77.94	22.06	194.26			
No. 4	4.75	2,145.0	13.16	91.10	8.90	285.36			
Charola		1,450.0	8.90	100.00	0.00				
<b>Total</b>		<b>16,295.0</b>	<b>100</b>						

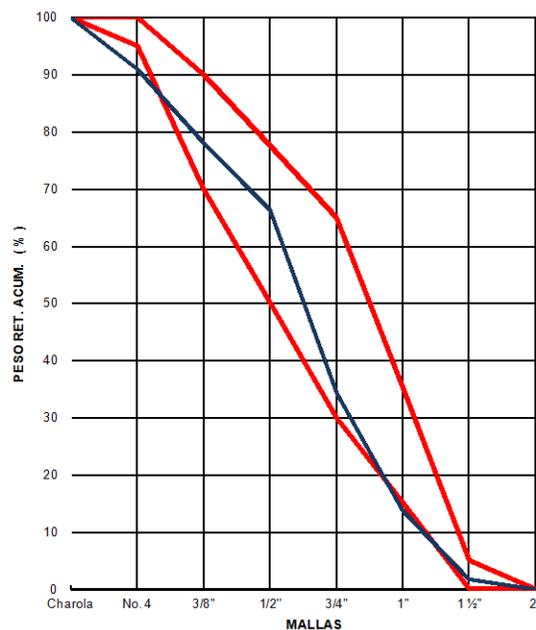


Tabla A-35 Resultados de la grava en la planta 11 banco 1.

