



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

THÈSE EN COTUTELLE: Université Paul Sabatier-Universidad Autónoma de Nuevo León

Présentée et soutenue par :

M. Jesús Octavio RIVERA-CORRAL

Le 29 Septembre 2016

Titre :

Contribution à l'évaluation de l'état de dégradation de divers types de barres d'acier utilisées comme armatures dans des bétons carbonatés ou pollués par des chlorures

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

Directeur/trice(s) de Thèse :

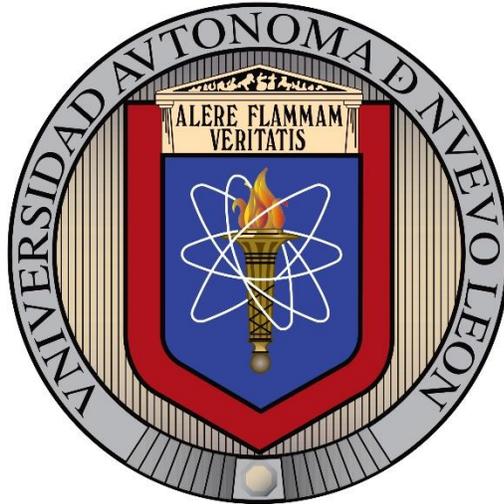
Mme. Ginette ARLIGUIE

M. Gerardo FAJARDO-SAN MIGUEL

Jury :

M. Gilles ESCADEILLAS	Invité
M. Pedro VALDEZ-TAMEZ	Examineur
M. Fabrice DEBY	Invité
M. Facundo ALMERAYA-CALDERÓN	Examineur
M. Carlos BARRIOS-DURSTEWITZ	Rapporteur
M. Erick MALDONADO-BANDALA	Rapporteur

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



***“EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN DE DIVERSOS TIPOS
DE VARILLA DE ACERO UTILIZADAS COMO REFUERZO EN
CONCRETOS CARBONATADOS Y CONTAMINADOS CON CLORUROS”***

**POR
ING. JESÚS OCTAVIO RIVERA CORRAL**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE DOCTOR
EN INGENIERÍA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
Y ESTRUCTURAS**

SEPTIEMBRE 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



***“EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN DE DIVERSOS TIPOS
DE VARILLA DE ACERO UTILIZADAS COMO REFUERZO EN
CONCRETOS CARBONATADOS Y CONTAMINADOS CON CLORUROS”***

POR
ING. JESÚS OCTAVIO RIVERA CORRAL

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE DOCTOR
EN INGENIERÍA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
Y ESTRUCTURAS**

DIRECTOR DE TESIS
DR. GERARDO DEL JESÚS FAJARDO SAN MIGUEL

CO-DIRECTOR DE TESIS
PROFESORA GINETTE ARLIGUIE

SEPTIEMBRE 2016

En memoria de **Victoria Peña Ramos**

“El estudio es la mejor herencia de padres humildes a sus hijos, la única que nadie les podrá pelear o quitar”

Dios por darme fortaleza y paciencia cuando lo he requerido, además, de permitirme alcanzar un objetivo más.

A mi Madre **Alma Lidia Corral Peña**, por todo el apoyo otorgado y por enseñarme a luchar y no darme por vencido, a perseguir mis sueños, metas y objetivos.

A mi familia: **Rafael Soto Vega, Fidel Urbalejo Salazar, Guadalupe Soto Peña, Jaime Armando Soto Peña y Brenda Berenice Urbalejo Corral.**

A la familia García Vázquez especialmente a **Raúl García Vázquez**, por tu apoyo incondicional en este proceso.

“La educación es el arma más poderosa que existe para cambiar el mundo”

Nelson Mandela

AGRADECIMIENTOS / REMERCIEMENTS

Es para mí un gran placer agradecer a todas las personas e instituciones que me han apoyado y permitido llevar a cabo este trabajo de investigación.

Agradezco a la subdirección de posgrado perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por permitirme ser parte de esta institución de prestigio, además, de otorgarme el privilegio de formar parte de su Doctorado de Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras.

Se agradece a CONACYT por la beca otorgada durante mis estudios de doctorado durante mi proceso como estudiante. Igualmente, por la beca mixta otorgada durante la estancia realizada en la Universidad de Toulouse, Francia. Además, del financiamiento para este proyecto de investigación (proyecto CONACYT-CB 177839).

Agradezco sinceramente a mi asesor el Dr. Gerardo Fajardo, primero por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por apoyándome y darme las facilidades para trabajar en este proyecto de investigación, su esfuerzo y dedicación, su persistencia y paciencia han dado como resultado este producto. También, por darme la oportunidad de crecer personal y académicamente. El apoyo en las diversas estancias que realicé nacionales e internacionales, las cuales me permitieron conocer investigadores que nutrieron mi formación.

Je voudrais également remercier ma directrice de thèse en France, Mme. Ginette ARLIGUIE d'avoir accepté de diriger mon travail de thèse. Je tiens à vous remercier de votre confiance mais aussi de la généreuse collaboration que m'ont apporté. Sa patience et ses nombreuses remarques très pertinentes m'ont été des plus précieuses durant ce travail. Également, les facilitations de bourse et location pendant mes stages à Toulouse.

Durant mon stage en France, j'ai eu la toute grande chance de connaître et de travailler avec M. Fabrice DEBY, un docteur exceptionnel tant pour ses compétences scientifiques que pour ses qualités humaines. Je lui en suis donc très profondément reconnaissant.

AGRADECIMIENTOS / REMERCIEMENTS

Je remercie les membres du laboratoire LMDC-INSA, en particulier à Mme. Soula Carole, M. Leclerc Frédéric, M. Boix Laurent, M. Bouaskeur Yann, M. Dos Santos Sylvain et M. Attard Bernard, pour leurs conseils et leurs soutiens tout au long de mon stage à Toulouse.

Así mismo, agradezco a mis revisores de tesis: Dr. Carlos Barrios y Dr. Eric Maldonado, por sus valiosos comentarios que naturalmente han mejorado la calidad de esta tesis.

De igual manera, agradezco al comité de evaluación tanto de Francia como de México: Prof. Ginette ARLIGUIE, Dr. Gerardo FAJARDO, Dr. Gilles ESCADEILLAS, Dr. Pedro VALDEZ-TAMEZ, Dr. Fabrice DEBY, Dr. Facundo ALMERAYA-CALDERÓN, Dr. Carlos BARRIOS-DURSTEWITZ y Dr. Erick MALDONADO-BANDALA, por su colaboración en este trabajo de investigación

Agradezco encarecidamente al Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez, por el apoyo otorgado desde mi formación académica en el aula, concejos y comentarios atinados. Así, como el apoyo en sus gestiones como subdirector de investigación y como director de la facultad de ingeniería civil, su invariable soporte y solidaridad.

Agradezco al Dr. Alejandro Duran Herrera, quien tuvo mucho que ver en mi decisión de incursionar en el mundo de la investigación, su apoyo sembrando una semilla desde mi primera estancia en el IIC-FIC como becario en el verano de investigación 2009, hoy se ve reflejada en este producto. Eternamente le estaré agradecido por el apoyo brindado durante mi formación académica y desarrollo personal.

Al departamento de tecnología del concreto, al laboratorio de materiales de construcción y a todo el personal: Beto, Catarino y Gumaro Tobar, por apoyarme y permitirme realizar mis experimentos de investigación en sus instalaciones. Así mismo, al personal de la biblioteca de posgrado por el apoyo en la búsqueda de información.

AGRADECIMIENTOS / REMERCIEMENTS

Gracias al Dr. Ricardo Orozco Cruz de la Universidad Veracruzana por aceptar ser parte de este proyecto, además, de las facilidades otorgadas durante mis estancias en su institución.

Expreso mi agradecimiento a la Dra. Rosa Elba Núñez Jaquez, Dr. Carlos Paulino Barrios Durstewitz, Dra. Adriana Cruz Enriquez y al Dr. José de Jesús Campos Gaxiola, profesores de la Facultad de Ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa, quienes han sido parte importante y a su vez mi plataforma en mis inicios como investigador. Sus consejos, comentarios y palabras exactas en el momento exacto, permitieron virar el sentido de mi profesión, el consejo de la Dra. Rosa “No perder el piso” están hoy en día más claro y las palabras de la Dra. Adriana “apoya a quien puedas en tu camino, y que esto sea una cadena” las profeso en cada oportunidad.

No preciso de un adjetivo que englobe todo lo que mi familia me ha dado, mi sentir va más allá de un agradecimiento. Desde mis abuelos; Victoria Peña y Rafael Soto, Hermanos; Guadalupe, Armando y Brenda, hasta Fidel. Y a la razón de mi vivir y crecer mi madre Alma Corral Peña, quien me ha apoyado en todo momento y ha respetado cada una de mis decisiones, permitiendo alcanzar este logro.

Así mismo, para la familia García Vázquez que me adoptó y apoyó durante este tiempo. No hay manera de pagar todo el apoyo brindado durante esta travesía Raúl García Vázquez, que mi Dios te bendiga hoy y siempre.

Una aventura no estaría completa sin el apoyo de personas que durante este proceso ves más que a tu familia de sangre, muchas gracias M.C. J. Alejandro Herrera González, sin duda mi mayor admiración por todo lo que haces, eres una excelente persona. Gracias a todos mis compañeros de doctorado y maestría con los cuales he trabajado y convivido durante este proceso. Agradezco a los estudiantes de licenciatura que me apoyaron durante los trabajos de investigación: Eduardo Costilla, Gilberto Solís, et al.

Contribution à l'évaluation de l'état de dégradation de divers types de barres d'acier utilisées comme armatures dans des bétons carbonatés ou pollués par des chlorures

Résumé long

1 - Introduction

Les avancées technologiques ont permis la conception de nouveaux types d'aciers pour les constructions en béton armé. En particulier, des modifications de la surface sont effectuées sur des aciers au carbone (AC) en vue d'apporter une amélioration de leurs propriétés, notamment une meilleure résistance à la corrosion.

Dans les matériaux cimentaires, en raison de leur forte basicité (pH de l'ordre de 12,5 à 13,5) les aciers se recouvrent d'une couche passivante composée d'oxydes de fer qui les protège de la corrosion. Cependant, le béton étant un matériau poreux, certains agents agressifs peuvent pénétrer dans le réseau poreux et provoquer la corrosion des armatures si les dispositions nécessaires n'ont pas été prises. Il s'avère que la corrosion des armatures est la pathologie la plus courante des ouvrages de Génie Civil. Ses conséquences sont une diminution de la section des aciers, la formation de fissures dans le béton, une altération de l'adhérence entre les armatures et le béton, et elles peuvent conduire jusqu'à la ruine de la construction.

Classiquement, les armatures utilisées sont en acier au carbone (AC) dit d'usage général, ce matériau étant principalement caractérisé par sa résistance mécanique. Il ne présente aucune disposition particulière visant à le protéger de la corrosion, l'enrobage du béton devant leur procurer cette protection.

Selon les pays, différentes solutions sont envisagées pour améliorer la résistance à la corrosion des aciers classiques lorsque les constructions doivent être exposées à des environnements agressifs, notamment l'exposition aux chlorures. En Amérique, il est

parfois fait appel à des aciers galvanisés (AG), obtenus par immersion de l'acier ordinaire dans un bain de zinc fondu et dont la surface est ainsi recouverte par une couche d'alliages fer-zinc. Sont encore parfois utilisées des barres en acier dual (AD) pour lesquelles l'acier ordinaire est recouvert par un double dépôt : un revêtement de zinc, lui-même recouvert par un composé polymère. Actuellement, des aciers thermo-traités (ATT) sont aussi disponibles. Le traitement thermique permet d'obtenir des aciers dont la microstructure est caractérisée par la formation d'une couche extérieure de martensite (Figure 1). Le gain obtenu est une meilleure résistance mécanique ainsi qu'une amélioration de la ductilité. Le comportement à la corrosion présente en revanche des résultats contradictoires.

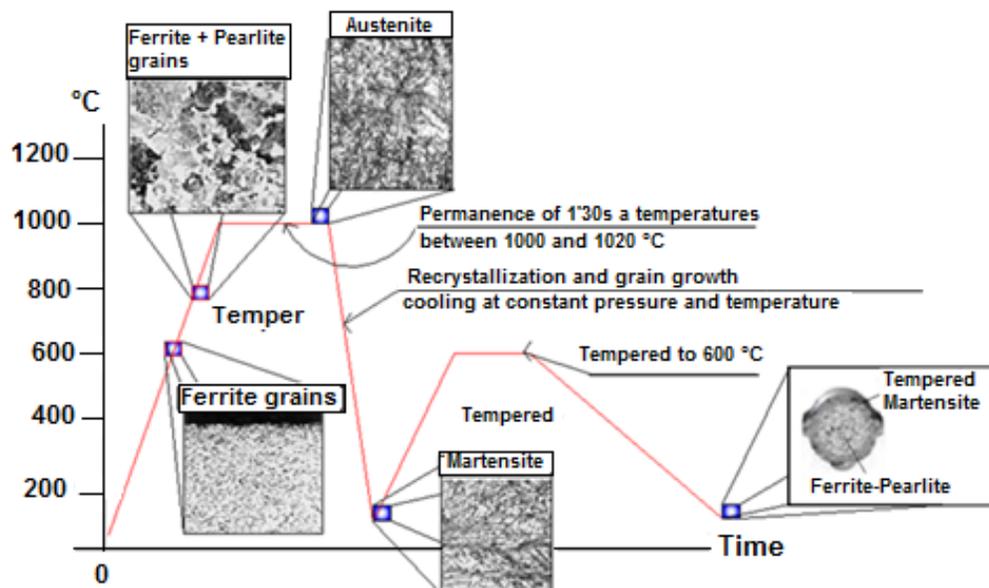


Figure 1 : Schématisation du diagramme de phase pour l'obtention d'acier ATT

2 - Caractérisation des aciers

Afin d'évaluer les différences microstructurales entre les aciers AC et ATT, des essais de microdureté Vickers ont été effectués. Pour se faire, des sections de tiges des deux types d'acier ont été polies puis soumises à un bain d'ultrasons afin d'éliminer les derniers dépôts sur leur surface (Figure 2).



Figure 2 : Préparation des aciers pour la caractérisation de la microdureté

Les essais ont été effectués par micro-indentation à l'aide d'un duromètre Nawage qui applique une charge de 9,807 N pendant 15 secondes. Les empreintes obtenues sur les sections polies sont représentées sur la Figure 3.

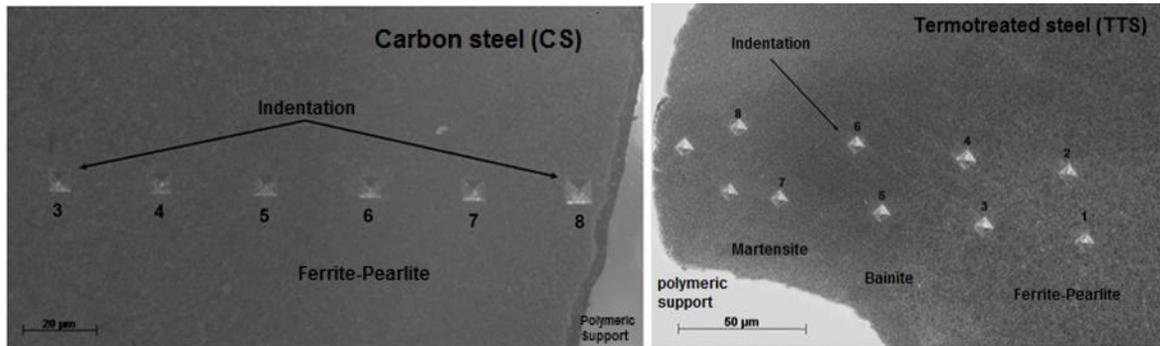


Figure 3 : Mesure de la microdureté sur AC (CS, anglais) et ATT (TTS, anglais)

Les valeurs de microdureté sont présentées sur la Figure 4 . L'horizontale en pointillés correspond à la limite définie par la norme ASTM E-384 entre une dureté faible (<240 HV) et moyenne (>240 HV).

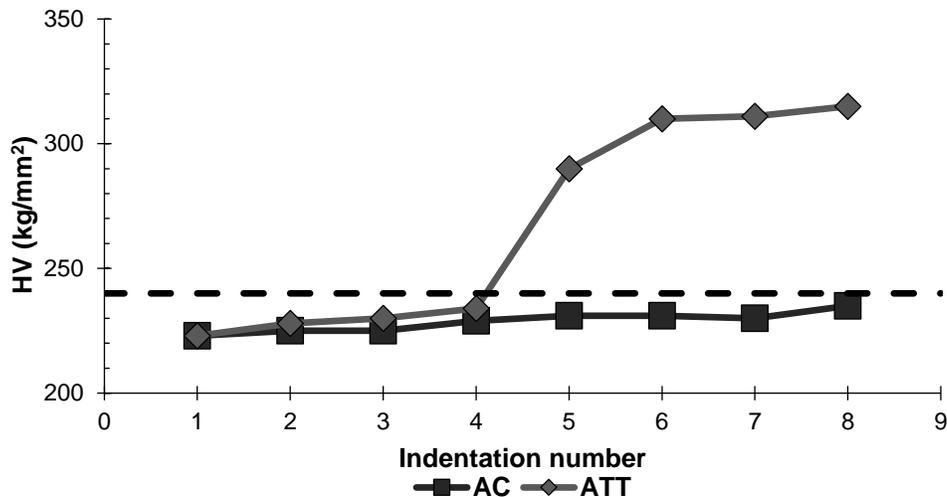


Figure 4 : Comparaison de la microdureté entre les aciers AC et ATT

La microdureté déterminée sur les empreintes 1 à 4, situées dans la partie centrale des barres AC et ATT, est considérée comme faible. Sur les empreintes 5 à 8, proches de la périphérie des sections, la microdureté prend des valeurs correspondant à une dureté moyenne pour les barres ATT et reste dans la gamme des duretés faibles pour les barres AC. Ces résultats sont en bonne concordance avec les valeurs reportées dans la littérature pour les phases de ferrite-perlite (microdureté faible), et de martensite pour la microdureté moyenne.

Des analyses complémentaires ont été effectuées par métallographie pour caractériser la microstructure de ces barres. La préparation de surface des échantillons est tout d'abord identique à celle effectuée pour les essais de microdureté puis, avant les observations au Microscope Electronique à Balayage (JEOL JSM 6510-LV), un traitement au NITAL 2% (2% d'HNO₃ + 98% d'alcool éthylique) est appliqué à la surface polie, comme préconisé par la norme ASTM E407.

Les observations montrent que, de façon classique, la microstructure uniforme des barres AC est composée de deux phases ferrite et perlite, et que pour les barres ATT, une phase de martensite a été formée en périphérie sur une épaisseur d'environ 160 μm comme illustré sur la Figure 5.

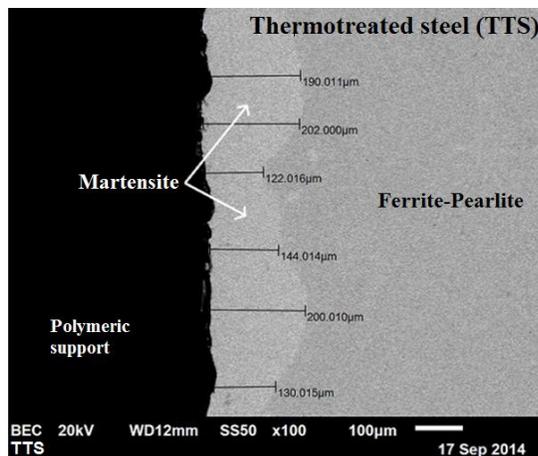


Figure 5 : Microstructure observée sur les aciers ATT (TTS, anglais)

Une analyse similaire de la microstructure des aciers AG indique que l'épaisseur du revêtement à base de zinc, obtenu par galvanisation à chaud, est d'environ 100 µm pour les aciers provenant du Mexique et d'environ 43 µm pour ceux provenant de France. Pour les aciers AD, les mesures ont montré que le revêtement est constitué par une couche de zinc d'environ 44 µm, elle-même revêtue par une couche d'époxy d'environ 320 µm.

3 - Essais de durabilité en conditions In Situ

Afin de tester le comportement à la corrosion des différentes barres dans des conditions qui se rapprochent le plus des conditions réelles d'utilisation des armatures pour la construction, des corps d'épreuve en béton ont été confectionnés. Pour cela, deux formulations de bétons ont été testées qui se différencient par leur rapport Eau/Ciment : $E/C = 0,45$ et $E/C = 0,65$. Ces deux formulations permettent de couvrir des gammes de béton d'utilisation courante.

Les armatures sont préparées de façon à parfaitement maîtriser la zone (5 cm de long) soumise aux agressions, comme représenté sur la Figure 6. Pour cela, la zone d'armature protégée a été recouverte d'une résine époxy.

A l'opposé, les armatures AD étant déjà parfaitement protégées par une résine époxy, des incisions dans la résine ont été réalisées en vue de simuler un endommagement

lors de la mise en place des armatures dans une structure (armatures ADCI). Des barres sans incisions (ADSI) ont également été utilisées à titre de comparaison.

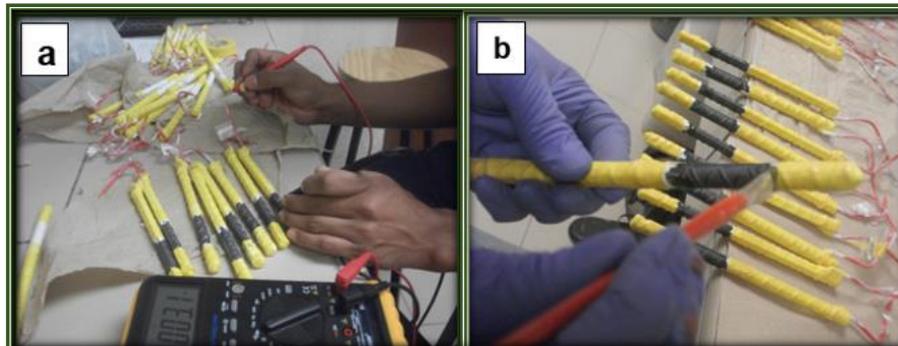


Figure 6 : Préparation des armatures ; a) vérification de la continuité électrique entre la zone d'étude et le fil électrique relié à l'armature b) nettoyage de la surface d'étude avant coulage

Des éprouvettes prismatiques contenant deux armatures de même type, comme présenté sur la Figure 7, sont fabriquées avec les deux formulations de béton. La partie supérieure de l'éprouvette est surmontée d'un tube et de résine pour protéger les fils électriques reliés à l'armature positionnés en vue des essais électrochimiques.

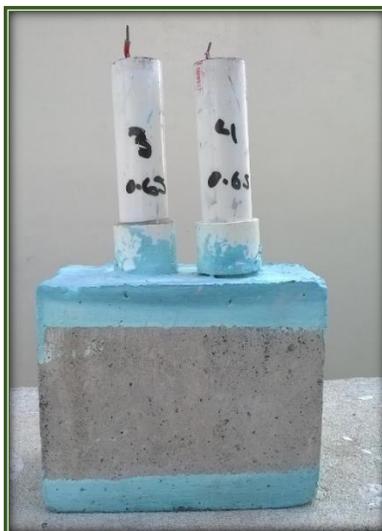


Figure 7 : Échantillon de béton armé soumis aux expositions agressives naturelles

- Une première étude in situ en milieu chlorure a été menée. Une partie des échantillons précédents a été transférée à l'Institut d'ingénierie de l'Université Veracruzana, à Boca del Rio, Veracruz, dont les bâtiments sont situés à 0,5 km

du golfe du Mexique. La Figure 8 présente les échantillons exposés sur le toit de l'institut.



Figure 8 : Exposition des échantillons en environnement marin

Des mesures de potentiel ont été effectuées au cours du temps pour suivre l'évolution du système électrochimique en milieu chlorure. La Figure 9 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** présente l'évolution du potentiel de corrosion E_{corr} suivant le type d'armatures et pour les deux rapports E/C étudiés.

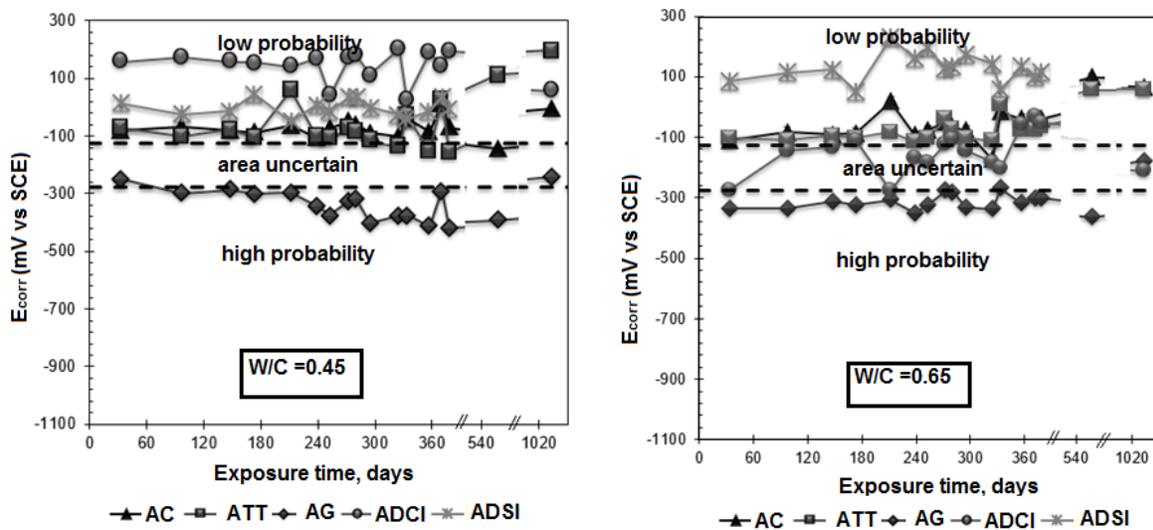


Figure 9 : Suivi du potentiel de corrosion au cours du temps pour les différents types d'armatures et les deux formulations de béton, éprouvettes exposées en milieu marin

Pour les barres AC et ATT le potentiel reste constant autour de -100 mV/ECS, ce qui indique une faible probabilité de corrosion sur la période d'observation. Les valeurs pour les barres AG se situent entre -400 et -300 mV/ECS, ce qui indique la encore l'absence de corrosion pour ce type d'acier. Enfin pour les armatures ADSI, la valeur

n'a pas vraiment de sens puisque le contact électrolyte-métal n'est pas assuré ; en revanche, cela permet une comparaison entre les armatures avec incisions (ADCI) et sans incision (ADSI). Dans le cas du rapport E/C de 0,65, on constate que certaines valeurs pour ADCI tendent vers la valeur prise par les barres AG, ce qui semble cohérent compte tenu de la présence du revêtement de zinc sous la couche d'époxy.

Les mesures de densité de courant de corrosion i_{corr} effectuées avec un Galvapulse, matériel portatif pour la mesure de la résistance de polarisation, tendent à confirmer ces résultats avec des valeurs estimées très faibles ($<0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Le taux de contamination en chlorures a été mesuré en fonction de la profondeur dans chaque type d'échantillons. Pour cela, les éprouvettes ont été sciées en tranche d'environ 8 mm et la quantité de chlorures associés a été déterminée par fluorescence X. La Figure 10 présente les profils en chlorures obtenus pour deux échéances et les deux formulations.

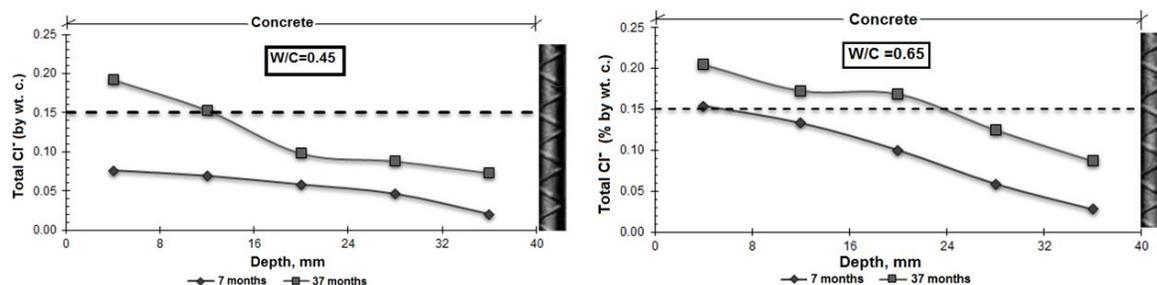


Figure 10 : profils en chlorures mesurés à 7 et 37 mois d'exposition en milieu marin

Le seuil de 0,15% de chlorures par rapport à la masse de ciment, qui est la limite proposée par les recommandations ACI-318 (2008), est reporté sur les graphiques. Ce seuil, communément admis bien que discutable, correspond au taux de chlorures maximal autorisé à proximité de l'armature ; au-delà de ce seuil, la corrosion est possible. Dans les deux séries d'éprouvettes, ce seuil n'est pas atteint au niveau des aciers. Les mesures électrochimiques précédentes montrent effectivement que le taux de chlorures est insuffisant pour initier la corrosion des armatures.

Les profondeurs de carbonatation ont été également déterminées. A presque trois ans, la profondeur carbonatée est d'environ 3 mm pour le béton E/C = 0,45 et 7 mm pour le béton E/C = 0,65.

- Une seconde étude In Situ en milieu industriel a été menée en vue d'évaluer le comportement des armatures face à la carbonatation seule. L'autre partie des échantillons précédemment réalisés a ainsi été positionnée sur le toit de l'IIC UANL située à San Nicolas de los Garza, Nuevo Leon.

Le suivi du potentiel de corrosion E_{corr} est reporté sur la Figure 11.

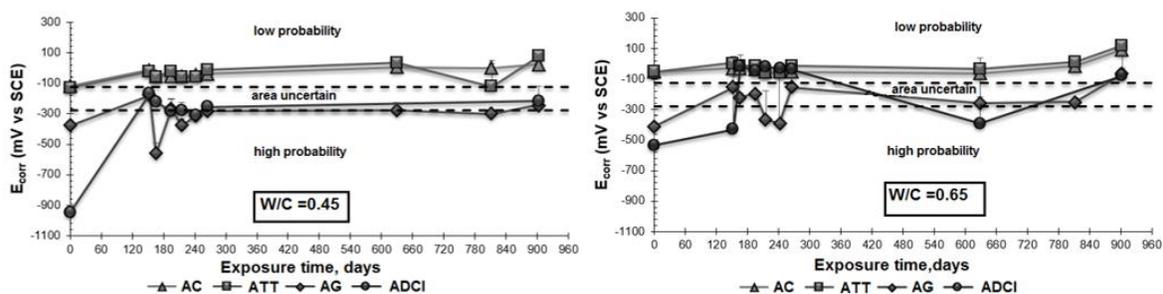


Figure 11: Suivi du potentiel de corrosion au cours du temps pour les différents types d'armatures et les deux formulations de béton, éprouvettes exposées en condition industrielle

Pour les barres AC et ATT, le potentiel reste constant autour de -100 mV/ECS, ce qui indique une faible probabilité de corrosion. Les valeurs pour les barres AG se situent encore entre -400 et -300 mV/ECS. Pour les armatures ADCI on constate initialement des valeurs de E_{corr} très négatives qui correspondent à l'activation de la couche de zinc.

La profondeur de béton carbonaté a également été mesurée. Les valeurs sont reportées sur la Figure 12. On constate que dans cet environnement industriel, choisi pour un taux de CO_2 plus élevé qu'en environnement marin, la cinétique de progression reste néanmoins inchangée. La profondeur de carbonatation atteint là encore 3 mm pour le béton E/C = 0,45 et 8 mm dans le cas du E/C= 0,65.

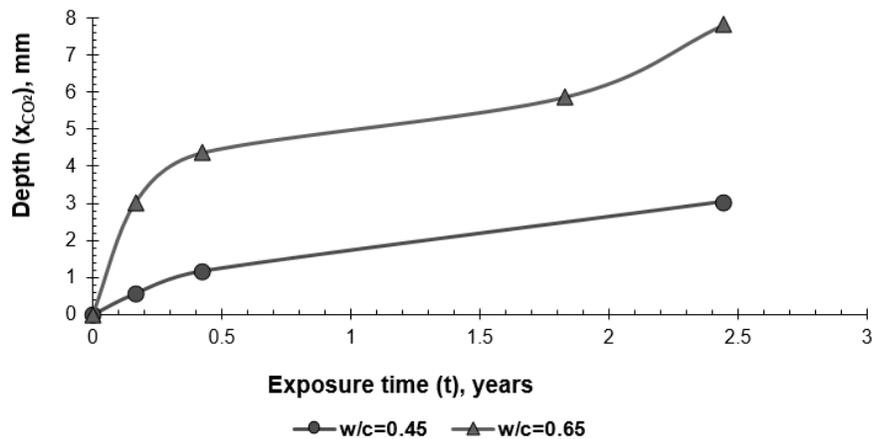


Figure 12 : évolution de la profondeur de carbonatation des bétons en condition industrielle

4 - Essais de durabilité en conditions de laboratoire

Les essais réalisés en conditions naturelles n'ont pas permis d'amorcer la corrosion pendant la durée du suivi. Des essais en laboratoire ont été menés en vue d'accélérer les pathologies étudiées. Pour forcer la pénétration des chlorures, des cycles d'humidification/séchage ont été réalisés sur des périodes de 7 jours : après avoir séjourné 3 jours à 40°C et 60% d'humidité relative, les échantillons de bétons, identiques à ceux réalisés pour les essais In Situ, sont plongés 4 jours dans une solution de NaCl à 35 g/l.

A l'issue de chacun des cycles, c'est-à-dire à la sortie de la solution de NaCl, un suivi électrochimique est effectué par mesure du potentiel de corrosion et détermination de la résistance de polarisation.

Le suivi du potentiel indique que pour les armatures AC et ATT un amorçage de la corrosion semble avoir eu lieu entre 200 et 450 jours pour le béton E/C = 0,45 et entre 60 et 240 jours pour le béton E/C = 0,65. Partant de valeurs autour de -100 mV/ECS, le potentiel de corrosion chute en effet dans cette période pour se stabiliser ensuite dans des valeurs très électronégatives autour de -500 et -600 mV/ECS. La Figure 13 présente la période de transition du potentiel pour les deux types de bétons.

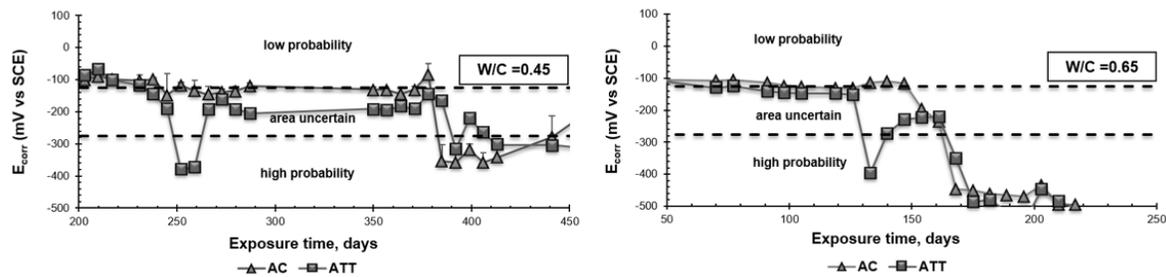


Figure 13 : chute du potentiel pour les armatures AC et ATT, pour les deux formulations de béton

Pour les armatures AG, les valeurs de potentiel de corrosion commencent typiquement par des valeurs assez basses pour ensuite se passiver. Puis le potentiel commence à osciller entre -300 et -600 mV/ECS, ce qui peut indiquer que la protection cathodique de la couche de zinc a commencé à diminuer.

Enfin, les armatures ADCI présentent un comportement similaire à AG avec une période d'amorçage de la corrosion qui semble plus longue. Pour les éprouvettes E/C 0,65, autour de 700 jours, le potentiel des armatures ADCI indique une forte probabilité de corrosion, phénomène associé à la dissolution de la couche de zinc dans les zones où le revêtement époxy avait été endommagé.

Des mesures de densité de courant de corrosion i_{corr} , effectuées à l'aide d'un Potentiostat-Galvanostat Voltalab, tendent à confirmer ces résultats avec des valeurs estimées des densités de courant de corrosion qui font apparaître les mêmes échéances pour l'amorçage de la corrosion.

- Estimation de la teneur en chlorures pour le démarrage de la corrosion

Lorsque les résultats du suivi électrochimique montrent à la fois des valeurs inférieures à -275 mV/ECS pour E_{corr} et des valeurs supérieures à $0.1 \mu A/cm^2$ pour i_{corr} (valeurs correspondant à une haute probabilité de corrosion avec un courant de corrosion faible), quelques éprouvettes sont extraites des cycles d'immersion-séchage dans l'objectif de déterminer leur teneur en chlorures. La Figure 14 résume les valeurs obtenues pour les différents types de barres et de E/C. La ligne horizontale en pointillés rappelle le seuil de chlorures admis par la réglementation ACI-318.

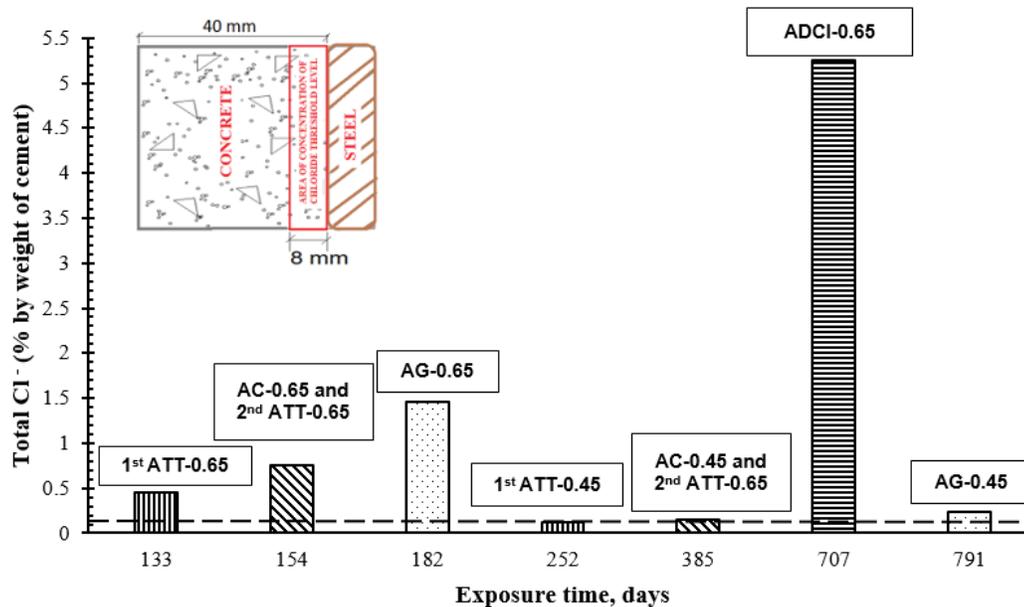


Figure 14 : Teneur critique en chlorures pour les éprouvettes exposées en atmosphère contrôlée au laboratoire

Etant donné que lors de la transition entre phase d'initiation et dépassivation, les barres ATT ont montré un comportement activation / passivation / activation, deux déterminations ont été effectuées pour ce type de barres. Leur premier signe de dépassivation coïncide avec une teneur en chlorures de 0.45% (133 jours) pour le rapport E/C de 0,65 et 0.12% (252 jours) pour le rapport E/C 0.45. Les valeurs correspondant aux barres AG sont 1.46% (182 jours) et 0.23% (791 jours) pour respectivement E/C 0.65 et 0.45. Quant aux barres ADCI, la teneur en chlorures lors de la dépassivation est de 5.25% (707 jours) pour le E/C de 0.65, et il n'y a pas eu de dépassivation pour E/C 0.45 pendant la durée d'observation.

Ensuite, conjointement avec les aciers AC, les concentrations en chlorures lors de la dépassivation des barres ATT sont de 0.75% (154 jours) pour E/C 0.65 et 0.15% (385 jours) pour E/C 0.45.

Ces résultats illustrent le rôle des revêtements de surface des armatures dans le processus de dégradation par corrosion : pour un même rapport E/C, le taux de chlorures nécessaire pour dépassiver les aciers galvanisés ou doublement revêtus est plus important que pour les aciers AC et ATT.

- **Essais par couplage galvanique**

Une autre série d'essais en laboratoire a été effectuée pour étudier la corrosion par carbonatation. Un nouveau type d'essai, qui consiste à accélérer la corrosion de façon naturelle par couplage galvanique, a été mis en œuvre. Les éprouvettes sont constituées de la façon suivante : une armature est placée dans un cylindre de béton qui est mis ensuite en enceinte de carbonatation accélérée. Une fois le cylindre entièrement carbonaté, un béton sain contenant d'autres armatures du même type est coulé autour comme présenté sur la Figure 15. La partie centrale contient ainsi une barre active du point de vue de la corrosion tandis que le pourtour contient 4 armatures dans des conditions passives. Là encore les deux formulations de bétons ont pu être testées.

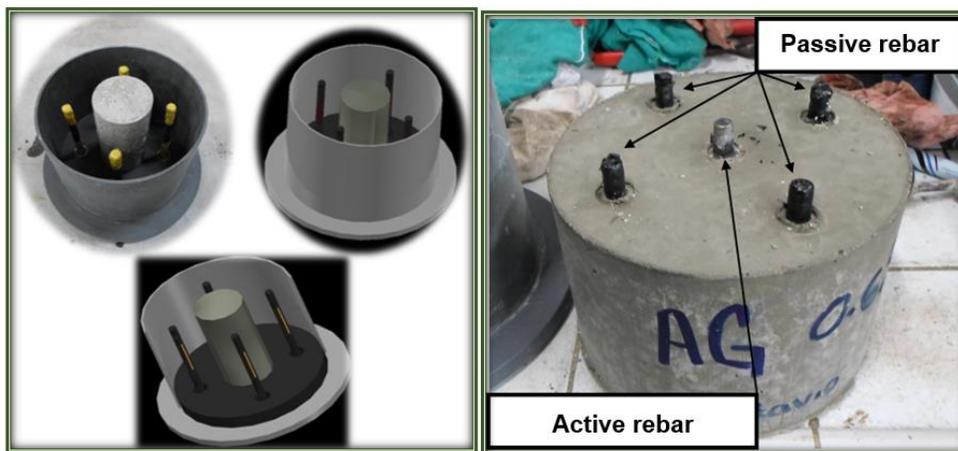


Figure 15 : Réalisation des corps d'épreuve pour l'essai de corrosion accélérée

Par la suite, un couplage galvanique est effectué en reliant électriquement les armatures comme présenté sur la Figure 16, forçant ainsi la corrosion au niveau de l'anode (armature dans le béton carbonaté).

