

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**FACTIBILIDAD DE MODIFICACIÓN DEL ENSAYO WINDSOR PARA LA
DETERMINACION DE RESISTENCIA EN EL CONCRETO.**

POR:

ING. ISAAC LÓPEZ VALDEZ

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2024



Factibilidad de modificación del ensayo Windsor para la determinación de resistencia en el concreto. Tesis presentada por Isaac López Valdez como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Estructuras, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado

Dra. Mirna Teresita Armendáriz Hernández
Coordinadora Académica

Dr. José Mora Ruacho
Director de Tesis

Diciembre 2024

Fecha

COMITÉ

Dr. José Mora Ruacho
M.I. Xochitl Aidé Valencia Fierro
M.I. Jorge Mendoza Hernández
M.I. Romualdo Chanes Mendoza



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

03 de diciembre de 2024.

ING.ISAAC LÓPEZ VALDEZ
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Estructuras, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. José Mora Ruacho** para que lo desarrolle como Tesis, con el título **“Factibilidad de modificación del ensayo Windsor para determinación de resistencia en el concreto”**.

Índice de Contenido

Dedicatoria

Agradecimientos

Índice de tablas.

Índice de figuras.

Capítulo 1: Introducción.

1.1 Justificación.

1.2 Fundamentación teórica.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo Principal.

1.3.2 Objetivos Específicos.

1.4 Hipótesis.

Capítulo 2. Estado del arte en métodos no destructivos

2.1 Método de dureza superficial: martillo de rebote Schmidt.

2.2 Método de velocidad de pulso ultrasónico.

2.3 Prueba de extracción Pullout.

2.4 Método de la prueba de ruptura Break-Off.

2.5 Método de la madurez.

2.6 Métodos de resistencia a la penetración.

**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Circuito No. 1, Campus Universitario II
Tel. (614) 442-9500
Chihuahua, Chih., México
www.uach.mx/fing





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 2.6.1 Método de penetración Windsor
- 2.6.2 Prueba de penetración de pasador.
- 2.6.3 Aspecto económico de la prueba.

Capítulo 3. Metodología experimental.

- 3.1 Caracterización de los materiales.
- 3.2 Diseño de las mezclas de referencia.
- 3.3 Elaboración de los especímenes.
- 3.4 Variabilidad en la prueba.
- 3.5 Procedimiento de correlación.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

- 4.1 Resultados para concretos con agregados redondeados.
- 4.2 Resultados para concretos con agregados triturados
- 4.3 Potencia y mecanismos de falla.
- 4.4 Grado de destructividad de la prueba a la penetración.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

Bibliografía.

Currículo Vitae

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

**DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES
MARTÍNEZ**

**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Circuito No. 1, Campus Universitario II
Tel. (614) 442-9500

Chihuahua, Chih., México

www.uach.mx/fing



Dedicatoria

A todas las personas que formaron parte de este gran proyecto: a mi familia, amigos, maestros y colegas; a quienes están presentes y a quienes ya no lo están. Cada uno contribuyó con su valiosa y particular participación en las distintas etapas de este camino, el cual comenzó en enero de 2020 con el propósito de reingresar a la casa de estudios que tanto me ha dado.

Hace una década, esta misma institución me formó como ingeniero civil, y hoy, con el deseo de especializarme en el área de estructuras, culmino esta nueva etapa lleno de gratitud.

Agradecimientos

A Dios por la oportunidad que me regala cada día y por el regalo de la razón, a mis maestros por compartir su conocimiento y su tiempo, a mi esposa y mis hijas por toda su paciencia y apoyo.



Índice de contenidos.

Dedicatoria	5
Agradecimientos	6
Índice de tablas.	9
Índice de figuras.	10
Capítulo 1: Introducción.	12
1.1 Justificación.	13
1.2 Fundamentación teórica.	14
1.3 Objetivos.	16
1.3.1 Objetivo Principal.	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Hipótesis.	17
Capítulo 2. Estado del Arte en métodos no destructivos.....	18
2.1 Método de dureza superficial: martillo de rebote Schmidt.....	18
2.2 Método de velocidad de puso ultrasónico.....	21
2.3 Prueba de extracción Pullout.	24
2.4 Método de la prueba de ruptura Break-Off.....	27
2.5 Método de la madurez.....	27
2.6 Métodos de resistencia a la penetración.....	29
2.6.1 Método de penetración Windsor.....	29
2.6.2 Prueba de penetración de pasador.....	33
2.6.3 Aspecto Económico de la prueba.....	33
Capítulo 3. Metodología Experimental.	35
3.1 Caracterización de los materiales.....	37
3.2 Diseño de las mezclas de referencia.	38
3.3 Elaboración de los especímenes.....	39
3.4 Variabilidad en la prueba.	41
3.5 Procedimiento de correlación.	42

Capítulo 4. Resultados y discusión.	43
4.1 Resultados para concretos con agregados redondeados.....	44
4.2 Resultados para concretos con agregados triturados	50
4.3 Potencia y mecanismos de falla.	56
4.4 Grado de destructividad de la prueba a la penetración.	57
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.	57
Bibliografía.	59
Currículo Vitae	61

Índice de tablas.

Tabla 1.- Principales métodos de prueba para la estimación de resistencia a compresión en el concreto.	12
Tabla 2.- Índices de precisión para las pruebas de resistencia con sondas según ASTM C803.	36
Tabla 3.- Características de los agregados fino y grueso utilizado en las mezclas de concreto.	37
Tabla 4.- Dosificación para las mezclas de concreto con agregado redondeado.	38
Tabla 5.- Dosificación para las mezclas de concreto con agregado triturado.	38
Tabla 6.- Coeficientes típicos de variación de los resultados de las pruebas, y precisiones máximas de la predicción de resistencia in-situ para los principales métodos.	42
Tabla 7.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados redondeados para el método Windsor.	45
Tabla 8.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados redondeados para el método Windsor modificado.	47
Tabla 9.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados triturados para el método Windsor.	51
Tabla 10.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados triturados para el método Windsor Modificado.	53

Índice de figuras.

Figura 1.- Esquema de falla del método Windsor y método Windsor modificado. -----	14
Figura 2.- Dos tipos básicos de herramienta. -----	15
Figura 3.- Comparación grafica del ensayo Windsor y Windsor modificado-----	16
Figura 4.- Esquema para ilustrar el funcionamiento del martillo de rebote Schmidt. -----	19
Figura 5.- Curvas de conversión estándar de esclerometría. -----	19
Figura 6.- Probador ultrasónico de velocidad de pulso. -----	21
Figura 7.- Configuraciones de medición de velocidad de pulso. -----	22
Figura 8.- Esquema de la prueba de extracción Pullout. -----	24
Figura 9.- Equipo moderno de prueba Pull-out para determinar la resistencia en estructuras viejas. -----	26
Figura 10.- Equipo medidor de madurez de concreto. -----	28
Figura 11.- Vista del equipo para el ensayo Windsor. A) Pistola, B) Perno para concreto de resistencia normal, C) Plantilla de ubicación, y D) Medidor de profundidad digital. -----	30
Figura 12.- Perno utilizado en el ensayo Windsor. -----	30
Figura 13.- Correlación entre resistencia a la compresión y longitud de sonda expuesta.-----	32
Figura 14.- Molde utilizado para elaboración de bloques de concreto en pruebas método Windsor. -----	39
Figura 15.- Eliminación de aire atrapado en probetas cilíndricas. -----	40
Figura 16.- Cuarto de curado de la Universidad.-----	40
Figura 17.- Prueba ensayo Windsor Modificado.-----	41
Figura 18.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados redondeados utilizando el método Windsor. -----	47
Figura 19.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados redondeados utilizando el método Windsor modificado. -----	48
Figura 20.- Comparativa de los coeficientes de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados redondeados utilizando el método Windsor / Windsor modificado. ---	49
Figura 21.- Penetración perpendicular a la superficie de prueba que sobrepasa la capa de mortero. -----	50
Figura 22.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados triturados utilizando el método Windsor. -----	52
Figura 23.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados triturados utilizando el método Windsor modificado. -----	54

Figura 24.- Comparativa de los coeficientes de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados triturados utilizando el método Windsor / Windsor modificado. -----	55
Figura 25.- Falla representativa en el concreto durante la prueba de penetración. -----	56

Capítulo 1: Introducción.

La tendencia actual en la infraestructura de concreto reforzado ha cambiado sustancialmente en los campos desde la construcción en nuevas estructuras, al de la rehabilitación o mantenimiento de estructuras existentes. Esto se debe principalmente a la reducción del presupuesto del producto Interno Bruto (PIB) a nivel mundial, sumado a otros entornos y ambientes económicos (Kose & Ohnsorge, 2023). Por otra parte, aún con las expectativas de variables de diseño en estructuras y la presente generalización de términos aprendidos en la práctica, en las últimas décadas en ingeniería estructural viene ganando peso el termino *durabilidad*, debido a que, el solo considerar la *resistencia* no es un parámetro que garantice la vida útil de una estructura.

Aún y con los retos de cara al futuro, para cumplir con los términos de durabilidad exigidos para la rehabilitación y/o durabilidad de la estructura en el entorno de pruebas de laboratorio, los métodos tradicionales no cumplirían con el perfil exigido en la determinación de las propiedades mecánicas del material. Desde 1960 hasta nuestros días se ha venido desarrollando el concepto de métodos no destructivos (Malhotra & Carino , 2004) en donde se ha tratado de encontrar una ventaja en fiabilidad, practicidad y rapidez en la obtención de resultados.

Tabla 1.- Principales métodos de prueba para la estimación de resistencia a compresión en el concreto.

Característica de investigación	Nombre de la prueba	Normativa
Resistencia del Concreto	Método de dureza superficial	ASTM C 805
	Método de velocidad de pulso ultrasónico	ASTM C 597
	Prueba de extracción (Pullout)	ASTM C 900
	Prueba de ruptura (Break-off)	ASTM C 1150
	Método de la madurez	ASTM C 1074
	Método de resistencia a la penetración	ASTM C 803

Hoy día, existe bastante literatura que proporciona información referente a la determinación de las propiedades mecánicas, de condición del material, etc., reflejados en la descripción de varios métodos de índole no-destructivo, de los cuales, cada uno ha sido concebido para medir una determinada propiedad del material que, a partir de esta se puede estimar cuantitativa y cualitativamente la resistencia del concreto en una porción o zona de la estructura (Malhotra & Carino , 2004). En la Tabla 1 se enlistan de forma resumida algunos de los métodos más utilizados en laboratorio y campo.

1.1 Justificación.

Las demandas actuales de seguridad referentes al manejo de instrumentos que puedan comprometer la integridad física del operario y su entorno, enunciadas en la normatividad mexicana (www.stps.gob.mx, 2022), (NOM-004-STPS, 1999), así como en normativas internacionales, son un tema que hoy día no se puede dejar pasar, existe una extensa literatura en la que se habla de la mejora y modificación de la instrumentación de aparatos utilizados, en este caso se hablara del ensayo Windsor. Aunque son necesarios ciertos parámetros como la velocidad a la que debería penetrar la sonda a través de la estructura, la medición de la penetración, el daño local de la estructura asociado al ensayo, etc., estos parámetros pueden ser modificados a conveniencia para intentar llegar al mismo objetivo que es determinar la resistencia en el concreto. Actualmente el aspecto económico y comercial, la factibilidad de conseguir los insumos del método, la seguridad del operario, etc. han convertido al ensayo Windsor en un método poco factible en un uso generalizado.

El equipo que se propone para la realización del ensayo de penetración, presenta ventajas en comparación al sistema de ensayo Windsor. Para lograr la penetración de la sonda que utiliza el ensayo Windsor es necesaria una gran cantidad de energía, lo que provoca una zona de fractura o hendidura en la superficie del concreto en la que parte de la energía es absorbida por el aplastamiento y fractura del mismo durante la realización de la prueba. El método Windsor modificado que se propone, utiliza sólo la energía necesaria para lograr la penetración de la sonda, la cual sería de menor diámetro y en consecuencia ocasionará menores daños locales sobre la superficie del concreto,

así como una mayor seguridad física al operario y mayor rapidez en la elaboración de la prueba; de acuerdo con investigaciones similares realizadas por (Selcuk, Kayabali, Gokce, & Simsek, 2012), el ensayo a la penetración Windsor modificado que se propone, presentaría ciertas ventajas de operación al resultar más práctico sobre el ensayo Windsor y ofrecería mantener la fiabilidad en resultados. El equipo de penetración e insumos necesarios para llevar a cabo el ensayo Windsor modificado resultan ser asequibles y fáciles de encontrar.

1.2 Fundamentación teórica.

El planteamiento derivado en la descripción del método Windsor se basa en el modelo de falla en la penetración de la sonda y los efectos de fractura en la zona local de daño como se muestra en la Figura 1. En el patrón de penetración, entre el método Windsor y el método propuesto, el primero, al lado izquierdo de la imagen, utiliza un perno más robusto, el cual cuenta con un diámetro de 6.35 mm en su punta y 7.94 mm en el cuerpo del mismo, y es proyectado a gran velocidad (James, 2018), por lo que tendrá zona de daño mayor en comparación con el segundo, en el cual se utilizarán pernos de 3.68 mm de diámetro que necesitan menos velocidad para lograr la penetración.

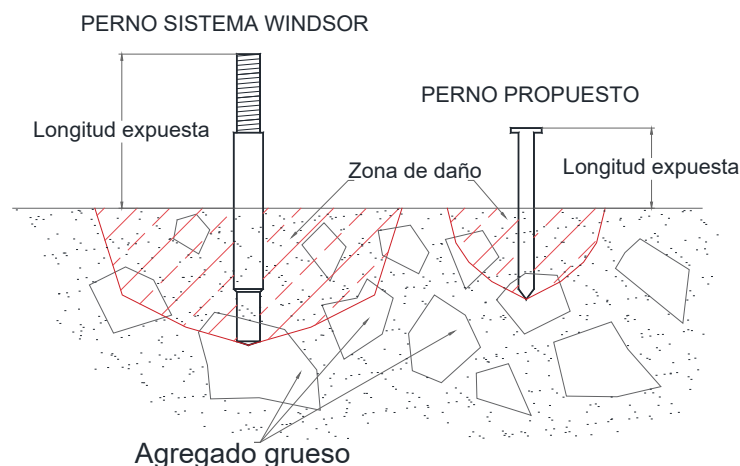


Figura 1.- Esquema de falla del método Windsor y método Windsor modificado.

