





---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA  
ABRASIÓN DEL CONCRETO CON AGREGADOS  
CALIZOS DE ALTA ABSORCIÓN”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C.GERARDO ENRIQUE CHAN MAGAÑA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

OPCIÓN CONSTRUCCIÓN

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2017

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

El autor de este trabajo agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) por el apoyo brindado para la realización de los estudios de posgrado y de este proyecto de tesis.

## Resumen

El fenómeno de la abrasión en el concreto es un efecto poco estudiado en el ámbito de la tecnología del concreto al compararlo con otros como la determinación de distintos esfuerzos o resistencias, la permeabilidad o su comportamiento ante agentes externos. A nivel internacional existen trabajos relacionados a la abrasión que han concluido que el adecuado curado y el uso de puzolanas pueden influir positivamente en la resistencia a la abrasión. En la península de Yucatán no existe un estudio relativo a la resistencia a la abrasión que emplee el agregado calizo regional.

El presente trabajo consistió en emplear algunos factores manipulables en la elaboración de elementos de concreto tales como su relación agua/cemento, el tipo y tiempo de curado y los agregados finos empleados para encontrar cuales son aquellos factores que impactan positivamente en la resistencia a la abrasión.

Se hicieron pruebas de resistencia a la compresión, de tensión por compresión, de índice de dureza y de resistencia a la abrasión. Esta última empleando el abrasímetro indicado en la norma EN-1342. Adicionalmente los valores obtenidos fueron empleados para modelar alguna ecuación que pudiera predecir el valor de la abrasión teniendo solamente valores de las resistencias antes mencionadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos y en concordancia con lo que indica la literatura clásica de tecnología del concreto, se obtuvo que para cualquier relación A/C, el empleo de curado húmedo impactó positivamente en la resistencia a la abrasión al igual que el empleo de un agregado fino más resistente al encontrado naturalmente en la región de la Península de Yucatán.

## Contenido

1. Planteamiento del problema.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivo General .....	5
1.3 Objetivos específicos .....	5
2. Marco Teórico .....	6
2.1 Tribología .....	6
2.1.1 Abrasión.....	7
2.1.2 Abrasión en el concreto .....	7
2.1.3 Factores que influyen en la resistencia a la abrasión del concreto .....	8
2.2 Pisos de concreto.....	8
2.2.1 Diseño de pisos de concreto.....	11
2.2.2 Materiales empleados en pisos de concreto .....	11
2.3 Características de los agregados empleados.....	12
2.3.1 Agregados gruesos calizos .....	13
2.3.2 Agregados finos calizos .....	14
2.3.3 Arena de sílica .....	14
2.4 Efecto del curado en las características del concreto endurecido.....	15
2.4.1 Técnicas de curado.....	16
2.5 Pruebas para resistencia a la abrasión en el concreto .....	17
2.6 Investigaciones recientes sobre la abrasión en el concreto .....	18
2.7 Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	21
3. Metodología.....	23
3.1 Diseño del experimento.....	23
3.1.1 Relaciones agua/ cemento empleadas .....	23

3.1.2 Sustitución del agregado fino .....	23
3.1.3 Tratamientos de curado empleados .....	24
3.1.4 Tamaño de la muestra .....	25
3.2 Pasos de la investigación .....	25
3.2.1 Adquisición de agregados .....	25
3.2.2 Caracterización de los agregados .....	26
3.2.2.1 Cuarteo de agregados .....	26
3.2.2.2 Granulometría .....	26
3.2.2.3 Módulo de finura .....	27
3.2.2.4 Pesos volumétricos .....	28
3.2.2.5 Densidad y absorción .....	28
3.2.2.6 Desgaste .....	29
3.2.3 Diseño de mezclas de concreto .....	29
3.2.4 Procedimiento de mezclado .....	30
3.2.5 Pruebas al concreto fresco .....	30
3.2.6 Elaboración de especímenes .....	31
3.2.7 Proceso de curado .....	33
3.2.8 Pruebas de especímenes .....	34
3.2.9 Análisis estadístico de los resultados .....	37
4. Resultados .....	39
4.1 Caracterización de los agregados .....	39
4.2 Diseño de mezclas .....	42
4.3 Resultados en el concreto fresco .....	42
4.4 Resultados en el concreto endurecido .....	43
4.4.1 Resistencia a la compresión .....	44

4.4.2 Resistencia a la tensión por compresión.....	45
4.4.3 Resistencia a la abrasión .....	47
4.4.4 Índice de dureza.....	52
4.5 Análisis estadístico.....	53
4.6 Elaboración de modelos de regresión .....	57
5. Discusión.....	61
5.1 Resistencia a la compresión.....	61
5.2 Resistencia a la tensión por compresión.....	62
5.3 Resistencia a la abrasión (ancho del área desgastada).....	64
5.4 Análisis estadístico de los resultados.....	66
6. Conclusiones.....	71
7. Referencias bibliográficas .....	72
ANEXOS .....	75

Tabla 1.- Clasificación de pisos de concreto según el ACI 302.....	10
Tabla 2.- Caracterización del agregado grueso calizo de la región.....	13
Tabla 3.- Caracterización del agregado fino calizo de la región.....	14
Tabla 4.- Cantidad de probetas de concreto elaboradas.....	25
Tabla 5.- Características físicas de los agregados empleados. ....	41
Tabla 6.- Cantidades para elaborar un m <sup>3</sup> de concreto (sin ajuste de humedad).....	42
Tabla 7.- Revenimiento y peso volumétrico del concreto fresco. ....	43
Tabla 8.- Resistencia a la compresión (f'c) para cada serie y promedio. ....	44
Tabla 9.- Resistencia a la tensión por compresión en kg/cm <sup>2</sup> para cada serie y promedio. ....	46
Tabla 10.- Resultados de abrasión.....	47
Tabla 11.- Resultados de la prueba de índice de dureza. ....	52
Tabla 12.-ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio de arena, en concretos curados a 14 días. ....	54
Tabla 13.- ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio de arena, en concretos con curado natural. ....	54
Tabla 14.- ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio el curado, en concretos con arena caliza. ....	55
Tabla 15.- ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio el curado, en concretos con arena de sílica. ....	56
Tabla 16.- ANOVA del desgaste utilizando como factor el cambio en la relación A/C, en concretos con arena caliza, curados por 14 días. ....	56
Tabla 17.- Prueba post hoc de Scheffe de comparación múltiple utilizando como factor el cambio en la relación A/C, en concretos con arena caliza, curados por 14 días...	57
Tabla 18.- Valores de resistencia a la compresión, tensión por compresión, índice de dureza, ancho desgastado y pérdida de peso empleados para la realización del modelo de regresión. ....	58
Tabla 19.-Correlaciones bivariadas entre las variables medidas. ....	58
Tabla 20.- Coeficientes de correlación y determinación de los modelos.....	60
Tabla 21.- Comparación de las resistencias a tensión obtenidas por Sánchez (2008), Gómez (2009) y las obtenidas en el estudio (kg/cm <sup>2</sup> ). ....	64

Tabla 22.- Comparación de los resultados de Serrano (2007) con el estudio de abrasión (mm), para A/C de 0.50. ....	65
Tabla 23.- Comparación del desgaste, en mm, para distintas relaciones A/C. ....	66

Figura 1.- Cuarteo de los agregados pétreos.....	26
Figura 2.- Prueba de Granulometrías.....	27
Figura 3.-Distintos tamaños de partículas de agregado fino.....	27
Figura 4.- Prueba de pesos volumétricos.....	28
Figura 5.- Prueba de Los Ángeles.....	29
Figura 6.- Mezclado del concreto.....	30
Figura 7.-Pruebas de revenimiento y peso volumétrico al concreto Fresco.....	31
Figura 8.- Elaboración de cilindros de concreto.....	32
Figura 9.- Moldes para la elaboración de losas de concreto.....	32
Figura 10.- Elaboración de losas de concreto.....	33
Figura 11.- Prueba de abrasión.....	35
Figura 12.- Ejemplo de medición de ancho de área desgastada.....	36
Figura 13.- Martillo de rebote empleado.....	37
Figura 14.- Aplicación de martillo de rebote sobre losas de concreto.....	37
Figura 15.-Curva granulométrica del agregado grueso.....	39
Figura 16.-Curva granulométrica del agregado fino calizo.....	40
Figura 17.-Curva granulométrica del agregado fino de sílica.....	41
Figura 18.- Promedio de la resistencia a la compresión a los 28 días por cada A/C.....	45
Figura 19.- Promedios de la resistencia a la tensión por compresión ( $f_{ct}$ ) para cada A/C.....	46
Figura 20.- Comparación del desgaste entre los tipos de curados, con agregados calizos.....	48
Figura 21.- Comparación del desgaste entre los tipos de curados, con agregado fino de sílica.....	49
Figura 22.- Comparación del desgaste entre agregados finos para concretos curados 14 días.....	50
Figura 23.- Comparación del desgaste entre agregados, para concretos con curado natural.....	51
Figura 24. Distintos desgastes obtenidos en la prueba de abrasión para cada relación A/C.....	51

Figura 25.- Comparación de resultados entre las pruebas de abrasión e índice de dureza para curado a 14 días.....	53
Figura 26.- Comparación de resultados entre las pruebas de abrasión e índice de dureza para curado natural. ....	53
Figura 27.- Comparación de la resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ). ....	61
Figura 28.- Comparación de la resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) obtenida en este estudio con las de Solís, Moreno (2011). ....	62
Figura 29.- Comparación entre tipos de agregado de la resistencia a la tensión por compresión (kg/cm <sup>2</sup> ).....	63
Figura 30.- Comparación del efecto de las arenas en la media del desgaste, con curado a 14 días inmersión (3: caliza, 4: sílica). ....	67
Figura 31.- Comparación del efecto de las arenas en la media del desgaste con curado natural (3: caliza, 4: sílica).....	68
Figura 32.- Comparación del efecto del curado en la media del desgaste, con arena caliza (1: inmersión, 2: natural). ....	69
Figura 33.- Comparación del efecto del curado en la media del desgaste, con arena de sílica (1: inmersión, 2: natural). ....	69
Figura 34.- Comparación del efecto de la A/C en el desgaste con arena caliza y curado de 14 días por inmersión. ....	70

# 1. Planteamiento del problema

## 1.1 Antecedentes

El concreto es el material más utilizado en la construcción debido a su versatilidad, durabilidad y economía.<sup>1</sup> La razón por la que el concreto es preferido en la construcción es porque presenta características significativas de trabajabilidad, impermeabilidad y resistencia.<sup>2</sup> Además de sus usos estructurales en elementos de concreto (Reforzado, preesforzado y postensado), se emplea como material para la elaboración de pisos industriales, pisos peatonales o calles.

Por lo general en el diseño de los elementos arriba mencionados solo se consideran las propiedades estructurales del concreto, como resistencia media a la compresión ( $f_c$ ) o el módulo de ruptura (MR). El módulo de ruptura toma un papel muy importante al momento de diseñar pavimentos, losas u otras estructuras apoyadas sobre terrenos.<sup>3</sup>

Uno de los problemas de la superficie de los pisos de concreto es su desgaste superficial o abrasión. En nuestro medio se han reportado casos de clientes que han presentado quejas a los constructores de infraestructura por desperfectos o problemas en las superficies de pisos. Adicionalmente, en obras de urbanización se han presentado problemas con áreas peatonales desgastadas prematuramente generando accidentes entre los usuarios y un gasto adicional al no cumplir los elementos construidos con su vida útil mínima de los elementos construidos.<sup>4 5</sup>

Se ha encontrado en el medio local, que el concreto empleado para la construcción de estos elementos, cumple con la resistencia especificada a la compresión, por lo que se podría asumir que esta característica no es el principal factor asociado al desgaste

---

<sup>1</sup> González Cuevas, Robles, *Aspectos Fundamentales Del Concreto Reforzado*, 2005.

<sup>2</sup> Héctor Padilla and Humberto Cárdenas, "Relación de La Resistencia a La Compresión Y El Módulo de Ruptura Del Concreto Hidráulico," *Innovare. Revista de Ciencia Y Tecnología* 2 (2013): 77–85.

<sup>3</sup> Ibid.

<sup>4</sup> Diario de Yucatán, "Continúan Los Perjuicios En El Centro de Mérida," *Diario de Yucatán*, Junio 29, 2015, <http://yucatan.com.mx/merida/gobierno-merida/continuan-los-perjuicios>.

<sup>5</sup> Milenio Novedades, "Anciana Cae En Las Nuevas Banquetas Del Centro," *Milenio Novedades*, Enero 9, 2014, <http://sipse.com/milenio/accidente-mujer-caida-banqueta-centro-merida-69882.html>.

de la superficie, y por lo tanto se deberían considerar otros aspectos como el curado, acabado o tipo de agregado. Investigaciones en distintas partes del mundo, que se mencionan más adelante, han probado esta aseveración usando distintos factores de diseño, elaboración o tratamiento del concreto.

Se ha concluido en investigaciones previas que la resistencia al desgaste del concreto aumenta en función directa con la resistencia a la compresión; pero también la resistencia al desgaste es influenciada por la resistencia mecánica y propiedades de los agregados, así como por el acabado final del piso y los aditivos empleados.<sup>6</sup>

Otros autores han concluido con base en estudios anteriores que la estructura y propiedades de la superficie de pisos de concreto son distintas a las del interior del mismo elemento<sup>7</sup>. Lo anterior puede deberse a la técnica de acabado usada o al sangrado excesivo cuando el contenido de agua de la mezcla es alto, haciendo que la parte superior de los elementos tenga marcadamente menor resistencia a la abrasión que las partes interiores del mismo elemento.

Sin embargo, a pesar de que la durabilidad del elemento sujeto a abrasión depende principalmente de las características de la zona superficial, ha habido poca investigación dirigida a estudiar los factores que contribuyen al deterioro de ésta zona.

8

Algunas investigaciones han concluido que las características de los agregados, influyen fuertemente en la resistencia a la abrasión. Li *et al.*(2011) encontraron una tendencia a tener mayor resistencia a la abrasión mientras mejores fueron los resultados de la prueba de Los Angeles en el agregado grueso. También encontraron mejores resistencias a la abrasión usando arena manufacturada con respecto a la

---

<sup>6</sup> Yazıcı, G · Inan, "An Investigation on the Wear Resistance of High Strength Concretes," *Wear* 260 (2006).

<sup>7</sup> V C Vassou, N R Short, and R J Kettle, "Microstructural Investigations into the Abrasion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete Floors," *Journal of Materials in Civil Engineering* 20, no. February (2008): 157–68.

<sup>8</sup> Ibid.

arena de río; lo anterior fue atribuido a que los agregados finos manufacturados son más angulares y tienen una superficie más rugosa que las arenas naturales.<sup>9</sup>

Con respecto a las adiciones al concreto Kumar y Sharma (2014) encontraron que las puzolanas influyen favorablemente en la resistencia a la abrasión del concreto; sus mejores resultados los obtuvieron cuando usaron aproximadamente 20% de puzolana con respecto al contenido de cemento portland.<sup>10</sup>

Por su parte Ghafoori y Diawara (2007) estudiaron la sustitución de una fracción del agregado fino por microsilica para mejorar la resistencia a la abrasión. Encontraron que a cualquier nivel de sustitución, esta resistencia mejoraba, siendo la cantidad óptima una sustitución del 10%. Estos autores en su investigación también utilizaron diferentes tiempos de curado para probar la efectividad de la microsilica en la resistencia a la abrasión. Tuvieron su mejor resultado curando durante 28 días por inmersión; lo cual atribuyeron a que la aportación de la microsilica en edades tempranas no es significativa.<sup>11</sup>

Varios autores han modelado ecuaciones para predecir la resistencia a la abrasión. Algunos la correlacionaron con la resistencia a la compresión ( $f'c$ ), contenido de microsilica y la edad de curado. Mientras que otros la correlacionaron con la resistencia a la compresión y a la tensión por compresión.<sup>12</sup> En ambos casos obtuvieron coeficientes de correlación aceptables, 0.95 en el primer caso y 0.83 en el segundo, entre el valor de desgaste estimado mediante las ecuaciones y el obtenido en las pruebas experimentales.

A nivel local, Serrano (2007) encontró que el curado influye en las características de la capa superficial del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción, mejorando su resistencia a la abrasión. En este estudio se obtuvieron mayores

---

<sup>9</sup> Beixing Li, Guoju Ke, and Mingkai Zhou, "Influence of Manufactured Sand Characteristics on Strength and Abrasion Resistance of Pavement Cement Concrete," *Construction and Building Materials* 25, no. 10 (2011): 3849–53.

<sup>10</sup> G.B. Ramesh Kumar and U.K. Sharma, "Abrasion Resistance of Concrete Containing Marginal Aggregates," *Construction and Building Materials* 66 (2014): 712–22.

<sup>11</sup> Nader Ghafoori and Hamidou Diawara, "Strength and Wear Resistance of Sand-Replaced Silica Fume Concrete," *ACI Materials Journal* 104, no. 2 (2007): 206–14.

<sup>12</sup> Yazıcı and Inan, "An Investigation on the Wear Resistance of High Strength Concretes."

resistencias a la abrasión, conforme se incrementó el tiempo de curado por inmersión.<sup>13</sup> Sin embargo, no se ha realizado un estudio sistemático de la resistencia a la abrasión en esta región, utilizando los agregados típicos de la misma, que involucre diferentes parámetros, como son la relación agua/cemento, el tiempo de curado y la sustitución parcial del agregado local por uno de mejores características.

---

<sup>13</sup> Carlos Serrano, "Influencia Del Tiempo de Curado Por Inmersión En El Desempeño Del Concreto En Clima Calido, Sub-Humedo" (Universidad Autónoma de Yucatán, 2006).

## 1.2 Objetivo General

Probar la influencia de algunos factores en la resistencia a la abrasión del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción.

## 1.3 Objetivos específicos

Determinar las resistencias a la abrasión, a la compresión, a la tensión por compresión y la dureza superficial del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción.

Determinar la influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a la abrasión del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción.

Determinar la influencia del curado en la resistencia a la abrasión del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción.

Determinar la influencia de la sustitución parcial del agregado fino calizo por arena de sílica en la resistencia a la abrasión del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción.

## 2. Marco Teórico

El concepto de resistencia a la abrasión se ha estudiado en muchos ámbitos de la industria, buscando mejores mecanismos que reduzcan el desgaste o la fricción entre cuerpos. En la construcción, específicamente en la tecnología del concreto, es una de las áreas menos estudiadas con respecto a otras como la resistencia a la compresión del concreto.

### 2.1 Tribología

La tribología es definida como “la técnica que estudia el rozamiento entre los cuerpos sólidos, con el fin de producir mejor deslizamiento y menor desgaste entre ellos”<sup>14</sup>. En elementos constructivos es relevante la segunda parte de la definición, que se refiere al desgaste; mientras que el aspecto del deslizamiento es principalmente de interés en maquinarias donde es importante el movimiento entre superficies. Regularmente no es algo deseable, sobre todo en pisos o losas, tener un elemento altamente deslizante.

La tribología es la ciencia que engloba el estudio del desgaste, la fricción y la lubricación. Estos tres aspectos deben ser entendidos en su totalidad para la resolución de problemas industriales; donde las tasas de desgaste no solo dependen de las propiedades de los materiales, sino también del comportamiento conjunto entre el medio friccionante y el material.<sup>15</sup>

Cuando se logran consolidar y utilizar estos conocimientos científicos en un fin específico, se impacta positivamente en la economía de la industria donde son utilizados. Lo anterior lo respalda el hecho de que los países industrializados al aplicar adecuadamente sus conocimientos tribológicos han tenido un ahorro económico del orden del 7% del PIB de la industria.<sup>16</sup>

---

<sup>14</sup>Real Academia de la Lengua Española, “Real Academia de La Lengua Española,” *Diccionario de La Lengua Española*, 2015.

<sup>15</sup> Edgar Jesús López López, “Estudio Experimental Del Desgaste Abrasivo En Aceros Aisi 8620 , D-2 Y H-13 Con Y Sin Tratamiento Superficial” (Instituto Politécnico Nacional, 2004).

<sup>16</sup> Ibid.

De ahí la importancia de estudiar esta ciencia en los materiales usados en una industria o en ingeniería y enfocarse la interacción entre los mismos. Existen estudios y publicaciones científicas muy amplios acerca del desgaste de metales, piedras, materiales sintéticos, materiales compuestos, etc.

### 2.1.1 Abrasión

Se define a la abrasión como la acción o efecto de raer o desgastar por fricción o el proceso de desgaste o de destrucción, producido en una superficie por agentes externos<sup>17</sup>. De las definiciones anteriores, podemos extraer dos conceptos: la abrasión se genera por fricción y por agentes externos al elemento. La abrasión o desgaste por fricción ha sido un problema ampliamente estudiado en distintos materiales utilizados en las diversas industrias, no siendo así en la de la construcción.

### 2.1.2 Abrasión en el concreto

El desgaste por abrasión se presenta en pavimentos, pisos, estructuras hidráulicas (presas, canales o tuberías) por la interacción entre la superficie y los objetos en movimiento.<sup>18</sup>

Los pavimentos de concreto pueden diseñarse y construirse utilizando diversos tipos de agregados. La durabilidad del elemento es influenciada, en gran medida, por la calidad y propiedades físicas del agregado empleado en su construcción<sup>19</sup>. De acuerdo a estudios publicados, los parámetros del cemento, tales como su clase o resistencia temprana, parecen no ser tan relevantes en la resistencia al desgaste.<sup>20</sup>

En el caso de estructuras hidráulicas, la acción de los materiales abrasivos acarreados por el agua produce la abrasión.<sup>21</sup> Este desgaste ocasiona un continuo proceso de

---

<sup>17</sup> Española, "Real Academia de La Lengua Española."

<sup>18</sup> Yazıcı and Inan, "An Investigation on the Wear Resistance of High Strength Concretes."

<sup>19</sup> Li, Ke, and Zhou, "Influence of Manufactured Sand Characteristics on Strength and Abrasion Resistance of Pavement Cement Concrete."

<sup>20</sup> T Sebök and O Stráněl, "Wear Resistance of Polymer-Impregnated Mortars and Concrete," *Cement and Concrete Research* 34 (2004): 1853–58.