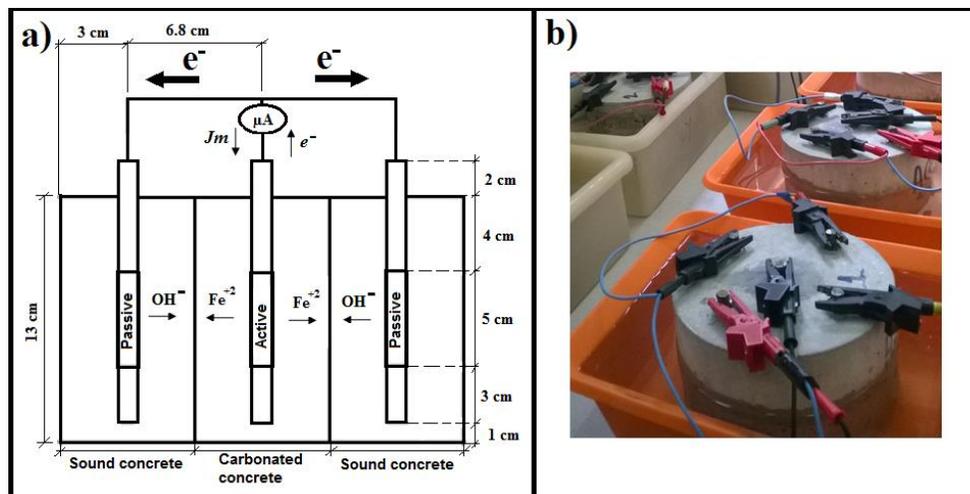


Figure 16 : Essai de corrosion accélérée, a) schéma de principe, b) connexions électriques

Les courants galvaniques qui en résultent sont alors enregistrés au cours du temps et présentés sur la Figure 17. Les armatures ADCI n'ont pas été testées pour ce type d'essai.

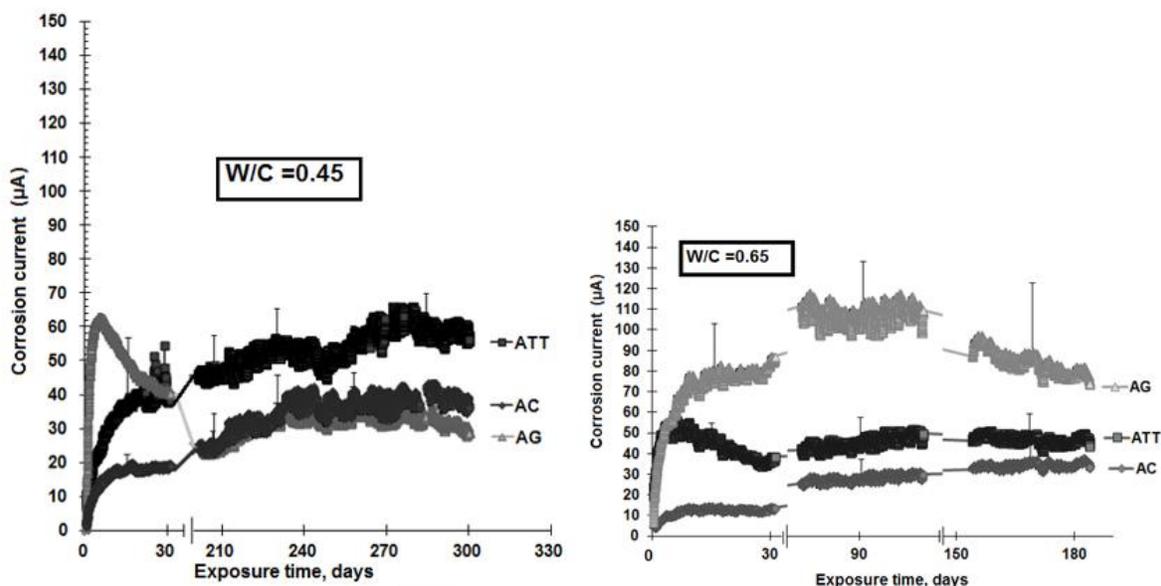


Figure 17 : courants galvaniques obtenu pour 3 types d'armatures et les deux formulations de béton

Une première période de transition de quelques jours apparaît : les courants de corrosion augmentent avec la diminution de la résistivité puisque les corps d'épreuve sont partiellement immergés dans l'eau afin de favoriser les courants ioniques teneur en assurant l'apport en oxygène nécessaire au niveau des électrodes (immersion

partielle). Il s'ensuit une stabilisation des courants de corrosion qui permet de comparer les types d'armatures.

Dans le cas des armatures ATT, le courant galvanique mesuré est légèrement plus élevé que pour les aciers AC, ce qui semble indiquer un moins bon comportement dans un système de corrosion galvanique dû à la carbonatation.

Dans le cas des armatures AG, après un courant galvanique mesuré plus fort que pour les autres armatures, ce courant diminue progressivement pour se stabiliser à un niveau équivalent à celui des barres AC. Cela semble indiquer une destruction progressive de la couche de zinc pour se rapprocher progressivement du comportement d'une armature AC.

Afin de retrouver le comportement expérimental obtenu lors de ces essais, une modélisation en éléments finis a été proposée. Le logiciel commercial COMSOL Mutiphysics a ainsi permis, grâce au module AC/DC, d'utiliser les lois de l'électrocinétique classique, conservation de la charge et loi d'Ohm locale, en vue d'estimer les courants de corrosion théoriques issus de cet essai. Il a fallu pour cela implanter la relation de Butler-Volmer comme condition aux limites surfaciques sur l'acier. L'identification des paramètres de Tafel s'est alors avérée nécessaire pour l'utilisation de la relation Butler-Volmer.

Ainsi, une série de courbes Intensité/Potentiel a été réalisée sur des cylindres de bétons, pour chaque type d'acier, mais seulement pour le béton E/C = 0,45, carbonaté ou non. Le montage expérimental est rappelé sur la Figure 18.



Figure 18 : Montage expérimental pour le tracé des courbes de polarisation et l'identification des paramètres de Tafel.

Les courbes de polarisation enregistrées ont permis d'identifier les paramètres de Tafel mais également la résistivité du béton, carbonaté ou non. Le Tableau 1 résume les paramètres ainsi obtenus.

Tableau 1 : Paramètres de Tafel expérimentaux sur béton E/C = 0,45

Specimens		TAFEL parameters				Resistance and resistivity of concrete		
		Beta A (V/Decade)	Beta C (V/Decade)	I _{corr} (µA)	E _{corr} (mV)	GetRu (Ω)	R (Ω)	ρ (Ω*m)
Carbonated concrete w/c=0.45	AC-C	0.17	0.05	21.7	-602.9	1034.4	1253.0	103.5
	ATT-C	0.14	0.06	28.4	-619.8	1080.1	1285.3	106.1
	AG-C	0.28	0.15	4.4	-972.0	1873.5	3212.7	265.3
Sound concrete w/c=0.45	AC-NC	1.03	0.04	0.3	-228.0	340.3	570.6	94.3
	ATT-NC	1.10	0.02	0.4	-191.6	304.9	428.5	70.8
	AG-NC	0.79	0.08	0.3	-695.5	455.5	848.0	140.1

Le modèle éléments finis permet alors d'obtenir le champ de potentiel dans le volume de béton ainsi que les lignes de courants qui se propagent dans ce même volume. La Figure 19 présente qualitativement ces résultats.

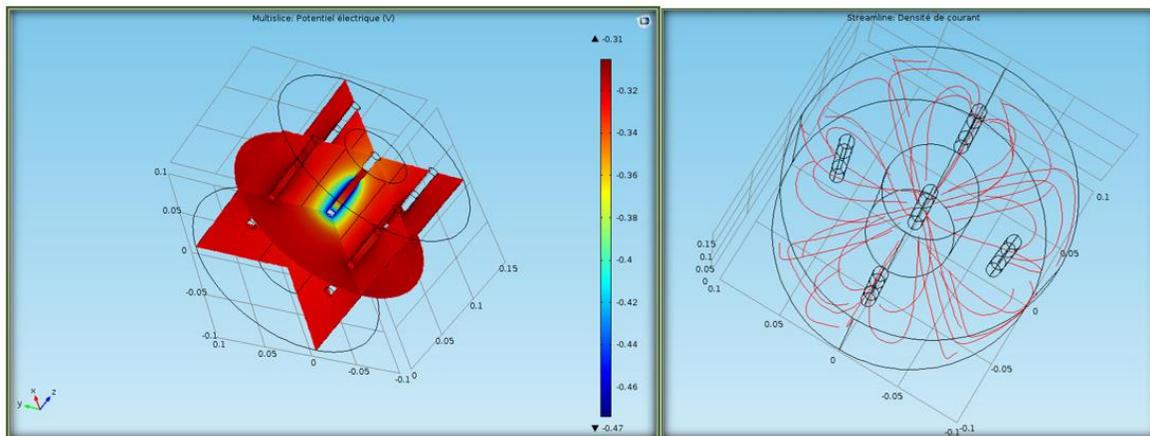


Figure 19 : champ de potentiel et lignes de courant obtenus par modélisation

Par intégration de la densité de courant locale sur l'anode (ou les 4 cathodes) le courant de corrosion, ou courant galvanique, est alors calculé. Des valeurs à 74, 215 et 38 μA ont été obtenues respectivement pour les aciers AC, ATT et AG. Comparés aux résultats de la figure 17, ces valeurs de courants conduisent à la même classification des aciers puisque, une fois stabilisées, les valeurs expérimentales donnent un courant de corrosion autour de 50 μA pour ATT et 30 à 35 μA pour AG et AC respectivement. Ces valeurs numériques semblent malgré tout éloignées des valeurs expérimentales, notamment pour ATT, mais il faut noter que l'identification des paramètres de Tafel a été effectuée sur un faible nombre d'échantillon et que les courbes de polarisation donnent une variabilité importante.

5 - Conclusion

Si le traitement thermique de l'acier (ATT) conduit à une diminution du courant de corrosion par rapport à l'acier conventionnel (AC) lorsque les barres sont exposées à des chlorures, le résultat est inverse lorsque la corrosion est due à la carbonatation de l'enrobage. En outre, les aciers ATT présentent un comportement du type activation / passivation / activation lors de la phase de transition entre l'initiation et la dépassivation des armatures. Ce comportement est attribué à la présence d'éléments carborigènes (Cr, Mo, V, ...) dans les aciers, dont la présence est plus forte dans les aciers ATT. En présence de chlorures, il se forme tout d'abord une couche d'oxydes qui protège un temps le métal.

Tous les essais de laboratoire ont conduit au même ordre de classement des barres vis-à-vis de la corrosion : AC, ATT, AG et AD. Le revêtement obtenu par galvanisation à chaud permet d'augmenter la période d'initiation ainsi que le taux de chlorures nécessaire pour dépassiver. L'amélioration est encore plus nette lorsque la corrosion est due à la carbonatation de l'enrobage.

Concernant les essais de corrosion galvanique, les résultats donnent un classement à la corrosion un peu différent mais compte tenu du faible nombre d'échantillons, pour des essais à la variabilité importante, des essais supplémentaires sont probablement nécessaires.

En conclusion, les caractéristiques de surface des armatures sont déterminantes pour leur tenue à la corrosion en milieu agressif, et ont une influence sur le seuil de chlorures admissible dans le béton d'enrobage. Les essais par courant galvanique associés à des expérimentations numériques pourraient être envisagés afin de tester préalablement le comportement de barres métalliques dans la formulation de béton envisagée.

Evaluación del estado de degradación de diversos tipos de varillas de
acero utilizadas como refuerzo en concretos carbonatados y
contaminados con cloruros

Resumen

La corrosión de las varillas de acero embebidas en concreto se considera como uno de los problemas más importantes que afectan la integridad de las obras civiles de un país. Para obtener una mayor resistencia frente a la corrosión, la varilla de acero ordinario (AC) es sometida a diversos procesos que incluyen la aplicación de recubrimientos superficiales con capas metálicas como el zinc (AG) o duales como el caso del recubrimiento metal-polímero (AD). Así mismo, existen en el mercado varillas de acero con tratamientos térmicos (ATT) que fueron desarrolladas principalmente como una alternativa para mejorar las propiedades mecánicas sin el uso de ferroaleaciones; siendo una interrogante su comportamiento frente a mecanismos de deterioro como la corrosión provocada por cloruros o carbonatación. De igual manera, el comportamiento electroquímico de la mayoría de estas varillas ha sido evaluado en la fase iniciación o despasivación.

En este trabajo se estudió el uso de varillas de acero antes mencionadas embebidas en especímenes prismáticos de concreto fabricado con dos relaciones agua/cemento: 0.45 y 0.65. Previo a su utilización las varillas fueron caracterizadas mecánica y metalográficamente. Los especímenes fueron colocados en dos sitios de exposición: un ambiente urbano/industrial o marino, y un ambiente controlado en laboratorio. Se realizó un seguimiento del potencial de corrosión, la resistencia a la polarización lineal y la espectroscopía de impedancia electroquímica durante la exposición. Se determinó la concentración crítica de cloruros para cada tipo de varillas y se llevó a cabo un seguimiento del avance de la carbonatación. Adicionalmente, mediante la inducción de un par galvánico por carbonatación el comportamiento electroquímico de las varillas AC, AG y ATT fue analizada mediante modelación por elemento finito.

RESUMEN / RÉSUMÉ

Se encontró que la despasivación de las distintas varillas expuestas en ambiente controlado de laboratorio se dio en el mismo orden para ambas relaciones a/c: ATT, AC, AG y AD. La mayor concentración de cloruros se obtuvo para las varillas de AG y AD. No obstante, tras la inspección visual, se encontró que la morfología de daño ocasionado en las varillas de AG fue mayor respecto a los otros tipos. En la etapa de propagación, la densidad de corriente de corrosión de las varillas de ATT fue menor, incluso a la obtenida por la varilla de AG.

Palabras clave: Corrosión, concreto reforzado, tipos varilla, cloruros, carbonación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	XXX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XL
NOMENGLATURAS Y ABREVIACIONES.....	XLI
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CONTEXTO DE ESTUDIO.....	8
JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	10
HIPÓTESIS.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	14
1.1 CONCRETO REFORZADO.....	15
1.2 DURABILIDAD DEL CONCRETO REFORZADO.....	16
1.2.1 Cloruros.....	18
1.2.1.1 Concentración Crítica de Cloruros (CCC).....	20
1.2.2 Carbonatación.....	21
1.2.3 Métodos de Prevención.....	23
1.3 EVOLUCIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	26
1.4 TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	31
1.4.1 Técnicas Semi-destructivas.....	31
1.4.1.1 Potencial de Corrosión (E_{corr}).....	32

1.4.1.2	Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).....	34
1.4.1.3	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).....	35
1.4.1.4	Curvas de Tafel.....	40
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES.....		43
2.1	VARILLA ORDINARIA DE ACERO (AC)	44
2.2	VARILLA DE ACERO CON TRATAMIENTO TÉRMICO (ATT)	46
2.3	VARILLA DE ACERO GALVANIZADO (AG).....	51
2.4	VARILLA DE ACERO CON RECUBRIMIENTO DUAL (AD).....	57
2.5	INDUCCIÓN DE LA CORRIENTE GALVÁNICA.....	61
CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL		66
3.1	ETAPA I. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARILLAS DE ACEROS	67
3.1.1	Ensayos Mecánicos.....	67
3.1.2	Microdureza por Vickers.....	68
3.1.3	Metalografía (Identificación de fases y espesor)	70
3.1.4	Análisis Químico de las varillas de acero AC y ATT.....	70
3.2	ETAPA II. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO.....	71
3.2.1	Cemento.....	71
3.2.2	Agregados	72
3.2.3	Agua para Mezcla.....	72
3.2.4	Aditivo.....	73
3.2.5	Proporcionamiento	73
3.3	ETAPA III. PREPARACIÓN DE VARILLAS Y DISEÑO DE PROTECCIÓN AL INTEMPERISMO.....	74

3.4 ETAPA IV. FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES.....	79
3.4.1 Fabricación de los especímenes en México.....	79
3.4.2 Fabricación de los especímenes en Francia	83
3.5 ETAPA V. INDUCCIÓN DEL DETERIORO DE LAS VARILLAS.....	89
3.5.1 Exposición a ambiente natural	89
3.5.1.1 Ambiente marino	89
3.5.1.2 Ambiente urbano/industrial.....	91
3.5.2 Ambiente controlado en laboratorio.....	92
3.5.3 Inducción de corriente galvánica por carbonatación.....	92
3.5.4 Caracterización electroquímica	94
3.5.4.1 Ambiente marino	94
3.5.4.2 Ambiente urbano/industrial.....	94
3.5.5 Determinación del contenido de cloruros	96
3.5.6 Seguimiento de la profundidad de carbonatación	98
3.5.7 Modelación matemática mediante elemento finito.....	99
3.5.7.1 Modelo numérico.....	101
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	103
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS VARILLAS DE ACERO.....	104
4.1.1 Microdureza.....	104
4.1.2 Metalografía	105
4.2 EXPOSICIÓN AMBIENTE NATURAL.....	108
4.2.1 Exposición a ambiente marino.....	108
4.2.1.1 Comportamiento electroquímico.....	108

4.2.1.2	Contenido de cloruros	112
4.2.1.3	Profundidad de carbonatación.....	116
4.2.2	Exposición en ambiente urbano/industrial	118
4.2.2.1	Comportamiento electroquímico.....	118
4.2.2.2	Profundidad de carbonatación.....	120
4.2.3	Discusión de resultados de exposición en ambiente natural	122
4.3	EXPOSICIÓN A AMBIENTE CONTROLADO DE LABORATORIO	124
4.3.1	Comportamiento electroquímico.....	124
4.3.2	Discusión de resultados de exposición en ambiente controlado en laboratorio	133
4.3.3	Contenido crítico de cloruros (CCC).....	137
4.3.4	Inspección visual	143
4.4	INDUCCIÓN DE LA CORROSIÓN GALVÁNICA POR CO ₂ (FRANCIA)	148
4.5	MODELACIÓN MEDIANTE ELEMENTO FINITO	152
	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	157
5.1	CONCLUSIONES	158
5.2	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	160
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Consecuencias de la corrosión de las varillas de acero de refuerzo embebidas en concreto (http://www.enriquealario.com/carbonatacion-de-hormigon/#lightbox/0/).	3
Fig. 2. Modelo de vida útil de Tuutti, para el concreto reforzado (Tuutti, 1982).	17
Fig. 3. Representación del daño localizado ocasionado por ataque de cloruros sobre la superficie de una varilla de acero.	19
Fig. 4. Factores que influyen en la carbonatación e inicio de la corrosión (Andrade, et al., 1989).	22
Fig. 5. Representación del frente de carbonatación no uniforme sobre el recubrimiento de concreto (http://www.prociestructuras.com/patologia_estructural.html).	23
Fig. 6. Esquema ilustrativo de la diferencia microestructural de las varillas de acero ordinario y de acero con tratamiento térmico (doble fase).	24
Fig. 7. Esquema del mecanismo de corrosión de la varilla de acero (Villeda, 2011).	27
Fig. 8. Relación entre el volumen de los productos de corrosión y el metal destruido (http://civilgeeks.com/2011/11/02/evaluacion-de-la-corrosion-en-las-estructuras-de-concreto-armado-i/).	28
Fig. 9. Disminución de la sección transversal (diámetro/varilla) en función del tiempo y de los valores de i_{corr} . Para los niveles de corrosión se establecen: insignificante, baja, moderada y alta (Andrade & Alonso, 1996).	29

Fig. 10. Esquema de medida del potencial de corrosión del refuerzo (ASTM C-876, 2000).	32
Fig. 11. Diagrama típico de Nyquist y su circuito equivalente (Ribeiro et al., 2013).	37
Fig. 12. Circuito eléctrico equivalente de Randles.	38
Fig. 13. Esquema de una reacción anódica en un diagrama de Tafel, E_0 , a: potencial de equilibrio, j_0 , a: densidad de corriente intercambio, b: pendiente de Tafel = 2.303β (Meas et al, 2002).	41
Fig. 14. Lingotes para la fabricación de varillas de AC.	44
Fig. 15. Esquema que representa las etapas del tratamiento térmico del temple de la varilla de ATT.	47
Fig. 16. Trabajos de investigación realizados sobre las varillas de ATT y su relación con las etapas generales del proceso de corrosión.	50
Fig. 17. Microfotografía del recubrimiento de galvanizado en caliente donde se muestra el detalle de las capas de aleación y su dureza (Yeomans, 2004).	52
Fig. 18. Velocidad de corrosión del zinc en función del pH del medio (Yeomans 2004).	53
Fig. 19. Varilla de acero dual (recubrimiento metal-polímero)(http://www.specifyzbar.com/).	58
Fig. 20. Esquema de una macrocelda de corrosión (Hansson et al., 2006).	63

Fig. 21. Máquina Universal Tinius Olsen; a) Cabezal superior, b) Tornillos lisos, c) Cabezal o marco fijo, d) Botonera, e) Centro hidráulico de poder y f) Consola de medición de carga.	67
Fig. 22. Preparación de varillas antes del ensayo de microdureza por Vickers.	68
Fig. 23. Muestra posicionada en el microdurómetro para el ensayo de microdureza.	69
Fig. 24. Incisiones realizadas sobre la sección transversal de una varilla de AC.	69
Fig. 25. Incisiones realizadas sobre la sección transversal de una varilla de acero ATT.	70
Fig. 26. Corte de las diferentes varillas de acero.	74
Fig. 27. Preparación de las varillas: a) pesaje, b) conexión e identificación, c) delimitación de área de estudio y d) verificación de continuidad eléctrica.	75
Fig. 28. Aplicación del recubrimiento con pintura epóxica y cinta de aislar.	76
Fig. 29. Verificación de la continuidad eléctrica y remoción de residuos de pintura del área de estudio.	76
Fig. 30. Cuchilla e incisiones realizadas sobre la varilla de AD.	77
Fig. 31. Esquema del diseño y preparación de la protección al intemperismo de las varillas.	78
Fig. 32. Montaje de las varillas antes del colado del concreto.	80

Fig. 33. Especímenes confinados en los moldes metálicos después del colado.	81
Fig. 34. Espécimen fabricado antes de su exposición a un medio agresivo.	81
Fig. 35. Esquema de un espécimen agrietado con un diseño típico vs especímenes fabricados.	82
Fig. 36. Molde cilíndrico y espaciador	83
Fig. 37. Preparación de espécimen antes del colado.	83
Fig. 38. Especímenes colados y esquema con sus dimensiones	84
Fig. 39. Sistema de carbonatación y espécimen carbonatado totalmente.	85
Fig. 40. Moldes utilizados para fabricación de especímenes para prueba de corrosión acelerada.	86
Fig. 41. Colocación de varillas y espécimen carbonatado	86
Fig. 42. Montaje de espécimen carbonatado y varillas el molde para la fabricación de los cilindros de la segunda fase.	87
Fig. 43. Especímenes fabricados para el ensaye de inducción de corriente galvánica por carbonatación acelerada.	88
Fig. 44. Ubicación del Instituto de Ingeniería, Boca del Río, Veracruz, México.	89
Fig. 45. Exposición de especímenes a ambiente marino.	89
Fig. 46. Ubicación del Instituto de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.	90

Fig. 47. Especímenes expuestos a ambiente urbano/industrial (azotea del IIC).	91
Fig. 48. a) Esquema de conexión de la varilla activa con las pasivadas, b) Ensayo de corrosión galvánica.	92
Fig. 49. Configuración para el monitoreo electroquímico.	94
Fig. 50. Esquema del control de los ciclos de inmersión-secado de la exposición a ambiente controlado en laboratorio.	95
Fig. 51. Espécimen seccionado para recuperar una muestra de concreto en la proximidad de la interface varilla-concreto.	96
Fig. 52. Representación de la obtención del perfil de contenido de cloruros.	97
Fig. 53. Cambio de coloración de la fenolftaleína revelando el frente de carbonatación profundidad del frente de avance de carbonatación.	98
Fig. 54. Sistema de tres electrodos para la aplicación de la técnica de extrapolación de Tafel.	99
Fig. 55. Modelo geométrico del espécimen por Comsol.	101
Fig. 56. Comparativa de los valores de microdureza de las varillas AC y ATT.	103
Fig. 57. Microestructura de la varilla de AC, composición física; ferrita-perlita.	104
Fig. 58. Microestructura de la varilla de ATT, composición física; ferrita-perlita y martensita.	105

Fig. 59. Microestructura de la varilla de AG utilizado en México: núcleo de acero al carbono (AC) y espesor del Zinc.	106
Fig. 60. Microestructura de la varilla de AG utilizado en Francia: núcleo de acero al carbono (AC) y espesor del Zinc.	106
Fig. 61. Microestructura de la varilla de AD: acero al carbono, recubrimiento de zinc y recubrimiento epóxico.	107
Fig. 62. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla expuestas a ambiente marino: relación $a/c=0.45$.	108
Fig. 63. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla expuestas a ambiente marino: relación $a/c=0.65$.	109
Fig. 64. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestos a ambiente marino: relación $a/c = 0.45$.	110
Fig. 65. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestos a ambiente marino: relación $a/c = 0.65$.	111
Fig. 66. Perfiles de contenido cloruros para 7 y 37 meses de exposición a ambiente marino: relación a/c de 0.45	112
Fig. 67. Perfiles de contenido cloruros para 7 y 37 meses de exposición a ambiente marino: relación a/c de 0.65.	112
Fig. 68. Sección de un espécimen diseñado con una protección al intemperismo y diferentes varillas extraídas sin presencia de daño en la interface varilla-concreto-ambiente.	114
Fig. 69. Corrosión de la varilla de acero en la interface varilla-concreto-ambiente (Hartt, 2016).	114

Fig. 70. Seguimiento de la profundidad de carbonatación para la exposición ambiente marino: a/c de 0.45 y 0.65.	115
Fig. 71. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla: a/c=0.45, exposición ambiente urbano/industrial.	117
Fig. 72. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla: a/c=0.65, expuestos a ambiente urbano/industrial.	118
Fig. 73. pH de los concretos utilizados en la fabricación de los especímenes.	119
Fig. 74. Seguimiento de la profundidad de carbonatación para la exposición ambiente urbano/industrial: a/c de 0.45 y 0.65.	120
Fig. 75. Comparación de la profundidad de carbonatación de los concreto con relaciones a/c de 0.65 y 0.45, expuestos a ambiente natural: marino (Ver.) y urbano/industrial (N.L).	122
Fig. 76. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c=0.45.	123
Fig. 77. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c=0.65.	124
Fig. 78. Comportamiento del E_{corr} en el período de 210 a 450 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c=0.45.	126
Fig. 79. Comportamiento del E_{corr} en el período de 60 a 240 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c=0.65.	126

Fig. 80. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c = 0.45.	128
Fig. 81. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c = 0.65.	128
Fig. 82. Comportamiento del i_{corr} en el período de 210 a 450 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c = 0.45.	131
Fig. 83. Comportamiento del i_{corr} en el período de 60 a 240 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c = 0.65.	131
Fig. 84. Superficie de un espécimen de concreto agrietado expuesto a ambiente controlado en laboratorio: AG-0.65 (varilla de acero galvanizado-relación a/c=0.65).	136
Fig. 85. corte de un espécimen de concreto agrietado expuesto en ambiente controlado en laboratorio: AG-0.65. Sin presencia de manchas en la superficie del espécimen.	136
Fig. 86. Contenido crítico de cloruros para los diferentes tipos de varilla expuestas a ambiente controlado en laboratorio en sus respectivas relaciones a/c y tiempo de despasivación.	138
Fig. 87. Valores críticos de cloruros necesarios para iniciar la corrosión de la varilla de acero de refuerzo. Datos de literatura: % por peso del cemento (%ppc)	140
Fig. 88. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de AC expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.	143

Fig. 89. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de AC expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.	143
Fig. 90. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.	144
Fig. 91. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.	144
Fig. 92. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de AG expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.	145
Fig. 93. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de AG expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.	145
Fig. 94. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de ADCI expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.	146
Fig. 95. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas de ADCI expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.	146
Fig. 96. Comportamiento electroquímico de los diferentes tipos de varillas de acero inducidas a corrosión galvánica por CO ₂ : relación a/c=0.45.	148
Fig. 97. Comportamiento electroquímico de los diferentes tipos de varillas de acero inducidas a corrosión galvánica por CO ₂ : relación a/c=0.65.	149

Fig. 98. Campo de potencial eléctrico inducido por el sistema de par galvánico.	153
Fig. 99. Líneas de densidad de corriente inducido por el sistema de par galvánico.	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos de prevención y protección contra la corrosión del concreto reforzado.	25
Tabla 2. Electrodo de media celda utilizados en la práctica (Nygaard, 2008).	33
Tabla 3. Condición de la corrosión del acero de refuerzo, relacionado con el valor de potencial de media celda.	34
Tabla 4. Grado de corrosión de acuerdo con la corriente calculada con la RPL.	35
Tabla 5. Composición química de las varillas de acero AC y ATT.	71
Tabla 6. Composición química, % por peso de cemento.	72
Tabla 7. Proporcionamiento de la mezcla utilizado en la fabricación del concreto.	73
Tabla 8. Nomenclatura utilizada para la identificación de los especímenes.	78
Tabla 9. Datos obtenidos a partir de análisis de profundidad de carbonatación.	117
Tabla 10. Datos obtenidos a partir de análisis de profundidad de carbonatación ...	121
Tabla 11. Valores críticos de cloruros necesarios para iniciar la corrosión de la varilla de acero de refuerzo.	142
Tabla 12. Parámetros de Tafel y Resistividad del concreto para varillas en estado activo y pasivo para la relación $a/c=0.45$	153
Tabla 13. Intensidades de corriente obtenida por modelación con elemento finito.	155
Tabla 14. Intensidades de corriente obtenida en laboratorio.	155

NOMENGLATURAS Y ABREVIACIONES

AC	Varilla de Acero Ordinario o al Carbono
ACI	American Concrete Institute
AD (CI)	Varilla de Acero Dual (Con Incisión)
AD (SI)	Varilla de Acero Dual (Sin Incisión)
AG	Varilla de Acero Galvanizado
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATT	Varilla de Acero con Tratamiento Térmico
A/C	Relación Ánodo/Cátodo
a/c	Relación agua/cemento
CaHZn	Hidróxi zincato de calcio
CCC	Contenido Crítico de cloruros
CO ₂	Dióxido de carbono
CPO	Cemento Portland Ordinario
CYTED	Ciencia y Tecnología para el Desarrollo
EIE	Espectroscopía de Impedancia Electroquímica
E _{corr}	Potencial de corrosión
FRX	Fluorescencia de Rayos X

i_{corr}	Corriente de corrosión
i_{corr}	Densidad de corriente de corrosión
k_{CO_2}	Coefficiente de difusión de CO_2 en el concreto
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NaCl	Cloruro de sodio
NMX	Norma Mexicana
ONNCCE	Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
RPL	Resistencia a la Polarización Lineal
pH	Potencial de Hidrógeno
Sa/Sc	Relación Superficie anódica/Superficie catódica
SCE	Electrodo saturado de calomelanos (siglas en inglés)
SHE	Electrodo normal de hidrógeno (siglas en inglés)
t	Tiempo
x_{CO_2}	Profundidad de carbonatación
°C	Grados Celsius

INTRODUCCIÓN

GENERAL



El concreto reforzado es un material estructural en el que se integran las propiedades del concreto simple y de las varillas de acero de refuerzo. Para que dicha integración suceda, es necesario que ambos materiales estén íntimamente unidos e interactúen a través de las fuerzas de adherencia que se desarrollan en la interface varilla-concreto.

A partir de su descubrimiento en la tercera década del siglo XIX, el concreto reforzado ha sido de gran importancia para el desarrollo de un país, tanto que es fácil diferenciar mediante su infraestructura, si éste se encuentra en vías de desarrollo o en pleno desarrollo.

Por su característica sólida después del fraguado, los primeros ingenieros tenían la creencia de que era un material que poseía una larga vida útil, sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Actualmente, es fácil encontrar una gran cantidad de estructuras construidas con concreto reforzado que presentan en menor o mayor grado algún tipo de daño, ocasionado regularmente por la ocurrencia de la corrosión de la varilla de acero de refuerzo.

En el proceso de degradación por efecto de la corrosión, la calidad del conjunto varilla-concreto es de suma importancia, ya que dependerá en gran medida de la estabilidad física y química de las fases que forman la pasta del cemento, y del papel de la capa protectora que se genera sobre la superficie de la varilla de acero contra el desarrollo de la corrosión (Fontana & Greene, 1987). La cual ocurre precisamente por la destrucción de esta capa pasivante (García-Alonso et al., 2007; Pu et al., 2011). Este proceso tiene dos causas principales: la presencia de una cantidad suficiente de cloruros (Morris et al., 2004; Ann & Song, 2007), y la disminución de la alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente, principalmente con el dióxido de carbono (CO_2) (Zhang et al., 2012; Duong et al., 2013; Roventi et al., 2014).

La corrosión de la varilla de acero de refuerzo embebida en concreto desencadena una triple consecuencia (véase figura 1) (Otieno et al., 2016):

- 1 La sección transversal de la varilla de acero disminuye y por consecuencia reduce su capacidad de carga.
- 2 El concreto puede fracturarse o desprenderse por capas debido a los esfuerzos de tensión generados por el aumento del volumen los productos de corrosión
- 3 La adherencia entre el concreto y la varilla de acero disminuye o desaparece.



Fig. 1. Consecuencias desencadenadas tras el proceso de corrosión de las varillas de acero de refuerzo embebidas en concreto (<http://www.enriquealario.com/carbonatacion-de-hormigon/#lightbox/0/>).

Normalmente cuando el grado de corrosión comienza a mermar la calidad de una estructura, se realiza algún tipo de intervención ya sea de reparación, renovación o sustitución, lo cual es sumamente costoso.

Existen algunas estimaciones en pérdidas económicas y del grado de deterioro de estructuras por efecto de la corrosión. Por ejemplo, España con 1,200 millones de Euros de costo anual, 50 millones de Euros que gasta Gran Bretaña cada año sólo en la reparación de puentes, o el caso de los Estados Unidos que el 44% de los más de 500,000 puentes y carreteras son considerados como estructuras deficientes y que requieren algún tipo de reparación (García-Alonso et al., 2007), en el caso de México la SIPUMEX calificó en 2005 a los más de 6065 puentes con un estado general como adecuado (calificación 2, de una escala del 0 al 5). Sin

embargo, la edad promedio de los puentes en la red federal es cercana a los 35 años, esto implica que muchos de los puentes carreteros están en los límites de su vida útil (Acosta et al., 2010).

Es por ello que distintos investigadores buscan desde diferentes frentes mitigar el deterioro por efecto de la corrosión. Así, mientras algunos han trabajado con el mejoramiento de las propiedades del concreto (Fajardo et al., 2009; Shaikh & Supit, 2015), otros proponen métodos alternos de protección externa como la protección catódica, extracción electroquímica de cloruros o realcalinización electroquímica (Pérez et al., 2010; Bertolini et al., 2008).

En lo que respecta a la varilla de acero de refuerzo, se han propuesto diferentes alternativas de protección que involucran la modificación de las propiedades de su superficie. Uno de los métodos de protección más empleados es el galvanizado por inmersión en caliente en donde la varilla de acero de refuerzo es recubierta de una capa de zinc (Acero Galvanizado; AG) (Delaunois et al., 2014). Otro es la varilla del acero dúplex (Acero Dual; AD) (Chang et al., 2002), cuyo término describe la protección de la varilla de acero ordinario por un revestimiento de zinc que a su vez está recubierto por un revestimiento no metálico (generalmente una resina polimérica constituida por Bisfenol A y Oxido de cromo III [Cr_2O_3]).

Otro tipo de varilla de acero de refuerzo que podemos encontrar en el mercado y que ha surgido de la modificación microestructural es la varilla de acero con tratamiento térmico (ATT) (Nakagawa & Thomas, 1985; Xu et al., 2016), la cual consiste principalmente de una matriz suave de ferrita y una capa exterior dura compuesta de martensita. Sin embargo, no fue desarrollada pensando en mitigar la corrosión.

Por otro lado, como bien se sabe la primera defensa contra el desarrollo de la corrosión de la varilla de acero de refuerzo es el concreto. En ese sentido, se debe controlar la calidad de éste, utilizando relaciones agua/cemento (a/c) bajas, tipo de cemento adecuado para el medio de exposición, materiales de calidad, espesores o recubrimientos adecuados, el curado, entre otros cuidados. Sin embargo, el

llevarlos a la práctica es complejo y aumenta el costo, por lo que los métodos constructivos aplicados en obra no están enfocados al aspecto de la durabilidad de las mismas (Mangat et al., 2016).

Es por eso que, desde la perspectiva del acero de refuerzo, se busca por medio de la mejora de la superficie de la varilla de acero, aminorar el problema de corrosión, ya que desde este frente se busca reducir el impacto del proceso de corrosión cuando la calidad del concreto sea deficiente.

Es claro que el utilizar una varilla de acero que ha sido mejorada para combatir el problema de corrosión, aunado a un concreto fabricado con la mejor calidad, el resultado será una obra que fácilmente tendrá un incremento considerable en su vida útil. Como resultado para el inversionista y/o contratista, será una obra de calidad, la cual presentará ahorros económicos considerables en mantenimiento y operación, además, su estética dará confianza al usuario de la estabilidad del inmueble, o simplemente coadyuvará a la rentabilidad del proyecto.

A pesar de eso, la realidad es que las obras ingenieriles rara vez se realizan con un diseño adecuado por durabilidad, debido principalmente al incremento del costo inicial de la obra, lo cual lleva nuevamente a prevenir la corrosión desde la perspectiva de mejorar al acero de refuerzo.

Con estas mejoras, crece el número de varillas de acero modificadas superficialmente y con ellas, nace la incertidumbre del cómo será su comportamiento frente a la corrosión. Paralelo a ello, el tema de evaluación, ya que las técnicas y parámetros con los que actualmente se cuentan para medir el grado de corrosión, fueron idealizados inicialmente para el acero de refuerzo ordinario (AC); nombrada así en este trabajo para diferenciarla de la varilla ATT quien también es una varilla de acero al carbono. Por lo tanto, el comportamiento electroquímico y los valores establecidos como límites referidos al estado activo o pasivo de la varilla de acero al carbono embebida en concreto, o los valores del contenido crítico de cloruros obtenidos ya sea en campo o laboratorio son referidos a dicho tipo de acero.

Así, el desarrollo de la metodología utilizada en este trabajo implicó a las distintas varillas de acero de refuerzo antes mencionadas, y la utilización de concretos, para simular el comportamiento de una estructura real ante el ataque por cloruros, el CO₂, o la formación de un par galvánico en un concreto en vías de carbonatación, utilizando especímenes o probetas.

Las probetas fabricadas para las exposiciones de ambiente costero, ambiente urbano/industrial y a ciclos de inmersión-secado en solución de NaCl en laboratorio, fueron especímenes de geometría prismática de 17.5 cm x 9 cm x 15 cm, con dos varillas del mismo tipo de acero embebidas. A éstas últimas se les realizó una preparación para su protección ante el intemperismo.

Dos relaciones agua/cemento (a/c) fueron utilizadas: una de 0.65 la cual es usual en la industria de la construcción; y la otra de 0.45 la cual satisface características ideales en aspectos de durabilidad para cualquier tipo de exposición ambiental de las estructuras de concreto reforzado (Baghabra Al-Amoudi et al., 2009; Kosmatka et al., 2004).

En el caso de los especímenes utilizados en el estudio de inducción de corriente galvánica por carbonatación, fueron fabricados en dos fases, en la primera fase se fabricaron especímenes cilíndricos de concreto de 6.5 cm de diámetro por 13 cm de longitud, con las varillas de AC, ATT y AG, los cuales fueron carbonatados totalmente. En la segunda fase los especímenes estuvieron compuestos por dos cilindros concéntricos de concreto con varillas de acero embebidas. Uno en el interior, el cual era el cilindro previamente carbonatado en la fase uno y con la varilla de acero despasivada, el otro, un cilindro exterior (no carbonatado) con cuatro varillas de acero embebidas del mismo tipo, las cuales se encontraban en estado pasivo.

En este trabajo se presentan los resultados electroquímicos de las diferentes varillas de acero y en los diferentes medios de exposición, así como los valores de contenido crítico de cloruros. Además, las profundidades de carbonatación

obtenidas tras la exposición de los especímenes en los medios de ambiente urbano/industrial y ambiente costero.

Esta tesis se articula en torno a cuatro capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el capítulo uno se realiza una revisión documental sobre el concreto reforzado; su durabilidad y deterioro por efecto de la corrosión del acero. Se aborda el tema de la corrosión por efecto de los agentes agresivos: iones cloruro (Cl⁻) y carbonatación (CO₂). También se hace mención de los métodos de prevención y la evolución de las varillas de acero contra el desarrollo de deterioro por esta patología. Finalmente, se mencionan algunas de las técnicas de evaluación de la corrosión de las estructuras de concreto reforzado.

En el capítulo dos se presentan los antecedentes referentes a las varillas de acero estudiados en esta investigación: varilla ordinario de acero, varilla de acero con tratamiento térmico, varilla de acero galvanizado y varilla de acero dual. Se describen características referentes al comportamiento ante su degradación frente al deterioro por efecto de la corrosión.

El capítulo tres describe la metodología experimental implementada para esta investigación. Está conformada por cinco etapas, en las dos primeras se describe la caracterización de las varillas de acero y de los materiales requeridos para la fabricación del concreto. Las etapas tres y cuatro corresponden al diseño y fabricación de los especímenes. Finalmente, la quinta etapa describe el inicio de exposición a los distintos medios agresivos.

El análisis y la discusión de los resultados son descritos en el capítulo cuatro. Dicha sección describe los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas utilizadas, conforme al medio agresivo que pertenezca. Además, se anexan las conclusiones del trabajo de investigación, así, como las recomendaciones y trabajos futuros.

CONTEXTO DE ESTUDIO

Con la adquisición de conocimientos sobre la degradación de las varillas de acero embebidas en concreto por efecto de la corrosión, toma mayor fuerza el enfoque preventivo. Entendiéndose éste como el resultado de una serie de medidas adicionales encaminadas a modificar las características de los materiales con que se construye. En ese sentido se ha llevado a la varilla ordinaria de acero a una evolución en sus características superficiales, buscando siempre la mitigación de dicho deterioro.

Precisamente el avance de la tecnología es la que ha permitido la modificación de la microestructura superficial de las varillas ordinarias de acero (Speer & Matlock, 2002), lo cual a su vez ha traído como resultado diferentes productos que hoy en día se pueden encontrar en el mercado. Aunque la mayoría buscan la mitigación de la corrosión, también se pueden encontrar los que fueron idealizados simplemente para soportar las demandas mecánicas que son exigidas a las estructuras de concreto reforzado.

No obstante, es importante mencionar que los métodos que dieron lugar a las normas, técnicas de evaluación, procedimientos de inspección y los métodos de prueba para el análisis del deterioro por corrosión, fueron desarrollados inicialmente para las varillas ordinarias de acero. Sin embargo, en la actualidad las evaluaciones de las nuevas varillas modificadas superficialmente se realizan bajo los mismos criterios, adicionalmente, dichas evaluaciones en su mayoría se desarrollan sólo en la fase de iniciación/despasivación (Ismail et al, 2012) o bien en soluciones sintéticas (Sarkar et al., 2005), etc., esto último pudiese llevar a una percepción errónea cuando se realiza un diagnóstico a estructuras que utilizan como refuerzo estas varillas modificadas.

Por lo que en el presente estudio se llevó a cabo un seguimiento electroquímico que permitió evaluar las fases por las que invariablemente pasa la varilla de acero, cuando ésta es dañada por el mecanismo de corrosión: iniciación, despasivación y

propagación. Obteniéndose información que permite observar lo que sucede cuando la corrosión daña o deteriora la capa superficial de las varillas de refuerzo.

