



*Certificación ISO 9001:2008 ‡*

---

---

# **Caracterización física de pastas de cementos híbridos a partir de ceniza volante tipo F y su efecto en las propiedades electroquímicas del acero**

Mariela Rendón Belmonte  
Miguel Martínez Madrid  
Abraham López Miguel  
Jorge Terán Guillén  
José Trinidad Pérez Quiroz  
Andrés Torres Acosta

**Publicación técnica núm. 486  
Sanfandila, Qro. 2016**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Caracterización física de pastas de cementos  
híbridos a partir de ceniza volante tipo F y su  
efecto en las propiedades electroquímicas del acero**

**Publicación técnica núm. 486**  
**Sanfandila, Qro. 2016**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte por la Dra. Mariela Rendón Belmonte, Dr. Miguel Martínez Madrid, M. en E. Abraham López Miguel y Dr. Jorge Terán Guillén.

Se agradecen las observaciones y recomendaciones técnicas del Dr. José Trinidad Pérez Quiroz, investigador titular y Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, encargado del Área de Materiales del Instituto Mexicano del Transporte.



# Contenido

---

Resumen		iii
Abstract		v
Resumen	ejecutivo	vii
Capítulo 1	Introducción	1
Capítulo 2	Antecedentes	3
Capítulo 3	Desarrollo del estudio	9
Capítulo 4	Resultados	26
Capítulo 5	Conclusiones	44
Capítulo 6	Recomendaciones	45
Bibliografía		46





# Resumen

---

Esta investigación describe las propiedades físicas y mecánicas de pastas de cementos híbridos, obtenidos a partir de ceniza volante tipo F (CV) + Cemento Portland Ordinario (CPO) (70% CV+30% CPO y 80 CV+20% CPO) hidratadas con disolución alcalina (pH ~11.3). Incluye también el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en tales pastas. Las técnicas empleadas para la caracterización física fueron: resistividad eléctrica húmeda ( $\rho$ ), velocidad de pulso ultrasónico (VPU), absorción capilar, resistencia a la compresión ( $f'c$ ). Las técnicas electroquímicas para caracterizar al acero en estas pastas fueron: potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ).

Los resultados indican que los cementos híbridos, proveen propiedades físicas y mecánicas comparables con las alcanzadas con un Cemento Portland Ordinario 100%, incluso en el caso de la resistividad eléctrica los valores fueron superiores. Respecto al comportamiento electroquímico del acero de refuerzo, en los cementos híbridos en proporciones 70/30 (ceniza volante/Cemento Portland Ordinario en porcentaje), el nivel de corrosión fue menor respecto al Cemento Portland Ordinario (CPO).



# Abstract

---

This research describes the physical and mechanical properties of hybrid cement pastes (fly ash type F + ordinary portland cement) with alkaline solution (pH ~ 11.3). It also includes the electrochemical behavior of reinforcing steel embedded in such pastes. The techniques used were: electrical resistivity ( $\rho$ ), ultrasonic pulse velocity (VPU), percentage of total water absorption, capillarity, compressive strength ( $f'c$ ), corrosion potential ( $E_{corr}$ ) and resistance to polarization  $R_p$ .

The results indicate that hybrid cements provide physical and mechanical properties comparable with respect to ordinary portland cement. The electrical resistivity values were higher with this hybrid cement. With respect to the electrochemical behavior of the reinforcing steel, the corrosion level was lower in the 70/30 (fly ash / ordinary portland cement) compared to ordinary portland cement.



# Resumen ejecutivo

---

Dentro de las áreas de investigación del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), está impulsando el desarrollo de *nuevos cementos*, constituidos básicamente por materiales silicoaluminosos tales como ceniza volante tipo F, con la finalidad de ampliar la gama de materiales cementicios que tengan propiedades comparables o incluso mejores que un Cemento Portland Ordinario.

En esta investigación se obtuvieron propiedades físicas y el comportamiento electroquímico de acero de refuerzo embebido en cementos híbridos. Para la obtención de las pruebas físicas de pastas, los cementos de estudio fueron: cemento 70-30 (70% ceniza volante y 30% Cemento Portland Ordinario), cemento 80-20 (80% ceniza volante y 20% Cemento Portland Ordinario) y CPO (100% Cemento Portland Ordinario). Como disolución de hidratación para los dos primeros cementos se empleó disolución al 1, 2 y 3% de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y para el cemento CPO, agua de grifo. Las muestras de estudio fueron cúbicas de dimensiones 5x5x5 cm y las propiedades físicas obtenidas fueron: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades (7, 14, 21, 28, 49, 56, 63, 71 y 77 días), porcentaje de absorción total de agua y resistencia a la compresión a 2, 28 y 60 días.

Los resultados de resistividad eléctrica de pastas de cementos híbridos alcalinos superaron los valores alcanzados con el Cemento Portland Ordinario; el riesgo de corrosión en las pastas de cementos híbridos alcalinos fue moderado mientras en el Cemento Portland Ordinario fue alto. Las pastas más destacadas fueron las 70-30-3, 80-20-2 y 70-30-2. Para el caso de la velocidad de pulso ultrasónico, los resultados de los cementos híbridos fueron comparables con un Cemento Portland Ordinario, en la mayoría de los casos indicaron calidad normal. Tomando en cuenta las resistencias a la compresión, las pastas de cementos híbridos con proporciones del 70 y 80% de ceniza volante alcanzaron valores comparables con un Cemento Portland Ordinario, a la edad de 60 días todos alcanzaron resistencias superiores a 50 MPa.

Para el estudio electroquímico del acero de refuerzo, las muestras fueron prismáticas de dimensiones 5.5x2x8 cm obtenidas a partir de los cementos híbridos 70/30, 80/20 y cemento CPO, cada probeta contuvo dos varillas de acero de refuerzo (electrodo de trabajo) y una barra de grafito (electrodo de referencia) embebida. Para los dos primeros casos se utilizó como disolución de hidratación  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 2% (pH ~11.3), para el CPO (referencia) se utilizó agua de grifo. En todos los casos la relación disolución/cemento (a/c) fue de 0.3. Posterior al tiempo de curado, en todos los casos se dio el tiempo necesario para que el acero alcanzara su estado de pasivación, una vez logrado esto, las muestras se sometieron a ciclos de inmersión en agua de mar natural y secado (21 y 28 días). El comportamiento electroquímico del acero de refuerzo se obtuvo mediante las técnicas de medición de potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) y resistencia a la polarización lineal (Rpl) durante el proceso de curado, condición seca e inmersión

en agua de mar natural.

Considerando los resultados obtenidos después de 160 días de monitoreo, las varillas de acero de refuerzo embebidas en cemento CPO, en los ciclos de inmersión y secado, presentaron nivel de corrosión muy elevado, mientras las varillas de acero de refuerzo embebidas en el cemento 70-30 en algunos casos presentaron daño por corrosión despreciable.

# 1 Introducción

---

El Cemento Portland actualmente es el principal producto cementante utilizado en la construcción, su masiva producción conlleva problemas medioambientales, energéticos y de durabilidad. La comunidad científica ha investigado nuevas alternativas que puedan sustituir a este material sin repercutir en sus propiedades. Una de ellas actualmente es el desarrollo de *cementos híbridos* (Palomo A. et. al., 2015), alternativa que se basa en un sistema multicomponente. Considera la adición de un subproducto industrial con contenidos de adiciones minerales (materiales silicoaluminosos que presentan estructuras amorfas o vítreas) incorporados al Cemento Portland Ordinario. La presencia de una cierta cantidad de calcio reactivo (en forma de Cemento Portland) en la mezcla de partida permite que el material endurezca a temperatura ambiente sin necesidad de emplear una activación térmica inicial.

Estos materiales al ser mezclados con activadores alcalinos, fraguan y endurecen para dar lugar a un material con buenas propiedades conglomerantes. A estos cementos activados alcalinamente con porcentajes de Cemento Portland Ordinario, inferiores al 30%, se les denomina “Cementos híbridos”. Los materiales silicoaluminosos, surgen como una alternativa altamente sustentable, económica y de durabilidad, que se basa en mezclar con el Cemento Portland Ordinario para dar lugar a cementos híbridos alcalinos.

Si bien los cementos híbridos alcalinos son una nueva tecnología que se está estudiando ampliamente en el ámbito científico, en este proyecto se abordan pruebas físicas, mecánicas y el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en pastas de dichos cementos.





## 2 Antecedentes

---

### 2.1 Cemento Portland

Ruiz Santa 2013, reporta que en 1824 Joseph Aspdin fabricó y patentó un material grisáceo y pulverulento que, amasado con agua y arena, endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido al de las calizas de Portland, de ahí que lo patentara con el nombre de “Cemento Portland”. El cemento patentado por Aspdin es considerado como el precursor del Cemento Portland actual, aunque la temperatura empleada para calcinar las arcillas y calizas era considerablemente inferior a la que se alcanza actualmente para completar la clinkerización.

Unos años más tarde, Isaac Johnson observó que si se aumentaba la temperatura de calcinación de la mezcla de caliza y arcilla, el material obtenido, pese a endurecer con mayor lentitud, presentaba mejores propiedades mecánicas. El producto que obtuvo Johnson no era sino un Clinker muy parecido al Portland actual.

El Cemento Portland es un material inorgánico finamente molido “conglomerante hidráulico”, que mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de una reacción química y procesos de hidratación, y que una vez endurecido mantiene su resistencia y estabilidad incluso sumergido en el agua.

Arias Jaramillo 2013 afirma que este material es fabricado a partir de calizas, arcillas y otros materiales de composición similar, bajo un proceso de calentamiento con el cual se inducen cambios en las propiedades, donde se produce una fusión parcial de los componentes iniciales. El producto resultante es llamado “Clinker” y es el componente principal de los cementos hidráulicos Portland. El Clinker generalmente está conformado en un 90% por silicatos de calcio, aluminatos de calcio.

Ruiz Santa, 2013, afirma que actualmente una de las líneas de investigación más importantes en torno al Cemento Portland se orienta hacia la forma de reducir el gasto energético en el proceso de fabricación de este material y a reducir, en la medida de lo posible, las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generadas durante dicho proceso.

#### 2.1.1 Calor de hidratación

Las reacciones durante el endurecimiento del cemento Portland se caracteriza por la liberación de calor. A esta liberación de calor se le conoce como calor de hidratación.

Bas *et. al.*, 2008, mencionan que el alto calor de hidratación puede ocasionar problemas tanto de grietas como de fisuras en el concreto. Este agrietamiento es crítico, ya que disminuye la resistencia del concreto al flujo de agentes agresivos hacia el mismo. El uso de ceniza volante como sustituto parcial del Cemento Portland Ordinario reduce el calor de hidratación. Un aumento del nivel de sustitución de Cemento Portland por ceniza volante, implica una mayor reducción de calor de hidratación y, por lo tanto, un menor riesgo de agrietamiento en el concreto.

### 2.1.3 Impacto ambiental y energético que tiene la producción de Cemento Portland

Criado Sanz M., 2007, sostiene que el Cemento Portland es el producto de la calcinación de una mezcla apropiada de calizas y arcillas. Durante el proceso de calcinación de calizas, se produce un desprendimiento de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera. La producción de 1 tonelada de cemento genera, alrededor de 0,55 toneladas de CO<sub>2</sub> por efecto de la descarbonatación de la caliza, así como de unas 0,40 toneladas del mismo gas por el consumo de combustibles. Por lo tanto, la fabricación de una tonelada de cemento supone la emisión a la atmósfera de aproximadamente 1 tonelada de CO<sub>2</sub>. Con respecto al elevado consumo energético, durante la fabricación del Cemento Portland, en la etapa de clinkerización, es necesario alcanzar temperaturas muy altas para la formación de cada una de sus fases.