La diferencia en la zona de falla esperada debería ser menor dado la menor cantidad de energía desarrollada por el método Windsor modificado que permite un menor daño local. Esto es importante al momento de relacionar la energía residual con el desprendimiento

de la parte superficial de mortero en la parte superior del cuerpo de prueba o estructura. Se puede aprovechar esta ventaja para orientar la mayor parte de la energía en insertar tal sonda.

Para la correcta penetración de la sonda, se debe considerar que esta misma no sufra pandeo al momento de introducirse en el material. Si estas condiciones son cumplidas, se puede asegurar una buena factibilidad en el método propuesto.

El equipo propuesto para la realización de los ensayos de penetración consiste en la utilización de un sistema de fijación con equipo comercial que incluye pistola de acción indirecta, de baja velocidad, Figura 2, en la cual los gases en expansión actúan sobre un pistón interno que impulsa el perno o clavo, alcanzando una velocidad aproximada de 170 m/s (HILTI, 2013).

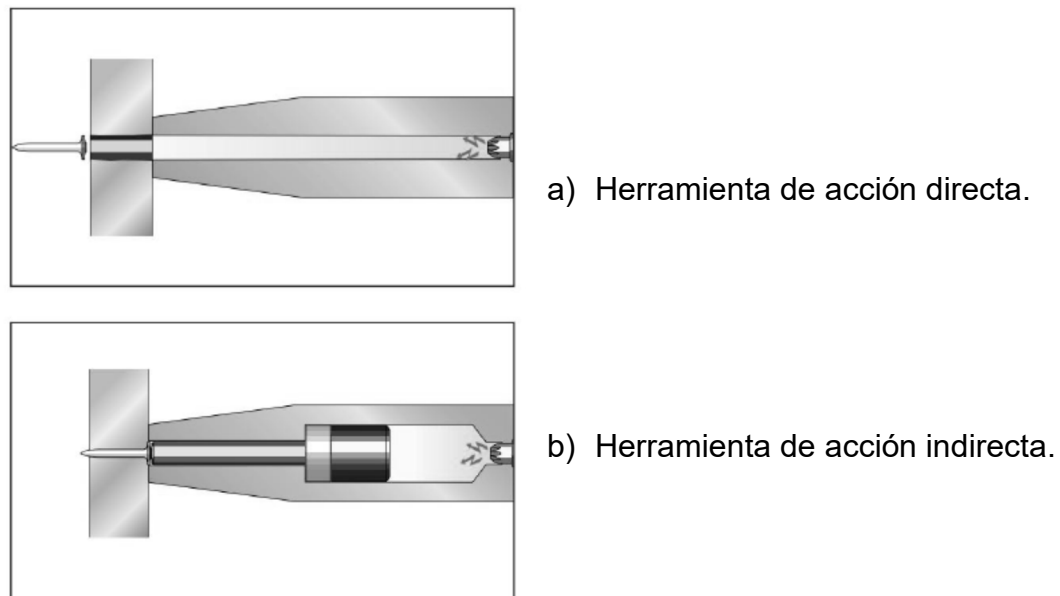


Figura 2.- Dos tipos básicos de herramienta.

En la siguiente imagen Figura 3. se muestra la proyección de cómo se espera que resulte la comparativa entre las gráficas de correlación: Longitud de exposición del perno/ resistencia a la compresión, entre el ensayo Windsor y el ensayo Windsor modificado.

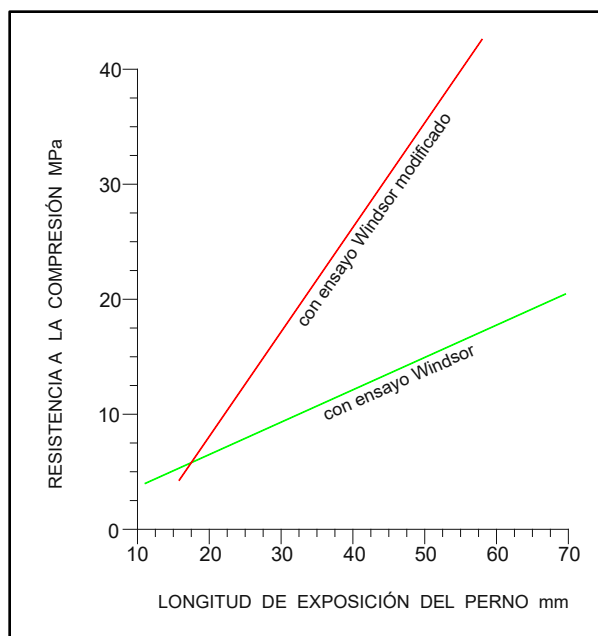


Figura 3.- Comparación grafica del ensayo Windsor y Windsor modificado

Como se comentó anteriormente el método propuesto genera menor energía, por lo tanto, se espera que sea mayor la longitud expuesta del perno, lo que implica una mayor pendiente en la línea de la gráfica: longitud de exposición del perno / resistencia a la compresión; así, cada milímetro representa un mayor aumento o disminución en la resistencia a la compresión, resultando aún más importante el cuidado y la precisión con la que se realicen las mediciones del perno insertado.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo Principal.

- Mostrar un perfil de elementos actualizados que sustituyan parcialmente el método Windsor para adecuarse a las tendencias de seguridad y de mercado, así como aumentar el uso del método en la actividad de laboratorios y campo.
- Determinar un modelo de fractura comparativo en ambos métodos para determinar la similitud y fiabilidad para su uso e implementación.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Realizar pruebas de penetración y resistencia a compresión simple en probetas de concreto fabricado con agregado calizo y silíceo.
- Construir curvas de correlación penetración-resistencia en el método de penetración Windsor modificado para que sean compatibles con el método Windsor.
- Analizar en la medida de lo posible los perfiles de falla del daño localizado por la penetración de las sondas mediante el método Windsor y Windsor modificado.
- Determinar los valores de resistencias a compresión máximas en el que el método Windsor modificado propuesto tenga una fiabilidad aceptable.

1.4 Hipótesis.

La energía de penetración desarrollada por el ensayo Windsor pudiera resultar con valores residuales no necesarios para el impulso de su sonda. Esto puede resultar en el efecto de una zona local de daño amplia que pudiese afectar el resultado de penetración de la sonda.

Una energía menor desarrollada por el método Windsor modificado que se propone, pudiera mitigar los daños ocasionados si se compara con la alta energía del ensayo Windsor. De esta forma el ensayo Windsor modificado pudiera emplear eficientemente su energía desarrollada sólo o en gran medida para hacer penetrar su sonda.

La colocación y comparación de los datos de estos resultados de cara a encontrar una ventaja lo suficientemente sólida en este método, ofrecería una gran ventaja para el aprovechamiento, implementación y generalización en su uso como método no destructivo para estimar la resistencia en estructuras de concreto.

Capítulo 2. Estado del Arte en métodos no destructivos

Durante décadas se ha buscado determinar las propiedades del concreto mediante técnicas de ensaye no destructivas, dichas técnicas se definen como pruebas que no causan daño estructural significativo en el concreto, su ejecución deberá ser relativamente sencilla y rápida, y ofrecer la posibilidad de realizar un buen número de determinaciones sobre la estructura sin que esto signifique alteraciones de funcionalidad y resistencia en la misma, otra característica igual de importante es que deberán tener un bajo costo; partiendo de lo anterior se han desarrollado a lo largo del tiempo un buen número de métodos por parte de los estudiosos, de los cuales se mencionarán algunos de los más utilizados hoy día.

2.1 Método de dureza superficial: martillo de rebote Schmidt.

Debido a la propiedad del concreto, de aumentar su dureza y resistencia con el paso del tiempo, se han desarrollado métodos de ensayo para la medición de dicha propiedad.

Los métodos basados en estimar la dureza superficial, o a pocos milímetros de la superficie, han resultado ser los más utilizados hoy día. El método basado en el principio de rebote para estimar la dureza superficial del concreto y a partir de ello determinar su resistencia a la compresión, es el ensayo de esclerometría (ASTM C805, 2018).

Es una técnica de ensayo no destructivo y se basa en la medición de la dureza de la superficie del concreto Figura 4, la cual se encuentra relacionada con su resistencia a la compresión.

El esclerómetro o martillo de rebote Schmidt, consiste en una punta de acero endurecido que se presiona contra la superficie del concreto mediante un resorte, se aplica una carga conocida y se mide la deformación elástica de la punta de acero, la energía necesaria para deformar la punta se utiliza para medir la dureza superficial del concreto la cual se expresa en una escala arbitraria.

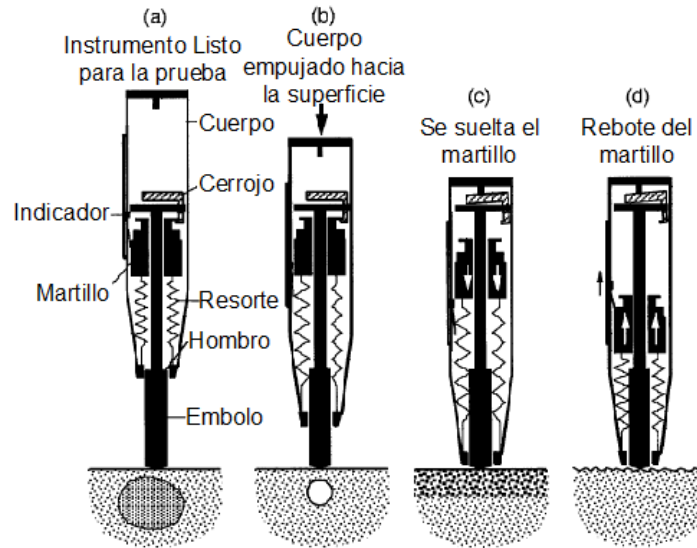


Figura 4.- Esquema para ilustrar el funcionamiento del martillo de rebote Schmidt.

Se han desarrollado correlaciones empíricas para estimar la resistencia del concreto a partir de las mediciones de esclerometría Figura 5.

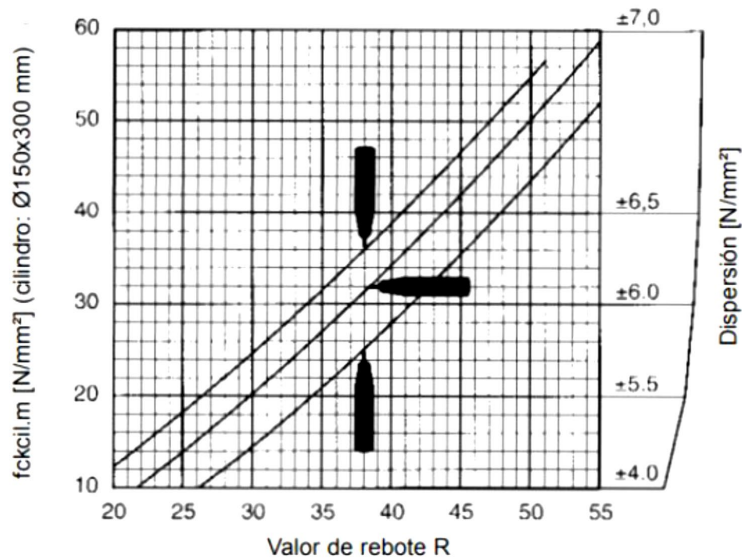


Figura 5.- Curvas de conversión estándar de esclerometría.

A pesar de ser la técnica más difundida y utilizada en la práctica, el esclerómetro por sí solo no mide la resistencia a compresión y no deberán de ser empleadas las gráficas incluidas en el esclerómetro para reportar directamente una resistencia; ya que cada

martillo esta provisto de curvas de correlación desarrolladas por el fabricante, en las que se utilizan especímenes cúbicos estándar, y las condiciones de prueba muy probablemente no serán similares a las que se utilizaron cuando se realizó la calibración original del instrumento; por lo que se recomienda realizar la calibración del instrumento mediante la fabricación de nuevas curvas de correlación elaborando especímenes de laboratorio con los materiales que se utilizaran en la construcción.

En este método de prueba deberá tener en consideración que existen ciertas condiciones que afectan los resultados del martillo de rebote, tales como: la textura de la superficie, ya que si es rugosa, la punta del embolo provoca un aplastamiento excesivo y se medirá un número de rebote reducido, el tamaño de la muestra afectara, debido a que cualquier movimiento bajo el impacto reducirá las lecturas del rebote, la edad del concreto también influye ya que la tasa de aumento de dureza superficial del concreto es rápida hasta los 7 días, después de ese tiempo es más lenta la ganancia de dureza superficial, para el concreto viejo se recomienda elaborar tablas de correlación exclusivas, antes de los 3 días de edad tampoco es recomendable realizar la prueba pues la superficie aún es muy blanda, las condiciones de humedad en la superficie también afectaran decisivamente los resultados, entre más humedad menor será el número de rebote, el tipo de agregado a utilizar afecta el número de rebote, respecto a la carbonatación de la superficie cuando es un caso extremo, puede hacer variar el número de rebote hasta en un 50% más alto, en este caso se deberán de considerar factores de corrección, de lo contrario se sobreestimara la resistencia del concreto. Cuando se tomen lecturas a un elemento de concreto reforzado, se deberá localizar previamente el acero y realizar el ensayo a un punto alejado del mismo debido a que al acero de refuerzo afecta sensiblemente la lectura.