<sup>21</sup> Adam Neville, *Tecnología Del Concreto*, Cuarta edición (IMCYC, 1999).

mantenimiento a lo largo del tiempo lo cual debe ser considerado durante el ciclo de vida del proyecto.<sup>22</sup>

### 2.1.3 Factores que influyen en la resistencia a la abrasión del concreto

Se ha demostrado que una baja relación A/C mejora la resistencia a la abrasión en la superficie del elemento. También son importantes la colocación y el acabado del concreto debido a que tienen un efecto significativo en la calidad de los 3.0 mm superiores de la losa. Por lo anterior se puede entender que la resistencia a la compresión no es la única medida importante de la calidad del concreto en pisos con superficie expuesta.<sup>23</sup>

Se han identificado que los principales factores que afectan la resistencia a la abrasión del concreto son los siguientes: las condiciones ambientales, el proporcionamiento de la mezcla, el uso de algún cemento especial, las características del agregado, el uso de adiciones (como ceniza volante o fibras poliméricas), el acabado de la superficie, las condiciones de curado, y desde luego la resistencia mecánica.<sup>24</sup>

Con respecto al curado en pisos, la literatura especializada recomienda para alcanzar un buen grado de durabilidad a la abrasión, un tiempo de curado de 14 días, que corresponde al doble del curado convencional recomendado para estos elementos.<sup>25</sup>

## 2.2 Pisos de concreto

Un piso de concreto sobre terreno es un elemento bastante común en la construcción; puede ser una losa muy simple o compleja. El Instituto americano del concreto (ACI) describe nueve clases de pisos de concreto; sin importar sus características, el método de construcción es similar, consiste en: preparar el terreno, colocar y dar acabado al

---

<sup>22</sup> Zoran J Grdic et al., "Abrasion Resistance of Concrete Micro-Reinforced with Polypropylene Fibers," *Construction and Building Materials* 27 (2012): 305–12.

<sup>23</sup> James A Farny, *Diseño Y Construcción de Pisos En Concreto*, Primera Ed (Asocreto, 2007).

<sup>24</sup> El' Zbieta Horszczaruk, "Abrasion Resistance of High-Strength Concrete in Hydraulic Structures," *Wear* 259 (2005): 62–69.

<sup>25</sup> American Concrete Institute, *Construcción de Losas Y Pisos de Concreto ACI-302*, ed. IMCYC, 3era Edici (IMCYC, 1992).

concreto y curarlo adecuadamente.<sup>26</sup> Las nueve clases mencionadas se presentan en la Tabla 1.

El ACI 302 es uno de los manuales más usados para el diseño de pisos de concreto simple o reforzado. Contiene recomendaciones para la composición de la mezcla a emplear, el diseño del refuerzo, el diseño de las juntas y la colocación del concreto y su posterior acabado.

Los pisos de concreto deben de satisfacer un número de requisitos específicos como son: adecuada planicidad, control de agrietamiento, durabilidad y suficiente capacidad de carga. Cualquier incumplimiento en estos requerimientos y el posterior deterioro de la superficie, ocasionarán reparaciones no planeadas que pueden ser difíciles y costosas.<sup>27</sup>

Los pisos de concreto en áreas grandes deben diseñarse y construirse con la mayor economía posible para proporcionar un servicio sin problemas por muchos años. Es importante conocer los criterios de desempeño y las condiciones de servicio del piso para llevar a buen término el piso requerido.<sup>28</sup>

---

<sup>26</sup> Farny, *Diseño Y Construcción de Pisos En Concreto*.

<sup>27</sup> Petr Mynarčík, "Technology and Trends of Concrete Industrial Floors," *Procedia Engineering* 65 (2013): 107–12.

<sup>28</sup> Farny, *Diseño Y Construcción de Pisos En Concreto*.

Tabla 1.- Clasificación de pisos de concreto según el ACI 302.

Clase	Tipo de tráfico esperado	Uso	Consideraciones Especiales	Acabado final
1	Peatonal ligero	Superficies residenciales principalmente con recubrimiento de piso	Pendiente para drenajes: niveles apropiados de losa para aplicación de recubrimiento; curado.	Allanado simple
2	Peatonal	Oficinas o iglesias; comúnmente con recubrimiento de piso, decorativo	Tolerancia de superficie. Agregados antiderrapantes	Allanado simple; acabado antiderrapante cuando se requiera
3	Peatonal y de rodada neumática	Andadores exteriores, calzadas, pisos de garaje, banquetas	Pendiente para drenaje. Contenido de aire	Aplanado, allanado o con escoba
4	Peatonal y tráfico vehicular ligero	Institucional o comercial.	Nivel de losa aceptable para recubrimiento	Acabado normal con llana metálica
5	Tráfico vehicular industrial con rodada neumática	Pisos de servicio industrial ligero para fabricación, procesado y almacenaje	Subrasante buena y uniforme. Tolerancia de superficie	Acabado intenso con llana metálica
6	Tráfico vehicular industrial, ruedas duras	Pisos industriales sujetos a tráfico pesado; pueden estar sujetos a cargas de impacto	Subrasante buena y uniforme; tolerancia de superficies	Agregados metálicos o minerales especiales; acabado intenso repetido con llana metálica
7	Tráfico vehicular industrial, ruedas duras	Pisos de dos capas ligadas sujetos a tráfico pesado o impactos	Losa base, subrasante buena y uniforme Coronamiento. Compuesto de agregado bien graduado	Limpia y apropiada textura superficial para la adherencia de la capa subsecuente de coronamiento. Acabado especial con allanado mecánico con pasadas repetidas de llana metálica
8	Como el de las clases 4, 5, 6	Capa superior no ligada. Pisos de frigoríficas con aislamiento en pisos viejos o donde el programa de construcción lo exija	Rompedores de adherencia en superficies viejas. Refuerzo con malla	Acabado intenso con llana metálica
9	Superplano o cuando se requieren tolerancias críticas de superficie	Pasillos angostos, andenes de almacenes, estudios de televisión	Requisitos de no variación en la calidad del concreto	Síganse estrictamente las técnicas de acabado de la sección 7.15 del manual ACI 302.

### 2.2.1 Diseño de pisos de concreto

Respecto al diseño de los pisos o losas de concreto las cuatro variables principales, desde el punto de vista estructural y de construcción, a considerar son las siguientes: la resistencia del concreto empleado, el espesor de la losa, los distintos tipos de junta y el refuerzo de la losa. De acuerdo a la Tabla 1.

Al aumentar el número de la clase del piso, aumentan sus exigencias o consideraciones especiales durante el diseño y la construcción.

### 2.2.2 Materiales empleados en pisos de concreto

De acuerdo al ACI la resistencia mínima a la compresión del concreto a los 28 días ( $f'_c$ ) debe ser de aproximadamente  $214 \text{ kg/cm}^2$  ( $20,98 \text{ MPa}$ ) para cualquier clase de piso.<sup>29</sup> Se han usado resistencias menores a esta para aplicaciones que no necesitan altos grados de resistencia a la abrasión. Para la mayor parte de los pisos de uso industrial /comercial se recomienda una resistencia mínima de  $285 \text{ kg/cm}^2$  ( $27,94 \text{ MPa}$ ) Para pisos sometidos a tránsito pesado, que podrían incluir cargas dinámicas, se recomienda una resistencia a los 28 días de  $316 \text{ kg/cm}^2$  ( $31 \text{ MPa}$ ) como mínimo, para tener una adecuada resistencia al desgaste en estos ambientes altamente abrasivos; en este último caso una resistencia a la compresión del concreto podría ser menor y soportar efectivamente las cargas, pero no el desgaste<sup>30</sup>

El módulo de ruptura, indicador de la resistencia a la flexión, juega un papel importante en el diseño de pavimentos o pisos de concreto. Los esfuerzos de compresión alcanzados durante el uso en una losa de concreto, son generalmente mucho más bajos que la resistencia límite a la compresión del material. Sin embargo es la resistencia a la flexión el principal parámetro que se usa para diseñar el espesor de un piso de concreto debido a los esfuerzos de tensión que se presentan en él.

Respecto al acero de refuerzo, los pisos de concreto, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

---

<sup>29</sup> Institute, *Construcción de Losas Y Pisos de Concreto ACI-302*.

<sup>30</sup> Farny, *Diseño Y Construcción de Pisos En Concreto*.

- Pisos de concreto simple (sin refuerzo de acero)
- Pisos de concreto con refuerzo débil o bajo (reforzados con malla electro soldada)
- Pisos de concreto reforzado (refuerzo con varillas de acero, en una o dos capas)
- Pisos de concreto preesforzado (reforzado con torones especiales)<sup>31</sup>

El refuerzo es necesario cuando se requiere un espaciamiento largo de juntas o cuando las juntas son inaceptables en el piso. El refuerzo de acero permite aumentar la distancia entre juntas para formar paneles más espaciados. El acero se puede agregar como malla (pisos con refuerzo débil) o como varillas (pisos reforzados).

Las desventajas al usar refuerzo de acero son un aumento en el costo del producto terminado, una instalación laboriosa y la presencia de micro agrietamiento a pesar del refuerzo utilizado.

### 2.3 Características de los agregados empleados

La importancia de los agregados en el concreto es fundamental, ya que aportan la mayor cantidad de masa en este material compuesto; además componen la fase que suele presentar la mayor resistencia mecánica y el mayor módulo de elasticidad. Si se utiliza la mayor cantidad de agregados en un volumen unitario de concreto, la mayoría de las veces se producirá un concreto más denso, más estable volumétricamente y, sobre todo, más económico.

Las rocas sedimentarias de carbonato de calcio [CaCO<sub>3</sub>] son denominadas calizas y son las más comunes en la Península de Yucatán. Los agregados para concreto utilizados en esta región provienen de plantas de trituración que se localizan en los propios bancos de extracción de la roca caliza. Se les denomina tradicionalmente quebradoras.<sup>32</sup>

---

<sup>31</sup>Mynarčík, "Technology and Trends of Concrete Industrial Floors."

<sup>32</sup> Eric Moreno, Romel Solís, *Concreto Con Agregados Calizos: En Clima Cálido*, Primera ed (Académica Española, 2011).

Diversos estudios sobre los agregados calizos han sido efectuados en la Península de Yucatán, en los cuales se ha concluido lo siguiente:

Los agregados tienen como principales características su alta absorción y su gran cantidad de partículas finas. Estas dos propiedades aunadas a la forma angulosa y plana de las partículas hacen que los requerimientos de agua para el concreto sean relativamente altos para lograr una medida de trabajabilidad requerida; y como consecuencia de lo anterior, también hacen necesario un mayor consumo de cemento para alcanzar una calidad y resistencia especificada.<sup>33</sup>

### 2.3.1 Agregados gruesos calizos

Solís y Moreno (2011) caracterizaron agregado grueso de 16 bancos de materiales cercanos a la ciudad de Mérida, Yucatán, y mediante un análisis estadístico obtuvieron las propiedades índice, presentadas en la Tabla 2.<sup>34</sup>

Hernández (2013) encontró que el agregado grueso calizo local presenta una alta variabilidad de propiedades, es poroso, absorbente y a veces frágil. Reportó una alta absorción de entre un 6-14%.<sup>35</sup> Los valores que obtuvo de absorción coincidieron con los reportados previamente en la localidad (Tabla 2).

Tabla 2.- Caracterización del agregado grueso calizo de la región.

<b>Agregado Grueso</b>	<b>Media</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS)	1153	1224	1065
Peso Volumétrico Seco Compactado (PVSC)	1267	1358	1162
Densidad	2,35	2,48	2,22
Absorción (%)	6,43	10,10	3,80
Finos (%)	4,01	9	1
Desgaste de Los Ángeles (%)	30	47	23
Tamaño Máximo del Agregado (mm)	19	25	19

<sup>33</sup> Ibid.

<sup>34</sup> Ibid.

<sup>35</sup> Guillermo Hernández, "Determinación de La Influencia de La Calidad de Los Agregados En El Concreto" (Universidad Autónoma de Yucatán, 2013).

### 2.3.2 Agregados finos calizos

Igualmente para el agregado fino local, Solís y Moreno (2011) caracterizaron 16 bancos de materiales obteniendo las propiedades índice que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Caracterización del agregado fino calizo de la región.

<b>Agregado Fino</b>	<b>Media</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS)	1340	1505	1153
Módulo de Finura	2,81	3,20	2,50
Densidad	2,47	2,55	2,37
Absorción (%)	4,93	7,60	3,00
Finos (%)	18,11	26	13,7

En la Tabla 3 se observa una alta variabilidad entre los valores máximo y mínimo de cada propiedad. Un porcentaje alto de partículas finas y una absorción de alrededor del 5% en promedio, que coincide con lo reportado por Hernández (2013).

El agregado fino o arena de la región se obtiene de plantas de manufactura o “quebradoras” por lo que debido a su método de producción puede contener una gran cantidad de finos, es más poroso y de menor calidad para la elaboración del concreto que la arena natural de río.<sup>36</sup>

### 2.3.3 Arena de sílica

A partir de las arenas silíceas se pueden producir fracciones granulométricas específicas destinadas a mercados industriales tan diversos como: filtros de agua, perforaciones, fundición, vidrio, morteros, ornamentos y fabricación de resinas.

Buscando mejorar la economía y mantener la resistencia a la compresión del concreto investigadores como Jignesh y Vaniya (2015) sustituyeron una fracción del cemento del proporcionamiento de concreto por arena de sílica obtenida en una localidad de

<sup>36</sup> Li, Ke, and Zhou, “Influence of Manufactured Sand Characteristics on Strength and Abrasion Resistance of Pavement Cement Concrete.”

La India en rangos de un 10% a un 70%. Encontraron mejores resultados con una sustitución del 50%.<sup>37</sup>

La arena de sílica utilizada en esta investigación, denominada “grano de oro” y originaria de Veracruz, México, tiene las siguientes características: 98% de sílice en su composición, una gravedad específica o densidad relativa de 2.6, dureza en la escala de Mohs de 6 y una absorción máxima del 0.5%.

## 2.4 Efecto del curado en las características del concreto endurecido

El término curado se refiere a los procedimientos realizados para promover la hidratación del cemento, por medio del control de la temperatura y las condiciones de humedad; para que esta técnica sea eficiente debe ser aplicado inmediatamente después del fraguado inicial y durante un periodo suficiente para lograr el nivel esperado de desempeño.<sup>38</sup>

Este término también se refiere al tiempo durante el cual se ejecutan acciones específicas para mantener el concreto en condiciones favorables de humedad y temperatura, como pueden ser aplicarle agua, aislarlo del medio ambiente, calentarlo, etc.<sup>39</sup>

Es sabido que cuando existe curado apropiado, el concreto se vuelve más fuerte, más durable y más resistente a la abrasión. Siete días de curado bajo condiciones ideales de temperatura (11° a 23° c) son suficientes para que el cemento portland (ASTM C tipos 1 ó 2) desarrolle la resistencia especificada a los 28 días (f'c).<sup>40</sup>

Generalmente se acepta que si las condiciones del medio ambiente proporcionan suficiente humedad y una temperatura favorable en forma constante durante un

---

<sup>37</sup> Kerai Jignesh, “Effect of Use of Silica Sand as Fine Material in Concrete” 2, no. 1 (2015): 266–71.

<sup>38</sup> K Metha, P Monteiro, *Concreto. Estructura, Propiedades Y Materiales*, ed. IMCYC (México: IMCYC, 1998).

<sup>39</sup> Moreno, Solís, *Concreto Con Agregados Calizos: En Clima Cálido*.

<sup>40</sup> Ghafoori, Diawara, “Strength and Wear Resistance of Sand-Replaced Silica Fume Concrete.”

periodo de 7 o más días, no se requiere realizar acción alguna para curar el elemento de concreto.<sup>41</sup>

### 2.4.1 Técnicas de curado

A pesar de que se cuenta con diversas técnicas de curado para elementos de concreto, en este trabajo solo se presentan las que recomienda aplicar el ACI 302 para el curado de pisos o losas de concreto.

Cubiertas húmedas: en pisos o losas, la lona es el recubrimiento húmedo usado con más frecuencia. Proporcionan un abastecimiento continuo de humedad, distribuida uniformemente sobre la superficie. Deben ser colocadas tan pronto la superficie esté lo bastante dura para que no se dañe.

Aspersión o empapado: debe hacerse aplicando un rocío fino y continuo, no intermitentemente, de manera que no se seque la superficie. Su principal desventaja es el requerimiento de supervisión continua y el uso de agua donde esta es escasa.

Encharcamiento: cuando la superficie tiene una planicidad adecuado, se puede optar por encharcarla por completo. Se requiere un borde o dique para contener el agua perimetralmente. Tiene la ventaja de mantener el concreto a una temperatura uniforme y la misma desventaja respecto al uso del agua mencionada arriba.

Existen curados que podrían ser menos efectivos que los mencionados anteriormente, llamados curados por retención de humedad. Entre ellos se encuentran las películas de polietileno, el papel impermeable y los compuestos de curado aplicados con aspersor.<sup>42</sup>

Como se mencionó anteriormente, para el clima de la Península de Yucatán los valores de temperatura y humedad, pueden suponer condiciones de curado natural en el concreto. Sin embargo, la humedad suele tener un rango de variación durante el día de alrededor de un 50% que podría presentar ciclos completos de humedad y secado

---

<sup>41</sup> Neville, *Tecnología Del Concreto*.

<sup>42</sup> Institute, *Construcción de Losas Y Pisos de Concreto ACI-302*.

en el concreto; y la temperatura rebasar en ciertas estaciones, en mucho, las condiciones ideales para el concreto<sup>43</sup>

## 2.5 Pruebas para resistencia a la abrasión en el concreto

La resistencia del concreto a la abrasión es difícil de valorar pues la acción del daño varía según la causa exacta del desgaste, y ningún procedimiento de prueba es satisfactorio en evaluar todas las condiciones. Pruebas como el frotamiento, rueda de cepillar o chorro de arena pueden ser apropiadas en casos diferentes.

La norma ASTM C 418 prescribe el procedimiento para determinar el desgaste por chorro de arena; es conocida también como método de *Sandblast*. Consiste en arrojar arena abrasiva sobre una superficie empleando un dispositivo roceador. La pérdida de volumen del concreto sirve como una base de juicio preliminar pero no se recomienda como un criterio para determinar la resistencia a la abrasión de la superficie.

Para otras pruebas, la norma ASTM C 779 prescribe tres procedimientos de prueba en laboratorio o campo útiles para pisos: la prueba del disco giratorio, de abrasión de bolas de acero y la prueba de rueda de cepillar. Las tres pruebas se realizan con un equipo base y solamente se cambian en el equipo base los dispositivos que efectuarán la abrasión en cada una de las tres pruebas.

La prueba del disco giratorio utiliza un movimiento de tres superficies planas impulsadas en trayectorias circulares. Se introduce carburo de silicio como abrasivo. La segunda prueba, se efectúa aplicando carga a un cabezal rotatorio que está separado del espécimen por bolas de acero. La prueba se efectúa en agua para remover el material de erosión. La prueba de rueda cepillar usa un cabezal con cepillos de acero que simulan la abrasión sobre la superficie. Sin embargo, y a pesar que tratan de simular los modos de abrasión, la dificultad mayor en las pruebas de abrasión es asegurarse que los resultados de una prueba representan la resistencia comparativa del concreto a un tipo dado de desgaste.<sup>44</sup>

---

<sup>43</sup> Solís and Moreno, *Concreto Con Agregados Calizos: En Clima Cálido*.

<sup>44</sup> Neville, *Tecnología Del Concreto*.

Además de las pruebas para determinar la resistencia a la abrasión que se presentan en las normas ASTM C, una categoría totalmente diferente de valorar de las características superficiales del concreto es la prueba de índice de dureza. Esta prueba mide únicamente, mediante un instrumento llamado martillo de rebote o esclerómetro, las propiedades de una zona superficial de alrededor de 3 cm. Los cambios que afectan la superficie del concreto como su acabado o su humedad tienen influencia sobre el valor de la prueba. Por tanto esta prueba es una aplicación particular que podría ayudar a determinar la resistencia a la abrasión del concreto.<sup>45</sup>

En términos generales, todas las pruebas intentan simular diversos modos de abrasión, el reto es definir cuál de ellas representa la acción abrasiva a la que se verá sujeto el elemento de concreto bajo estudio.

## 2.6 Investigaciones recientes sobre la abrasión en el concreto

El tema de la abrasión en el concreto ha sido estudiado en años recientes, convirtiéndolo en un tema de relevancia actual. En otros países del mundo se han realizado estudios con diversos agregados, variando el tipo o tiempo de curado y empleando aditivos que mejoren las propiedades del concreto.

A continuación se presentan algunos aspectos relevantes sobre investigaciones recientes en esta área:

Sebok y Stranel (2004) utilizaron en su experimento resinas y polímeros endurecedores para mejorar la superficie del concreto. Encontraron que en todos los casos se obtuvo mejora en la resistencia al desgaste al emplear estos aditivos. Con resistencias a la compresión menores a 102 kg/cm<sup>2</sup> (10 MPa) reportaron malos resultados al desgaste y adecuadas resistencias al desgaste en sus probetas a partir del rango de 204 a 306 kg/cm<sup>2</sup> (20-30 MPa)<sup>46</sup>.

---

<sup>45</sup> Adam Neville, *Tecnología Del Concreto*, Cuarta ed (IMCYC, 1999).

<sup>46</sup> Sebök and Stráněl, "Wear Resistance of Polymer-Impregnated Mortars and Concrete."

Yazici e Inan (2005) reportaron una ecuación para predecir el desgaste del concreto empleando únicamente los valores de la resistencia a la compresión a los 28 días y la resistencia a la tensión indirecta (prueba brasileña)<sup>47</sup>.

La ecuación obtenida fue:

$$LOW = 29.38 - 0.31f'_c + 0.39f_{st}$$

Donde:

LOW: Pérdida de masa de concreto

f'c: resistencia a la compresión a los 28 días

f<sub>st</sub>: resistencia a la tensión 28 días

Horszczaruk (2005) efectuó pruebas de abrasión en concreto utilizando las normas del ASTM C 1138, que se utiliza para elementos sumergidos, con el fin de simular las condiciones de uso de estructuras hidráulicas. Evaluó concretos de muy alta resistencia (entre 80MPa y 120 MPa) similares a los usados en presas o canales. Concluyó que es un método efectivo para estos casos y más pertinente que las pruebas con discos.<sup>48</sup>

Ghafoori y Diawara (2007) emplearon distintos tiempos de curado. Utilizaron microsílca como sustitución parcial del agregado, la cual independientemente del tipo de curado, mejoró la resistencia al desgaste en un 10% promedio.<sup>49</sup>

Estos autores también reportaron una ecuación, pero empleando los parámetros de resistencia a la compresión (CS), contenido de microsílca (SF) y edad de curado (CA).