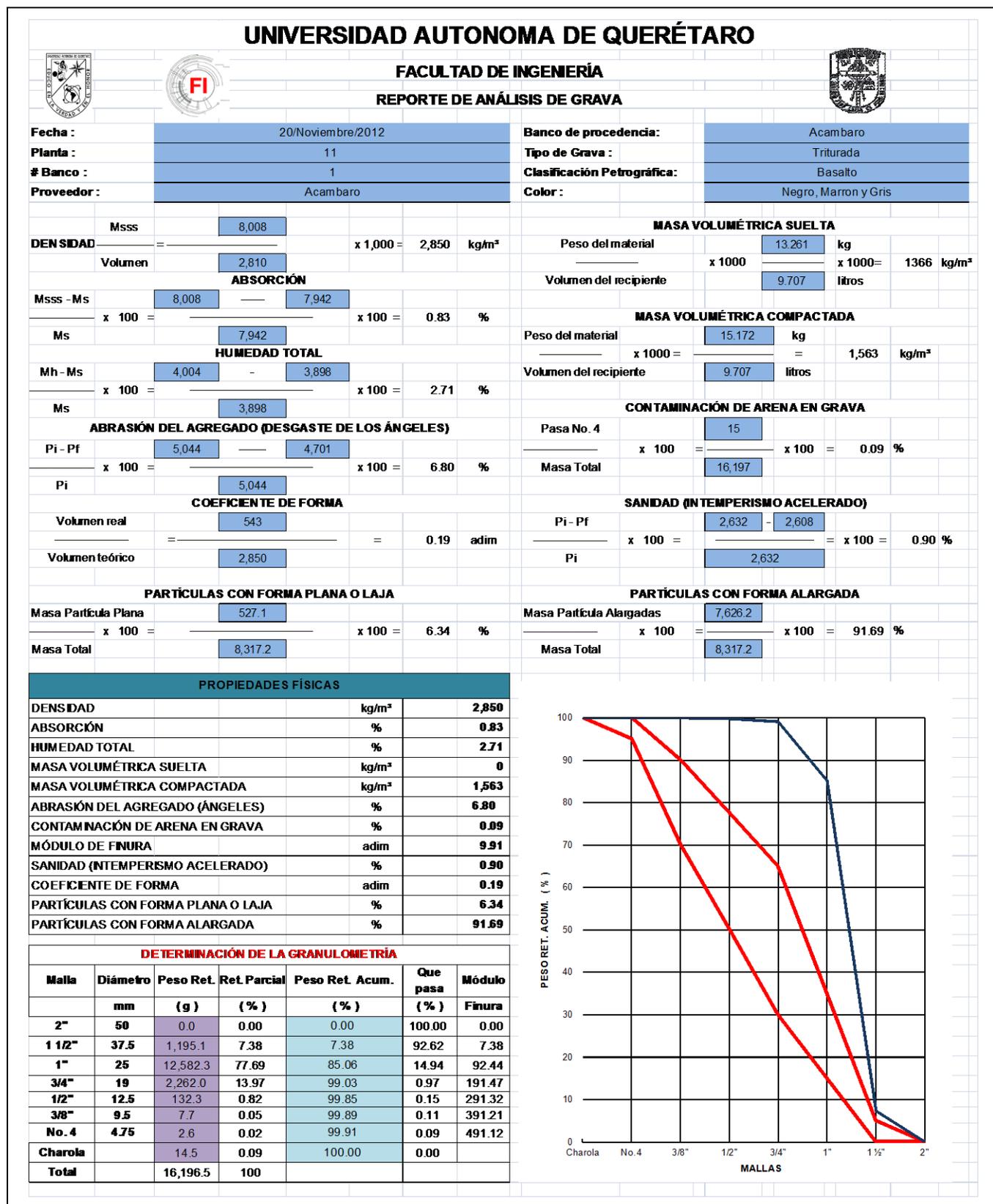


Tabla A-36 Resultados de la grava en la planta 11 banco 2.