Si se desarrolla una curva de correlación adecuada para el martillo, en la que se permitan algunas de las variables descritas anteriormente, la precisión de la estimación de la resistencia a la compresión de especímenes debidamente elaborados y probados en condiciones de laboratorio se encontrará entre ± 15 y ± 20 %, resultando ser más

probable un 25 % en la precisión de la estimación de la resistencia del concreto en una estructura (Malhotra & Carino , 2004).

En resumen, el método se aplica para evaluar la uniformidad del concreto in-situ, para delimitar zonas de concreto pobre o deteriorado en una estructura y para estimar el desarrollo de resistencia in-situ. Además, no es un método satisfactorio para predecir el desarrollo de resistencia del concreto en edades tempranas.

2.2 Método de velocidad de puso ultrasónico.

El método de velocidad de pulso ultrasónico fue desarrollado por primera vez en Canadá por Leslie y Cheesman entre los años 1945 y 1949, quienes desarrollan un instrumento llamado “el soniscopio”; al mismo tiempo e Inglaterra Jones desarrolla un instrumento llamado “el probador ultrasónico”, ambos instrumentos eran bastante similares, y con solo pequeñas diferencias.

El instrumento de prueba moderno mostrado en la Figura 6. consta de un conjunto de transductores con frecuencias de resonancia que van de 25 a 100 kHz, uno de ellos será el medio generador de pulso llamado “transmisor”, el cual producirá e introducirá un pulso de onda en el concreto, el otro será el medio receptor que detecta la llegada del pulso llamado “receptor”, el cual deberá medir con precisión el tiempo que tarda en viajar el pulso atreves de una distancia “L”.



Figura 6.- Probador ultrasónico de velocidad de pulso.

Cabe destacar que dicho método permite que el espécimen pueda ser probado en repetidas ocasiones y en el mismo lugar ya que la técnica consiste en la emisión ondas mecánicas las cuales no provocan ningún daño al elemento.

En este método se crea un pulso de onda ultrasónica a través del concreto en un punto de la superficie del objeto de prueba, y se mide el tiempo de viaje desde un punto a otro, al conocerse la distancia entre los dos puntos, se puede determinar la velocidad del pulso de onda, de acuerdo a la teoría de propagación de ondas son tres los tipos de onda que se propagan: ondas de compresión (ondas longitudinales), ondas de corte (ondas transversales), y ondas superficiales (ondas de Rayleigh), cada tipo de onda se propaga con su velocidad característica, y la velocidad particular de una onda dependerá de las propiedades elásticas y de la densidad del medio.

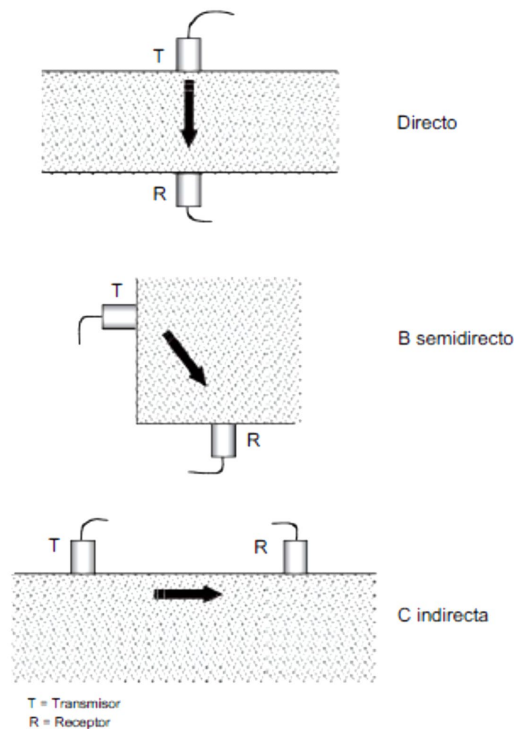


Figura 7.- Configuraciones de medición de velocidad de pulso.

Los transductores que se utilizan para probar concreto generan principalmente ondas de compresión predominantemente en una frecuencia, dirigiendo la mayor parte de la

energía a lo largo del eje normal a la cara del transductor; la velocidad del pulso para el concreto ordinario oscila entre 3,700 y 4,200 m/s; existen tres configuraciones en las que se pueden disponer los transductores Figura 7., estas son: transmisión directa, transmisión semidirecta y transmisión indirecta o superficial, siendo la transmisión directa la más deseable y precisa.

Entre los factores que afectan la velocidad del pulso se encuentran los que resultan directamente de las propiedades del concreto como lo son: el tipo y cantidad de agregado grueso y fino, el tipo de cemento, la relación agua-cemento, el uso de aditivos y la edad del concreto.

Así mismo existen otros factores que deberán de ser tomados en consideración para no caer en errores a la hora de realizar la prueba; los transductores deberán encontrarse en pleno contacto con el objeto de prueba, no debiendo de existir bolsa de aire entre el objeto de prueba y el transductor, existen infinidad de acoplantes disponibles en el mercado; también deberá de eliminarse cualquier fuente que cree el más mínimo movimiento ondulatorio en el elemento de prueba como lo son martillos neumáticos, vibro compactadores, etc.

La longitud de trayectoria, deberá ser medida con alta precisión, las dimensiones laterales mínimas en el elemento de prueba no serán menores a la longitud de onda; la presencia de acero de refuerzo es uno de los factores más significativos ya que la velocidad de pulso en el acero es de 1.4 a 1.7 veces la velocidad de pulso del concreto simple, por lo que se deberán de evitar en la medida de lo posible las mediciones cerca del acero paralelas a la dirección de propagación del pulso. El grado de saturación también afecta, por lo este factor deberá ser considerado al evaluar resultados de la prueba, la velocidad de pulso del concreto saturado puede ser hasta un 5% mayor que la del concreto seco.

El método de velocidad de pulso es un medio excelente para evaluar la uniformidad y calidad relativa del concreto, así como para indicar la presencia de grietas y vacíos en la estimación del deterioro o agrietamiento en una estructura, de igual forma es un buen

método para la realización de monitoreo de cambios en la condición de la estructura a lo largo del tiempo.

Respecto a la estimación de la resistencia a la compresión o flexión del concreto, no es recomendable su uso, dado que un gran número de variables afectan las relaciones entre los parámetros de resistencia del concreto y velocidad de pulso.

2.3 Prueba de extracción Pullout.

En la prueba se mide la fuerza necesaria para realizar la extracción de un inserto metálico incrustado con una cabeza agrandada en una estructura o espécimen de concreto, el inserto es tirado por un ariete de carga el cual se encuentra asentado en un anillo concéntrico al eje del inserto, el anillo transmite las fuerzas de reacción al concreto, a medida que se extrae el inserto se extrae un fragmento del concreto en forma cónica de la masa de concreto, Figura 8., la prueba se considera un ensayo semi destructivo.

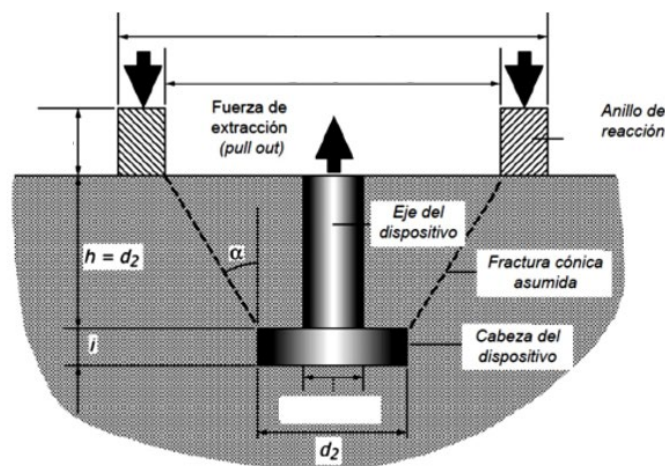


Figura 8.- Esquema de la prueba de extracción Pullout.

El principio de la prueba de extracción moderna tiene sus orígenes en el Instituto Central para la Investigación de Edificios Industriales en la antigua Unión Soviética en el año de 1938, años después Tremper en Estados Unidos realizó algunas modificaciones a la prueba; al no utilizar un anillo de apoyo se creía que la carga máxima de extracción era controlada por la resistencia a la tensión del concreto, dando como resultado una correlación no lineal entre la resistencia a la extracción y la resistencia a la compresión (Malhotra & Carino , 2004). En el año de 1962 Kierkegaard-Hansen determina la

geometría óptima para la realización más práctica de la prueba, introduciendo un anillo de rodamiento, dando como resultado un cono de falla con geometría bien definida, y una correlación lineal pero no proporcional entre la resistencia a la extracción y la resistencia a la compresión, además se encontró que la relación depende del tamaño máximo del agregado grueso.

En búsqueda por entender el mecanismo de falla de la prueba de extracción se han realizado estudios analíticos y experimentales en los que se declara que, en la prueba de extracción, el concreto se somete a una carga estática en la que se sujeta a un complejo estado de tensión tridimensional no uniforme, así mismo se encontró que hay dos sistemas de grietas circunferenciales y un sistema secundario que definen la forma del cono extraído, también se demostró que la resistencia a la extracción tiene una buena correlación con la resistencia a la compresión del concreto, incluso se encontró que la prueba tiene una buena repetibilidad al momento de obtener resultados, (Krenchel & Peterson, 1984) reportaron coeficientes de variación que va de 4 a 15% con un promedio del 8%.

La prueba se ha adoptado en muchas partes del mundo, en América del Norte se encuentra regida por la norma ASTM C 900, y no limita su configuración a una geometría específica, respecto al procedimiento para la colocación de insertos, es permitido que sea fijado a la superficie del encofrado antes de colocar el concreto o que sea colocado en la superficie del concreto recién colocado, este último procedimiento es el menos recomendado por la mayor variabilidad que presenta.

Para la estimación de la resistencia en sitio se deberán realizar pruebas en una zona en particular de la estructura, teniendo cuidado de elegir las ubicaciones más críticas para la colocación de los insertos, así como un número suficiente de pruebas para proporcionar resultados significativos, la relación de resistencia se utiliza para convertir los resultados de la prueba en un valor de la resistencia a la compresión, para poder proporcionar margen de seguridad, los resultados de la prueba deberán tratarse estadísticamente, proporcionado con esto un buen nivel de confianza.

Es recomendable que antes de usar la prueba para determinar la resistencia en un lugar se establezca una relación entre la carga máxima de extracción y la resistencia a la compresión para el sistema de prueba particular y los materiales que conforman la mezcla de concreto, ya que el tamaño del agregado grueso, como se comentó anteriormente, tiene influencia significativa en los resultados.

Se aconseja usar al menos seis conjuntos de datos para desarrollar la relación de la fuerza, y que los datos de correlación abarquen un rango amplio, asegurando así, que el nivel de la fuerza que se espera medir en campo se encuentre dentro del rango.

La prueba es utilizada durante la construcción en estructuras nuevas como un medio de monitoreo de la ganancia de resistencia en el concreto, facilitando la toma de decisiones en la ejecución de obra lo como es: el retiro de cimbra, el aplicar el pre-esfuerzo, etc.



Figura 9.- Equipo moderno de prueba Pull-out para determinar la resistencia en estructuras viejas.

Debido a la necesidad de evaluar concreto viejo en estructuras construidas con anterioridad, existe una variante de la prueba de extracción de la que se desarrollaron varias técnicas de perforación que se denominan “prueba de fractura interna”, Figura 9. en la que el procedimiento consiste en la perforación de un agujero perpendicular a la superficie del concreto, posteriormente se socava una ranura dentro del orificio en la que se coloca un inserto expandible, después de la expansión se extrae del concreto todo el conjunto; existe una prueba comercial llamada “CAPO” (por sus siglas en ingles cut and

pull out) en la cual el concreto es sometido al mismo sistema de carga que en una prueba de extracción ordinaria.

Antes de la realización de esta prueba es necesario preparar cuidadosamente la superficie para garantizar una baja variabilidad en los resultados, con la mejora del equipo y la práctica, los resultados obtenidos mediante este procedimiento son comparables con los obtenidos en la prueba de extracción convencional en la que el inserto se coloca al momento del vaciado de concreto.

El procedimiento para la realización de pruebas de extracción posteriores a la instalación fue incluido en la revisión de la norma ASTM C900 en 1999.

2.4 Método de la prueba de ruptura Break-Off.

Entre las pruebas ligeramente destructivas se encuentran, la extracción de núcleos, la de determinación de humedad y densidad del concreto, determinación de adherencia, determinación de carbonatación, determinación de corrosión y arranque de cilindros (break off). Debido a que la prueba de ruptura (break off) se considera destructiva en un nivel ligero, a que de acuerdo a la literatura la prueba no es utilizada en América del Norte y tiene poco uso en otras partes del mundo, tampoco existe retroalimentación basada en la experiencia de campo y resulta difícil la recomendación de revisiones significativas del método, y en 2002 la ASTM discontinuó el método de prueba, este método no será descrito en el presente documento.

2.5 Método de la madurez.

El método de la madurez utilizado en la estimación de la resistencia del concreto en lugar, se basa y parte del efecto que se genera en el concreto debido a las reacciones químicas exotérmicas entre el agua y los materiales cementosos, y la ganancia de resistencia del mismo al momento de su colocación; en este método se correlacionan la ganancia de resistencia del concreto con los efectos combinados del tiempo y temperatura, dichos efectos serán cuantificados y se obtendrá un historial de temperatura medida durante un periodo de tiempo de curado, el cual se utilizara para el cálculo de un factor único que indicara la resistencia del concreto, llamado “madurez”, la función de madurez es una

expresión matemática que convierte el historial de temperatura del concreto en un índice de madurez; el método se podrá utilizar únicamente durante el periodo de curado por lo que no será aplicado a estructuras existentes.