Dicho monitoreo se realizó en especímenes fabricados en laboratorio y trasladados a los diferentes lugares de exposición. Para el caso de los especímenes expuestos a ambiente costero, éstos fueron ubicados en la azotea del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana en Boca del Río, Veracruz. Los expuestos a ambiente urbano/industrial fueron colocados en la azotea del Instituto de Ingeniería Civil (IIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Una serie de especímenes fueron expuestos a condiciones controladas de laboratorio por medio de ciclos de inmersión en NaCl y secado a 40 °C en el laboratorio de investigación ubicado en el IIC. Finalmente, los especímenes correspondientes a la evaluación de par galvánico fueron fabricados y ensayados en el Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'Université Paul Sabatier ubicado en Toulouse, Francia.

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En la actualidad, la extensión de la vida útil de los proyectos importantes de infraestructura, es un tema que ha cobrado interés entre los científicos y especialistas de la Ingeniería Civil. a la luz de la literatura se constata el desarrollo de propuestas para lograr este fin, que incluyen desde el mantenimiento y reparación (protección catódica, extracción de cloruros, realcalinización, etc.)(Polder et al., 2014; Fajardo et al., 2006; Ribeiro et al., 2013) hasta la prevención misma del fenómeno de la corrosión utilizando inhibidores de corrosión en el concreto, o propuestas que involucran la modificación de las propiedades superficiales de las varillas ordinarias de acero, ya sean recubrimientos metálicos y/o metal-polimérico (Tittarelli & Bellezze, 2010).

Así, dentro de los métodos de protección más empleados es el galvanizado por inmersión en caliente en donde la varilla ordinaria de acero de refuerzo es recubierta de una capa de zinc (AG). Otro es la varilla de acero dúplex (AD), el término describe la protección de la varilla de acero ordinario por un revestimiento de zinc que a su vez está recubierto por un revestimiento no metálico (generalmente una resina polimérica).

También, se pueden encontrar en el mercado varillas de acero de refuerzo que han surgido de la modificación microestructural, las cuales consiste principalmente de una matriz suave de ferrita y una capa exterior dura compuesta de martensita, y que no necesariamente fueron desarrolladas pensando en mitigar la corrosión (Worldwide, 1981).

La comprensión del mecanismo de corrosión que da origen a las diferentes manifestaciones de deterioro de las estructuras de concreto reforzado, y el manejo adecuado de las distintas técnicas de evaluación y diagnóstico, son primordiales para poder proponer las consecuentes estrategias de intervención a nivel de campo.

En ese sentido la evaluación de las varillas de acero de refuerzo ante el fenómeno de la corrosión más allá de la fase de despasivación, son de vital importancia para

la comprensión del comportamiento electroquímico de determinado tipo de varilla de refuerzo, en un determinado medio de exposición.

Tal es el caso de las varillas de ATT, AG y AD las cuales han sido estudiadas en la mayoría de los casos en condiciones de exposición a cloruros y solo hasta la fase de despasivación (Chang et al., 2002; Ismail et al., 2012), dejando entre visto el mecanismo de propagación. Además, son escasos los estudios de estos tipos de varillas frente a un mecanismo de carbonatación, siendo que el problema de la emisión de CO₂ en las grandes ciudades se mantiene presente y va en aumento, por lo que resulta necesario conocer los efectos ante esta patología.

En el caso de las varillas de acero galvanizado han sido estudiadas otros métodos de inducción del par galvánico, sin embargo, no son muy representativos de lo que sucede en una estructura real en vías de carbonatación como lo hace el método aplicado en esta investigación.

HIPÓTESIS

El mecanismo de deterioro por corrosión de la varilla de acero embebida en concreto invariablemente pasa por tres etapas: iniciación, despasivación y propagación. La mayoría de las investigaciones se han realizado en las etapas de iniciación y/o despasivación, siendo escasas las enfocadas a la etapa de propagación. Lo anterior, ha traído como consecuencia discrepancias en la interpretación y extrapolación de los resultados obtenidos a partir de los estudios puntuales en cada una de las etapas evaluadas, esto principalmente para las varillas ATT y AG. Las varillas ATT, AG Y AD presentan una modificación superficial en forma de recubrimiento metálico o metálico-polimérico de un espesor determinado. En este sentido, la corrosión de las varillas provocada por cloruros o carbonatación se presenta como una disolución superficial que causa una pérdida del diámetro inicial y sus consecuentes problemas de durabilidad.

Si se evalúa el comportamiento electroquímico en las tres etapas por las que pasa el proceso de corrosión de las varillas AC, ATT, AG y AD embebidas en concretos y bajo condiciones de corrosión generadas por cloruros y carbonatación, entonces la información que se obtenga permitirá identificar en que medio sería más factible utilizar un determinado tipo de varilla.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento del proceso de corrosión inducido por carbonatación y cloruros en las fases de iniciación, despasivación y propagación de varillas con diferente acabado superficial embebidas en concreto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar el comportamiento electroquímico (E_{corr} e i_{corr}) hasta la etapa de propagación de las varillas con diferente acabado superficial, embebidas en concreto y expuestas a ambientes ricos en CO_2 y cloruros.

Determinar la concentración de cloruros, de los distintos tipos de varillas con diferente acabado superficial en especímenes de concreto expuestos a ambiente marino y ambiente controlado en laboratorio.

Llevar un seguimiento de la profundidad de carbonatación de especímenes expuestos a ambiente natural urbano/industrial y marino.

Caracterizar el comportamiento electroquímico de las varillas de AC, ATT y AG, mediante la generación de un par galvánico por carbonatación acelerada simulando la corrosión de las varillas de acero en un concreto en vías de carbonatación.

CAPÍTULO I.

GENERALIDADES



1.1 CONCRETO REFORZADO

Desde su descubrimiento ha sido el material compuesto más utilizado en la industria de la construcción, siendo clave fundamental en el desarrollo socioeconómico mundial. Normalmente un país que presenta una gran infraestructura su nivel socioeconómico es estable, caso contrario es el de un país en vías de desarrollo donde habitualmente su infraestructura es careciente.

Por su característica sólida después del fraguado, los primeros ingenieros tenían la creencia de que era un material el cual poseía una larga vida útil, sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así (Garcés et al., 2008). Actualmente, es fácil encontrar una gran cantidad de estructuras construidas con concreto reforzado que presentan en menor o mayor grado algún tipo de daño, ocasionado regularmente por la ocurrencia de la corrosión de la varilla de acero de refuerzo.

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; logrando con ello estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio. Sin embargo, se han encontrado problemas relacionados con el medio en el que se encuentra la estructura (Cook, 2005; de la Fuente et al., 2011). Debido a esto era inminente la necesidad de investigar las razones del porqué del deterioro del concreto reforzado y solucionar problemas prácticos. De ahí se derivó el interés de estudiar la relación y los factores que interactúan entre este tipo de estructuras y su entorno.

Hoy en día se sabe, que el concreto confiere inicialmente una buena protección a las varillas de acero de refuerzo tanto física como química. Proporciona un ambiente alcalino que las rodea, generando las condiciones óptimas para que la capa inicial de óxidos que se forma esté en una condición pasiva. Sin embargo, la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado se ve comprometida debido a la corrosión de la varilla de acero de refuerzo, el cual es la causa principal del deterioro de este tipo de estructuras (Apostolopoulos & Papadakis, 2008).

1.2 DURABILIDAD DEL CONCRETO REFORZADO

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado está asociada a los procesos de degradación del concreto y del acero, como consecuencia de causas diferentes a las cargas y sollicitaciones contempladas en el proyecto. Para abordar el diseño de estructuras durables, se debe tener en cuenta los posibles mecanismos de degradación que puedan afectarla, así como los diferentes niveles de exposición que vayan a incidir sobre cada elemento estructural.

El ACI define la durabilidad como: la capacidad de mantener las condiciones de servicio de un producto, ensamble o construcción por un periodo determinado de tiempo, dichas condiciones de servicio comprenden la capacidad de cumplir con las funciones para las cuales la estructura fue diseñada y construida. Así mismo define a la vida útil como: el período de tiempo después de la instalación en el cual, el desempeño de las estructuras cumplen con los valores mínimos de mantenimiento (ACI-365.1R, 2000).

Para el concreto reforzado el modelo básico de vida útil relacionado con la corrosión de la varilla de acero de refuerzo se debe a Tuutti (Tuutti, 1982) (véase figura 2). Este modelo ha sido aplicado por distintos autores para el cálculo de la vida útil de las estructuras que se resumen en diversos manuales.

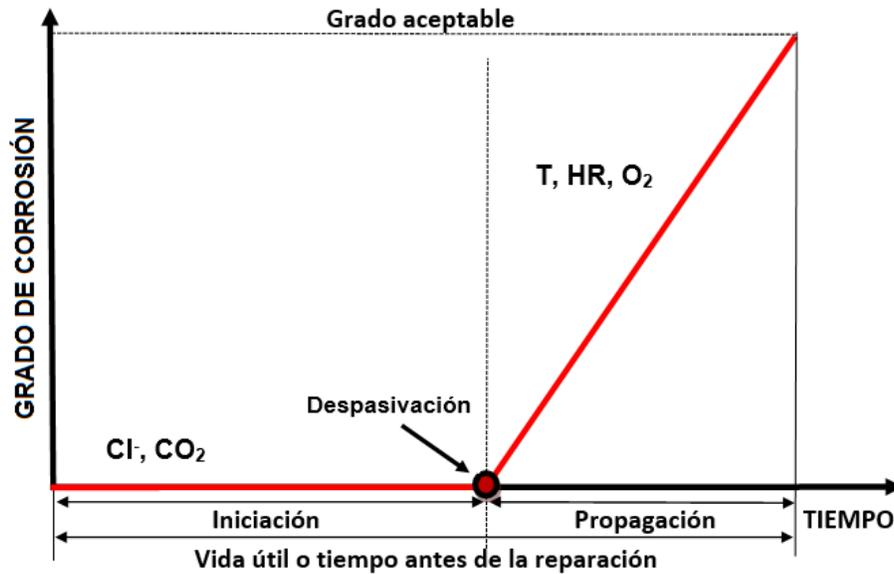


Fig. 2. Modelo de vida útil de Tuutti, para el concreto reforzado (Tuutti, 1982).

Inicialmente, las varillas de acero se estabilizan rápidamente por el medio que le rodea en el concreto fresco, en esas condiciones se dice que se encuentran pasivas. En esta primera fase, denominada de periodo de iniciación, va a consistir en reunir las condiciones necesarias para que se produzca la ruptura de esta estabilidad, es decir la despasivación de la varilla de acero. Durante esta fase las sustancias agresivas (cloruros y CO_2 , principalmente) que pueden despasivar a la varilla penetran desde la superficie hasta la interface varilla-concreto, en el mejor de los casos.

Una vez que el frente de carbonatación o una cantidad suficiente de cloruros ha alcanzado la superficie de la varilla de acero embebida en concreto, la capa pasiva es destruida, en consecuencia, da inicio la fase de propagación. En ésta fase la corrosión sólo tendrá lugar si el agua y oxígeno se encuentran presentes. La velocidad de corrosión determinará el tiempo que tarda la estructura en alcanzar un estado mínimo aceptable de degradación. Se debe tener en cuenta que esta velocidad puede variar considerablemente dependiendo de la temperatura, la humedad relativa y el oxígeno presente en la interface (Roventi et al., 2014; Kosmatka et al., 2004).

Es clara la importancia del concreto ya que en la primera etapa actúa tanto como una barrera física como química, impidiendo parcialmente el ingreso de los agentes agresivos que detonarán el inicio de la corrosión en el acero de refuerzo. Por ende, sus características serán un factor importante en la durabilidad al momento de concebir una estructura, tales como el contenido y el tipo de cemento, el recubrimiento o espesor, la porosidad y la relación agua/cemento (a/c), entre otros.

Sin embargo, cuando estas características no son controladas la durabilidad de la estructura dependerá exclusivamente de las características superficiales de la varilla de refuerzo. Así la propagación de la corrosión dependerá la disolución de la capa superficial del tipo de varilla de acero en cuestión y del tipo de agente agresivo.

Generalmente éstos agentes agresivos son los cloruros (Cl^-) y el dióxido de carbono (CO_2), que después de una determinada concentración o disminución del pH en la interface varilla-concreto romperán la capa pasiva de la varilla. Éstos han sido objeto de estudio desde hace décadas por razones obvias.

A continuación, se describen algunas características de la forma de ataque de estos dos agentes agresivos.

1.2.1 Cloruros

En el caso del ataque por cloruros, la morfología que presentan las varillas de acero tras sufrir un daño es en la forma de perforaciones localizadas (véase figura 3), las cuales se originan sobre la superficie de la varilla donde fue alcanzada por dichos iones (Ghods et al., 2011).

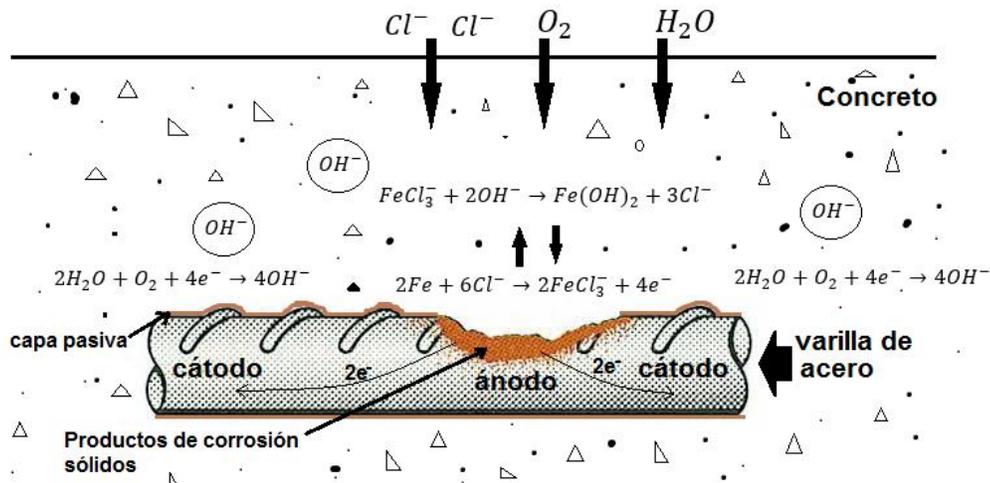


Fig. 3. Representación del daño localizado ocasionado por ataque de cloruros sobre la superficie de una varilla de acero.

La corrosión de la varilla de acero de refuerzo inducida por estos agentes, es considerada como el factor más importante que gobierna la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado (Bastidas et al., 2015). Los iones cloruro, pueden ser añadidos al concreto en el momento del mezclado, accidentalmente en la forma de contaminantes en el agua o en los agregados, también, pueden ingresar al concreto a través de aditivos acelerantes del fraguado o reductores de agua, los cuales suelen contenerlos en su composición química (Meagher et al., 2015). Sin embargo, la principal fuente de contaminación de cloruros es la sal proveniente de la brisa marina, los cuales ingresan a través de la red de poros del concreto. Al principio la agresividad puede ser nula con respecto al tiempo, pero directamente proporcional conforme este pasa (Ožbolt et al., 2016).

Respecto al mecanismo mediante el cual los cloruros actúan como catalizador en la pérdida de protección de la capa pasiva, aparecen en la literatura dos teorías: En la primera, éstos reemplazan a los átomos de oxígeno de la capa pasiva, aumentando su conductividad y su solubilidad, causando diferencias en el potencial electroquímico y proporcionando inestabilidad a la capa pasivante. De acuerdo con la segunda teoría, la capa pasiva contiene defectos y poros. Por una disolución selectiva de los componentes más activos de la capa y debido a su pequeño

tamaño, los cloruros penetran en la película por los huecos más fácilmente que otros iones que puedan estar presentes en la disolución de los poros. Se forman así, distintos ánodos sobre la superficie de la varilla activa rodeada por grandes áreas catódicas de superficie de la varilla en estado pasivo. Ambas teorías ponen de manifiesto que el ataque de la película pasiva por cloruros es un fenómeno localizado (Fernández, 2008).

La velocidad de corrosión está determinada por la movilidad de los cloruros, la disponibilidad de oxígeno y resistividad eléctrica del concreto. A medida que la velocidad de corrosión aumenta, el pH de la solución de los poros en la picadura decrece, aumentando la disolución del hierro en el fondo de la picadura (Zamri, 2008).

Así, el ataque por cloruros comienza con la picadura en los puntos débiles de la interface varilla-concreto. Un punto débil se puede generar debido a una caída del pH, a un hueco de aire por mala compactación, a una grieta del concreto o a un defecto en la superficie de la varilla de acero (Ann & Song, 2007).

1.2.1.1 Concentración Crítica de Cloruros (CCC)

La corrosión de la varilla de acero de refuerzo en las estructuras de concreto expuestas a cloruros, ocurre por la destrucción de la capa pasivante, suceso derivado de la presencia de una cantidad suficiente de cloruros, conocida como “contenido crítico de cloruros” (Ann & Song, 2007). El valor dependerá de diversos factores como relación agua/cemento (a/c), tipo de cemento, contenido de aluminato tricálcico (C_3A) en el cemento, la temperatura, la humedad relativa (HR), la fuente de cloruros y la superficie de la varilla de acero de refuerzo (Pereira et al., 2013).

Para cuantificar la cantidad de cloruros presentes en el concreto al momento del inicio de la corrosión, la relación Cl^-/OH^- es uno de los parámetros más precisos (Alonso et al., 2002). Sin embargo, debido a la dificultad para la medición del OH^- en el concreto, los contenidos de cloruros libres y totales por peso de cemento o

concreto, son los parámetros que han sido más utilizados para indicar el riesgo de corrosión (Alonso et al., 2000).

Mientras que algunos autores consideran que la despasivación se produce cuando hay un cierto cambio en el potencial de corrosión (E_{corr}). Otros autores utilizan la inspección visual e identifican la despasivación con la aparición de manchas de óxido en la superficie de la varilla. Por último, otros relacionan la despasivación con un cierto nivel de corriente de corrosión (i_{corr}) (Alonso et al., 2000).

1.2.2 Carbonatación

En lo que respecta a la morfología de daño que presenta la superficie de las varillas de acero tras la llegada del frente de carbonatación, ésta normalmente es generalizada, es decir, la pérdida de sección de la varilla se da a lo largo del área donde el concreto ha perdido su alcalinidad.

Aunque la corrosión inducida por cloruros se considera más grave que la corrosión por carbonatación, Parrott (Parrott, 1996) y Jones et al. (Jones et al., 2000), afirman que 2/3 de todo el concreto estructural se expone a condiciones ambientales que favorecen la corrosión inducida por carbonatación. Éste último, es un fenómeno que en sí no provoca el deterioro del concreto, pero acidifica el pH de la solución de los poros (Gandía-Romero et al., 2016). Cuando esto sucede, sobre la superficie de la varilla de acero de refuerzo se producen diferentes zonas anódicas y catódicas, las cuales son repartidas irregularmente con un cambio aleatorio de posición durante el proceso, adquiriendo una forma generalizada.

La penetración del CO_2 en el recubrimiento del concreto es un proceso complejo, gradientes en el contenido de humedad (Glass et al., 1991), excesivas tensiones (Castel et al., 1999), la calidad del recubrimiento del concreto y la ubicación de la varilla de acero de refuerzo en una estructura, son factores que afectan la progresión de la carbonatación e iniciación de la corrosión (véase figura 4).

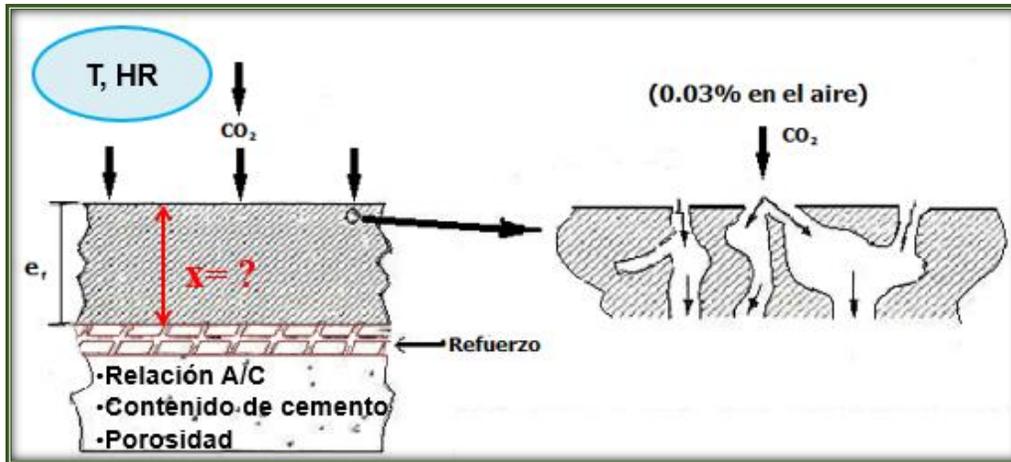


Fig. 4. Factores que influyen en la carbonatación e inicio de la corrosión (Andrade, et al., 1989).

Debido a estos factores, el frente de carbonatación no es uniforme (véase figura 5) lo que significa que incluso algunas áreas locales de la estructura, no son afectadas al mismo tiempo. Como el refuerzo está compuesto por una gran cantidad de varillas de acero usualmente unidas, esta situación puede conducir a una macrocelda de corrosión desarrollada entre las diferentes partes de la superficie del acero, creando diferentes potenciales de equilibrio electroquímico (Nasser et al., 2010; Hansson et al., 2006). Así, cuando una estructura de concreto reforzado se carbonata parcialmente, en las partes carbonatadas el acero tiene potenciales electroquímicos más negativos, y en las partes no carbonatadas, presenta potenciales más positivos (Nasser et al., 2010). Dicha circunstancia produce a largo plazo, una reducción en la sección transversal de la varilla y una cantidad significativa de óxidos, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión en el concreto que agrietan el recubrimiento, o bien pueden difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto produciendo manchas en el acabado.

A causa de la variabilidad de factores descritos anteriormente que pueden generar pares galvánicos, surge la necesidad de implementar una técnica que permita evaluar en un ambiente controlado (laboratorio) el proceso de corrosión, pudiendo de esta manera identificar las variaciones del comportamiento electroquímico de una estructura real puesta en servicio.

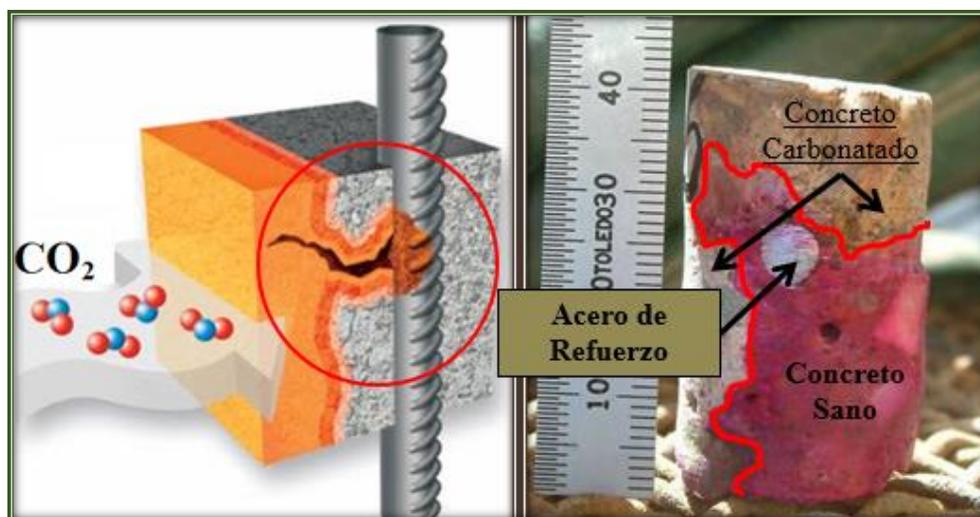


Fig. 5. Representación del frente de carbonatación no uniforme sobre el recubrimiento de concreto (http://www.prociestructuras.com/patologia_estructural.html).

Por otro lado, como bien se sabe son diversos los factores que influyen en el desarrollo de la corrosión de la varilla de acero. Tradicionalmente se ha diseñado en base a patrones climáticos del pasado considerados como normales. Sin embargo, en la actualidad se sabe que el cambio climático es un problema que se ha hecho más evidente en los últimos años, y que éste podría traer como consecuencia que los fenómenos que favorecen la corrosión no se den como normalmente se suscitan. Por ejemplo, cuando nos referimos al problema de corrosión por carbonatación, automáticamente asociamos este problema con las zonas urbanizadas y/o industrializadas, donde la concentración de CO_2 es alta debido a las emisiones locales, minimizando así la ocurrencia de la carbonatación en las zonas costeras, trayendo como consecuencia una percepción que podría ser errónea sobre esta aseveración.

1.2.3 Métodos de Prevención

En base a los conocimientos adquiridos en esta materia, desde hace mucho tiempo se ha buscado desde diferentes perspectivas la forma de mitigar este fenómeno. Así, mientras algunos investigadores han trabajado con el mejoramiento de las propiedades del concreto (Fajardo et al., 2009; Shaikh & Supit, 2015; González et

al., 2011), otros han propuesto métodos alternos de protección externa (Pérez et al., 2010; Bertolini et al., 2008).

En lo que respecta a la varilla de acero de refuerzo, se han propuesto diferentes alternativas de protección que involucran la modificación de las propiedades de su superficie. Uno de los métodos de protección más empleados es el galvanizado por inmersión en caliente en donde la varilla de acero de refuerzo ordinaria es recubierta de una capa de zinc (AG). Otra es la varilla de acero dúplex (AD), el término describe la protección de la varilla de acero ordinaria por un revestimiento de zinc que a su vez está recubierto por un revestimiento no metálico.

Por último, está la varilla de acero de doble fase o acero con tratamiento térmico (ATT) la cual consiste principalmente de una matriz suave de ferrita y una capa exterior dura compuesta de martensita (véase figura 6). Sin embargo, cabe aclarar que el proceso de manufactura no se desarrolló con la finalidad de contrarrestar la corrosión, por ello la inminente necesidad de su evaluación ante el fenómeno de la corrosión.

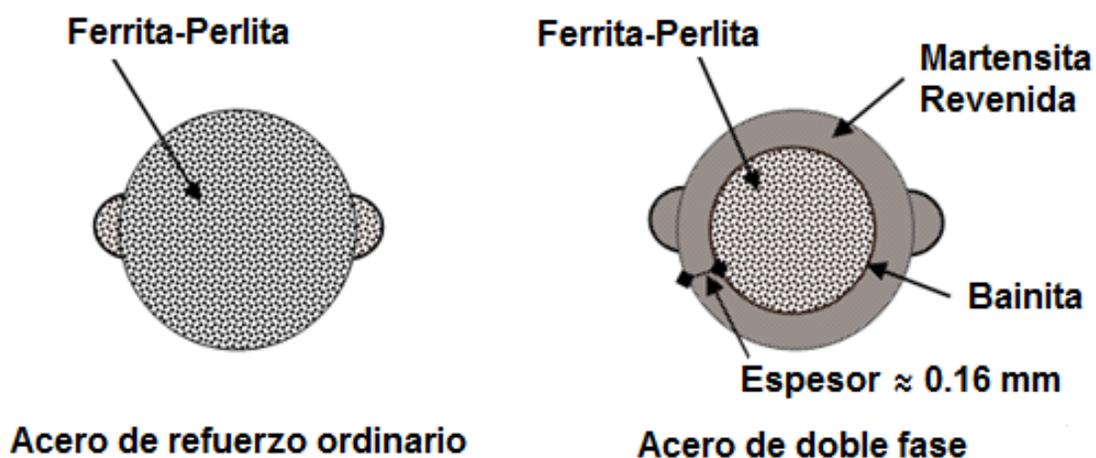


Fig. 6. Esquema ilustrativo de la diferencia microestructural de las varillas de acero ordinario y de acero con tratamiento térmico (doble fase).

En la Tabla 1, se muestran algunos de los métodos de protección y prevención contra el desarrollo de la corrosión de las varillas acero embebidas en concreto.

Tabla 1. Métodos de prevención y protección contra la corrosión del concreto reforzado.

Modificación de las propiedades del concreto	Modificación superficial de la varilla de acero usada como refuerzo	Métodos alternos de protección externa
<ul style="list-style-type: none"> • Materiales cementantes suplementarios (ceniza volante, escorias granuladas, humo de sílice, puzolanas naturales). • Empleo de aditivos (incluidos de aire, reductores de agua, etc.) • Inhibidores de corrosión agregados a la mezcla de concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Recubrimientos superficiales (epóxicos, inhibidores, etc.) • Varillas galvanizadas • Varillas de acero inoxidable • Varillas de acero con recubrimiento metal-polímero 	<ul style="list-style-type: none"> • Protección catódica • Extracción electroquímica de cloruros • Realcalinización electroquímica del concreto • Recubrimientos superficiales sobre el concreto

Estos métodos se han desarrollado para proteger al concreto reforzado de la corrosión, con la consigna de que es mejor prevenir este tipo de patología que realizar reparaciones que normalmente llevan a costos muy elevados. Estos métodos dan lugar a una serie de normas, técnicas de evaluación, procedimientos de inspección, métodos de prueba, etc., desarrollados por diversos organismos (ACI, ASTM, NACE, CYTED, RILEM) y que han sido reportados en diversos medios de publicación (ASTM-STP-1276, 2014; NACE Standard SP0308, 2008; ACI-222R, 2010). Los criterios de valoración contenidos en las normas, están basados principalmente en una varilla ordinaria de acero. Sin embargo, como ya se ha mencionado esta varilla ha sufrido una serie de modificaciones en sus propiedades superficiales, creando incertidumbre sobre el diagnóstico del deterioro por corrosión.

1.3 EVOLUCIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.

La corrosión de la varilla de acero de refuerzo embebido en concreto obedece a un proceso electroquímico. Para que la corrosión ocurra se requiere la presencia de zonas anódicas, catódicas y un electrolito para formar una celda de corrosión. En esta se da un proceso de óxido-reducción; la zona anódica corresponde al proceso de oxidación, donde hay una pérdida de electrones; a su vez la reacción catódica corresponde al proceso de reducción, donde los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones del electrolito, y se produce una ganancia de electrones.

En el caso del acero, la reacción anódica que tiene lugar es:



Consecuentemente, se debe de dar lugar a una reacción catódica para iniciar y mantener la corrosión metálica. Un ejemplo de reacción catódica es la reducción de protones.



La reacción de corrosión total será la suma de ambas reacciones.



tanto la reacción anódica como catódica dan lugar a corrientes llamadas anódica y catódica respectivamente y la corriente total suma de ambos procesos es proporcional a la velocidad de corrosión. Un esquema del proceso sería que se muestra en la figura 7.

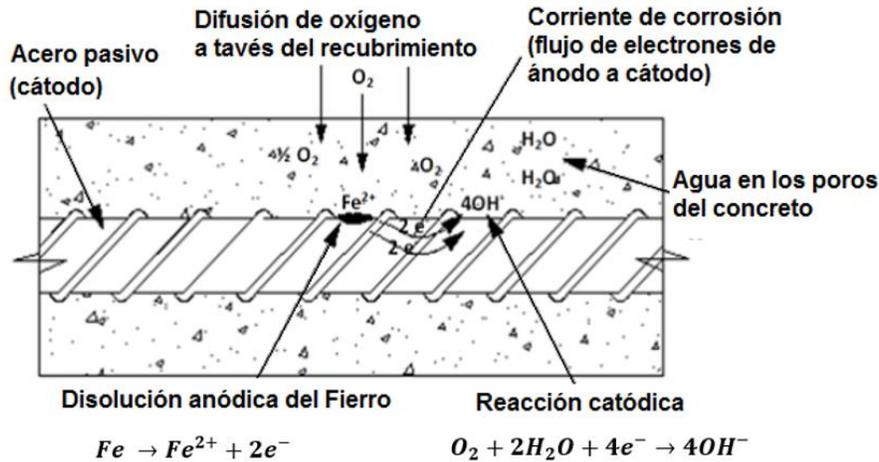


Fig. 7. Esquema del mecanismo de corrosión de la varilla de acero (Villeda, 2011).

En el concreto reforzado, la conexión metálica para el flujo de electrones del ánodo al cátodo se da en el mismo acero estructural, mientras que el concreto toma la función de electrolito, el cual debe estar suficientemente húmedo para permitir la migración de iones, además es indispensable suficiente oxígeno para que se lleve a cabo el proceso catódico.

Los iones hidroxilo presentes en la reacción catódica reaccionan con Fe^{2+} y producen hidróxido ferroso, el cual a su vez reacciona con el oxígeno y el agua presente en el concreto produciendo hidróxido férrico; el último componente corresponde al óxido de hierro hidratado.



Estos productos férricos contribuyen al deterioro del concreto. El hidróxido férrico incrementa el volumen de la varilla de acero embebida y, por tanto, genera esfuerzos de tensión que producen agrietamientos en el concreto (véase figura 8). Cuando se produce el óxido férrico hidratado su volumen aumenta aún más, hasta

6.5 veces del volumen original. En esta etapa el concreto se agrieta hasta que hay delaminación y deja expuesta la varilla de acero de refuerzo.

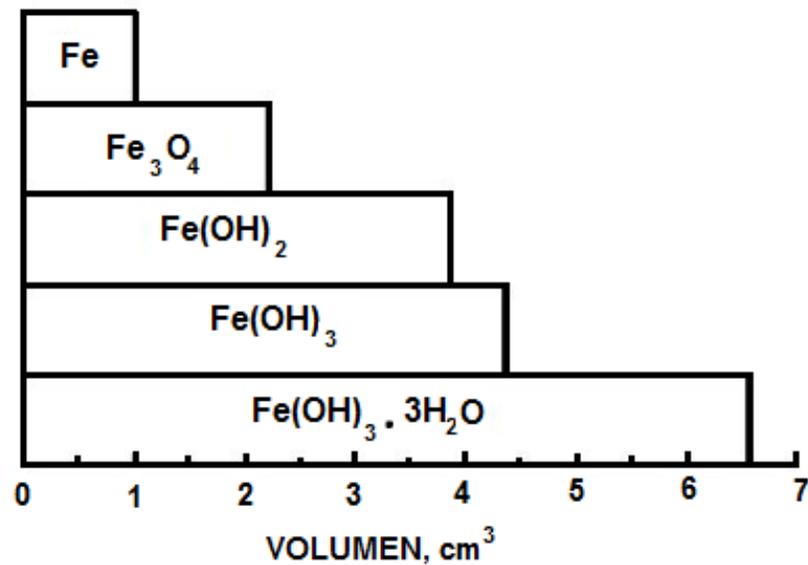


Fig. 8. Relación entre el volumen de los productos de corrosión y el metal destruido (<http://civilgeeks.com/2011/11/02/evaluacion-de-la-corrosion-en-las-estructuras-de-concreto-armado-i/>).

Tras el proceso de degradación por efecto de la corrosión la varilla comienza a disminuir la sección transversal. En el caso de las varillas que han sido recubiertas superficialmente, la disolución de ésta capa tendrá como resultado diferentes comportamientos electroquímicos. Las varillas ordinarias de acero ya han sido ampliamente estudiadas desde esta perspectiva (Pu et al., 2011), tal y como se muestra en la figura 9, donde se presenta un determinado porcentaje de pérdida de sección con respecto a un determinado valor de densidad de corriente de corrosión.

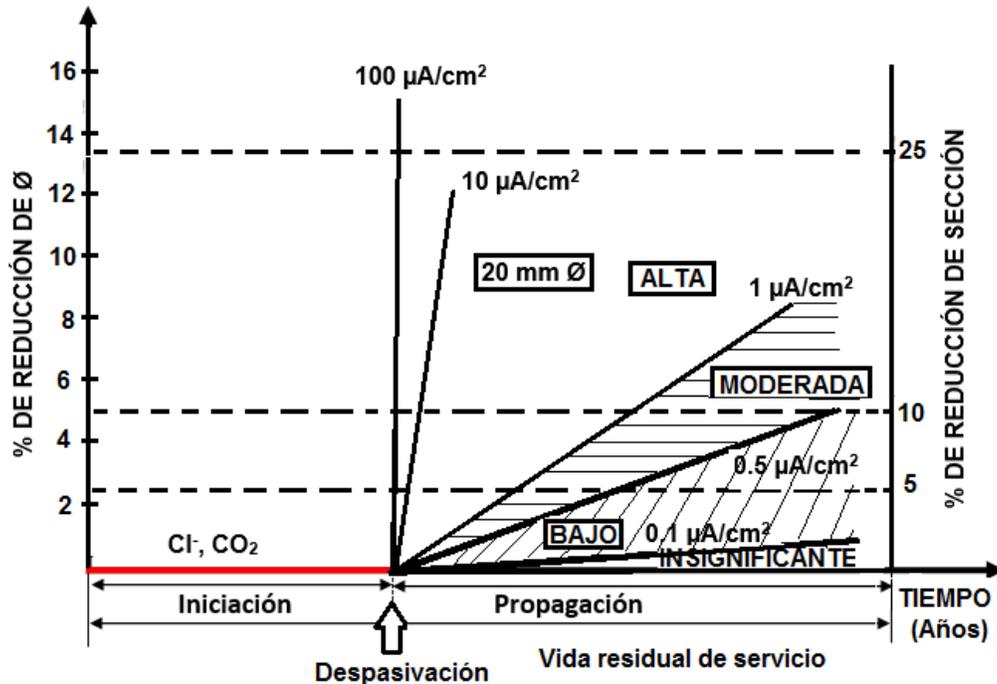


Fig. 9. Disminución de la sección transversal (diámetro/varilla) en función del tiempo y de los valores de i_{corr} . Para los niveles de corrosión se establecen: insignificante, baja, moderada y alta (Andrade & Alonso, 1996).

Con estos conocimientos, toma mayor fuerza el enfoque preventivo. Entendiéndose éste como el resultado de una serie de medidas adicionales encaminadas a modificar ciertas características de los materiales con que se construye. En ese sentido se ha llevado a la varilla de refuerzo a una evolución en sus propiedades superficiales, buscando siempre la mitigación de dicho deterioro.

Estas modificaciones se logran normalmente con recubrimientos metálicos o poliméricos, o en determinado caso ambos (es decir, una doble protección), algunos ejemplos incluyen recubrimientos orgánicos tales como pinturas o inorgánicos como polvos de fusión unida. Otros, son recubrimientos de metal activo sobre la superficie de la varilla, tales como zinc, cadmio y aluminio, que no sólo proporcionan protección de barrera simple, sino también la protección catódica adicional que actúa como un ánodo de sacrificio en el caso de que la varilla subyacente está expuesta. De todos los sistemas de recubrimiento disponibles, los dos más

comunes son la galvanización por inmersión en caliente y la aplicación de capas de pintura epóxica mediante unión por fusión.

Como principio general, el recubrimiento sobre de la varilla de acero se elige como un sistema de protección contra la corrosión y no debe ser a expensas de la utilización de un concreto de mejor calidad y apropiado para la aplicación prevista. Si se es comparada una varilla con algún tipo de recubrimiento contra una varilla de acero de refuerzo ordinario, se verán reflejadas una serie de ventajas, tales como:

- Un incremento de tiempo para la despasivación de la varilla de acero y un menor riesgo de formación de grietas, manchas de óxido y desprendimiento de concreto.
- Un aumento en la vida útil de la estructura o componente de concreto.
- Una reducción en la frecuencia y magnitud de las reparaciones de las estructuras concreto reforzado.
- Protección contra la corrosión de la varilla de acero antes de ser embebido en el concreto.

En lo que respecta a la varilla de acero recubierta con zinc (varilla de acero galvanizado) los primeros informes datan de 1908, aunque no fue sino hasta la década de 1930 en Estados Unidos donde se dio el primer uso regular (Yeomans, 2004).

Desde este momento, y especialmente en los últimos 25-30 años, ha habido un uso constante en todo el mundo de este tipo de refuerzo en una amplia variedad condiciones y tipos de exposición ambiental. La aceptación del uso de refuerzo galvanizado también se refleja en el número de normas nacionales e internacionales para el uso del zinc como recubrimiento (es decir, galvanizado), y la existencia de diversos códigos y especificaciones relativas al refuerzo galvanizado (Yeomans, 2004).

El uso de la varilla de acero galvanizado como refuerzo en las estructuras para mitigar el deterioro por corrosión era ya algo tangible, sin embargo, aún se busca incrementar más el tiempo de vida útil de este tipo de estructuras. En ese sentido a inicios de los años 50 el experto holandés J.F.H. Van Eijnsbergen adoptó el sistema dúplex; el término describe la protección de la varilla ordinaria de acero por un revestimiento de zinc que a su vez está recubierto por un revestimiento no metálico (generalmente una resina epóxica). El propósito, conferir una resistencia adicional contra la corrosión cuando se requiera, o cuando se necesite conseguir un aspecto atractivo (Eijnsbergen, 1994).

Cuando las pinturas se aplican sobre recubrimientos galvanizados, aunque la humedad penetre igualmente a través de los poros y microgrietas de la pintura, ésta dará lugar a la formación de productos de corrosión de zinc compactos y adherentes que rellenan las grietas, prolongando la duración de la película de pintura. Este comportamiento trae como consecuencia que los sistemas Duplex presenten un tiempo de vida útil mayor que el obtenido en cada sistema por separado.

Si bien, actualmente no se ha logrado eliminar por completo el proceso de corrosión de la varilla de acero, es claro que, con la mejora superficial de las varillas, se han logrado avances reflejados en el incremento de la vida útil de las estructuras concebidas con concreto reforzado.

1.4 TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

1.4.1 Técnicas Semi-destructivas

Son una serie de ensayos cuya finalidad es evaluar el estado de los materiales, sin afectar las propiedades y funcionalidad de los materiales examinados. La evaluación proporciona la información actualizada de la situación en que se encuentra un componente en determinado momento.

1.4.1.1 Potencial de Corrosión (E_{corr})

La medición del potencial de corrosión es una técnica práctica y ampliamente empleada para identificar la presencia de corrosión en las estructuras de concreto reforzado. El E_{corr} se mide como diferencia de potencial (o voltaje) contra un electrodo de referencia (véase figura 10). Como técnica de detección de corrosión, fue utilizada por primera vez por Richard Stratful (Stratfull, 1957). El valor numérico de la diferencia de potencial medida entre la varilla de acero embebida en concreto y el electrodo de referencia dependerá del tipo de electrodo de referencia utilizado y el grado de corrosión de la varilla en el concreto.

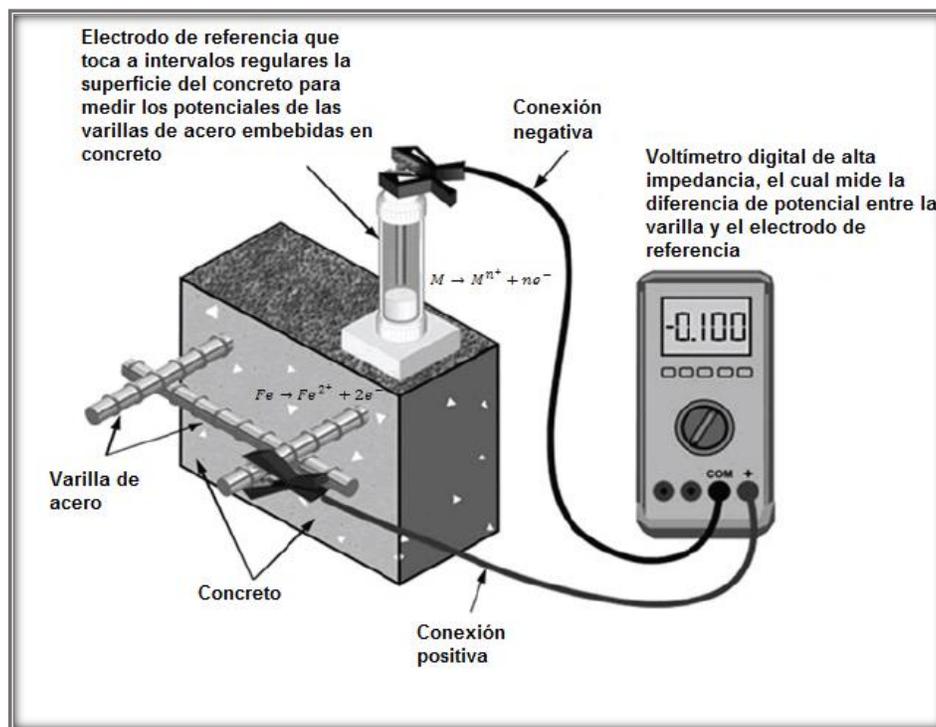


Fig. 10. Esquema de medida del potencial de corrosión del refuerzo (ASTM C-876, 2000).