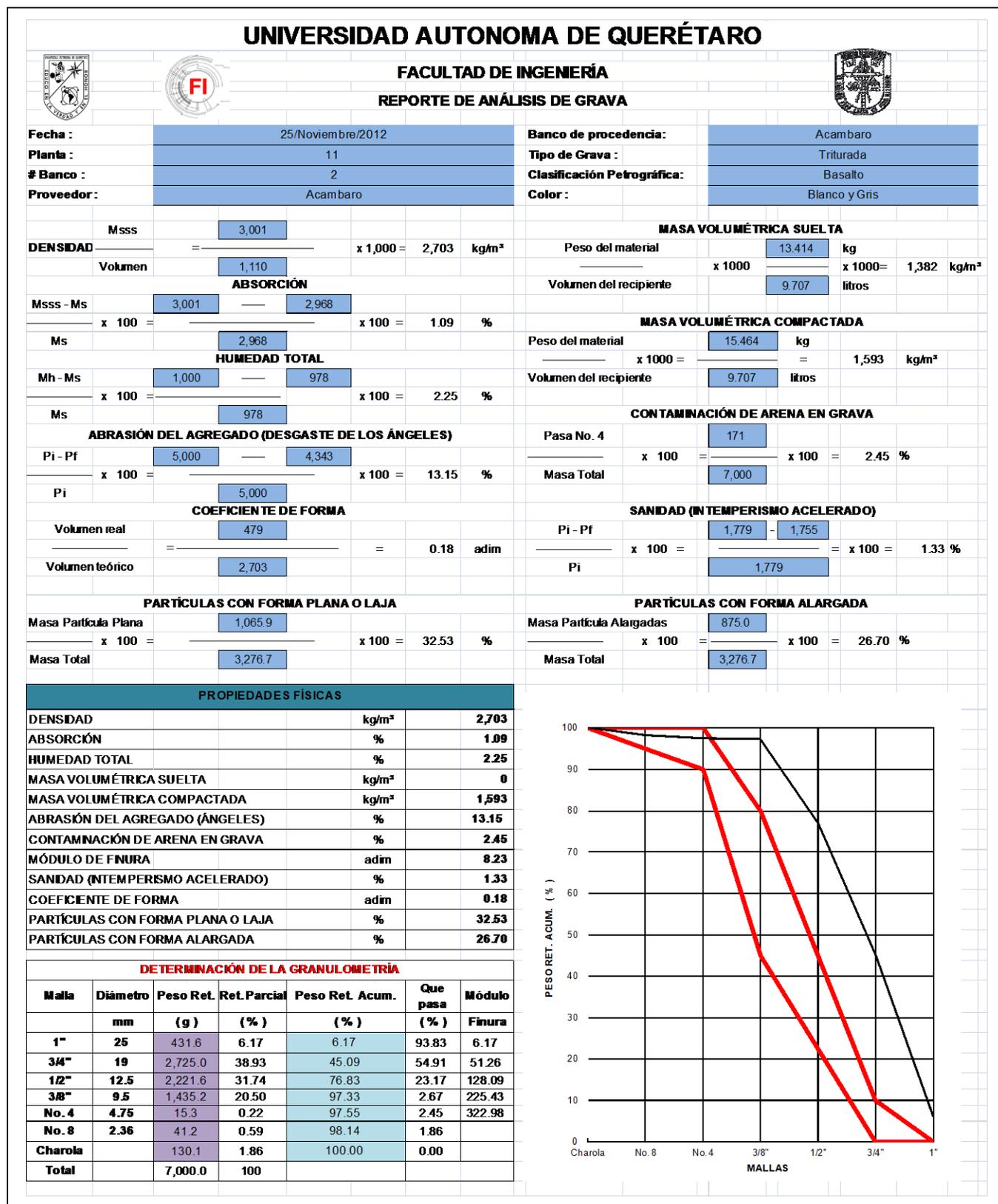


Tabla A-37 Resultados de la grava en la planta 12 banco 1.

<b>UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO</b>			
			
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b>			
<b>REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA</b>			
<b>Fecha :</b>	27/Noviembre/2012		<b>Banco de procedencia:</b>
<b>Planta :</b>	12		El Jovero
<b># Banco :</b>	1		<b>Tipo de Grava :</b>
<b>Proveedor :</b>	Corporación del Bajío		Triturada
			<b>Clasificación Petrográfica:</b>
			Basalto
			<b>Color :</b>
			Gris y Blanca

<b>DENSIDAD</b>	Msss	3,023			
	Volumen	1,156	x 1,000 =	2,615	kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN</b>					
Msss - Ms	3,023	-	2,991		
x 100				x 100 =	1.06 %
Ms	2,991				
<b>HUMEDAD TOTAL</b>					
Mh - Ms	1,000	-	992		
x 100				x 100 =	0.81 %
Ms	992				
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>					
Pi - Pf	5,000	-	4,430		
x 100				x 100 =	11.40 %
Pi	5,000				
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>					
Volumen real	587				
				=	0.22 adim
Volumen teórico	2,615				
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>					
Masa Partícula Plana	908.29				
x 100				x 100 =	24.52 %
Masa Total	3,704.19				

<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>	Peso del material	13,531	kg		
		x 1000 =		=	1,394 kg/m <sup>3</sup>
Volumen del recipiente	9,707	litros			

<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>	Peso del material	15,297	kg		
		x 1000 =		=	1,576 kg/m <sup>3</sup>
Volumen del recipiente	9,707	litros			

<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>	Pasa No. 4	150			
		x 100 =		x 100 =	0.89 %
Masa Total	16,800				

<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>	Pi - Pf	3,423	-	3,226	
		x 100 =		x 100 =	5.75 %
Pi	3,423				

<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>	Masa Partícula Alargadas	1,261.42			
		x 100 =		x 100 =	34.05 %
Masa Total	3,704.19				