En la Tabla 1 se muestra el balance térmico global del proceso de fabricación del Cemento Portland.

**Tabla 1. Consumo energético en el proceso de fabricación del cemento Portland (Criado Sanz M. 2007)**

<b>Consumo energético en la fabricación de Cemento Portland</b>	
Calor de formación	437 Kcal /Kg.
Pérdidas por radiación	215 Kcal /Kg.
Calor de secado del crudo	109 Kcal /Kg.
Pérdidas por gases calientes	91 Kcal /Kg.
Pérdidas por salida del Clinker caliente	11 Kcal /Kg.
Pérdidas por evaporación del agua	11 Kcal /Kg.

Es evidente que el proceso de fabricación del cemento consume gran cantidad de energía, dando un total de 874 Kcal /Kg.

## **2.3 Principales problemas de deterioro en estructuras de concreto reforzado (corrosión: cloruros, carbonatación)**

La corrosión es el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera general, puede entenderse como la tendencia que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Así, por ejemplo, el hierro y el acero tienen una tendencia natural a combinarse con otros elementos químicos para volver a sus estados de energía más bajos. A menudo se combinan con el oxígeno y el agua, presentes en la mayoría de los entornos naturales para formar óxidos hidratados de hierro, similares en composición química al mineral original de hierro.

Ávila & Genescá 2003, mencionan: La corrosión puede describirse como una reacción de oxidación, transformación sufrida por el metal que retorna a su estado original, semejante por tanto a cualquier oxidación química. Por esto mismo, debe y puede ser regida por las leyes establecidas de la física y la química.

Las estructuras son reforzadas con varillas de acero, las cuales se cubren de concreto (mezcla de Cemento Portland, arena, agua y agregado de pH alto, aproximadamente 12.5) con el objeto de proporcionar una adecuada resistencia mecánica a la estructura. En condiciones normales (en un medio con atmósfera limpia), no debe ocurrir nada que afecte a la estructura, ya que el concreto es un medio perfectamente compatible con el acero, precisamente por el alto valor del pH.

El concreto es un material duro, de alta densidad y discontinuo, debido a su propia constitución, puede ser permeable a líquidos y gases, debido a que contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados. Esto es de gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, pues tanto el agua como el oxígeno pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto. Por ejemplo, las estructuras que se encuentran en contacto con el agua de mar que contiene iones cloruro, a través de la propia porosidad del concreto pueden llegar a las varillas de acero y en ese momento se inicia la corrosión.

La corrosión del acero en el concreto consiste en la oxidación destructiva de éste, por el medio que lo rodea. Debido a lo cual, ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, que consiste de cuatro elementos principales:

- a) Un ánodo, donde ocurre la oxidación.

- b) Un cátodo, donde ocurre la reducción.
- c) Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- d) Un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de la uniformidad en el acero, al contacto con metales menos activos, así como también, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero.

La corrosión normalmente se previene por la formación de la película de óxido férrico hidratado. Sin embargo, cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de esta película y la corrosión del acero en las estructuras se hace presente, desencadenando las siguientes consecuencias:

- El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido.
- El concreto puede fisurarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.
- La adherencia acero - concreto disminuye o desaparece.

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse, existen dos mecanismos que en general son los más aceptados:

- 1) Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido.
- 2) Por la acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno.

Santiago Hurtado, G. 2010, sostiene que cuando un cemento o mortero está expuesto a dióxido de carbono, se origina una reacción que produce carbonatos, esta reacción también genera una contracción. La carbonatación también puede provocar un deterioro y una disminución del pH del concreto, provocando corrosión en la armadura próxima a la superficie, también la exposición al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante el proceso de endurecimiento puede afectar la superficie del concreto, dejando una superficie blanda, polvorienta y con menor resistencia al agua.

La fuente transportadora de CO<sub>2</sub> puede ser la atmósfera o agua que contenga CO<sub>2</sub>. El proceso de carbonatación depende de la humedad relativa ambiente, la temperatura, la permeabilidad del concreto y la concentración de CO<sub>2</sub>. Se produce mayor carbonatación cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 80%. Para humedad relativa menor a 25%, el grado de carbonatación se considera insignificante. Si la humedad relativa es mayor de 80%, la humedad presente en

los poros restringe la penetración de CO<sub>2</sub>. Los concretos permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los concretos densos, bien compactados y curados.

Santiago Hurtado G., 2010, afirma que en construcciones de estructuras de concreto en zonas cercanas al mar, si las estructuras se encuentran por debajo del nivel del agua, la absorción capilar y la evaporación pueden provocar saturación y cristalización en el concreto, lo cual provocaría un ataque químico sobre el concreto por sulfatos y la aceleración de la corrosión del acero por cloruros.

Vázquez P.E., 2007, afirma que los cloruros tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa, pero su participación en el mecanismo de la corrosión de los metales embebidos en el concreto producen compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y agregados.

## 2.5 Cementos híbridos

Estos cementos son materiales conglomerantes que surgen de la simbiosis del Cemento Portland más cementos alcalinos (Rendón et. al., 2015). La adición de activadores alcalinos pueden mejorar las propiedades de un cemento tradicional, especialmente en edades tempranas.

Palomo A. et. al., 2015, sostienen que se ha comprobado que la presencia de una cierta cantidad de calcio reactivo (en forma de Cemento Portland) en la mezcla de partida permite que el material endurezca a temperatura ambiente sin necesidad de emplear una activación térmica inicial. A estos cementos activados alcalinamente con un porcentaje de Cemento Portland se les denomina "Cementos híbridos". La enorme versatilidad de estas mezclas en cuanto a las materias primas que lo componen, admiten elevadas cantidades de subproductos como las cenizas volantes, escorias y metacaolín.

Rivera J. F. et. al., 2014, sostienen que los cementos híbridos tienen como objetivo combinar las características positivas de los materiales tradicionales como las de los materiales (CPO) con los de activación alcalina, generando nuevos materiales con mayor durabilidad y propiedades mecánicas, debido a la coexistencia de los productos de hidratación de una mezcla de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y aluminosilicatos o geopolímeros gel (N-A-S-H).

En estas mezclas cementosas, el tipo de producto formado depende en gran medida de las condiciones de reacción, incluyendo la composición química de las materias primas, el tipo de activador alcalino y la concentración y la temperatura de curado.

Investigaciones realizadas en el Instituto Eduardo Torroja (García Lodeiro et. al., 2015) demostraron que geles N-A-S-H (principal producto de reacción de activación de ceniza volante tipo F) y C-S-H (producto de hidratación principal en sistemas de Cemento Portland) son compatibles.

Palomo A. *et. al.*, 2007, 2015, afirma que el potencial del impacto tecnológico de la fabricación de cementos adicionados con un contenido de ceniza en altas porciones y sin perder el desempeño de cemento normal, ha impulsado la exploración actual de las propiedades mecánicas y de durabilidad de un sistema de cemento compuesto, Cemento Portland y ceniza volante hidratado con diferentes soluciones alcalinas.

### 3 Desarrollo del estudio

El desarrollo experimental seguido en esta investigación consistió en fabricar pastas de cementos híbridos de proporciones 70/30 y 80/20 de ceniza volante/ Cemento Portland Ordinario, hidratados con disoluciones alcalinas (pH~11). Como referencia se fabricaron muestras de Cemento Portland Ordinario 100% hidratados con agua de grifo. El estudio consistió en obtener las propiedades: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, porcentaje total de absorción de agua, resistencia a la compresión y el comportamiento electroquímico de acero de refuerzo embebido en tales pastas de cementos a diferentes edades. La Figura 1 describe el desarrollo experimental.

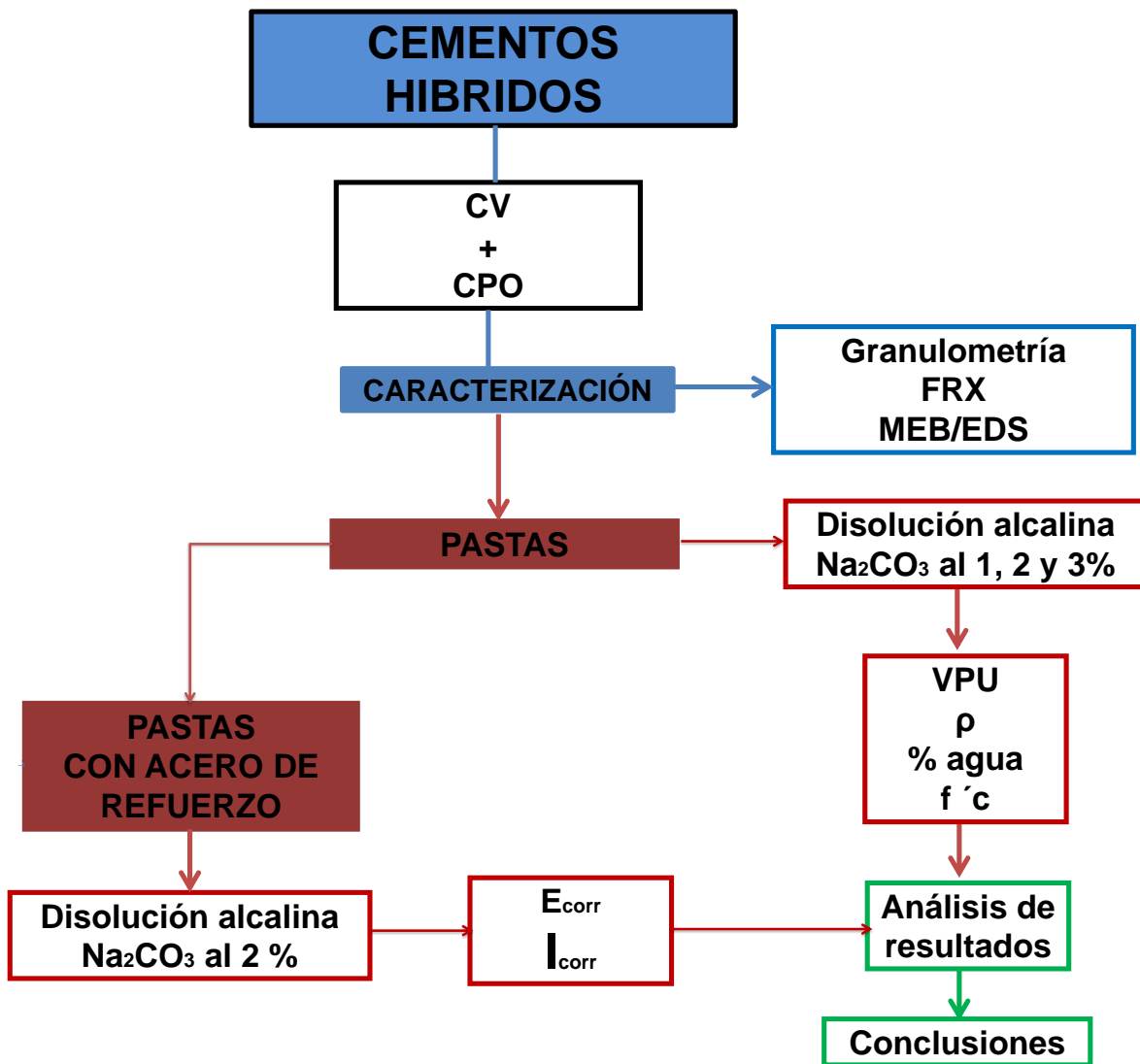


Figura 1. Desarrollo experimental

### 3.1 Cementos y disoluciones de hidratación

La Tabla 2 describe las características de las disoluciones empleadas como activadores para la obtención de cementos híbridos.