La ecuación tiene la forma:

$$DOW = \exp(-0.369CS + 0.00116SF - 0.00165CA + 2.25)$$

---

<sup>47</sup> Yazici and Inan, "An Investigation on the Wear Resistance of High Strength Concretes."

<sup>48</sup> Zbieta Horszczaruk, "Abrasion Resistance of High-Strength Concrete in Hydraulic Structures."

<sup>49</sup> Ghafoori and Diawara, "Strength and Wear Resistance of Sand-Replaced Silica Fume Concrete."

Donde: DOW es la pérdida de concreto por desgaste.

Vassou *et al.* (2008) emplearon micro fibras de polipropileno, muy usadas en el refuerzo de losas o pisos de concreto, y encontraron mejores resultados en todos los casos donde comparó las probetas con fibra con las fabricadas con concreto simple. Se le atribuyó a una mejora en la superficie del concreto al emplear las fibras poliméricas.<sup>50</sup> Grdic *et al.* (2012) usaron también las fibras de polipropileno, reportando los siguientes resultado: un aumento de hasta un 13.5% de resistencia al desgaste al agregar fibras de polipropileno, un aumento de entre un 9.5-13.4% en la prueba de módulo de ruptura y ningún cambio significativo en la resistencia a la compresión en las probetas ensayadas.<sup>51</sup>

Li *et al.* (2011) emplearon arena triturada, obtenida mediante un método similar al utilizado en la Península de Yucatán para fabricar agregado fino pero con distintas propiedades índice. Para ese tipo particular de agregado fino encontró que los microfinos no representan un problema mayor para la resistencia a la abrasión hasta un contenido límite del 26%; en nuestro medio se han reportado contenidos de finos del 7%-10%<sup>52</sup>.

Gencil *et al.* (2012) incorporaron hematita [Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] como material para agregado grueso y fino en su estudio de abrasión. Reportaron un claro aumento en la resistencia al desgaste en todos los casos donde incorporaron el mineral. Propusieron ecuaciones que relacionaron la resistencia a la compresión vs el desgaste, y la resistencia a la flexión vs el desgaste. Obtuvieron coeficientes de determinación ( $r^2$ ) de 0.992 y 0.997, respectivamente.

Kumar y Sharma (2014) hicieron su estudio empleando agregados de baja calidad o denominados “marginales”. Emplearon la prueba de Los Ángeles y encontraron que el problema de desgaste en el concreto está altamente relacionado con la resistencia de

---

<sup>50</sup>Vassou, Short, and Kettle, “Microstructural Investigations into the Abrasion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete Floors.”

<sup>51</sup> Zoran J Grdic et al., “Abrasion Resistance of Concrete Micro-Reinforced with Polypropylene Fibers,” *Construction and Building Materials* 27 (2012): 305–12.

<sup>52</sup> Li, Ke, and Zhou, “Influence of Manufactured Sand Characteristics on Strength and Abrasion Resistance of Pavement Cement Concrete.”

los agregados. Un agregado grueso con un alto valor de Los Ángeles produce un concreto con pobre resistencia a la abrasión. Sin embargo, no pudieron afirmar que exista una aceptable correlación entre los resultados de la prueba de Los Ángeles y el desgaste obtenido en el concreto.<sup>53</sup>

Gencil *et al.* (2014) utilizaron técnicas de lógica difusa y redes neuronales para manipular las variables que afectan la resistencia a la abrasión del concreto y encontrar los valores óptimos de cada una de las variables para obtener una mejor resistencia. Obtuvieron valores muy altos de correlación ( $r > 90\%$ ) por lo que pudieron afirmar que estas técnicas de gran actualidad sí son útiles para predecir esta característica del concreto.<sup>54</sup>

## 2.7 Conclusiones de la revisión bibliográfica

La resistencia al desgaste del concreto es un problema que se ha estudiado principalmente para evitar reparaciones, agrietamientos o pérdidas de estructuras construidas tales como calles, pisos o estructuras hidráulicas.

Factores como la resistencia a la compresión a los 28 días ( $f'c$ ) o incluso el módulo de ruptura (MR), que representa la resistencia a la flexión, son los factores que se toman en cuenta, con mayor frecuencia, al momento de diseñar el elemento aun y existan otros aspectos que mejoren la resistencia al desgaste. En la revisión literaria se presentó que el tipo de agregado, el tiempo de curado y el acabado del elemento son factores fundamentales menos tomados en cuenta en el diseño del piso de concreto.

En investigaciones recientes se ha hecho uso de ceniza volante o microsílca para mejorar las condiciones de desgaste del concreto. Como se mencionó con anterioridad, los mejores resultados se han obtenido sustituyendo con microsílca una parte del agregado fino.

---

<sup>53</sup> Ramesh Kumar and Sharma, "Abrasion Resistance of Concrete Containing Marginal Aggregates."

<sup>54</sup> Osman Gencil et al., "The Relations between Mechanical Strengths and Abrasive Wear of Concrete Incorporating the Hematite Aggregate," *International Journal of Pavement Engineering* 13, no. 3 (2012): 235–43.

El tiempo de curado es otro factor que la literatura clásica de tecnología del concreto y manuales de diseño de losas de concreto señala como primordial para aumentar la resistencia al desgaste del elemento. El curado para losas de concreto es bastante versátil y puede efectuarse con cualquiera de las técnicas conocidas como: aspersión, membranas o cubiertas.

En general todas las pruebas de laboratorio para medir el desgaste del concreto se efectúan mediante el rozamiento o frotación de dispositivos circulares o arenas especiales para medir la profundidad de desgaste o penetración. Es importante mencionar que estas pruebas son todas aceleradas, ya que el desgaste en condiciones normales puede ocurrir en meses o en años antes de que sea considerado crítico.

## 3. Metodología

En esta sección se presentan las pruebas seguidas para medir la resistencia a la abrasión y otras variables asociadas con el fenómeno. Se mencionarán las normas aplicables que se utilizaron en las pruebas a los agregados, el concreto fresco y el concreto endurecido.

### 3.1 Diseño del experimento

Las variables que se midieron fueron, en el concreto endurecido: resistencia media a la compresión, resistencia a la tensión por compresión, resistencia a la abrasión e índice de dureza. En el concreto fresco: revenimiento y peso volumétrico.

Los factores que se manipularon durante el experimento fueron: la relación agua/cemento, la sustitución parcial del 20% de agregado fino por arena de sílica y la forma de curado; todo esto con el fin de estudiar el efecto de cada uno de ellos en la resistencia a la abrasión.

El tipo de cemento y el agregado grueso se mantuvieron constantes durante toda la investigación.

#### 3.1.1 Relaciones agua/ cemento empleadas

Las relaciones agua/cemento empleadas se encontraron en el rango de 0.40 a 0.70 (para valores esperados de resistencia a la compresión en el rango de 370 a 180 kg/cm<sup>2</sup>) que es consistente con otros estudios realizados anteriormente en la Facultad de Ingeniería de la UADY, para caracterizar el concreto de la región; lo cual permitió comparar los resultados obtenidos con los publicados previamente.

#### 3.1.2 Sustitución del agregado fino

En el experimento, en lo general, se usaron agregados calizos de alta absorción de la región. La muestra fue seleccionada de acuerdo a estudios previos recientes en el área de concreto efectuados en la Facultad de Ingeniería de la UADY. Se buscó que

los agregados presentaran buenas propiedades índice como absorción, densidad relativa, contenido de humedad y adecuada granulometría.

Basandose en estudios de abrasión publicados, en esta investigación se realizó, en algunas mezclas, una sustitución parcial de la cantidad de agregado calizo por arena de sílica, buscando mejorar la resistencia a la abrasión. Los estudio previos mencionan haber empleado un rango de sustitución de 10% a 50% sin perder trabajabilidad.<sup>55</sup> Debido a lo anterior y al elevado costo de la arena de sílica, se decidió hacer en esta investigación una sustitución del 20% del agregado fino calizo.

### 3.1.3 Tratamientos de curado empleados

Las losas de concreto recibieron dos tipos distintos de curados: curado natural al ambiente (dentro del laboratorio) hasta el día de la prueba a los 28 días; y curado por inmersión por 14 días, permaneciendo las probetas los restantes 14 días, hasta el día de la prueba, en curado natural al ambiente. Este último tratamiento fue obtenido de la norma ENV 206, mencionada en el libro de Tecnología del concreto de Neville, que indica que para condiciones intensas de abrasión se recomienda un periodo de curado con el doble de duración del normal.<sup>56</sup>

Los cilindros para las pruebas de resistencia a compresión y tensión por compresión fueron curados por inmersión de acuerdo a indicaciones de las normas mencionadas en la metodología.

---

<sup>55</sup> Jyotsana Lalit Chaudhary, Alvin Harison, and Vikas Srivastava, "Use of Silica Sand As Cement Replacement in Ppc Concrete," no. January (2015): 2319–22.

<sup>56</sup> Neville, *Tecnología Del Concreto*.

### 3.1.4 Tamaño de la muestra

La Tabla 4 presenta la cantidad de probetas elaboradas en cada colado así como las combinaciones de curado, tipo de agregado y relación A/C empleadas.

Tabla 4.- Cantidad de probetas de concreto elaboradas.

	Relaciones agua/cemento							
	0.40		0.50		0.60		0.70	
Tipo de Agregado	C	S-20	C	S-20	C	S-20	C	S-20
Losas curado natural	3	3	3	3	3	3	3	3
Losas curado 14 días inmersión	3	3	3	3	3	3	3	3
Cilindros a Compresión	3	3	3	3	3	3	3	3
Cilindros a Tensión	3	3	3	3	3	3	3	3

C: arena caliza

S-20: sustitución de 20% arena de sílica

De la Tabla 4 se puede observar que se realizaron 8 colados (cantidad de columnas), para analizar las combinaciones resultantes de los factores tipo de curado, tipo de agregado y relaciones A/C. Para disminuir los errores en los resultados, todo el experimento se realizó con una repetición completa. De acuerdo a lo anterior se elaboraron 96 cilindros estándar y 96 losas de concreto.

## 3.2 Pasos de la investigación

El procedimiento experimental se inició con la adquisición de los agregados pétreos y su posterior caracterización. Después se procedió al diseño de las mezclas con base en los resultados obtenidos en la caracterización de los agregados. Se efectuaron pruebas al concreto fresco de revenimiento y peso volumétrico fresco. Las probetas elaboradas fueron probadas a la compresión, tensión por compresión y abrasión.

### 3.2.1 Adquisición de agregados

Los agregados grueso y fino calizos se adquirieron a una trituradora local. Se consideró usar una muestra de agregados de buena calidad, con el fin conseguir una buena aproximación al máximo potencial de resistencia a la abrasión del concreto elaborado con agregados calizos de alta absorción.

### 3.2.2 Caracterización de los agregados

La caracterización de agregados consistió de las siguientes pruebas: un cuarteo, las granulometrías, la obtención del módulo de finura del agregado fino, la obtención de los pesos volumétricos, el porcentaje de absorción, los pesos específicos relativos en estado saturado y por último, el desgaste del agregado grueso; todas de acuerdo a las normas del ASTM C respectivas.

#### 3.2.2.1 Cuarteo de agregados

Se realizó como indica de la norma ASTM C 702. Se requiere homogeneizar la muestra completa, tanto de agregado grueso como de agregado fino y realizar cuarteos sucesivos para reducir la muestra usando un separador mecánico. (Figura 1).



Figura 1.- Cuarteo de los agregados pétreos.

#### 3.2.2.2 Granulometría

Tanto la granulometría del agregado grueso como del agregado fino se realizaron como lo marca la norma ASTM C 136. Esta prueba consiste en pasar el material por distintas mallas o cribas ordenadas de mayor a menor abertura para separarlo de acuerdo a su tamaño (Figura 2); permite conocer la distribución de los tamaños de los

agregados y el tamaño máximo del agregado grueso. La granulometría del agregado grueso se efectuó con una muestra de 10 kg y la del agregado fino, por triplicado, con una muestra de 500 g. (Figura 3).



Figura 2.- Prueba de Granulometrías.



Figura 3.-Distintos tamaños de partículas de agregado fino.

### 3.2.2.3 Módulo de finura

Se obtuvo el módulo de finura de acuerdo a la norma ASTM C 136. Se efectuó la prueba por triplicado, ya que este valor es importante en el diseño de la mezcla de concreto. Representa la finura del agregado fino y sus valores límite, inferior y superior respectivamente, son 2.3 y 3.1.

### 3.2.2.4 Pesos volumétricos

Para el agregado grueso se obtuvo el Peso volumétrico seco suelto (PVSS) y el Peso volumétrico seco compacto (PVSC) de acuerdo a la norma ASTM C 29. Fue necesario secar el material en el horno a 100° C por 24 horas y posteriormente realizar la prueba por duplicado, como se indica en la ASTM C 29. (Figura 4)

Para el agregado fino se procedió de manera similar aunque solo se obtuvo el valor del Peso volumétrico seco suelto (PVSS). De igual manera, se secó la muestra en el horno y se efectuó la prueba por duplicado, como indica la norma ASTM C 29.



Figura 4.- Prueba de pesos volumétricos.

### 3.2.2.5 Densidad y absorción

Para el agregado grueso se obtuvo el porcentaje de absorción y la densidad relativa. Se dejó saturar una muestra por 24 horas para obtener los valores antes mencionados. Se usó una muestra de 3 kg y se hizo por duplicado de acuerdo a la norma ASTM C 127.

Para el agregado fino, de manera similar, se saturó una muestra de 500 g para la absorción y de 300 g para la densidad durante 24 horas. Posteriormente, se realizaron las mediciones por duplicado de acuerdo a la ASTM C 128.

### 3.2.2.6 Desgaste

Se realizó al agregado grueso de acuerdo a la norma ASTM C 131 mediante una prueba conocida como de Los Ángeles. Consiste en un tambor giratorio en el que se introduce el agregado y 11 esferas de acero para el caso de agregados para concreto. Mediante el giro del tambor se producen distintos efectos sobre el agregado como desgaste e impacto. Se midió la reducción del peso del agregado grueso respecto a su peso inicial. (Figura 5).



Figura 5.- Prueba de Los Ángeles.

### 3.2.3 Diseño de mezclas de concreto

Con los datos obtenidos en la caracterización de los agregados, se realizó el diseño de mezclas de concreto por medio del método de volúmenes absolutos del Instituto Americano del Concreto (ACI) contenido en la norma ACI 211.

Como se mencionó anteriormente, las relaciones A/C empleadas fueron de 0.4, 0.5, 0.6, 0.7. Teóricamente se consideró un revenimiento de 10 cm. Se diseñaron dos diferentes mezclas, una con la sustitución directa del 20% de arena de sílica y la otra con el 100% de agregado fino calizo, para cada relación A/C empleada.

Se estimaron un total de 75 litros de concreto fresco por colado, incluyendo los desperdicios, para obtener las probetas necesarias (losas y cilindros) de cada combinación y efectuar las pruebas al concreto fresco.

### 3.2.4 Procedimiento de mezclado

Se efectuó de acuerdo al método indicado en norma ASTM C 192 para fabricación de cilindros de concreto para pruebas de laboratorio (Figura 6).



Figura 6.- Mezclado del concreto.

### 3.2.5 Pruebas al concreto fresco

Se efectuaron las pruebas del cono de revenimiento y de peso volumétrico fresco de acuerdo a las normas ASTM C 143 y ASTM C 138, respectivamente. (Figura 7).



Figura 7.-Pruebas de revenimiento y peso volumétrico al concreto Fresco.

### 3.2.6 Elaboración de especímenes

Los cilindros de concreto se elaboraron de acuerdo a la norma ASTM C 192. Se elaboraron 3 cilindros para la prueba de compresión y 3 cilindros para la prueba de tensión por compresión, que son la muestra estándar recomendada por el ASTM C 39. Los cilindros empleados fueron los cilindros estándar (de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura).

Se utilizaron cilindros (tensión por compresión) en vez de vigas (tensión por flexión) para obtener los valores del esfuerzo de tensión, con el fin de ser consistente con investigaciones anteriores que utilizaron estos valores para modelar ecuaciones que predijeran el valor de la abrasión del concreto. (Figura 8)

Las losas de concreto, de 20 x 20 x 7.5 cm, se elaboraron siguiendo un procedimiento similar al del ASTM C 192; el cual se modificó compactando el concreto solamente en dos capas, debido a la escasa altura del espécimen. Se les aplicó un acabado superficial pulido con llana de metal. (Figura 9, Figura 10)



Figura 8.- Elaboración de cilindros de concreto.



Figura 9.- Moldes para la elaboración de losas de concreto.



Figura 10.- Elaboración de losas de concreto.

### 3.2.7 Proceso de curado

Como se mencionó en el diseño del experimento, se emplearon dos tipos de curado en el experimento: curado natural en el ambiente del laboratorio y curado por inmersión en piletas.

El curado natural aplicado en el experimento fue dentro del laboratorio con las probetas resguardadas bajo techo. Esto fue con el fin de controlar, en la medida de lo posible, el efecto de lluvias y días soleados o húmedos.

Respecto al curado por inmersión en piletas, las losas fueron curadas 14 días. Los 14 días restantes antes de la prueba fueron empleados como periodo de acondicionamiento para que las probetas liberaran humedad fuera de la pileta, en condiciones similares a las curadas naturalmente.

Los cilindros para las pruebas de compresión y tensión por compresión fueron curados de acuerdo a las normas ASTM C 39 y ASTM C 496 respectivamente.

### 3.2.8 Pruebas de especímenes

Los especímenes fueron probados a los 28 días de edad en las siguientes pruebas efectuadas en el concreto endurecido: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión por compresión y resistencia a la abrasión. Para el caso particular del índice de dureza la edad de prueba fue de 90 días.

La prueba de resistencia a la compresión axial fue efectuada de acuerdo a la norma ASTM C 39. La prueba de resistencia a la tensión por compresión (prueba brasileña) fue realizada de acuerdo a la norma ASTM C 496 en el mismo tipo de cilindro que para la prueba de compresión axial.

La prueba de abrasión se realizó de acuerdo a la norma europea EN-142 utilizando una máquina de abrasión modelo 48-D0471. La prueba consiste en el desgaste de la losa de concreto mediante un disco y el flujo continuo de arena sobre la probeta (Figura 11).

La prueba se realizó siguiendo las instrucciones del fabricante de la máquina:

- Se pesa la probeta al inicio de la prueba.
- Se coloca el espécimen en la máquina 48-D0471, se reinicia el equipo y en la pantalla de control se coloca un 75 mediante el botón rojo, que es el número de revoluciones de la rueda de abrasión en un minuto.
- Se oprime el botón verde y se mantiene oprimido hasta que la máquina empiece a contar el número de vueltas de la rueda de abrasión.
- Al mismo momento en que el contador inicia, se abre el depósito contenedor de la arena abrasiva.
- Una vez concluido el número de revoluciones, se mide el ancho del área desgastada producto de la prueba. Para esto se trazan las dos líneas que delimitan longitudinalmente esta área, y posteriormente se trazan tres líneas transversales a esas (Figura 12). Posteriormente se miden las tres líneas transversales y se promedian, siendo este el valor que se reporta como el ancho desgastado.

- Se pesa la probeta después de efectuar las mediciones. La diferencia de pesos es el valor que se reporta como pérdida de peso.

Los resultados finales del ancho desgastado deben ser ajustados dependiendo de la calibración de la máquina. La calibración se realiza de la misma manera que la prueba de especímenes y usando en este caso una piedra de mármol. El valor obtenido de desgaste en la prueba de la piedra de mármol se comparan con el valor de desgaste de control ( 20 mm según la norma EN-1342). Si el valor obtenido en la prueba es mayor al de control, la cantidad que sobrepase el valor de control se le restará a los valores obtenidos en los especímenes.

En caso contrario, si el valor obtenido en la prueba es menor que el de control, la diferencia se sumará a los valores obtenidos en la prueba de desgaste en los especímenes.<sup>57</sup>



Figura 11.- Prueba de abrasión.

---

<sup>57</sup> Carlos Serrano, "Influencia Del Tiempo de Curado Por Inmersión En El Desempeño Del Concreto En Clima Calido, Sub-Humedo" (Universidad Autónoma de Yucatán, 2006).

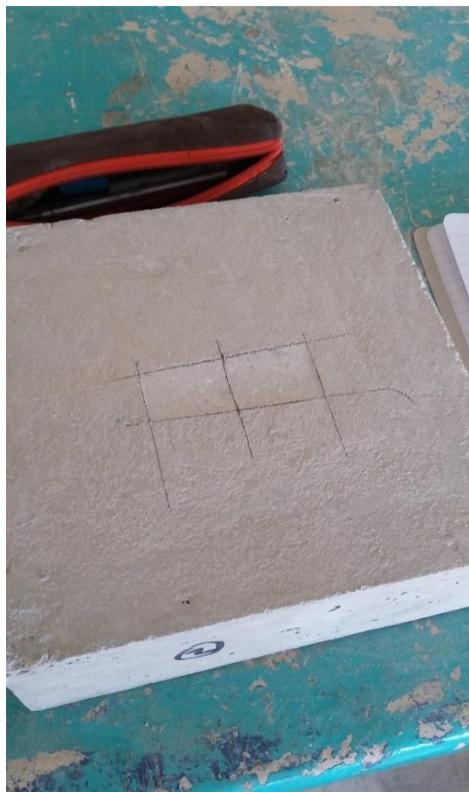


Figura 12.- Ejemplo de medición de ancho de área desgastada.

La prueba de índice de dureza superficial, conocida también como martillo de rebote, se efectuó de acuerdo a la norma ASTM C 805. Se empleó un martillo digital modelo D-1500 de la marca James Instruments (Figura 13).

La prueba se realizó en las losas de concreto empleadas en la prueba de abrasión y se realizaron 5 impactos en cada losa. Las losas fueron fijadas con ayuda de la prensa universal SATEC, de tal manera que el instrumento fuera aplicado en la misma área de la prueba de abrasión (Figura 14).

La prueba consiste en hacer rebotar una masa contra la superficie del concreto, haciendo uso de una cantidad constante de energía; dependiendo del rebote elástico de la masa se determina la dureza de la superficie. El valor que se obtiene es un índice

de dureza que expresa el cociente entre la distancia que recorre la masa y la extensión inicial del resorte que genera la energía.<sup>58</sup>



Figura 13.- Martillo de rebote empleado.