Para medir el potencial de media celda tiene que hacerse una conexión entre la varilla de acero y el electrodo de referencia, como se muestra en la figura 10. La varilla se conecta a la terminal positiva del voltímetro de alta impedancia, y el electrodo de referencia se conecta a la terminal negativa. En este dispositivo de media celda las

lecturas de potencial generalmente serán negativas. La ocurrencia de potenciales positivos es posible en una varilla de refuerzo pasivo en concreto seco.

Es necesario indicar siempre el tipo de electrodo de referencia que se utiliza para las mediciones de potencial de media celda. La Tabla 2 presenta los electrodos de referencia utilizados en la práctica, con su potencial constante y reproducible, definida frente al electrodo estándar de hidrógeno (SHE) (ASTM C-876, 2009).

Tabla 2. Electrodo de media celda utilizados en la práctica (Nygaard, 2008).

Electrodo de media celda	Potencial (mV/SHE)	Dependiendo de la temperatura (mV/°C)
Cobre/Sulfato de Cobre Sat. (CSE)	+0.318	0.90
Calomel Saturado (Hg/Hg ₂ Cl ₂) KCl (SCE)	+0.241	0.22
Plata/Cloruro de Plata (Ag/AgCl) KCl Sat. (SSCE)	+0.199	0.09

Para el trabajo a nivel de campo, el electrodo de CSE es el más común y es suficientemente preciso, a pesar de los errores que pudiesen surgir debido a la contaminación de la superficie de concreto con el sulfato de Cobre. Los electrodos SCE y SSCE se utilizan más en trabajos de laboratorio.

La Tabla 3, muestra la probabilidad de corrosión de la varilla de acero embebida en concreto, el grado de corrosión se establece en base al valor de potencial que se obtiene comparado con un determinado electrodo de referencia. Las normas de la ASTM (ASTM C-876, 2000) y las recomendaciones RILEM (RILEM TC-154-EMC, 2000) establecen la metodología para la medición del potencial de corrosión y parámetros de la probabilidad de corrosión.

Tabla 3. Condición de la corrosión del acero de refuerzo, relacionado con el valor de potencial de corrosión (ASTM C-876, 2000).

Potencial de media celda		Grado de corrosión
(mV vs. SCE)	(mV vs. CSE)	
< -426	< -500	Corrosión severa
< -275	< -350	Alta (< 90% de probabilidad)
-125 a -275	-350 a -200	Zona incierta
> -125	> -200	Baja (> 90% de probabilidad)

1.4.1.2 Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Es una de las más usadas para medir velocidad de corrosión. Se basa en la medición de la resistencia aparente de un electrodo de trabajo que se polariza anódica o catódicamente a valores de sobrepotencial no mayores de 10-20 mV. Se determina midiendo la velocidad de corrosión instantánea. Debe realizarse en medios electrolíticamente conductores.

El método de RPL puede ser derivado de la teoría del potencial mixto, la ecuación desarrollada por Stern y Geary (Mansfeld, 1976):

$$i_{corr} = B / R_p \quad (7)$$

Esta ecuación recuerda la Ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre los dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia.

Para el sistema de varillas de acero al carbono embebido el valor de la constante B de Stern-Geary se toma de 52 mV para la consideración de la varilla en estado pasivo y de 26 mV cuando ésta se presenta en estado activo. Éstos valores son ampliamente aceptados y utilizados (Otieno et al., 2016; Poursaee, 2010), en el caso de la varilla galvanizada (AG) estos valores pueden variar dependiendo de las

diferentes características del galvanizado, algunos valores reportados por Tan (Tan & Hansson, 2008) son de 20 mV considerando un estado pasivo y 39 mV para el estado activo sin embargo una vez que el E_{corr} medido es representativo del núcleo correspondiente a la varilla de acero ordinario, se toma el valor de B del AC en estado activo (Macias & Andrade, 1986)

La red de investigación DURAR propone una serie de valores de velocidad de corrosión obtenidos para el acero de refuerzo embebido en el concreto a partir de la técnica de resistencia a la polarización (véase Tabla 4).

Tabla 4. Grado de corrosión de acuerdo con la corriente calculada con la RPL.

Corriente de corrosión	Estado del refuerzo
$< 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Estado pasivo
$< 0.1 - 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	De bajo a moderado grado de corrosión
$< 0.5 - 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	De moderado a alto grado de corrosión
$> 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	Alta velocidad de corrosión

1.4.1.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)

La técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (AC) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente. El método permite la caracterización de un sistema electroquímico de una manera no destructiva, tanto de la difusión de especies agresivas dentro de los materiales base cemento, como la cinética de las reacciones electroquímicas que se producen en la superficie de la varilla de acero.

La técnica EIE se basa en una respuesta transitoria de un circuito equivalente para una interfaz electrodo/solución. La respuesta puede ser analizada por funciones debido a la aplicación pequeñas amplitudes de potencial de excitación ΔE a diferentes señales o tasas de barrido. A su vez la excitación de potencial produce

una corriente respuesta ΔI y viceversa. Así, una pequeña perturbación senoidal de amplitud pequeña (20-50 mV) se emplea en un sistema de corrosión modelándose con un circuito equivalente para determinar el mecanismo de corrosión y la resistencia a la polarización (Feliu et al., 1998).

La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En un circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la Ley de Ohm.

$$E=I \cdot R \quad (8)$$

En donde E es en Volts, I en Amperes y R en Ohms. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente:

$$E=I \cdot Z \quad (9)$$

Z representa la impedancia del circuito, con unidades de Ohm. Es necesario hacer notar que, a diferencia de la resistencia, la impedancia del circuito de CA depende la frecuencia de la señal que se aplica. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de Hertz (Hz) o número de ciclos por segundo (s^{-1}).

Los intervalos de frecuencias utilizados van desde 0.1 mHz hasta 10 kHz, encontrándose que de 10 kHz a 100 Hz son las frecuencias en las cuales es posible caracterizar a la interface varilla-concreto.

Con los espectros registrados durante los ensayos de la técnica EIS es posible obtener información específica del sistema electroquímico.

A partir del diagrama de Nyquist, el cual es una relación entre Z' y Z'' en un plano complejo (Véase figura 11), la resistencia de la solución (R_s) se puede obtener a partir del límite de altas frecuencias en Z' , la suma de la resistencia a la solución y la resistencia a la polarización (R_p) es igual al límite de bajas frecuencias de Z' y la capacitancia (C_d) puede ser calculada conociendo la frecuencia en la parte superior del semicírculo y la R_p .

El cálculo de la capacitancia implica la inspección de los datos debido a que la información no está incluida en el diagrama de Nyquist. La frecuencia en la parte superior del semicírculo no es fácil de estimar, sin embargo, se puede obtener directamente desde el diagrama Z'' frente a la frecuencia de Bode.

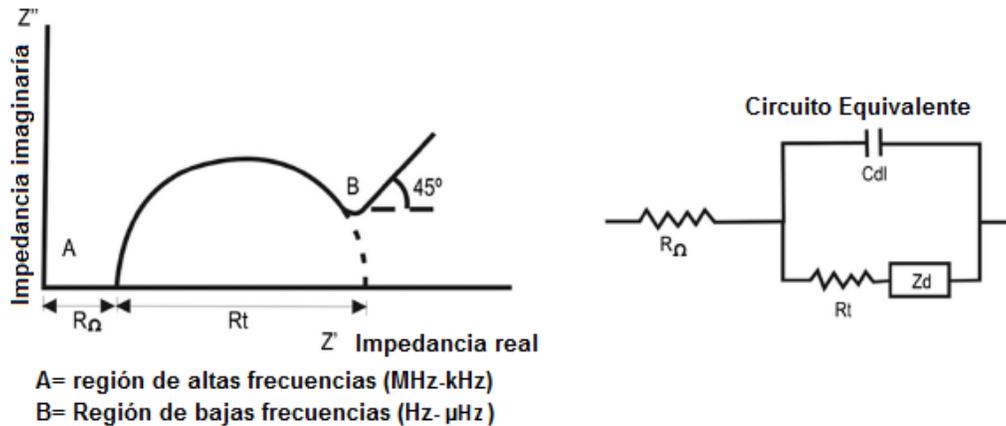


Fig. 11. Diagrama típico de Nyquist y su circuito equivalente (Ribeiro et al., 2013).

Para analizar la variación de la impedancia con la frecuencia en un sistema electroquímico es de gran utilidad recurrir al concepto de circuito equivalente.

El análisis de los resultados de EIE se realiza mediante un ajuste de los datos experimentales a un circuito eléctrico equivalente, se obtienen valores de diferentes parámetros eléctricos. Así es como la resistividad eléctrica del concreto se vuelve una propiedad física muy importante. Debido a que el concreto es un material semiconductor cuya resistividad puede modificarse en función de sus variables, los espectros obtenidos por EIE se pueden asociar con los cambios microestructurales en la matriz cementante, donde el valor de resistencia puede correlacionarse con los poros permeables, así como el valor de resistividad del concreto (Andrade et al., 2010). En términos muy generales, a mayor resistividad menor será la porosidad, por lo que el riesgo del ingreso de agentes agresivos a la interface varilla-concreto también será menor. De esta manera es como los valores son utilizados para obtener información, tanto de velocidades de corrosión como de mecanismos de corrosión.

Por otro lado, un circuito eléctrico equivalente es una aproximación a elementos eléctricos de los componentes de la interface, como se muestra en la figura 12. El valor de R_s representa la resistencia del electrolito; R_{ct} es la resistencia a la transferencia de carga; y C_{dl} es la doble capa compacta en los límites de las fases. La corriente circulará por los elementos que presenten menor resistencia, por tanto, origina menor caída de potencial. Si la corriente circula por R_{ct} , se dice que es un sistema resistivo; por ello la interface estará activa; es decir, su resistencia a la transferencia de carga será pequeña, permitiendo el paso de corriente. Cuando R_{ct} adquiere valores elevados, la corriente circulará por el capacitor, dando origen a la llamada corriente capacitiva, en la cual se tiene acumulación de carga en ambos lados del capacitor, pero no existe una transferencia de carga en la interface.

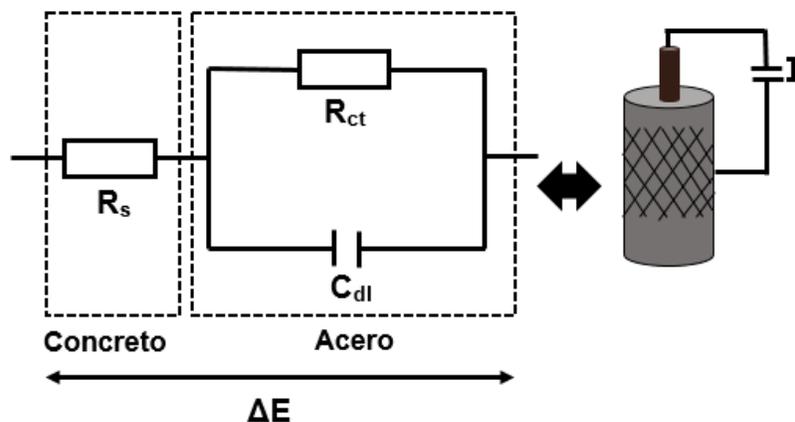


Fig. 12. Circuito eléctrico equivalente de Randles.

En este caso se habla de una interface pasiva, en consecuencia, de baja velocidad de corrosión. En el caso de concreto, la resistividad (R_s) es considerable, en ocasiones del orden de $k\Omega\text{-cm}$; por tanto, puede interferir en la respuesta de la interface varilla-concreto y proporcionar una lectura incorrecta. Es por esto que la medición de R_{ct} debe hacerse con compensación óhmica, que estime la resistencia eléctrica del concreto (R_s), y permita un cálculo de la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) más preciso.

Cuando se aplica un voltaje, la señal circula a través de la resistencia del electrolito (R_s) y del capacitor C_{dl} , y se registra la R_{ct} . El ángulo de fase toma valores cercanos a cero e indica que la Z (impedancia) medida que corresponde a una resistencia. Al disminuir la frecuencia, el capacitor tarda más en permitir el flujo de corriente, y tendrá una caída de potencial. Si esa caída de potencial es menor que la R_{ct} (resistencia a la transferencia de carga), la corriente circulará por el capacitor iniciándose un decremento en el ángulo de fase. Al continuar disminuyendo la frecuencia, la pérdida de potencial será mayor en el capacitor y llegará el momento en que compita con la R_{ct} . A estos valores de frecuencia, el ángulo de fase alcanza un máximo y toma valores menos negativos.

IR Compensación

Un problema común en los experimentos con concreto reforzado es el efecto de la resistencia del electrolito (conocido como efecto iR_u o efecto de la caída óhmica, donde i es corriente y R_u resistencia no compensada) en las mediciones electroquímicas, modifica la corriente de respuesta de las reacciones que ocurren sobre la superficie del electrodo de trabajo y genera variaciones aleatorias en el potencial redox formal (E°) obtenido para una determinada molécula. Este efecto es significativo para sistemas que presentan baja solubilidad de electrolitos como el concreto; sin embargo, puede ser compensado experimentalmente con el uso de la técnica denominada Compensación IR o IR Positive Feedback.

La Compensación IR consiste en la adición de una señal en el voltaje de entrada del potencióstato con la misma magnitud que la caída iR_u . Es decir que, en los experimentos, el potencióstato mide la corriente generada durante la aplicación de pulsos de potencial y hace correcciones eléctricas que equivalen a la caída de voltaje en el espacio entre los electrodos de trabajo y de referencia (caída que es inherente al medio resistivo), logrando con esto mantener un potencial fijo en la interface entre los electrodos. El resultado es una disminución de la variabilidad de las mediciones.

1.4.1.4 Curvas de Tafel

La observación y el establecimiento de la relación existente entre la corriente y el potencial del electrodo fueron deducidas de manera teórica por Tafel en 1905, la reacción de reducción del protón, y la ecuación de polarización de un electrodo.

Para determinar experimentalmente los parámetros cinéticos j_0 , β_a y β_c , es recomendable una representación gráfica en la que la densidad de corriente esté en una escala logarítmica, ya que así se pone en evidencia la relación lineal existente entre el $\log j$ y el sobre potencial, η , especialmente cuando este último, en valor absoluto, tiene un valor grande.

Se denomina región o dominio de Tafel anódico (zona Tafeliana), aquella región en la cual el potencial que corresponde a $\eta/\beta_a \gg 1$. La ecuación se convierte en

$$j = j_a = j_0 \exp(\eta/\beta_a) \quad (10)$$

Tomando logaritmos se obtiene:

$$\eta = -\beta_a \ln j_0 + \beta_a \ln j \quad (11)$$

Pasando a logaritmos de base diez y definiendo las *constantes de Tafel anódicas*, a_a y b_a se obtiene la ecuación de Tafel de una reacción anódica, también llamada *recta de Tafel anódica*:

$$\eta = a_a + b_a \log j \quad (12)$$

$$a_a = -2.303 \beta_a \ln j_0 \quad (13)$$

$$b_a = -2.303 \beta_a \quad (14)$$

De manera análoga, para el *dominio catódico de Tafel*, $\eta/\beta_c \ll 1$:

$$j = j_c = -j_0 \log j \exp(-\eta/\beta_c) \quad (15)$$

$$\eta = \beta_c \ln j_0 - \beta_c \ln |j| \quad (16)$$

Lo cual permite expresar las *constantes de Tafel catódica*, a_c y b_c de la ecuación de Tafel de una reacción catódica:

$$\eta = a_c + b_c \log j \quad (17)$$

$$a_a = -2.303 \beta_c \ln j_0 \quad (18)$$

$$b_a = -2.303 \beta_c \quad b_a = -2.303 \beta_c \quad (19)$$

Cuando se obtiene una curva de polarización experimental, la extrapolación de la recta que aparece en el dominio Tafeliano al valor del potencial de equilibrio, permite determinar la densidad de corriente de intercambio, j_0 (véase figura 13). El inverso del valor de la pendiente de estas rectas proporciona el valor de los coeficientes de Tafel, β_a y β_c (Meas et al, 2002).

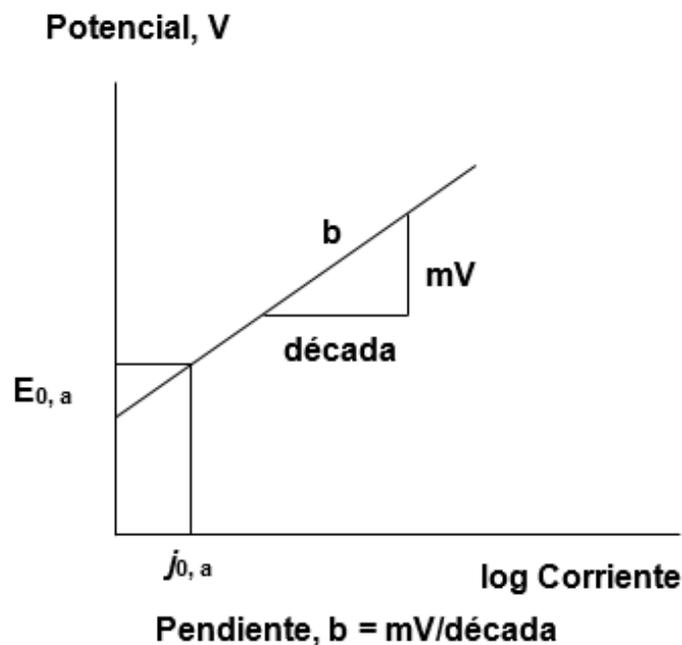


Fig. 13. Esquema de una reacción anódica en un diagrama de Tafel, $E_{0,a}$: potencial de equilibrio, $j_{0,a}$: densidad de corriente intercambio, b : pendiente de Tafel = 2.303β (Meas et al, 2002).

Tomando ciertos parámetros de las distintas técnicas es posible realizar modelos de corriente de corrosión, los cuales pueden simular el proceso de corrosión de las varillas de acero de refuerzo embebidas en elementos estructurales.

CAPÍTULO II.

ANTECEDENTES



Como ya se ha mencionado la modificación superficial de las varillas de acero de refuerzo, es uno de los frentes que han sido desarrollados para mitigar la corrosión. Éstas modificaciones van aplicadas tanto a sus propiedades físicas, químicas, como mecánicas, dando como resultado entre otros productos la varilla de acero de doble fase: varilla de acero con tratamiento térmico (ATT), varilla de acero galvanizado por inmersión en caliente (AG), varilla de acero dúplex o varilla de acero dual (AD), entre otros.

A continuación, se describen algunas características e investigaciones realizadas en base a la evolución de las varillas de acero de refuerzo, con énfasis en aquellos evaluados en la presente investigación: AC, ATT, AG y AD.

2.1 VARILLA ORDINARIA DE ACERO (AC)

Es una aleación de Hierro y Carbono principalmente, cuando este último no sobrepasa el 1.5% o poco más, además de que incluye otras impurezas en pequeñas cantidades como Mn, Si, P y S. Cuando estos cuatro elementos se hallan presentes en sus porcentajes normales, el producto se conoce como acero al carbono (véase figura 14). La resistencia mecánica de estos aceros está en función principalmente del contenido de sus aleantes y su templabilidad.

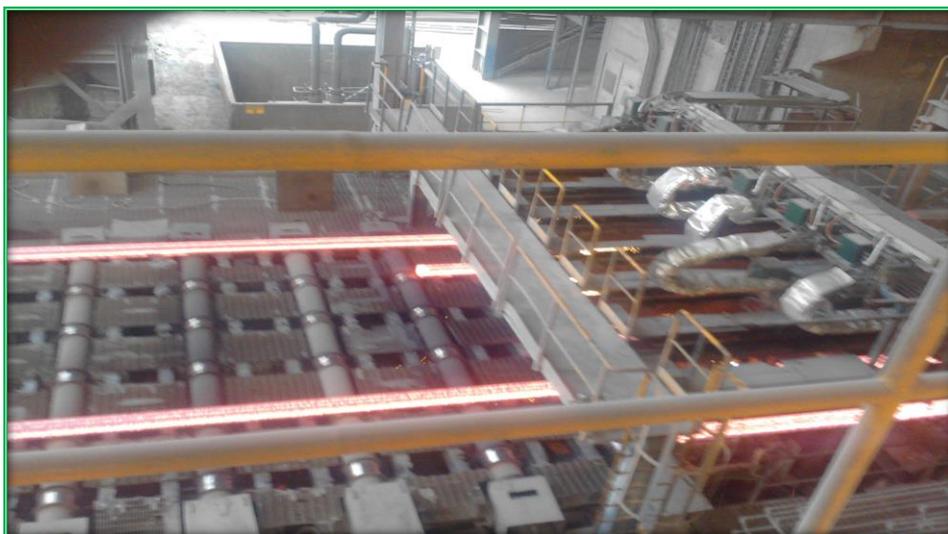


Fig. 14. Lingotes para la fabricación de varillas de AC.

Adicionalmente, las propiedades de las varillas ordinarias de acero tienen una fuerte dependencia de la microestructura que presentan en su interior y ésta se desarrolla desde el inicio de la solidificación.

Al realizar operaciones de calentamiento y diferentes velocidades de enfriamiento sobre el acero, se puede modificar la microestructura. Así, si se calienta el acero a temperaturas de austenización, se obtiene 100% austenita, y dependiendo de la velocidad de enfriamiento, la austenita puede transformarse en diferentes tipos de microestructuras, tales como: ferrita, perlita (ferrita + cementita), bainita y martensita o más comúnmente combinaciones de estas. Cada microestructura presenta variaciones y propiedades únicas, las cuales repercutirán directamente en el comportamiento mecánico del producto final (por ejemplo, varillas de acero) (William & Callister, 1995).

En el caso del acero estructural, las varillas utilizadas como refuerzo del concreto deben cumplir ciertas propiedades y requisitos para que sean consideradas como tal, en el caso de México la norma que rige estas especificaciones es la NMX-C 407 (407-ONNCCE, 2001).

Por otro lado, desde su descubrimiento como refuerzo para el concreto, este tipo de acero ha sido el más utilizado. Sin embargo, el mayor reto que presentan las estructuras concebidas con este tipo de varillas es la durabilidad, ya que es muy susceptible a padecer problemas de deterioro por corrosión (Fan et al., 2016).

El tema de la evaluación de la corrosión de la varilla AC ha sido objeto de numerosas investigaciones, las cuales sentaron las bases para proponer teorías e hipótesis que permitieron establecer las fronteras del grado de corrosión de las varillas de acero. Actualmente, esos criterios o valores son parte de normativas y/o reglamentos, los cuales permiten evaluar el grado de corrosión de una estructura, con ayuda de diversos equipos y técnicas.

Es claro el debate desde los diferentes frentes de detección de la corrosión, mientras unos buscan encontrar los valores de contenido crítico de cloruros (Román

et al., 2014; Cheewaket et al., 2012; Polder & Peelen, 2002; Hussain et al., 1995; Alonso et al., 2000), otros más, tratan de reproducir el comportamiento electroquímico de la varilla ordinaria de acero en estructuras en vías de carbonatación (Gandía-Romero et al., 2016; Jones et al., 2000; Nasser et al., 2010; Parrott, 1996). Sin embargo, muchos son los factores que promueven dichas discrepancias en los valores que cada investigador obtiene tras años de investigación, sumándose claramente en la actualidad el factor del cambio climático.

2.2 VARILLA DE ACERO CON TRATAMIENTO TÉRMICO (ATT)

Hoy en día es posible encontrar en el mercado aceros con una microestructura diferente obtenida por medio tratamientos térmicos especiales (véase figura 15). Es el caso de la varilla ATT, la cual consiste principalmente de una matriz suave de ferrita y una capa exterior dura compuesta de martensita. No obstante, es posible encontrar pequeñas cantidades de bainita, perlita y austenita revenida presentes en las fases microestructurales (Nakagawa & Thomas, 1985). Con este procedimiento, la varilla de acero tiene la capacidad de obtener de manera simultánea una buena ductilidad y una alta resistencia mecánica (David et al., 1994); adicionalmente podría disminuir los costos de producción (Simon et al., 1984).

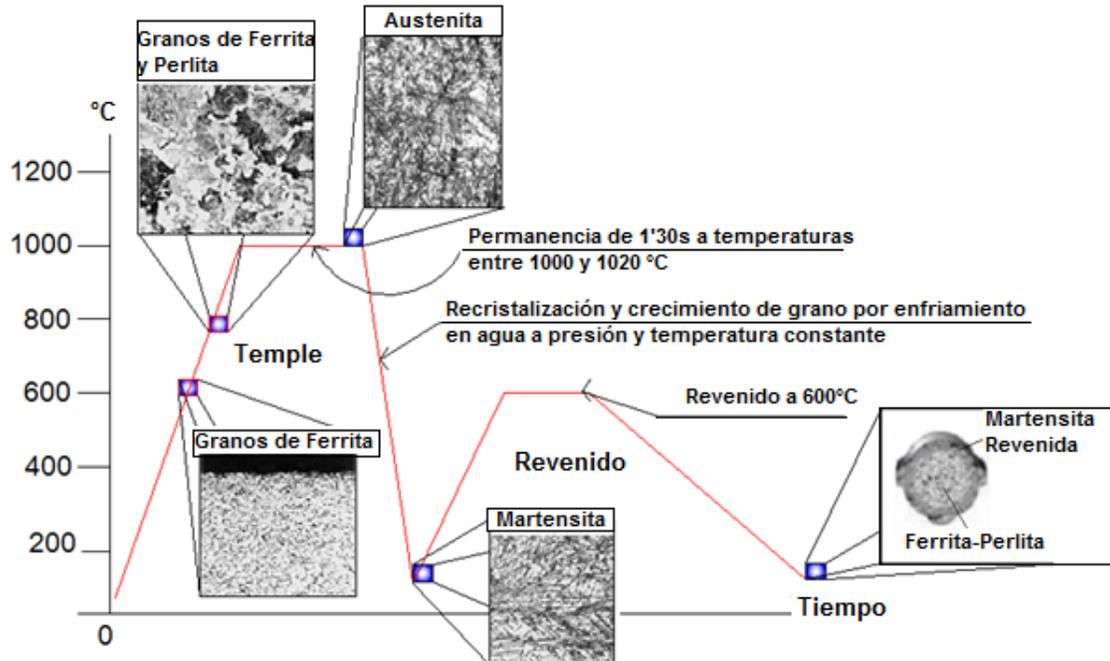


Fig. 15. Esquema que representa las etapas del tratamiento térmico y del temple de la varilla ATT.

El desarrollo de estas varillas de acero se desencadenó a principios de 1970, por el conflicto de la industria automotriz de Estados Unidos para la reducción del peso, y así aumentar el ahorro de combustible cumpliendo con ello las normas ecológicas, esto sin comprometer la resistencia mecánica la cual era necesaria para satisfacer la seguridad recién impuesta (Worldwide, 1981; Ismail et al., 2010).

Son claras las razones para generar varillas de refuerzo que cubran las demandas ya mencionadas, en ese sentido normalmente las investigaciones se inclinan a evaluar el comportamiento mecánico (Xiong et al., 2016; Xu et al., 2016; Li et al., 2016), dejando a un lado la respuesta ante el fenómeno de corrosión. Esto se refleja en la escasa información relacionada con el comportamiento frente a la corrosión de la varilla de ATT utilizado como refuerzo del concreto. Adicionalmente, la información existente presenta resultados contradictorios.

Mientras algunos autores afirman que la velocidad de corrosión de la varilla ATT es mayor comparado con la varilla AC, otros afirman lo contrario. Abriéndose un debate ante la eficacia de este tipo de varilla ante dicho deterioro.

Así, Trejo (Trejo et al., 1994) evaluó electroquímicamente varillas ATT y AC embebidas en concreto y contaminadas con CaCl_2 en el agua de mezcla. Después de 32 semanas de monitoreo, las varillas ATT no presentaron corrosión visible. El resultado final fue que la varilla ATT presentó mejor resistencia a la corrosión comparado con la varilla AC.

Ismail (Ismail et al., 2010), también trabajó con varillas ATT y AC embebidas en concreto. Después de 14 días de curado evaluó electroquímicamente los especímenes fabricados utilizando como electrolito agua de la red doméstica, agua de mar y una solución de NaCl al 3.5 por un período de 100 días. Para el monitoreo aplicó la técnica de polarización galvanostática. Dentro de sus conclusiones encontró que la varilla ATT presentó menor velocidad de corrosión comparado con la varilla AC.

Ellos atribuyen este comportamiento a la ausencia en la superficie de la varilla de “colonias” de perlita (capas de ferrita y carburo) la cual es normal en las varillas AC. Así, la formación de pares galvánicos entre el carburo (cátodo) y la ferrita (ánodo) se eliminan.

Por otro lado, Sarkar (Sarkar et al., 2005) monitoreó electroquímicamente varillas ATT y AC en solución de NaCl al 3.5%, mediante la técnica de polarización galvanostática, obteniendo valores de E_{corr} e i_{corr} . Concluye que la varilla AC presentó una mejor resistencia a la corrosión comparado con la varilla ATT.

Kelestemur (Keleştemur & Yildiz, 2009) evaluó electroquímicamente varillas ATT y AC embebidas en concreto, añadió NaCl al 3.5% en el agua de mezcla. Se registró el potencial de media celda durante 30 días, encontrando una mejor resistencia a la corrosión de la varilla AC comparado con la varilla ATT.

Finalmente, Nadlene (Nadlene et al., 2011) evaluó electroquímicamente varillas ATT y AC en una solución al 5 % de NaCl, obtuvo parámetros como E_{corr} , i_{corr} , entre otros. Concluye que la varilla AC presentó menor velocidad de corrosión comparada con la varilla ATT.

Estos autores concluyen que el incremento en el porcentaje de martensita en la varilla ATT resulta en un incremento en la velocidad de corrosión.

El diagrama de la figura 16 es posible destacar que el mecanismo del daño por corrosión de las varillas de acero embebidas en concreto invariablemente pasa por tres etapas: iniciación, despasivación y propagación (la figura presenta las etapas desproporcionadas en amplitud, con el fin de facilitar la descripción de los trabajos en la etapa de despasivación).

Adicionalmente, es posible observar ubicados en la figura los trabajos citados anteriormente. La mayor parte de estas investigaciones han sido realizadas en las etapas de iniciación y despasivación, siendo escasas las enfocadas durante la etapa de propagación.

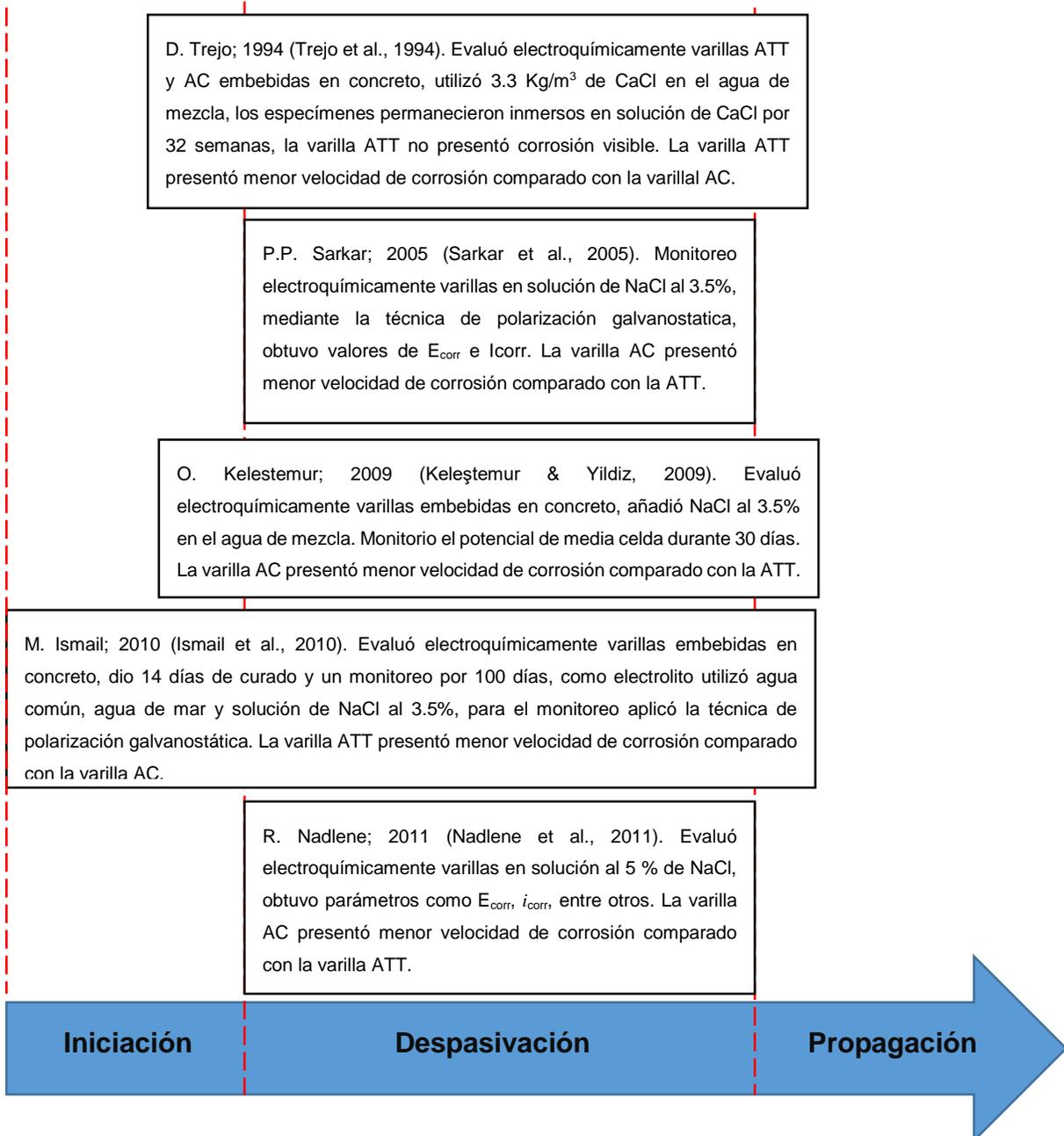


Fig. 16. Trabajos de investigación realizados sobre las varillas ATT y su relación con las etapas generales del proceso de corrosión.

La varilla de ATT presenta una modificación superficial de un espesor determinado que podría considerarse como un recubrimiento. En este sentido, la corrosión de las varillas de refuerzo provocada por cloruros o carbonatación se presenta como una disolución superficial que causa una pérdida del diámetro inicial, por lo que un

seguimiento del comportamiento electroquímico de estas varillas en estas condiciones aportará información que contribuya a la solución de las controversias mencionadas.

Por otra parte, se encuentran escasos estudios sobre este tipo de varillas frente a un mecanismo de carbonatación, siendo que el problema de la emisión de CO₂ en las grandes ciudades se mantiene presente y va en aumento, por lo que resulta necesario conocer los efectos ante esta patología.

2.3 VARILLA DE ACERO GALVANIZADO (AG)

Como ya se mencionó la aceptación de este tipo de varilla de acero ha sido ampliamente aceptada en todo el mundo, gracias a su estabilidad electroquímica en una amplia variedad de condiciones agresivas.

El zinc puede ser aplicado a la superficie de la varilla ordinaria de acero en una variedad de maneras, pero para varillas de acero de uso estructural (generalmente de espesor >5 mm) el método preferido y más ampliamente utilizado es por inmersión en caliente. Esto implica la inmersión de las varillas en un baño de zinc fundido a aproximadamente 470°C (Alvarenga & Cunha Lins, 2016), durante esto se produce una reacción metalúrgica entre la varilla de acero y el zinc, creándose un recubrimiento sobre la varilla de acero base compuesta de una serie de capas de aleación de hierro-zinc (gamma, delta y zeta) que crecen de la interfaz acero/zinc con una capa de zinc esencialmente puro (eta) a la superficie exterior (Delaunois et al., 2014). La estructura de revestimiento típico galvanizado se muestra en la figura 17.

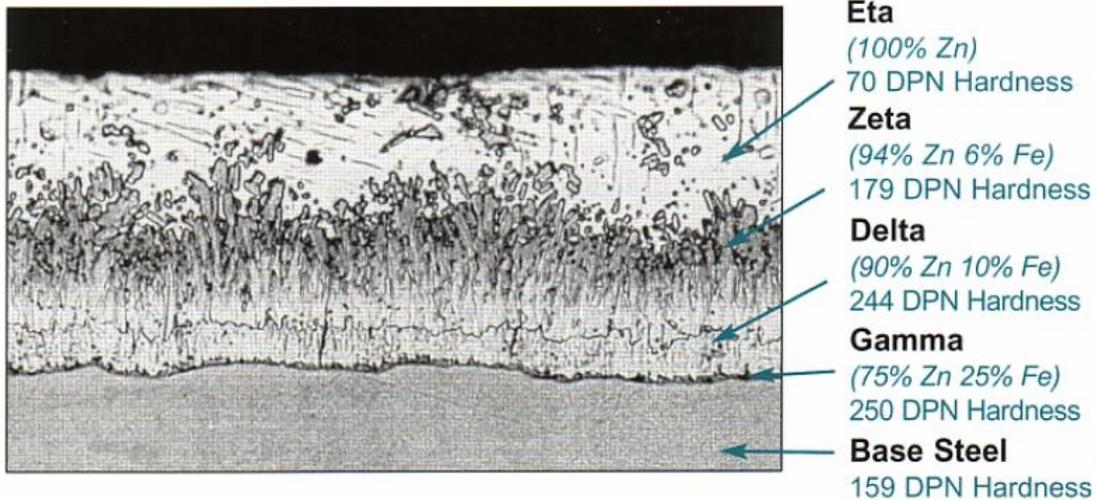


Fig. 17. Microfotografía del recubrimiento de galvanizado en caliente donde se muestra el detalle de las capas de aleación y su dureza (Yeomans, 2004).

Lo que distingue a la galvanización de otros tipos de recubrimientos es que el zinc está unido metalúrgicamente a la varilla ordinaria de acero. Dicha unión constituye una barrera impermeable que protege al acero del efecto del medio ambiente. Además, el galvanizado en caliente es el único proceso que brinda protección catódica del acero.

La protección de barrera se da debido a que en la superficie de zinc se forma una capa fina de óxidos de zinc, esto se debe a que el CO_2 de la atmósfera reacciona con el zinc dando como resultado ZnCO_3 , el cual tiene la característica de ser insoluble al agua y evita la formación de otros productos de corrosión (Zhu et al., 2000; Farina & Duffó, 2007).

La protección catódica que se proporciona al acero es debido a que el zinc es más anódico que el acero en diferentes medios. Esta protección se puede apreciar fácilmente si se llegara a fracturar la capa de zinc dejando expuesto al acero base con lo cual el zinc actuaría como ánodo de sacrificio (Padilla & Alfantazi, 2014; Belaïd et al., 2000).

Por otro lado, como bien se sabe bajo condiciones altamente alcalinas del concreto una capa microscópica de óxido se forma en la superficie de la varilla de acero de refuerzo ordinario, la denominada película pasiva. Esta película pasiva impide la disolución del hierro y de este modo la corrosión de la varilla de acero es severamente limitada, incluso en presencia de la humedad. En el caso de la varilla galvanizada, la situación es diferente puesto que el zinc es un metal anfótero. Esto significa que el zinc es estable sobre una amplia gama de pH, de aproximadamente 6 a 12.5, pero debajo y por encima de estos valores la velocidad de corrosión aumenta exponencialmente como se muestra en la figura 18 (Roventi et al., 2014).

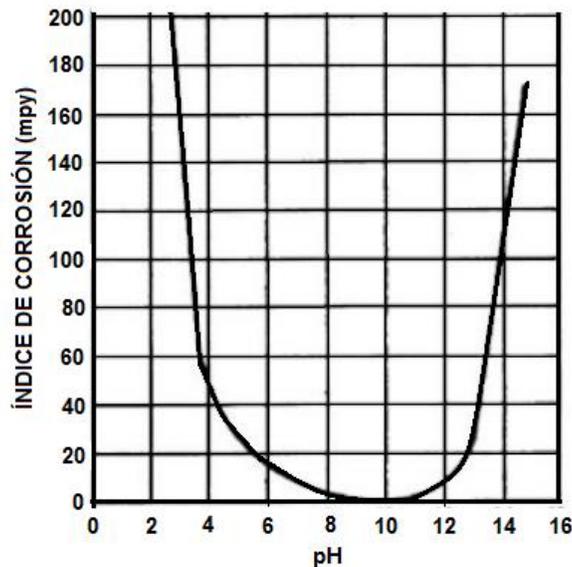


Fig. 18. Velocidad de corrosión del zinc en función del pH del medio (Yeomans 2004).

El comportamiento del zinc tanto en soluciones alcalinas débiles y como fuertes se ha estudiado ampliamente. Algunas conclusiones importantes de este amplio trabajo son las siguientes (Macias & Andrade, 1987):

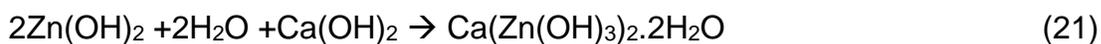
- Debajo de cierto contenido de OH^- , el primer producto anódico es el $\text{Zn}(\text{OH})_2$, mientras que por encima de pH 12.9 el producto principal es el ion zincato soluble ($(\text{ZnO}_2)^{2-}$);

- En un intervalo de pH entre 12 y 13.2 ± 0.1 el recubrimiento galvanizado se corroe a baja velocidad que es aceptable;
- A pH por debajo de 12 tiene lugar la corrosión localizada, mientras que por encima de 13.2 se produce la dislocación total del recubrimiento sin pasivación;
- El umbral para el inicio de la evolución del hidrógeno está en el pH 12.8 ± 0.1 ; y
- El producto de corrosión que causa la pasivación del zinc en soluciones alcalinas ricas en calcio es el hidroxincato de calcio (CaHZn)

Un mecanismo de dos etapas para la formación de CaHZn se ha dado como:



Luego



También se ha observado que el ZnO y el ϵ -Zn(OH)₂ se forman durante el proceso de corrosión.

Al igual que para las varillas de acero de refuerzo ordinario las varillas de acero galvanizado han sido estudiada su degradación por efecto de la corrosión cuando este se encuentra embebido en concreto.

Desde la perspectiva de la carbonatación del concreto es claro que el pH de la fase acuosa cambia desde valores muy alcalinos hasta valores cercanos a la neutralidad (pH ≈ 7). Está claro que a un valor pH cercano al neutro la velocidad de corrosión del zinc es muy bajo, por eso se esperaría que el recubrimiento galvanizado se comporte así.

Investigaciones y observaciones de campo han demostrado que la carbonatación no incrementa significativamente la velocidad de corrosión de las varillas galvanizadas en el concreto y en algunos casos hasta se reduce (Ismail et al., 2012; Farina & Duffó, 2007; Roventi et al., 2014).