La característica clave de una función de madurez es la expresión utilizada para representar la influencia de la temperatura en la tasa inicial de desarrollo de la fuerza. (ACI 228.1R-03, 2003), se utilizan dos enfoques principalmente, el primero y menos preciso supone que la tasa inicial de desarrollo de resistencia es una función lineal de la temperatura, esta función se conoce como Nurse-Saul; el segundo supone que, en un rango amplio de temperatura, la tasa inicial de ganancia de resistencia varía exponencialmente con la temperatura del concreto, por lo que es una función no lineal de la temperatura, esta función se conoce como ecuación de Arrhenius, la cual describe de una forma más precisa la relación entre la constante de velocidad y temperatura de curado, en esta función el parámetro clave es la energía de activación la cual define la sensibilidad a la temperatura de la constante de la velocidad.

Dentro del principio básico para la aplicación del método, se encuentra que deberá realizarse un curado adecuado, asegurando una correcta hidratación del concreto, de lo contrario la ganancia de resistencia cesará, pero el índice de madurez calculado continuará aumentando con el tiempo, dando como resultado una estimación de resistencia incorrecta.



Figura 10.- Equipo medidor de madurez de concreto.

El procedimiento consiste en realizar primero las pruebas en laboratorio, en las que se establecerá la sensibilidad de la temperatura de la constante de velocidad, esta información es necesaria para el desarrollo de la función de madurez, en segundo lugar, se deberá de monitorear en campo el historial de temperatura del elemento para evaluar la madurez, para el registro de la temperatura en función del tiempo se utilizan medidores de madurez comerciales Figura 10.

El método de madurez además de ayudar para la estimación de la resistencia a la compresión en el concreto, también se puede utilizar para estimar el desarrollo de otras propiedades del mismo.

Respecto a las limitaciones del método tenemos que, la resistencia calculada depende de la temperatura de curado del elemento a una edad temprana, por lo que no existe una relación resistencia-madurez para una muestra de concreto dada, por lo tanto la única información confiable que se puede obtener cuando se mide la madurez de un elemento en el lugar es la ganancia de fuerza relativa, por lo que el método de la madurez no detecta errores de dosificación del concreto, resultando necesario complementar con otros métodos para la obtención de un resultado confiable.

2.6 Métodos de resistencia a la penetración.

2.6.1 Método de penetración Windsor

Entre las técnicas de penetración, la más conocida y utilizada es la prueba de sonda Windsor, la cual se introdujo en la década de 1960 a los Estados Unidos para pruebas de penetración de concreto en laboratorio. La técnica de resistencia a la penetración es un método no destructivo utilizado para medir la dureza superficial del concreto, se basa en la medición de la profundidad de penetración de una barra (sonda) o un pasador forzado a penetrar en la superficie del concreto endurecido por medio de un impulsor accionado por pólvora, Figura 11. (ASTM C803, 2003). La prueba mide la compresibilidad de un área localizada de concreto mediante la creación de un bulbo de compactación subsuperficial.

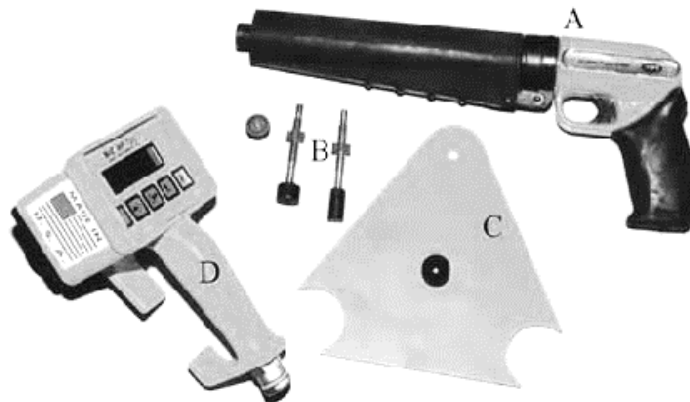


Figura 11.- Vista del equipo para el ensayo Windsor. A) Pistola, B) Perno para concreto de resistencia normal, C) Plantilla de ubicación, y D) Medidor de profundidad digital.

La técnica implica el uso de una pistola diseñada para insertar una sonda de acero en el concreto. La profundidad de penetración de la sonda tiene una relación empírica con la resistencia a la compresión del concreto.

La sonda o perno tiene una longitud de 79.5 mm, un extremo es roscado con un diámetro de 7.9 mm y el otro extremo es liso con diámetro de 6.3 mm y con punta cónica; la parte roscada del perno se une a una cabeza lisa de 12.7 mm de diámetro y se ajusta al cañón de la pistola, Figura 12.

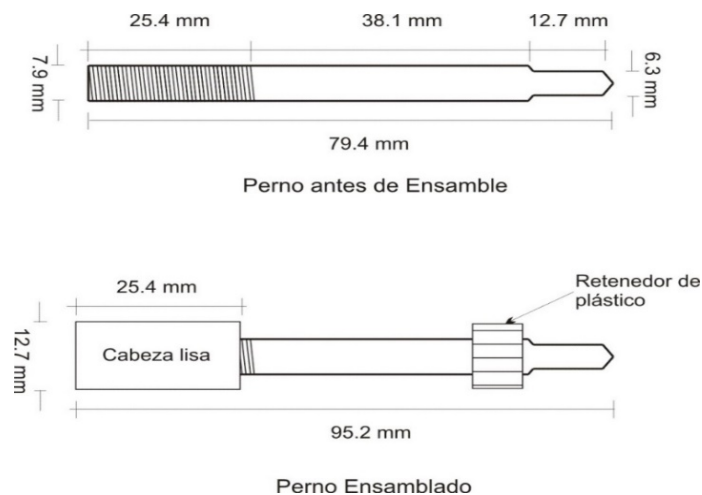


Figura 12.- Perno utilizado en el ensayo Windsor.

El método de prueba es sencillo, en primer lugar, es necesario preparar el área de trabajo la cual deberá tener un acabado cepillado o liso, se procede a introducir las sondas mediante el impulsor accionado por pólvora, pudiéndose apoyar con la plantilla de ubicación apropiada para lograr un patrón triangular equilátero de 178 mm por lado; la sonda penetra en el concreto hasta que su energía cinética inicial es absorbida, dicha energía es regida por la carga de pólvora utilizada para impulsar la sonda, la cual es de 79.5 m-kg.

Un requisito fundamental para la correcta ejecución de la prueba es que la sonda tenga un valor constante de la energía cinética inicial, es decir que la velocidad de salida de la sonda no tenga un coeficiente de variación mayor al 3% basado en 10 pruebas realizadas con métodos balísticos aprobados; en cuanto a los requisitos de tamaño mínimo del elemento por ensayar, los puntos de la prueba no deben colocarse a menos de 150 mm de cualquier borde u otro punto de medición; se miden las longitudes expuestas de las sondas con un medidor de profundidad o mediante un dispositivo mecánico, el valor promedio de la longitud de sonda expuesta se utilizara para estimar la resistencia a la compresión del concreto mediante el uso de datos de correlación adecuados.

Una característica importante de este ensayo es que el tipo, tamaño y distribución del agregado grueso afecta en gran medida la relación entre la resistencia del concreto y la profundidad de penetración de la sonda, de igual forma el que se cuente con presencia de acero de refuerzo dentro de la zona de influencia (menos de 100 mm) afectará la penetración de la misma; para que los resultados sean confiables, la muestra debe tener un espesor mínimo de tres veces la profundidad de penetración esperada (Malhotra & Carino , 2004); debido a que en este método la sonda llega a penetrar hasta una profundidad de 50 mm en el concreto, los resultados se consideran más significativos con respecto a los obtenidos con el martillo de rebote, el cual como ya se mencionó con anterioridad es un probador de dureza superficial y sus resultados son influenciados por la textura, humedad y carbonatación de la superficie de prueba.

La ASTM C 803 recomienda desarrollar una correlación para el diseño de una mezcla en particular a ser ensayada si se desean resultados más precisos.

Para correlacionar la resistencia del material con la penetración, como lo manda este método, el fabricante de dicho sistema ofrece tablas en las que se relaciona la longitud de la sonda expuesta con la resistencia a compresión del concreto, donde los valores correspondientes a la resistencia del concreto dependen de la dureza del agregado, la cual es medida por la escala de dureza Mohs, el sistema Mohs es un sistema universalmente aceptado para clasificar minerales por dureza con números que van del 1 al 10.

Las tablas que proporciona el fabricante se basan en relaciones empíricas elaboradas en su laboratorio y, en la mayoría de las veces no proporcionan resultados satisfactorios, sobreestimando o subestimando considerablemente la resistencia real, por lo que es imperativo que cada usuario del método correlacione los resultados de la prueba con el tipo de concreto que se desea utilizar.

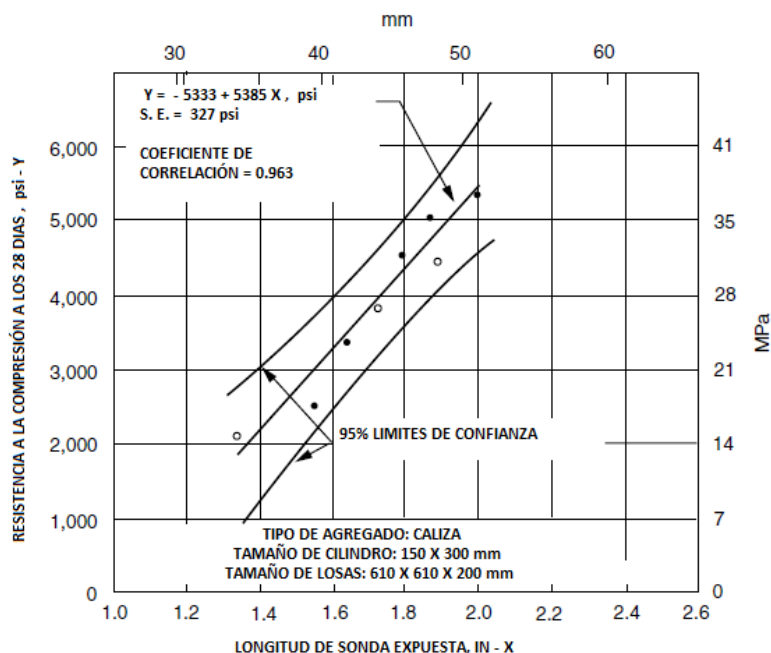


Figura 13.- Correlación entre resistencia a la compresión y longitud de sonda expuesta.

Para ello, se deberán preparar, probar y graficar un cierto número de ensayos en el que se ajustará la curva o línea resultante por medio del método de mínimos cuadrados, dibujando en la gráfica límites de confianza del 95% para los resultados individuales; los límites describirán el intervalo dentro del cual se tendrá una probabilidad del 95 % de que ahí caiga un resultado de la prueba, Figura 13.

2.6.2 Prueba de penetración de pasador.

El procedimiento fue desarrollado por Nasser y Al-Manaseer, y fue incorporado a la norma ASTM C 803/C en el año de 1990, se estima que el dispositivo requiere apenas 1.3% de la energía cinética entregada por el sistema Windsor; dicho dispositivo es accionado por un resorte de baja energía que clava un pasador puntiagudo de acero endurecido de 30.5 mm de longitud y diámetro de 3.56 mm en el concreto, debido al bajo nivel de energía, los pasadores se encuentran destinados para penetrar únicamente en la fracción de mortero del elemento, por lo que descartaran las pruebas que llegaran a golpear una partícula de agregado grueso, se tendrá en consideración que el pasador penetra solo una pequeña profundidad en el elemento, por lo que los resultados pueden variar seriamente debido a condiciones presentadas en la superficie; la penetración del pasador genera un pequeño agujero en la superficie del concreto del cual luego de ser limpiado cuidadosamente se mide la profundidad, dicha medida será utilizada para estimar la resistencia a la compresión del elemento previamente establecida una relación de resistencia. Este método no es recomendable para concreto con resistencia a la compresión superior a 28 MP.

2.6.3 Aspecto Económico de la prueba.

La mayoría de los países al encontrarse en zonas con actividad sísmica presentan el reto de proveer de infraestructura urbana estructuralmente capaz de soportar los efectos sísmicos, proporcionando estructuras seguras y confiables. Turquía se considera a sí mismo un modelo importante al hablar de regeneración urbana; debido a su ubicación geográfica cuenta con una alta actividad sísmica, pues conecta las placas tectónicas Euroasiática, Árabe, Africana y de Anatolia; en contraste a su alta actividad sísmica, Turquía cuenta con una buena cantidad del parque de sus edificios que no cumplen con

los códigos de diseño, ni con los estándares y especificaciones que se aplican al diseño estructural al día hoy, de acuerdo a estudios basados en un escenario de posibles terremotos, en Estambul se predice que resultarían entre 30,000 y 40,000 estructuras muy dañadas.

La baja resistencia a los efectos sísmicos del parque de edificios, es una gran problemática que enfrenta el gobierno turco; Cuando se determinan los niveles de riesgo en edificaciones, uno de los primeros pasos en la evaluación es la estimación de la resistencia a la compresión de concreto. Al realizar la determinación de la resistencia a compresión del concreto solo utilizando el método de extracción de núcleos da como resultado un procedimiento bastante costoso y tardado.

En 2018 se realiza un estudio por parte de la dirección regional de carreteras en conjunto con la facultad de ingeniería y arquitectura de la Universidad Firat, en Elazığ Turquía, en donde se evalúan algunos de los métodos de ensayos no destructivos más utilizados en la estimación de resistencia a compresión del concreto, mediante un análisis de viabilidad se comparan los métodos: número de rebote, prueba de velocidad de pulso ultrasónico, prueba de penetración con pines y prueba de sonda Windsor, en el que se determinara cual es el método más preciso, rápido y económico.

Dentro de las conclusiones obtenidas en el estudio, la que es de interés para el proyecto de investigación que se desarrolla, es que la prueba de la sonda Windsor resulta ser el método con mayor precisión y el más práctico, sin embargo, el costo de operación no es económico (Kursat Esat, Merve Acikgenc, Yavuzhan, & Ehsan, 2018).

Reforzando con este estudio el motor de esta investigación, el cual es aprovechar los beneficios de precisión y practicidad del método Windsor buscando al mismo tiempo sea un método económico.

Capítulo 3. Metodología Experimental.