**Tabla 2. Características de las disoluciones de hidratación**

REACTIVO	CONCENTRACIÓN	DESIGNACIÓN	pH
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1%	1	11.5
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2%	2	11.39
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2%	3	11.34
Agua de grifo	-	AG	

En la Tabla 3 se describen las condiciones y la denominación de las pastas de cementos híbridos estudiados. Cabe mencionar que las muestras de pastas de cementos híbridos para la caracterización física y mecánica fueron de dimensiones 5 x 5 x 5 cm, para el caso de las muestras de pastas con acero de refuerzo para el monitoreo electroquímico del acero fueron prismáticas de dimensiones 5.5 x 2 x 8 cm, descritas en la Tabla 4.



**Tabla 3. Descripción de las pastas de cementos híbridos fabricados**

<b>NOMBRE</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>ACTIVADOR</b>	<b>REL A/C</b>	<b>CURADO</b>
CPO	100% CPO	AG	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
70-30-1	CV 70% + CPO 30%	1	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
70-30-2	CV 70% + CPO 30%	2	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
70-30-3	CV 70% + CPO 30%	3	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
80-20-1	CV 80% + CPO 20%	1	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
80-20-2	CV 80% +CPO 20%	2	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
80-20-3	CV 80% + CPO 20%	3	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
PASTA 70-30	CV 70% + CPO 30%	2	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
PASTA 80-20	CV 80% + CPO 20%	2	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
PASTA CPO	100% CPO	AG	0,3	20 h a 22 °C 98% HR

**Tabla 4. Descripción de las pastas de cementos híbridos con acero de refuerzo e hidratadas con Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> al 2%**

Tipo de cemento	Núm. de probetas	Imagen de las probetas
Pasta 80-20	2	
Pasta 70-30	2	
Pasta CPO	2	

### 3.2 Materiales de partida

Los materiales de partida para generar los cementos híbridos fueron:

- *Ceniza volante tipo F (CV)*
- *Cemento Portland Ordinario tipo CPO 40 conforme a la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE (CPO)*

Cabe mencionar que estos materiales, fueron previamente caracterizados y reportados por Rendón M. *et. al.* 2015.

### 3.2.1 Fluorescencia de Rayos X

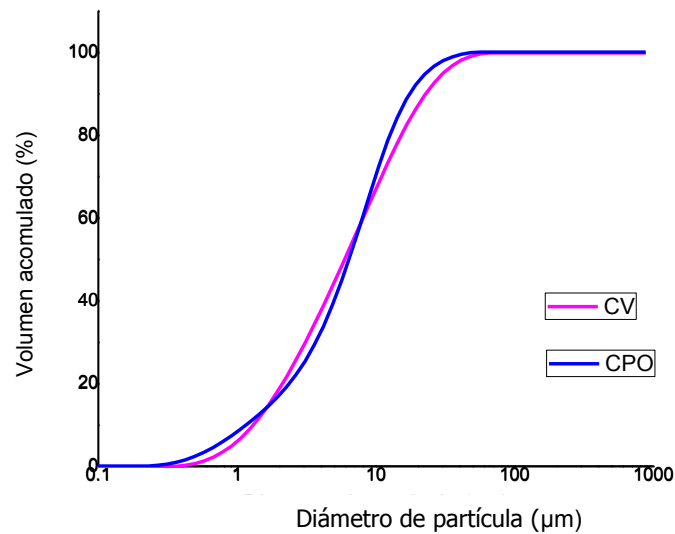
La composición química de todos los materiales obtenida por fluorescencia de rayos X en polvo, se presenta en la Tabla 5 (Rendón M. *et. al.* 2015).

**Tabla 5. Composición química de los materiales de partida**

	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	CuO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	SO <sub>3</sub>	otros
<b>CV</b>	1.14	1.55	1.92	23.9	8.633	0.0119	6.577	1.14	52.54	-	0.0448	0.783	1.756
<b>CPO</b>	3.2	0.201	1.71	3.51	66.07	0.0473	3.41	0.23	16.32	1.066	0.0293	3.928	0.2482

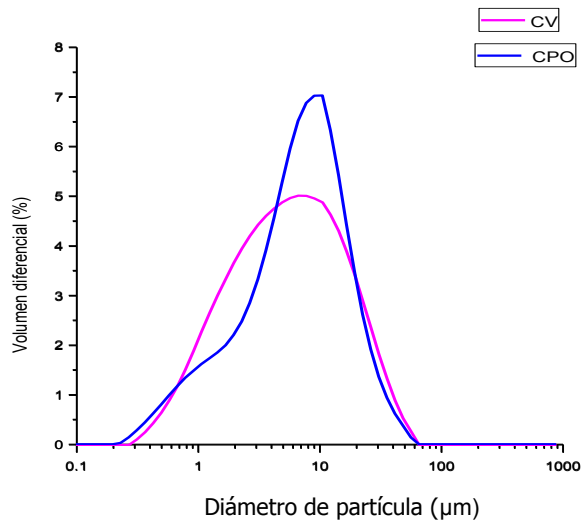
### 3.2.2 Granulometría

De acuerdo con investigaciones reportadas, la granulometría del material (CV) debe tener un tamaño de partícula < 45 µm ~80-90% para que las reacciones involucradas en el proceso de fraguado sean favorables (Fernández Jiménez A. y Palomo A. 2003). Los resultados de la CV y CPO se muestran en la Figura 2.



**Figura 2. Tamaño de partícula de CV y CPO (Rendón M. *et. al.* 2015)**

En la Figura 3 se observa que el 95% de las partículas de CV y CPO mostraron un tamaño menor a 45  $\mu\text{m}$ .

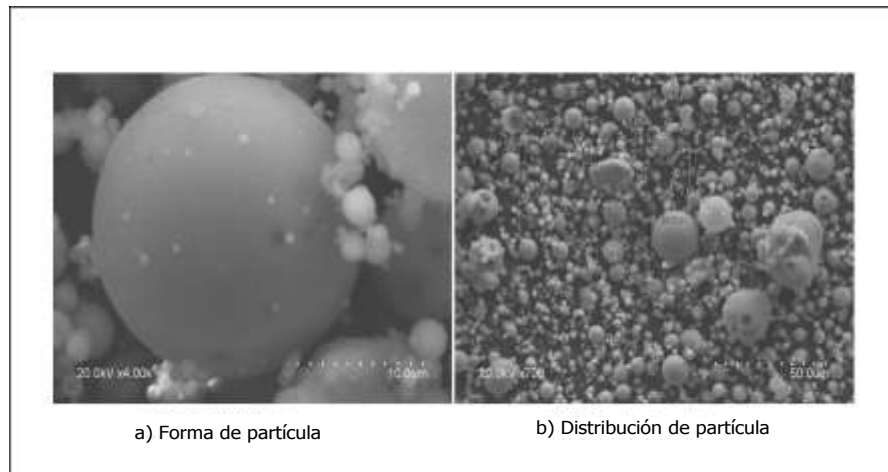


**Figura 3. Distribución del tamaño de partícula de CV y CPO** (Rendón M. *et. al.* 2015)

En la Figura 3 se muestra la distribución del tamaño de partículas de los materiales. Se observa que la CV está formada por partículas centradas en densidad de 8  $\mu\text{m}$  y el CPO está formado por partículas centradas con densidad de 10  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.3 Microscopía Electrónica de Barrido

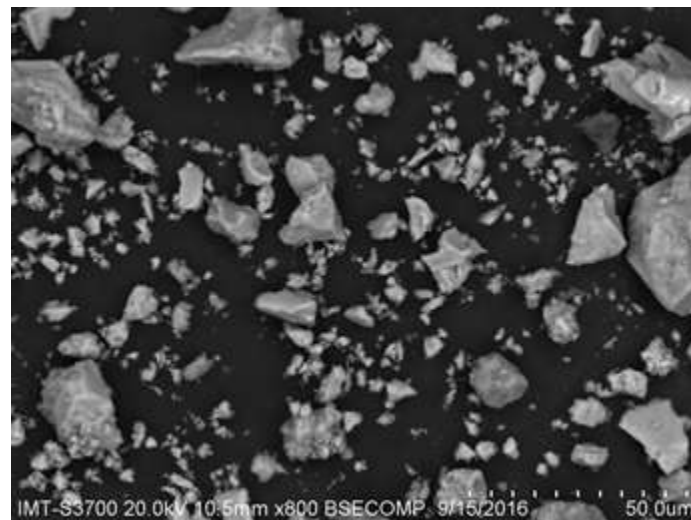
Los análisis mediante de microscopía electrónica de barrido (MEB) muestran la morfología y la forma que tienen las partículas de CV y el CPO. Figuras 4 y 5.



**Figura 4. Fotomicrografía de la CV (Rendón M. *et. al.* 2015)**

La Figura 4 demuestra que la forma de la partícula de la CV es esférica (ver Figura 4a). La Figura 4b muestra la distribución y los diferentes tamaños de las partículas de la CV.

La Figura 5 muestra la morfología del CPO que demuestra que la forma de la partícula del CPO es irregular.



**Figura 5. Fotomicrografía del CPO**

### 3.3 Fabricación de pastas

Para la fabricación de pastas se utilizaron tres disoluciones de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (ver Tabla 2). En todos los casos la relación agua/cemento fue de 0.3. El proceso para la fabricación de pastas fue de acuerdo al establecido en la Norma ASTM C305 y se describe a continuación:

- Se agregó el agua o disolución de hidratación en el recipiente (mezcladora) como se muestra en la Figura 6a, después se agregó el cemento (ver Figura 6b).
- Se mezcló por 60 segundos. Transcurrido este tiempo se detuvo la mezcladora y se limpió la mezcla adherida a las paredes y se llevó hacia el fondo del recipiente.
- Se mezcló nuevamente durante 60 segundos (Ver Figura 6c).



**Figura 6. Proceso de mezclado para pastas**

Después del mezclado, se procedió al llenado de los moldes. Cabe mencionar que previo al vaciado de las mezclas, se aplicó un recubrimiento delgado de un engrasante con un paño a las caras interiores de los moldes metálicos para facilitar su desmolde.

El vaciado de la mezcla en los moldes se realizó dentro de un tiempo total no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de obtener la mezcla. Para el caso de las muestras de 5x5x5 cm se hizo lo siguiente:

- Se colocó una capa de mezcla de alrededor de 25 mm (1 pulgada) (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos los compartimientos del cubo.

- Se apisonó la mezcla en cada compartimiento cúbico 32 veces durante 10 segundos en 4 rondas, cada ronda fue en ángulos rectos respecto a las otras y aplicando ocho golpes adjuntos sobre la superficie del espécimen.
- La presión de apisonado fue la suficiente para asegurar el llenado uniforme de los moldes.
- Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimientos cúbicos se completó, se llenaron los compartimientos con la mezcla restante y se apisonó como para la primera capa.
- Al completar el apisonado, la parte superior de todos los cubos se extendió levemente con una hoja de acero.
- Inmediatamente después de completar el llenado los especímenes se colocaron en condición húmeda por 24 horas.



**Figura 7. Almacenamiento de pastas**

Para el caso de las muestras prismáticas se vació la mezcla en los moldes y se apisonó ligeramente la mezcla para homogenizar. Finalmente se embebieron dos varillas de acero al carbono de 10.5 x 0.3175 cm (electrodo de trabajo) y una barra de grafito de 10 x 0.3175 cm (electrodo de referencia), ver Figura 8. Una vez transcurridas 24 horas, se desmoldó y todas las muestras se mantuvieron en cámara húmeda (curado) por 28 días.



**Figura 8. Fabricación de probetas**

Posterior al período de curado, todos los especímenes cúbicos se rociaron diariamente con agua del grifo.

Para el caso de las muestras prismáticas (con acero de refuerzo), posterior a los 28 días (tiempo curado) se aislaron del medio ambiente hasta alcanzar el estado de pasivación del acero. Una vez alcanzado este estado, se sometieron a ciclos de inmersión y secado (21 y 28 días respectivamente).