Moreno (Moreno et al., 2005) estudió el desempeño de varillas de acero de refuerzo galvanizado expuesto a un ambiente acelerado de carbonatación, comparándolo con el desempeño de una varilla de acero ordinaria. Se encontró que las varillas AG en concreto carbonatado se corroyeron a velocidades menores que las varillas AC, obteniendo velocidades de corrosión en el rango de 0.06 a 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, mientras que las barras de acero convencional presentaron valores de 1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ en promedio.

En cuanto a los cloruros, no existe un acuerdo universal sobre la resistencia de la varilla de acero galvanizado ante el ataque de estos agentes. Sin embargo, lo que parece claro, es que el zinc también es afectado por los cloruros, pero se requieren concentraciones críticas más altas que las demandados por las varillas de acero ordinario (Bellezze et al., 2006).

La resistencia del refuerzo galvanizado contra la penetración del cloruro depende de la compactación de la capa de CaHZn y de la microestructura del recubrimiento restante. Cuando los cloruros llegan al refuerzo, la capa CaHZn ya deberá estar formada.

La corrosión de la varilla de acero galvanizado ciertamente es un proceso muy complejo, el cual implica varios mecanismos físicos y electroquímicos. El proceso generalmente consiste en tres etapas diferentes (Padilla & Alfantazi, 2014; Tan & Hansson, 2008):

El comportamiento electroquímico se relaciona principalmente con la disolución de la capa de óxido de zinc que se formó al aire.

La superficie de la capa de zinc se cubre con un espesor de óxido blanco y el acero subyacente se comienza a corroerse. Durante esta etapa, la velocidad de corrosión del recubrimiento de zinc disminuye rápidamente, acompañado por un cambio de potencial de corrosión hasta un potencial más noble.

La cantidad de óxido rojo en la superficie del recubrimiento aumenta rápidamente, la varilla AG muestra casi el mismo potencial de corrosión de la varilla AC, a pesar de que el recubrimiento de zinc aún cubre unas pocas partes del acero de refuerzo.

Diversas investigaciones han realizado el seguimiento con técnicas electroquímicas que les ha permitido identificar cuando este tipo de acero es activado, a partir de ahí se determinan los umbrales de cloruros.

Bellezze (Bellezze et al., 2006) evaluó diferentes varillas de acero galvanizado comparadas con una barra de zinc puro embebidas en concreto, utilizó dos tipos de cemento con diferente alcalinidad. Sometió especímenes de concreto a ciclos de inmersión-secado en una solución de NaCl al 5% y agua de grifo. Obtuvo resultados de E_{corr} de -1350 mV/SCE en estado activo con altos valores de tasas de corrosión (150-300 $\mu\text{m/año}$) y -600 mV/SCE en el estado pasivo con tasas de corrosión más bajas (20 $\mu\text{m/año}$) esto durante los primeros 28 días. También, obtuvo valores de umbrales de cloruros de 1.36 a 4.02% por peso de cemento. Concluyó que todas las varillas de AG analizadas presentaron tasas de corrosión más altas que la barra de zinc puro, esto debido a la presencia de elementos en la aleación en los recubrimientos del AG. También, que la concentración crítica de cloruros depende de la calidad del recubrimiento de zinc y de la alcalinidad del cemento.

Belaïd (Belaïd et al., 2000) evaluó varillas ordinarios de acero y varillas AG con diferentes espesores de recubrimiento de galvanizado embebidas en concreto y expuestas a ciclos de inmersión-secado en una solución de NaCl al 3.5%. Determinó umbrales de cloruros de 0.4-0.7% por peso de concreto para los especímenes expuestos. Observó agrietamientos en el recubrimiento del concreto de los especímenes, los que tenían varillas con 40 μm de espesor presentaron

manchas de óxido rojo incluso antes de agrietarse, con respecto a las varillas galvanizadas de 50µm de espesor, observó que después del agrietamiento el recubrimiento de zinc no se había consumido completamente, a pesar de fisuración del concreto. Sin embargo, esto puede haber acelerado el proceso de corrosión de la varilla de refuerzo y la disminución de la eficacia de la protección otorgada por la galvanización. No se apreciaron manchas de óxido rojo en ninguna de las varillas con recubrimiento de 50 µm ni 100 µm sobre superficie del concreto después del agrietamiento. Concluyó que es de suma importancia el espesor de recubrimiento de galvanizado, el cual debe de ser diseñado con un espesor mínimo dependiendo del sitio de exposición para garantizar la protección del acero base. Finalmente, afirma que los productos de corrosión del AG dependen del contenido de cloruro en la interface varilla-concreto y el espesor del recubrimiento de galvanizado.

2.4 VARILLA DE ACERO CON RECUBRIMIENTO DUAL (AD)

El utilizar varillas de acero galvanizado como refuerzo en las estructuras para mitigar el deterioro por corrosión era ya algo tangible, sin embargo, aún se busca incrementar más el tiempo de vida útil de este tipo de estructuras. En ese sentido a inicios de los años 50 el experto holandés J.F.H. Van Eijnsbergen adoptó el sistema dúplex; el término describe la protección una varilla de acero ordinaria por un revestimiento de zinc que a su vez está recubierto por un revestimiento no metálico (generalmente resina epóxica a base de bisfenol A y óxido de cromo III [Cr_2O_3]) (véase figura 19). El propósito, conferir una resistencia adicional contra la corrosión cuando se requiera, o cuando se necesite conseguir un aspecto atractivo (Eijnsbergen, 1994).

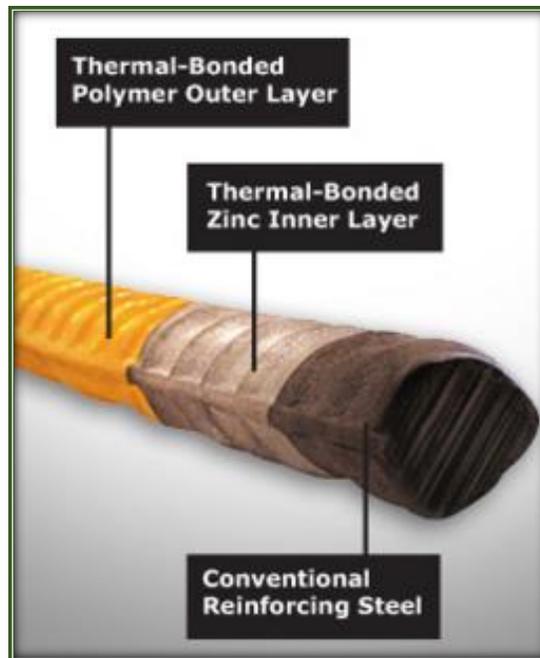


Fig. 19. Varilla de acero dual (recubrimiento metal-polímero)(<http://www.specifyzbar.com/>).

Cuando las pinturas se aplican sobre recubrimientos galvanizados, aunque la humedad penetre igualmente a través de los poros y microgrietas de la pintura, ésta dará lugar a la formación de productos de corrosión de zinc compactos y adherentes que rellenan las grietas, prolongando la duración de la película de pintura. Este comportamiento trae como consecuencia que los sistemas Dúplex presenten un tiempo de vida útil mayor que el obtenido en cada sistema por separado.

Los sistemas dúplex a base de una o varias capas de pintura sobre los recubrimientos galvanizados se utilizan generalmente en los casos en que es necesaria una protección frente a la corrosión muy eficaz. Los ejemplos más frecuentes se encuentran en aplicaciones que requieren protección en el borde costero, la edificación, el mobiliario urbano, infraestructura vial y en las industrias químicas y mineras.

Los recubrimientos de pintura tienen normalmente poros y microgrietas que permiten el paso de la humedad. Si estos recubrimientos están aplicados directamente sobre la superficie del acero, el óxido de hierro que se forma

inicialmente debajo de la capa de pintura tiende a agrandar estas grietas, por ser muy voluminoso (hasta 6,5 veces el volumen inicial) y, por tanto, facilita la penetración de más humedad desde el exterior hasta la superficie del acero, con la consiguiente formación de nuevas cantidades de óxido. De esta manera se producen tensiones expansivas debajo de la película de pintura que llegan a levantarla. Sin embargo, cuando las pinturas se aplican sobre los recubrimientos galvanizados, aunque la humedad penetre igualmente a través de los poros y microgrietas de la película, en este caso se encontrará con el sustrato de zinc, dando lugar a productos de corrosión de este metal, principalmente óxido de zinc (ZnO) (Vera & Cañas, 2005).

Estos productos son insolubles, compactos y adherentes y taponan las mencionadas grietas, lo que tiene como consecuencia la prolongación de la duración de la película de pintura. Como esta película de pintura protege a su vez al recubrimiento galvanizado de la acción corrosiva de la atmósfera y de los agentes químicos, puede decirse que existe una protección recíproca que beneficia a ambos sistemas de protección y que tiene como consecuencia que los sistemas dúplex tengan una duración superior a la que cabría esperar por la suma de las duraciones previsibles de cada sistema por separado, explicando la existencia del factor sinérgico (Pérez et al., 2000).

En la norma ASTM A 1055 se enumeran las diferentes pruebas tanto mecánicas como electroquímicas que son utilizadas para la evaluación de la calidad del producto. También establece que la capa de zinc debe ser $> 0,035$ mm (mayor a 35 micras) y el espesor total del recubrimiento (zinc y polímero epóxico) debe estar entre 0,175 y 0,400 mm (175 a 400 micras).

En las investigaciones que se han llevado a cabo, sobre la evaluación frente al deterioro por corrosión de este tipo de acero, colocan a la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica como la técnica más prometedora a la hora de evaluarlo (Lau & Sagues, 2011). Sin embargo, es posible medir el E_{corr} e i_{corr}

realizando un daño sobre el recubrimiento epóxico, estimando así, la protección que genera el doble recubrimiento aún en la situación más crítica, que es un defecto.

Lau (Lau & Sagues, 2011) evaluó varillas AC y AD (ésta con un daño sobre el recubrimiento) en soluciones sintéticas que simulan la solución de poro del concreto con y sin cloruros añadidos (3.5%). Aplicó polarizaciones desde +100 mV, -500 mV hasta -1000 mV, todas referidas vs. un electrodo saturado de Calomel (SCE), además, evaluó la adherencia de la pintura de la varilla AD. Durante el monitoreo del potencial de circuito abierto de la varilla AC obtuvo valores de -200 mV al inicio de la exposición y en la fase de propagación potenciales de -600 mV, éstos en la solución con cloruros. En ausencia de cloruros el potencial se mantuvo en -200 mV. En el caso de las varillas AD presentaron valores de E_{corr} similares tanto en la solución con y sin cloruros, éstos fueron de -800 mV para el estado pasivo y de -400 para el estado activo. Las tasas de corrosión obtenidas a partir de la polarización a +100 mV, -500 mV y -1000 mV fueron desde 0.02, 2 y 3 μA para la varilla AC; 0.2, 1 y 3 para la varilla AD respectivamente. Encontró que tanto la varilla AC como la varilla AD experimentaron gran corrosión bajo una fuerte polarización anódica en las soluciones simuladas con y sin cloruros. Finalmente, en ausencia de cloruros y rangos de polarización catódica baja y fuerte, la varilla AD presenta una corriente catódica (y por tanto una capacidad para soportar macroceldas de corrosión aun con defectos sobre el recubrimiento).

Dong (Dong et al., 2012) evaluó varillas AC y AC recubiertas con pintura epóxica (con un daño en la pintura), AG y AD (con un daño en la pintura), embebidas en concreto y expuestas a un ambiente costero. Monitoreó el E_{corr} , el i_{corr} y aplicó la técnica de EIE. Para la varilla AC obtuvo valores de E_{corr} de -200 mV/SCE a -800 mV/SCE y valores de i_{corr} de 1nA/cm^2 y de $10\ \mu\text{A/cm}^2$ para los estados pasivo y activo del acero respectivamente. Así mismo, los valores de E_{corr} de la varilla AG se mantuvieron siempre a -1000 mV/SCE y los valores de i_{corr} entre 0.1 a $0.5\ \mu\text{A/cm}^2$ lo que indica que las varillas nunca se pasivaron. Finalmente, la varilla AD, presentó valores de E_{corr} similares al de la varilla AG, pero valores de i_{corr} muy inferiores de $5\ \text{nA/cm}^2$. Concluyó sobre la importancia de la alcalinidad del concreto para pasivar

la varilla AG. Adicionalmente, sobre la relevancia del sistema de varilla dual ya que, a pesar de presentar un defecto sobre la pintura, aun así, sigue protegiendo contra el desarrollo de la corrosión.

2.5 INDUCCIÓN DE LA CORRIENTE GALVÁNICA

Las pérdidas económicas y daños causados por la corrosión del acero de refuerzo, ha sido el mayor problema de infraestructura que han enfrentado los países en los últimos tiempos.

En el proceso natural de corrosión existen diferentes factores que están relacionados con los materiales con los que se conciben las estructuras reforzadas, y otros que son exclusivos de las condiciones del medio en que se localizan. Esto se puede observar en el diagrama de Tuutti, donde en la fase de iniciación el proceso depende de las características del concreto, y de la fuente y/o tipo de agente agresivo del medio (cloruros o CO_2 , principalmente). La despasivación del acero representa la segunda fase del proceso, el cual dependerá de las características superficiales de la varilla embebida en el concreto, y de la presencia en la interface acero-concreto de los agentes agresivos, una concentración crítica para el caso de los cloruros y la pérdida de alcalinidad del concreto por parte de la carbonatación. En la fase de propagación, la HR, la temperatura y la cantidad de oxígeno presente, serán factores de suma importancia en la velocidad en que se propague la corrosión.

Este proceso de degradación de manera natural puede llevar varios años antes de que se dé, es por ello que diversos investigadores realizan en laboratorio procesos acelerados de corrosión, siempre tratando de que sus experimentos se apeguen a lo que se suscita en una estructura real.

Así, habitualmente se implementan diferentes técnicas para el estudio de la corrosión de acero de refuerzo; tales como, técnicas donde se aplica una corriente eléctrica al sistema, inmersión-secado de probetas en soluciones de NaCl, exposición natural en ambientes ricos en CO_2 y NaCl, y exposición de especímenes

en cámaras de carbonatación, todas ellas para acelerar el proceso de corrosión y estudiar su cinética.

Sin embargo, el proceso de corrosión es complejo y más aún en las estructuras reales donde los parámetros y factores no están controlados como en laboratorio. Tal es el caso de la corrosión por efecto de la carbonatación, donde es muy importante la ubicación de las varillas de acero de refuerzo y de factores que tienen que ver con la penetración del CO₂ en el recubrimiento del concreto, por ejemplo, el contenido de humedad (Glass et al., 1991), excesivas tensiones que promueven grietas (Castel et al., 1999), la calidad del recubrimiento (Fattuhi & Hughes, 1986), entre otros. Consecuentemente, el frente de carbonatación no es uniforme, lo que significa que incluso algunas áreas locales de la estructura, no son afectadas al mismo tiempo (Nasser et al., 2010; Hansson et al., 2006) (véase figura 20). Como el refuerzo está compuesto por una gran cantidad de varillas de acero usualmente unidas, esta situación puede conducir a una macrocelda de corrosión desarrollada entre las diferentes partes de la superficie de las varillas de acero, creando diferentes potenciales de equilibrio electroquímico. Así, cuando una estructura de concreto reforzado se carbonata parcialmente, en las partes carbonatadas las varillas de acero tienen potenciales electroquímicos más negativos, y en las partes no carbonatadas, presentan potenciales más positivos (Sohail et al., 2013). Dicha circunstancia produce a largo plazo, una reducción en la sección transversal de la varilla y una cantidad significativa de óxidos, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión en el concreto que agrietan el recubrimiento, o bien pueden difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto produciendo manchas en el acabado (Duong et al., 2013).

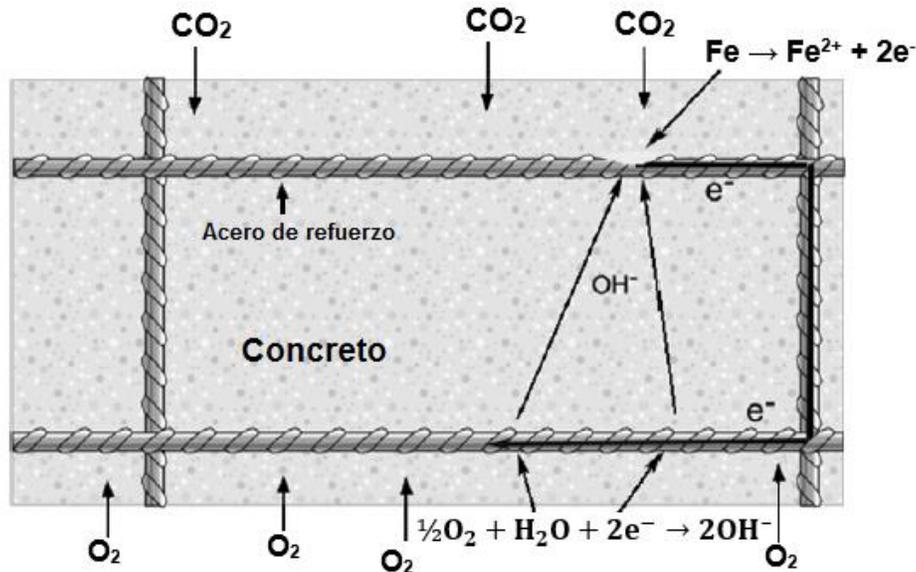


Fig. 20. Esquema de una macrocelda de corrosión (Hansson et al., 2006).

Una técnica relativamente nueva que ha surgido para la evaluación del proceso de corrosión, es la inducción de corriente galvánica, en la cual se mide la intensidad de corrosión generada por un par galvánico creado a partir de la diferencia de potencial entre varillas de acero en estado activo y pasivo. Lo relevante de esta técnica es que puede ser útil para la comprensión de la corrosión de las estructuras reforzadas, ya que los resultados de corriente galvánica obtenidos, son generados de manera natural, o sea, sin la inducción de alguna fuente de alimentación externa en la fase de propagación (Nasser et al., 2010).

Algunos de los trabajos que han utilizado esta técnica son las desarrolladas por Nasser y Sohail. En el caso de Nasser (Nasser et al., 2010) evaluó especímenes de concreto utilizando un diseño que consistió en carbonatar una sección del concreto donde se encontraba una varilla de acero embebida, en este sentido la varilla actuaría activamente en el proceso de corrosión. Posteriormente conectó el espécimen con las varillas activas con otro espécimen con varillas en estado pasivo. Adicionalmente, fabricó especímenes con un defecto interfacial (acero-concreto), con el objetivo de estudiar la corriente galvánica generada cuando existe tal daño. Después de 120 días encontró que las corrientes de corrosión por el par galvánico

eran muy altas con respecto a las recomendaciones de RILEM: $13 \mu\text{A}$ para los especímenes sin defecto y $33.1 \mu\text{A}$ para los que tenían defecto intersticial. Lo que indica que los parámetros utilizados comúnmente para establecer el estado pasivo y activo del refuerzo podrían no aplicar cuando se tiene un armado de más de una varilla traslapada con zonas activas electroquímicamente.

Sohail (Sohail et al., 2013) evaluó la corriente generada por pares galvánicos al conectar varillas de acero ordinario lisas embebidas en concreto que se encontraban en estado activo con otras en estado pasivo, para ello fabricaron especímenes cilíndricos compuestos por dos cilindros concéntricos, un cilindro en el interior carbonatado con la varilla despasivada y un cilindro exterior sin carbonatar con cuatro varillas de acero en estado pasivo, que rodeaban al del interior. Adicionalmente, realizó una modelación del sistema mediante elemento finito con un software comercial Comsol Multiphysic, para ello utilizó parámetros que obtuvo a partir de la aplicación de curvas de Tafel a especímenes carbonatados y sin carbonatar. Observó que al aumentar la relación cátodo/ánodo (C/A) resulta en una mayor polarización anódica de la varilla activa, lo cual es seguido de un aumento en la velocidad de reacción anódica. Además, que las mediciones de corriente galvánica revelaron altos niveles de velocidad de corrosión, incluso en la macroceldas generadas con baja relación C/A.

Bellezze (Bellezze et al., 2006) evaluó mediante el acoplamiento de las varillas AG y AC en especímenes de concreto con diferentes arreglos de relación de superficie anódica/superficie catódica (S_a/S_c), simulando así las discontinuidades que se pudieran presentar en la varilla AG, y expuestos a ciclos de inmersión-secado en soluciones de NaCl al 5% y agua de grifo. Concluyó que los potenciales obtenidos del par galvánico indicaron que la varilla AG ejerce una protección catódica para la varilla AC en todas las relaciones examinadas, además de que dicha protección aumenta el umbral de concentración de cloruros que pudiera inducir la corrosión localizada de la varilla AC. El daño a la capa de zinc depende de la agresividad del ambiente en que se encuentra la varilla y del tamaño del defecto. Finalmente,

discontinuidades mayores a 1 cm se pueden considerar críticos para el fenómeno de la corrosión de la capa de zinc.

En esta investigación se empleó la metodología desarrollada por Sohail, aplicándola a las varillas AC, ATT y AG, con el objetivo de tener una caracterización electroquímica del comportamiento natural de corrosión por efecto de la carbonatación acelerada, ya que los resultados de corriente galvánica mostrados para la varilla AC son muy altos, se precisa la necesidad de estudiar a las varillas de acero modificadas superficialmente: ATT y AG, así, dicha técnica permitió analizar el fenómeno de corrosión simulando lo que sucede en estructuras parcialmente carbonatadas.

CAPÍTULO III.
DESARROLLO
EXPERIMENTAL



A continuación, se describe la metodología experimental de la caracterización los materiales requeridos, el diseño y fabricación de los especímenes, finalizando con su exposición en los diferentes medios agresivos elegidos para su deterioro.

3.1 ETAPA I. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARILLAS DE ACEROS

En esta primera etapa se caracterizaron los cuatro tipos varillas de refuerzo antes de someterlos al deterioro por corrosión, para verificar el cumplimiento ante las diferentes normativas que rigen el uso de varillas de acero de uso estructural.

3.1.1 Ensayos Mecánicos

La caracterización mecánica fue evaluada con la ayuda de una máquina universal Tinius Olsen (véase figura 21), Las varillas de acero fueron instrumentadas con deformímetros eléctricos del tipo EA-06-250BG, para dicha caracterización se utilizaron tres muestras por tipo de varilla.

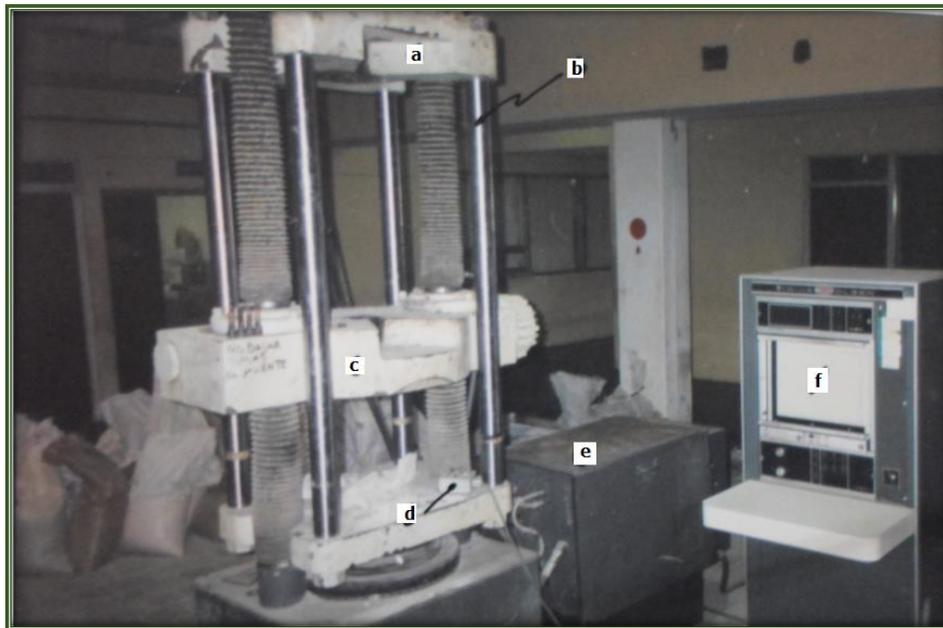


Fig. 21. Máquina Universal Tinius Olsen; a) Cabezal superior, b) Tornillos lisos, c) Cabezal o marco fijo, d) Botonera, e) Centro hidráulico de poder y f) Consola de medición de carga.

3.1.2 Microdureza por Vickers

Como parte de la evaluación y/o comprobación de la diferencia microestructural existente en la superficie de las varillas AC y ATT, se determinó la microdureza. Se requirió que las muestras de las diferentes varillas fueran pulidas hasta acabado espejo, para ello las muestras fueron montadas en un polímero el cual fungió como soporte para la manipulación, enseguida fueron desbastadas con papel de carburo de silicio con diferentes tamaños de grano: 80, 240, 320, 600, 800, 1200 y 2400, utilizando una desbastadora Metallographic Grinder. Posteriormente, el pulido se dio en un paño utilizando como abrasivo pasta de diamante: 6 μm , 3 μm , 1 μm y $\frac{1}{4}$ μm . Finalmente, las muestras fueron sometidas a un baño ultrasónico para eliminar residuos que pudiesen quedar sobre la superficie a observar (véase figura 22).



Fig. 22. Preparación de varillas antes del ensayo de microdureza por Vickers.

Una vez pulidas las muestras, se realizaron incisiones sobre la sección de la varilla a analizar con la ayuda de un durómetro marca NAWAGE (véase figura 23), programado para aplicar una carga de 9.807 N en un tiempo de 15 segundos. Las figuras 24 y 25 muestran las incisiones realizadas a las varillas de acero AC y ATT respectivamente. Los valores obtenidos fueron comparados con los establecidos en la norma ASTM E-384 (ASTM E-384, 1999).

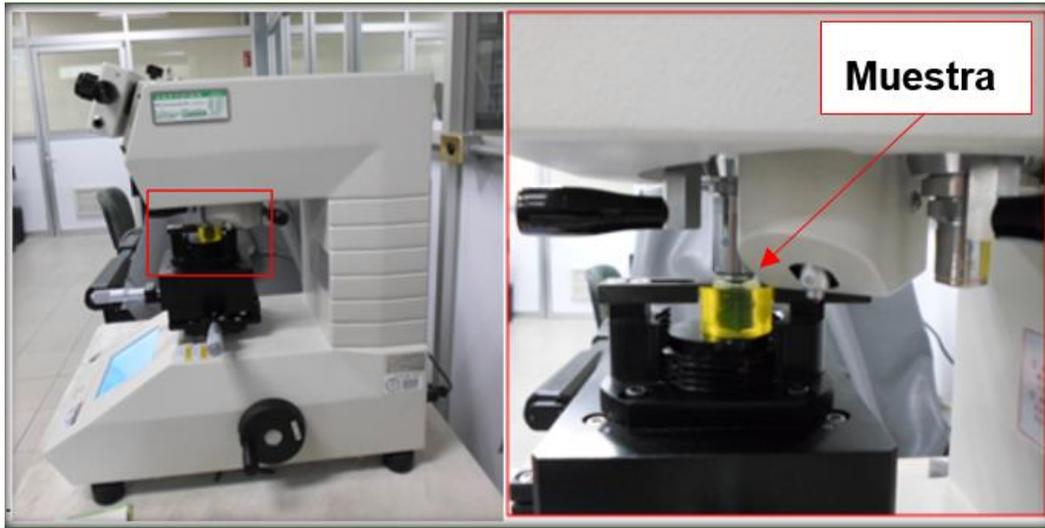


Fig. 23. Muestra posicionada en el microdurómetro para el ensaye de microdureza.

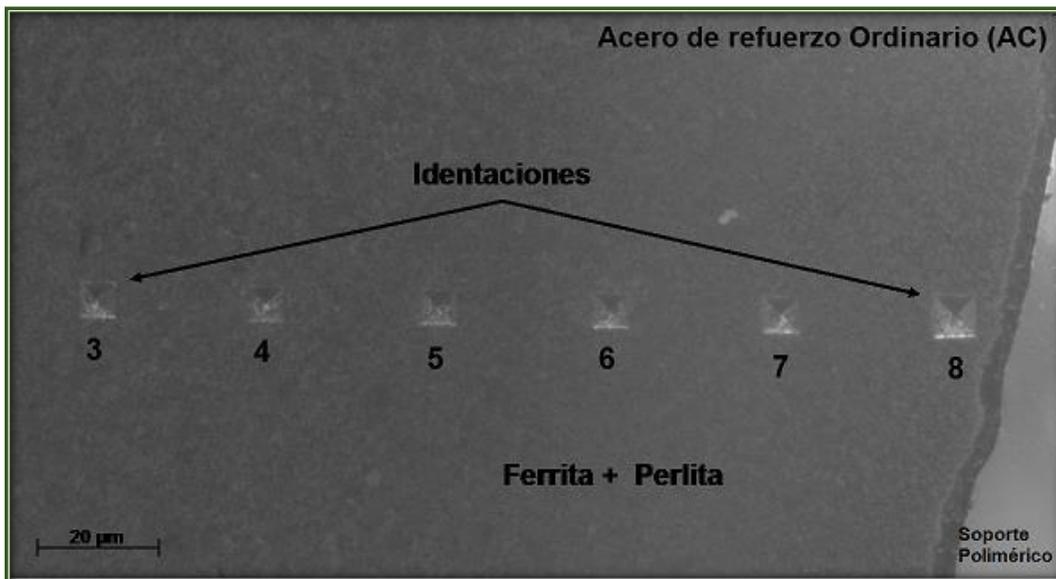


Fig. 24. Incisiones realizadas sobre la sección transversal de una varilla AC.

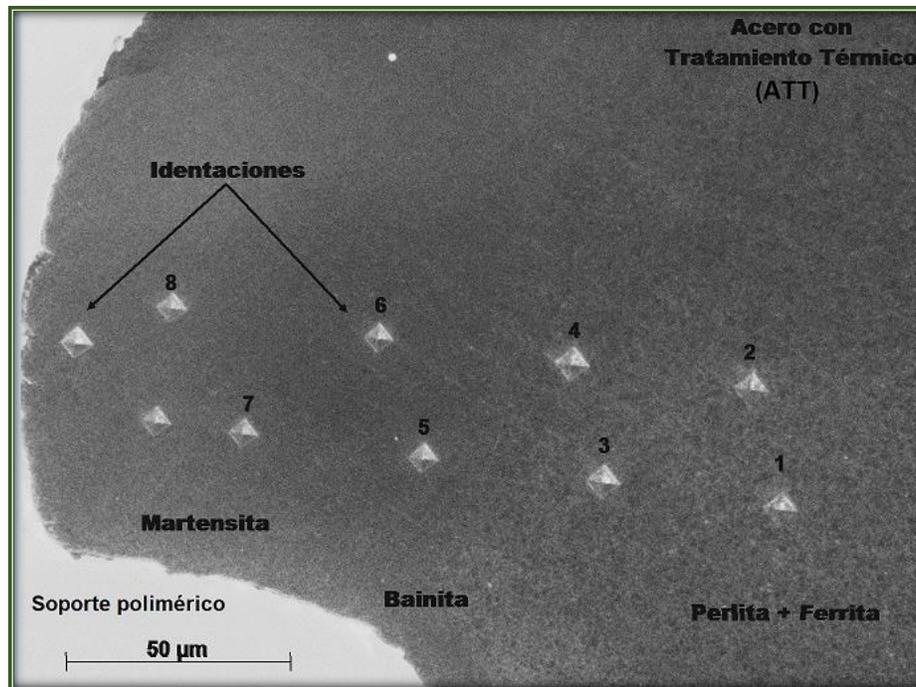


Fig. 25 Incisiones realizadas sobre la sección transversal de una varilla ATT.

3.1.3 Metalografía (Identificación de fases y espesor)

Para la metalografía las muestras fueron preparadas siguiendo el mismo procedimiento de pulido hasta acabado espejo descrito en el punto 1.2. Posteriormente, las muestras fueron atacadas químicamente de acuerdo a la norma ASTM E407 (ASTM E-407, 2006), utilizándose como reactivo NITAL al 2% (2% HNO_3 + 98% Alcohol etílico) para revelar las fases de interés. Posteriormente las muestras fueron observadas en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), JEOL JSM 6510-LV.

3.1.4 Análisis Químico de las varillas de acero AC y ATT

Como parte de la caracterización y diferenciación de las varillas ordinarias de acero y varillas con tratamiento térmico, se determinó la composición química la cual se muestra en la Tabla 5, ésta fue obtenida mediante la técnica de Espectroscopia de Emisión Atómica (conocida como arco y chispa). Se realizó bajo los criterios de la norma ASTM E-1019 (ASTM E-1019, 2003).

Tabla 5. Composición química de las varillas de acero AC y ATT.

Elemento	AC peso %	ATT peso %
C	0.41	0.37
Mn	1.13	0.67
P	0.02	0.02
S	0.02	0.03
Ni	0.07	0.11
Si	0.19	0.21
Cr	0.1	0.17
Mo	0.01	0.02
Fe	Bal.	Bal.

3.2 ETAPA II. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO

En esta segunda etapa se describe la caracterización de los materiales para la elaboración del concreto con el que se fabricaron los especímenes. Además, se presenta el proporcionamiento para las dos relaciones agua/cemento (a/c) utilizadas en la investigación: 0.65 y 0.45, de las cuales podemos resaltar que son una relación alta (normalmente utilizada en la industria de la construcción) y una relación baja la cual cumple uno de las características básicas de la durabilidad. Cabe mencionar que se describen las características de materiales de dos regiones de Nuevo León, México y Toulouse, Francia.

3.2.1 Cemento

Como la investigación se centra en la evaluación del comportamiento a la corrosión de varillas con diferente acabado superficial, se optó por usar un cemento con la menor variabilidad en la composición química. Es así que, para la fabricación de los especímenes en México se eligió un cemento portland ordinario-CPO 40 (el cual

cumple con la norma NMX-C-414). No obstante, para los especímenes fabricados en Francia se empleó un cemento II/B-LL 32.5 (clasificado según la norma 197-1:2000) el cual presentó una composición química similar al utilizado en México.

En la Tabla 6, se muestra la composición química de ambos cementos, la cual fue obtenida por medio del espectrómetro de fluorescencia de rayos x por dispersión de energía bajo la atmósfera de Helio, PANalytical-Epsilon3.

Tabla 6. Composición química, % por peso de cemento.

%	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	P. I
MX	0.86	1.16	3.97	16.7	5.46	0.8	66.42	2.46	2.17
FR	0.31	1.23	3.56	12.12	3.57	0.44	73.49	2.57	2.71

3.2.2 Agregados

Los agregados utilizados en México, son de origen calcáreo típico de la región, los cuales contaron con granulometría predominante de 12 mm para el agregado grueso y 1.2 mm para el agregado fino (ambos cumplen la norma ASTM C-33). Los agregados utilizados en Francia fueron de origen silico-calcáreo, contaron con granulometría predominante de 12 mm para el grueso y 4 mm para el agregado fino (los cuales cumplen la norma UNE 146120). La densidad, el peso volumétrico seco y compacto, el porcentaje de absorción, el módulo de finura (agregado fino) y el contenido de humedad, fueron determinados y tomados en cuenta para el diseño de la mezcla de concreto.

3.2.3 Agua para Mezcla

El agua utilizada para realizar el mezclado del concreto y el curado de los especímenes, fue agua potable procedente de la red local de suministro para el uso doméstico que cumple la norma NMX C-122.

3.2.4 Aditivo

Los concretos fabricados con relación agua/cemento de 0.45, requirieron de un aditivo superplastificante que permitirá una trabajabilidad de la mezcla adecuada para su colocación. Mediante pruebas preliminares (bachadas) se establecieron las cantidades necesarias de aditivo para mantener un revenimiento mínimo de 10 ± 2 cm. Los aditivos utilizados en la elaboración de los concretos fueron de la marca comercial Glenium 3400 para México (ASTM C 494) y ADVA FLOW 400 de GRACE para Francia (norma EN 934-2.).

3.2.5 Proporcionamiento

En la Tabla 7 se presenta el proporcionamiento de la mezcla, el cual fue diseñado con apego a la norma ASTM C 192/192 M, utilizándose dos relaciones agua/cemento (a/c): una de 0.65 la cual es usual en la industria de la construcción; y la otra de 0.45 la cual satisface características ideales en aspectos de durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

Tabla 7. Proporcionamiento de la mezcla utilizado en la fabricación del concreto.

<i>Ingredientes</i>	<i>(kg/m³)</i>	
<i>CPO 40</i>	356	356
<i>Agua</i>	159	231
<i>Agregado Fino</i>	1312	1169
<i>Agregado Grueso</i>	557	509
<i>Superplastificante</i>	0.28	0
<i>a/c</i>	0.45	0.65
<i>Porosidad accesible al agua (%)</i>	12.8	19.4
<i>fc a 28 días, MPa</i>	38	32

Los especímenes fabricados en Francia de igual manera fueron elaborados en base al proporcionamiento de la Tabla 7. Obteniéndose valores de resistencia mecánica cercanos a los reportados.

3.3 ETAPA III. PREPARACIÓN DE VARILLAS Y DISEÑO DE PROTECCIÓN AL INTEMPERISMO

En esta etapa se presenta la preparación de las varillas antes de ser embebidas en el concreto. Las descripciones corresponden a las preparaciones para los especímenes fabricados en México y Francia.

A continuación, se describe el desarrollo para preparación de las diferentes varillas de acero previo a la fabricación de los especímenes de concreto de México.

Primero, las varillas de $3/8"$ y $1/2"$ de diámetro nominal fueron cortadas a una longitud de 18 cm (figura 26), adicionalmente se les realizó una muesca a 1 cm de uno de los extremos, en el caso de las varillas de ATT se le realizó una muesca a un centímetro de uno de los extremos, de esta manera se diferenciaron las varillas de AC de las varillas ATT ya que a simple vista no hay diferencia. Después fueron decapadas siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM G-1 (ASTM G-1, 1999).

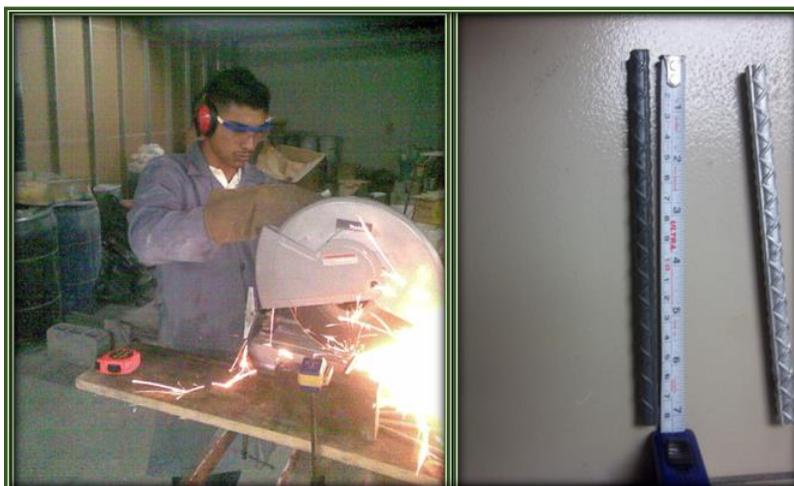


Fig. 26. Corte de las diferentes varillas de acero.

A continuación, se registró el peso inicial de cada varilla de acero (figura 27a). Posteriormente, se fijó un alambre de cobre a uno de los extremos de las varillas con la finalidad de realizar las lecturas electroquímicas, al alambre se le colocó una etiqueta con el nombre que permitió identificar el tipo de varilla (figura 27b). Después, con el objetivo de privilegiar y controlar la inducción de los agentes agresivos, se delimitó en la sección media de cada varilla un área de estudio equivalente a una longitud de 5 cm (figura 27c). Finalmente, se verificó la continuidad eléctrica entre el alambre de cobre y la varilla con ayuda de un multímetro (figura 27d).

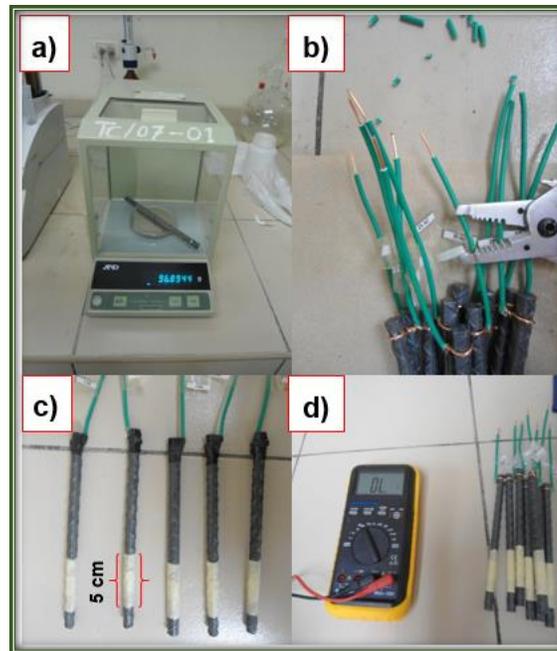


Fig. 27. Preparación de las varillas: a) pesaje, b) conexión e identificación, c) delimitación de área de estudio y d) verificación de continuidad eléctrica.

En seguida las varillas fueron recubiertas con tres capas de pintura epóxica seguido de un recubrimiento con cinta de aislamiento eléctrico, la figura 28 muestra el resultado de dicha preparación.



Fig. 28. Aplicación del recubrimiento con pintura epóxica y cinta de aislar.

Una vez más se verificó la continuidad eléctrica entre la conexión y la varilla (figura 29a). El área de exposición es un parámetro requerido para la obtención de la información electroquímica, por ende, fue importante mantener los 5 cm de longitud delimitados. Sin embargo, tras la aplicación de la pintura epóxica, en algunas varillas ésta ingresó y se adhirió en el área delimitada, por lo que fue necesario remover este exceso (figura 29b). Finalmente, el área delimitada de las varillas quedó sin residuos de pintura.

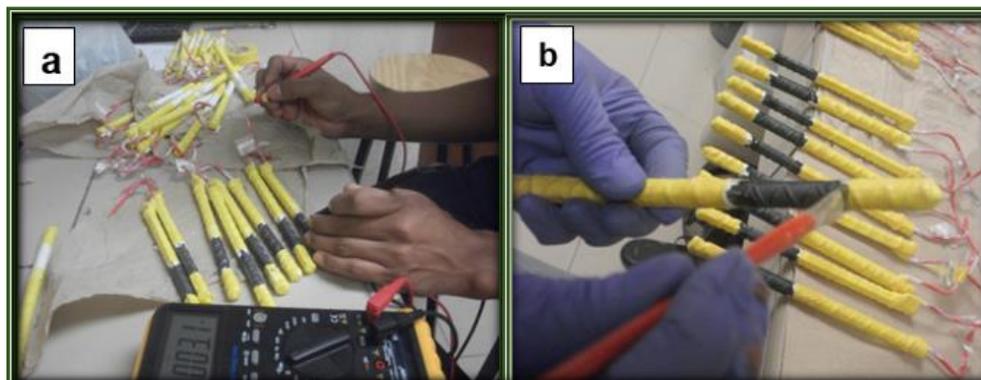


Fig. 29. Verificación de la continuidad eléctrica y remoción de residuos de pintura del área de estudio.

Con el objetivo de simular los daños que pueden sufrir sobre el recubrimiento epóxico durante su colocación en obra, a las varillas de acero dual (AD) se les realizó diversas incisiones dañando dicho recubrimiento. La figura 30 muestra la cuchilla y las incisiones realizadas sobre las varillas.