En este capítulo se describe el desarrollo del experimento, en el que se compararan los resultados obtenidos para el método Windsor y Windsor Modificado, así como el desarrollo de curvas de correlación para diferentes resistencias en el concreto.

Para lograr los objetivos de este trabajo, se llevaron a cabo seis tipos de concreto con resistencias de 10, 15, 20, 25, 30 y 35 MPa a la edad de 7, 14 y 28 días para dos tipos de agregado, grava triturada y grava redonda. Una vez obtenidos los diseños de las mezclas se procede a la elaboración de especímenes y el probado de los mismos para la determinación de la resistencia a la compresión (f'_c) y la profundidad de penetración de sondas para ambos métodos.

El equipo (unidad impulsora) con el que se llevará a cabo la inserción de pernos para el método Windsor modificado, será una pistola de baja velocidad accionada por pólvora marca RAMSET, calibre 0.27, con accionamiento de carga semi automático y una potencia que va de los 2,000 a 4,000 Lb/in² (140.6 a 281.2 Kgf/cm²) ; los pernos o sondas, serán pasadores de fijación de 0.3 in (7.6 mm) de diámetro de cabeza y 0.145 in (3.68 mm) de diámetro del vástago, con una longitud total del pasador de 2.5 in (63.5 mm), y grado de acero 1060-1065.

Los especímenes con los que se determinara la resistencia a compresión del concreto " f'_c " utilizada en la elaboración de las gráficas de correlación serán cilindros estándar de concreto de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto y serán elaborados y probados de acuerdo con la norma ASTM C31 y NMX-C-083-ONNCCE 2002.

Los especímenes de concreto que serán probados a la penetración mediante la inserción de pasadores para la estimación de la resistencia a la compresión, serán bloques de concreto de 500 x 500 mm de lado y profundidad de 150 mm, cumpliendo con las dimensiones mínimas para satisfacer los requerimientos de distancia mínima libre de un pasador al borde del espécimen de 100 mm, y un espesor mínimo que sea el doble de

la profundidad de penetración esperada, así como una longitud entre sondas no menor de 175 mm, tal como lo marca la normativa ASTM C803 (Método de prueba estándar para resistencia a la penetración del concreto endurecido).

El criterio para aceptar o descartar las lecturas realizadas, será el estipulado en la tabla provista por la normativa ASTM, la cual se muestra en la Tabla 2.

Una prueba será constituida por un mínimo de tres sondas firmemente integradas en un área de prueba, y si en el grupo de tres sondas validas, las medidas de penetración de la sonda exceden el valor de la tercer columna de la Tabla 2., se deberá tomar una cuarta medida y descartar la medida con la mayor desviación del promedio, si aun y con una cuarta medida no coinciden con el límite dado en la Tabla 2., se deberá seleccionar un área diferente y se obtendrán tres nuevas mediciones.

Tabla 2.- Índices de precisión para las pruebas de resistencia con sondas según ASTM C803.

Tamaño máximo de agregado.	Límite ^A (mm)	Rango máximo de tres mediciones individuales ^B (mm)	Límite máximo de la diferencia entre dos pruebas ^C (cada prueba se calcula como el promedio de tres mediciones) (mm)
No. 4 (mortero)	2.0	6.6	3.3
25 mm	2.5	8.4	4.1
50 mm	3.6	11.7	5.6

^A Estos valores son las desviaciones estándar de un solo operador para pruebas realizadas en concreto con el tamaño máximo de agregado que se muestra en la Columna 1.

^B Estos valores son los rangos máximos permitidos para grupos de tres mediciones individuales realizadas muy juntas, ya sea como mediciones individuales o utilizando el dispositivo de posicionamiento triangular.

^C Una diferencia mayor que los valores dados indica una alta probabilidad de que exista una diferencia estadísticamente significativa en el concreto en las dos áreas representadas por los dos grupos de tres mediciones cada uno.

El equipo de medición utilizado para determinar la longitud expuesta de la sonda será a base de un calibrador o un medidor de profundidad el cual estará provisto de una placa de referencia, necesaria para medir la profundidad de penetración de la punta del pasador en el concreto.

El procedimiento para la realización de la prueba Windsor y Windsor modificada será el siguiente:

1. La superficie de concreto sobre la que se colocara la placa base y sobre la que se insertaran las sondas deberá contar con una textura suave, de lo contrario se deberá de pulir.
2. Colocar las sondas en el bloque de concreto siguiendo las indicaciones de seguridad de la unidad impulsora de sondas.
3. Se deberá comprobar que las sondas que conforman la prueba estén firmemente incrustadas mediante un golpe con un martillo pequeño en el extremo expuesto de la sonda, rechazando las sondas que se encuentren sueltas.
4. Para la determinación de la longitud promedio expuesta de la sonda, se deberá retirar de la superficie en donde se apoyará la placa base, cualquier partícula de concreto triturado permitiendo con esto un apoyo firme de la placa sobre la superficie del concreto, se procederá a medir la distancia desde la placa base de referencia hasta el final de la sonda, si una de las sondas se encuentra a más de 10 grados respecto a la línea perpendicular a la superficie del concreto deberá de ser descartada e insertar otra nuevamente.

3.1 Caracterización de los materiales.

El cemento que se utilizará será el tipo CPC-30R (cemento portland compuesto de alta resistencia inicial), el agua será agua potable de la red general del municipio de Chihuahua; los áridos utilizados son: arena de río, grava de río redondeada y grava caliza triturada, con un tamaño máximo del agregado grueso de 19 mm. Las propiedades de la arena y grava se presentan en la Tabla 3. La caracterización de los agregados se realizó según la norma ASTM C 150.

Tabla 3.- Características de los agregados fino y grueso utilizado en las mezclas de concreto.

	Material	P.V.S.M. (kg/m³)	Absorción	Densidad relativa	Módulo de finura
	Arena	1,651	0.053	2.83	2.96

Concreto con grava de río.	Grava de río	1,499	0.038	2.54	-
Concreto con agregado triturado.	Arena	1,460	0.034	2.62	3.66
	Grava triturada	1,573	0.005	2.66	-

3.2 Diseño de las mezclas de referencia.

La dosificación del concreto se realizó según las recomendaciones de la Asociación del Cemento Portland (PCA). La Tabla 4 y Tabla 5 muestran la dosificación propuesta que se utilizara.

Tabla 4.- Dosificación para las mezclas de concreto con agregado redondeado.

	Resistencia a los 28 días (MPa)	Relación A/C	Cemento (kg/m³)	Agua (kg/m³)	Aditivo (ml/m³)	Grava (kg/m³)	Arena (kg/m³)
Dosificación para mezclas con agregado redondeado	10	0.89	202.7	180	1,310	899.4	1,079.8
	15	0.78	231.4	180	1,495	899.4	1,054.0
	20	0.68	265.5	180	1,715	899.4	1,023.4
	25	0.59	306.2	180	1,978	899.4	986.8
	30	0.51	354.4	180	2,289	899.4	943.5
	35	0.44	411.1	180	2,655	899.4	892.6

Tabla 5.- Dosificación para las mezclas de concreto con agregado triturado.

	Resistencia a los 28 días (MPa)	Relación A/C	Cemento (kg/m³)	Agua (kg/m³)	Aditivo (ml/m³)	Grava (kg/m³)	Arena (kg/m³)
Dosificación para mezclas con agregado triturado	10	0.89	230.9	205	1,491	943.8	908.9
	15	0.78	263.5	205	1,702	943.8	881.7
	20	0.68	302.4	205	1,954	943.8	849.4
	25	0.59	348.7	205	2,253	943.8	810.9
	30	0.51	403.6	205	2,607	943.8	765.2
	35	0.44	468.1	205	3,024	943.8	711.5

Para determinar la consistencia de la mezcla de concreto fresco, se realizaron pruebas de revenimiento para cada batchada por separado, de acuerdo con las especificaciones

ASTM C143. La prueba de revenimiento se realiza inmediatamente después de la reconstitución de la mezcla de concreto. Los resultados de las pruebas se utilizan para el control de calidad.

3.3 Elaboración de los especímenes.

Para la formación de bloques de concreto necesarios en la prueba de penetración con pasadores, se fabricaron dos moldes a base de madera, Figura 14; los moldes para la obtención de cilindros son metálicos y se utilizaran los existentes en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Para elaborar la mezcla se utilizó una revolvedora de concreto de 1 saco con motor de 16 HP.



Figura 14.- Molde utilizado para elaboración de bloques de concreto en pruebas método Windsor.

Una vez realizada la mezcla se procede al llenado de los moldes de acuerdo a la norma ASTM C192, en los moldes cilíndricos se realiza mediante tres capas, en cada capa se efectuarán 25 penetraciones distribuidos uniformemente con una varilla de extremo redondeado (punta de bala). La última capa deberá contar con una cantidad de concreto tal que permita enrasar la superficie y proporcionar un acabado en la superficie plano y uniforme, cuidando que no existan depresiones o promontorios de más de 3 mm; en los moldes cúbicos el llenado se realiza mediante dos capas y con un varillado de 55 penetraciones por capa, así mismo se golpean ligeramente las paredes de los moldes

con un mazo de goma para la eliminación del aire atrapado Figura 15, el enrazado y aplanado de la superficie se realizara igual que en los moldes cilíndricos.



Figura 15.- Eliminación de aire atrapado en probetas cilíndricas.

Una vez fraguado el concreto, pasadas 24 horas se procede a desmoldar y almacenar los especímenes en el cuarto de curado donde se encontrarán a temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ con humedad de 99%, Figura 16.



Figura 16.- Cuarto de curado de la Universidad.

A la edad de 7, 14 y 28 días de colados los especímenes de prueba, se procede a ensayarlos para determinar en los cilindros su resistencia a la compresión f'_c , y en los bloques realizar la prueba de penetración para los dos métodos, Windsor y Windsor modificado y obtener la longitud expuesta del perno, Figura 17. En los cilindros de concreto se ensayan tres probetas por cada mezcla de acuerdo a la norma ASTM C39. En lo bloques de concreto como se mencionó anteriormente, una prueba se compone de un mínimo de tres sondas firmemente integradas en el área de prueba; y serán también ensayadas tres probetas por cada mezcla y por cada método.



Figura 17.- Prueba ensayo Windsor Modificado.

3.4 Variabilidad en la prueba.

Cada vez que se realice más de una prueba, el comparar la variabilidad de los resultados proporcionara información valiosa, incluso si son pocos los resultados disponibles, sirve como indicación de la coherencia del proyecto; por lo tanto, proporcionara un índice de la uniformidad de las mediciones obtenidas. En los casos en que hay más resultados disponibles, como en las pruebas no destructivas, se pueden utilizar pruebas de variabilidad para identificar áreas con diferentes propiedades.

En la Tabla 6 obtenida de (Bungey & Millard, 1996) se resumen los valores típicos de los coeficientes de variación para los principales métodos, los cuales serán una guía muy

aproximada ya que el coeficiente de variación de la resistencia a compresión del concreto no es constante con la resistencia para un nivel dado de control, pues se calcula usando la resistencia media.

Tabla 6.- Coeficientes típicos de variación de los resultados de las pruebas, y precisiones máximas de la predicción de resistencia in-situ para los principales métodos.

Método de Prueba	Coeficiente de variación	Límites de confianza del 95% en estimaciones de resistencia.
Esclerometría	4%	± 25% en 12 pruebas
Velocidad de pulso ultrasónico	2.5%	± 20% en 1 prueba
Pull-Out	8%	± 20% en 4 pruebas
Break-Off	9%	± 20% en 5 pruebas
Ensayo Windsor	4%	± 20% en 3 pruebas
Corazones	10%	± 10% en 3 especímenes

El (ACI 228.1R-03, 2003) habla de la necesidad de un análisis estadístico en los resultados de las pruebas, y propone tener en cuenta tres fuentes primarias de incertidumbre para llegar a una estimación confiable de la resistencia a la compresión en el lugar.

1. El valor promedio de los resultados de las pruebas en el lugar.
2. La relación entre la resistencia a la compresión y los resultados de las pruebas en el lugar.
3. La variabilidad inherente de la resistencia a la compresión en el lugar.

3.5 Procedimiento de correlación.

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo a numerosas investigaciones es imperativo realizar un procedimiento de correlación en los resultados de la prueba, buscando con esto obtener una buena precisión y nivel de confianza en el método. El procedimiento realizado en la presente investigación consiste en:

1. La preparación de 36 cilindros de 300 x 150 mm y 72 losas de concreto de 150 x 500 x 500 mm; los especímenes cubrirán un rango de resistencias que va de 10 a 35 MPa, se considera utilizar dos tipos de agregado, triturado y redondeado de río, se utilizará el mismo tipo de cemento, y el curado será en cuarto húmedo.
2. Cumplidas las edades de 7, 14 y 28 días, los cilindros serán probados a compresión simple, respecto a las losas se insertarán tres sondas por cada una, tanto para el método Windsor como para el método Windsor modificado, en caso de que una sonda no lograra penetrar correctamente, será retirada y se disparara nuevamente, ya que al menos deberán ser tres resultados validos por prueba, se procede a medir la longitud expuesta de la sonda y se promedian los tres resultados.
3. Una vez ensayadas todas las muestras se grafica la longitud de la sonda expuesta contra la resistencia a la compresión obtenida de los cilindros, de la dispersión de puntos en la gráfica se ajustará una curva o línea por el método de mínimos cuadrados.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

De las mezclas de concreto ensayadas con agregado redondeado y triturado, y de las diferentes resistencias de las pruebas que se llevaron a cabo con los métodos Windsor y Windsor modificado, se observan diferencias en la resistencia a compresión, sobre todo que no se llegó a la resistencia planeada para los concretos con agregado redondeado. Las razones pueden obedecer a circunstancias propias de la actividad de laboratorio como una desviación del ajuste de mezcla o la propia interacción mecánica del agregado liso con la pasta de cemento; de acuerdo con (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003) en la interacción mecánica que existe entre la matriz y el agregado grueso, la fuerza de adherencia se produce principalmente por la textura del agregado grueso, por otra parte, se cuenta con un trabajo de investigación realizado por (Özturan & Çeçen,

1997) en donde se comparan concretos en los que se utilizaron agregados como el basalto, piedra caliza y grava, para producir concreto con resistencias a la compresión que va de 30 a 90 MPa a 28 días, encontrando que el esfuerzo a compresión a los 28 días para concretos elaborados con grava redonda se encuentra hasta 20 % más abajo que los concretos preparados con agregados triturados, los autores atribuyen la diferencia de resistencia a la superficie lisa de los agregados de canto rodado.