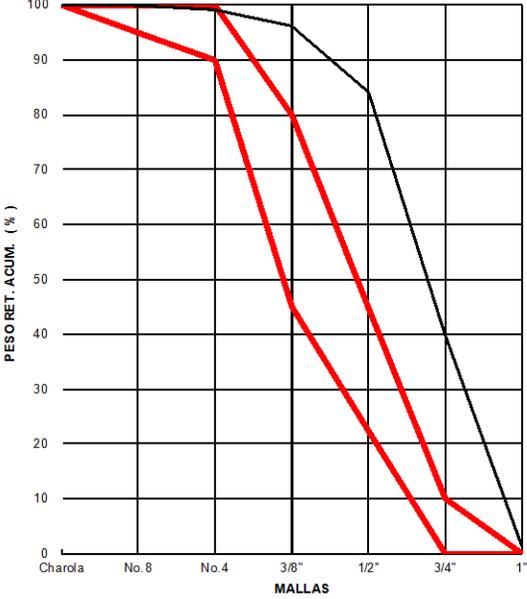
  

<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>			
DENSIDAD		kg/m <sup>3</sup>	2,615
ABSORCIÓN		%	1.06
HUMEDAD TOTAL		%	0.81
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA		kg/m <sup>3</sup>	0
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA		kg/m <sup>3</sup>	1,576
ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)		%	11.40
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA		%	0.89
MÓDULO DE FINURA		adim	8.21
SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)		%	5.75
COEFICIENTE DE FORMA		adim	0.22
PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA		%	24.52
PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA		%	34.05

<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura
1"	25	230.0	1.37	1.37	98.63	1.37
3/4"	19	6,500.0	38.69	40.06	59.94	41.43
1/2"	12.5	7,400.0	44.05	84.11	15.89	125.54
3/8"	9.5	2,020.0	12.02	96.13	3.87	221.67
No. 4	4.75	500.0	2.98	99.11	0.89	320.77
No. 8	2.36	125.0	0.74	99.85	0.15	
Charola		25.0	0.15	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>16,800.0</b>	<b>100</b>			



MALLAS

Tabla A-38 Resultados de la grava en la planta 12 banco 2.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO						
FACULTAD DE INGENIERÍA						
REPORTE DE ANÁLISIS DE GRAVA						
<b>Fecha :</b>	3/Diciembre/2012			<b>Banco de procedencia:</b>	El Jovero	
<b>Planta :</b>	12			<b>Tipo de Grava :</b>	Triturada	
<b># Banco :</b>	2			<b>Clasificación Petrográfica:</b>	Basalto	
<b>Proveedor :</b>	Corporación del Bajío			<b>Color :</b>	Gris	
<b>Msss</b>	5,000			<b>MASA VOLUMÉTRICA SUELTA</b>		
<b>DENSIDAD</b>	x 1,000 = 2,857 kg/m³			<b>Peso del material</b>	13.164 kg	
<b>Volumen</b>	1,750			<b>x 1000</b>	x 1000 = 1,356 kg/m³	
<b>ABSORCIÓN</b>						
<b>Msss - Ms</b>	5,000 - 4,980			<b>Volumen del recipiente</b>	9.707 litros	
<b>x 100</b>	x 100 = 0.40 %			<b>MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA</b>		
<b>Ms</b>	4,980			<b>Peso del material</b>	15.231 kg	
<b>HUMEDAD TOTAL</b>						
<b>Mh - Ms</b>	1,000 - 989			<b>x 1000</b>	= 1,569 kg/m³	
<b>x 100</b>	x 100 = 1.11 %			<b>Volumen del recipiente</b>	9.707 litros	
<b>Ms</b>	989			<b>CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA</b>		
<b>ABRASIÓN DEL AGREGADO (DESGASTE DE LOS ÁNGELES)</b>						
<b>Pi - Pf</b>	5,025 - 4,490			<b>Pasa No. 4</b>	50	
<b>x 100</b>	x 100 = 10.65 %			<b>x 100</b>	x 100 = 0.28 %	
<b>Pi</b>	5,025			<b>Masa Total</b>	17,980	
<b>COEFICIENTE DE FORMA</b>						
<b>Volumen real</b>	481.0			<b>SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)</b>		
<b>Volumen teórico</b>	2,857.1			<b>Pi - Pf</b>	4,356 - 4,232	
	= 0.17 adim			<b>x 100</b>	x 100 = 2.85 %	
				<b>Pi</b>	4,356	
<b>PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA</b>						
<b>Masa Partícula Plana</b>	1,462.39			<b>PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA</b>		
<b>x 100</b>	x 100 = 19.37 %			<b>Masa Partícula Alargadas</b>	2617.37	
<b>Masa Total</b>	7,551.49			<b>x 100</b>	x 100 = 34.66 %	
				<b>Masa Total</b>	7,551.49	
<b>PROPIEDADES FÍSICAS</b>						
DENSIDAD				kg/m³	2,857	
ABSORCIÓN				%	0.40	
HUMEDAD TOTAL				%	1.11	
MASA VOLUMÉTRICA SUELTA				kg/m³	0	
MASA VOLUMÉTRICA COMPACTADA				kg/m³	1,569	
ABRASIÓN DEL AGREGADO (ÁNGELES)				%	10.65	
CONTAMINACIÓN DE ARENA EN GRAVA				%	0.28	
MÓDULO DE FINURA				adim	9.60	
SANIDAD (INTEMPERISMO ACELERADO)				%	2.85	
COEFICIENTE DE FORMA				adim	0.17	
PARTÍCULAS CON FORMA PLANA O LAJA				%	19.37	
PARTÍCULAS CON FORMA ALARGADA				%	34.66	
<b>DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA</b>						
Malla	Diámetro	Peso Ret.	Ret. Parcial	Peso Ret. Acum.	Que pasa	Módulo
	mm	(g)	(%)	(%)	(%)	Finura
2"	50	0.0	0.00	0.00	100.00	0.00
1 1/2"	37.5	700.0	3.89	3.89	96.11	3.89
1"	25	10,500.0	58.40	62.29	37.71	66.18
3/4"	19	6,100.0	33.93	96.22	3.78	162.40
1/2"	12.5	450.0	2.50	98.72	1.28	261.12
3/8"	9.5	100.0	0.56	99.28	0.72	360.40
No. 4	4.75	80.0	0.44	99.72	0.28	460.12
Charola	50.0	0.28		100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>17,980.0</b>	<b>100</b>			