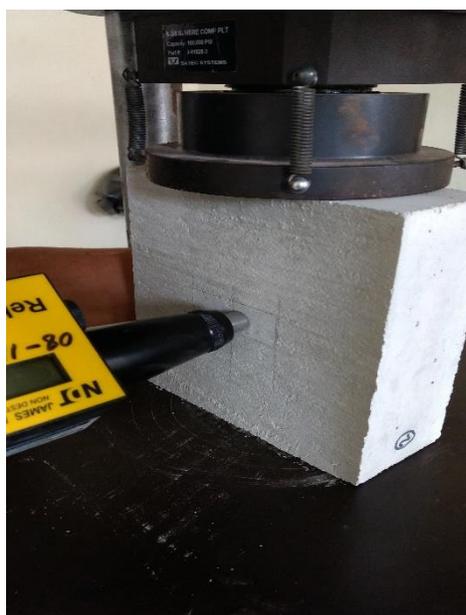


Figura 14.- Aplicación de martillo de rebote sobre losas de concreto.

### 3.2.9 Análisis estadístico de los resultados

Se obtuvo la estadística descriptiva de las variables medidas: resistencia a la compresión, a la tensión por compresión, a la abrasión e índice de dureza. También

---

<sup>58</sup> Romel G; Serrano Carlos Moreno, Eric I; Solís, "Influencia Del Tiempo de Curado Húmedo En La Resistencia Y Durabilidad Del Concreto En Clima Tropical," no. 2 (2013): 11.

se elaboraron gráficas de comparación de las variables, para cada factor presente en el estudio: curado, arenas y relación A/C.

El análisis estadístico de los resultados se realizó utilizando el software SPSS 23. Con el cual se efectuaron pruebas de significancia estadística, una prueba “Post hoc” o “a posteriori” de Scheffe con la cual se evaluó el efecto de la relación A/C y se obtuvieron gráficos de error que fueron empleados para complementar gráficamente la significancia estadística y evaluar la diferencia entre los factores empleados en el estudio.

Para evaluar la diferencia entre las medias de los resultados de resistencia a la abrasión, tanto del área desgastada como de la pérdida de peso, se empleó el análisis de varianza de una vía (ANOVA) con un nivel de significancia menor o igual a 5%. ANOVA es un método que permite de manera global, analizar si existe diferencia o no entre los valores medios de dos grupos cuando se hacen comparaciones. Si la significancia es menor que el valor de 5% establecido, los datos tienen medias diferentes, si es mayor a 5% los valores son no diferentes (sin poder asumir que son iguales).

El método post hoc de Scheffe permite identificar, en el caso de comparaciones múltiples, entre que grupos de medias se encuentran diferencias significativas y en entre cuáles no. Presenta todas las combinaciones de parejas de medias con sus respectivos valores de significancia.

Por último mediante el empleo de la correlación líneal se obtuvieron modelos que relacionaran las variables medidas en el estudio: resistencia a la compresión, tensión e índice de dureza con las variables que se pretendían estimar: ancho del área desgastada y pérdida de peso. Se empleó un método de regresión lineal “hacia atrás” que permitió evaluar cual de todas las combinaciones posibles presentaban mayores coeficientes de correlación.

## 4. Resultados

En el presente capítulo se presentan de forma sintética los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización de agregados, los diseños de mezclas y en las pruebas de resistencia a la compresión, a la tensión por compresión, a la abrasión y de índice de dureza, efectuadas al concreto endurecido.

### 4.1 Caracterización de los agregados

Para el agregado grueso se obtuvo la curva granulométrica que se presenta en la Figura 15, con ella se determinó el tamaño máximo del agregado, que resultó de  $\frac{3}{4}$ " de acuerdo a los criterios de la norma ASTM C 33. En la misma figura se han graficado los límites mencionados en la norma.

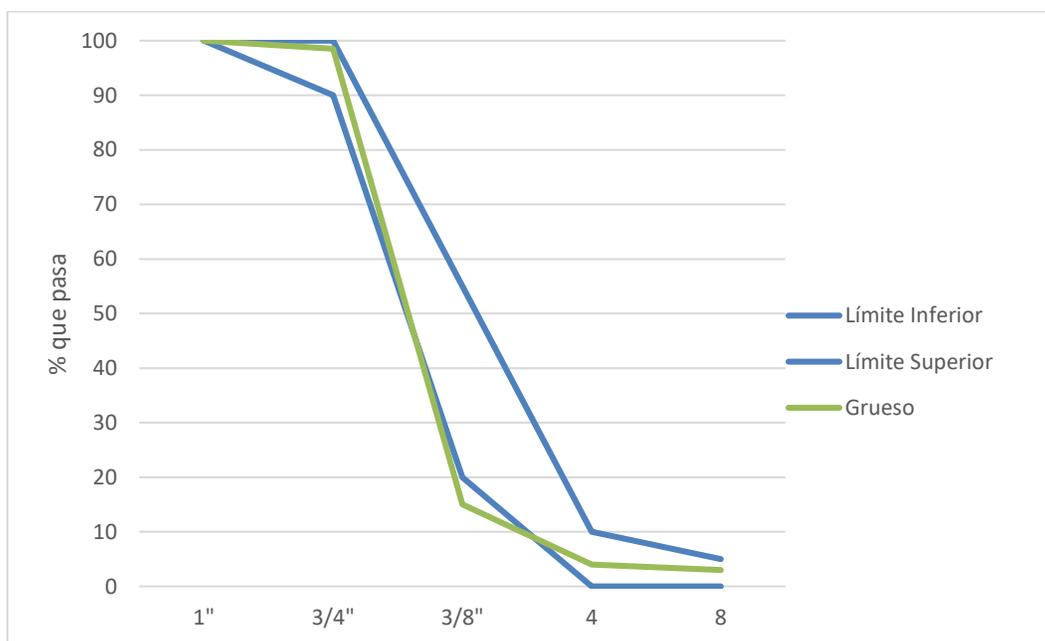


Figura 15.-Curva granulométrica del agregado grueso.

Se aprecia en esta la curva granulométrica que el porcentaje que pasa el tamiz de 3/8" está por fuera del límite que indica la norma ASTM C 33. Los demás porcentajes sí cumplen con los límites inferiores y superiores.

En cuanto al agregado fino calizo, se presenta en la Figura 16 su curva granulométrica graficada con los límites que indica la norma ASTM C 33.

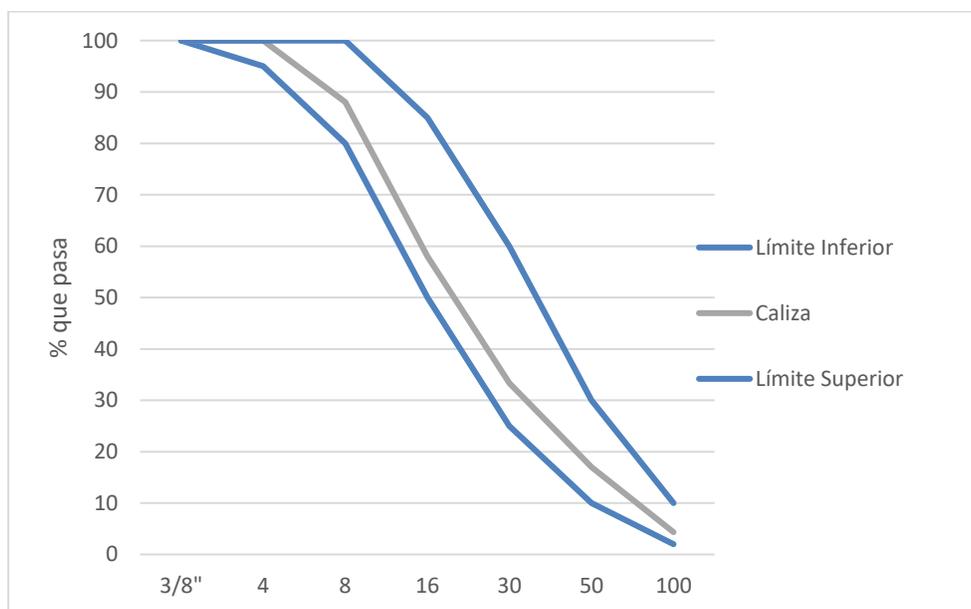


Figura 16.-Curva granulométrica del agregado fino calizo.

Se observa en esta curva que todos los porcentajes cumplen con los límites que establece la norma para el agregado fino.

En cuanto al agregado fino de sílica, en la Figura 17 se presenta su curva granulométrica y sus límites de acuerdo a la citada norma.

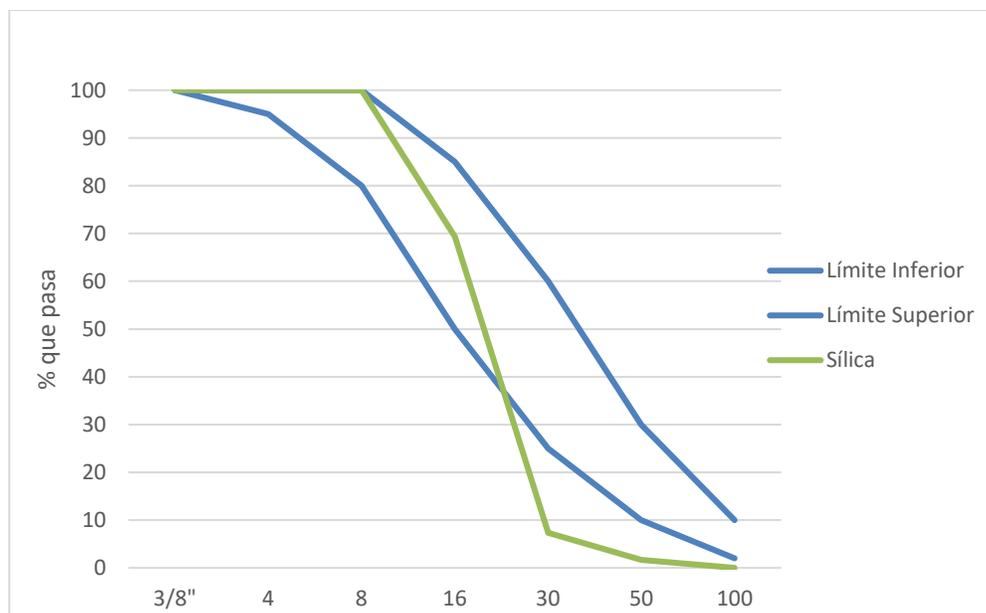


Figura 17.-Curva granulométrica del agregado fino de sílica.

En esta curva se aprecia que solamente tres porcentajes cumplieron con los límites que indica la norma ASTM C 33; los otros tres se encuentran fuera de los límites establecidos. Esta arena no se comercializa como agregado para concreto y por tanto es de esperarse que no presente las propiedades idóneas para este fin; sin embargo su dureza y bajo porcentaje de absorción permite utilizarla para los fines de este trabajo.

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización de los agregados, los cuales sirvieron para los diseños de mezclas respectivas.

Tabla 5.- Características físicas de los agregados empleados.

Propiedad	Caliza		Sílica
	Agregado Grueso	Agregado Fino	Agregado Fino
Peso Vol. Seco Suelto PVSS (kg/m <sup>3</sup> )	1059,84	1190,7	1638,48
Peso Vol. Seco Compacto PVSC (kg/m <sup>3</sup> )	1201,85	-	-
Densidad relativa (Gravedad específica)	2,28	2,40	2,65
Absorción %	7,76	4,28	0,60
Desgaste de Los Ángeles %	25,99		
Módulo de Finura	-	2,89	3,22

En la Tabla 5 se aprecia que el porcentaje de absorción del agregado fino de sílica es aproximadamente siete veces menor que el del agregado fino calizo. Así mismo el módulo de finura es mayor en el agregado de sílica, lo cual indica una arena más gruesa y con una graduación menos uniforme que la arena caliza.

## 4.2 Diseño de mezclas

Con los datos obtenidos en la caracterización de los agregados, presentados en la Tabla 5, se procedió a efectuar el diseño de mezclas de acuerdo al procedimiento indicado en el ACI 211. Se calcularon mezclas para cuatro relaciones A/C (0.40, 0.50, 0.60, 0.70); los resultados, sin ajuste de humedad, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.- Cantidades para elaborar un m<sup>3</sup> de concreto (sin ajuste de humedad).

<b>Componente</b>	<b>Relación Agua/Cemento</b>			
	0,40	0,50	0,60	0,70
Agua (kg)	240,00	220,00	220,00	220,00
Cemento (kg)	600,00	440,00	366,67	314,29
Grava (kg)	733,13	733,13	733,13	733,13
Arena (kg)	547,14	717,05	772,92	812,83

Antes de efectuar cada colado, se efectuó la corrección por humedad de los agregados, de acuerdo al procedimiento del ACI 211.

Para los colados donde se empleó arena de sílica, un 20% de la cantidad de arena caliza fue sustituida directamente por arena de sílica, sin modificar los pesos de los otros materiales.

## 4.3 Resultados en el concreto fresco

En la Tabla 7 se presentan los resultados de las pruebas de revenimiento y peso volumétrico del concreto fresco.

Tabla 7.- Revenimiento y peso volumétrico del concreto fresco.

<b>Relación A/C</b>	<b>Agregado fino</b>	<b>Revenimiento (cm)</b>	<b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0,50	Caliza	3	2148
0,60	Caliza	5	2117
0,60	Caliza	5	2127
0,50	Caliza	3	2094
0,70	Caliza	18	2086
0,70	Caliza	6	2091
0,40	Caliza	6	2099
0,40	Caliza	4	2104
0,50	Sílica 20	3	2154
0,50	Sílica 20	6	2134
0,60	Sílica 20	8	2142
0,60	Sílica 20	4	2142
0,40	Sílica 20	8	2135
0,40	Sílica 20	8	2148
0,70	Sílica 20	8	2128
0,70	Sílica 20	12	2131

Con relación a su peso volumétrico todos los concretos se clasifican como Tipo 2, de acuerdo a las NTC-DF; esto es, tuvieron valores entre 1.90 y 2.20 tn/m<sup>3</sup> (1,900 a 2,200 kg/m<sup>3</sup>).

Como se aprecia en la Tabla 7 se presentó gran variabilidad en el revenimiento; sin embargo este fue suficiente para los fines de trabajabilidad requeridos, especialmente para las losas (en las que se midió el desgaste), en donde el acomodo y compactación no requiere de muchos esfuerzos. De acuerdo a los resultados que se presentan, no hay indicios que esta variabilidad de resultados de revenimiento haya afectado los resultados de resistencia obtenidos.

#### 4.4 Resultados en el concreto endurecido

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión por compresión, índice de dureza superficial y resistencia a la abrasión.

#### 4.4.1 Resistencia a la compresión

En la Tabla 8 se presentan los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días, tanto de los cilindros elaborados con agregado calizo en su totalidad, como aquellos donde se sustituyó el 20 % por arena de sílica. Las pruebas se hicieron de acuerdo al ASTM C 39; las probetas se cabecearon con almohadillas de neopreno. Para cada relación A/C, se realizaron dos series o repeticiones de los colados, con una muestra de 3 cilindros en cada serie. En la Figura 18 se presentan graficados los promedios de la resistencia a la compresión. Los resultados completos se presentan en el Anexo A.

Tabla 8.- Resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) para cada serie y promedio.

<b>Agregado Fino</b>	<b>Relación A/C</b>	<b>Resistencia por serie (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia promedio (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Caliza	0,40	345	335
		324	
	0,50	294	305
		315	
	0,60	275	269
		263	
	0,70	172	178
		184	
Sílica 20	0,40	316	319
		321	
	0,50	321	293
		264	
	0,60	243	245
		247	
	0,70	164	163
		161	

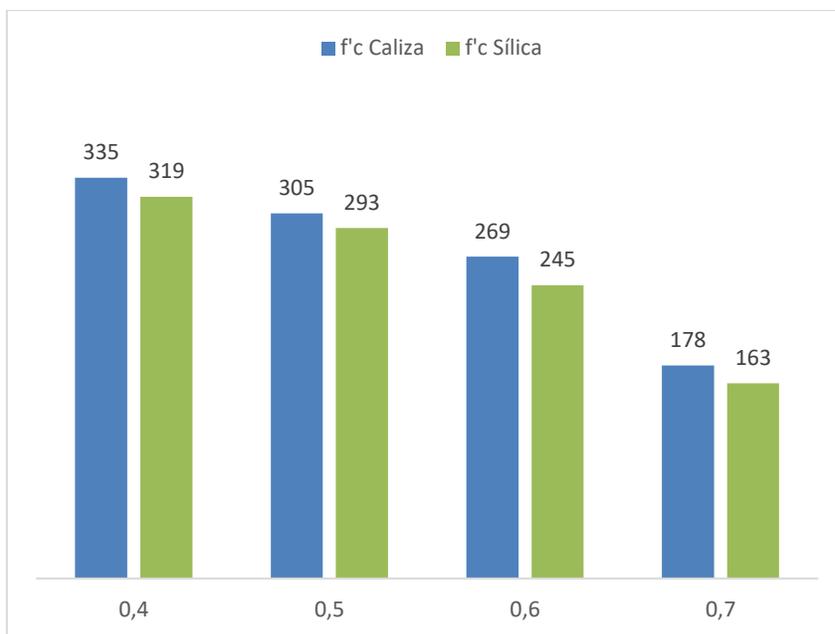


Figura 18.- Promedio de la resistencia a la compresión a los 28 días por cada A/C.

#### 4.4.2 Resistencia a la tensión por compresión

En la Tabla 9 y la Figura 19 se presentan los resultados del ensayo brasileño de tensión indirecta (por compresión) obtenidos para los dos tipos de agregado fino; se probaron 3 cilindros por cada serie. La resistencia a la tensión por compresión ( $f_{ct}$ ) resultó estar entre un 9 y un 11% de la resistencia a la compresión. Los resultados completos se presentan en el anexo B.

Tabla 9.- Resistencia a la tensión por compresión en kg/cm<sup>2</sup> para cada serie y promedio.

Agregado Fino	Relación A/C	f <sub>ct</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>ct</sub> promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
Caliza	0,40	33	33
		33	
	0,50	33	33
		32	
	0,60	32	30
		28	
	0,70	23	21
		20	
Sílica 20	0,40	33	33
		28	
	0,50	31	28
		25	
	0,60	24	26
		28	
	0,70	19	20
		20	

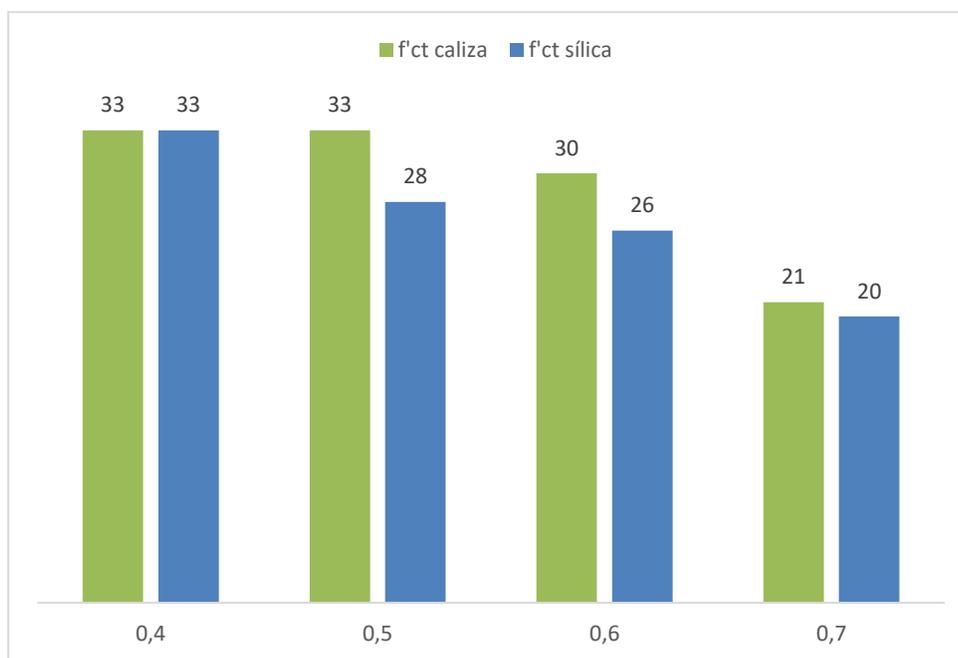


Figura 19.- Promedios de la resistencia a la tensión por compresión (f<sub>ct</sub>) para cada A/C.

#### 4.4.3 Resistencia a la abrasión

Se presentan los resultados de la prueba de abrasión efectuada en losas de concreto de 20 x 20 cm; se probaron 3 losas por cada serie. Se obtuvieron mediciones del ancho del área desgastada –en milímetros– y de la pérdida de masa –en gramos.

Es importante señalar que los valores de desgaste reportados en los gráficos y tablas siguientes ya presentan la corrección explicada en la metodología de la prueba de abrasión.

La Tabla 10 presenta los valores obtenidos en la prueba de abrasión. Se presenta la información dividida por cada uno de los agregados empleados y ordenados de acuerdo a la relación A/C usada; así como la división entre el curado húmedo de 14 días y el curado natural al ambiente. En las Figura 20 a Figura 23 se presentan los gráficos con los valores promedio y comparaciones entre tratamientos de curado, arenas usadas y relaciones A/C.

Tabla 10.- Resultados de abrasión.

Relación A/C	Agregado	Curado	Desgaste (mm)	Pérdida(g)
0,40	Caliza	Natural	25,83	4,08
		C-14	19,42	2,33
0,50		Natural	28,86	3,50
		C-14	23,63	3,17
0,60		Natural	29,37	4,91
		C-14	24,54	4,42
0,70		Natural	33,22	5,84
		C-14	31,20	5,25
0,40	Sílica 20	Natural	22,50	3,17
		C-14	17,03	2,34
0,50		Natural	23,45	3,34
		C-14	17,32	2,50
0,60		Natural	26,28	3,50
		C-14	19,28	2,83
0,70		Natural	21,37	3,42
		C-14	21,93	3,84

Con fines comparativos, para la variable ancho del área desgastada, medida en la prueba de abrasión, se generaron las siguientes cuatro gráficas:

Figura 20.- Curado Natural vs Curado de 14 días, con agregados calizos.

Figura 21.- Curado Natural vs Curado de 14 días, con agregado fino sílica 20.

Figura 22.- Agregados Calizos vs Agregado fino Sílica 20, con curado de 14 días.

Figura 23.- Agregados Calizos vs Agregado fina Sílica 20, con curado natural.

En la Figura 20 se observa que para todas las relaciones A/C, el efecto del curado húmedo mejoró la resistencia a la abrasión al tenerse un menor ancho del área desgastada. Además se observa que al aumentar la A/C el efecto del curado parece ser menor; esto puede atribuirse a que la cantidad de cemento disminuye y el concreto se compone de más fase agregado, la cual no se beneficia con el curado.

