

## ***Diseño de mezcla de hormigón para evitar grietas plásticas y reducir permeabilidad***

Luis O. Soto-Escobar, BSCE  
Maestría en Ingeniería Civil  
Héctor J. Cruzado-Vélez, PhD  
Departamento de Ingeniería Civil & Ambiental  
Universidad Politécnica de Puerto Rico

**Resumen** — Las grietas plásticas son causadas por la pérdida rápida de agua en el hormigón fresco antes de fraguado, mientras permanece en estado plástico. Esto ocurre cuando la tasa de evaporación de humedad de la superficie supera la velocidad a la que el aumento de agua de exudación puede reemplazarlo. Con la reducción de permeabilidad del hormigón se ayuda a evitar las grietas y evitar que penetren iones de químicos agresivos que son facilitadores al deterioro del hormigón. Para ésta investigación, se llevaron a cabo tres tipos de mezclas de hormigón para estudiar sus comportamientos. Los resultados de estos experimentos indicaron que las mezclas de hormigón utilizando polímeros tuvieron mejores resultados, tanto en las pruebas de compresión, medición de grietas y permeabilidad de agua. Estos resultados ayudan a entender y utilizar de forma combinada polímeros que no se acostumbra utilizar de ésta manera.

**Palabras claves** — grietas plásticas, mezclas de hormigón, permeabilidad, polímeros.

### **INTRODUCCIÓN**

En Puerto Rico se tiene la experiencia que al construir cualquier tipo de estructura de hormigón (edificios de vivienda, edificios de oficina, puentes, muelles, estacionamientos multipisos, etc.), se puede observar cómo a menudo ocurren grietas. Las causas de éstas son varias, pero en ésta investigación se estudian y analizan las grietas plásticas. Se discute por qué ocurren y cómo es posible evitarlas y a su vez reducir permeabilidad, todo dentro de un ambiente adecuado de trabajo.

Se realizaron muestras de hormigón estructural con los diferentes polímeros siguiendo las directrices y parámetros de los estándares de

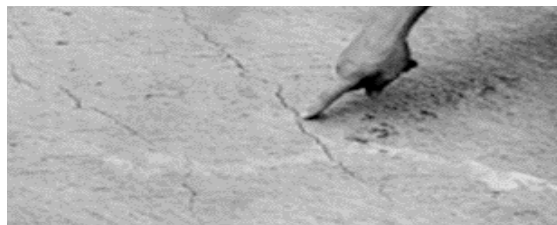
ASTM–Internacional y de la American Concrete Institute (ACI) correspondientes a los distintos aditivos y los parámetros que apliquen.

### **OBJETIVOS**

Con la utilización de polímeros disponibles en los laboratorios de investigación privada, se pretende diseñar una mezcla de hormigón que evite las grietas plásticas. Estos químicos no son utilizados comúnmente de manera comercial, ya que su uso es estrictamente para proyectos bajo el cual el laboratorio realiza pruebas para sus usos según las especificaciones a las que fueron diseñados. De esta manera se asegura que el producto es utilizado de manera efectiva.

### **GRIETAS PLÁSTICAS**

Las Grietas Plásticas ocurren antes del endurecimiento del hormigón, como resultado al asentamiento del concreto y por la pérdida rápida de agua en la mezcla mientras el hormigón está todavía en estado plástico. Estas grietas son relativamente pequeñas y pueden producirse debido al clima, cuando hay mucho viento, baja humedad y/o temperaturas altas (calentamiento térmico), pero éstas ocurren luego de varios días de remover las formaletas y en lugares de forma aleatoria. En la Figura 1, de la referencia [1], se muestra una losa con grietas plásticas visibles.



**Figura 1**  
**Muestra de grietas plásticas**

En la Figura 2, de la referencia [2], se muestra como el esfuerzo en tensión del hormigón es mayor a la resistencia en tensión, produciéndose así grietas plásticas.