Tabla A-39 Resumen de los resultados del agregado fino o arena.

Planta No.	Banco	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Humedad (%)	Equivalente de Arena (%)	Peso Volumétrico Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Volumétrico Compacto (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	Pérdida por lavado (%)	Contracción lineal (%)	Límite Líquido (%)	Índice plástico (%)	Porcentaje Pasa malla NO. #200 (0.075 m) (%)	Módulo de Finura (Adim)	Colorimetría (Adim)
1	1	2,326	4.73	0.20	59	1,345	1,555	1,450	5.26	No presenta	Sin límite líquido	No Plástico	5.62	3.05	Nula o poca presencia de materia orgánica
	2	2,183	5.08	1.21	63	1,555	1,850	1,702	13.29	"	12.3	"	14.37	3.16	"
2	1	2,500	2.91	3.95	56	1,403	1,688	1,545	13.62	"	15.90	"	14.14	2.88	"
	1	2,381	4.17	0.60	85	1,438	1,623	1,530	4.16	"	Sin límite líquido	"	4.70	2.12	"
4	1	2,232	4.86	1.83	44	1,555	1,892	1,723	13.55	"	18.1	"	14.97	2.84	"
	2	2,222	4.85	2.46	77	1,303	1,513	1,408	6.73	"	Sin límite líquido	"	7.40	2.44	"
5	1	2,137	2.88	1.42	70	1,255	1,358	1,307	7.20	"	Sin límite líquido	"	6.76	2.83	"
	1	2,460	3.37	1.01	73	1,224	1,474	1,349	8.30	"	Sin límite líquido	"	9.06	2.63	"
6	2	2,632	1.56	2.88	63	1,581	1,831	1,706	14.22	"	13.7	"	14.84	2.84	"
	1	2,283	5.26	2.67	81	1,649	1,878	1,764	8.76	"	Sin límite líquido	"	7.89	2.20	"
7	2	2,273	3.31	0.20	80	1,581	1,902	1,741	9.00	"	Sin límite líquido	"	9.92	3.13	"
	1	2,439	3.28	1.01	64	1,786	1,871	1,828	15.06	"	17.10	"	15.51	2.99	"
8	2	2,520	2.67	0.60	37	1,324	1,513	1,419	10.89	"	Sin límite líquido	"	11.35	2.87	"
	1	2,564	2.61	0.81	83	1,295	1,474	1,385	9.94	"	Sin límite líquido	"	10.80	2.42	"
9	2	2,326	4.17	0.20	46	1,603	1,820	1,711	17.18	"	21.3	"	18.88	2.93	"
	1	2,128	5.95	0.40	67	1,555	1,850	1,702	9.79	"	Sin límite líquido	"	10.65	3.35	"
10	2	2,550	2.65	3.73	80	1,282	1,513	1,398	5.28	"	Sin límite líquido	"	6.95	2.47	"
	1	2,174	5.74	2.67	52	1,349	1,509	1,429	12.20	"	16.2	"	13.04	2.65	"
11	2	2,591	2.46	4.17	76	1,224	1,474	1,349	5.60	"	Sin límite líquido	"	6.20	2.70	"
	1	2,128	5.26	0.81	69	1,408	1,702	1,555	6.54	"	Sin límite líquido	"	7.37	3.70	"
12	2	2,500	2.85	0.20	76	1,261	1,471	1,366	4.62	"	Sin límite líquido	"	5.13	2.92	"