### **3.4 Mediciones físicas y mecánicas**

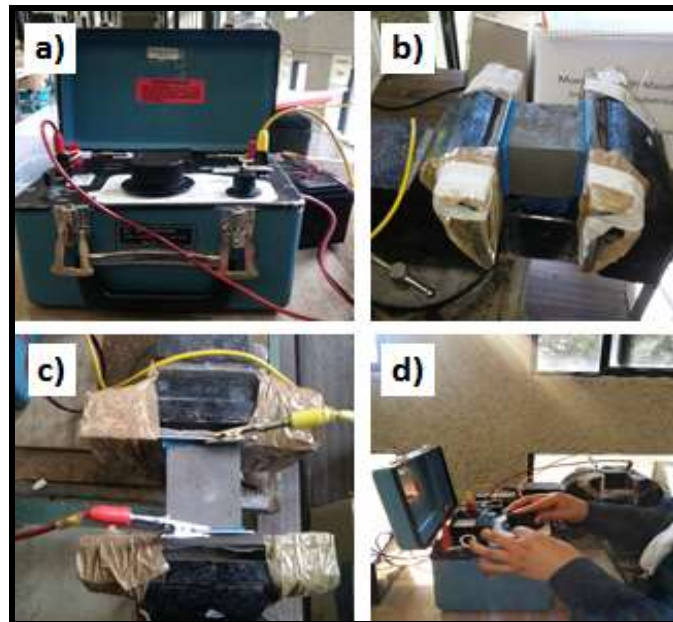
Para el análisis de pastas cúbicas (5x5x5 cm) de cementos híbridos alcalinos, se realizaron las técnicas: velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, % de absorción total de agua y resistencia a la compresión a diferentes edades para la obtención de su comportamiento mecánico y durable. Cabe mencionar que no existen criterios para la evaluación de pastas de cementos, es por ello que se emplearon procedimientos y criterios establecidos para concretos.

#### **3.4.1 Determinación de resistividad eléctrica**

El equipo utilizado fue un Resistómetro marca Nilson (ver Figura 9a). Para realizar las mediciones en pastas el procedimiento fue considerando el descrito en el Manual de la Red DURAR y se resume a continuación: se colocaron dos paños



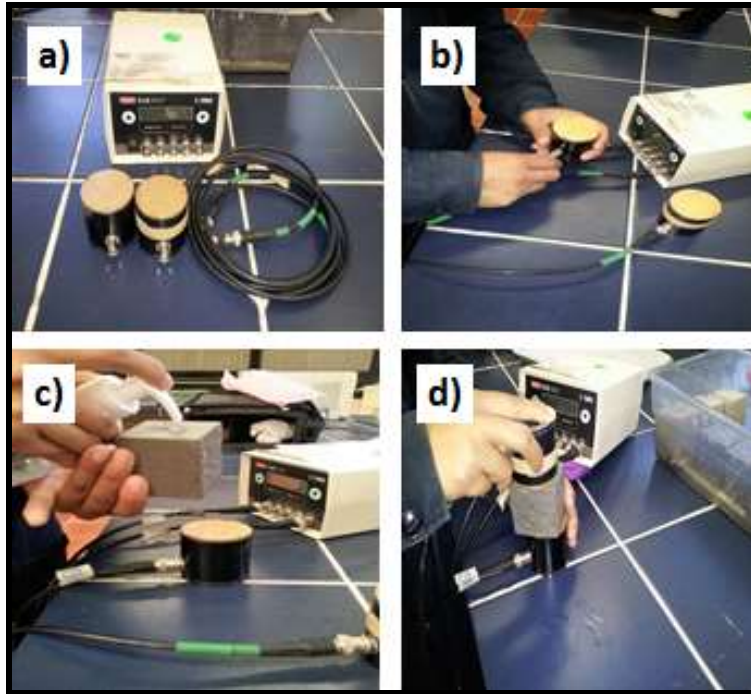
húmedos en dos caras opuestas, con un área similar a la de la probeta cubica (5x5x5 cm). Posteriormente se colocaron dos placas de acero inoxidable en cada extremo de las dos caras asegurándose de que quedaran fijas (ver Figura 9b). Una vez sujeto el cubo en conjunto con las placas y los paños húmedos, se colocaron las conexiones del resistómetro en cada una de estas placas (ver Figura 9c) y se obtuvo la resistencia eléctrica. (Ver Figura 9d).



**Figura 9. Procedimiento para la medición de resistividad eléctrica de pastas**

### 3.4.2 Medición de velocidad de pulso ultrasónico

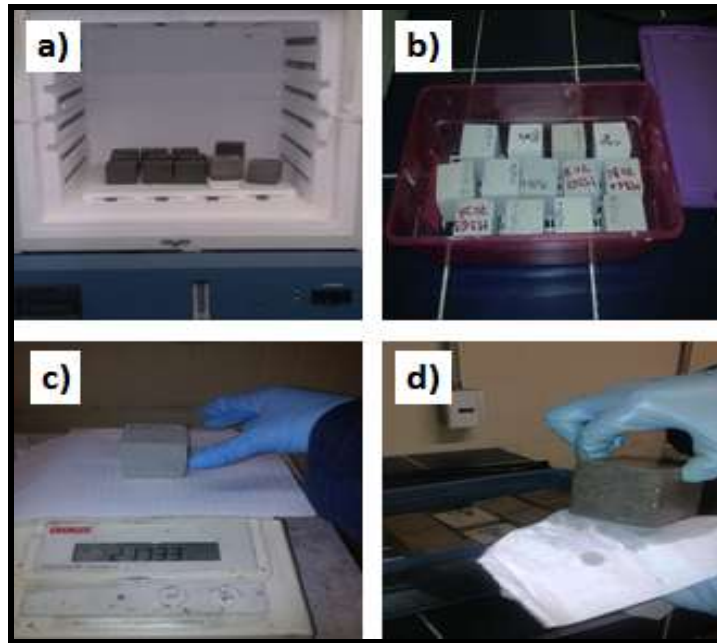
Para las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico, el procedimiento considerado fue el descrito en el Manual de la Red DURAR. Se utilizó el equipo mostrado en la Figura 10a, se conectaron los cables al receptor y transmisor como se muestra en la Figura 10b, se aplicó gel en dos caras laterales del espécimen a medir (ver Figura 10c), se colocó el transmisor en una cara del espécimen y por la otra cara el receptor y se obtuvo la lectura de velocidad en microsegundos (ver la Figura 10d).



**Figura 10. Medición de la velocidad de pulso ultrasónico en los especímenes cúbicos**

### **3.4.3 Determinación del porcentaje de absorción total de agua**

Para este ensayo fue necesario un pre-acondicionamiento de secado a 50°C hasta alcanzar su peso constante (ver Figura 11a). Una vez alcanzado el peso constante, las probetas a evaluar se sumergieron completamente en un recipiente con agua de grifo (ver Figura 11b) y se registró su peso cada 24 horas hasta alcanzar su saturación (ver Figura 11c). Cabe mencionar que previo a cada medición, cada muestra fue secada con un sanita (ver Figura 11d). Este ensayo fue elaborado de acuerdo a la norma ASTM C 642.



**Figura 11. Pastas sometidos a prueba de porcentaje de absorción total de agua**

### **3.4.4 Determinación de resistencia a la compresión**

Los especímenes cúbicos de pastas fueron ensayados en la máquina Universal Prensa Marca Controls, Modelo 70-C0019Z a las edades de 2, 28 y 60 días. Para cada edad se ensayaron 3 especímenes. Figura 12.



**Figura 12. Prueba de resistencia a la compresión de pastas**

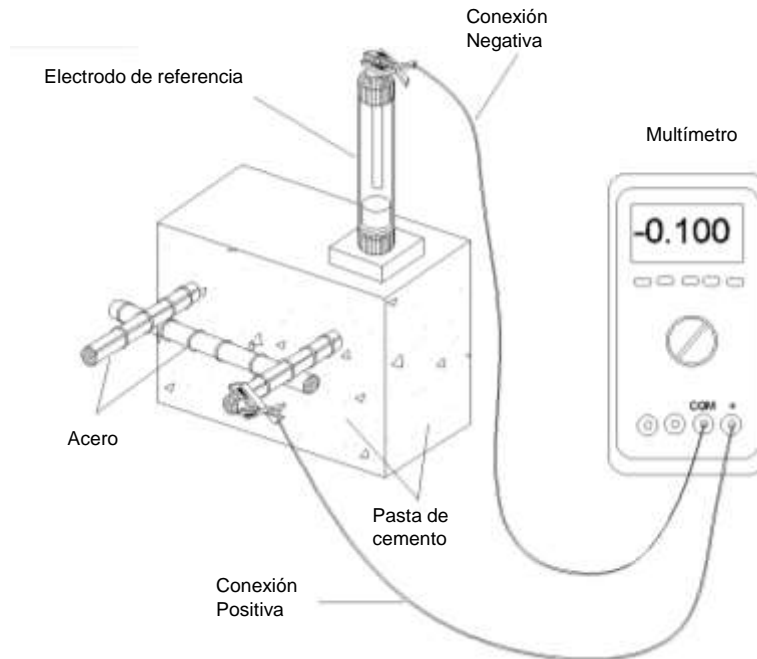
## 3.5 Mediciones electroquímicas

Durante el proceso de curado, condición seca e inmersión en agua de mar, se realizaron pruebas electroquímicas del acero de refuerzo (varilla) para analizar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en los cementos híbridos alcalinos. El monitoreo electroquímico consistió en medición de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ) considerando las normas ASTM C876, G59 y Manual de la Red DURAR. El electrodo de referencia utilizado en algunas de las mediciones fue el grafito, siendo necesario convertir los valores al electrodo de  $Cu/CuSO_4$  para el análisis de los resultados.

Cabe mencionar que posterior al período de curado los potenciales mostraron valores más negativos que  $-350$  mV vs  $Cu/CuSO_4$ , esto llevó a mantener las probetas en condición aislada del ambiente (cubiertas) hasta obtener valores de potencial más positivos que  $-350$  mV vs  $Cu/CuSO_4$ , considerando que de esta manera el acero se encuentra en estado pasivo de acuerdo a la Norma ASTM C876. La finalidad de esperar a que el acero alcanzara el estado pasivo, fue conocer el efecto que ocasionan los ciclos de inmersión y secado en la pasivación del acero. Los ciclos de inmersión en agua de mar natural y secado de las muestras fueron de 21 y 28 días respectivamente.

### 3.5.1 Medición de potencial

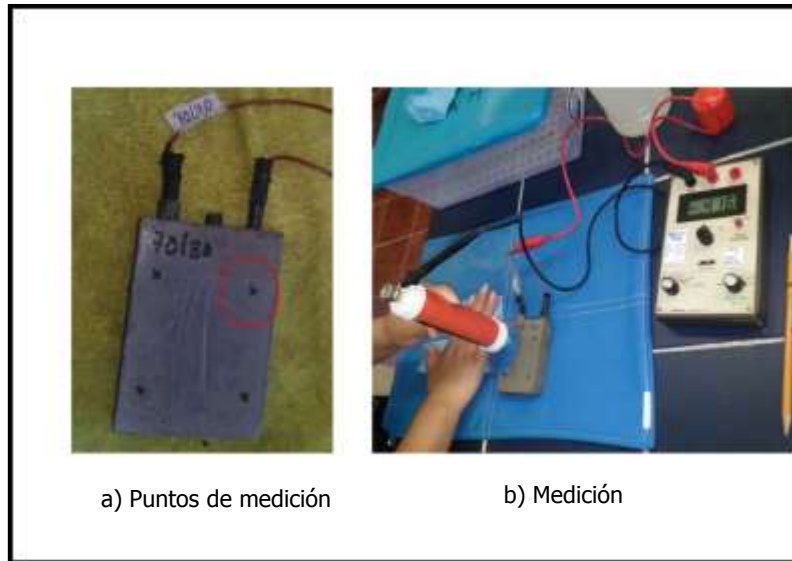
La medición de potencial fue registrada cada 7 días durante y después del tiempo de curado de cada probeta para saber el estado de actividad del acero de refuerzo (varilla). La medición se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C876 y se esquematiza en la Figura 13.