Fig. 30. Cuchilla e incisiones realizadas sobre la varilla de AD.

Finalmente, la preparación de la varilla concluyó con la protección al intemperismo y así evitar la formación de un par galvánico en la conexión eléctrica (véase figura 31). Para ello, el extremo de la varilla con la conexión eléctrica fue embebida en una resina polimérica utilizando un tubo de PVC como molde, mismo que permaneció como una barrera adicional. En la parte inferior del PVC se colocó un conector con rosca que permitió un mejor anclaje con el concreto de los especímenes. En la parte superior se colocó un tapón removible que facilitó el acceso al conductor eléctrico durante las mediciones electroquímicas.

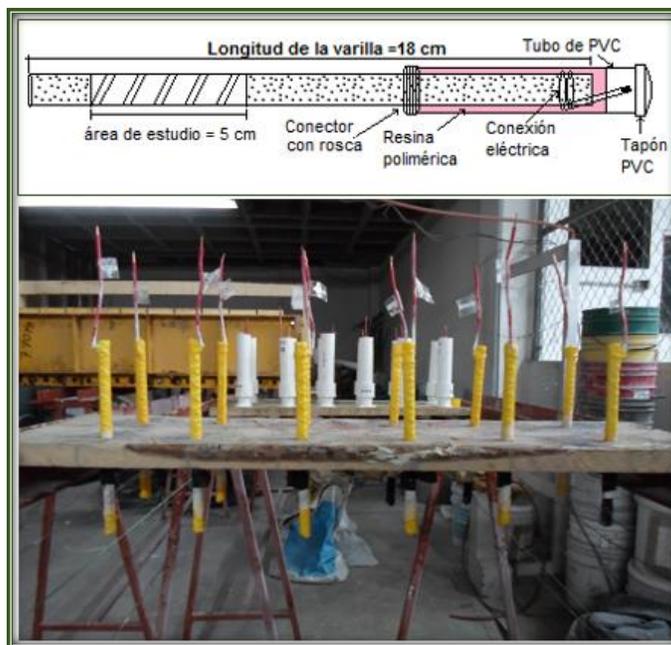


Fig. 31. Esquema del diseño y preparación de la protección al intemperismo de las varillas.

En la Tabla 8 se presenta la nomenclatura y la descripción utilizada en esta investigación para la identificación de los especímenes.

Tabla 8. Nomenclatura utilizada para la identificación de los especímenes.

<i>Nomenclatura</i>	<i>Descripción</i>
AC-0.45	Varilla de Acero ordinario, $a/c=0.45$
AC-0.65	Varilla de Acero ordinario, $a/c=0.65$
ATT-0.45	Varilla de Acero con Tratamiento Térmico, $a/c=0.45$
ATT-0.65	Varilla de Acero con Tratamiento Térmico, $a/c=0.65$
AG-0.45	Varilla de Acero Galvanizado, $a/c=0.45$
AG-0.65	Varilla de Acero Galvanizado, $a/c=0.65$
ADCI-0.45	Varilla de Acero Dual Con Incisión, $a/c=0.45$
ADCI-0.65	Varilla de Acero Dual Con Incisión, $a/c=0.65$
ADSI-0.45	Varilla de Acero Dual Sin Incisión, $a/c=0.45$
ADSI-0.65	Varilla de Acero Dual Sin Incisión, $a/c=0.65$

El desarrollo de la preparación de las varillas para la fabricación de los especímenes de Francia, consistió en el mismo procedimiento descrito para las utilizadas en México a diferencias de la longitud la cual fue de 14 cm para adaptarse a las dimensiones de los moldes, sólo las varillas ATT fueron trasladadas a Francia para el experimento, el AC y AG fueron proporcionadas por parte del laboratorio (LMDC) en Toulouse.

3.4 ETAPA IV. FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES

En esta etapa se describe la metodología empleada para la fabricación de los especímenes de México y los de Francia.

3.4.1 Fabricación de los especímenes en México

El procedimiento de fabricación de los especímenes de México se inició con el armado de los moldes metálicos seccionados con madera a las dimensiones correspondientes de los especímenes prismáticos. Enseguida se procedió con el montaje de las varillas preparadas en la etapa anterior, esto se puede apreciar en la figura 32. Mediante un soporte de madera las varillas quedaron sujetas y centradas de modo que la rosca del conector quedará embebida cuando se vertiera el concreto. Se colocaron dos varillas del mismo tipo de acabado superficial de tal manera que al verter el concreto éstas fueran parte del mismo espécimen.



Fig. 32. Montaje de las varillas antes del colado del concreto.

Con la finalidad de que todos los especímenes obtenidos contaran con las mismas características del concreto, la elaboración del mismo se preparó en batchadas que permitieron la fabricación de especímenes de un determinado grupo de exposición y/o relación agua/cemento (a/c). Paralelamente se fabricaron especímenes sin varillas embebidas que permitieron dar un seguimiento al frente de carbonatación o perfil de cloruros cual fuese el caso.

Durante la fabricación del concreto se determinaron las siguientes propiedades del concreto en estado fresco: revenimiento (ASTM C-143), peso unitario (ASTM C-138) y contenido de aire (ASTM C-231).

El concreto fue vertido en los moldes y mediante un vibrado fue compactado, quedando así confinado en dichos moldes (figura 33). Adicionalmente, se fabricaron especímenes cilíndricos de 100 mm X 200 mm (ASTM C-31), éstos con la finalidad de determinar la resistencia mecánica y porosidad accesible al agua. del concreto en estado endurecido.



Fig. 33. Especímenes confinados en los moldes metálicos después del colado.

A continuación, los especímenes permanecieron 24h en el sitio de colado cubiertos para impedir el intercambio de humedad con el exterior, evitando así una evaporación excesiva de agua. Una vez concluido este tiempo fueron desmoldados, y trasladados al cuarto de curado con rocío continuo de agua a 20°C y 100% de humedad relativa, donde permanecieron por 28 días.

En la figura 34 se puede apreciar uno de los especímenes fabricados mediante el desarrollo descrito anteriormente. Para inducir la penetración de los agentes agresivos por la zona preferencial los especímenes fueron pintados.



Fig. 34. Espécimen fabricado antes de su exposición a un medio agresivo.

El diseño del espécimen consideró que un extremo de la varilla quedaría expuesta al ambiente y por tanto vulnerable a la acción de los agentes agresivos lo que podría conducir a un proceso de corrosión en esta parte del espécimen. Es por ello, que la varilla fue preparada con una protección al intemperismo, evitando además la formación de un par galvánico en la conexión eléctrica (véase figura 35).

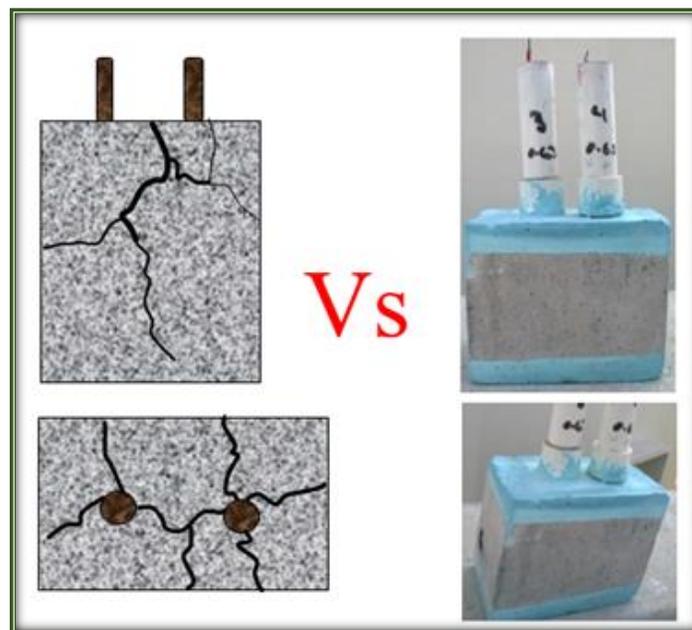


Fig. 35. Esquema de un espécimen agrietado con un diseño típico vs especímenes fabricados.

3.4.2 Fabricación de los especímenes en Francia

Los especímenes fabricados en Francia consistieron en dos fases. En la primera fase se fabricaron especímenes cilíndricos de 6.5 cm de diámetro y 13 cm de longitud. Los moldes que encofraban dichos especímenes consistieron en dos partes (véase figura 36), un molde cilíndrico elaborado de PVC el cual tenía una longitud de 17 cm y 6.5 cm de diámetro interior. La otra parte era un espaciador cilíndrico de las siguientes dimensiones, 4 cm de longitud y 6.5 cm de diámetro, además, éste tenía una perforación de 2 cm de diámetro la cual fue realizada a lo largo de la longitud del mismo, donde se posicionó la varilla de acero. Finalmente, el conjunto del espaciador con la varilla de acero incrustada fue introducido en el molde de PVC (véase figura 37).

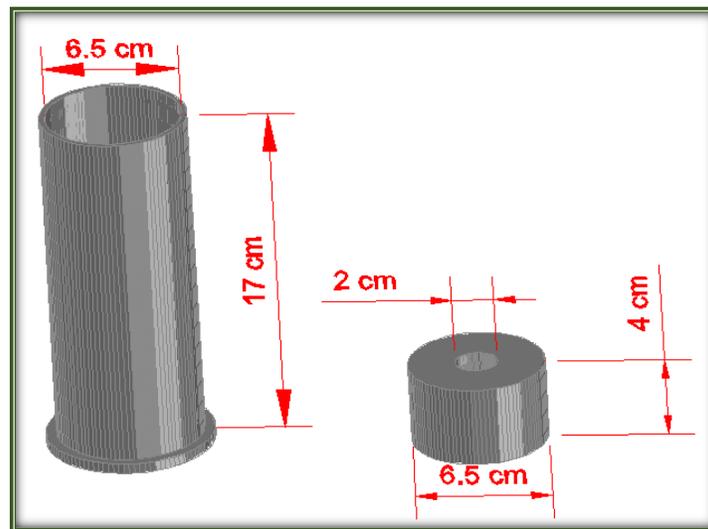


Fig. 36. Molde cilíndrico y espaciador.

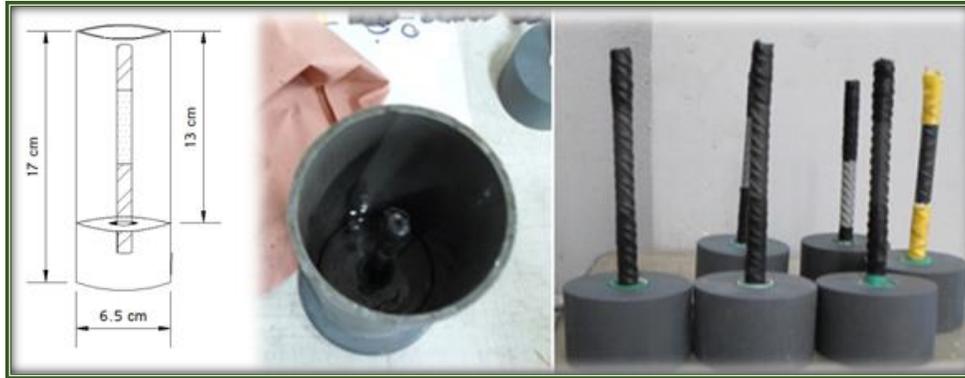


Fig. 37. Preparación de espécimen antes del colado.

Posteriormente, el concreto fue colado dentro de los moldes dejando embebidas las varillas, después de haber aplicado un vibrado. La forma y dimensiones finales de los especímenes se muestran en la figura 38.

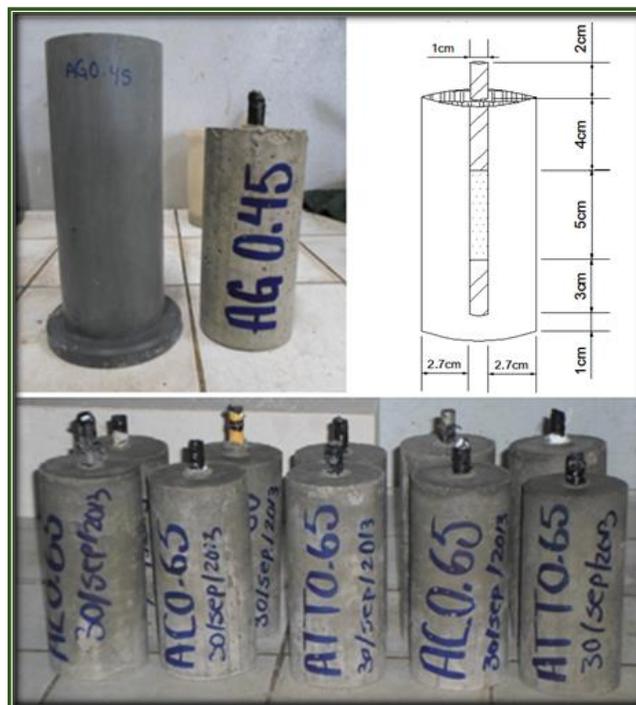


Fig. 38. Especímenes colados y esquema con sus dimensiones

Después del colado, los especímenes permanecieron 24h en el cuarto de curado con rocío continuo de agua a 20°C y 95% de HR, una vez concluido este tiempo fueron desmoldados, y regresados nuevamente para que concluyan un curado de

7 días. Al concluir éste periodo, fue necesario preparar los especímenes a las condiciones de exposición dentro del laboratorio (65% HR, 27 °C), logrando así un equilibrio en la humedad y temperatura entre el exterior y el interior de los poros del concreto, esto antes de la inducción de la carbonatación.

Al final del preacondicionamiento los especímenes fueron colocados dentro de una cámara de carbonatación, a 50% CO₂, 50% HR y 20°C donde permanecieron hasta lograr una carbonatación total de los mismos. Para dar seguimiento a la profundidad de carbonatación, se colocaron especímenes testigo, los cuales fueron fabricados paralelamente a los especímenes en estudio. Estos especímenes fueron extraídos regularmente de la cámara de carbonatación para el seguimiento de la profundidad de carbonatación del concreto mediante la aplicación de la prueba colorimétrica con fenolftaleína. En la figura 39, se observa un corte transversal de un espécimen testigo el cual no muestra el color típico rosa para concretos no carbonatados, lo cual confirma que el concreto se encontraba totalmente carbonatado.



Fig. 39. Sistema de carbonatación y espécimen carbonatado totalmente.

Una vez que los especímenes fueron carbonatados totalmente, se procedió a la fabricación de los especímenes de la segunda fase.

Para ello se requirieron moldes compuestos por un tubo de PVC de 19.5 cm de diámetro interior y 14.5 cm de altura, y una base móvil de 2 cm de espesor, la cual contaba con cinco perforaciones de 2 cm de diámetro, uno al centro y los otros cuatro hechos simétricamente y a iguales distancias de separación (véase figura 40).

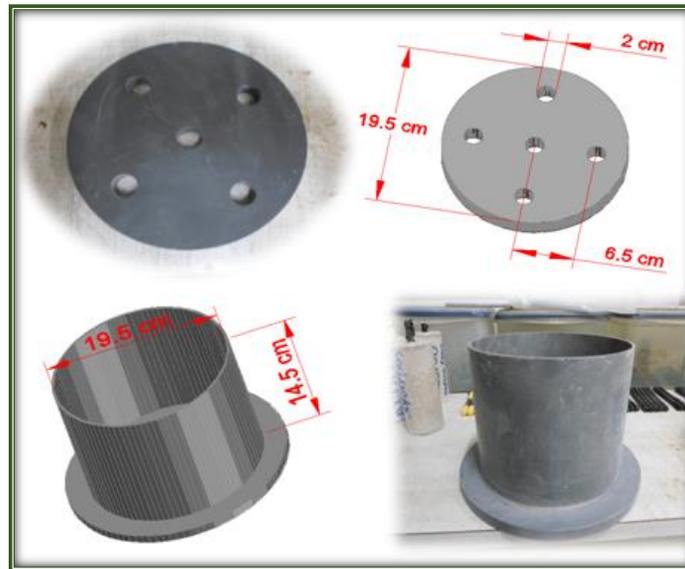


Fig. 40. Moldes utilizados para fabricación de especímenes para prueba de corrosión acelerada.

Los especímenes fabricados en esta segunda fase, estuvieron compuestos por dos cilindros concéntricos de concreto. Uno en el interior, en el cual se colocó el cilindro previamente carbonatado en la primera fase, el otro, un cilindro exterior con cuatro varillas embebidas del mismo tipo de acero (véase figura 41).



Fig. 41. Colocación de varillas y espécimen carbonatado

El arreglo del montaje del espécimen carbonatado y las varillas de acero, fue introducido en el molde de PVC, (véase figura 42). Así, se procedió a colar el nuevo concreto, el cual se elaboró siguiendo el mismo diseño de mezcla que se utilizó para los especímenes de la primera fase. Es importante mencionar las varillas que rodeaban a la varilla central, contaron con la misma separación de 6.5 cm.

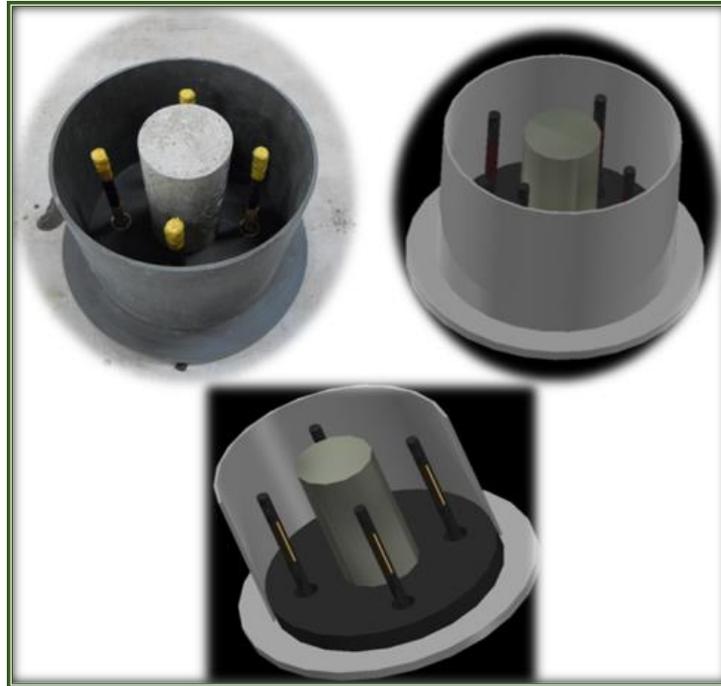


Fig. 42. Montaje de espécimen carbonatado y varillas el molde para la fabricación de los cilindros de la segunda fase.

Al igual que los especímenes fabricados en la primera fase, éstos después de ser colados fueron trasladados al cuarto de curado, una vez concluidas las 24h se desmoldaron y regresaron al cuarto de curado por un período adicional de 7 días. Los especímenes fabricados para el ensaye se muestran en la figura 43, adicionalmente, se señalan la varilla pasiva y las activas.



Fig. 43. Especímenes fabricados para el ensaye de inducción de corriente galvánica por carbonatación acelerada.

3.5 ETAPA V. INDUCCIÓN DEL DETERIORO DE LAS VARILLAS

En esta última etapa los especímenes fueron fabricados en el laboratorio de tecnología del concreto del Instituto de Ingeniería Civil (IIC), perteneciente a la Universidad Autónoma de Nuevo León, éstos con las características descritas en las etapas anteriores. Posteriormente fueron trasladados a los diferentes medios de exposición donde comenzaron su deterioro, con el consecuente monitoreo electroquímico.

3.5.1 Exposición a ambiente natural

3.5.1.1 Ambiente marino

Con el objetivo de evaluar los diferentes tipos de varillas en un medio rico en cloruros, los especímenes fueron trasladados al Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, ubicado en Boca del Río, Veracruz, localizado a 500 m

de distancia de la costa del Golfo de México (Véase figura 44). La atmósfera marina-urbana y el clima tropical seco (Clasificación climática de Köppen: Aw)(Trujeque, 1999), son factores importantes para propiciar la corrosión del refuerzo en las estructuras. Es por ello que se seleccionó esta zona.



Fig. 44. Ubicación del Instituto de Ingeniería, Boca del Río, Veracruz, México.

Una vez ahí, los especímenes fueron colocados en la azotea del mencionado Instituto para el inicio de la exposición natural (véase figura 45), orientados de manera que los vientos preferenciales los golpearan.



Fig. 45. Exposición de especímenes a ambiente marino.

3.5.1.2 Ambiente urbano/industrial

Con el objetivo de evaluar el deterioro de los diferentes tipos de varillas de acero por acción de la carbonatación de manera natural, los especímenes de concreto fueron trasladados a la azotea del IIC de la UANL, ubicado en San Nicolás de los Garza, Nuevo León (véase figura 46). Este medio cuenta con valores de temperatura máx. 40 °C y mín. 14 °C, HR de 60.77% y 42.38%, la velocidad del viento oscila entre 7.61 y 5.10 km/h. Con referencia a la concentración de CO₂ es difícil obtener información oficial de la localidad ya que la información obtenida por parte de las estaciones de monitoreo ambiental son monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas menores a 10 micras. Sin embargo, valores obtenidos en trabajos previos de investigación monitorearon valores de 341 ppm (partes por millón) (A.Silva, 2011) .



Fig. 46. Ubicación del Instituto de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

En la figura 47 se pueden ver los especímenes colocados en el lugar de explosión (IIC).



Fig. 47. Especímenes expuestos a ambiente urbano/industrial (azotea del IIC).

3.5.2 Ambiente controlado en laboratorio

Una vez concluidos los 28 días de curado, los especímenes fueron trasladados al Laboratorio de Materiales de Construcción ubicado en el IIC. Para acelerar el proceso de ingreso de cloruros, los especímenes fueron expuestos a ciclos que consistieron de 4 días en inmersión parcial en una solución de NaCl de 35 g/L seguido de 3 días de secado en una cámara ambiental a 40° C y 60% de HR.

3.5.3 Inducción de corriente galvánica por carbonatación

Esta experimentación fue realizada en el Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'Université Paul Sabatier ubicado en Toulouse, France.

Tras haber concluido el tiempo de curado mencionado en la sección 3.4.2, los especímenes fueron utilizados para la prueba acelerada de corrosión galvánica, esto mediante la conexión eléctrica de la varilla central (activada como ánodo) con las varillas que la rodean (pasivadas actuando como cátodo). A continuación, se muestra de manera esquemática la interacción electroquímica que se suscita, figura 48a, y el arreglo utilizado para dicha prueba figura 49b.

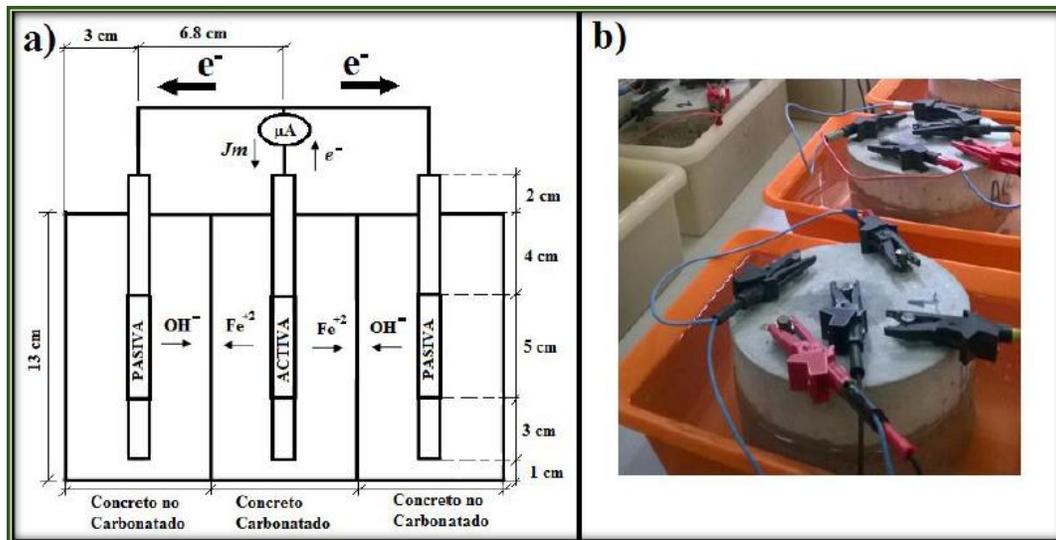


Fig. 48. a) Esquema de conexión de la varilla activa con las pasivadas, b) Ensayo de corrosión galvánica.

Este acoplamiento permitió el intercambio natural de electrones entre la varilla activada y las varillas pasivas, resultando en una mutua polarización anódica de la varilla activada (acero en disolución) y la polarización catódica de las varillas pasivas. Este intercambio de cargas eléctricas es asociado con la corriente de corrosión de la macrocelda (J_m) que fluye de la varilla activa a las varillas pasivas.

Cada espécimen fue conectado a una resistencia de 1Ω (con variación de $\pm 1\%$) en el circuito entre el ánodo y los cátodos. Se empleó un equipo Yokagawa Mw 100[®], para medir la diferencia de potencial sobre la resistencia y mediante la ley de Ohm se calculó la corriente de corrosión de la macrocelda, este mismo equipo guardaba la información en una plataforma durante períodos de 30 días. La resistencia aplicada fue de 1Ω la cual es un valor despreciable con respecto a la resistencia óhmica debida al concreto y, consecuentemente, esto lo hace no influir en el sistema de equilibrio galvánico. El sistema galvánico se evaluó por 183 días para los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.65 y 299 días los correspondientes a la relación a/c de 0.45.

3.5.4 Caracterización electroquímica

3.5.4.1 Ambiente marino

Los especímenes expuestos a este medio, normalmente fueron monitoreados mediante el potencial de corrosión, el cual se realizó por medio de un electrodo de cobre/sulfato de cobre portátil como electrodo de referencia y un voltímetro portátil. En la figura 10 del punto 1.4.1.1 se puede observar cómo se realizó la conexión para efectuar la medición. Sin embargo, en algunas ocasiones por medio del equipo portátil Galvapulse se realizaron medidas de i_{corr} y E_{corr} .

3.5.4.2 Ambiente urbano/industrial

Para la evaluación de los especímenes expuestos al ambiente urbano/industrial y al ambiente controlado de laboratorio, el potencial de corrosión $-E_{corr}$ (ASTM C-876) (ASTM C-876, 2000), la Resistencia a la Polarización Lineal -RPL y la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) fueron obtenidos usando un Potenciostato-Galvanostato Voltalab 40 (PGZ 300) conectado a una computadora personal. Se utilizó una configuración de tres electrodos, donde la varilla embebida en el concreto fungió como electrodo de trabajo, una placa de acero inoxidable como electrodo auxiliar y un electrodo saturado de Calomel (SCE por sus siglas en inglés) como electrodo de referencia (véase figura 49).

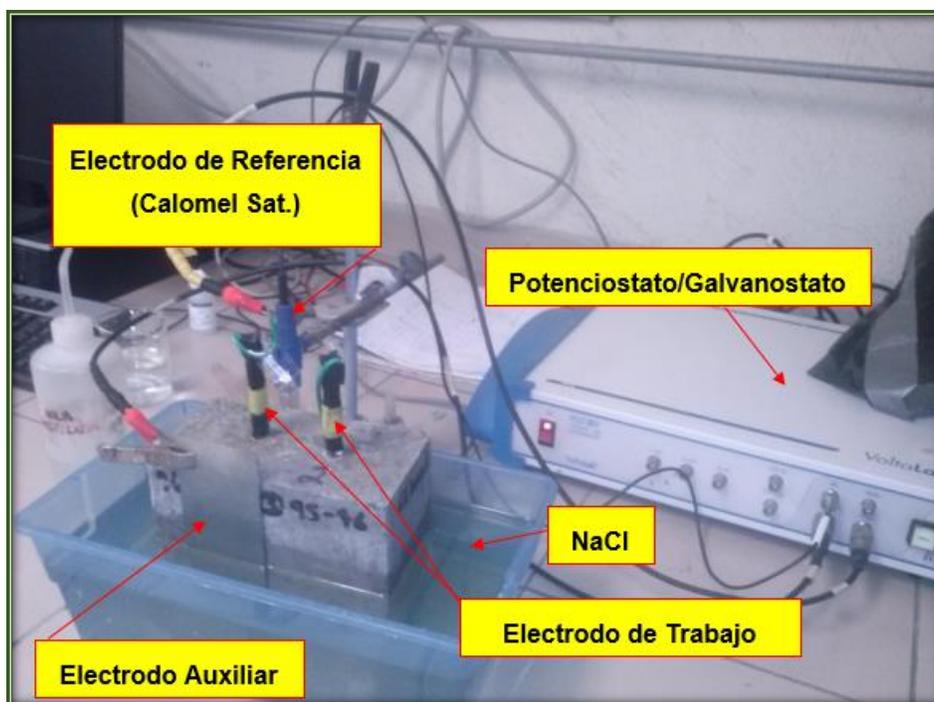


Fig. 49. Configuración para el monitoreo electroquímico.

El monitoreo electroquímico para los especímenes expuestos al medio urbano se realizó bajo el mismo procedimiento descrito en la sección anterior (a excepción del uso de NaCl como medio electrolítico) ya que para el monitoreo de este tipo de especímenes solamente se colocó una esponja humedecida con agua destilada donde hacían contacto el electrodo auxiliar y el electrodo de referencia con el concreto.

Para las mediciones de RPL, el electrodo de trabajo fue polarizado a ± 20 mV para equilibrar el potencial a una velocidad de barrido de 0.1 mV/s. Para el cálculo de la corriente de corrosión (i_{corr}). Los valores de la constante de B corresponden a los descritos en el punto 1.4.1.2.

En cuanto a la técnica de EIE, se aplicó una frecuencia de 10 kHz a 100 Hz, a 10 mV de amplitud considerando 10 puntos por década.

Las pruebas electroquímicas fueron desarrolladas a intervalos de 7 días, siempre al final del periodo de inmersión (al término del cuarto día) (véase figura 50), sobre

tres varillas de cada tipo de acabado superficial localizadas en dos especímenes de cada relación a/c.

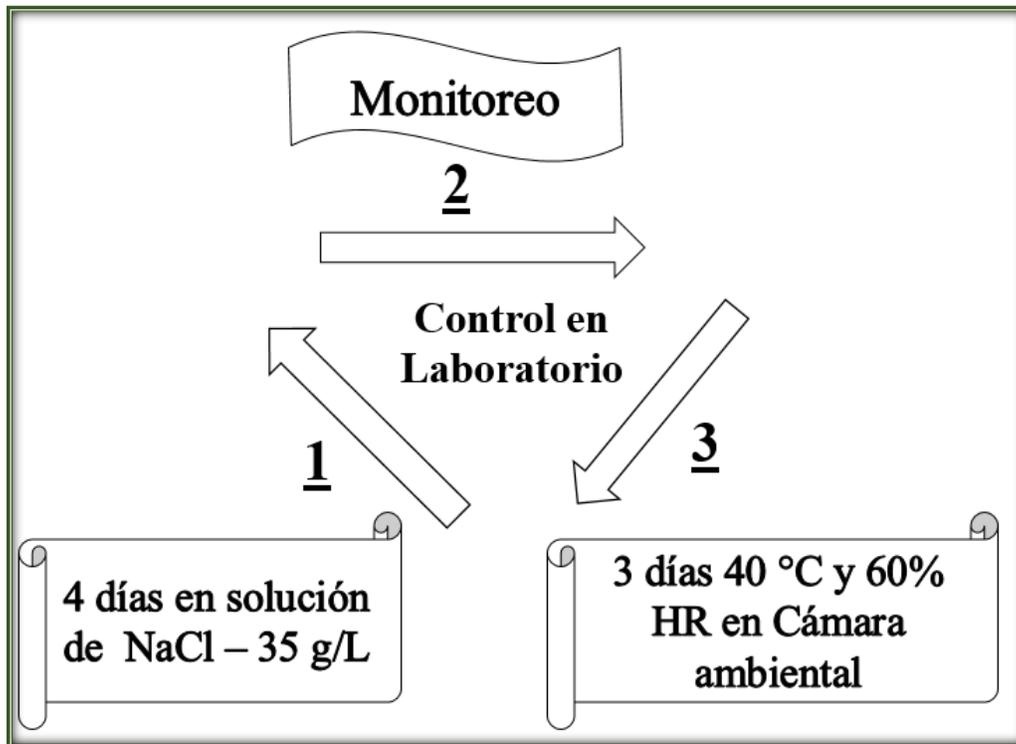


Fig. 50. Esquema del control de los ciclos de inmersión-secado de la exposición a ambiente controlado en laboratorio.

3.5.5 Determinación del contenido de cloruros

La determinación del contenido de cloruros para los medios de exposición natural y de laboratorio se efectuó siguiendo el mismo procedimiento. Sin embargo, la determinación de la concentración de cloruros de los especímenes expuestos en laboratorio se realizó inmediatamente después de la activación de cada tipo de varilla, esto inferido a partir del monitoreo electroquímico. En el caso de los especímenes expuestos al ambiente natural la determinación se realizó a los 7 y 37 meses del inicio de la exposición.

Para ello algunos especímenes fueron sometidos a la prueba de tensión por compresión axial para recuperar muestras de concreto en la proximidad de la

interface varilla-concreto (8 mm aproximadamente), con el objetivo de determinar la concentración de cloruros (totales vs. % por peso de cemento).

En la figura 51 se observan algunas etapas de un espécimen seccionado hasta obtener finalmente una muestra de 40 x 50 x 50 mm. Los cortes a cada 8 mm fueron pulverizados para fabricar pastillas que a su vez fueron analizadas mediante la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX). Obteniéndose, como resultado un perfil de concentración de cloruros como se muestra en el esquema de la figura 52.



Fig. 51. Espécimen seccionado para recuperar una muestra de concreto en la proximidad de la interface varilla-concreto.

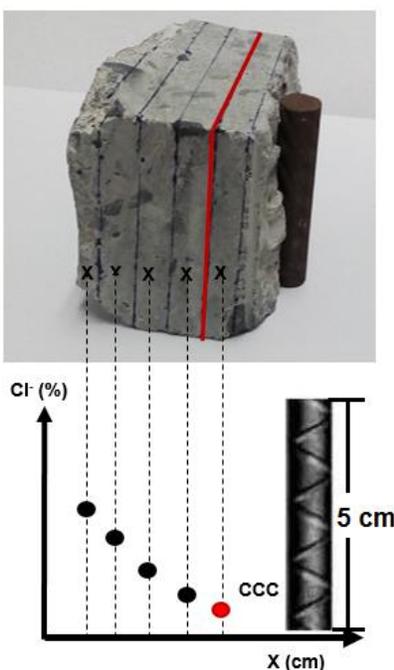


Fig. 52. Representación de la obtención del perfil de contenido de cloruros.

3.5.6 Seguimiento de la profundidad de carbonatación

El seguimiento de la profundidad de carbonatación (véase figura 53) para los especímenes expuestos a ambiente natural: marino y urbano/industrial, se realizó periódicamente. Para ello, algunos especímenes sin varilla fueron sometidos a la prueba de tensión por compresión axial, posteriormente, se les eliminó el polvo de la superficie del corte mediante aire seco a presión. Finalmente, se aplicó mediante un atomizador una solución que consistió en 1% de fenolftaleína en 96 % de alcohol etílico sobre toda la superficie de concreto, revelando así, las profundidades de carbonatación. Inmediatamente, se realizaron medidas a cada centímetro con un vernier. A continuación, se analizó dicho frente de carbonatación.

Esta técnica colorimétrica permitió mediante la reacción de la fenolftaleína con la superficie del concreto, un cambio de tonalidad a rosa mexicano en las zonas donde el valor de pH es superior a 9, mientras que en las zonas donde el CO₂ reaccionó con los álcalis del concreto y perdió la alcalinidad (pH inferior a 9) la fenolftaleína permaneció incolora.



Fig. 53. Cambio de coloración de la fenolftaleína revelando el frente de carbonatación. Profundidad del frente de avance de carbonatación.

3.5.7 Modelación matemática mediante elemento finito

Con efecto de analizar la distribución de las corrientes de corrosión de la macrocelda generada entre las áreas de las varillas pasivas y la varilla activa, se realizó la modelación del sistema galvánico con ayuda del software comercial Comsol Multiphysics®.

Mediante la determinación de las curvas de Tafel se obtuvieron los parámetros con los que se alimentó el modelo. Para ello se utilizaron los especímenes fabricados en la primera fase (véase la sección 3.4.2 y la figura 38), mientras algunos permanecieron sin carbonatar otros fueron carbonatados totalmente.

Previo a la aplicación de la técnica de extrapolación de Tafel, los especímenes fueron saturados en agua ordinaria de la red doméstica durante una semana (véase figura 54). Una vez concluido este tiempo, se realizaron las mediciones a temperatura del laboratorio (20 °C). Se obtuvieron las pendiente anódica y catódica (β_a y β_c , respectivamente), además del E_{corr} e i_{corr} .

La resistividad del sistema acero-concreto fue determinada mediante el modulo Ru de Gamry® y mediante IR compensación del mismo equipo.



Fig. 54. Sistema de tres electrodos para la aplicación de la técnica de extrapolación de Tafel.

El comportamiento de polarización de los sistemas electroquímicos puede ser descrito por la ecuación de Butler-Volmer, ya sea para la varilla de acero en estado activo (22) o en estado pasivo (23). Esta ecuación corresponde a la suma algebraica de las densidades de corriente anódica y catódica involucradas en el sistema electroquímico que sigue la ley de Tafel (SOHAIL, 2013).

$$j_a = j_{corr}^a \left[\exp\left(\frac{\log(10)(E^a - E_{corr}^a)}{\beta_a^a}\right) - \exp\left(\frac{-\log(10)(E^a - E_{corr}^a)}{\beta_c^a}\right) \right] \quad (22)$$

$$j_p = j_{corr}^p \left[\exp\left(\frac{\log(10)(E^a - E_{corr}^p)}{\beta_a^p}\right) - \exp\left(\frac{-\log(10)(E^a - E_{corr}^p)}{\beta_c^p}\right) \right] \quad (23)$$

Donde

- j_a y j_p son las densidades de corriente aparente (o neta) que fluye a través de la interface electroquímica para los estados activo y pasivo, respectivamente.
- E_a y E_p son los potenciales de polarización (alrededor de E_{corr}) de la varilla activa y pasiva, respectivamente.

- j_{corr}^a y j_{corr}^p son las densidades de corriente de corrosión ocurridas en la varilla de acero activa y pasiva, respectivamente.
- E_{corr}^a y E_{corr}^p son los potenciales libres de corrosión de las varillas activa y pasiva, respectivamente.
- β^a y β^p son las constantes anódicas de Tafel para el acero activo y pasivo, respectivamente ($\beta^a < \beta^p$).
- β^c y β^p son las constantes catódicas de Tafel para el acero activo y pasivo, respectivamente ($\beta^c \approx \beta^p$).

3.5.7.1 Modelo numérico

La figura 55a, muestra la geometría del mallado por elemento finito de los especímenes simulados, correspondiente a la forma y dimensiones de los especímenes. El modelo geométrico se compone de dos cilindros concéntricos. El cilindro interior simula al concreto carbonatado y tiene una varilla de acero activa en el centro (figura 55b). El cilindro exterior rodea al interior y este simula un concreto no carbonatado. De acuerdo con la prueba experimental que se desea simular, el cilindro exterior tiene cuatro varillas de acero en estado pasivo (figura 55c). Todas las varillas tienen 1 cm de diámetro y 5 cm de longitud como área de estudio. La distancia entre la varilla activa y las pasivas es de 6.8 cm de centro. Los cilindros de concreto tienen diferentes valores de resistividad en función del grado de carbonatación de concreto, es decir, el concreto carbonatado ofrece una mayor resistividad al paso de corriente que el concreto no carbonatado a la corriente.

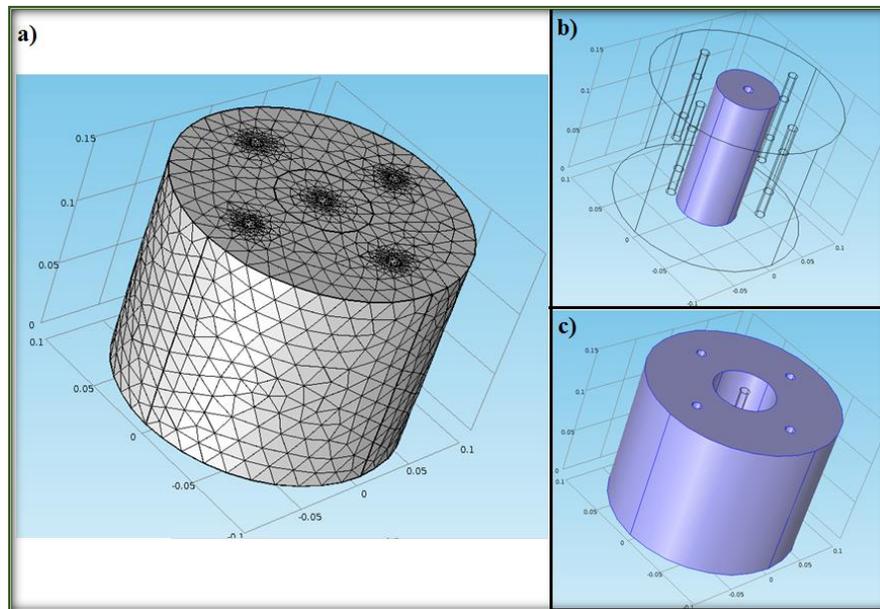
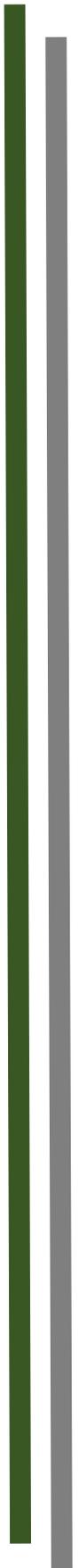


Fig. 55. Modelo geométrico del espécimen por Comsol.

La solución numérica se logró mediante el método de elemento finito (MEF), las simulaciones se llevaron a cabo gracias al módulo AC / DC (Módulo de Corriente Alterna/ Corriente Directa) del software comercial Comsol Multiphysics®. El módulo de AC / DC permitió la simulación del concreto como medio de resistencia eléctrica continua con la ley de conservación de la carga y la ley de Ohm. Finalmente, se obtuvieron diferentes valores de corriente de corrosión para las varillas de AC, ATT y AG y las dos relaciones agua/cemento.

**CAPÍTULO IV.
ANÁLISIS Y
DISCUSIÓN DE
RESULTADOS**



En este capítulo se presentan los resultados y la correspondiente discusión de los mismos relacionados con la caracterización y experimentación obtenidos durante la investigación.

4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS VARILLAS DE ACERO

4.1.1 Microdureza

La figura 56 muestra los resultados obtenidos de los ensayos de microdureza de las varillas AC y ATT. La línea horizontal punteada corresponde al valor establecido como límite para diferenciar entre una dureza baja (< 240 HV) y media (> 240 HV), según lo establecido en la norma ASTM E-384.