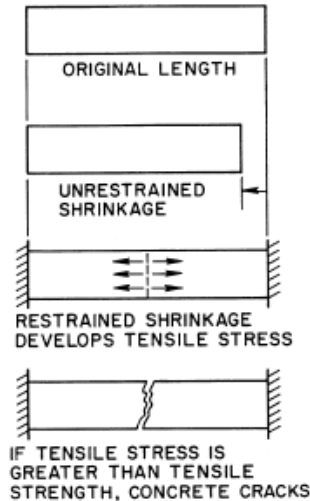


Figura 2  
Grietas plásticas

En la Figura 3, de la referencia [3], se muestran los tipos de grietas plásticas durante la construcción y donde frecuentemente ocurren.

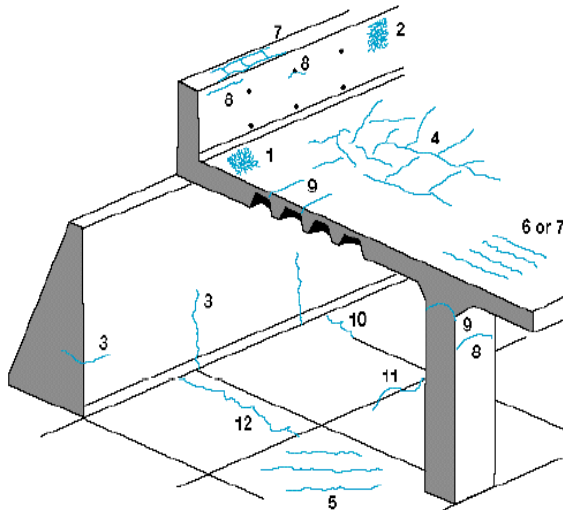


Figura 3  
Tipos de grietas plásticas

A continuación se describen las grietas según están enumeradas en la Figura 3:

1. Las grietas pueden ocurrir en las superficies pulidas.

2. Las grietas que están más llanas, con cemento para acelerar el acabado y en las superficies con materiales impermeables.
3. Las grietas causadas por la contracción temprana por calor térmico se pueden producir en los miembros profundos, cuando un exceso de calor se genera o cuando el cambio de temperatura entre el interior y la cara del elemento es demasiado alto.
4. Las grietas por contracción plástica también se producen debido a la rápida evaporación inicial de la superficie de concreto. Estas grietas pueden aparecer en losas elevadas.
5. Las grietas por contracción plástica también aparecen en las losas sobre terreno.
6. Las grietas por contracción plástica también aparecen sobre o paralelo al refuerzo.
7. Las grietas plásticas por asentamiento se puede producir sobre o paralelo al refuerzo.
8. Las grietas plásticas por asentamiento también aparecen en el lado del refuerzo o aberturas.
9. Las grietas plásticas por asentamiento también aparecen en los cambios en el espesor de la sección transversal. El asentamiento plástico es causado por la rápida evaporación.
10. Las grietas debidas a las juntas de contracción pueden ir por delante de la sierra si el corte se hace demasiado tarde.
11. Si el corte es demasiado superficial las grietas pueden ocurrir fuera de la junta.
12. Las juntas de contracción son menos eficaces en el control de grietas para refuerzo continuo a través del corte.

## POLÍMEROS UTILIZADOS PARA EVITAR LAS GRIETAS PLÁSTICAS

Los polímeros son sustancias cuyas moléculas son aproximadamente múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero, pero si el número de unidades es muy grande, se usa la expresión – polímero. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas, debido a

que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química.

A continuación se presentan los polímeros utilizados en éste proyecto, indicando sus propiedades más importantes y como son utilizados comúnmente.

- Force 10,000 Microsilica – producido por *W.R. Grace & Co.-Conn.*, es un polímero granular que produce en la mezcla de hormigón la propiedad de baja permeabilidad, pero a su vez crea grietas plásticas.
- Eclipse - producido por *W.R. Grace & Co.-Conn.*, es un polímero líquido que reduce en la mezcla de hormigón las grietas plásticas.
- Concryl Acrylic Bonder & Admix – producido por *CONSPRO CORP.*, es un producto comercial de polímeros acrílicos que mejora la resistencia, adhesión y mejora el curado en morteros; para lo cual en éste laboratorio se utiliza para producir en la mezcla de hormigón la propiedad de reducir la permeabilidad, pero a su vez tiene la propiedad de crear grietas plásticas.
- IMIFIBER-MP – producido por *CONSPRO CORP.*, es fibra de monofilamentos de polipropileno que reduce en la mezcla de hormigón las grietas plásticas y a su vez aumenta de resistencia.

## METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología y los distintos procesos necesarios para realizar el laboratorio de manera efectiva.

En la Tabla 1 se muestran las propiedades de los polímeros y demás materiales de construcción utilizados durante el laboratorio.

En la Tabla 2 se muestran las dosis recomendadas por los fabricantes. Las cantidades de los polímeros fueron sustituidos en cada material según las porciones a base del peso, para ser consistentes en el peso unitario de los diseños de las mezclas.

**Tabla 1**  
**Propiedades de materiales**

Agua	62.4 lb/ft <sup>3</sup>
Agregado Grueso	150.39 lb/ft <sup>3</sup>
Agregado Fino	170.98 lb/ft <sup>3</sup>
Force 10K	131.0 lb/ft <sup>3</sup>
Eclipse	7.70 lb/gal
IMIFIBER-IM	1.00 lb/ft <sup>3</sup>
Concryl	11.00 lb/gal

**Tabla 2**  
**Dosis recomendadas para polímeros**

Polímeros	Dosis recomendadas
Force 10K	15% del cemento
Eclipse	2.05 gal/ft <sup>3</sup>
IMIFIBER-IM	2.5 lb/ft <sup>3</sup>
Concryl	50% peso del agua

En la Tabla 3 a la Tabla 5 se muestran los diseños de las tres mezclas realizadas. Estas fueron diseñadas para resistencia de  $f'_c=4,000$  psi.

**Tabla 3**  
**Diseño de Mezcla Control**

Tipo	[lbs]
Agua	19.03
Cemento	31.12
Agregado Grueso	94.11
Agregado Fino	74.78
Total	219.04

**Tabla 4**  
**Diseño de Mezcla #1**

Tipo	[lbs]
IMIFIBER-MP	0.14
Concryl	9.51
Agua	9.51
Cemento	30.99
Agregado Grueso	94.11
Agregado Fino	74.78
Total	219.04

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestran las tres capas de recubrimiento de hormigón de tamaño 24"x36"x2" que se colocaron a fraguar de manera permanente sobre un techo expuesto a las condiciones normales a las que estaría cualquier hormigón: temperatura, viento, lluvia, sol, etc.

**Tabla 5**  
**Diseño de Mezcla #2**

Tipo	[lbs]
Eclipse	0.86
Force 10K	4.67
Agua	15.53
Cemento	26.20
Agregado Grueso	89.79
Agregado Fino	81.99
Total	219.04

El proceso del curado del hormigón se realizó siguiendo las directrices y parámetros establecidos según las referencias [4] y [5].



**Figura 4**  
**Capa de recubrimiento de Mezcla Control**



**Figura 5**  
**Capa de recubrimiento de Mezcla #1**



**Figura 6**  
**Capa de recubrimiento de Mezcla #2**

Para hacer las mezclas de hormigón se utilizaron equipos y materiales del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Puerto Rico.

## **PRUEBAS REALIZADAS**

### **Pruebas de compresión**

Las pruebas de compresión, se realizaron a los 14 y 28 días siguiendo las directrices y parámetros establecidos en la referencia [6]. Se hicieron 6 muestras de cilindros de cada mezcla, de las cuales se descartó de cada muestra 1 cilindro por sus valores atípicos y se promediaron los valores aceptados. Se realizaron muestras de control para cada prueba, para poder comparar los resultados.

En la Figura 7, se muestra la ruptura del cilindro de hormigón al estar sometido a la prueba de compresión.

Se realizaron pruebas de permeabilidad a las 3 capas de recubrimiento. Las pruebas se realizaron a los 8 meses con 14 días.



**Figura 7**  
Ruptura de cilindro en prueba de compresión

### Pruebas de permeabilidad de agua

Para la prueba se utilizó el equipo “Poroscope Plus”, que se muestra en la Figura 8. El equipo es producido por *James Instruments, Inc.* y realiza pruebas no destructivas, tanto para medir la permeabilidad de agua y permeabilidad de aire.