**Figura 13. Esquema de conexión para medición de potencial de corrosión (ASTM C876)**

El método consistió en medir el potencial de las varillas embebidas en las pastas de cementos, utilizando como electrodo de referencia un electrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  y un multímetro Miller, modelo LC- 4.5.

De cada varilla, se obtuvieron dos puntos de medición de potencial por repetitividad. Para cada medición se colocó una esponja húmeda entre el punto de medición y electrodo de referencia. Ver Figura 14.



**Figura 14. Medición de potencial**

### 3.5.2 Resistencia a la polarización

La prueba de Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ) se realizó cada 7 días para obtener los valores de la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ). La prueba Resistencia a la polarización fue realizada a una velocidad de barrido de 0.16 mV/s con intervalo de barrido  $\pm 30$  mV conforme a la Norma G59.

Para lograr esta prueba, la celda electroquímica se conformó con los siguientes elementos:

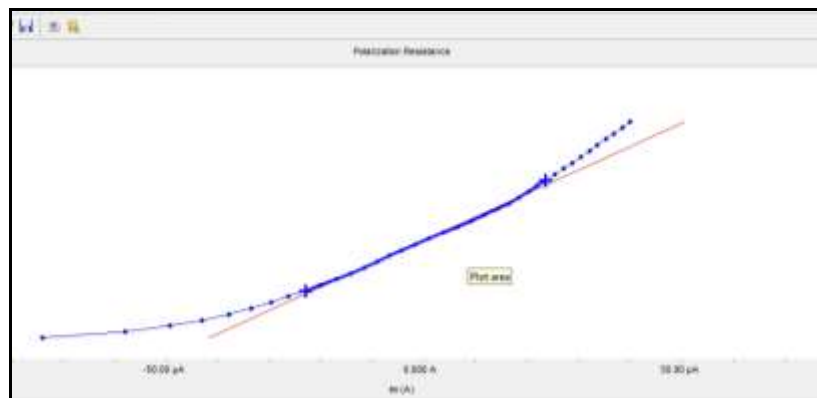
- El electrodo de trabajo: en este caso fue la varilla de acero al carbono.
- Electrodo de referencia: se utilizó una barra grafito como electrodo de referencia.
- Contra electrodo: se utilizó una malla de acero inoxidable.

Para la prueba de resistencia a la polarización se utilizó el equipo "potenciostato Gamry" modelo interface 1000. La Figura 15, representa la celda electroquímica utilizada.



**Figura 15. Esquema de conexión de la celda electroquímica**

Con ayuda del programa Gamry Echem Analyst (programa que incluye el potenciostato) se obtuvieron gráficas para cada prueba realizada como muestra la Figura 16



**Figura 16. Gráfica obtenida del potenciostato**

## 4 Resultados

### 4.1 Mediciones físicas y mecánicas

#### 4.1.1 Resistividad eléctrica

Los resultados de resistividad eléctrica obtenidos a diferentes edades de los cementos 80-20 y 70-30 e hidratados con disolución al 1, 2 y 3 de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  incrementaron conforme el transcurso del tiempo. Después de 77 días, el cemento 80-20-3 alcanzó valores de 37 K $\Omega$ .cm, 70-30-3 ~26 K $\Omega$ .cm, 80-20-2 y 70-30-2 ~ 23 K $\Omega$ .cm, 80-20-1 ~22 K $\Omega$ .cm y 70-30-1 ~ 20 K $\Omega$ .cm. Para el caso del CPO, el valor máximo alcanzado fue de ~ 5 K $\Omega$ .cm. Considerando estos resultados y los criterios establecidos en la Tabla 6 el riesgo de que exista corrosión del acero de refuerzo embebido en los cementos alcalinos es moderado, mientras que para el CPO resultó alto riesgo (<10 K $\Omega$ .cm). (Ver Figura 17).

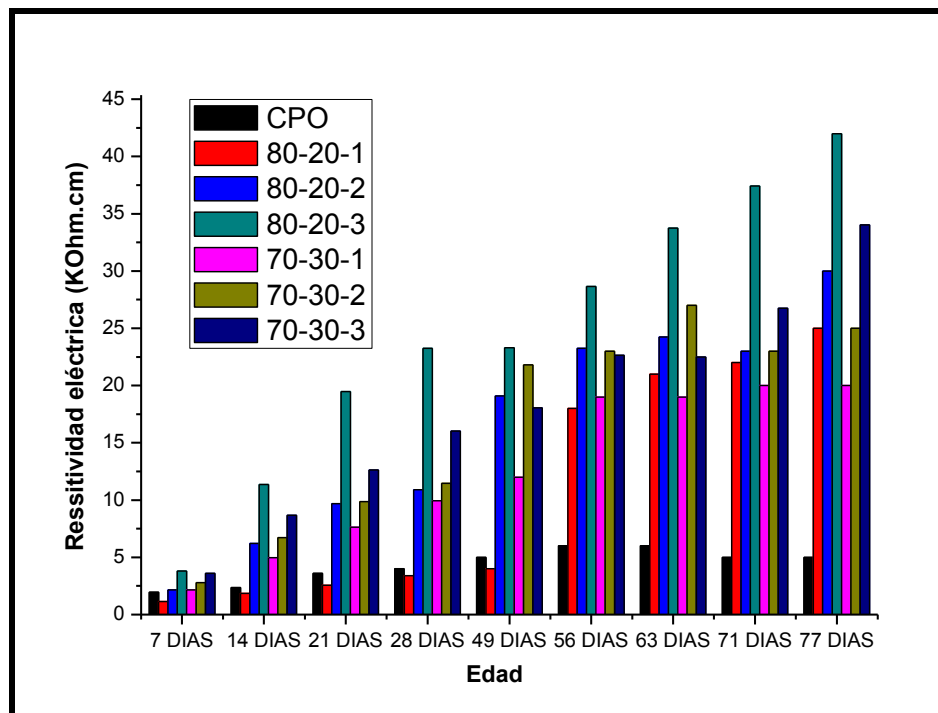


Figura 17. Resultados de resistividad eléctrica de las pastas de cemento a diferentes edades

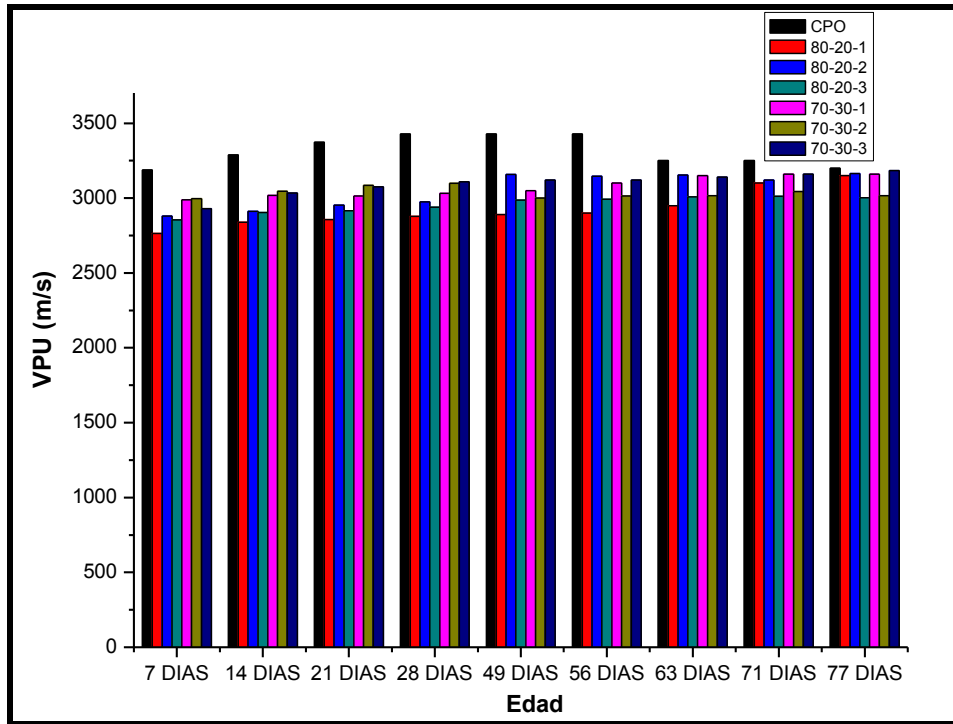


**Tabla 6. Criterios de evaluación de resistencia eléctrica (Manual DURAR)**

<b>Riesgo de corrosión</b>	
<b>Rango</b>	<b>Calidad del concreto</b>
$\rho > 200 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}$	Alto riesgo

### 4.1.2 Velocidad de pulso ultrasónico

Los resultados de velocidad de pulso ultrasónico de los cementos a 7, 14, 21, 28, 49, 56, 63, 71 y 73 días se muestran en la Figura 18. En todos los cementos, en general el orden de los valores se mantuvo conforme el paso del tiempo, después de 28 días el cemento que mostró valores superiores fue el CPO con 3300 m/s, seguido de los cementos 70-30-2 y 70-30-3 con valores  $\sim 3000$  m/s. El resto de los cementos alcanzaron valores menores a 2800 m/s. A edades superiores de 28 días, los valores de VPU se mantuvieron dentro del orden alcanzado a 28 días, excepto los cementos 80-20-2, 70-30-2 y 70-30-3 que alcanzaron valores  $\sim 3100$  m/s. (Ver Figura 18).



**Figura 18. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico de las pastas de cemento híbridos a diferentes edades**

Conforme a los criterios descritos en la Tabla 7, la calidad de los cementos CPO, 70-30-2 y 70-30-3 se considera como alta, mientras el resto de los cementos se consideran de calidad normal.

**Tabla 7. Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (Manual DURAR)**

Velocidad de pulso ultrasónico	
Velocidad de propagación	Calidad del concreto
<2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

### 4.1.3 Porcentaje total de absorción de agua.

Los resultados de porcentaje de absorción de agua obtenidos en muestras de los cementos evaluados, se presentan en la Tabla 8.

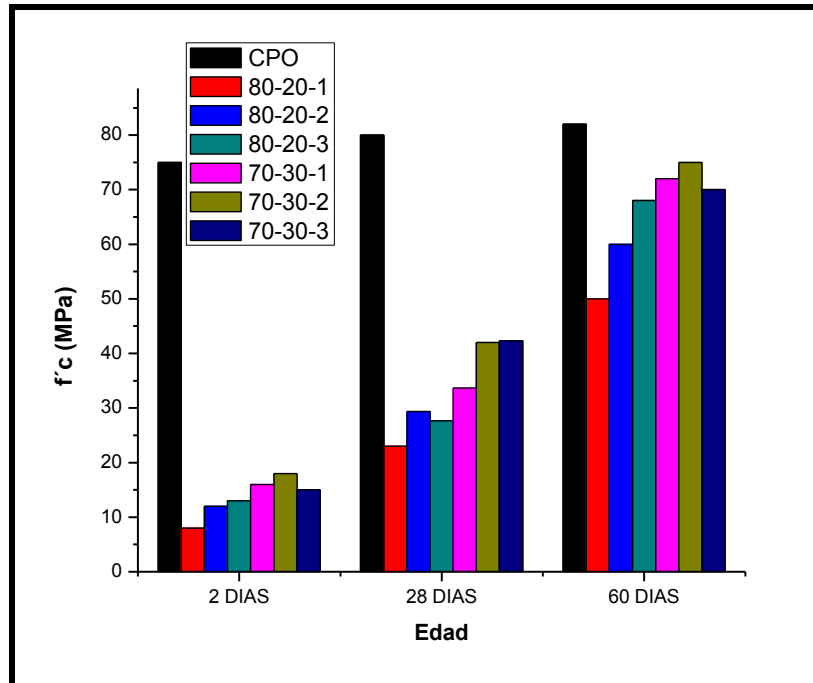
**Tabla 8. Porcentaje de absorción total de agua de cementos y CPO**

<b>Porcentaje de absorción total de agua</b>	
<b>Cemento</b>	<b>% de absorción total de agua</b>
CPO	9
80-20-1	17
80-20-2	20
80-20-3	20
70-30-1	14
70-30-2	17
70-30-3	18

El orden descendente de la capacidad de absorción total de agua de los cementos fue: 80-20-2, 80-20-3, 70-30-3, 70-30-2, 80-20-1, 70-30-1 y CPO. El cemento con menor porcentaje de absorción correspondió al CPO.