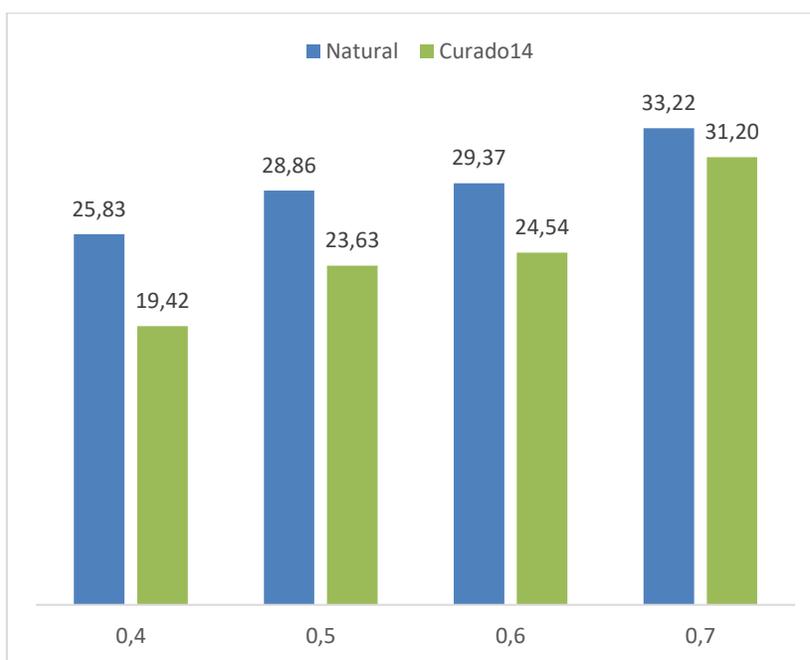


Figura 20.- Comparación del desgaste entre los tipos de curados, con agregados calizos.

En la Figura 21 se compara el efecto de los curados sobre las probetas elaboradas parcialmente con agregado fino de sílica. Se puede notar que, al igual que con el agregado calizo, el curado mejoró la resistencia a la abrasión en todas las relaciones A/C, con excepción de la A/C de 0.70.

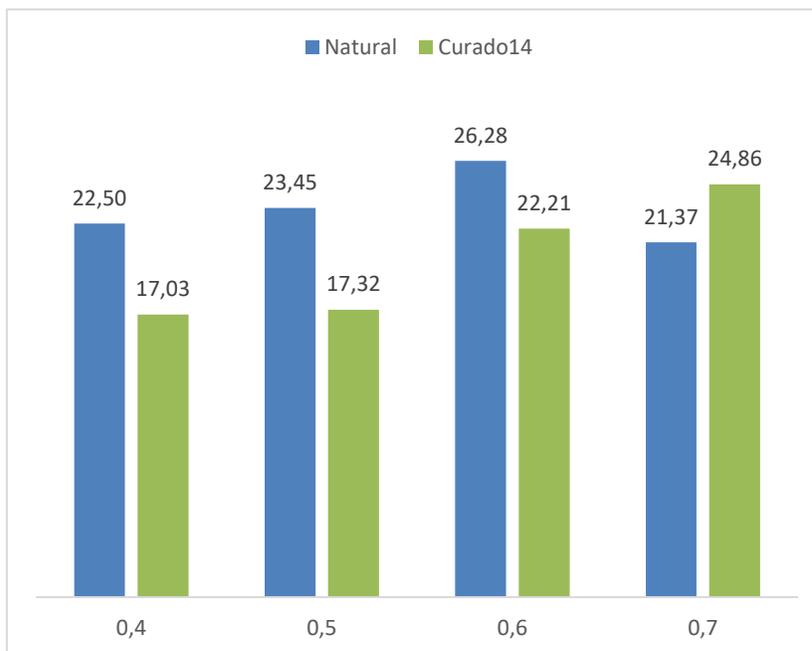


Figura 21.- Comparación del desgaste entre los tipos de curados, con agregado fino de sílica.

En la Figura 22 se aprecia el efecto de la arena de sílica sobre todas las relaciones A/C, haciéndose menor el desgaste en donde se empleó la sustitución directa del 20 % de agregado fino. En esta comparativa se puede notar que ambas series de agregados finos siguieron una tendencia ascendente en sus áreas desgastadas. En el caso de la sílica 20 es posible que se haya dado un efecto sinérgico entre la arena resistente y el cemento bien hidratado, lo cual produciría la condición ideal de concreto resistente a la abrasión.

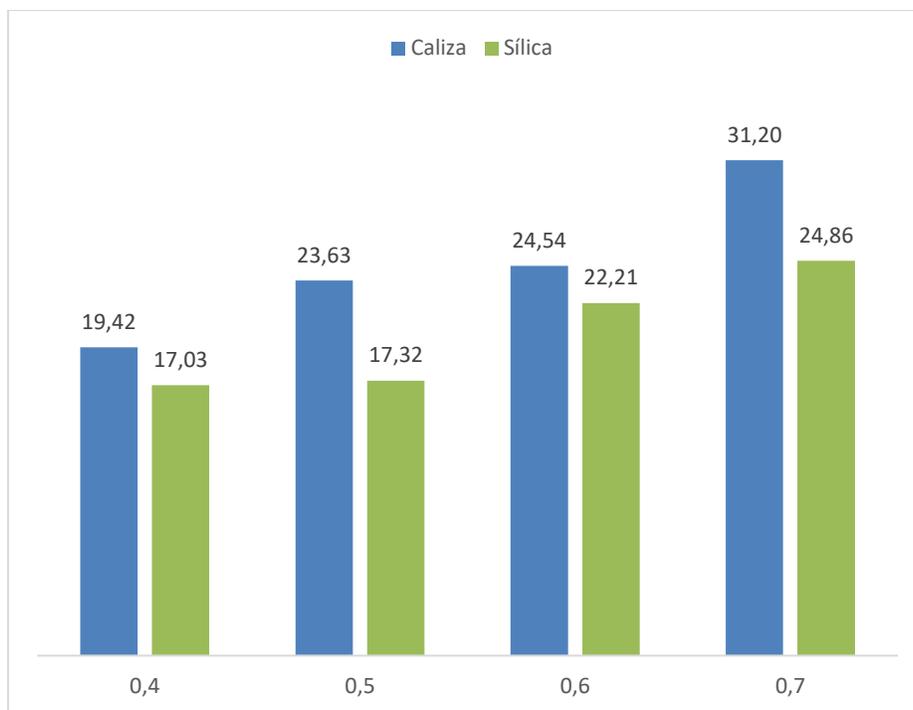


Figura 22.- Comparación del desgaste entre agregados finos para concretos curados 14 días.

En la Figura 23 se comparan probetas de ambos tipos de agregado fino con curado natural al medio ambiente. Se observa también en forma consistente el efecto positivo de la arena de sílica en el desgaste; se resalta que a pesar de que el concreto no tuvo curado húmedo, siempre es apreciable el efecto de la arena de sílica al presentar, en todos los casos, menor área desgastada.

Comparaciones similares se realizaron con la variable de pérdida de peso, obteniéndose resultados similares a los presentados anteriormente. Estos resultados, en conjunto con todos los demás resultados de esta prueba, se pueden consultar en el Anexo C.

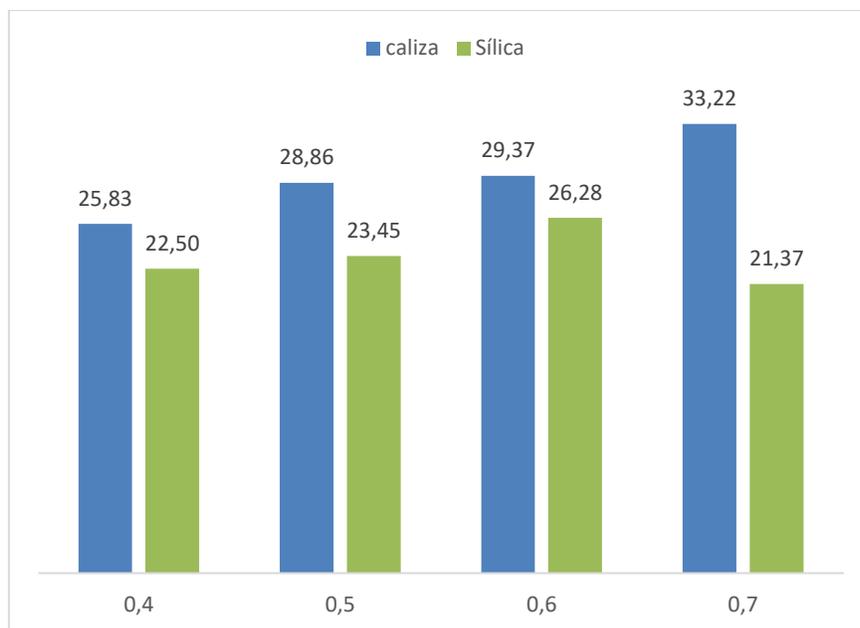


Figura 23.- Comparación del desgaste entre agregados, para concretos con curado natural.

Se presenta como ejemplo ilustrativo una imagen con cuatro losas, una por cada relación A/C para observar el incremento en el ancho del desgaste. Se observa que a menor relación A/C la abertura del desgaste es menor. (Figura 24)

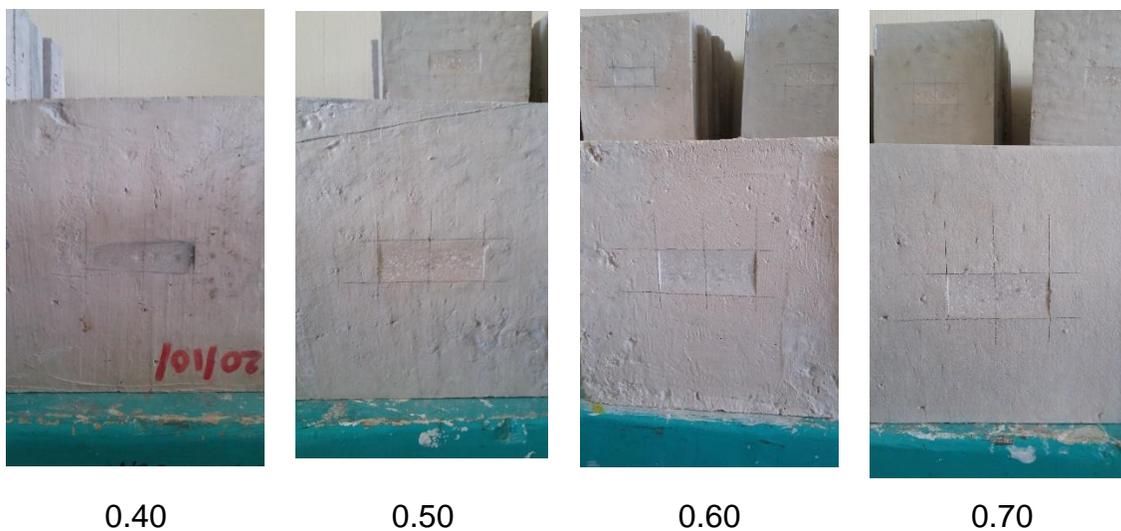


Figura 24. Distintos desgastes obtenidos en la prueba de abrasión para cada relación A/C.

#### 4.4.4 Índice de dureza

Los resultados obtenidos en la prueba de índice de dureza se presentan en la Tabla 11. Se puede observar que a menor relación A/C, el índice es mayor y que se obtuvieron valores similares entre tratamientos de curado y diferentes entre agregados finos empleados. Los resultados completos de esta prueba se encuentran en el Anexo D.

Tabla 11-. Resultados de la prueba de índice de dureza.

Agregado	A/C	Curado 14	Natural
Caliza	0,40	32	33
	0,50	30	31
	0,60	30	31
	0,70	24	25
Sílica 20	0,40	27	27
	0,50	27	27
	0,60	25	24
	0,70	20	21

Al relacionar los resultados obtenidos en la prueba de abrasión con los del índice de dureza (Figura 25, Figura 26) se observó que existe una relación inversamente proporcional entre las dos variables.

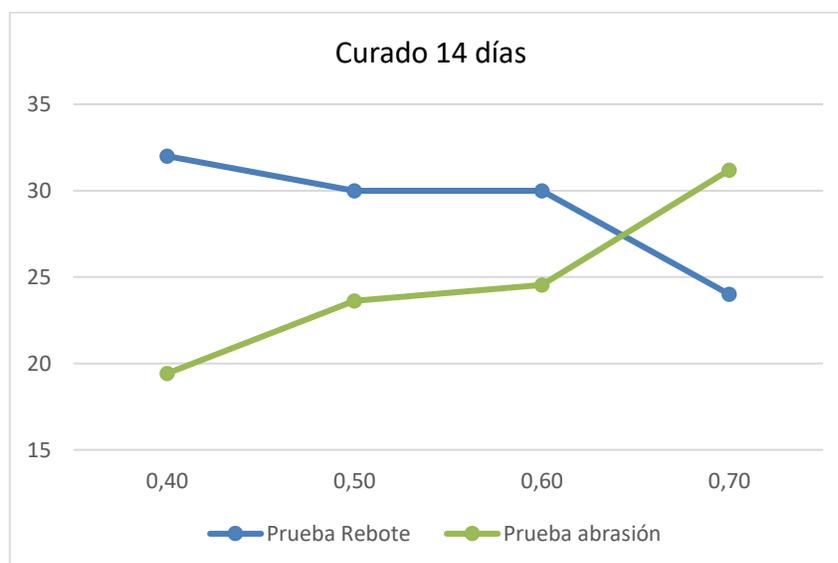


Figura 25.- Comparación de resultados entre las pruebas de abrasión e índice de dureza para curado a 14 días.

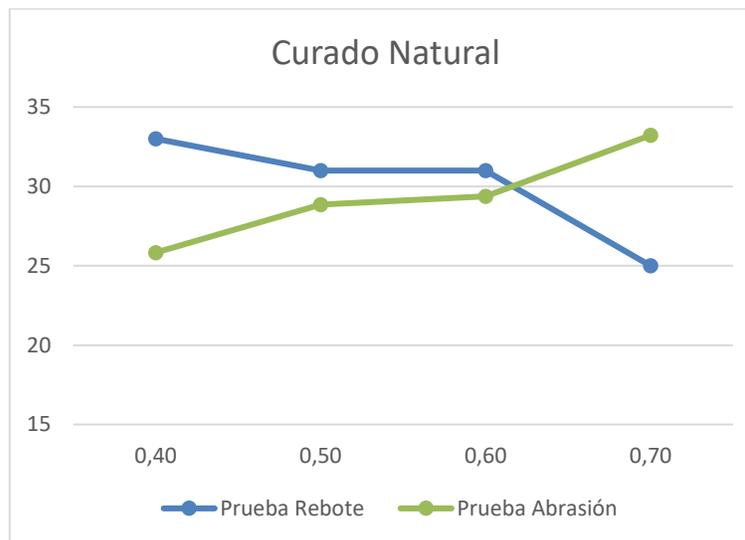


Figura 26.- Comparación de resultados entre las pruebas de abrasión e índice de dureza para curado natural.

Con los dos grupos de datos, de abrasión y dureza, se procedió a modelar una ecuación para predecir la resistencia a la abrasión. Los resultados se presentan en la sección 4.6.

#### 4.5 Análisis estadístico

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en las siguientes pruebas estadísticas: análisis de varianza (ANOVA) de una vía, cuando fue necesario prueba *post hoc* de Scheffe; y análisis de correlación entre las diferentes variables.

En la Tabla 12 se presentan los resultados del ANOVA del ancho del área desgastada y de pérdida de peso, para concretos con el tratamiento de curado de 14 días, utilizando como factor el cambio de arena. Para ambas variables se obtuvo una significancia menor a 0.05 por lo que se asume que la media del desgaste para la arena caliza (24.69 mm) es estadísticamente diferente a la media del desgaste para arena de sílica(16.47 mm).

Tabla 12.-ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio de arena, en concretos curados a 14 días.

		Suma de cuadrados	GL	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Desgaste</b>	Entre grupos	384,760	1	384,760	18,320	<0,001
	Dentro de grupos	903,085	43	21,002		
	Total	1287,844	44			
<b>Pérdida</b>	Entre grupos	9,289	1	9,289	5,262	0,027
	Dentro de grupos	75,911	43	1,765		
	Total	85,200	44			

En la Tabla 13 se presentan los resultados de área desgastada y de pérdida de peso, para el tratamiento de curado natural y utilizando como factor el cambio de arenas. Para ambos casos se obtuvo una significancia menor a 0.05 por lo que se asume que las medias, caliza 29.32 y sílica 22.99, son estadísticamente diferentes.

Tabla 13.- ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio de arena, en concretos con curado natural.

		Suma de cuadrados	GL	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Desgaste</b>	Entre grupos	418,864	1	418,864	34,578	<0,001
	Dentro de grupos	508,764	42	12,113		
	Total	927,627	43			
<b>Pérdida</b>	Entre grupos	25,906	1	25,906	10,639	0,002
	Dentro de grupos	102,275	42	2,435		
	Total	128,182	43			

En la Tabla 14 se presentan los resultados de ancho de área desgastada y de pérdida de peso, para arena caliza y utilizando como factor el cambio de curado. Se observa que para el área desgastada sí se obtuvo una significancia menor a 0.05 en las medias (24.70 mm Curado 14; 29.32 mm Natural). Para la pérdida el valor quedó

ligeramente por arriba del 0.05 por lo que se considera que las medias son marginalmente diferentes.

Tabla 14.- ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio el curado, en concretos con arena caliza.

		<b>Suma de cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
<b>Desgaste</b>	Entre grupos	234,646	1	234,646	11,220	0,002
	Dentro de grupos	941,055	45	20,912		
	Total	1175,701	46			
<b>Pérdida</b>	Entre grupos	13,646	1	13,646	3,986	0,052
	Dentro de grupos	154,067	45	3,424		
	Total	167,713	46			

De manera análoga, para el caso de la arena sílica, en la Tabla 15 se presenta el resultado obtenido. Para el área desgastada se obtuvo un valor menor al 0.05, con medias de 18.83 mm para curadas 14 días y 22.99 mm para curado natural. Para la pérdida de peso se obtuvo un valor de 0.06 con lo que las medias de los grupos se asumen como no diferentes.

En la Tabla 16 se presentan los resultados de ancho de área desgastada para arena caliza y utilizando como factor la relación A/C. Se observa que para el ancho del área desgastada se obtuvo una significancia menor a 0.05 por lo que se asume que existen medias significativas entre algunas relaciones A/C.

Para analizar cuales de estas medias presentan diferencias, se efectuó la prueba Post-Hoc, que se presenta en la Tabla 17. De acuerdo a los valores de significancia, solo se puede asumir que la media de la relación A/C de 0.70 es diferente a las medias de los otros tres grupos.

Tabla 15.- ANOVA del desgaste y la pérdida de peso, utilizando como factor el cambio el curado, en concretos con arena de sílica.

		<b>Suma de cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
<b>Desgaste</b>	Entre grupos	181,168	1	181,168	15,393	<0,001
	Dentro de grupos	470,793	40	11,770		
	Total	651,962	41			
<b>Pérdida</b>	Entre grupos	2,149	1	2,149	3,564	0,066
	Dentro de grupos	24,119	40	0,603		
	Total	26,268	41			

Tabla 16.- ANOVA del desgaste utilizando como factor el cambio en la relación A/C, en concretos con arena caliza, curados por 14 días.

		<b>Suma de cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
<b>Desgaste</b>	Entre grupos	427,636	3	142,545	15,388	<0,001
	Dentro de grupos	185,270	20	9,264		
	Total	612,906	23			

Tabla 17.- Prueba post hoc de Scheffe de comparación múltiple utilizando como factor el cambio en la relación A/C, en concretos con arena caliza, curados por 14 días.

(I) ac	(J) ac	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 5%	
					Límite inferior	Límite superior
0,40	0,50	-4,21167*	1,75722	0,160	-5,2459	-3,1774
	0,60	-5,12333*	1,75722	0,064	-6,1576	-4,0891
	0,70	-11,77833*	1,75722	,000	-12,8126	-10,7441
0,50	0,40	4,21167*	1,75722	0,160	3,1774	5,2459
	0,60	-,91167	1,75722	0,965	-1,9459	,1226
	0,70	-7,56667*	1,75722	0,004	-8,6009	-6,5324
0,60	0,40	5,12333*	1,75722	0,064	4,0891	6,1576
	0,50	,91167	1,75722	0,965	-,1226	1,9459
	0,70	-6,65500*	1,75722	0,011	-7,6892	-5,6208
0,70	0,40	11,77833*	1,75722	0,000	10,7441	12,8126
	0,50	7,56667*	1,75722	0,004	6,5324	8,6009
	0,60	6,65500*	1,75722	0,011	5,6208	7,6892

#### 4.6 Elaboración de modelos de regresión

Se efectuó una regresión lineal usando los datos de los valores de los cinco parámetros presentados en la Tabla 18. Se emplearon ocho series (dos por cada relación A/C empleada), provenientes de los valores del ancho del área desgastada y pérdida de peso de las losas curadas 14 días y elaboradas con arena caliza por simular de mejor manera las condiciones reales con las que se fabricaría una losa de concreto sometida a abrasión.

Tabla 18.- Valores de resistencia a la compresión, tensión por compresión, índice de dureza, ancho desgastado y pérdida de peso empleados para la realización del modelo de regresión.

Relación A/C	Resistencia a la compresión(kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la tensión(kg/cm <sup>2</sup> )	Índice de dureza	Ancho desgastado (mm)	Pérdida de peso (g)
0,4	345	33	34	19,42	2,33
0,4	324	33	30	25,83	4,08
0,5	294	33	29	23,63	3,17
0,5	315	32	31	28,86	3,50
0,6	275	32	29	24,54	4,42
0,6	263	28	30	29,37	4,92
0,7	172	23	24	31,20	5,25
0,7	184	20	24	33,22	5,83

Mediante un análisis de correlación bivariado se pueden observar las parejas de variables que tienen una correlación más cercana a la unidad. (Tabla 19)

Tabla 19.-Correlaciones bivariadas entre las variables medidas.