De la prueba de permeabilidad se obtiene el valor de WAR, que es la tasa de absorción de agua [ $\text{sec/ml} * 10^3$ ] utilizada en el “Poroscope Instruction Manual” en la referencia [7].



**Figura 8**  
Equipo - Poroscope Plus

En las Figuras 9 y 10, se muestran las pruebas de permeabilidad de agua, que se realizaron durante un día soleado y con baja humedad para que no afectara las lecturas de las pruebas. El proceso de obtener las lecturas requiere precisión al momento de hacer los barrenados. Para ésta prueba se hacen un mínimo de 4 lecturas y se descarta cualquier lectura atípica. Luego se promedian los valores aceptados.



**Figura 9**  
Prueba de permeabilidad - Mezcla #1



**Figura 10**  
Prueba de permeabilidad - Mezcla #2

### Mediciones de grietas

Las mediciones de grietas se realizaron en las mismas capas de recubrimiento que se hicieron las

pruebas de permeabilidad. Las pruebas se realizaron en dos ocasiones: a los 35 días y a los 7 meses & 21 días. El estudio y medición de grietas se realizó siguiendo las directrices y parámetros establecidos en la referencia [2].

Para la prueba se utilizó el equipo “Crack Detection Pocket Microscope” que se muestra en la Figura 11. Este equipo es producido por *CAPCO Test Equipment*.



**Figura 11**  
Equipo – Crack Detection Microscope

En las Figuras 12 y 13, se muestran las lecturas magnificadas de las pruebas de grietas. Para éste proyecto, era muy importante realizar las pruebas en dos ocasiones y con un tiempo de diferencia considerable para determinar cómo se comportan las mezclas de hormigón a largo tiempo.



**Figura 12**  
Medición de grietas - Mezcla #1



**Figura 13**  
Medición de grietas - Mezcla #2

Para éstas pruebas se hace un mínimo de 3 lecturas y se descarta cualquier lectura atípica. Luego se promedia los valores aceptados, se tabulan y grafican los datos para ser analizados y hacer las conclusiones y/o recomendaciones a los diseños de mezcla.

## RESULTADOS

En las Tablas 6, 7 y 8 se muestran los resultados de las pruebas de compresión. Con los valores promedios de las pruebas de compresión se realizó la gráfica de la Figura 14.

**Tabla 6**  
Prueba de compresión para Mezcla Control

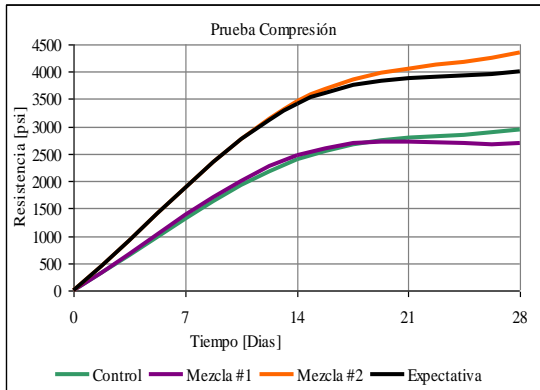
ID	Dias	$f_c$ [psi]	$f_c$ Prom. [psi]	% vs Diseño	% vs Control
#1	14	2,465.0	2,389.0	59.7%	59.7%
#2		2,313.0			
#3	28	2,941.0	2,937.3	73.4%	73.4%
#4		2,930.0			
#5		2,941.0			

**Tabla 7**  
Prueba de compresión para Mezcla #1

ID	Dias	$f_c$ [psi]	$f_c$ Prom. [psi]	% vs Diseño	% vs Control
#1	14	2,543.0	2,484.0	62.1%	104.0%
#2		2,425.0			
#3	28	2,616.0	2,691.0	67.3%	91.6%
#4		2,719.0			
#5		2,738.0			

**Tabla 8**  
Prueba compresión para Mezcla #2

ID	Dias	f <sub>c</sub> [psi]	f <sub>c</sub> Prom. [psi]	% vs Diseño	% vs Control
#1	14	3,019.0	3,463.5	86.6%	145.0%
#2		3,908.0			
#3	28	4,281.0	4,350.3	108.8%	148.1%
#4		4,469.0			
#5		4,301.0			