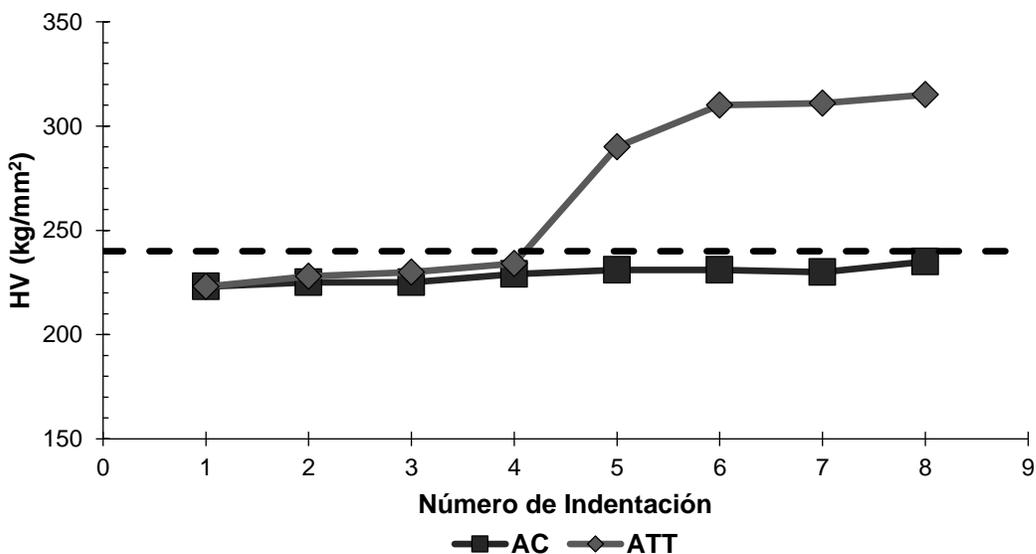


Fig. 56. Comparativa de los valores de microdureza de las varillas AC y ATT.

Como se observa en la figura, la microdureza de la varilla AC y ATT en las incisiones 1-4 localizadas en la sección central de las varillas son muy similares y consideradas como baja. No obstante, en las incisiones 5-8 localizadas hacia el exterior de la sección transversal de las varillas la microdureza obtenida fue mayor para la varilla ATT clasificada como microdureza media. Los resultados obtenidos corresponden con los rangos de las microdurezas de las fases ferrita-perlita (dureza baja) y

martensita revenida (dureza media) reportados en la literatura (Nadlene et al., 2011; Sarkar et al., 2005). Lo anterior infiere que los valores obtenidos son debidos principalmente a las diferencias microestructurales producto del proceso de fabricación de las varillas.

4.1.2 Metalografía

Mediante un análisis metalográfico realizado, fue posible caracterizar las diferencias microestructurales presentes en la superficie de las varillas. En la figura 57 se presenta la imagen obtenida a través de microscopía óptica de la sección transversal de una varilla AC, en donde se observa claramente la microestructura uniforme de las fases ferrita y perlita, distribuidas en la sección analizada.

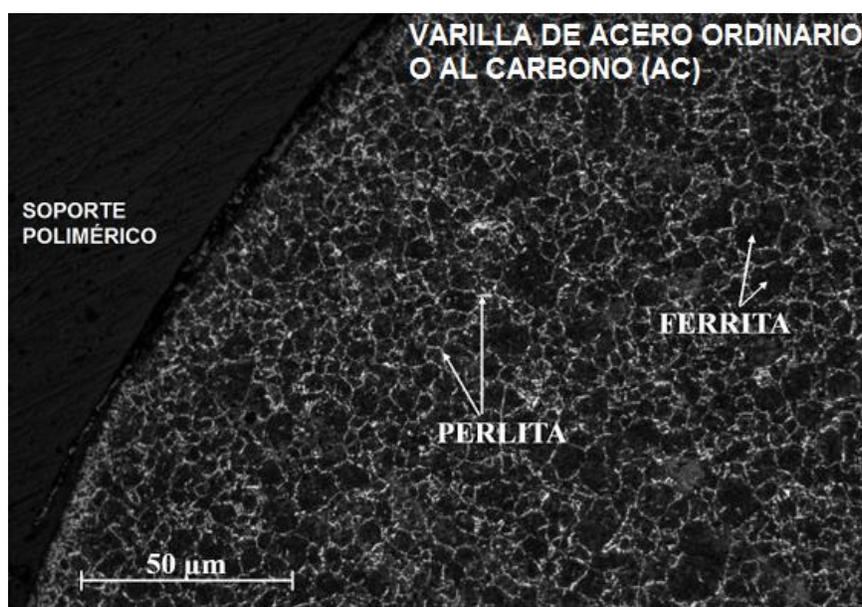


Fig. 57. Microestructura de la varilla AC, composición fásica; ferrita-perlita.

En la figura 58 se presenta una imagen obtenida de una sección transversal de la varilla ATT. En ella se observan dos fases principales: una fase localizada en la sección media correspondiente a la fase ferrita-perlita y otra fase ubicada hacia la periferia de la sección transversal identificada como martensita producto del proceso de revenido. Ésta última fase midió en promedio 0.16 mm (160 μm a partir de la periferia exterior).



Fig. 58. Microestructura de la varilla ATT, composición física; ferrita-perlita y martensita.

Contrastando los resultados de las microdurezas con las imágenes metalográficas se confirmó que las microdurezas clasificadas como baja correspondieron al núcleo de las varillas AC y ATT caracterizado por la fase ferrita-perlita. Por su parte, las microdurezas clasificadas como media fueron características de la fase martensita, encontrada en la periferia de la sección de la varilla ATT.

Las figuras 59 y 60 corresponden a la sección transversal de las varillas de acero galvanizado (AG) utilizadas en México y Francia respectivamente. En ellas se muestra el espesor de recubrimiento de zinc obtenido mediante el proceso de galvanización por inmersión en caliente. Se constata, que el espesor promedio de la capa de zinc fue de 0.102 mm (102 µm) para las varillas galvanizadas en México y de 0.043 mm (43 µm) para las de Francia, cabe mencionar que el espesor de las varillas galvanizadas en Francia fue ligeramente inferior a los 50 µm recomendados en la normativa (ASTM A-767, 2013).

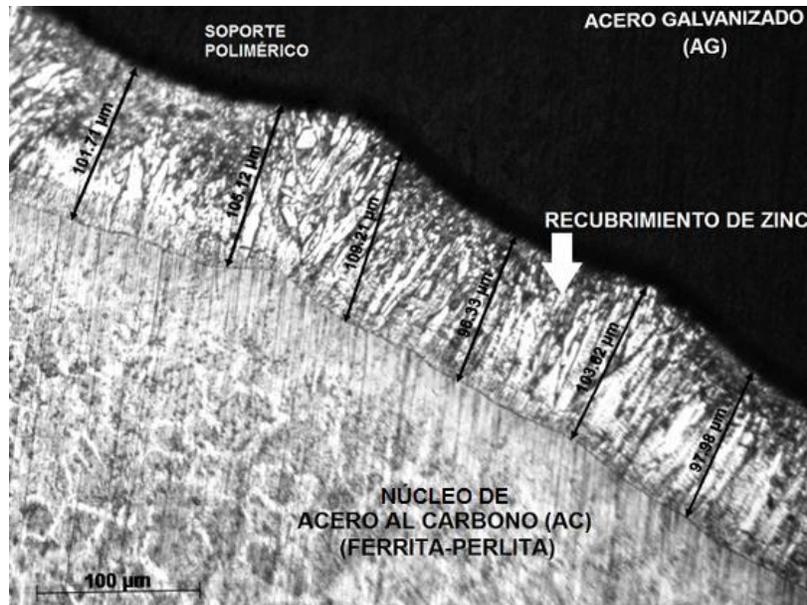


Fig. 59. Microestructura de la varilla AG utilizado en México: núcleo varilla ordinaria de acero (AC) y espesor del Zinc.

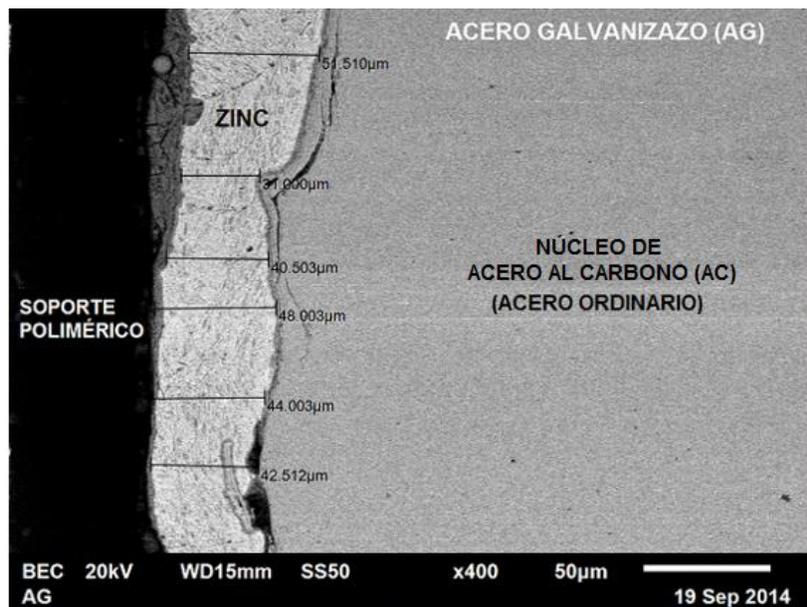


Fig. 60. Microestructura de la varilla AG utilizado en Francia: núcleo varilla ordinaria de acero (AC) y espesor del Zinc.

En la figura 61 se presenta una imagen obtenida de una sección transversal de la varilla AD. En ella se pueden identificar los espesores correspondientes a los recubrimientos con los que cuenta este tipo de acero, el primero es el de zinc con

un espesor promedio de 0.044 mm (44.1 μm), el cual cumple con los 35 μm de espesor de zinc recomendados para este tipo de acero (ASTM A-1055, 2008). El segundo recubrimiento es el epóxico el cual cuenta con un espesor de 0.321 mm (321.6 μm). El espesor final resultante de la suma de los dos recubrimientos debe ser de 300 μm como mínimo según lo especificado en la norma antes citada. Es claro que este tipo de acero cumple con dichas especificaciones.

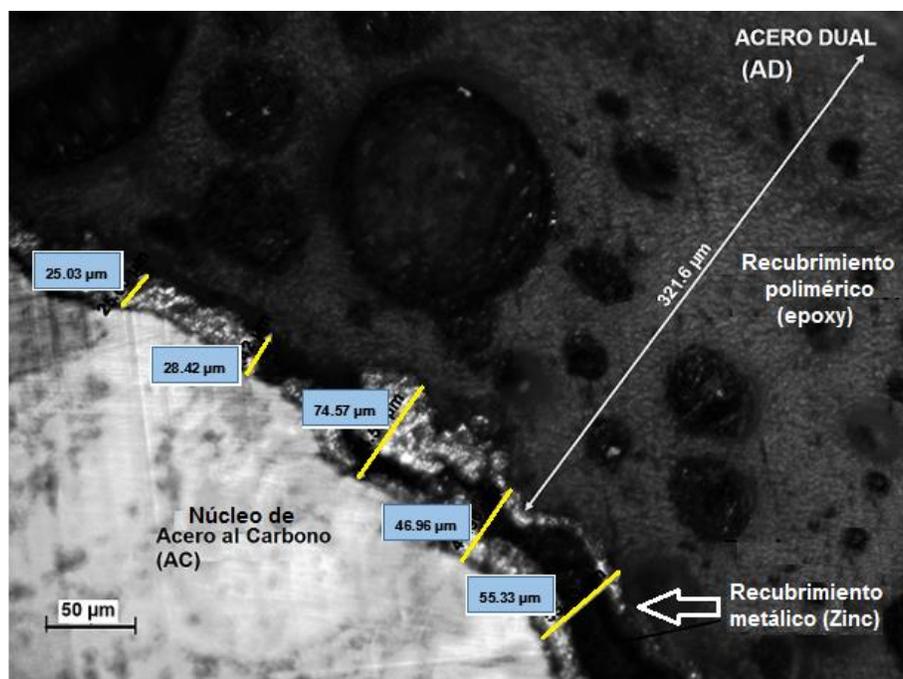


Fig. 61. Microestructura de la varilla AD: acero al carbono, recubrimiento de zinc y recubrimiento epóxico.

4.2 EXPOSICIÓN AMBIENTE NATURAL

4.2.1 Exposición a ambiente marino

4.2.1.1 Comportamiento electroquímico

Para la interpretación de los resultados electroquímicos, en este trabajo se tomaron en cuenta los criterios aceptados (ASTM C-876, 2000 y Andrade & Alonso, 1996) para establecer la pasivación, iniciación/despasivación y propagación de la corrosión de los diferentes tipos de varilla utilizadas en la investigación. Dichos

criterios fueron incorporados en las gráficas mediante líneas horizontales punteadas.

Potencial de corrosión (E_{corr})

En las figuras 62 y 63 se muestra el comportamiento del E_{corr} durante el tiempo de exposición de los distintos tipos de varilla de acero, en las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente. Debido a que el monitoreo electroquímico no fue realizado constantemente, en las gráficas solo se presentan los lapsos de tiempo en los que se realizaron mediciones.

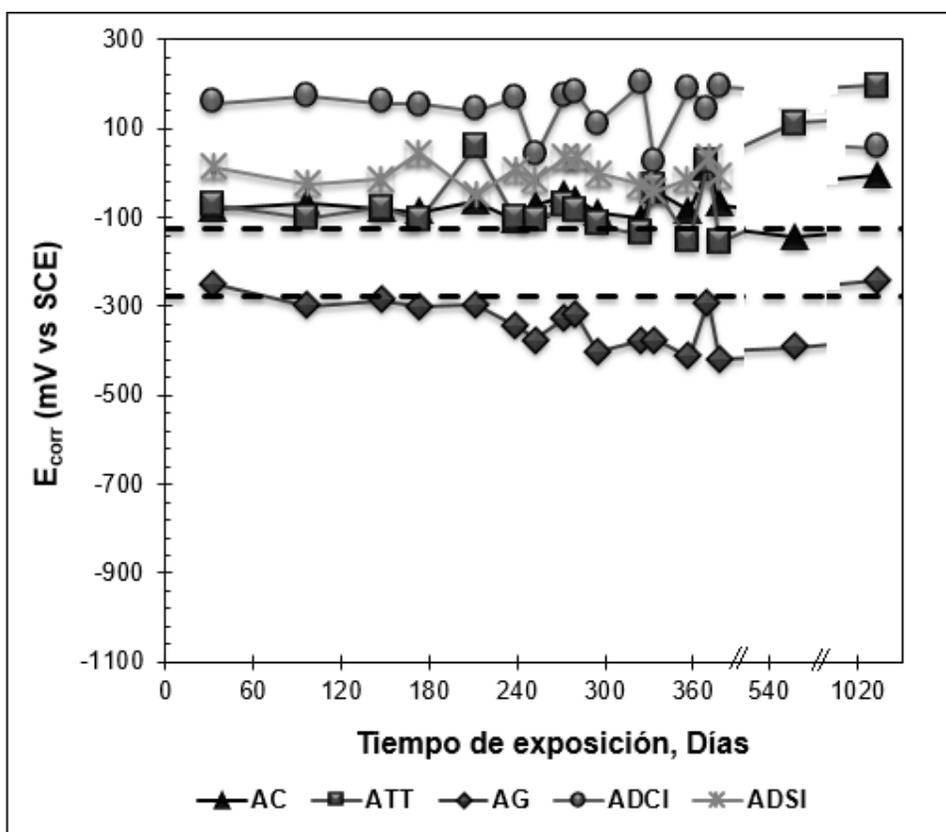


Fig. 62. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla expuestas a ambiente marino: relación a/c=0.45.

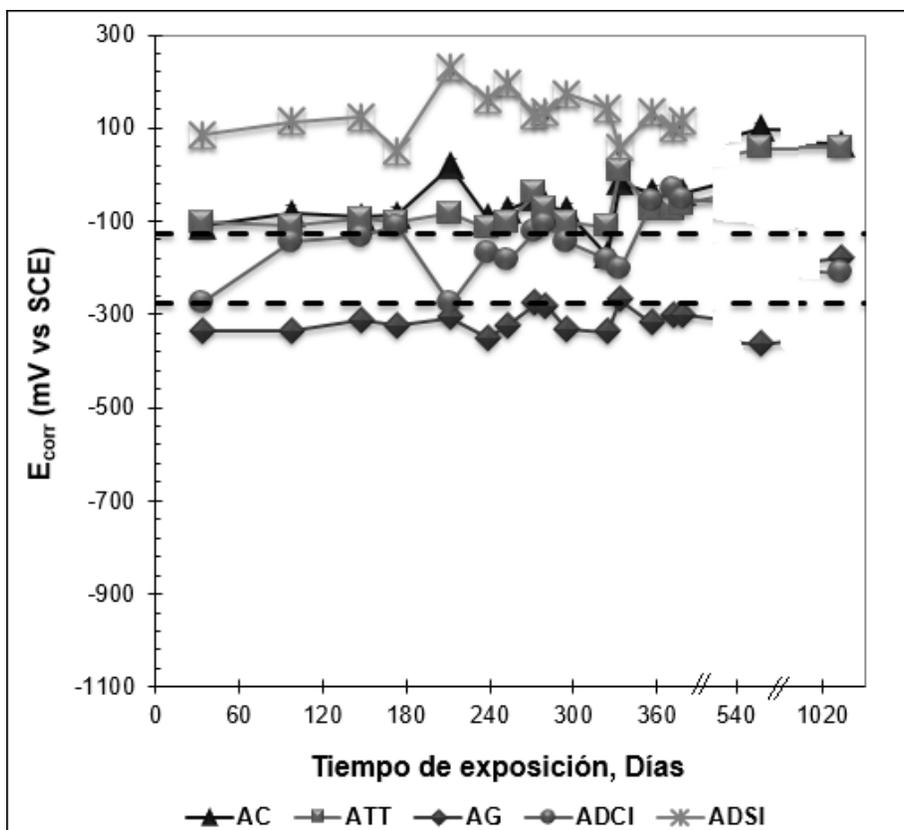


Fig. 63. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla expuestas a ambiente marino: relación a/c=0.65.

En las figuras 62 y 63 se pueden apreciar los valores de E_{corr} adquiridos por las varillas ATT y AC los cuales permanecieron próximos a -100 mV_{SCE} durante el período evaluado, indicando una baja probabilidad de corrosión. Estos valores ya han sido reportados para la fase de iniciación de las varillas AC y ATT embebidas en concreto (Fajardo et al., 2009; Keleştemur & Yildiz, 2009; Morris et al., 2004). La varilla AG presentó valores entre -400 y -300 mV_{SCE} , característicos de un estado pasivo de este tipo de varilla. Se sabe que esta técnica no es apropiada para las varillas ADSI ya que no existe una interacción entre el medio electrolítico y la superficie metálica, sin embargo, se tomó como referencia para ilustrar las diferencias cuando el recubrimiento epóxico presenta algún daño, este es el caso de la varilla ADCI embebida en los especímenes con relación a/c de 0.65 la cual a diferencia de los valores de potencial positivos que presentó la varilla ADSI, ésta adquirió en algunas lecturas potenciales de -300 mV_{SCE} los cuales son

representativos de la varilla AG. Estos valores de la varilla ADCI son similares a los reportados por Dong en la etapa de iniciación (Dong et al., 2012).

Las fluctuaciones del E_{corr} están relacionadas a la influencia de las condiciones ambientales que se presentaron al momento del monitoreo principalmente.

Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})

En las figuras 64 y 65 se muestra el comportamiento de i_{corr} durante el tiempo de exposición de los diferentes tipos de varillas de acero en las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente. Los valores mostrados fueron obtenidos periódicamente con el equipo Galvapulse.

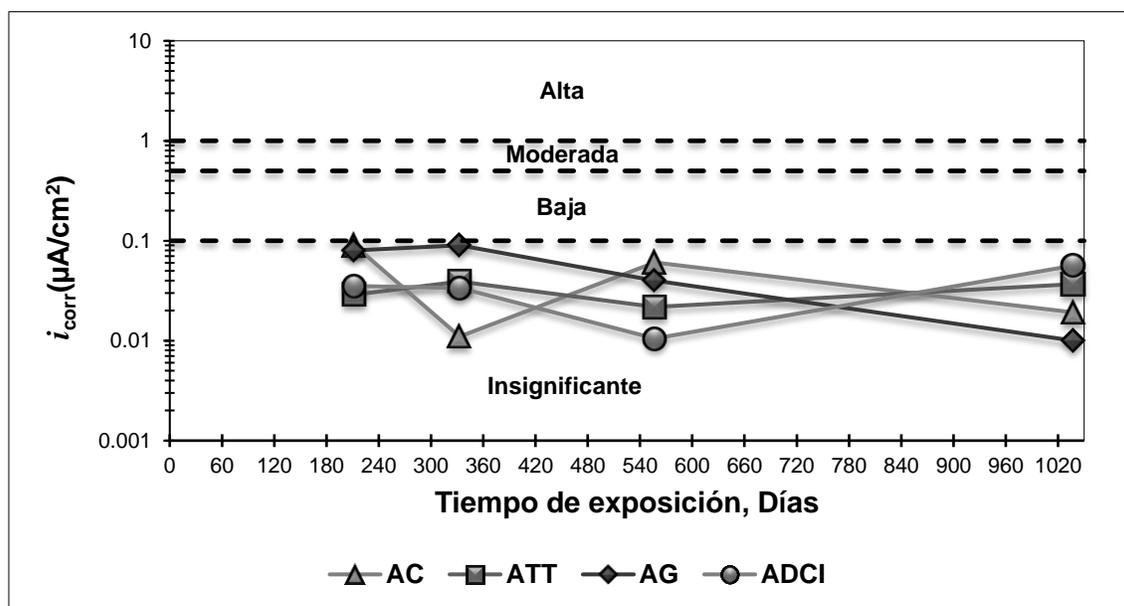


Fig. 64. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente marino: relación a/c = 0.45.

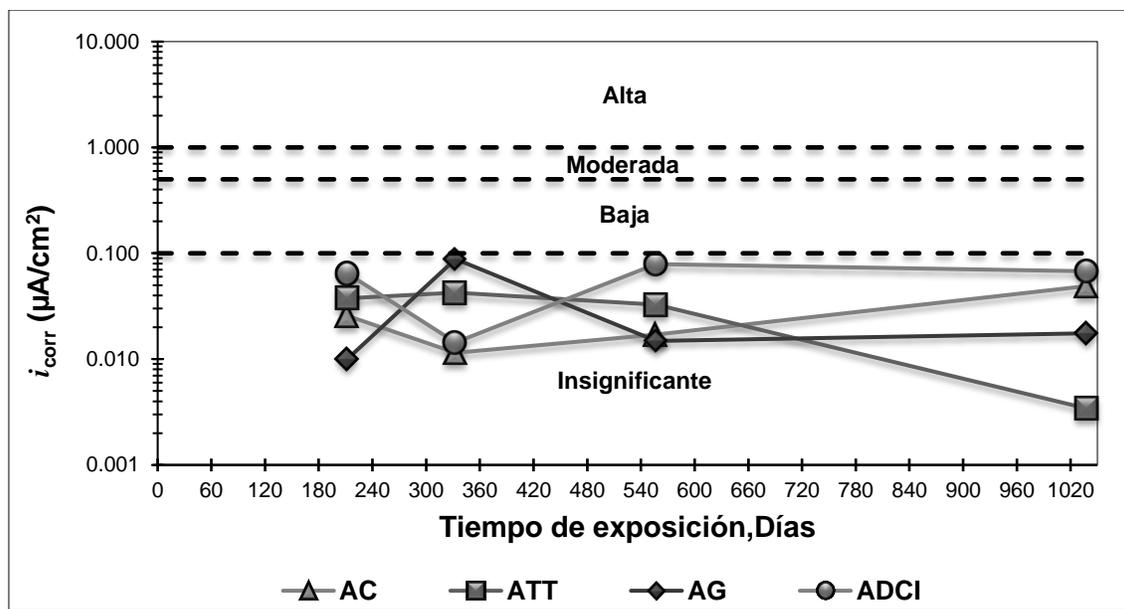


Fig. 65. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestos a ambiente marino: relación a/c = 0.65.

Como se observa en las figuras los valores de i_{corr} se presentan por debajo del valor crítico de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando una velocidad de corrosión insignificante, infiriendo con ello la pasividad de los diferentes tipos de varilla.

4.2.1.2 Contenido de cloruros

En las figuras 66 y 67 se muestran los perfiles de contenido de cloruros de los especímenes expuestos a ambiente marino para las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente, mismos que son expresados en porcentaje por peso de cemento. Cada valor del perfil representa el promedio de la concentración encontrada en un espesor de 8 mm de concreto. La concentración máxima permitida de cloruros en el diseño de nuevas estructuras de concreto reforzado expuestas a un ambiente agresivo o marino (ACI-318, 2008), está marcada por una línea horizontal punteada dentro de las figuras.

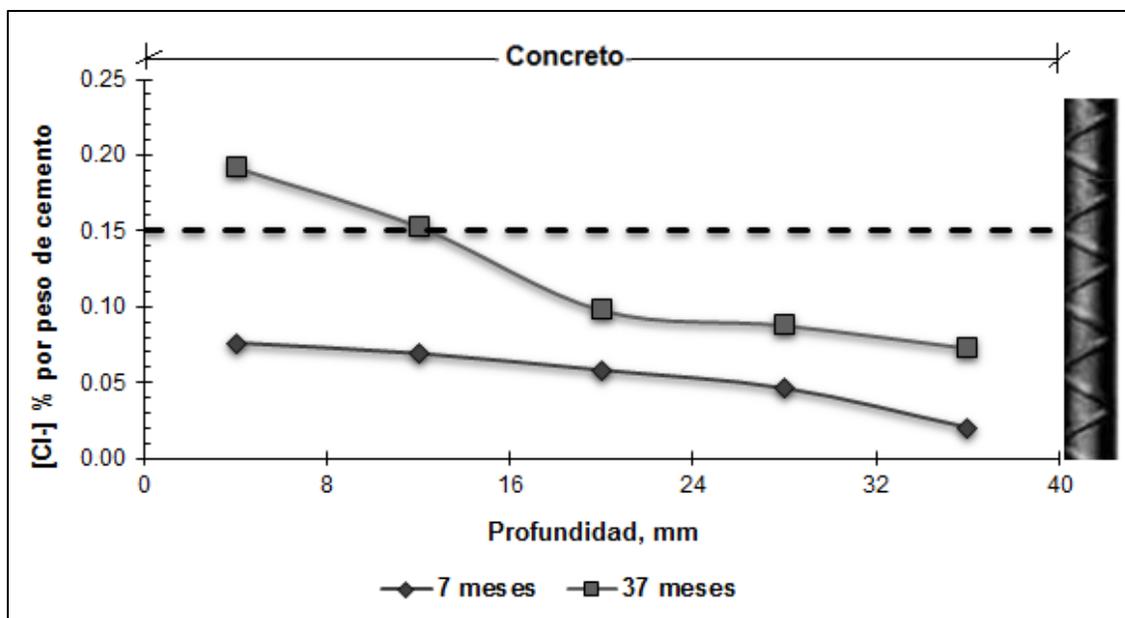


Fig. 66. Perfiles de contenido cloruros para 7 y 37 meses de exposición a ambiente marino: relación a/c de 0.45.

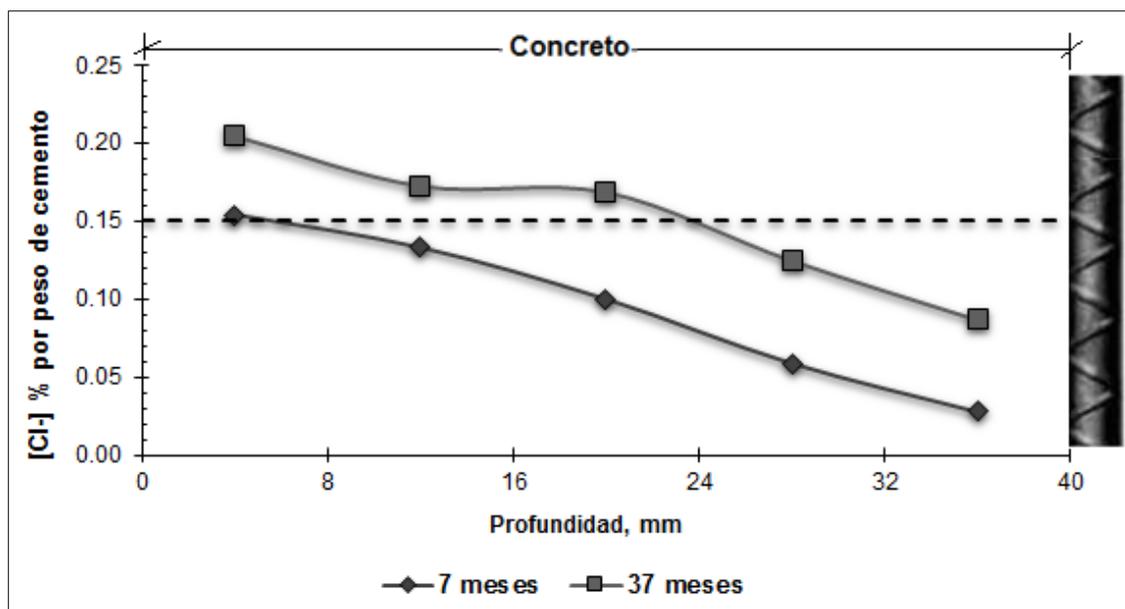


Fig. 67. Perfiles de contenido cloruros para 7 y 37 meses de exposición a ambiente marino: relación a/c de 0.65.

Como se puede observar en las figuras anteriores la concentración de cloruros disminuye con respecto a la profundidad en ambas relaciones a/c. De igual manera, se puede apreciar como dicha concentración incrementa con respecto al tiempo de exposición, siendo ligeramente mayor para los especímenes fabricados con relación a/c de 0.65.

Sin embargo, la concentración de cloruros en la interface varilla-concreto aún se encuentra por debajo del valor crítico, lo cual constata al comportamiento electroquímico obtenido que indica el estado pasivo de los diferentes tipos de varilla.

Por medio del uso del programa de cómputo Life-365, se obtuvo un tiempo estimado de 7.5 años y 10.5 años para las relaciones a/c de 0.65 y 0.45 respectivamente, para que una concentración mínima de cloruros (definida en 0.15% ppc) alcance la interface varilla-concreto.

Por otro lado, en la actualidad la concentración crítica de cloruros (CCC) es un valor que ha sido estudiado por diversos investigadores. Sin embargo, no se ha establecido estrictamente un valor puntual debido a la variabilidad en los resultados obtenidos, los cuales están influenciados por una gran cantidad de factores relacionados con el concreto y las características superficiales de las varillas.

Aunado a ello, los especímenes que se exponen generalmente no cuentan con un diseño que brinde la protección adecuada del extremo de la varilla que frecuentemente queda expuesta al medio, y vulnerable a la acción de los agentes agresivos, lo que podría conducir a un proceso de corrosión en esta parte del espécimen (véase figura 68). Estos problemas han sido evidenciados recientemente por Hartt (Hartt, 2016), quien demostró que los resultados electroquímicos pueden ser mal interpretados sino se eliminan las alteraciones por los procesos de corrosión fuera del área de estudio (véase figura 69).



Fig. 68. Sección de un espécimen diseñado con protección al intemperismo y diferentes varillas extraídas sin presencia de daño en la interface varilla-concreto-ambiente.



Fig. 69. Corrosión de la varilla de acero en la interface varilla-concreto-ambiente (Hartt, 2016).

Normalmente las investigaciones relacionan un determinado cambio electroquímico con la despasivación de la varilla embebida en el concreto, para ello, suponen que ésta se dará en el área de estudio previamente delimitada. Sin embargo, la falta de una protección en la interface varilla-concreto-ambiente podría traer como consecuencia la activación de la varilla por esta última zona como lo muestra Hartt.

Por ende, los resultados de concentración de cloruros se relacionarían erróneamente con los encontrados en la interface varilla-concreto del área delimitada. En esta investigación se evitó la influencia de estos factores, lo cual se evidencia en la figura 68 donde los diferentes tipos de varilla no muestran algún indicio de productos de corrosión en la interface varilla-concreto-ambiente, con lo que se presume que el proceso de corrosión iniciará en el área especificada y que los resultados de concentración crítica de cloruros corresponderán exclusivamente a ésta.

4.2.1.3 Profundidad de carbonatación

En la figura 70 se muestra el seguimiento de la profundidad carbonatación de los especímenes fabricados con las relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.65 expuestos a ambiente costero (Veracruz). Adicionalmente, se incluye la Tabla 9 con los datos experimentales obtenidos del último análisis, en ella se muestran el tiempo (t), la profundidad de carbonatación (x_{CO_2}) y la constante (k_{CO_2}) obtenida a partir de los datos experimentales antes mencionados.

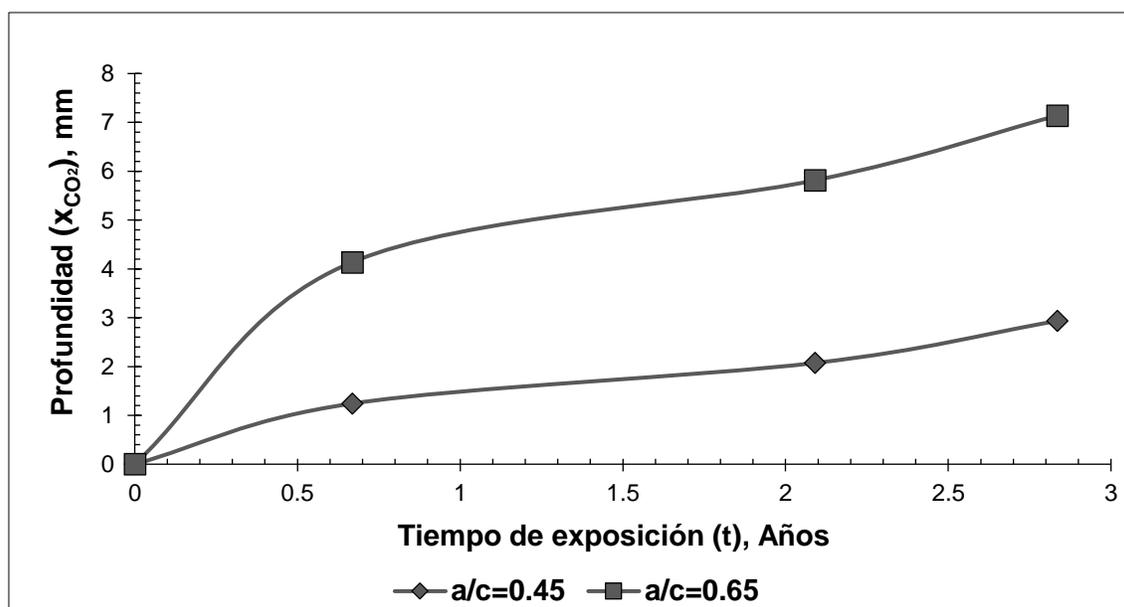


Fig. 70. Seguimiento de la profundidad de carbonatación para la exposición ambiente costero: a/c de 0.45 y 0.65.

Tabla 9. Datos obtenidos a partir de análisis de profundidad de carbonatación.

a/c	Tiempo (t), años	Profundidad (x_{CO_2}), mm	k_{CO_2} , mm/año ^{1/2}
0.45	2.84	2.93	1.74
0.65		7.14	4.24

Como se muestra en la figura la profundidad de carbonatación de los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.65 fue mayor, comparada con la que presentaron los especímenes correspondientes a la relación a/c de 0.45, lo cual corresponde con lo previsto.

Con los datos obtenidos experimentalmente mostrados en la tabla 9, se estimaron los tiempos en que el frente de carbonatación llegaría a la interface varilla-concreto. Así, el tiempo estimado para los especímenes correspondientes a la relación a/c de 0.65 requerirán de ≈ 89 años, mientras que para los fabricados con la relación a/c de 0.45 se estiman ≈ 529 años.

Comparando las estimaciones del tiempo requeridas para que la profundidad de carbonatación o la concentración crítica de cloruros, lleguen a la interface varilla-concreto y de inicio a la despasivación de la varilla, se puede inferir que la concentración de cloruros es el mecanismo que predomina que iniciará el proceso de corrosión. Sin embargo, cabe señalar que la concentración utilizada para la estimación corresponde a la establecida por el ACI (definida en 0.15 %ppc), la cual es inferior a la encontrada en esta investigación en ambiente controlado de laboratorio (véase sección 4.3.3), así, como en otras investigaciones, por lo que el tiempo podría incrementar. Aunado a ello, el efecto del cambio climático puede inferir en la velocidad de ingreso de los agentes agresivos a través del recubrimiento de concreto hacia su interface con el refuerzo, pudiendo ser cualquiera el detonante del proceso de corrosión (Castro & Mendoza, 2010).

4.2.2 Exposición en ambiente urbano/industrial

4.2.2.1 Comportamiento electroquímico

Potencial de corrosión (E_{corr})

En las figuras 71 y 72 se muestra el comportamiento del E_{corr} de los diferentes tipos de varilla de acero durante el período de exposición, esto para las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente, las cuales fueron expuestas en ambiente urbano/industrial.

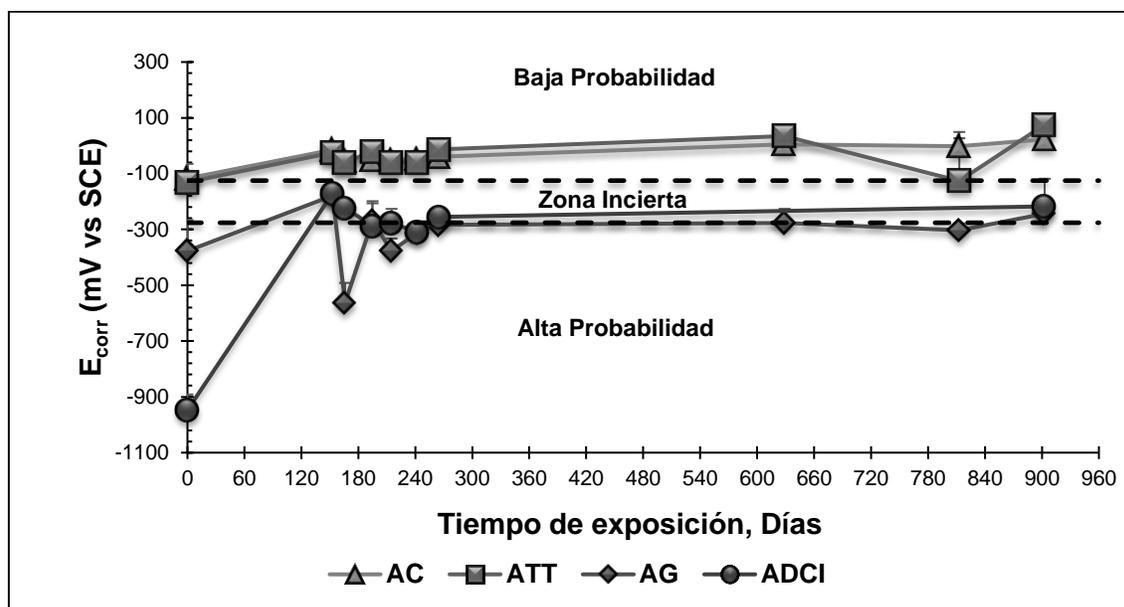


Fig. 71. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla: a/c=0.45, exposición ambiente urbano/industrial.

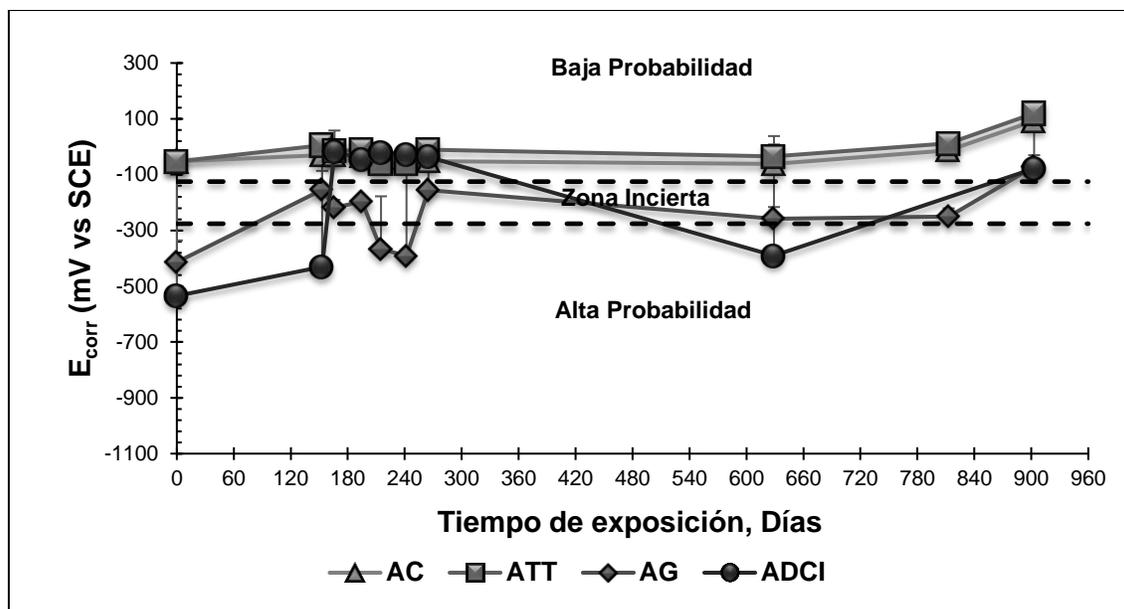


Fig. 72. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla: $a/c=0.65$, expuestos a ambiente urbano/industrial.

Como se puede observar en las figuras las varillas AC y ATT se mantienen alrededor de los -100 mV correspondiendo a una baja probabilidad de corrosión, valor ya reportado en la literatura para la fase de iniciación de este tipo de varillas embebidas en concreto (Fajardo et al., 2009; Keleştemur & Yildiz, 2009). La varilla AG presentó un potencial de -400 mV al inicio de la exposición, posteriormente el comportamiento presentado fue de valores más positivos cercanos a los -300 mV para ambas relaciones a/c . Este último comportamiento se atribuye a la reacción de la capa de ZnO con los iones OH^- (Tan & Hansson, 2008; Padilla & Alfantazi, 2014), indicando la pasivación de este tipo de varilla. En el caso de las varillas ADCI adquirieron inicialmente valores de E_{corr} negativos, los cuales corresponden a la activación del zinc.

Las fluctuaciones que se observan del comportamiento de E_{corr} correspondieron a la variación de las condiciones ambientales que se presentaron en el momento del monitoreo. Después de 950 días (2.6 años) de exposición el E_{corr} de los diferentes tipos de varillas se mantuvo en la zona de baja probabilidad de corrosión.

4.2.2.2 Profundidad de carbonatación

Tomando en cuenta que el valor del pH es un factor determinante en el comportamiento electroquímico de las varillas AG, en este trabajo se determinó para los concretos de ambas relaciones a/c: 0.45 y 0.65. Para ello se utilizó la metodología descrita en la tesis de Manrique (Manrique, 2011), esto permitió dar argumentos en los resultados electroquímicos.

En la figura 73 se pueden observar los valores de pH obtenidos a diferentes profundidades del recubrimiento del concreto después de 5 meses de exposición en ambiente urbano/industrial. Se puede constatar que el valor de pH de los concretos con los que se fabricaron los especímenes contaron con un valor aproximado de 12.5, adicionalmente se observa la influencia de la carbonatación que disminuyó el pH del concreto, pudiendo se observar el valor de ≈ 12.25 obtenido a partir del perfil de los primeros 8 mm de concreto en la relación a/c de 0.65.