		<b>Correlaciones</b>				
		Compresión	tensión	dureza	anchodesg	pérdida
Compresión	Correlación de Pearson	1	,936**	,949**	-,906**	-,781*
	Sig. (bilateral)		,001	,000	,002	,022
	N	8	8	8	8	8
tensión	Correlación de Pearson	,936**	1	,856**	-,815*	-,753*
	Sig. (bilateral)	,001		,007	,014	,031
	N	8	8	8	8	8
dureza	Correlación de Pearson	,949**	,856**	1	-,912**	-,673
	Sig. (bilateral)	,000	,007		,002	,067
	N	8	8	8	8	8
anchodesg	Correlación de Pearson	-,906**	-,815*	-,912**	1	,719*
	Sig. (bilateral)	,002	,014	,002		,044
	N	8	8	8	8	8
pérdida	Correlación de Pearson	-,781*	-,753*	-,673	,719*	1
	Sig. (bilateral)	,022	,031	,067	,044	
	N	8	8	8	8	8

En la Tabla 19 se puede observar que la variable pérdida de peso no se correlaciona fuertemente con alguna de las otras variables medidas por lo que se excluyó para efectuar los modelos de correlación.

Empleando un método de regresión “hacia atrás” que permite apreciar la manera en que las variables introducidas al cálculo aportan positivamente al coeficiente de correlación, de mayor a menor aporte.

Se presentan los tres casos generados por el método de regresión “hacia atrás” del software. La primer combinación incluye las variables: resistencia a la compresión, resistencia a la tensión por compresión e índice de dureza. La segunda combinación incluye la compresión y el índice de dureza y por último, la tercera combinación incluye el índice de dureza.

Las ecuaciones obtenidas presentan la siguiente forma:

$$52,88 - 0,045 (f'c) + 0,134(f_{ct}) - 0.688(\text{Índice de Dureza}) = \text{Ancho del área desgastada(mm)}\text{-----(1)}$$

$$55,04 - 0,032 (f'c) - 0.754(\text{Índice de Dureza}) = \text{Ancho del área desgastada(mm)}\text{-----(2)}$$

$$62,64 - 1,314(\text{Índice de Dureza}) = \text{Ancho del área desgastada(mm)}\text{-----(3)}$$

De acuerdo a los valores de R presentados en la Tabla 20, se observa que con el índice de dureza obtenido mediante la prueba del martillo de rebote se obtiene un coeficiente de correlación alto, 0.912. Agregando el valor de la prueba de resistencia a compresión, el valor del coeficiente sube unas décimas hasta 0.921. Por último y al agregar la prueba de resistencia a la tensión, el índice de correlación aumenta una milésima por lo que al ser tan insignificante su aporte y una prueba no tan común, se recomienda emplear solamente las ecuaciones 2 y 3.

Si no se supiera si el piso fue curado después de la colocación del concreto, la ecuación 3 podría aplicarse eficazmente. Sin embargo, se podrían obtener valores más cercanos a los obtenidos en la prueba de abrasión en el laboratorio si se tiene la certeza de que el piso fue curado después de la colocación del concreto dado que se podría emplear la segunda expresión.

Tabla 20.- Coeficientes de correlación y determinación de los modelos.

**Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Sig.
1	0,922 <sup>a</sup>	0,851	0,739	2,5035	0,040
2	0,921 <sup>b</sup>	0,848	0,788	2,2559	0,009
3	0,912 <sup>c</sup>	0,832	0,804	2,1694	0,002

a. Predictores: (Constante), dureza, tensión, Compresión

b. Predictores: (Constante), dureza, Compresión

c. Predictores: (Constante), dureza.

## 5. Discusión

### 5.1 Resistencia a la compresión

Debido a que es una propiedad relacionada con una importante cantidad de otras propiedades del concreto, era importante realizar pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días ( $f'_c$ ). Los resultados sirvieron para observar si se cumplían las condiciones establecidas en la literatura clásica de tecnología del concreto: a menor relación A/C, mayor resistencia a la compresión.

Comparando los promedios de ambas series, caliza y sílica, por relación A/C se observa una menor resistencia en los especímenes elaborados con el 20% de arena de sílica respecto a los elaborados con solamente agregado calizo (Figura 27).

Se puede atribuir a que se realizó una sustitución directa del agregado fino, como se estableció en la metodología y no se empleó el método de diseño de mezclas del ACI para considerar las características físicas del agregado en la mezcla a emplear. Además en los resultados de la granulometría del agregado fino de sílica se aprecia que el agregado solo cumplió con los límites granulométricos en dos de sus valores y en todos los demás tuvo una granulometría pobre o deficiente.

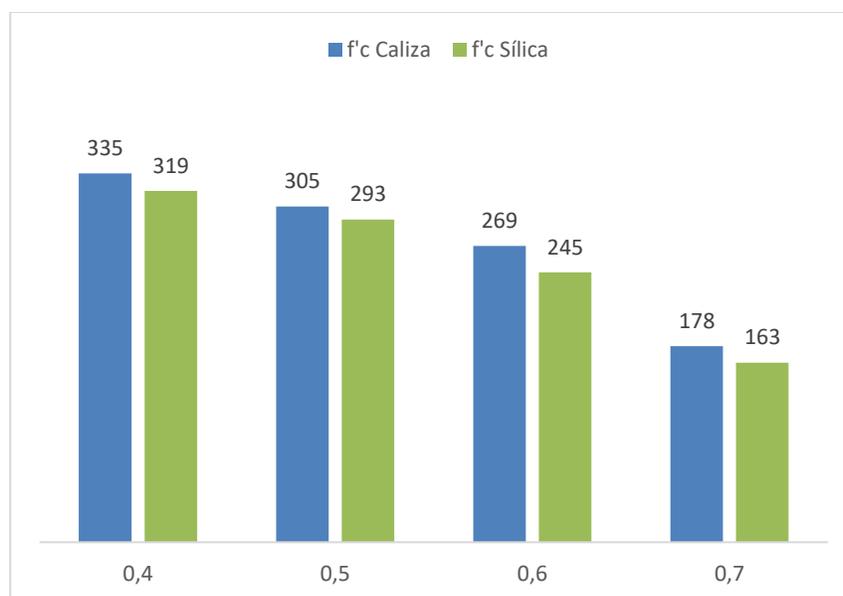


Figura 27.- Comparación de la resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>).

En la Figura 28 se comparan los resultados de resistencia a la compresión del agregado calizo con los reportados por Solís, Moreno (2011) con concretos elaborados también con agregados calizos locales. Para las relaciones A/C de 0.40 y 0.50 las resistencias promedio fueron iguales en un 100%; en la relación A/C de 0.60 la similitud fue de 97% y en la relación A/C de 0.70 de solamente 75% con una resistencia menor en la obtenida en este estudio.<sup>59</sup>

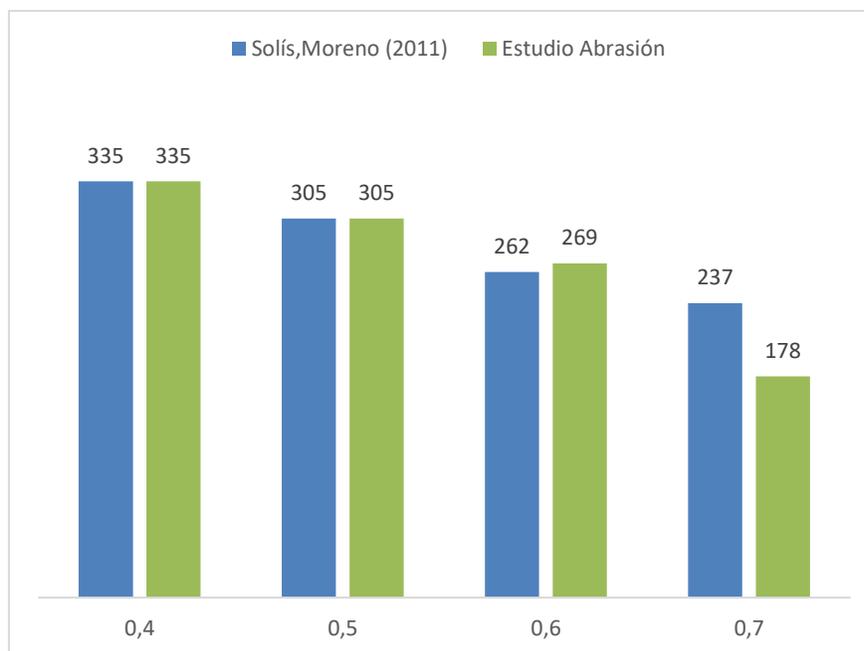


Figura 28.- Comparación de la resistencia a la compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ) obtenida en este estudio con las de Solís, Moreno (2011).

## 5.2 Resistencia a la tensión por compresión

Comparando las resistencias a la tensión por compresión, se observa que al igual que en la resistencia a la compresión, se obtienen menores valores para los especímenes elaborados con agregado fino de sílica, esto debido a lo mencionado en el apartado anterior respecto al proporcionamiento y a la granulometría (Figura 29).

<sup>59</sup> Solís and Moreno, *Concreto Con Agregados Calizos: En Clima Cálido*.

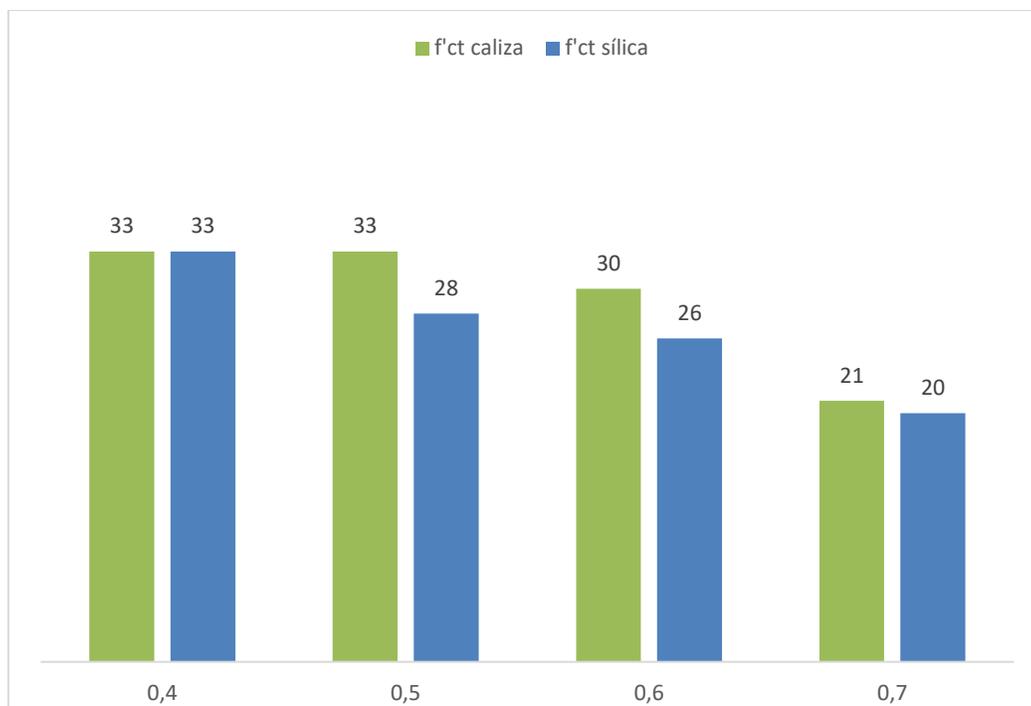


Figura 29.- Comparación entre tipos de agregado de la resistencia a la tensión por compresión ( $\text{kg/cm}^2$ ).

De acuerdo a los trabajos presentados por Gómez (2009) y Sánchez (2008), que emplearon agregados de la localidad, la resistencia a la tensión por compresión se encuentra entre un 9% y un 13% de los valores de resistencia a la compresión.

Sánchez (2008) empleó la prueba brasileña para probar si existía diferencia entre cilindros reforzados con fibra polimérica y cilindros de concreto simple. Para el caso del concreto simple (sin fibra) obtuvo para una relación A/C de 0.60 una resistencia promedio de  $22 \text{ kg/cm}^2$ , valor que se encuentra lejano al encontrado en este estudio que fue de  $30 \text{ kg/cm}^2$  para la misma relación A/C con agregado calizo. Para una relación A/C de 0.80 obtuvo un valor de  $18 \text{ kg/cm}^2$ , cercano a los  $20 \text{ kg/cm}^2$  obtenidos con una relación A/C de 0.70 en el presente trabajo.

Gómez (2009) empleó relaciones A/C de 0.40 y 0.60 usando agregados de tres bancos diferentes y obtuvo los resultados promedio que se presentan en la Tabla 21. Los resultados son muy parecidos a los reportados en el presente estudio.<sup>60</sup>

Tabla 21.- Comparación de las resistencias a tensión obtenidas por Sánchez (2008), Gómez (2009) y las obtenidas en el estudio (kg/cm<sup>2</sup>).

Relación A/C	Sánchez (2008)	Gómez (2009)	Presente Estudio (2017)
0,40	-	34	33
0,60	22	31	30
0,70	-	-	20
0,80	18	-	-

En general los valores de la resistencia a la tensión por compresión obtenidos en este estudio, tienen similitud con los obtenidos en estudios previos efectuados empleando agregado calizo local.

### 5.3 Resistencia a la abrasión (ancho del área desgastada)

En esta prueba fue evidente el efecto positivo del curado en las probetas elaboradas con ambos tipos de agregados. En todos los casos fue menor el ancho del área desgastada tanto para las arenas calizas como para las arenas de sílica.

En el estudio de Serrano (2007) se empleó una relación A/C (0.50) y distintos ciclos de curado, entre ellos curado al ambiente natural hasta el día de la prueba (180 días) y curado húmedo 7 y 28 días. En la Tabla 22 se presentan las comparaciones de los resultados obtenidos, en pruebas a 180 días, para la relación A/C de 0.50.

<sup>60</sup> Marco Antonio Gómez López, "Determinación de La Resistencia a Tensión Del Concreto Elaborado Con Agregado Calizo Triturado de Alta Absorción" (Universidad Autónoma de Yucatán, 2009).

Tabla 22.- Comparación de los resultados de Serrano (2007) con el estudio de abrasión (mm), para A/C de 0.50.

Serrano(2007)		Este estudio (2017)
Natural	28,34	28,86
Curado 7 días	25,44	-
Curado 14 días	-	23,63
Curado 28 días	24,79	-

Se observa que el estudio de Serrano (2007) únicamente para el caso de curado natural, obtuvo valores menores de desgaste; esto se puede atribuir a que las pruebas en ese estudio se realizaron a 180 días de edad y las pruebas en este estudio se realizaron a 28 días de edad de las probetas.<sup>61</sup> Por su parte Ramesh, Sharma (2014) hicieron pruebas a 28 y 90 días de edad y concluyeron que la resistencia a la abrasión mejoró con la edad. Sin embargo en aplicaciones constructivas reales, muchas veces no se puede esperar la edad donde alcance su resistencia máxima a la abrasión para ponerla en uso.<sup>62</sup>

En lo que respecta al efecto del agregado empleado, tanto para el curado natural como para el curado de 14 días se obtuvieron mejores resultados con el agregado de sílica. En la Figura 19 (capítulo 4) se observa el efecto en el desgaste de uno y otro agregado para el tratamiento de curado de 14 días.

La mejora de la resistencia a la abrasión por el empleo de otro tipo de agregados va en concordancia con los estudios de Ghafoori, Diawara (2007) y de Li *et al.* (2014), que sustituyeron cantidades de agregado fino por puzolanas y emplearon agregados “triturados manufacturados” provenientes de canteras, respectivamente. Encontraron que al sustituir agregado fino por algún material de mejor calidad, la resistencia a la abrasión mejora significativamente.

<sup>61</sup> Serrano, “Influencia Del Tiempo de Curado Por Inmersión En El Desempeño Del Concreto En Clima Calido, Sub-Humedo.”

<sup>62</sup> G.B. Ramesh Kumar and U.K. Sharma, “Abrasion Resistance of Concrete Containing Marginal Aggregates,” *Construction and Building Materials* 66 (2014): 712–22.

Serrano (2007) encontró que a un mayor tiempo de curado, la resistencia a la abrasión mejora. En su trabajo su variable de estudio fue el efecto del curado y mantuvo constante la relación  $A/C = 0.50$ . Sin embargo en un estudio preliminar, con una muestra pequeña y con intención de probar el equipo empleado en su trabajo, efectuó pruebas de abrasión utilizando distintas relaciones  $A/C$  (desde 0.30 hasta 0.70). En la Tabla 23 se comparan los resultados obtenidos por Serrano (2007) con los obtenidos en este estudio con el tratamiento de curado de 14 días y arena caliza.

Tabla 23.- Comparación del desgaste, en mm, para distintas relaciones  $A/C$ .

<b>A/C</b>	<b>Serrano (2007)</b>	<b>Presente estudio (2017)</b>	<b>Diferencia absoluta</b>
0,40	25,23	19,42	5,81
0,50	27,45	23,63	3,82
0,60	28,47	24,54	3,93
0,70	30,28	31,53	1,25

Se aprecia una mayor similitud en la relación  $A/C$  de 0.70 y resultados más alejados conforme la relación  $A/C$  disminuye. Las diferencias se pueden atribuir a que el estudio de Serrano (2007) no especifica la duración del tratamiento de curado empleado y solamente menciona que fueron curadas por inmersión.

#### 5.4 Análisis estadístico de los resultados

En esta sección se interpretan los resultados del análisis de varianza, para probar que el tratamiento de curado o la sustitución de una fracción del agregado producen diferencias significativas en las medias de las variables.

El método ANOVA de un factor establece que si la significancia es menor que un valor establecido como aceptable (generalmente 0.05) los conjuntos de datos tienen una media diferente; y si el valor es mayor al aceptable los conjuntos son no diferentes (no se puede asumir que son iguales).

Para el caso del efecto de las arenas, se presenta en las Figura 30 y Figura 31 las medias del desgaste y sus bandas de confianza del 95 %. En ambos casos se aprecia

que no se traslapan las bandas de confianza. Esto significa que las medias de sus valores son diferentes, por tanto, estadísticamente si se aprecia un efecto distinto al emplear una u otra arena.

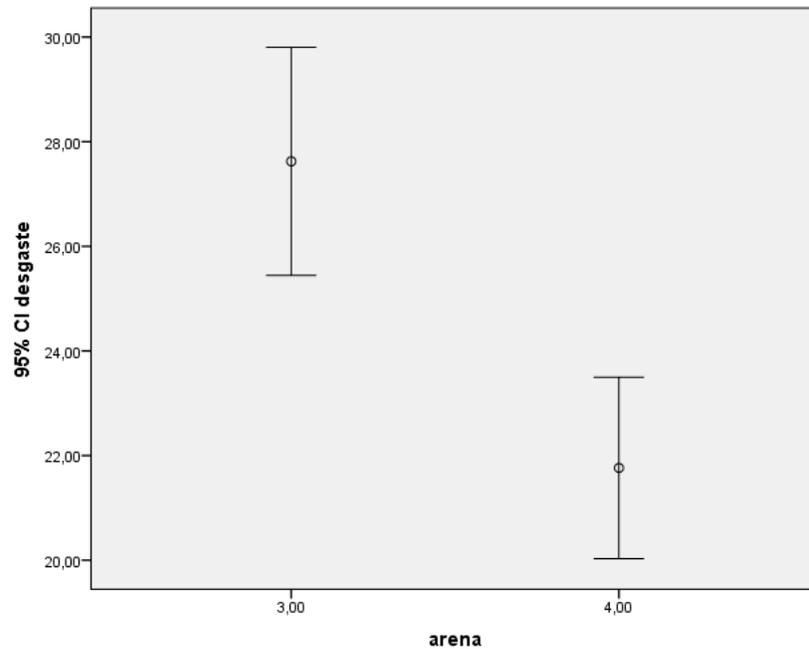


Figura 30.- Comparación del efecto de las arenas en la media del desgaste, con curado a 14 días inmersión (3: caliza, 4: sílica).

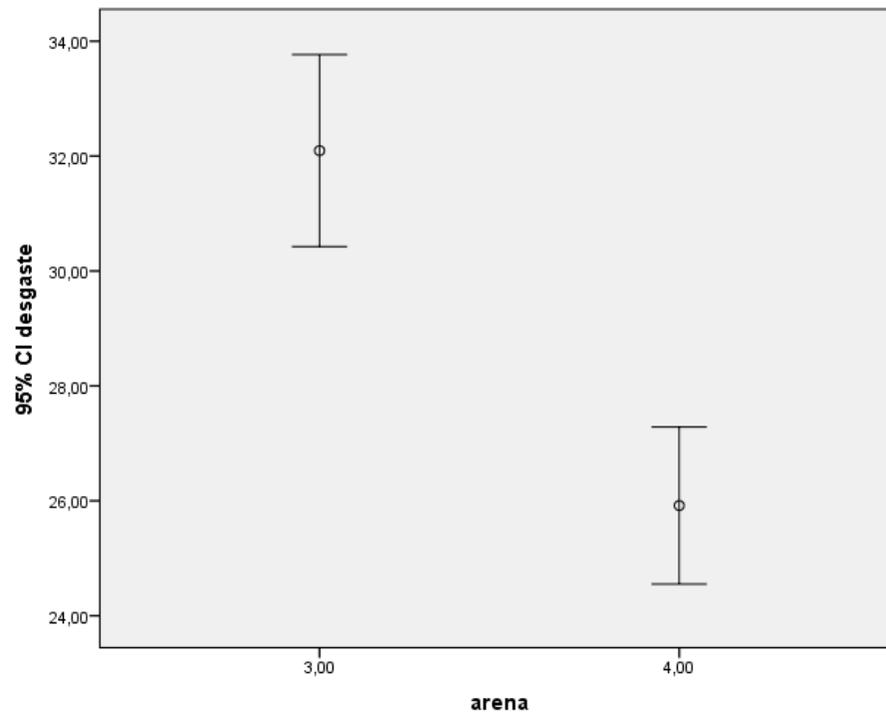


Figura 31.- Comparación del efecto de las arenas en la media del desgaste con curado natural (3: caliza, 4: sílica).

Para el caso del efecto del curado, se presenta en las Figura 32 y Figura 33 las medias del desgaste y sus bandas de confianza del 95 %. De nueva cuenta, en ambos casos se aprecia que no se traslapan las bandas de confianza por lo que estadísticamente si existe diferencia entre emplear uno u otro método de curado.