**Figura 14**  
Gráfica de prueba de compresión

Según los resultados obtenidos de las Pruebas de Compresión podemos determinar lo siguiente:

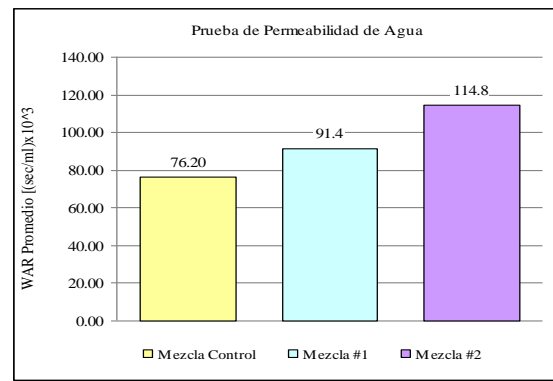
- Se puede ver en la Tabla 6 que la Mezcla Control no alcanzó la resistencia de diseño  $f_c = 4,000$  psi y sólo obtuvo 2,937 psi, lo que es un 73.4% del diseño.
- Se puede ver en la Tabla 7 que la Mezcla #1 obtuvo una resistencia  $f_c = 2,691$  psi, lo que es 91.6% de la Mezcla Control y 67.3% del diseño.
- Se puede ver en la Tabla 8 que la Mezcla #2 es la mezcla de más resistencia con  $f_c = 4,330$  psi, lo que es 108% de la Mezcla Control y 148% del diseño; también se puede observar en la Figura 14.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de las pruebas de permeabilidad de agua. Con los valores promedios de WAR, se realizó la gráfica de la Figura 15.

**Tabla 9**  
Prueba de permeabilidad de agua - 8 meses con 14 días

	ID	Tiempo [sec]	WAR [(sec/ml)x10 <sup>3</sup> ]	Tiempo Prom. [sec]	WAR Prom. [(sec/ml)x10 <sup>3</sup> ]	Quality*	% Dif.
Control	#1	702	70	762.0	76.2	Good	0.0%
	#2	771	77				
	#3	813	81				
Mezcla #1	#1	851	85	938.3	91.4	Good	19.9%
	#2	935	92				
	#3	1029	97				
Mezcla #2	#1	1087	110	1141.0	114.8	Excellent	50.7%
	#2	1122	113				
	#3	1214	121				

\*Recomendado por "Porosicope Plus Operating Manual"



**Figura 15**  
Gráfica de prueba de permeabilidad de agua

Según los resultados obtenidos de las Pruebas de Permeabilidad de Agua podemos determinar lo siguiente:

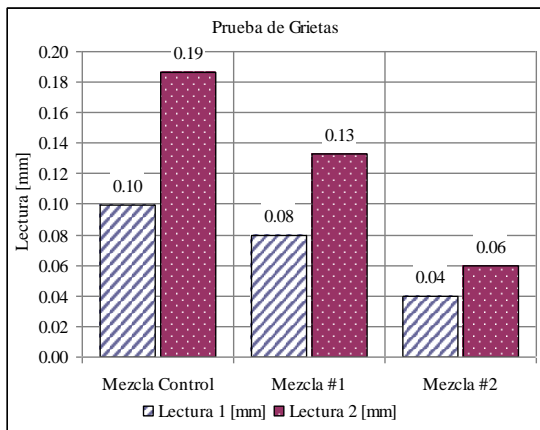
- En la Tabla 9 se puede ver que en la Mezcla Control el valor WAR promedio es de 76.2, según los valores recomendados en el manual del equipo [7], se clasifica como "Buena Calidad"; por lo que a pesar que es de buena calidad, es la mezcla de mayor permeabilidad.
- En la Tabla 9 se puede ver que la Mezcla #1 tuvo un valor WAR promedio de 91.4, lo que la clasifica como de "Excelente Calidad", según el manual del equipo [7]. La mezcla tiene 19.9% menos permeabilidad que la Mezcla Control.
- En la Tabla 9 se puede ver que la Mezcla #2 tuvo un valor WAR promedio de 114.8, lo que la clasifica como de "Excelente Calidad", según el manual del equipo [7]. La mezcla tiene 50.7% menos permeabilidad que la

Mezcla Control, por lo que es la mezcla de menor permeabilidad y la que mejores resultados obtuvo; según también se puede observar en la Figura 15.