La diferencia observada en general entre los agregados redondeados y triturados conlleva a condiciones ya descritas por otros autores cuando tratan del tema de resistencia a la penetración (Arni, 1972).

De los resultados de penetración entre ambos métodos se observaron diferencias importantes debido a la naturaleza de energía, sondas y aparato de prueba.

De los distintos parámetros que serán utilizados para la evaluación de ambos métodos, los estadísticos muestran de forma más contundente la justificación del método propuesto cuando se compara con el método Windsor.

4.1 Resultados para concretos con agregados redondeados.

Agregado redondeado Método Windsor

Para cubrir un abanico de resistencias con ambos tipos de agregados, como aún se continúa empleando en algunas zonas, el agregado redondeado se empleó en estas pruebas como parte complementaria de estudio. Su alta resistencia a la compresión cuando se le compara con el agregado calizo triturado y su superficie lisa hacen que se comporte de forma distinta cuando se expone a distintas demandas mecánicas en el concreto. Los resultados de resistencia a compresión para los concretos con agregados redondeados se muestran en la Tabla 7 para mezclas a edades del concreto de 7, 14 y 28 días. Se observa que, en particular, estos no se acercaron a las resistencias de diseño a compresión planeadas desde los 10 hasta los 35 MPa. Los valores medios de la resistencia de la compresión en los especímenes de prueba a los 7 días de edad

variaron de un rango de 4.01 a 14.74 MPa, para los 14 días oscilan de 5.25 a 20.0 MPa y a los 28 días de edad se obtuvo un rango de 6.23 a 21.7 Mpa; El rango de las desviaciones estándar para los cilindros ensayados a los 7 días de edad fue del orden del 0.08 al 0.81, para los ensayos de 14 días se tuvo un rango de 0.15 al 0.75, y finalmente para los ensayos de 28 días se obtuvo un rango de 0.27 a 1.17; Respecto al coeficiente de variación, los cilindros a 7 días muestran valores que van de 1.0 al 6.0 %, para los cilindros ensayados a los 14 días se obtuvieron valores de 3.0 al 7.0 %, y a los 28 días de edad el coeficiente ronda del 3.0 a 6.0 %.

Aún con el inconveniente de que no se lograron las resistencias esperadas para este tipo de concretos con agregados redondeados, la uniformidad en sus estimaciones estadísticas de medias, desviaciones estándar o coeficientes de variación se justifican para ser utilizados y como medio de comparación para ambos métodos y agregados empleados. Una justificación importante es aquella mostrada en la norma ASTM C39, la cual especifica que el coeficiente de variación para tres resultados en condiciones de laboratorio es como máximo un 7.8 % de lo que se deduce que la prueba se llevó acabo de una manera correcta y los resultados obtenidos son confiables.

Tabla 7.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados redondeados para el método Windsor.

Resistencia de diseño, f'_c , Mpa	Edad, días	Resistencia a compresión, f'_c , Mpa			Longitud de exposición de sonda, mm		
		Media	Desviación Estándar	C.V. %	Media	Desviación Estándar	C.V. %
	7	4.04	0.20	5.0	14.90	0.07	0.5
10	14	5.26	0.39	7.0	17.00	0.17	1.0
	28	6.27	0.28	4.0	23.60	0.28	1.2
	7	4.01	0.19	5.0	15.50	0.11	0.7
15	14	5.25	0.15	3.0	18.40	0.17	0.9
	28	6.23	0.27	4.0	25.50	0.21	0.8
	7	5.57	0.28	5.0	18.00	0.17	0.9
20	14	7.21	0.21	3.0	21.70	0.12	0.6
	28	8.48	0.48	6.0	23.60	0.21	0.9
	7	6.29	0.08	1.0	27.80	0.19	0.7
25	14	8.19	0.24	3.0	33.70	0.30	0.9
	28	9.61	0.44	5.0	36.20	0.22	0.6
	7	10.40	0.42	4.0	39.80	0.43	1.1

30	14	13.70	0.75	5.0	45.60	0.36	0.8
	28	15.89	0.54	3.0	50.90	0.51	1.0
	7	14.74	0.81	6.0	37.70	0.23	0.6
35	14	20.00	0.75	4.0	39.00	0.30	0.8
	28	21.70	1.17	5.0	44.90	0.28	0.6

En los resultados de penetración obtenidos por el Método Windsor para las mezclas elaboradas con agregados redondeados, se observa que los valores medios de longitud de exposición de la sonda en las losas ensayadas a 7 días de edad variaron de un rango de 14.9 a 39.8 mm, para los 14 días oscilan de entre 17.0 a 45.6 mm y a los 28 días de edad se obtuvo un rango de 23.6 a 50.9 mm; El rango de las desviaciones estándar para las losas ensayados a los 7 días de edad fue del orden del 0.07 a 0.43, para los ensayos de 14 días se tuvo un rango de 0.12 a 0.36, y finalmente para los ensayos de 28 días se obtuvo un rango de 0.21 a 0.51; Respecto al coeficiente de variación, a 7 días se muestran valores que van de 0.5 al 1.1 %, para los ensayos a los 14 días se obtuvieron valores de 0.6 al 1.0 %, y a los 28 días de edad el coeficiente ronda del 0.6 a 1.2 %.

El Comité ACI (ACI 228.1R-03, 2003) resume los trabajos de autores como: (Malhotra, 1976) quien propone un rango del coeficiente de variación promedio para la profundidad de penetración en concretos elaborados con tamaño máximo de agregado de 19 mm de un 3.5 a 5.6 %; en un estudio realizado por (Carette & Malhotra, 1984) se obtienen un promedio de 5.4 %; por otra parte (Keiller, 1982) realiza un estudio en el que obtiene el valor de 7.8%; otro estudio realizado en 1984 por los autores (Swamy & Al-Hamed) en el que estudiaron para el caso de un agregado más pequeño, de 10 mm y obtuvieron coeficientes de variación que van de 2.7 a 7.0 %.

En la Figura 18. se observa la gráfica de correlación para concretos elaborados con agregados redondeados para el método Windsor. De los puntos de longitud de exposición y su respectiva resistencia a compresión, se construye la línea de tendencia de geometría lineal con los mínimos cuadrados. El resultado del coeficiente de correlación, R^2 fue de 0.73. Cualitativamente, pudiera considerarse un valor bajo respecto a valores obtenidos por autores como (Pucinotti, 2009).

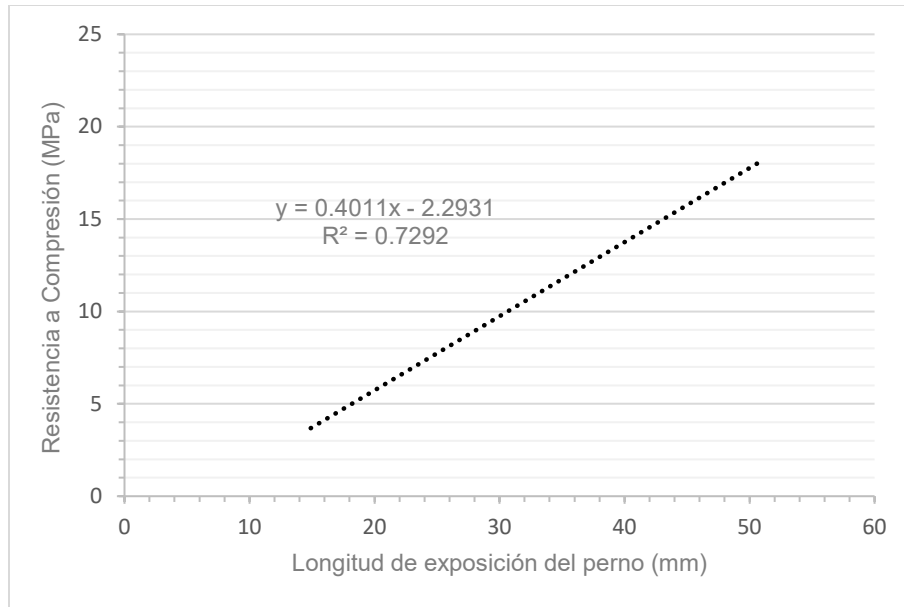


Figura 18.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados redondeados utilizando el método Windsor.

Agregado redondeado Windsor modificado

Por otro lado, respecto a los resultados obtenidos en el ensayo de penetración Windsor modificado, estos se muestran en la Tabla 8. Se observa que los valores medios de longitud de exposición de la sonda modificada a 7 días de edad variaron de un rango de 6.2 a 12.8 mm, para los 14 días oscilan de entre 7.6 a 13.3 mm y a los 28 días de edad se obtuvo un rango de 9.0 a 14.0 mm.

Tabla 8.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados redondeados para el método Windsor modificado.

Resistencia de diseño, f'_c , Mpa	Edad, días	Resistencia a compresión, f'_c , Mpa			Longitud de exposición de sonda, mm		
		Media	Desviación Estándar	C.V. %	Media	Desviación Estándar	C.V. %
10	7	4.04	0.20	5.0	6.20	0.08	1.3
	14	5.26	0.39	7.0	7.60	0.15	1.9
	28	6.27	0.28	4.0	9.00	0.26	2.9
15	7	4.01	0.19	5.0	6.70	0.08	1.2
	14	5.25	0.15	3.0	7.90	0.21	2.7

	28	6.23	0.27	4.0	9.20	0.18	2.0
	7	5.57	0.28	5.0	8.10	0.13	1.6
20	14	7.21	0.21	3.0	8.80	0.26	3.0
	28	8.48	0.48	6.0	9.10	0.10	1.1
	7	6.29	0.08	1.0	9.80	0.20	2.1
25	14	8.19	0.24	3.0	11.00	0.29	2.7
	28	9.61	0.44	5.0	11.30	0.20	1.8
	7	10.40	0.42	4.0	12.80	0.26	2.1
30	14	13.70	0.75	5.0	13.30	0.26	2.0
	28	15.89	0.54	3.0	14.00	0.20	1.4
	7	14.74	0.81	6.0	12.40	0.40	3.2
35	14	20.00	0.75	4.0	12.50	0.17	1.4
	28	21.70	1.17	5.0	13.80	0.26	1.9

El rango de las desviaciones estándar para las losas ensayados a los 7 días de edad fue del orden del 0.08 a 0.4, para los ensayos de 14 días se tuvo un rango de 0.15 a 0.29, y finalmente para los ensayos de 28 días se obtuvo un rango de 0.10 a 0.26; Respecto al coeficiente de variación, las losas a 7 días muestran valores que van de 1.3 al 3.2 %, para los ensayos a los 14 días se obtuvieron valores de 1.4 al 3.0 %, y a los 28 días de edad el coeficiente ronda del 1.1 a 2.9 %.

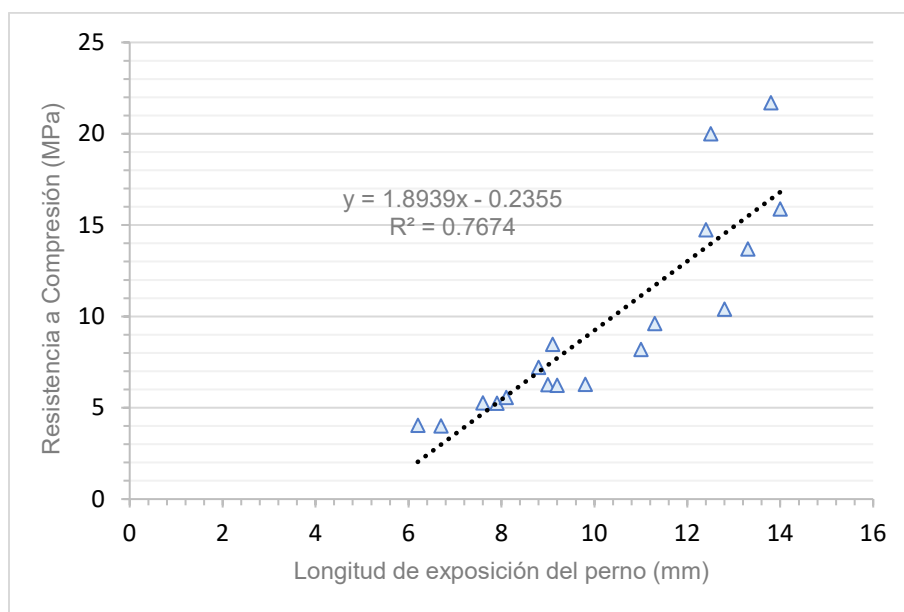


Figura 19.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados redondeados utilizando el método Windsor modificado.

En la Figura 19. se observa la gráfica de correlación para concretos elaborados con agregados redondeados para el método Windsor modificado. La línea de tendencia utilizada adoptada fue de geometría lineal, al igual que autores como (Pucinotti, 2009) y (Levent , Kamil , H. Süleyman , & Osman , 2012) utilizaron en su trabajo de investigación. La correlación resultante, R^2 es de 0.77, que puede considerarse un valor regular tomando en cuenta el número de muestras limitadas llevadas a cabo en este estudio.

Comparación entre correlaciones de Método Windsor y Modificado, agregado redondeado.

En la Figura 20, se observa la comparación entre ambos métodos, Windsor y Windsor modificado, por medio de graficas de correlación para concretos elaborados con agregados redondeados, como se ya comentó anteriormente, el método Windsor (cuadros) para cada uno de los datos graficados, se traza una línea de tendencia lineal que resultó en una correlación, R^2 de 0.73, mientras que la línea de tendencia del método Windsor Modificado (triángulos), arroja una línea con mayor pendiente y una correlación de R^2 de 0.77.