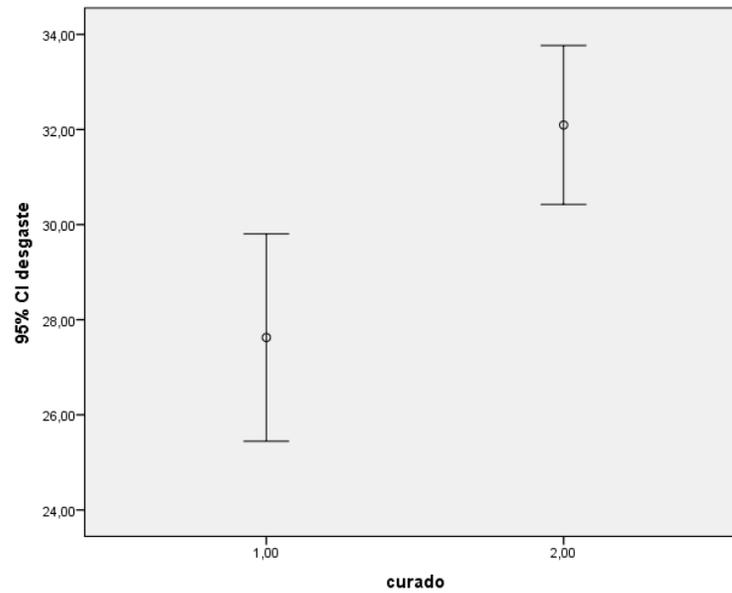


Figura 32.- Comparación del efecto del curado en la media del desgaste, con arena caliza (1: inmersión, 2: natural).

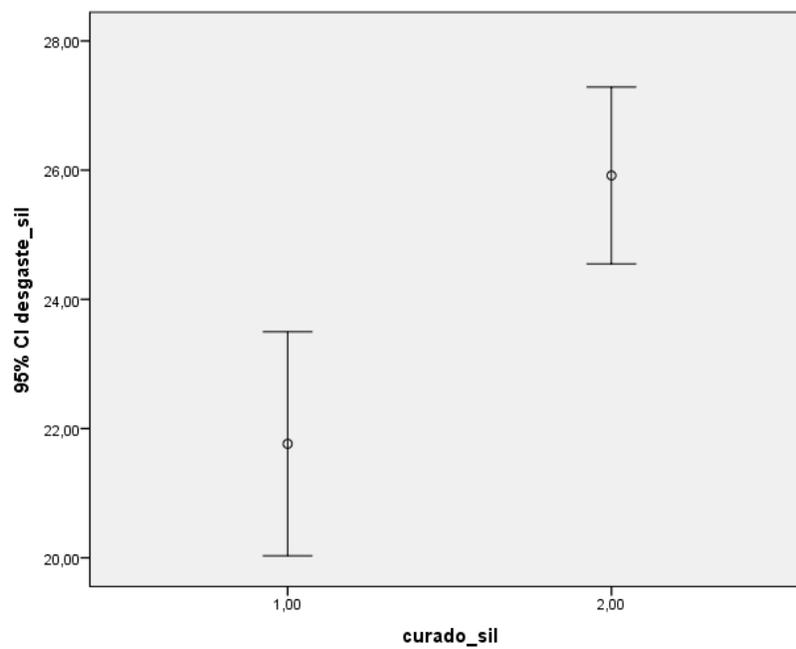


Figura 33.- Comparación del efecto del curado en la media del desgaste, con arena de sílica (1: inmersión, 2: natural).

La relación A/C a pesar de controlar varias características del concreto, cuando se analizó su influencia en el desgaste se encontró que solamente fue diferente, desde el punto de vista estadístico, en la relación A/C de 0.70. Para el resto de relaciones A/C no se encontró diferencia significativa por lo que sería un indicio de no emplear relaciones A/C de 0.70 (o menores) en la construcción de elementos sometidos a condiciones de abrasión. La Figura 34 muestra las medias del desgaste para cada A/C, con sus respectivas bandas de confianza del 95 %; se aprecia que se traslapan las bandas de confianza de los concretos con menor A/C.

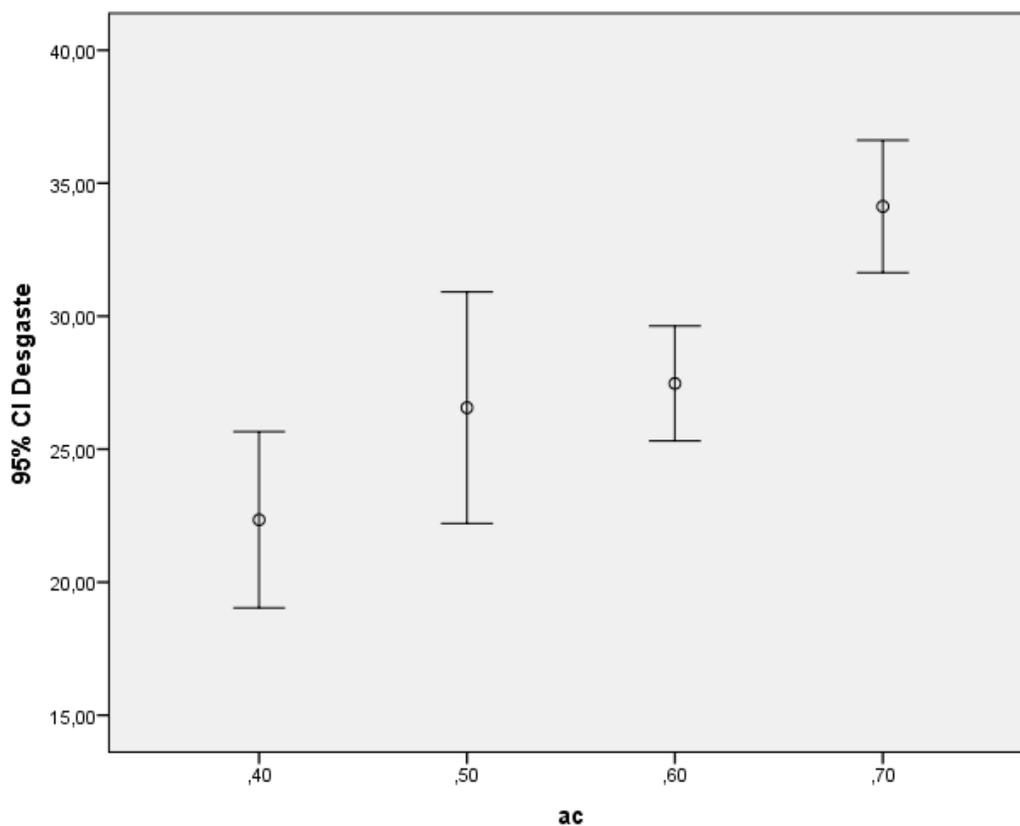


Figura 34.- Comparación del efecto de la A/C en el desgaste con arena caliza y curado de 14 días por inmersión.

## 6. Conclusiones

La resistencia a la compresión y tensión por compresión medidos estuvieron en los rangos establecidos en investigaciones locales previas. Al emplear la sustitución parcial del agregado de sílica no se encontraron mejores resistencias a la compresión que empleando en su totalidad arena caliza.

A pesar de que la A/C controla en gran medida las características de resistencia del concreto, en este estudio y para condiciones de abrasión se encontró que con relaciones de 0.60 y menores, se obtienen resultados estadísticamente similares en resistencia a la abrasión. Para relaciones A/C mayores a 0.60, tal como 0.70, la abrasión sí presenta diferencias significativas por lo que no se recomienda emplearlas en elementos sometidos a condiciones intensas de abrasión.

En este estudio queda demostrada la importancia del curado ante condiciones intensas de abrasión. Emplear curados de 14 días en elementos sometidos a desgastes intensos puede ser un factor que aumente la durabilidad de estos elementos.

La utilización de un agregado fino de mayor resistencia y menor absorción, puede mejorar la resistencia a la abrasión al compararlos con concretos elaborados con agregado calizo de alta absorción en su totalidad. El tema económico podría ser una limitante para este uso por lo que se plantea el uso de sustituciones parciales.

## 7. Referencias bibliográficas

Chaudhary, Jyotsana Lalit, Alvin Harison, and Vikas Srivastava. "Use of Silica Sand As Cement Replacement in Ppc Concrete," no. January (2015): 2319–22.

Española, Real Academia de la Lengua. "Real Academia de La Lengua Española." *Diccionario de La Lengua Española*, 2015.

Farny, James A. *Diseño Y Construcción de Pisos En Concreto*. Primera Ed. Asocreto, 2007.

Gencil, Osman, Cengiz Ozel, Mumin Filiz, and Fuat Koksall. "The Relations between Mechanical Strengths and Abrasive Wear of Concrete Incorporating the Hematite Aggregate." *International Journal of Pavement Engineering* 13, no. 3 (2012): 235–43. doi:10.1080/10298436.2011.619266.

Ghafoori, Nader, and Hamidou Diawara. "Strength and Wear Resistance of Sand-Replaced Silica Fume Concrete." *ACI Materials Journal* 104, no. 2 (2007): 206–14.

Gómez López, Marco Antonio. "Determinación de La Resistencia a Tensión Del Concreto Elaborado Con Agregado Calizo Triturado de Alta Absorción." Universidad Autónoma de Yucatán, 2009.

González Cuevas, Óscar M, and Francisco Robles. *Aspectos Fundamentales Del Concreto Reforzado*, 2005.

Grdic, Zoran J, Gordana A Toplicic Curcic, Nenad S Ristic, and Iva M Despotovic. "Abrasion Resistance of Concrete Micro-Reinforced with Polypropylene Fibers." *Construction and Building Materials* 27 (2012): 305–12. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.044.

Hernández, Guillermo. "Determinación de La Influencia de La Calidad de Los Agregados En El Concreto." Universidad Autónoma de Yucatán, 2013.

Institute, American Concrete. *Construcción de Losas Y Pisos de Concreto ACI-302*.

Edited by IMCYC. 3era Edici. IMCYC, 1992.

- Jignesh, Kerai. "Effect of Use of Silica Sand as Fine Material in Concrete" 2, no. 1 (2015): 266–71.
- Li, Beixing, Guoju Ke, and Mingkai Zhou. "Influence of Manufactured Sand Characteristics on Strength and Abrasion Resistance of Pavement Cement Concrete." *Construction and Building Materials* 25, no. 10 (2011): 3849–53. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.004.
- López, Edgar Jesús López. "Estudio Experimental Del Desgaste Abrasivo En Aceros Aisi 8620 , D-2 Y H-13 Con Y Sin Tratamiento Superficial." Instituto Politécnico Nacional, 2004.
- Metha, K, and P Monteiro. *Concreto. Estructura, Propiedades Y Materiales*. Edited by IMCYC. México: IMCYC, 1998.
- Moreno, Eric I; Solís, Romel G; Serrano Carlos. "Influencia Del Tiempo de Curado Húmedo En La Resistencia Y Durabilidad Del Concreto En Clima Tropical," no. 2 (2013): 11.
- Mynarčík, Petr. "Technology and Trends of Concrete Industrial Floors." *Procedia Engineering* 65 (2013): 107–12. doi:10.1016/j.proeng.2013.09.019.
- Neville, Adam. *Tecnología Del Concreto*. Edited by IMCYC. Cuarta edi. IMCYC, 1999.
- Novedades, Milenio. "Anciana Cae En Las Nuevas Banquetas Del Centro." *Milenio Novedades*. January 9, 2014. <http://sipse.com/milenio/accidente-mujer-caida-banqueta-centro-merida-69882.html>.
- Padilla, Héctor, and Humberto Cárdenas. "Relación de La Resistencia a La Compresión Y El Módulo de Ruptura Del Concreto Hidráulico." *Innovare. Revista de Ciencia Y Tecnología* 2 (2013): 77–85.
- Ramesh Kumar, G.B., and U.K. Sharma. "Abrasion Resistance of Concrete Containing Marginal Aggregates." *Construction and Building Materials* 66 (2014): 712–22.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.084.

Sebök, T, and O Stráněl. "Wear Resistance of Polymer-Impregnated Mortars and Concrete." *Cement and Concrete Research* 34 (2004): 1853–58. doi:10.1016/j.cemconres.2004.01.026.

Serrano, Carlos. "Influencia Del Tiempo de Curado Por Inmersión En El Desempeño Del Concreto En Clima Calido, Sub-Humedo." Universidad Autónoma de Yucatán, 2006.

Solís, Romel, and Eric Moreno. *Concreto Con Agregados Calizos: En Clima Cálido*. Primera ed. Académica Española, 2011.

Vassou, V C, N R Short, and R J Kettle. "Microstructural Investigations into the Abrasion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete Floors." *Journal of Materials in Civil Engineering* 20, no. February (2008): 157–68. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:2(157).

Yazıcı, and G · Inan. "An Investigation on the Wear Resistance of High Strength Concretes." *Wear* 260 (2006): 615–18. doi:10.1016/j.wear.2005.03.028.

Yucatán, Diario de. "Continúan Los Perjuicios En El Centro de Mérida." *Diario de Yucatán*, June 29, 2015. <http://yucatan.com.mx/merida/gobierno-merida/continuan-los-perjuicios>.

Zbieta Horszczaruk, El'. "Abrasion Resistance of High-Strength Concrete in Hydraulic Structures." *Wear* 259 (2005): 62–69. doi:10.1016/j.wear.2005.02.079.

## ANEXOS

## Anexo A

Datos de resistencia a la compresión a los 28 días (f'c) en cilindros estándar.

## Caliza

Rel.A/C	Cilindro #	Carga (kg)	Diámetro Promedio(cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo(kg/cm <sup>2</sup> )
0,4	1	62000	15,19	181,22	342,13
	2	63500	15,23	182,18	348,57
	3	63000	15,25	182,65	344,91
	<b>Promedio</b>				<b>345</b>
0,4	1	59500	15,03	177,42	335,36
	2	58500	15,24	182,30	320,91
	3	57500	15,26	182,77	314,60
	<b>Promedio</b>				<b>324</b>
0,5	1	53350	15,15	180,27	295,95
	2	52333	15,10	179,08	292,23
	<b>Promedio</b>				<b>294</b>
0,5	1	56954	15,20	181,46	313,87
	2	57448	15,20	181,46	316,59
	3	56972	15,20	181,46	313,97
	<b>Promedio</b>				<b>315</b>
0,6	1	51773	15,10	179,08	289,11
	2	46364	15,15	180,27	257,20
	3	50039	15,15	180,27	277,58
	<b>Promedio</b>				<b>275</b>
0,6	1	48746	15,15	180,27	270,41
	2	46224	15,20	181,46	254,74
	3	47630	15,20	181,46	262,48
	<b>Promedio</b>				<b>263</b>
0,7	1	30364	15,18	180,86	167,88
	2	31291	15,13	179,67	174,16
	3	32086	15,28	183,25	175,09
	<b>Promedio</b>				<b>172</b>
0,7	1	33000	15,20	181,46	181,86
	2	33500	15,24	182,30	183,77
	3	33750	15,23	182,06	185,38
	<b>Promedio</b>				<b>184</b>

## Sílica

Rel. A/C	Cilindro #	Carga (kg)	Diámetro Promedio (cm)	área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo(kg/cm <sup>2</sup> )
0,4	1	56500	15,10	179,08	315,50
	2	56750	15,15	180,27	314,81
	3	57250	15,15	180,27	317,59
	<b>Promedio</b>				<b>316</b>
0,4	1	59000	15,21	181,58	324,93
	2	57500	15,23	182,06	315,84
	3	58500	15,20	181,46	322,39
	<b>Promedio</b>				<b>321</b>
0,5	1	57018	15,02	177,19	321,80
	2	55693	15,02	177,19	314,32
	3	59443	15,20	181,46	327,58
	<b>Promedio</b>				<b>321</b>
0,5	1	48221	15,08	178,49	270,17
	2	44893	15,20	181,46	247,40
	3	50044	15,21	181,70	275,43
	<b>Promedio</b>				<b>264</b>
0,6	1	42441	15,10	179,08	237,00
	2	44710	15,20	181,46	246,39
	3	43748	15,10	179,08	244,29
	<b>Promedio</b>				<b>243</b>
0,6	1	45000	15,15	180,27	249,63
	2	44390	15,20	181,46	244,63
	3	44406	15,15	180,27	246,34
	<b>Promedio</b>				<b>247</b>
0,7	1	29630	15,25	182,65	162,22
	2	29623	15,21	181,70	163,03
	3	30342	15,23	182,06	166,66
	<b>Promedio</b>				<b>164</b>
0,7	1	29247	15,25	182,65	160,12
	2	29712	15,23	182,06	163,20
	3	29176	15,23	182,06	160,26
	<b>Promedio</b>				<b>161</b>

## Anexo B

Datos de resistencia a la tensión por compresión a los 28 días ( $f_{ct}$ ) en cilindros estándar.

## Caliza

Rel. A/C	Cilindro #	Carga(kg)	Diámetro promedio (cm)	Longitud promedio(cm)	Esfuerzo(kg/cm <sup>2</sup> )
0,4	1	23073	15,07	30,10	32,38
	2	24600	15,37	30,60	33,31
	3	24013	15,22	30,65	32,78
	<b>Promedio</b>				<b>33</b>
0,4	1	24319	15,20	30,40	33,50
	2	22263	15,25	30,55	30,42
	3	24789	15,20	30,50	34,04
	<b>Promedio</b>				<b>33</b>
0,5	1	24526	15,10	30,40	34,01
	2	23331	15,10	30,35	32,41
	<b>Promedio</b>				<b>33</b>
0,5	1	21626	15,10	30,50	29,89
	2	24099	15,20	30,70	32,88
	3	24776	15,20	30,55	33,97
	<b>Promedio</b>				<b>32</b>
0,6	1	22243	15,10	30,40	30,85
	2	22439	15,10	30,45	31,07
	3	24190	15,10	30,50	33,44
	<b>Promedio</b>				<b>32</b>
0,6	1	20878	15,20	30,50	28,67
	2	20278	15,15	30,45	27,98
	3	20175	15,20	30,60	27,61
	<b>Promedio</b>				<b>28</b>
0,7	1	17201	15,20	30,50	23,62
	2	15511	15,14	30,55	21,35
	3	16439	15,20	30,55	22,54
	<b>Promedio</b>				<b>23</b>
0,7	1	16550	15,27	30,40	22,69
	2	11000	15,20	30,55	15,08
	3	15000	15,17	30,40	20,70
	<b>Promedio</b>				<b>19</b>

## Sílica

Rel.A/C	Cilindro #	Carga(kg)	Diámetro promedio (cm)	Longitud promedio(cm)	Esfuerzo(kg/cm2)
0,4	1	26505	15,28	30,65	36,04
	2	25823	15,23	30,60	35,29
	3	19650	15,23	30,50	26,94
	<b>Promedio</b>				<b>33</b>
0,4	1	22249	15,20	30,55	30,50
	2	23103	15,25	30,55	31,57
	3	15542	15,23	30,50	21,31
	<b>Promedio</b>				<b>28</b>
0,5	1	21132	15,05	29,90	29,91
	2	23564	15,31	30,60	32,03
	3	22120	15,31	30,55	30,12
	<b>Promedio</b>				<b>31</b>
0,5	1	19287	15,20	30,45	26,53
	2	15281	15,18	30,55	20,98
	3	19679	15,24	30,50	26,96
	<b>Promedio</b>				<b>25</b>
0,6	1	17842	15,15	30,45	24,62
	2	16880	15,15	30,10	23,57
	3	18005	15,15	30,55	24,77
	<b>Promedio</b>				<b>24</b>
0,6	1	18775	15,20	30,65	25,66
	2	20813	15,15	30,55	28,63
	3	22234	15,20	30,70	30,33
	<b>Promedio</b>				<b>28</b>
0,7	1	15437	15,25	30,45	21,16
	2	12129	15,23	30,65	16,55
	3	13872	15,23	30,50	19,02
	<b>Promedio</b>				<b>19</b>
0,7	1	15462	15,20	30,45	21,27
	2	16780	15,20	30,50	23,04
	3	11133	15,20	30,50	15,29
	<b>Promedio</b>				<b>20</b>

## Anexo C

Datos de resistencia a la abrasión. Área desgastada y pérdida de peso.