### 4.1.4 Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos después de 2, 28 y 60 días, se muestran en la Figura 19.



**Figura 19. Resultados de resistencia a la compresión después de 2, 28 y 60 días de pastas de cementos híbridos**

El orden descendente de resistencia mecánica fue: CPO con ~80 MPa, 70-30-2 con ~75 MPa, 70-30-1 con ~70 MPa, 70-30-3 con 67 MPa, 80-20-3 con 65 MPa, 80-20-2% con 60 MPa y por último 80-20-1 con 50 MPa. Las resistencias alcanzadas después de 28 días en todos los casos fueron > 45 MPa.

## 4.2 Mediciones electroquímicas

### 4.2.1 Potencial de corrosión

Los resultados fueron interpretados según el criterio establecido en la norma ASTM C876 y descritos en la Tabla 9.

**Tabla 9. Criterios de evaluación de potencial de corrosión (ASTM C876)**

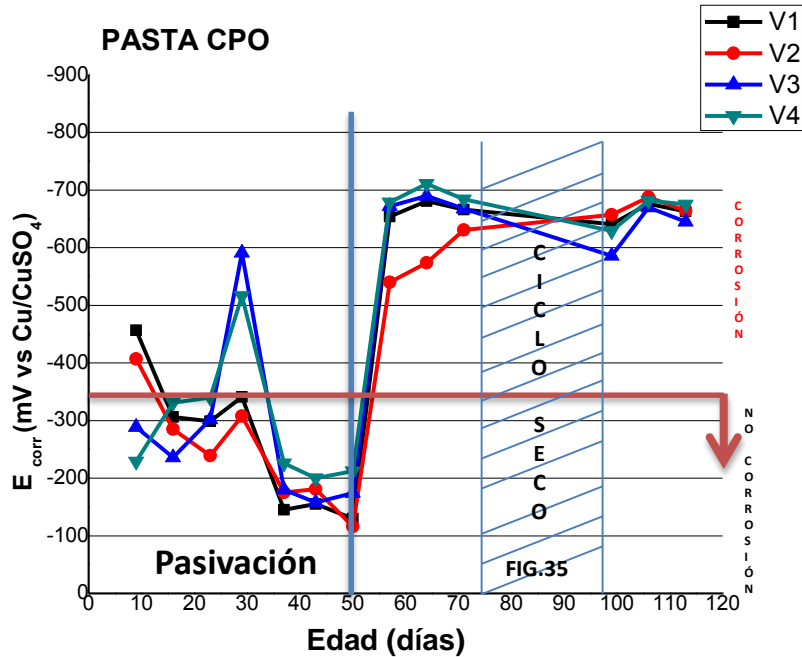
<b>Criterios para la interpretación de potenciales</b>	
<b>Potencial de corrosión (<math>E_{corr}</math>) Cu/CuSO<sub>4</sub></b>	<b>Probabilidad de corrosión</b>
Más negativo que -0.350 V	90% que exista corrosión
Más positiva que -0.200 V	90% que no exista corrosión
Valores de -0.200 a -0.350 V	incierto

### Cemento CPO

Cabe mencionar que para una mejor comprensión de resultados, se separaron los datos obtenidos durante los ciclos de inmersión y ciclos de secado.

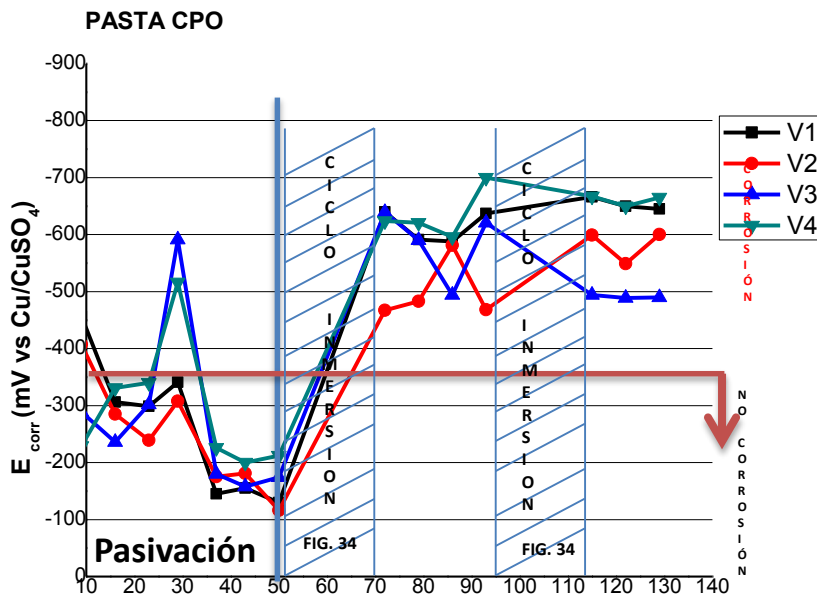
En las Figuras 20 y 21 se observa que en el tiempo de curado (28 días) de las probetas, las varillas no alcanzaron completamente la pasivación, existieron potenciales que oscilaron en valores de -550 mV. A los 37 días los potenciales de las varillas se encontraban en valores más positivos de -350 mV lo cual indicó pasivación conforme a la norma ASTM 876.

Una vez que todas las varillas mostraron valores de potencial de pasivación, el día 49 se sumergieron en agua de mar natural, ocasionando desplazamiento de potencial a valores más negativos de -500 mV, valores que durante los ciclos de inmersión se mantuvieron. Ver Figura 20. Estos valores de  $E_{corr}$  indicaron presencia de corrosión del acero.



**Figura 20. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento CPO durante los ciclos de inmersión**

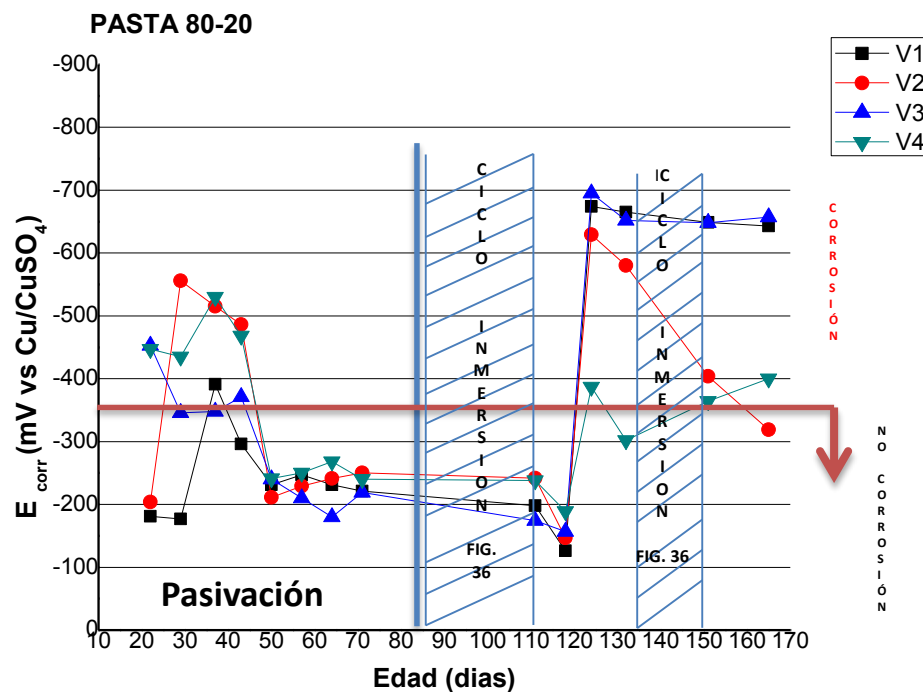
El comportamiento del potencial de corrosión durante los ciclos de secado se presenta en la Figura 21. Se observa que los potenciales se mantuvieron más negativos que -450 mV durante todo el monitoreo, indicando presencia de corrosión.



**Figura 21. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento CPO durante los ciclos de secado**

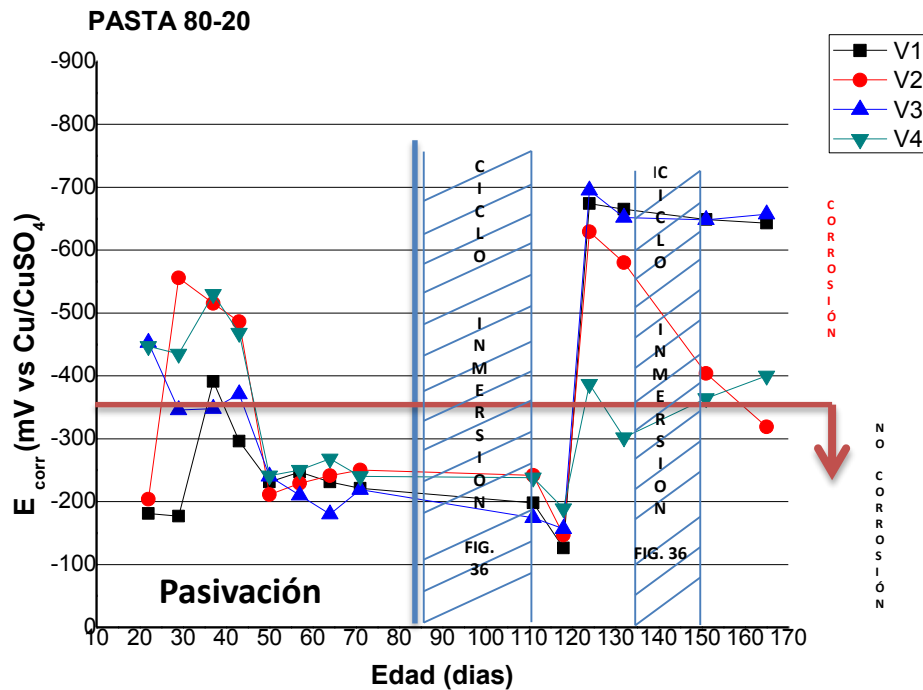
## Cemento 80-20

En las Figuras 22 y 23 se muestran los potenciales de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) de las varillas embebidas en cemento 80-20 (pasta) tanto en los ciclos de inmersión y secado respectivamente. En ambas gráficas se observa que en el tiempo de curado (28 días) de las probetas, las varillas no alcanzaron completamente la pasivación, existieron potenciales que oscilaron en valores más negativos de -350 mV. El día 50 los potenciales de las varillas tendieron a valores más positivos de -350 mV lo cual indicó pasivación conforme a la norma ASTM 876. Una vez alcanzado este estado, se sumergieron en agua de mar natural el día 70. A partir de este día todos los potenciales obtenidos fueron más negativos que -500 mV, indicando corrosión (Figura 22).