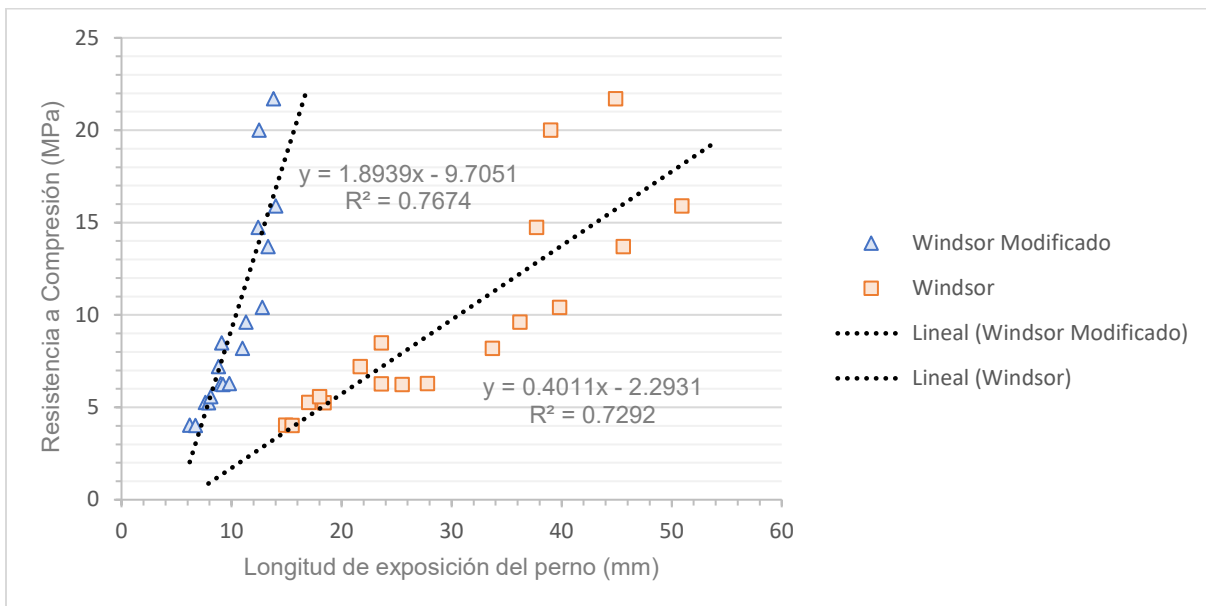


Figura 20.- Comparativa de los coeficientes de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados redondeados utilizando el método Windsor / Windsor modificado.

Ambas gráficas representan pendientes muy distintas entre sí; se observa que la pendiente del método Windsor modificado presenta una mayor inclinación, siendo esta de 1.89 MPa/mm frente a una de 0.4 MPa/mm para el método Windsor. Con este resultado, se observa que la pendiente del método Windsor modificado es más sensible al momento de estimar la resistencia a compresión. Esta diferencia de pendientes es debida a la baja potencia con la que se realiza el disparo de la sonda, se puede argumentar que, aunque exhibe un considerable nivel de sensibilidad, la sonda va en paralelo al momento de penetrar capas de agregado al igual que el método Windsor, tal como se puede observar en la Figura 21.

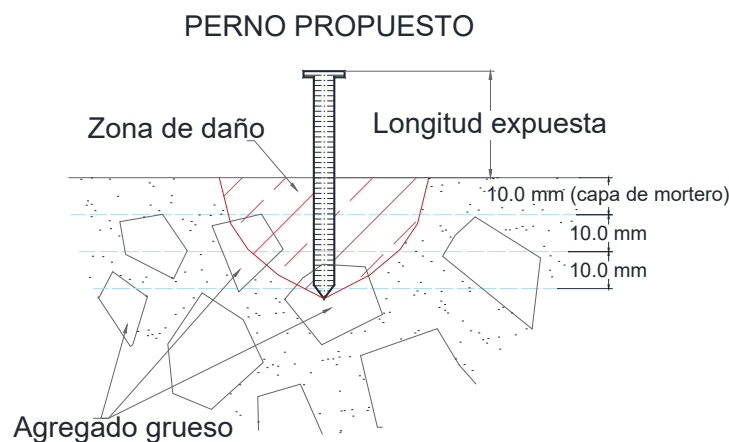


Figura 21.- Penetración perpendicular a la superficie de prueba que sobrepasa la capa de mortero.

4.2 Resultados para concretos con agregados triturados

Agregado triturado Método Windsor.

En la Tabla 9, se observan los resultados obtenidos para las mezclas de concreto elaboradas con agregados triturados a los 7, 14 y 28. Los valores medios de la resistencia de la compresión a los 7 días de edad variaron de un rango de 7.88 a 25.93 MPa, para los 14 días oscilan de 10.35 a 29.09 MPa y a los 28 días de edad se obtuvo un rango de 12.22 a 33.37 Mpa.

Tabla 9.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados triturados para el método Windsor.

Resistencia de diseño, f'_c , Mpa	Edad, días	Resistencia a compresión, f'_c , Mpa			Longitud de exposición de sonda, mm		
		Media	Desviación Estándar	C.V. %	Media	Desviación Estándar	C.V. %
10	7	7.88	0.38	4.8	25.80	0.25	1.0
	14	10.35	0.31	3.0	34.00	0.44	1.3
	28	12.22	0.44	3.6	32.90	0.63	1.9
15	7	9.70	0.50	5.2	29.40	0.29	1.0
	14	12.77	0.76	6.0	26.60	0.25	0.9
	28	14.95	0.62	4.1	43.60	0.60	1.4
20	7	13.25	0.58	4.4	27.80	0.13	0.5
	14	15.10	0.98	6.5	51.80	0.33	0.6
	28	19.09	1.18	6.2	45.40	0.12	0.3
25	7	22.54	0.65	2.9	42.80	0.16	0.4
	14	22.24	1.21	5.4	56.20	0.11	0.2
	28	22.93	0.82	3.6	54.40	0.39	0.7
30	7	20.18	1.52	7.5	50.90	0.20	0.4
	14	26.05	1.40	5.4	55.10	0.21	0.4
	28	29.97	1.72	5.7	52.80	0.37	0.7
35	7	25.93	1.21	4.7	49.50	0.29	0.6
	14	29.09	1.06	3.6	63.00	0.19	0.3
	28	33.27	1.55	4.7	60.10	0.47	0.8

El rango de las desviaciones estándar para los cilindros ensayados a los 7 días de edad fue del orden del 0.38 al 1.52, para los ensayos de 14 días se tuvo un rango de 0.31 al 1.40, y finalmente para los ensayos de 28 días se obtuvo un rango de 0.44 a 1.72; respecto al coeficiente de variación, los cilindros a 7 días muestran valores que van de 2.9 al 7.5 %, para los cilindros ensayados a los 14 días se obtuvieron valores de 3.0 al 6.5 %, y a los 28 días de edad el coeficiente ronda del 3.6 a 6.2 %.

Al igual que lo mencionado en la prueba anterior, la norma ASTM C39, que especifica un coeficiente de variación para tres resultados en condiciones de laboratorio de como máximo un 7.8 %; el coeficiente de variación obtenido para tres resultados en condiciones de laboratorio se considera aceptable y dentro de un rango razonable, por

lo que se deduce que la prueba se llevó acabo de una manera correcta y los resultados obtenidos son confiables.

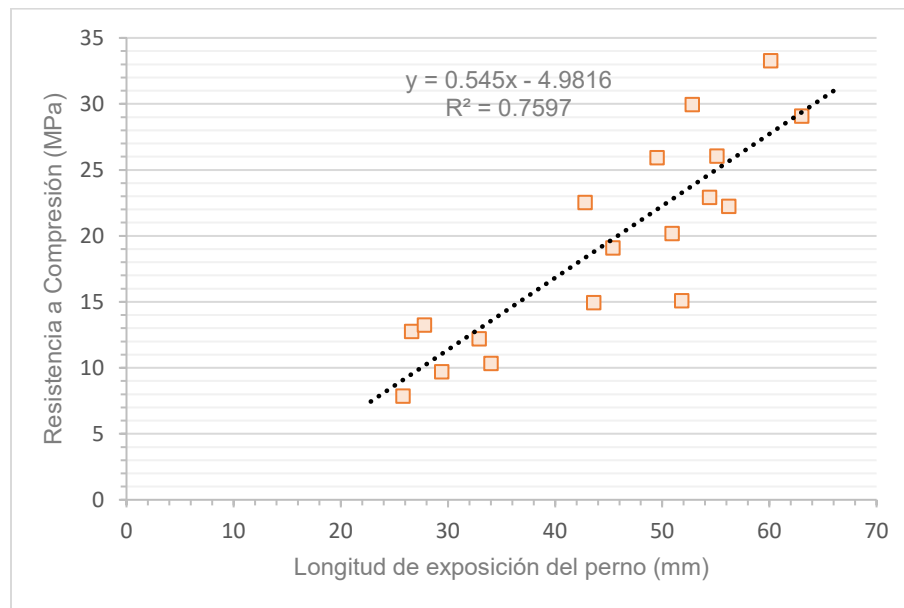


Figura 22.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados triturados utilizando el método Windsor.

Respecto a los resultados obtenidos en el ensayo de penetración Windsor, los valores promedio de longitud de exposición de la sonda a los 7 días de edad variaron de un rango de 25.8 a 50.9 mm, para los 14 días oscilan de entre 26.6 a 63.0 mm y a los 28 días de edad se obtuvo un rango de 32.9 a 60.1 mm; El rango de las desviaciones estándar para los 7 días de edad fue del orden del 0.13 a 0.29, para los ensayos de 14 días se tuvo un rango de 0.11 a 0.44, y finalmente para los ensayos de 28 días se obtuvo un rango de 0.12 a 0.63; Respecto al coeficiente de variación, a los 7 días se muestran valores que van de 0.4 al 1.0 %, para los ensayos a los 14 días se obtuvieron valores de 0.2 al 1.3 %, y a los 28 días de edad el coeficiente ronda del 0.3 a 1.9 %.

En la Figura 22. se observa la gráfica de correlación para concretos elaborados con agregados triturados para el método Windsor, para lo cual se adopta la geometría lineal como en las gráficas anteriores, resultando en una correlación, R^2 de 0.76, que se puede

considerar de valor regular, debido a las muestras de carácter limitante por el volumen del estudio.

Agregado triturado método Windsor modificado

Los resultados obtenidos para el ensayo de penetración Windsor modificado se muestran en la Tabla 10 para las mezclas elaboradas con agregados triturados. Se observa que los valores promedio de longitud de exposición de la sonda a los 7 días de edad variaron de un rango de 16.8 a 26.2 mm, para los 14 días oscilan de entre 19.7 a 26.3 mm y a los 28 días de edad se obtuvo un rango de 21.6 a 26.8 mm; El rango de las desviaciones estándar a los 7 días de edad fue del orden del 0.17 a 0.72, para los ensayos de 14 días se tuvo un rango de 0.26 a 0.75, y finalmente para los ensayos de 28 días se obtuvo un rango de 0.17 a 0.40; Respecto al coeficiente de variación, a los 7 días se muestran valores que van de 0.8 al 3.6 %, para los ensayos a los 14 días se obtuvieron valores de 1.2 al 3.8 %, y a los 28 días de edad el coeficiente ronda del 0.7 a 1.8 %.

Tabla 10.- Resultados de resistencia a compresión y penetración en concretos con agregados triturados para el método Windsor Modificado.

Resistencia de diseño, f'_c , Mpa	Edad, días	Resistencia a compresión, f'_c , Mpa			Longitud de exposición de sonda, mm		
		Media	Desviación Estándar	C.V. %	Media	Desviación Estándar	C.V. %
10	7	7.88	0.38	4.8	16.80	0.36	2.1
	14	10.35	0.31	3.0	19.70	0.75	3.8
	28	12.22	0.44	3.6	21.60	0.26	1.2
15	7	9.70	0.50	5.2	20.20	0.72	3.6
	14	12.77	0.76	6.0	20.80	0.26	1.3
	28	14.95	0.62	4.1	21.90	0.40	1.8
20	7	13.25	0.58	4.4	21.30	0.17	0.8
	14	15.10	0.98	6.5	22.40	0.26	1.2
	28	19.09	1.18	6.2	23.10	0.17	0.7
25	7	22.54	0.65	2.9	22.50	0.69	3.1
	14	22.24	1.21	5.4	23.30	0.36	1.5
	28	22.93	0.82	3.6	25.20	0.30	1.2
	7	20.18	1.52	7.5	22.90	0.20	0.9

30	14	26.05	1.40	5.4	26.30	0.36	1.4
	28	29.97	1.72	5.7	26.80	0.17	0.6
	7	25.93	1.21	4.7	26.20	0.70	2.7
35	14	29.09	1.06	3.6	25.10	0.30	1.2
	28	33.27	1.55	4.7	27.90	0.36	1.3

En la Figura 23. se observa la gráfica de correlación para concretos elaborados con agregados triturados para el método Windsor modificado, donde se muestra una línea de tendencia de geometría lineal con una correlación R^2 de 0.89. Se observa que este valor está por encima del valor de correlación anterior para el método Windsor, lo que puede suponer un mejor desempeño del método Windsor modificado frente al Windsor.