## Curado Natural. Arena Caliza

Relación A/C				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
0,4	1	30,55	24,3	30,62	25,56	6264	6261	3
	2	32,75	30,83	30,52	28,44	6048,5	6042,5	6
	3	31,08	31,34	31,33	28,32	5929	5922	7
	Promedio				<b>27,44</b>			<b>5,33</b>
0,4	1	30,72	30,19	31,62	27,91	5987	5984	3
	2	30,98	30,74	30,09	27,67	5864	5860,5	3,5
	3	20,32	21,66	18,04	17,08	6143	6141	2
	Promedio				<b>24,22</b>			<b>2,83</b>
0,5	1	32,56	32,39	32,73	29,63	6568	6563,5	4,5
	2	32,33	30,72	34,38	29,55	6501	6496	5
	3	31,16	30,6	31,34	28,10	7315,5	7311,5	4
	Promedio				<b>29,09</b>			<b>4,5</b>
0,5	1	33,85	34,59	32,97	30,87	5914	5911	3
	2	31,83	31,56	30,87	28,49	5781,5	5779	2,5
	3	29,54	29,61	29,13	26,50	6110	6108	2
	Promedio				<b>28,62</b>			<b>2,5</b>
0,6	1	31,43	30,38	31,89	28,30	5904,5	5901	3,5
	2	32,79	33,13	33,08	30,07	5922,5	5918	4,5
	3	33,64	30,41	30,24	28,50	5997	5990	7
	Promedio				<b>28,96</b>			<b>5</b>

0,6	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	31,45	32,59	29,67	28,31	6111	6106	5
2	35,19	34,21	36,5	32,37	6272	6267,5	4,5	
3	31,5	31,11	32,15	28,66	6328,5	6323,5	5	
Promedio				<b>29,78</b>			<b>4,83</b>	

0,7	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	31,07	30,37	32,19	28,28	5796	5792,5	3,5
2	37,16	36,41	38,23	34,34	5786	5780,5	5,5	
3	34,6	32,95	34,55	31,10	5730,5	5726	4,5	
Promedio				<b>31,24</b>			<b>4,5</b>	

0,7	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	38,49	39,94	36,65	35,43	5766	5758	8
2	38,83	39,9	36,08	35,34	5728,5	5722	6,5	
3	37,98	35,36	39,9	34,82	5867	5860	7	
Promedio				<b>35,20</b>			<b>7,17</b>	

## Curado 14 días. Arena Caliza

Relación A/C	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	0,4	1	19,7	16,69	21,11	16,24	6120	6118
	2	24,88	23,77	25,62	21,83	6589	6586	3
	3	22,9	19,77	26,26	20,05	6005	6003	2
	Promedio				<b>19,37</b>			<b>2,33</b>

0,4	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
		1	27,21	28,19	25,22	23,94	6370,5	6367,5
	2	19,61	20,1	16,82	15,91	6321	6319	2
	3	21,42	15,62	27,34	18,53	6124	6122	2
	Promedio				<b>19,46</b>			<b>2,33</b>

0,5	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	30,72	27,6	32,36	27,30	7155	7151	4
2	27	27,7	25,88	23,93	7602	7598	4	
3	31,06	31,13	30,72	28,04	6287	6282	5	
Promedio				<b>26,42</b>			<b>4,33</b>	

0,5	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	23,18	23,44	22,18	20,00	6212	6211,5	0,5
2	20,44	19,76	21,01	17,47	6337	6335	2	
3	28,54	27,33	28,02	25,03	6271	6267,5	3,5	
Promedio				<b>20,84</b>			<b>2</b>	

0,6	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	29,72	29,76	29,11	26,60	6059,5	6056,5	3
2	28,89	28,59	28,99	25,89	6041,5	6038	3,5	
3	29,02	29,65	27,71	25,86	6170,5	6168	2,5	
Promedio				<b>26,12</b>			<b>3</b>	

0,6	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	27,89	25,93	29,41	24,81	5980	5974,5	5,5
2	25,41	25,02	26,35	22,66	6102	6097	5	
3	24,4	23,96	24,7	21,42	6143	6136	7	
Promedio				<b>22,97</b>			<b>5,83</b>	

0,7	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
	1	30,51	30,27	30,15	27,38	5986,5	5983	3,5
2	32,85	33,02	33,71	30,26	5729	5723	6	
3	34,21	33,45	35	31,29	5915,5	5910	5,5	
Promedio				<b>29,64</b>			<b>5</b>	

Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
1	34,76	32,99	37	31,99	5966	5960,5	5,5
2	34,3	34,57	34,72	31,60	5881	5876	5
3	37,72	38,93	36,1	34,65	5964	5958	6
Promedio				<b>32,75</b>			<b>5,5</b>

## Curado Natural. Arena Sílica 20

Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
1	25,5	25,88	26,6	23,06	6346	6343	3
2	28,25	29,62	27,53	25,54	6302	6298,5	3,5
3	27,05	27,53	26,94	24,24	6412,5	6409,5	3
Promedio				<b>24,28</b>			<b>3,17</b>

Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
1	25,3	22,71	28,41	22,54	6177,5	6174,5	3
2	25,43	24,79	24,38	21,94	6250	6247	3
3	20,42	20,73	20,64	17,67	6190,5	6187	3,5
Promedio				<b>20,72</b>			<b>3,17</b>

Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
1	24,99	25,02	25,01	22,08	6346	6343	3
2	23,6	26,99	19,31	20,37	6160,5	6156,5	4
3	24,33	23,15	17,83	18,84	6253	6251	2
Promedio				<b>20,43</b>			<b>3,00</b>

Losa #	Centro	Derecha	Izquierda	Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)
1	31,30	31,24	28,21	27,32	5982,5	5978,5	4
2	28,78	30,25	25,96	25,40	6037	6034	3
3	27,21	36,21	25,44	26,69	6010	6006	4
Promedio				<b>26,47</b>			<b>3,67</b>

0,6 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	30,08	30,94	29,46	27,23	6270	6266,5	3,5
	2	29,24	31,73	26,69	26,29	6145	6140	5
	3	28,20	27,38	29,20	25,33	6223,5	6221,5	2
	Promedio				<b>26,28</b>			<b>3,50</b>

0,7 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	22,50	22,39	22,00	19,37	6320	6316,5	3,5
	2	26,78	23,94	30,01	23,98	6186	6181,5	4,5
	3	24,91	28,05	21,44	21,87	6107	6105	2
	Promedio				<b>21,74</b>			<b>3,33</b>

0,7 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	21,52	23,21	19,66	18,53	6075,5	6072,5	3
	2	23,26	22,91	22,91	20,10	6244	6240,5	3,5
	3	27,54	26,24	28,06	24,35	5992	5988	4
	Promedio				<b>20,99</b>			<b>3,50</b>

## Curado 14 días. Arena Sílica 20

Relación A/C 0,4 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	22,06	19,89	23,65	18,94	6289	6287	2
	2	25,59	23,99	26,73	22,51	6203,5	6200,5	3
	3	23,52	22,19	24,44	20,45	6548,5	6546	2,5
	Promedio				<b>20,63</b>			<b>2,50</b>

0,4 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	11,49	11,95	11,84	8,83	6534,5	6532	2,5
	2	19,8	19,79	18,8	16,53	6605	6603	2
	3	18,24	18,23	17,01	14,90	6374	6372	2
	Promedio				<b>13,42</b>			<b>2,17</b>

0,5 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	18,3	21,7	18,5	16,57	6327,5	6325,5	2
	2	20,18	22,75	14,7	16,28	6217	6214	3
	3	16,5	17,22	16,56	13,83	6272	6270	2
	Promedio				<b>15,56</b>			<b>2,33</b>

0,5 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	24,15	25,1	23,2	21,22	6110	6107	3
	2	22,39	21,88	24,4	19,96	6222,5	6220	2,5
	3	17,9	20,48	18,59	16,06	6166	6163,5	2,5
	Promedio				<b>19,08</b>			<b>2,67</b>

0,6 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	25,84	24,22	25,82	22,36	6407,5	6405	2,5
	2	20,38	19,48	19,99	17,02	6451	6447,5	3,5
	3	21,34	22,33	20,53	18,47	6296,5	6294	2,5
	Promedio				<b>19,28</b>			<b>2,83</b>

0,7 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	22,68	22,8	22,88	19,86	6418,5	6414,5	4
	2	27,33	26,96	28,15	24,55	6117	6113	4
	3	27,97	28,78	26,75	24,90	6330,5	6326,5	4
	Promedio				<b>23,10</b>			<b>4,00</b>

0,7 Sílica				Desgaste Promedio (mm)	Peso Inicial	Peso Final	Pérdida Peso (g)	
	Losa #	Centro	Derecha	Izquierda				
	1	22,64	23,01	23,12	19,99	6049,5	6046,5	3
	2	25,27	27,11	23,78	22,46	6339,5	6335	4,5
	3	22,89	23,79	21,58	19,82	6212,5	6209	3,5
	Promedio				<b>20,76</b>			<b>3,67</b>

Gráficas obtenidas para la pérdida de peso medida en la prueba de abrasión

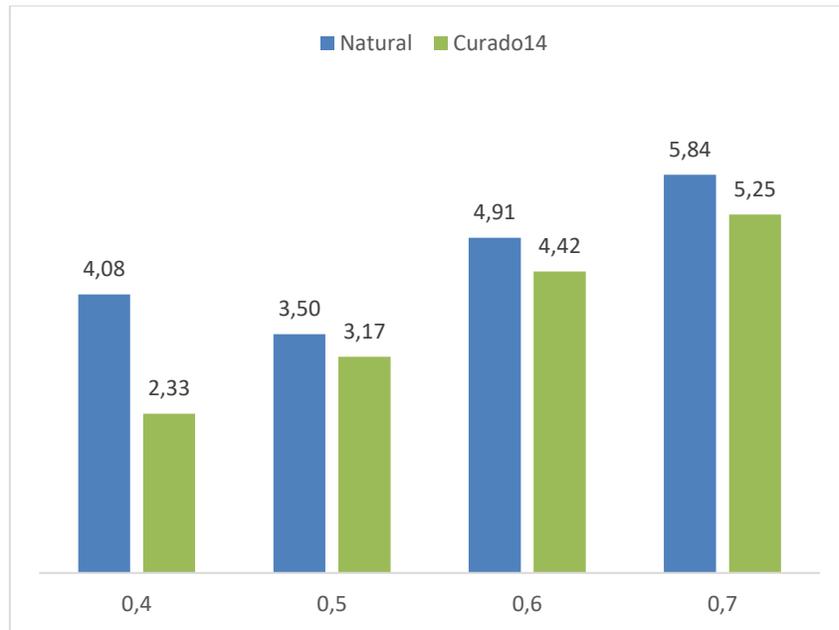


Figura 1.-Comparación de la pérdida de masa entre tipos de curado, para agregado calizo.

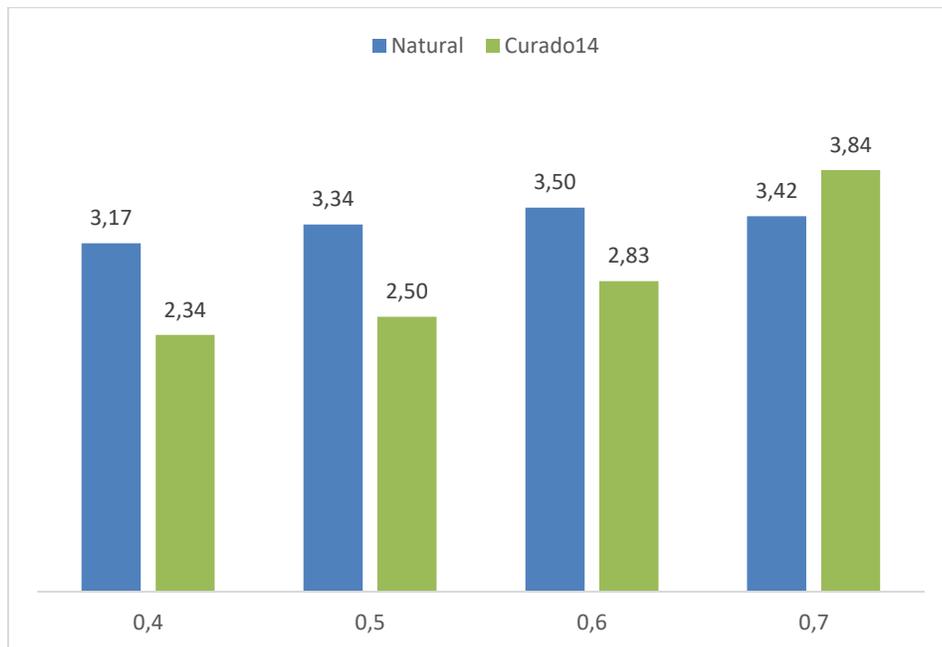


Figura 2.-Comparación de la pérdida de masa entre tipos de curado, para agregado de sílica 20.

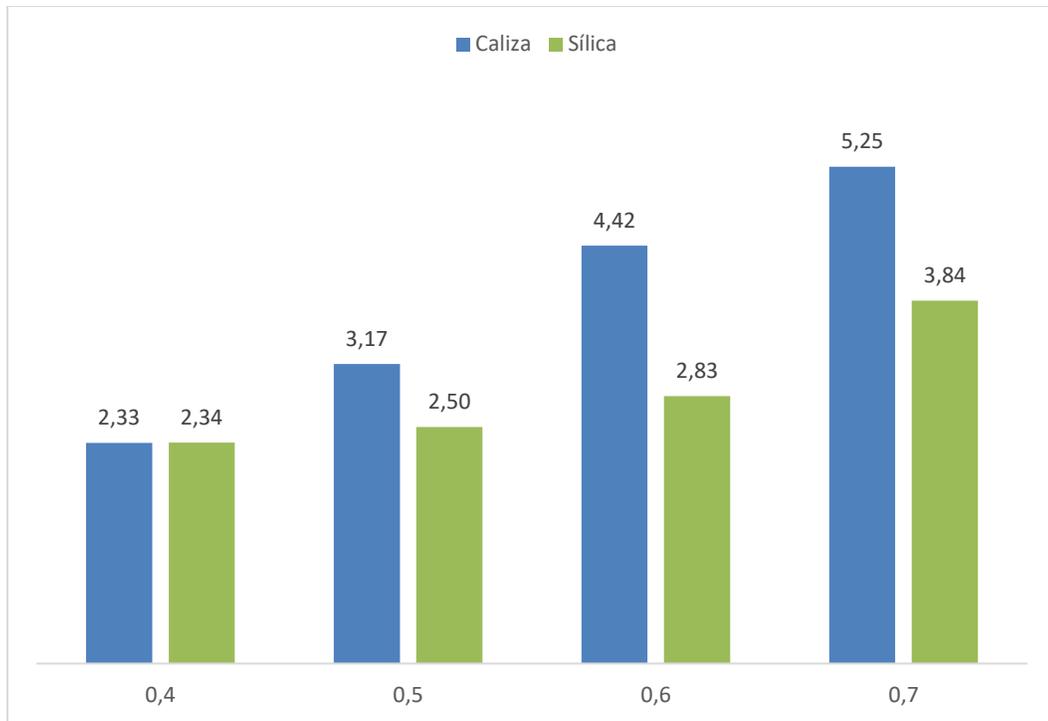


Figura 3.- Comparación de la pérdida de masa entre tipos de agregado, con curado a 14 días.

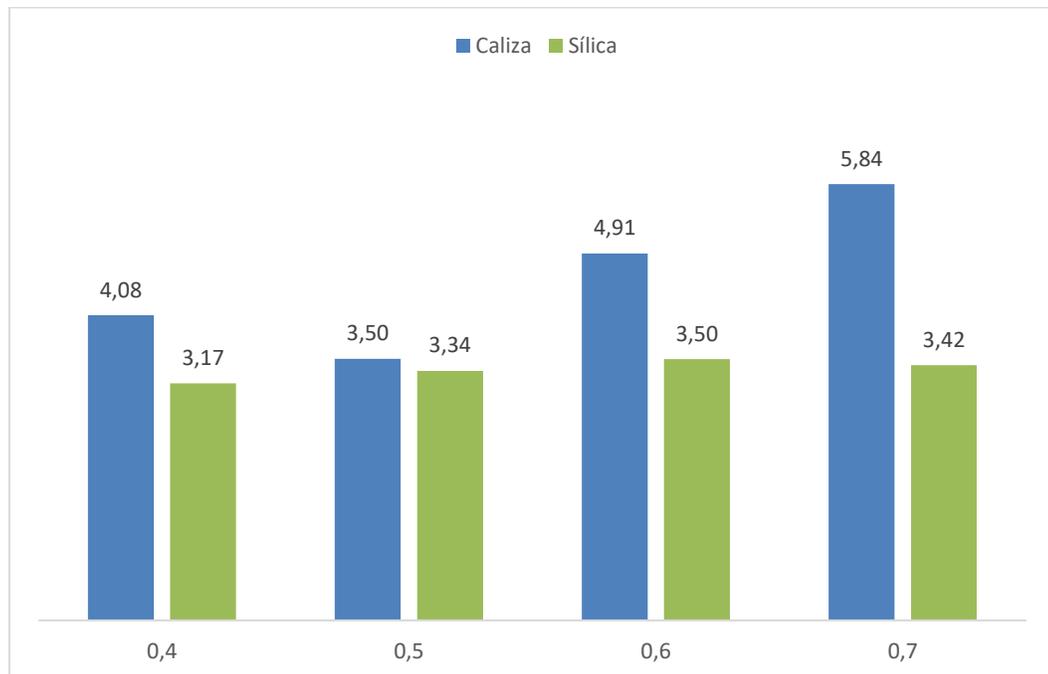


Figura 4.- Comparación de la pérdida de masa entre tipos de agregados, con curado natural.

## Anexo D

## Índice de dureza para probetas de caliza y sílica 20

**Caliza**

0,4	Curado 14	34	32
		30	
0,4	Natural	32	33
		33	
0,5	Curado 14	29	30
		31	
0,5	Natural	27	31
		34	
0,6	Curado 14	29	30
		30	
0,6	Natural	30	31
		31	
0,7	Curado 14	24	24
		24	
0,7	Natural	25	25
		24	

**Sílica 20**

0,4	Curado 14	27	27
		27	
0,4	Natural	25	27
		28	
0,5	Curado 14	28	27
		26	
0,5	Natural	29	27
		24	
0,6	Curado 14	25	25
		25	
0,6	Natural	24	24
		24	
0,7	Curado 14	22	20
		17	
0,7	Natural	22	21
		19	

## Anexo E

Tablas del método del ACI 211 por volúmenes absolutos empleadas en el diseño de mezclas de concreto.

Tabla 6.3.3 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado.

Revenimiento en cm	Agua ,kg/m <sup>3</sup> concreto para TMA en mm							
	9,5	12,5	19	25	38	50	75	150
de 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
de 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
de 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada. Aire Incluido (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Tabla 6.3.6 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo del agregado, en mm	2,4	2,6	2,8	3,0
9,5 (3/8")	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5(1/2")	0,59	0,57	0,55	0,53
19(3/4")	0,66	0,64	0,62	0,60
25(1")	0,71	0,69	0,67	0,65
37.5(1 1/2")	0,75	0,73	0,71	0,69
50(2")	0,78	0,76	0,74	0,72
75(3")	0,82	0,80	0,78	0,76
150(6")	0,87	0,85	0,83	0,81

## Anexo F

Proporcionamiento de mezclas por medio del método de volúmenes absolutos del ACI  
211

Ejemplificando para la relación A/C =0.6 para arena caliza.

\*Paso 1. De la tabla 6.3.3 para un revenimiento de 7.5 a 10 cm y un TMA de 19 mm:

Agua de mezclado=  $205 \text{ kg/m}^3 + 15 \text{ kg}$  (Por experiencia del laboratorio)

Agua de mezclado=  $220 \text{ kg/m}^3$

Contenido de aire= 2%

\*Paso 2. Para una relación A/C =0.6:

Cemento=  $220 / 0.6$

Cemento=  $366.67 \text{ kg/m}^3$

\*Paso 3. Para un TMA de 19 mm y un módulo de finura = 2.9, de la tabla 6.3.6

Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto= 0.61

Volumen de agregado grueso= (Volumen unitario) x PVSC Grava

Volumen de agregado grueso=  $0.61 \times 1201.85 = 733.13 \text{ kg/m}^3$

\*Paso 4. Cálculo del contenido de Arena por el método de volúmenes absolutos

	Peso (kg)	Densidad relativa	Volumen requerida
Agua	220	1	220.00
Cemento	366.67	3.15	116.40
Grava	733.13	2.28	321.55
Aire			20
Suma			677.95

Volumen de arena = 1000- Suma

Volumen de arena= 1000- 677.95 = 322.05 unidades por m<sup>3</sup>

Peso de la arena= Densidad relativa x Volumen de arena

Peso de la arena= 2.4 x 322.05= 772.92 kg

\*Paso 5. Cantidades preliminares para 1 m<sup>3</sup> de concreto

Material	kg
Agua	220
Cemento	366,67
Grava	733,13
Arena	772,92

\*Paso 6. Cantidades húmedas de agregados

Humedad grava (%)= 0.3

Humedad arena (%)= 0.4

Grava= 733.13 x (1.003)=735.33 kg

Arena= 772.92 x (1.004)= 776.01 kg

\*Paso 7. Ajuste de humedad de la mezcla

Para la grava:

$$Ajuste Humedad = \frac{\%Humedad - (80\% * \%Absorción)}{100} \times \text{Peso Grava}$$

$$A. H = \frac{0.3 - (80\% * 7.76)}{100} \times 733.13 = -43.31 \text{ kg}$$

Para la arena:

$$Ajuste Humedad = \frac{\%Humedad - (80\% * \%Absorción)}{100} \times \text{Peso Arena}$$

$$A. H = \frac{0.4 - (80\% * 4.28)}{100} \times 772.92 = -23.37 \text{ kg}$$

Solo se considera el 80% de la absorción de ambos agregado (absorción efectiva).

Al obtener signo negativo en ambos ajustes, los kilogramos obtenidos se deben sumar a la cantidad preliminar de agua.

\*Paso 8. Cantidades finales de materiales para 1 m<sup>3</sup> de concreto

Cantidades Finales (kg)	
Agua	286,69
Cemento	366,67
Grava	735,33
Arena	776,01

Ejemplificando para la relación A/C =0.6 para arena sílica.

\*Paso 1. De la tabla 6.3.3 para un revenimiento de 7.5 a 10 cm y un TMA de 19 mm:

Agua de mezclado=  $205 \text{ kg/m}^3 + 15 \text{ kg}$  (Por experiencia del laboratorio)

Agua de mezclado=  $220 \text{ kg/m}^3$

Contenido de aire= 2%

\*Paso 2. Para una relación A/C =0.6:

Cemento=  $220 / 0.6$

Cemento=  $366.67 \text{ kg/m}^3$

\*Paso 3. Para un TMA de 19 mm y un módulo de finura = 2.9

Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto= 0.61

Volumen de agregado grueso= (Volumen unitario) x PVSC Grava

Volumen de agregado grueso=  $0.61 \times 1201.85 = 733.13 \text{ kg/m}^3$

\*Paso 4. Cálculo del contenido de Arena por el método de volúmenes absolutos

	Peso (kg)	Densidad relativa	Volumen req
Agua	220	1	220.00
Cemento	366.67	3.15	116.40
Grava	733.13	2.28	321.55
Aire			20
Suma			677.95

Volumen de arena = 1000- Suma

Volumen de arena=  $1000 - 677.95 = 322.05$  unidades por  $m^3$

Peso de la arena= Densidad relativa x Volumen de arena

Peso de la arena=  $2.4 \times 322.05 = 772.92$  kg

\*Paso 5. Cantidades preliminares para  $1 m^3$  de concreto

Material	kg
Agua	220
Cemento	366,67
Grava	733,13
Arena	772,92

\*Paso 6. Cantidades húmedas de agregados

Humedad grava (%)= 0.3

Humedad arena (%)= 0.4

Grava=  $733.13 \times (1.003) = 735.33$  kg

Arena=  $772.92 \times (1.004) = 776.01$  kg

\*Paso 7. Ajuste de humedad de la mezcla

Para la grava:

$$Ajuste Humedad = \frac{\%Humedad - (80\% * \%Absorción)}{100} \times \text{Peso Grava}$$

$$A.H = \frac{0.3 - (80\% * 7.76)}{100} \times 733.13 = -43.31 \text{ kg}$$

Para la arena:

$$Ajuste Humedad = \frac{\%Humedad - (80\% * \%Absorción)}{100} \times \text{Peso Arena}$$

$$A.H = \frac{0.4 - (80\% * 4.28)}{100} \times 772.92 = -23.37 \text{ kg}$$

Multiplicando por el 80% de arena caliza

$$A.H. = -23.37 * 80 \% = -18.69 \text{ kg}$$

Solo se considera el 80% de la absorción de ambos agregado (absorción efectiva).

Al obtener signo negativo en ambos ajustes, los kilogramos obtenidos se deben sumar a la cantidad preliminar de agua.

\*Paso 8. Cantidades finales de materiales para 1 m<sup>3</sup> de concreto

Cantidades Finales (kg)	
Agua	282,00
Cemento	366,67
Grava	735,33
Arena	620.80
Sílica	155.20