Tabla A-40 Resumen de los resultados del agregado grueso o grava.

Banco	Tamaño Agregado	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Humedad (%)	Módulo de Finura (adim)	Partículas Alargadas (%)	Partículas lapaedas o Planas (%)	Desgaste a la abrasión (Prueba de los Angeles) (%)	Peso volumétric o suelto (kg/m <sup>3</sup> )	Peso volumétrico compacto (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio de Pesos volumétricos (kg/m <sup>3</sup> )	Contaminación de arena en grava (%)	Coefficiente de forma (adim)	Santidad (Imperpetismo acelerado) (%)
1	3/4	2685.15	0.30	1.83	7.57	79.28	19.28	22.69	1465	1616	1541	6.46	0.19	3.97
1	3/4	2632.19	1.26	4.71	8.13	30.30	21.12	21.78	1365	1570	1467	2.82	0.17	6.58
2	1 1/2	2641.64	1.15	3.63	9.45	33.77	24.08	24.12	1351	1562	1456	0.66	0.19	16.50
1	1 1/2	2835.41	0.74	6.38	9.06	18.51	22.14	12.52	1557	1794	1676	2.44	0.19	1.82
1	1 1/2	2673.80	0.40	2.56	9.03	35.28	20.12	21.71	1475	1668	1571	1.16	0.16	4.39
2	3/4	2679.99	0.26	0.90	7.29	29.58	23.22	22.41	1449	1603	1526	8.43	0.20	2.25
1	3/4	2718.25	0.77	3.31	6.95	36.89	21.60	18.28	1430	1618	1524	1.89	0.17	3.35
1	3/4	2631.58	1.51	6.95	7.93	25.11	24.24	23.18	1315	1476	1395	0.46	0.21	18.72
1	3/4	2727.27	0.33	1.01	7.82	72.49	34.65	36.92	1364	1600	1482	1.83	0.18	0.13
1	3/4	2729.71	1.01	8.50	7.39	20.75	19.53	11.20	1531	1713	1622	3.88	0.21	10.39
1	1 1/2	2858.97	0.69	1.73	8.68	20.65	10.45	11.86	1598	1733	1665	1.64	0.16	2.25
1	3/4	2697.84	0.67	4.82	7.99	32.94	22.86	20.40	1449	1607	1528	3.50	0.18	3.45
2	1 1/2	2673.80	0.40	1.94	7.85	32.80	20.88	22.16	1456	1651	1554	8.90	0.22	6.41
1	1 1/2	2849.86	0.83	2.71	9.91	91.69	6.34	6.80	1366	1563	1465	0.09	0.19	0.90
2	3/4	2703.33	1.09	2.25	8.23	26.70	32.53	13.15	1382	1593	1487	2.45	0.18	1.33
1	3/4	2614.63	1.06	0.81	8.21	34.05	24.52	11.40	1394	1576	1485	0.89	0.22	5.75
2	1 1/2	2857.14	0.40	1.11	9.60	34.66	19.37	10.65	1356	1569	1463	0.28	0.17	2.85