**Figura 22. Potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 80-20 durante los ciclos de inmersión**

El comportamiento del potencial durante los ciclos de secado, en algunas mediciones se observaron valores más positivos que -350 mV, sin embargo, la mayoría de las mediciones indicaron corrosión (más negativos que -350 mV). Figura 23.



**Figura 23. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 80-20 durante los ciclos de secado**

### Cemento 70-30

En las Figuras 24 y 25 se muestran los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) de las varillas embebidas en cemento 70-30 (pasta), en los ciclos de inmersión y secado respectivamente. En ambas gráficas se observa que durante el tiempo de curado (28 días) de las probetas, las varillas no alcanzaron completamente la pasivación, existieron potenciales que oscilaron en valores más negativos de -350 mV. El día 47 los potenciales de las varillas mostraron valores más positivos de -350 mV lo cual indicó pasivación conforme a la norma ASTM C876. Una vez alcanzado este estado, se sumergieron en agua de mar natural el día 70. A partir de este día los potenciales en su mayoría fueron más negativos que -500 mV, tanto en condición inmersa y seca, indicando presencia de corrosión (Figuras 24 y 25).



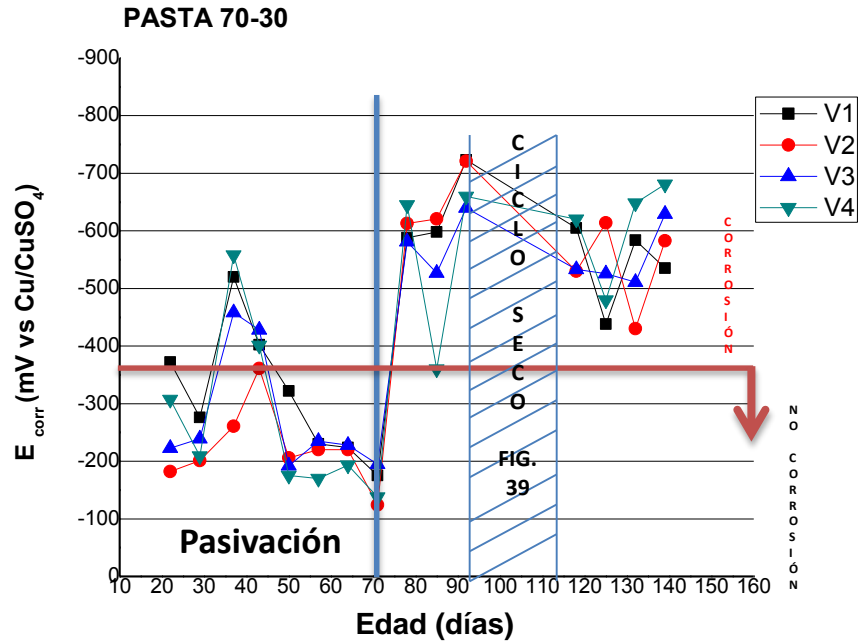


Figura 24. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 70-30 durante los ciclos de inmersión

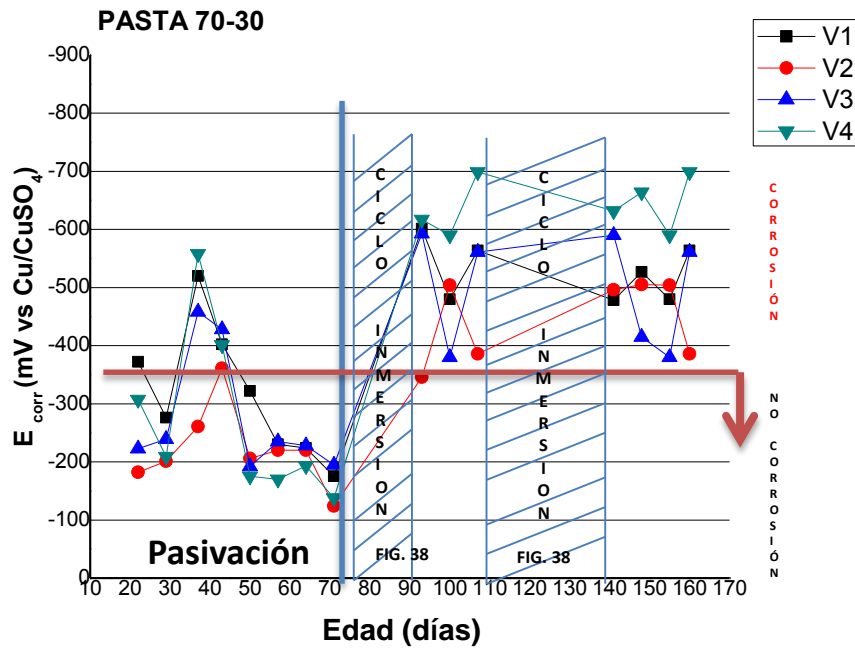


Figura 25. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 70-30 durante los ciclos de secado

Sin embargo, es importante mencionar que por las condiciones de evaluación: alta concentración de cloruros y poca disponibilidad de oxígeno (condición inmersa), es posible que se adquieran lecturas de potencial muy negativas, sin que esto indique que la corrosión del acero sea severa. Esta medición es sólo termodinámica, es necesario complementar la información con técnicas que proporcionen datos cinéticos como la densidad de corriente de corrosión obtenida a partir de la resistencia a la polarización lineal (Rpl).

#### 4.2.2 Resistencia a la polarización lineal (Rpl)

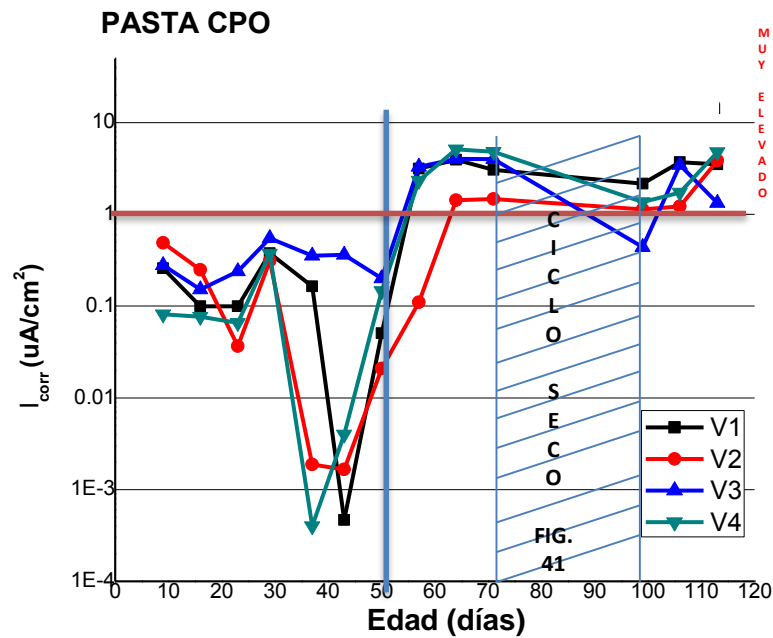
Por medio de esta técnica se obtuvieron los datos de densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) del acero de refuerzo de las probetas ensayadas. Los datos fueron interpretados conforme a los criterios descritos en la Tabla 10.

**Tabla 10. Criterios de evaluación de densidad de corriente de corrosión (Manual DURAR 1998)**

$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevado
> 1	Muy elevado

#### Cemento CPO

Las mediciones de densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo embebido en cemento CPO, reportadas en la Figura 26 durante el período de inmersión en agua de mar, indicaron un nivel de corrosión muy elevado ( $> 1 \mu A/cm^2$ ), resultado que corrobora la presencia de corrosión conforme a los valores de potencial reportados en la Figura 20.



**Figura 26. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento CPO durante los ciclos de inmersión**

La Figura 27, muestra que las densidades de corrosión durante los ciclos de secado en su mayoría se ubicaron en nivel de corrosión muy elevado, comportamiento que coincide con los potenciales de corrosión reportados en la Figura 21.

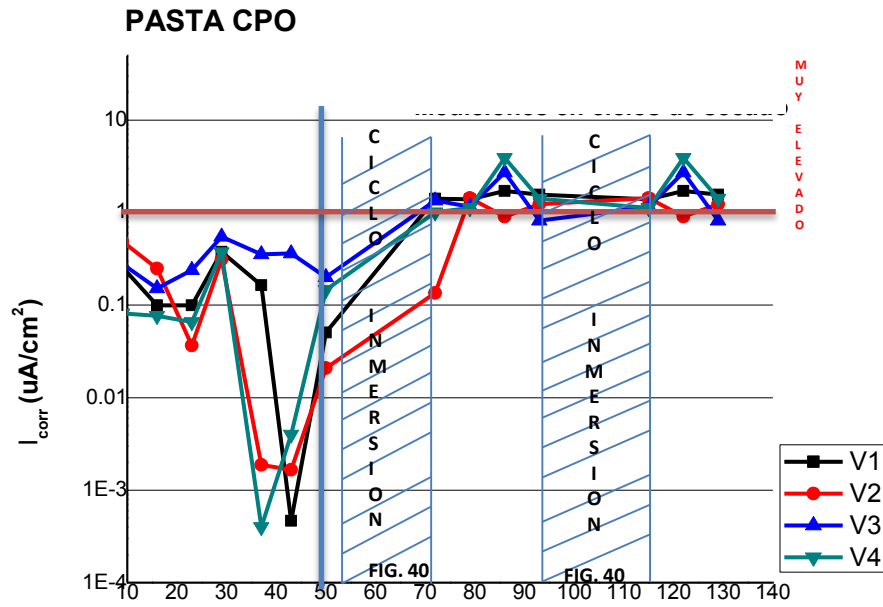
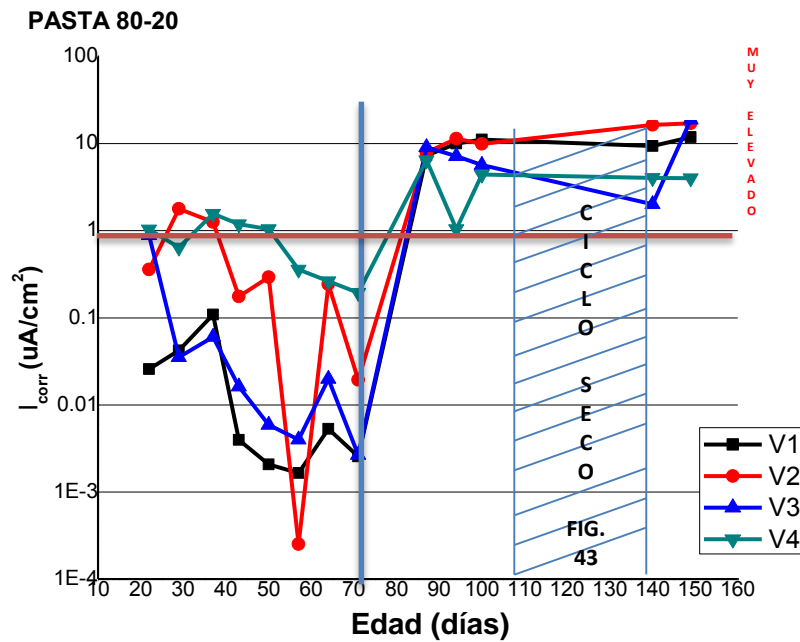


Figura 27. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento CPO durante los ciclos de secado