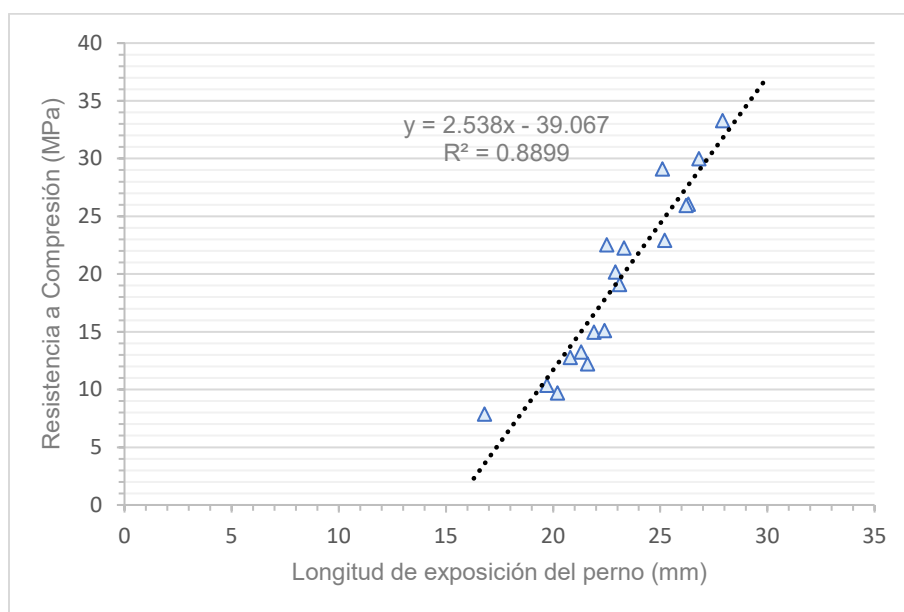


Figura 23.- Coeficiente de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados triturados utilizando el método Windsor modificado.

Comparación entre correlaciones de Método Windsor y Modificado, agregado triturado

En la Figura 24. se observa la comparación entre ambos métodos, Windsor y Windsor modificado, por medio de graficas de correlación para concretos elaborados con agregados triturados.

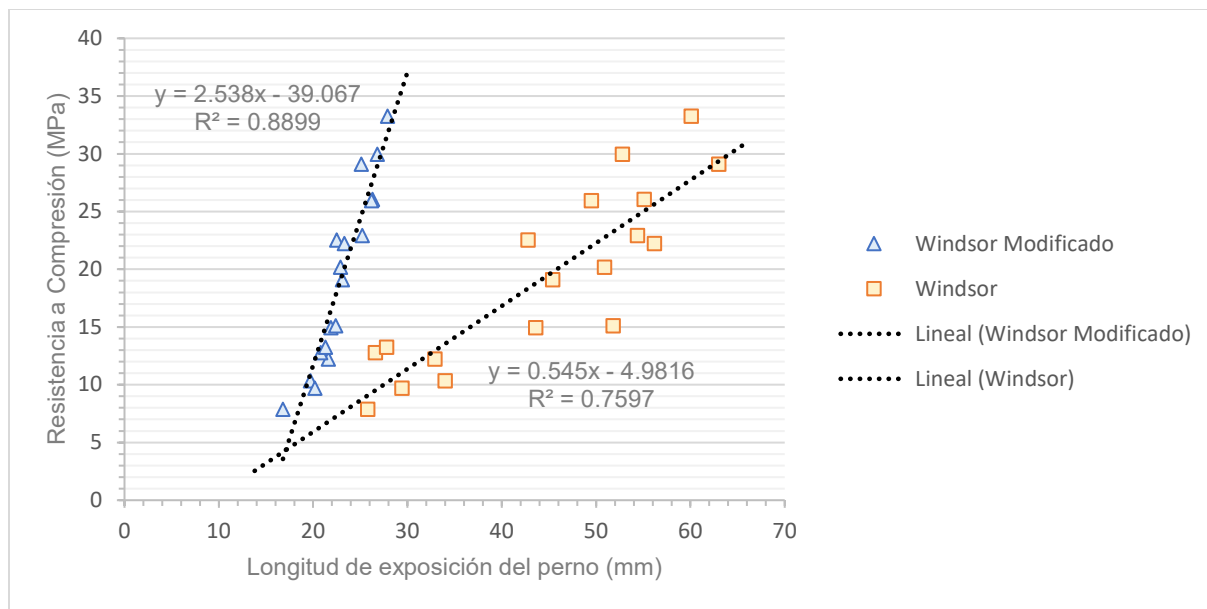


Figura 24.- Comparativa de los coeficientes de correlación para la resistencia a compresión en concreto con agregados triturados utilizando el método Windsor / Windsor modificado.

Para la serie de valores representados por ambos métodos que se compararon por separado anteriormente, se observan pendientes de distinto valor, de nuevo con la tendencia de que la pendiente del método Windsor modificado resulta ser más inclinada respecto a aquella del método Windsor. Aunque sus correlaciones ya fueron mencionadas, se observa que la sensibilidad del método Windsor y el Windsor modificado son de 0.55 MPa/mm y 2.5 MPa/mm respectivamente.

De nueva cuenta se observa que la pendiente del método Windsor modificado es más sensible al momento de estimar la resistencia a compresión. Al igual que en la comparación realizada para agregado redondeado, esta diferencia de pendientes en concreto con agregado triturado es debido a la baja potencia en el disparo de la sonda, que aun así se puede argumentar que, pese a la sensibilidad mostrada por el Windsor modificado, va paralelo en penetrar capas de agregado al igual que el método Windsor, como se mostró en la Figura 21.

4.3 Potencia y mecanismos de falla.

En la actualidad no se ha propuesto un análisis riguroso del mecanismo de falla del ensayo Windsor, dado que existen complejidades por la naturaleza heterogénea del concreto y las complejas combinaciones de esfuerzos de tensión en el rango dinámico que se desarrollan en el espécimen durante algún ensayo de penetración de la sonda.

El ensayo involucra una cantidad inicial de energía cinética aplicada a la sonda, la cual es absorbida durante la penetración, la mayor parte se reparte en el aplastamiento y fractura del concreto y la otra parte en la fricción entre el perno y el concreto.

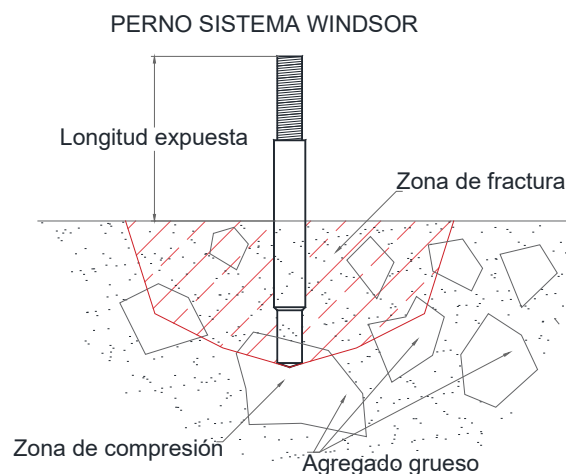


Figura 25.- Falla representativa en el concreto durante la prueba de penetración.

La penetración de la sonda Figura 25. provocara la fractura del concreto en forma de cono debajo de la superficie con grietas que se propagan hasta la superficie; Una mayor penetración por debajo de dicha zona es en gran parte resistida por la compresión del material adyacente. (Malhotra & Carino , Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2004)

Existen dos afirmaciones que aún no han sido comprobadas, las cuales plantean que la prueba de sonda Windsor mide la compresibilidad de un área localizada de concreto creando un bulbo de compactación superficial; y que la energía necesaria para romper el agregado grueso es un porcentaje bajo del total de la sonda impulsada, por lo que la profundidad de penetración no se verá afectada significativamente.

4.4 Grado de destructividad de la prueba a la penetración.

Por lo general la prueba a la penetración es considerada como una prueba no destructiva, y lo es, sin embargo, tratándose en específico de la sonda utilizada en el ensayo Windsor, el orificio resultante después de que se ha realizado la prueba es de apenas 8 mm, en el caso de concreto maduro el daño se puede extender hasta la profundidad de penetración de la sonda creando alrededor de la misma una región en forma de cono en donde el concreto se encuentra fuertemente fracturado, con respecto al ensayo realizado mediante el método Windsor modificado, el daño será considerablemente menor reduciéndose a un orificio de apenas 4 mm, en el caso de concreto maduro no se observa la formación de una región dañada, reduciéndose solamente al área que ocupara la sonda insertada en el concreto.

El daño se traduce solamente al aspecto visual, a la estética de la estructura por ensayar, de ser el caso en el que las pruebas se ubiquen en elementos aparentes y a la vista, y de ser así, simplemente se deberán remover las sondas y parchar la superficie de prueba. Debido a que la resistencia de los miembros estructurales ensayados no se ve afectada significativamente por la prueba y a que la misma puede ser llevada a cabo en sitio, el ensayo efectivamente se considera como no destructivo.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

A continuación, se describen las conclusiones resultantes a lo largo de la investigación, de acuerdo a los objetivos e hipótesis planteados en un inicio.

- El control de las muestras y el método de prueba en el experimento se llevaron a cabo de una manera adecuada ya que el coeficiente de variación en los dos casos, grava redondeada y triturada se encuentra dentro de los límites marcados por la normativa.
- Como fue comentado en la fundamentación teórica, a un inicio del documento, el método Windsor modificado genera menor energía, por lo tanto, resulta ser mayor

la longitud expuesta del perno, lo que refleja una mayor pendiente en la línea de la gráfica de correlación; así, cada milímetro representa un mayor aumento o disminución en la resistencia a la compresión, resultando aún más importante el cuidado y la precisión con la que se realicen las mediciones del perno insertado.

- Se comprueba que la energía de penetración desarrollada por el ensayo Windsor si resulta con valores residuales no necesarios para el impulso de su sonda, aparte de resultar en el efecto de una zona local de daño amplia que pudiese afectar el resultado de penetración de la sonda, resulta no ser necesaria tal cantidad de energía para llevar a cabo un experimento de penetración que proporcione resultados confiables (Windsor modificado).
- Pese a que los concretos elaborados con agregado redondeado no llegaron a la resistencia proyectada, los resultados obtenidos en la gráfica de correlación son congruentes y obedecen una trayectoria y comportamiento muy similar al obtenido en las mezclas con agregado triturado.
- Con respecto a los agregados redondeado y triturado, no se observó durante la ejecución de la prueba un comportamiento que indique la existencia de algún efecto que provoque variación en los resultados, por lo que se concluye que no es un factor determinante en la variación de medición de la longitud de sonda expuesta en pruebas de penetración.
- La correlación obtenida es aceptable, aunque es un parámetro que se puede mejorar, en el método Windsor modificado se observan valores un poco más aproximados a la unidad respecto al método Windsor, es decir el método propuesto se comportó bastante bien.
- Se propone realizar un estudio similar al actual, en el que se realicen pruebas a los concretos presentes en estructuras ya existentes, mediante la obtención de núcleos, con la finalidad de comparar y observar el comportamiento de la sonda Windsor y Windsor modificada en superficies diferentes a las obtenidas en probetas de laboratorio, así como observar su comportamiento en concretos con más de 28 días de edad, revisando que variación se tiene con respecto a coeficientes de variación y correlación.

Bibliografía.

- ACI 228.1R-03. (2003). *In Place Methods to Estimate Concrete Strength*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Arni, H. (1972). *Impact and penetration tests of portland cement concrete*. Washington, D.C.: NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING.
- ASTM C39-04a. (2007). *Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM C803. (2003). *Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete*. ASTM Subcommittee C09.64 on Nondestructive and In-Place Testing.
- ASTM C805, B. D. (2018). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. Philadelphia, EE. UU.: ASTM.
- Bungey, J., & Millard, S. (1996). *Testing of concrete in structures*. Chapman and Hall.
- Carette, G., & Malhotra, V. (1984). In Situ Tests: Variability and Strength Prediction of Concrete at Early Ages. *Symposium Paper* (págs. 111-142). Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute.
- Chan Yam, J., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería 7-2*, 39-46.
- HILTI. (2013). *Direct Fastening Technology Manual*. Germany: Hilti Corp. Obtenido de www.hilti.com
- James, I. (2018). *Windsor Probe System Z-WP-534 Operator's Manual*. Chicago, IL: James Instruments. Obtenido de www.ndtjames.com
- Keiller, A. P. (1982). *Preliminary Investigation of Test Methods for the Assessment of Strength of In Situ Concrete*. Slough, Inglaterra: Cement and Concrete Association.
- Kose, M. A., & Ohnsorge, F. (2023). *Falling Long-Term Growth Prospects*. Washington, DC: World Bank Group. Obtenido de <https://acortar.link/GXGc8J>
- Krenchel, H., & Peterson, C. (1984). In-place testing with LOK-Test: Ten years' experience. Ottawa.
- Kursat Esat, A., Merve Acikgenc, U., Yavuzhan, T., & Ehsan, G. (2018). Feasibility Analysis of NDT Methods Using to Estimate the Concrete Strength as Part of Urban Regeneration. *Turkish Journal of Science & Technology*, 9-17.
- Levent, S., Kamil, K., H. Süleyman, G., & Osman, S. (2012). A non-destructive testing technique: Nail penetration test. *ACI Structural and Materials Journals*.
- Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Washington, D.C.: CRC PRESS.
- Malhotra, V. (1976). *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*. (A. m. Institute, Ed.) Iowa State University Press.
- NOM-004-STPS. (1999). *Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo*. México, D.F.: Diario Oficial.
- Özturan, T., & Çeçen, C. (1997). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. *Cement and Concrete Research*, 165-170.
- Pucinotti, R. (2009). In situ concrete strength assessment: Influence of the aggregate hardness on the Windsor probe test results. *Journal of Building Appraisal*, 75-85.
- Selcuk, L., Kayabali, K., Gokce, S., & Simsek, O. (2012). A non destructive testing technique: Nail penetration test. *ACI Structural Journal*, 29. Recuperado el
- Swamy, R., & Al-Hamed, A. (1984). *Evaluation of the Windsor Probe Test to Assess In-Situ Concrete Strength*. London: Institution of Civil Engineers.

www.stps.gob.mx. (2022). *Riesgos de Trabajo Registrados en el IMSS*. Obtenido de <https://www.stps.gob.mx/gobmx/estadisticas/riesgos.htm>

Currículo Vitae