En la Tabla 10 se muestran los resultados de las mediciones de grieta. Estas mediciones se utilizaron para realizar la gráfica de la Figura 16.

**Tabla 10**  
**Prueba de grietas**

ID	35 días		7 meses & 21 días		Dif. % Lectura 1 vs Lectura 2
	Lectura 1 [mm]	Dif. %	Lectura 2 [mm]	Dif. %	
Mezcla Control	0.10	0.0%	0.19	0.0%	46.4%
Mezcla #1	0.08	-20.0%	0.13	-28.6%	40.0%
Mezcla #2	0.04	-60.0%	0.06	-67.9%	33.3%



**Figura 16**  
**Gráfica de mediciones de grietas**

Según los resultados obtenidos de las Pruebas de mediciones de grietas se puede determinar lo siguiente:

- En la Tabla 10 se puede observar que para la Mezcla Control la primera lectura de grietas fue de 0.10 mm de ancho y en la segunda lectura es de 0.19 mm, la cual es la de mayor grieta.
- En la Tabla 10 se puede observar que para la Mezcla #1, la primera lectura de grietas fue de 0.08 mm de ancho y la segunda lectura fue de 0.13 mm, lo cual es 20% y 28.6% de diferencia, respectivamente, de las lecturas de la Mezcla Control.

- En la Tabla 10 se puede observar que para la Mezcla #2, la primera lectura de grietas fue de 0.04 mm de ancho y la segunda lectura fue de 0.06 mm, lo cual es 60% y 67.9% de diferencia, respectivamente, de las lecturas de la Mezcla Control. Se puede apreciar en la Figura 16, las grietas de la Mezcla #2 fueron las más pequeñas, lo que representa los mejores resultados.

## CONCLUSIÓN

Luego de resumir y analizar los datos obtenidos a lo largo del proyecto se puede determinar que la mezcla que obtuvo los mejores valores y desempeños fue la *Mezcla #2 - Eclipse & Force 10K*, tanto en las pruebas de compresión, pruebas de permeabilidad y pruebas de grietas.

Esta mezcla demostró ser excelente calidad y cumplió con los requisitos del laboratorio, ya que los polímeros utilizados en los diseños de la mezcla no se acostumbran a utilizar de forma combinada. Nos provee una herramienta para evitar las grietas plásticas y a la misma vez reducir la permeabilidad, por lo que puede ser recomendada para futuras investigaciones y pruebas.

## RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS

### FUTUROS

Para una futura experimentación se debería trabajar con las variantes en los porcentajes de los polímeros para poder determinar un diseño de mezcla que maximice las propiedades de cada uno. Además realizarles pruebas periódicas por al menos un año, para poder determinar de manera más efectiva su comportamiento.

Se recomienda que se realice bajo las condiciones reales de campo, o sea realizar las mezclas en horas donde esté la temperatura alta, la humedad baja, con viento considerable, etc.

El propósito principal debería ser poder crear el diseño de mezcla que se pueda utilizar de manera principal o de primera intención, en vez de ser sólo con propósitos de rehabilitación. Así se disminuye los costos de mantenimiento de las estructuras,



eliminando las grietas, la humedad, las filtraciones y demás problemas que éstas causan.

### **REFERENCIAS**

- [1] *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*, ACI 302.1R-04, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. March 2004, pp. 63-65.
- [2] *Control of Cracking in Concrete Structures*, ACI 224R-01, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. May 2001, pp. 11-17.
- [3] Grant T. Halvorson, *Troubleshooting Concrete Cracking During Construction*, Concrete Construction, October 1993, pp. 3-4.
- [4] *Specification for Curing Concrete*, ACI 308.1-11, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. April 2011, pp. 6-9.
- [5] ASTM STANDARD C 192/C 192M – 02 *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*, pp. 1-8.
- [6] ASTM STANDARD C 39/C 39M – 01 *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, , pp. 1-7.
- [7] *Poroscope Instruction Manual*, NDT James Instruments Inc., Chicago IL. 2007, pp. 1-11.