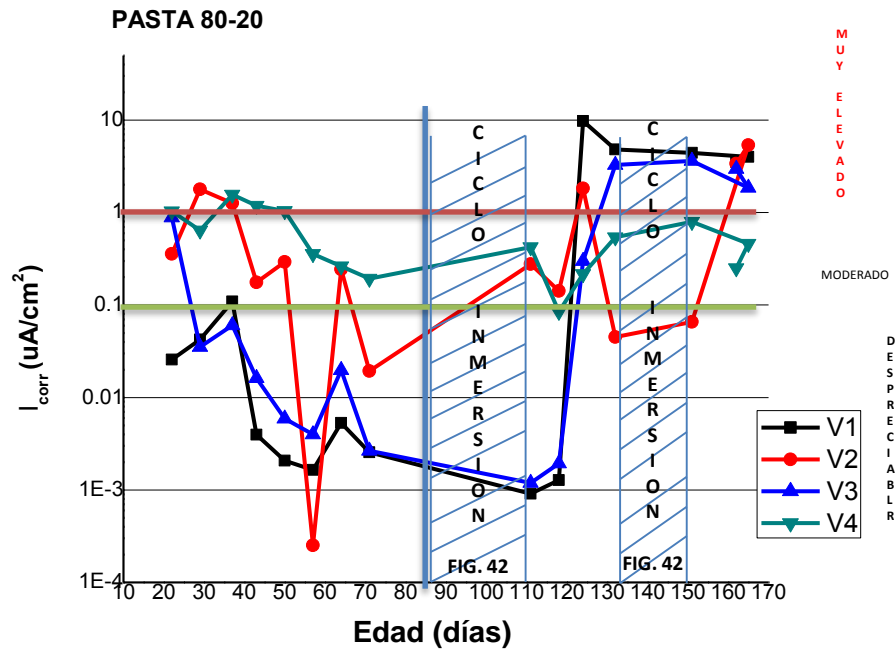
#### Cemento 80-20

Las mediciones de densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo embebido en cemento 80-20 reportadas en la Figura 28, indican que durante el período de inmersión en agua de mar el nivel de corrosión fue muy elevado ( $> 1 \mu A/cm^2$ ) incluso los valores fueron superiores al obtenido en el cemento CPO. Este resultado confirmó la presencia de corrosión en conjunto con los valores de potencial reportados en la Figura 22 .



**Figura 28. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido cemento 80-20 durante los ciclos de inmersión**

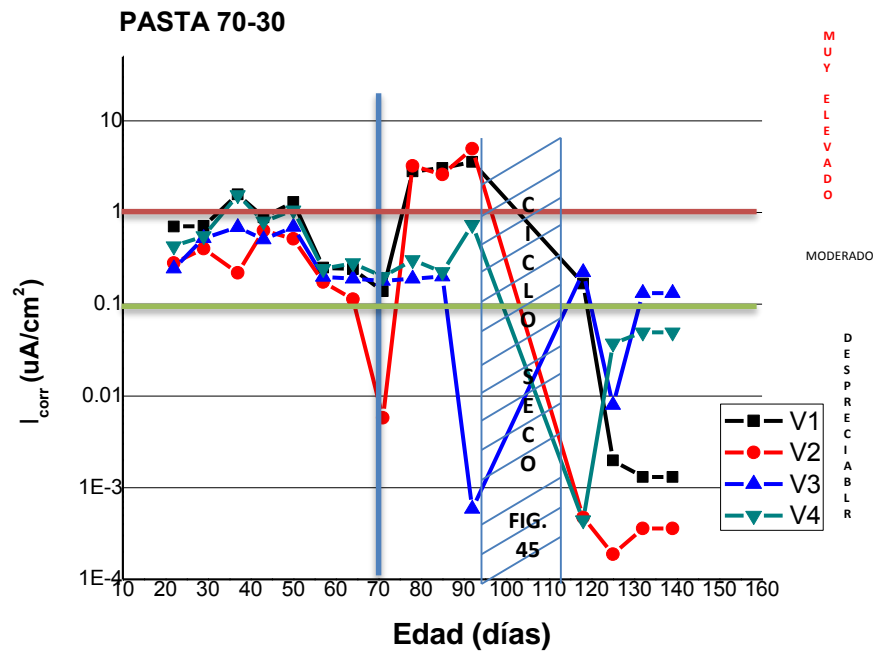
La Figura 29, indica que las densidades de corriente de corrosión durante los ciclos de secado se ubicaron en nivel de corrosión muy elevado, comportamiento que coincidió con los valores de potencial de corrosión reportados en la Figura 23.



**Figura 29. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 80-20 durante los ciclos de secado**

### Cemento 70-30

Las mediciones de densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo embebido en cemento 70-30 reportadas en la Figura 30, muestran en las primeras mediciones del período de inmersión en agua de mar oscilación entre nivel de corrosión moderado ( $0.3 \mu A/cm^2$ ) y muy elevado ( $> 1 \mu A/cm^2$ ), sin embargo, en mediciones del día 95, la densidad de corriente de corrosión se mantuvo en nivel de corrosión moderado y despreciable.



**Figura 30. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 70-30 durante los ciclos de inmersión**

Las mediciones de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) obtenidas en condición seca, muestran que durante todo el monitoreo oscilaron en nivel de corrosión moderado y despreciable, ver Figura 31.

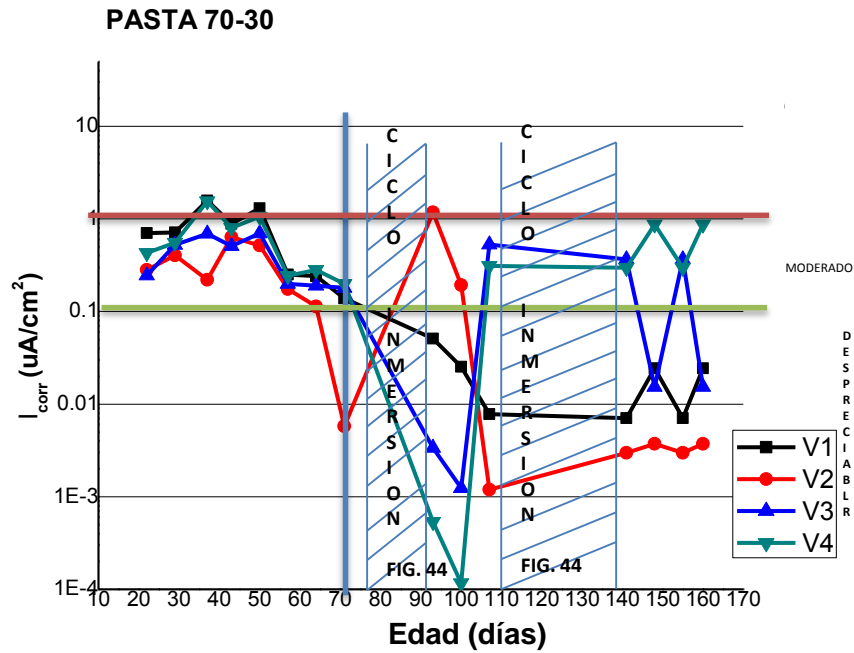


Figura 31. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero de refuerzo embebido en cemento 70-30 durante los ciclos de secado





## 5 Conclusiones

---

- Los valores de resistividad eléctrica promedio (25 k $\Omega$ .cm) de las pastas de cementos híbridos alcalinos fueron cinco veces superiores a los valores alcanzados con el Cemento Portland Ordinario (5 k $\Omega$ .cm). El riesgo de corrosión en las pastas de cementos híbridos alcalinos considerando la Tabla 6, fue moderado, mientras que en el Cemento Portland Ordinario fue alto. Las pastas con mejor comportamiento fueron 70-30-3, 80-20-2 y 70-30-2.
- La velocidad de pulso ultrasónico de las pastas de los cementos híbridos fueron comparables con un Cemento Portland Ordinario, en la mayoría de los casos indicaron calidad normal considerando los criterios descritos en la Tabla 7.
- La capacidad de absorción total de agua fue ~ 50% menor en las pastas de Cemento Portland Ordinario respecto a todos los cementos híbridos alcalinos.
- La resistencia a la compresión de pastas de cementos híbridos con proporciones del 70 y 80% de ceniza volante, después de 60 días, alcanzaron valores superiores a 45 MPa, valor que de acuerdo al Manual DURAR es considerado para una estructura durable.
- Las mediciones electroquímicas obtenidas después de 160 días de monitoreo, indicaron que el acero de refuerzo que se mantuvo en un nivel moderado y despreciable de deterioro por corrosión, correspondió al acero embebido en cemento 70-30, mientras el acero de refuerzo embebido en los cementos CPO y 80-20 mantuvo un nivel de corrosión muy elevado de acuerdo a la Tabla 10.
- Con base en los resultados obtenidos a la fecha, se concluye, que el uso de cementos híbridos apunta a ser una alternativa favorable para disminuir el consumo del Cemento Portland Ordinario (CPO) en el sector de la construcción.

## 6 Recomendaciones

---

Es conveniente continuar con la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en los cementos 70-30, 80-20 y CPO, para definir su comportamiento en periodos largos de evaluación. Se sugiere también la evaluación del cemento 80-20 con otras disoluciones de hidratación con el propósito de optimizar su capacidad de protección ante la corrosión del acero de refuerzo. Con esta información, se podría determinar si los cementos híbridos 70-30 y 80-20 son cementos aptos para su uso en la construcción y/o reparación de estructuras de concreto reforzado, o bien, delimitar su aplicación.

## Bibliografía

---

ASTM C305 (2014). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*.

ASTM C642 (2013) Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

ASTM C876 (2009) Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

ASTM G59 (1997 reprobada 2014) Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.

Arias Jaramillo, Y. P. (2013). *Incidencia de la temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de cenizas de carbón* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia).

Ávila, J. y Genescá J., (2003). Más allá de la herrumbre II; 3ª Ed. La ciencia para todos. México: pp. 48-81.

Bas, M., y Omar, I. (2008). *La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón* (Tesis Doctoral), Universidad Politécnica de Madrid, España.

Criado Sanz M. (2007), —*Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes; Caracterización de geles N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble; Efecto del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.*, (Tesis doctoral), Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica e Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.

*Fernández Jiménez A. y Palomo A. (2003), Characterization of fly ashes: Potential reactivity as alkaline cements, Fuel vol. 82, p. 2259-2265.*

*García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A.. (2015). Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor clinker. Revista ALCONPAT, 5(1), 1-17.*

Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "*corrosión/impacto ambiental sobre materiales*". Red temática "*Durabilidad de la armadura*". Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. DURAR (1998). 2a Edición.

Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática "Durabilidad de la armadura". Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. DURAR (2007). 1a Edición.

Palomo, A; Fernández-Jiménez, A; García-Lodeiro, I; (2015). *Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor clinker.* Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 1-17.

Rendón Belmonte, M., Fernández Jiménez, A., Palomo Sánchez, A., Martínez Madrid, M., Torres Acosta, a. a., & Pérez Quiroz, J.T. (2015). *Desarrollo de nuevos cementos: cementos alcalinos y cementos híbridos.* Publicación técnica, (444).

Rivera, J. F., de Gutierrez, R. M., Mejía, J. M., & Gordillo, M. (2014). Hybrid cement based on the alkali activation of by-products of coal. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 13(2), 31-39.

Ruiz Santa y Quiteria Gómez C. (2013), *Materias primas alternativas para el desarrollo de nuevos cementos: activación alcalina de vidrios silicoaluminosos,* (tesis doctoral), Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Inorgánica e Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.

Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordoñez, L. M., & Naranjo, M. C. (2007). OPC-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during alkaline hydration. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2958-2966.

Santiago Hurtado, G. (2010). *Determinación del nivel de corrosión y perfil de carbonatación en vigas de concreto reforzado con 3 años de exposición al medio ambiente de la Cd. de Xalapa, Ver.* (Tesis doctoral). Universidad Veracruzana.

Vázquez, P.E. (2007). *Concreto de alto desempeño con elevado consumo de ceniza volante.* (Tesis de maestría) Instituto de Ingeniería, UNAM.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000  
CP 76700, Sanfandila  
Pedro Escobedo, Querétaro, México  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>