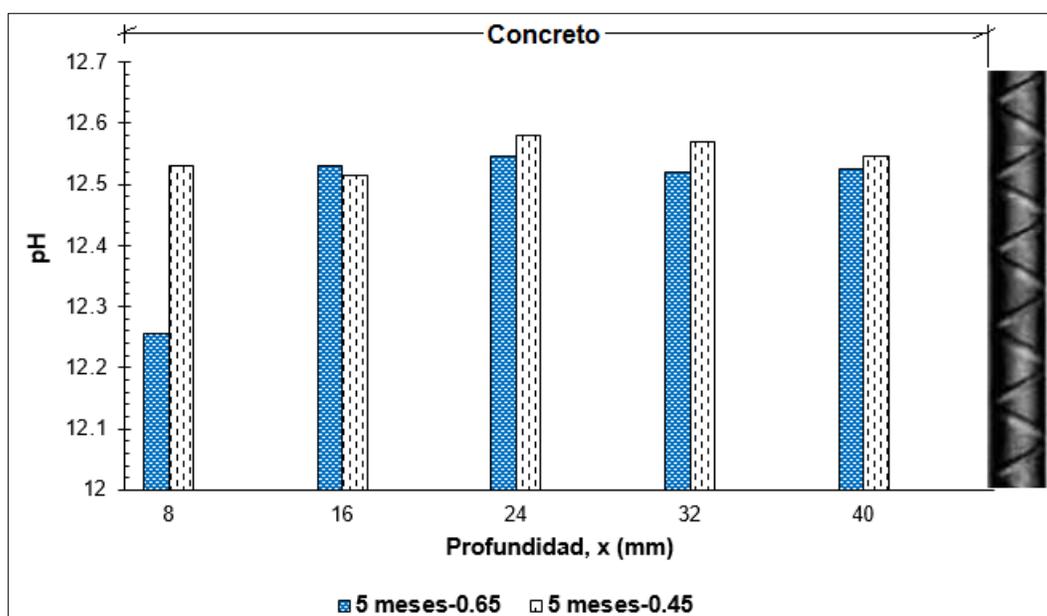


Fig. 73. pH de los concretos utilizados en la fabricación de los especímenes.

En la figura 74 se muestra el seguimiento de la profundidad carbonatación durante el tiempo de exposición de los especímenes fabricados con las relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.65, éstos expuestos a ambiente urbano/industrial (Nuevo León). Adicionalmente, se incluye la Tabla 10 con los datos obtenidos del último análisis de la profundidad de carbonatación, en ella se muestran el tiempo (t), la profundidad de carbonatación (x_{CO_2}) y la constante k_{CO_2} obtenida a partir de los datos experimentales antes mencionados.

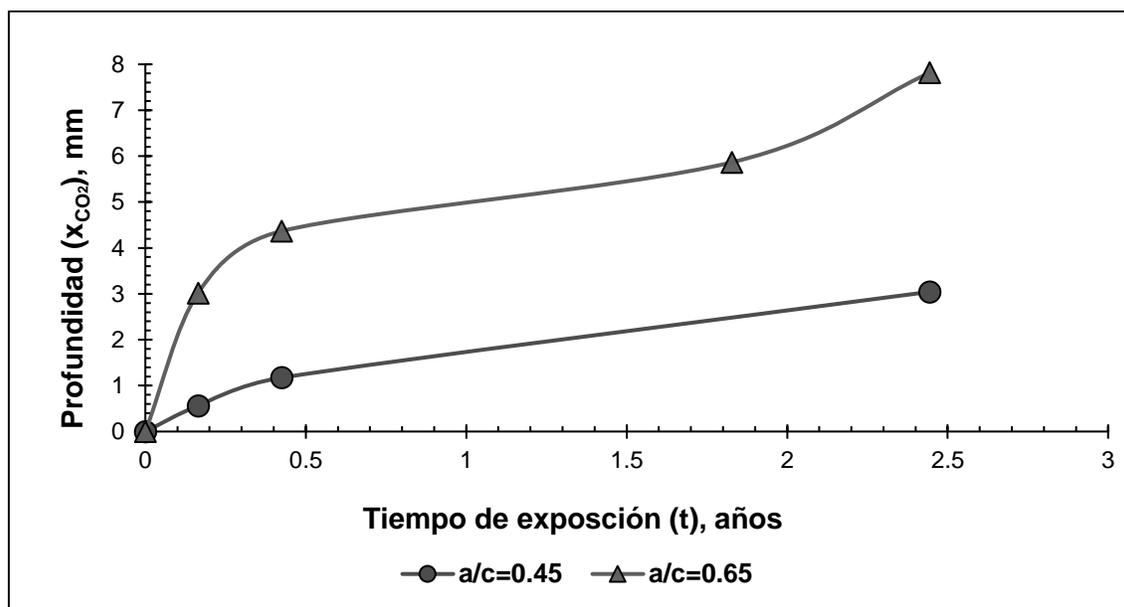


Fig. 74. Seguimiento de la profundidad de carbonatación para la exposición ambiente urbano/industrial: a/c de 0.45 y 0.65.

Tabla 10. Datos obtenidos a partir de análisis de profundidad de carbonatación

a/c	Tiempo (t), años	Profundidad (x_{CO_2}), mm	k_{CO_2} , mm/año ^{1/2}
0.45	2.44	3.04	1.95
0.65		7.81	5.00

De la figura anterior es posible observar que la profundidad de carbonatación de los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.65 fue mayor a la presentada por los especímenes correspondientes a la relación a/c de 0.45.

A partir de los datos obtenidos de la exposición se realizaron estimaciones del tiempo en que el frente de carbonatación llegaría a la interface varilla-concreto, así, para los especímenes con relación a/c de 0.65 se requerirán ≈ 64 años y para la relación a/c de 0.45 ≈ 420 años.

Los resultados electroquímicos de E_{corr} obtenidos durante el monitoreo concuerdan con estos resultados, donde el frente de carbonatación aún se encuentra lejos de la interface varilla-concreto en ambas relaciones a/c, precisando la baja probabilidad de corrosión de los distintos tipos de varillas de acero.

4.2.3 Discusión de resultados de exposición en ambiente natural

Como se puede observar en las diferentes figuras del comportamiento electroquímico, los valores obtenidos de E_{corr} indican una baja probabilidad de corrosión y los valores de i_{corr} una insignificante velocidad de corrosión. Con esto se constata el estado pasivo de los diferentes tipos de varillas en las exposiciones de ambiente marino y urbano/industrial.

En la figura 75 se puede observar la comparación del seguimiento de la profundidad carbonatación de los especímenes fabricados con las relaciones agua/cemento de 0.65 y 0.45 expuestos a ambiente natural: marino (Veracruz) y urbano/industrial (Nuevo León).

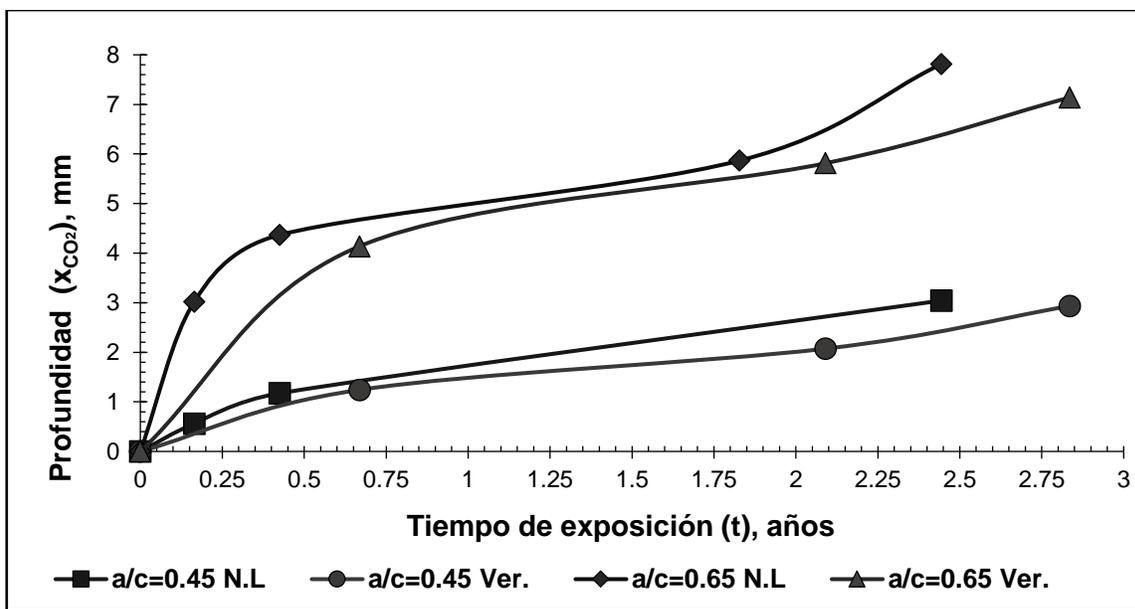


Fig. 75. Comparación de la profundidad de carbonatación de los concreto con relaciones a/c de 0.65 y 0.45, expuestos a ambiente natural: marino (Ver.) y urbano/industrial (N.L.).

En la figura anterior se puede apreciar como la profundidad de carbonatación de los especímenes fabricados con relación a/c de 0.65 fue mayor comparada con la que presentaron los especímenes de relación 0.45, lo cual corresponde a lo esperado.

Inicialmente se pensó que el avance de la carbonatación en los especímenes expuestos a ambiente marino sería menor que en el ambiente urbano/industrial. Esto debido a que en una zona industrial la concentración de CO_2 es mayor. Sin embargo, los valores obtenidos demuestran lo contrario. La profundidad de carbonatación fue muy similar en el ambiente urbano/industrial (N.L) con respecto al ambiente marino (Ver.), esto para ambas relaciones a/c .

Debido que el comportamiento electroquímico de los diferentes tipos de varillas de acero puede variar dependiendo del ambiente de exposición, es de suma importancia establecer que al menos la zona estudiada de Veracruz, no solo los cloruros deben ser objeto de estudio al momento de establecer el inicio, la despasivación y la propagación de la corrosión de las varillas de refuerzo. En efecto,

el frente de carbonatación podría llegar en menor tiempo a la interface varilla-concreto que la cantidad de cloruros requerida para la activación de la varilla.

4.3 EXPOSICIÓN A AMBIENTE CONTROLADO DE LABORATORIO

4.3.1 Comportamiento electroquímico

Potencial de corrosión (E_{corr})

En las figuras 76 y 77 se muestra el comportamiento de E_{corr} de los cuatro tipos de varilla con respecto al tiempo de exposición, para las relaciones a/c: 0.45 y 0.65 respectivamente. Las líneas horizontales corresponden la probabilidad de corrosión vs SCE (ASTM C-876, 2000).

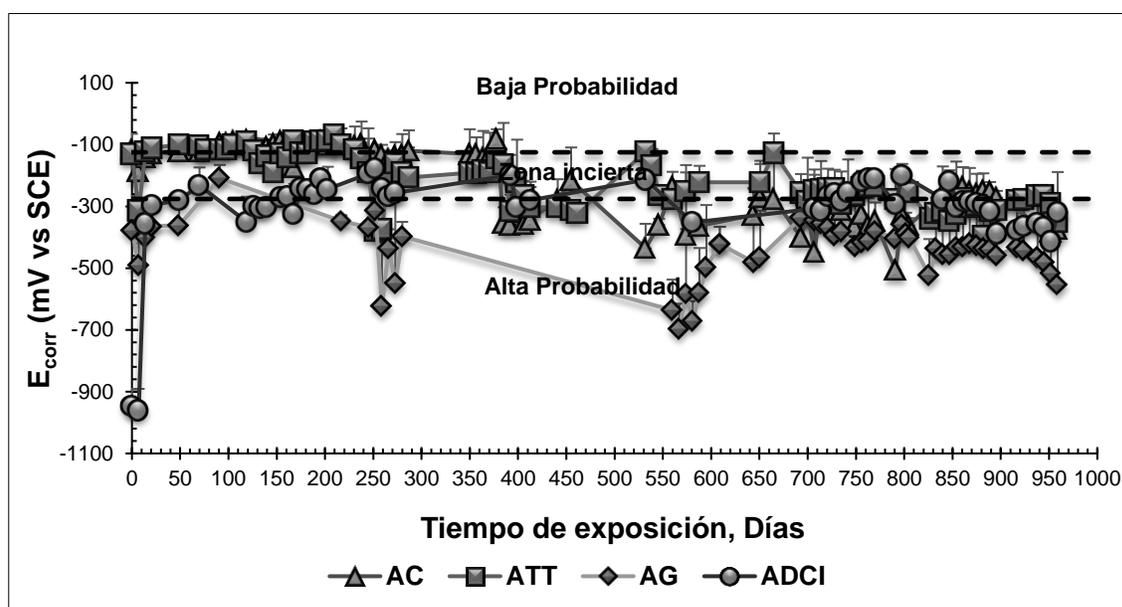


Fig. 76. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c=0.45.

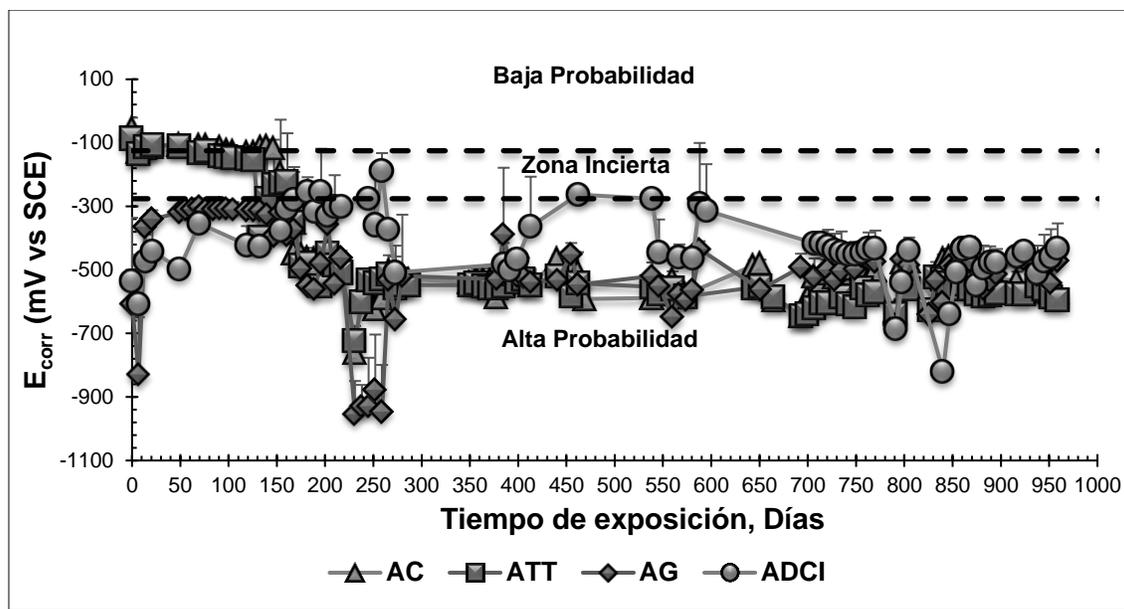


Fig. 77. Comportamiento del E_{corr} de los distintos tipos de varilla expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación $a/c=0.65$.

Como se puede observar en las figuras anteriores, las varillas AC y ATT embebidas en concretos con relación a/c de 0.45 y 0.65, adquirieron valores de E_{corr} cercanos a -100 mV desde el inicio de la exposición indicando una baja probabilidad de corrosión. Después de un tiempo de exposición las varillas ATT disminuyeron su potencial a valores próximos a -400 mV indicando una alta probabilidad de corrosión, sin embargo, rápidamente regresaron a valores que se sitúan en la zona incierta de probabilidad de corrosión. Posteriormente, dichos valores se situaron en la zona de alta probabilidad esta vez junto con las varillas AC. Para las varillas embebidas en los concretos con relación a/c de 0.45 las fluctuaciones en el potencial de corrosión oscilaron entre la zona incierta y de alta probabilidad de corrosión dando lugar a la despasivación de las varillas. Finalmente, el potencial osciló entre -500 y -600 mV, permaneciendo así hasta el final de la exposición.

En el caso de las varillas AG asumieron un comportamiento típico, con valores muy negativos al inicio de la exposición para posteriormente pasivarse, permaneciendo en ese estado hasta que se alcanzó una cantidad de cloruros suficiente en la interface varilla-concreto. En ese momento el potencial comenzó a fluctuar entre -

300 y -600 mV, pudiendo indicar que la protección catódica del recubrimiento de zinc ha comenzado a disminuir (Padilla & Alfantazi, 2014), lo cual concuerda con el potencial de -600 mV adquirido por las varillas AC (varilla base).

Finalmente, las varillas ADCI presentaron un comportamiento similar a las varillas AG como lo reporta Bellezze (Bellezze et al., 2006) diferenciándose en la permanencia durante más tiempo en valores que fluctúan de la zona incierta a alta probabilidad de corrosión. Alrededor de los 700 días el potencial de las varillas ADCI embebidas en los especímenes con relación a/c de 0.65 se estabilizó próximo a -500 mV, indicando una alta probabilidad de corrosión, comportamiento similar al reportado por Lau (Lau & Sagues, 2011), quien lo asocia con la disolución de la capa de zinc y el incremento de la concentración de cloruros en la zona donde se generó el daño del recubrimiento epóxico, debido al incremento en la concentración de cloruros. En el caso de las varillas embebidas en los concretos con relación a/c de 0.45 presentaron un valor de potencial que fluctuó entre las zonas incierta y de alta probabilidad de corrosión esto hasta el final de la exposición.

En las figuras 78 y 79 se muestra el comportamiento del E_{corr} en las zonas delimitadas con líneas verticales en las figuras anteriores. Éstas muestran con mayor claridad el comportamiento que presentaron las varillas AC y ATT en las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente y los probables períodos de tiempo de despasivación.

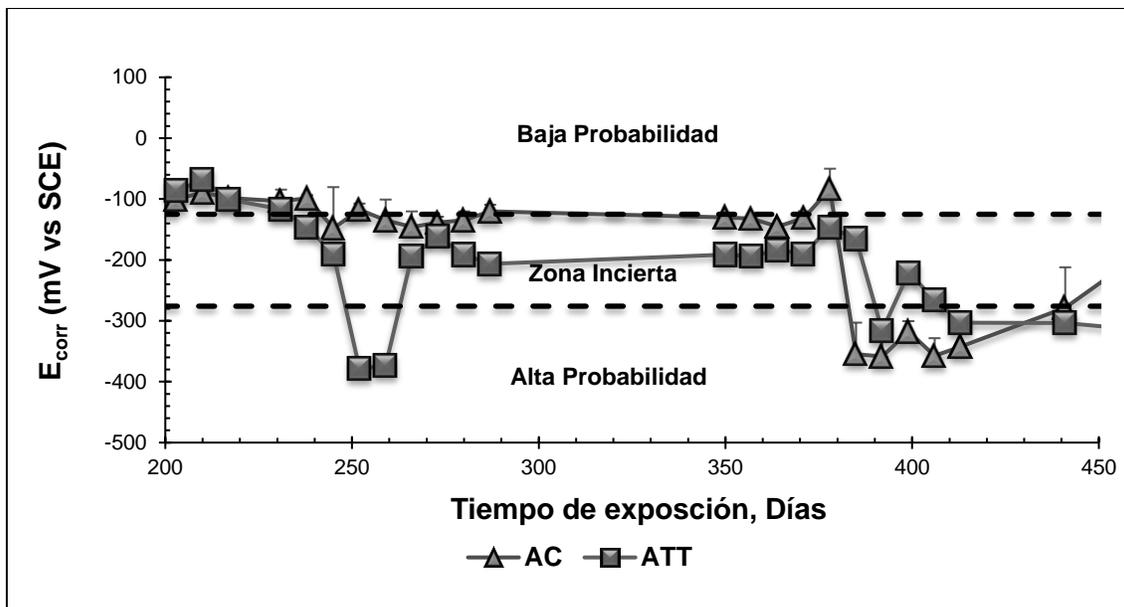


Fig. 78. Comportamiento del E_{corr} en el período de 210 a 450 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación $a/c=0.45$.

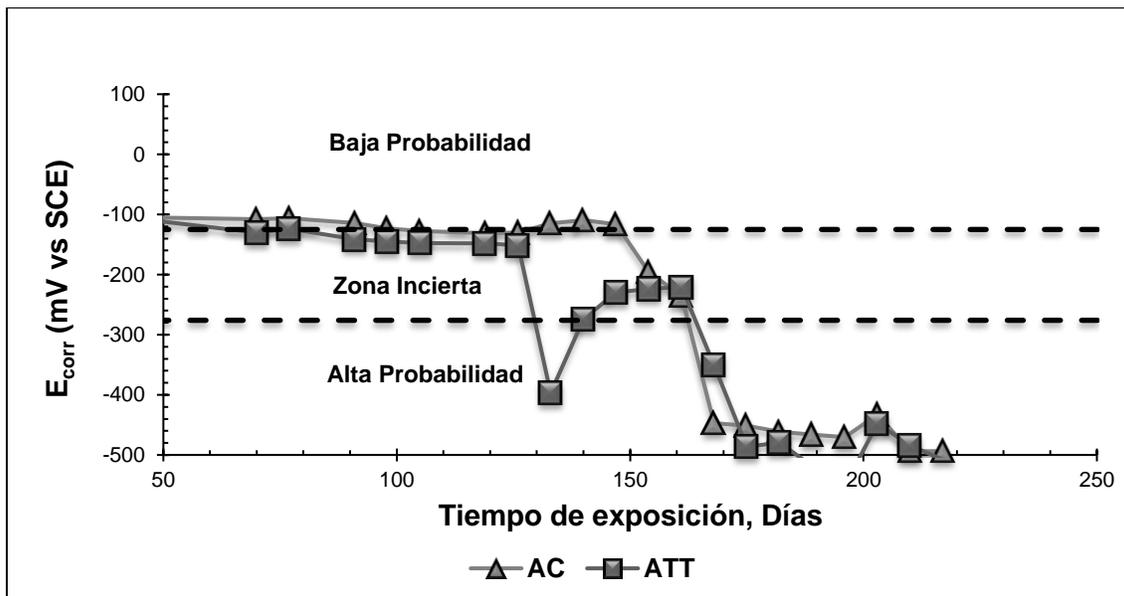


Fig. 79. Comportamiento del E_{corr} en el período de 60 a 240 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación $a/c=0.65$.

Como se indicó en las figuras 76 y 77 al inicio de la exposición las varillas AC y ATT presentaron valores de E_{corr} próximos a -100 mV correspondientes a una baja probabilidad de corrosión. No obstante, es de resaltar el comportamiento

presentado por la varilla ATT en donde el potencial disminuye hasta -400 mV ubicándose en una alta probabilidad de corrosión, sin embargo, poco después regresa a valores que corresponden a la zona incierta. En el caso de las varillas ATT embebidas en los especímenes con relación a/c de 0.45 permanecieron en esa zona hasta los 390 días, por su parte, los correspondientes a la relación a/c de 0.65 lo hicieron hasta los 180 días, disminuyendo su potencial a valores que los colocaron con alta probabilidad de corrosión en conjunto con la varilla AC.

Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})

En las figuras 80 y 81 se muestra el comportamiento del i_{corr} de los cuatro tipos de varillas embebidas en concreto con respecto al tiempo de exposición, para las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente. Las líneas punteadas horizontales limitan los diferentes grados de corrosión que pueden alcanzar los distintos tipos de varilla durante el período de exposición, esto de acuerdo a los criterios descritos por Andrade (Andrade & Alonso, 1996) los cuales son ampliamente aceptados en la comunidad científica.

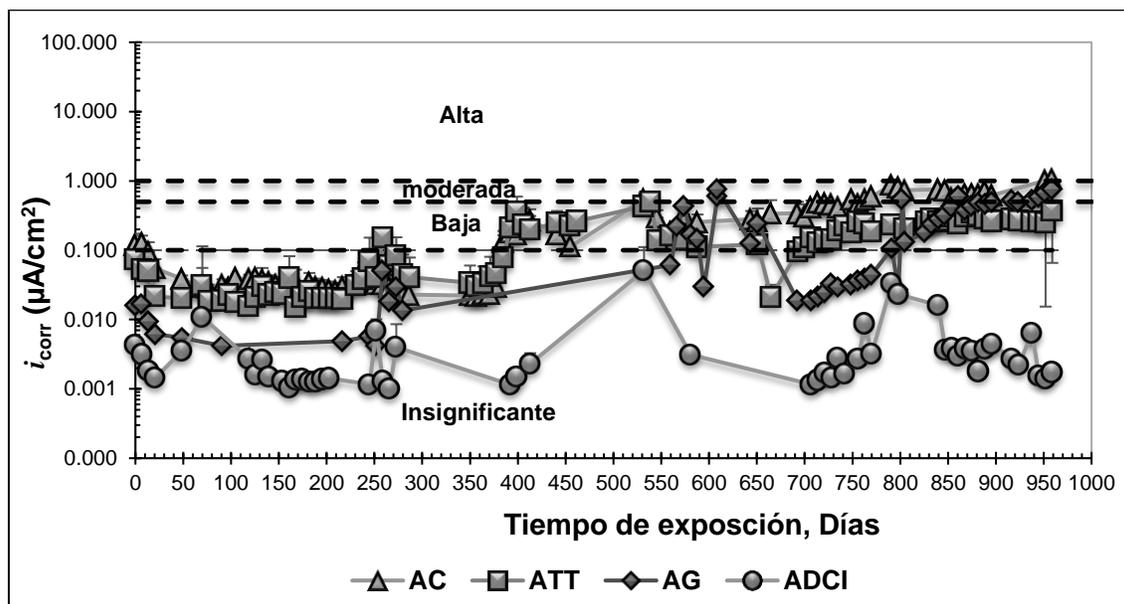


Fig. 80. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c = 0.45.

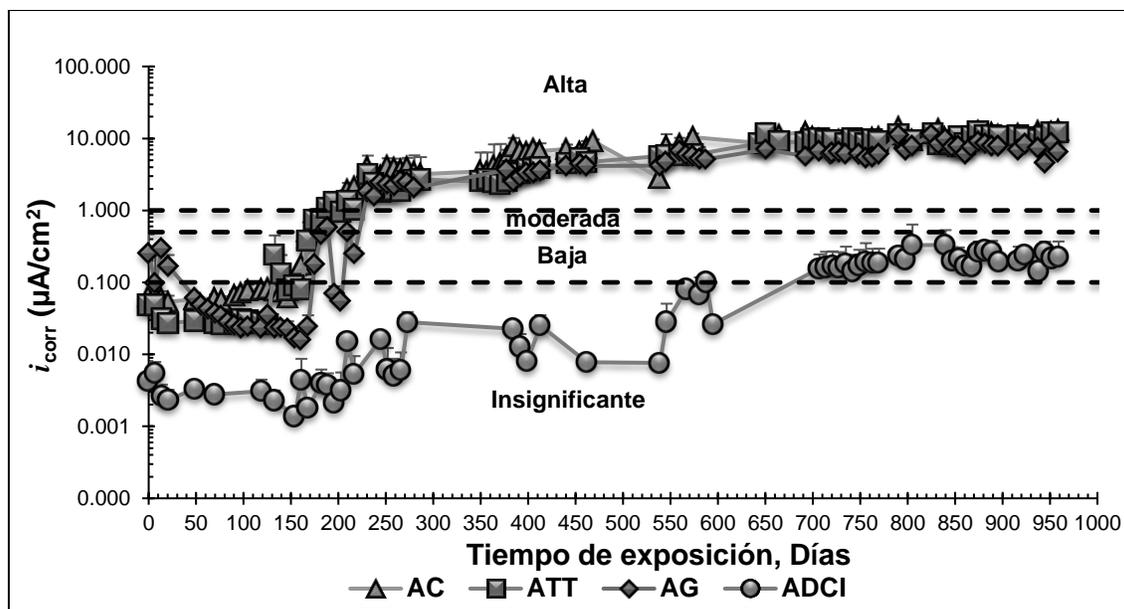


Fig. 81. Comportamiento del i_{corr} de los distintos tipos de varillas expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación $a/c = 0.65$.

Como se observa en las figuras las varillas AC y ATT presentaron valores por debajo de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ desde el inicio de la exposición, indicando un grado de corrosión insignificante. Así mismo, se aprecia la influencia de la relación a/c en el período de iniciación/despasivación de los distintos tipos de varilla.

En el caso de las varillas ATT se requirieron 130 días para la primer posible activación en la relación a/c de 0.65, mientras que para la relación de 0.45 el tiempo se incrementó a 240 días. En ambas relaciones el valor de i_{corr} adquirido fue de $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. La permanencia en la zona de baja velocidad de corrosión fue corta, puesto que gradualmente la i_{corr} de las varillas regresó a la zona de moderada velocidad de corrosión. De nuevo se ve reflejada la influencia de la relación a/c en la activación de las varillas, requiriéndose 40 días para 0.65 y 130 días para los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.45. Esta vez dicha activación se dio al mismo tiempo con la varilla AC con valores cercanos a $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para ambas relaciones a/c . Después de la fase de despasivación los valores obtenidos de i_{corr} para estos dos tipos de varillas en la relación a/c de 0.65 aumentaron gradualmente hasta situarse por encima de $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (zona de alta velocidad de corrosión) a los 190

días de exposición estabilizándose cerca de los 650 días con un valor próximo a $10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ hasta el final de la exposición. Estos valores ya han sido reportados en la literatura para la varilla AC (García-Alonso et al., 2007). En el caso de las varillas embebidas en los concretos fabricados con la relación a/c de 0.45, los valores fluctuaron entre 0.1 y $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ hasta cerca de los 700 días cuando el comportamiento fue más estable. Al final de la exposición las varillas AC presentaron una diferencia de $0.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ con respecto a las varillas ATT.

En el caso de las varillas AG estas presentaron valores de i_{corr} superiores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en los concretos fabricados con la relación a/c de 0.65 e inferiores para el caso de 0.45. Este comportamiento se puede relacionar con la concentración de oxígeno presente en la interface varilla-concreto como se ha reportado en algunos trabajos (Dubuisson et al., 2007; Hamlaoui et al., 2008), donde debido a la mayor porosidad que presentan los concretos fabricados con la relación a/c de 0.65 la concentración es mayor, por ende, el incremento en la intensidad de corrosión. La influencia de la relación a/c en el proceso de iniciación/despasivación también se puede constatar en el comportamiento de este tipo de varilla. Mientras las correspondientes a la relación a/c de 0.65 presentaron una despasivación a los 180 días de exposición, en los fabricados con la relación a/c de 0.45 se presentó a los 570 días. Lo anterior, se ve más claro a los 780 días donde la velocidad de corrosión incrementa gradualmente sobrepasando los $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Finalmente, el comportamiento electroquímico de las varillas en la relación a/c de 0.65 convergen cerca de los 240 días con los valores adquiridos por las varillas AC (varilla base). Al final de la exposición las varillas AG presentaron una diferencia del doble del i_{corr} con respecto a las varillas ATT.

Por último, el comportamiento electroquímico de las varillas ADCI presentaron valores de i_{corr} por debajo de $0.01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ al inicio de la exposición, indicando una velocidad de corrosión insignificante según los criterios establecidos al inicio del experimento. En el caso de las varillas embebidas en los especímenes con relación a/c de 0.45 al final de la exposición sus valores de i_{corr} no superaron los $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, entendiéndose que durante toda la exposición las varillas permanecieron en estado

pasivo. Con respecto a las varillas embebidas en los especímenes con relación a/c de 0.65 el seguimiento electroquímico permitió observar que cerca de los 700 días los valores de i_{corr} superaron los $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ permaneciendo así en zona de baja velocidad de corrosión durante el resto de la exposición.

En las figuras 82 y 83 se muestra el comportamiento de i_{corr} de las varillas AC y ATT en las zonas delimitadas con las líneas verticales punteadas en las figuras 80 y 81. Éstas muestran con mayor claridad el comportamiento que presentan estos dos tipos de varillas en ambas relaciones a/c y en sus respectivos tiempos de despasivación.

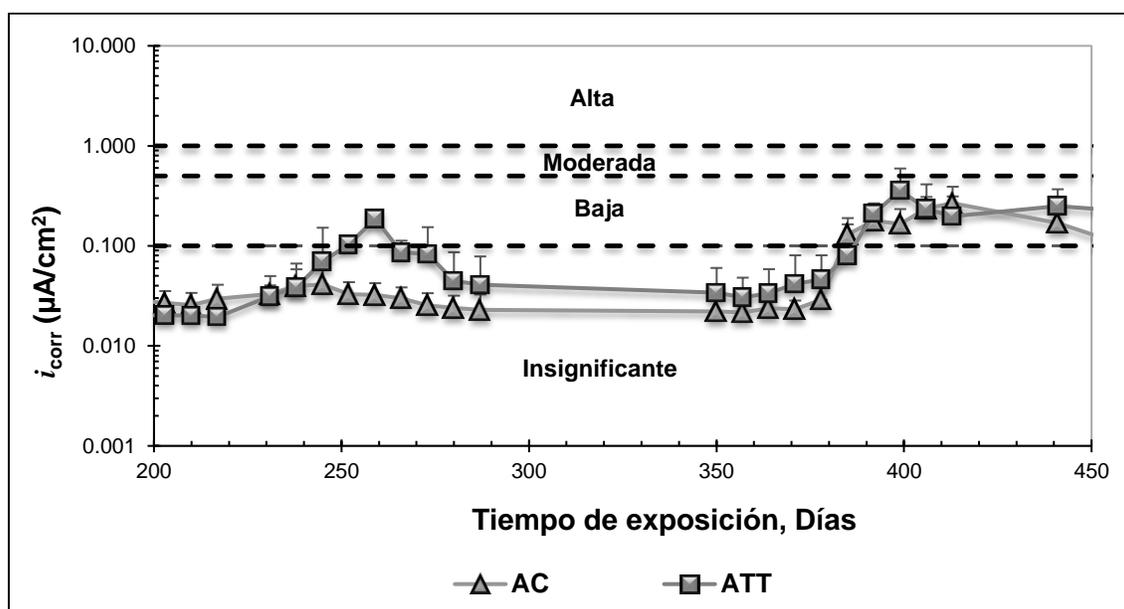


Fig. 82. Comportamiento del i_{corr} en el período de 210 a 450 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c = 0.45.

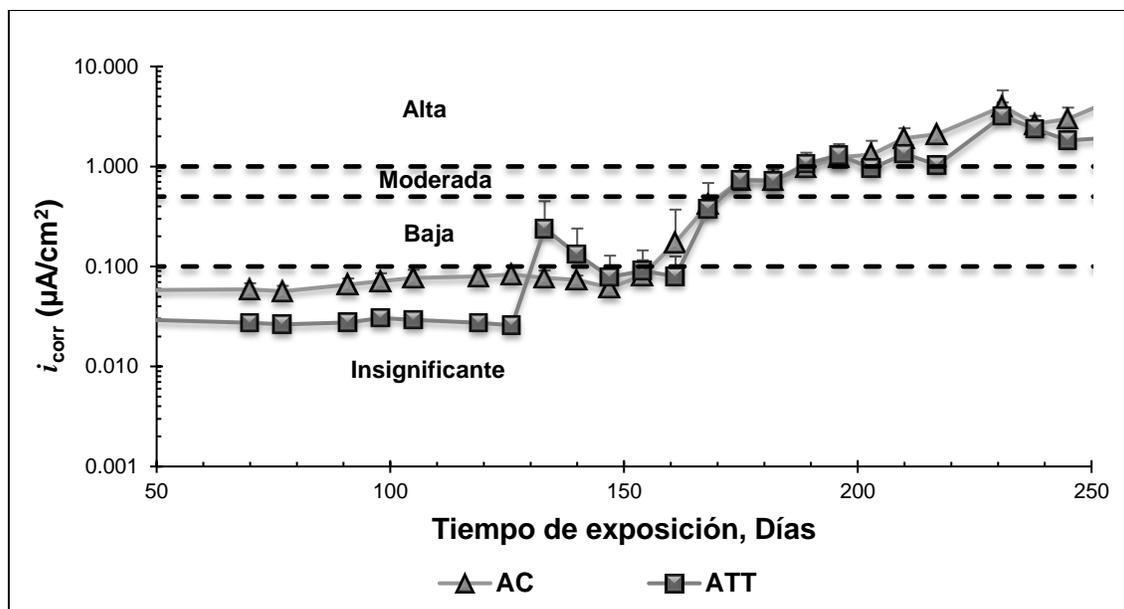


Fig. 83. Comportamiento del i_{corr} en el período de 60 a 240 días de las varillas de AC y ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación $a/c = 0.65$.

En las figuras se puede observar con mayor claridad el comportamiento electroquímico que presentaron las varillas de AC y ATT en la transición de las fases de iniciación/despasivación/propagación de la corrosión. Describiéndose la fase de iniciación con valores de i_{corr} que no superaron los $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ desde el inicio de la exposición, posteriormente, en la fase de despasivación se aprecia un comportamiento que parece ser propio de la varilla ATT y caracterizado por el valor de i_{corr} por encima de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ permaneciendo no más de 7 días en esa zona de alta velocidad de corrosión, el segundo incremento se da en conjunto con las varillas AC, esta vez al menos para las varillas embebidas en los concreto fabricados con relación a/c de 0.65 dicho incremento se dio gradualmente superando valores de $10.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. No así, para las varillas correspondientes a la relación de 0.45 donde a pesar de superar el valor crítico establecido los valores adquiridos no aumentaron gradualmente.

4.3.2 Discusión de resultados de exposición en ambiente controlado en laboratorio

Del comportamiento electroquímico de los distintos tipos de varilla embebidas en los especímenes fabricados con relación agua/cemento de 0.45 y 0.65, es posible destacar desde la perspectiva del concreto la importancia que tiene éste frente al proceso de corrosión. Se puede observar como al disminuir la relación a/c se incrementa el tiempo requerido para despasivar cada tipo de varilla, lo cual está relacionado con la facilidad del ingreso de cloruros y oxígeno a la interface varilla-concreto. Adicionalmente, la modificación superficial de cada tipo varilla influye sobre el comportamiento electroquímico y en el tiempo de despasivación como se pudo observar en las figuras anteriores, debido principalmente a la protección extra que ofrecen los recubrimientos como el galvanizado y el dual (galvanizado + epóxico).

Así, estos resultados permiten observar la similitud en el comportamiento de las varillas AC y ATT en cuanto a su respuesta de E_{corr} . Pero también, es posible establecer una diferencia en la respuesta del i_{corr} , donde a pesar de activarse primero las varillas AC, las ATT presentaron una i_{corr} menor durante la fase de iniciación independientemente de la relación a/c.

Dicho comportamiento se presentó también en los especímenes con la relación a/c de 0.45 en la fase de propagación, donde al final de la exposición se pudo observar una diferencia de casi tres veces en las varillas AC con respecto al obtenido en las varillas ATT. No obstante, al comparar los valores de i_{corr} de las varillas ATT con las varillas AG, se pudo apreciar que éste último presentó cerca del doble del valor adquirido por las varillas ATT al final del experimento, comportamiento reportado en trabajos anteriores (Ismail et al., 2012).

Del comportamiento electroquímico de la varilla ATT ante los otros tipos de varillas, es posible observar la activación-pasivación-activación la cual se presenta en la transición de iniciación/propagación. Ésta respuesta puede ser considerada como

un comportamiento característico de este tipo de varilla, debido a que se presentó en los especímenes de ambas relaciones a/c.

La evaluación electroquímica refleja la importancia del seguimiento tanto para la fase de iniciación como para la de propagación. Para el caso de la varilla ATT, la presente investigación podría dar respuesta a la controversia de algunos de los trabajos reportados relacionados con su resistencia frente al deterioro por corrosión. Los trabajos que han evaluado electroquímicamente dicho deterioro, no presentan valores más allá de la fase de despasivación.

Por un lado, Trejo (Trejo et al., 1994) e Ismail (Ismail et al., 2010) en sus trabajos reportan que la velocidad de corrosión de la varilla ATT es menor cuando se compara con la desarrollada por la varilla AC. Dicha aseveración concuerda con los resultados electroquímicos obtenidos en esta investigación en la fase de iniciación donde la i_{corr} es menor comparada con la varilla AC. Lo cual concuerda con la evaluación que realizaron dichos investigadores.

Por otro lado, las afirmaciones de Sarkar (Sarkar et al., 2005), Keleştemur (Keleştemur & Yildiz, 2009) y Nadlene (Nadlene et al., 2011) los cuales aseguran que las varillas AC presentan una mayor resistencia frente a la corrosión respecto a las varillas ATT, también se cumplen ya que sus trabajos solo corresponden a la fase de despasivación, donde la varilla ATT desarrolla un comportamiento indicativo de ser más activa con respecto a la varilla AC.

No obstante, la evaluación realizada más allá de la fase de despasivación (propagación) indica que la velocidad de corrosión de las varillas AC y ATT tiende a ser similares cuando el concreto es fabricado con una relación a/c alta (0.65), mientras que con una relación a/c baja (0.45) la velocidad de corrosión disminuye considerablemente. Esto se debe a que los concretos fabricados con una mayor relación a/c presentan una mayor porosidad y por tanto, la facilidad del ingreso de los cloruros a la interface varilla-concreto.

Por otro lado, la mayor parte de los investigadores coinciden en que la varilla AG por inmersión en caliente es uno de los métodos de protección más empleados en donde la varilla ordinaria de acero es recubierta de una capa de zinc. Este procedimiento forma una película adherente que provee una barrera física contra la corrosión y una protección catódica de la varilla ordinaria de acero (Yeomans, 1998; Cheng et al., 2005).

Al respecto, el comportamiento electroquímico de las varillas AG obtenido en esta investigación ya ha sido reportado en trabajos previos (Padilla & Alfantazi, 2014; Tan & Hansson, 2008), y puede quedar representado en tres etapas.

En la primera, el óxido de zinc generado cuando es expuesto al aire comienza a disolverse cuando la varilla entra en contacto con los compuestos alcalinos del concreto. El E_{corr} e i_{corr} dependerán de factores como el valor del pH del concreto y la calidad y espesor del zinc. Al respecto, los valores obtenidos en esta investigación corresponden al valor del pH del concreto fabricado (pH \approx 12.5, véase figura 73) y de las características de las varillas AG utilizadas en esta investigación.

En la segunda etapa, sobre el recubrimiento de galvanizado se crea una capa de óxido blanco, y la velocidad de corrosión del recubrimiento disminuye rápidamente, acompañado por un cambio de potencial de corrosión a valores más positivos.

En la tercera etapa, el recubrimiento de zinc comienza a disolverse debido al incremento de la cantidad de cloruros, por ende, la velocidad de corrosión de nuevo aumenta, paralelamente el potencial de corrosión disminuye (Bellezze et al., 2006). Posteriormente, la cantidad de óxido rojo incrementa, es entonces cuando la varilla AG presenta un potencial y una densidad de corriente de corrosión similar a la de la varilla AC, esto a pesar de que el recubrimiento de zinc podría cubrir algunas zonas de la superficie de las varillas.

Durante la fase de iniciación (y hasta antes de la despasivación) esta protección es evidente. Sin embargo, en la fase de propagación aún existen ciertas discrepancias sobre la efectividad de esta protección en presencia de cloruros, ya que los

compuestos que se forman ocupan de 1.5 a 3.6 veces en volumen si se comparan con el zinc original (F. Belaïd et al., 2000; Sistonen et al., 2008; Yeomans, 1998). Este incremento de volumen aunado el de los productos de óxido de la varilla base (AC) pueden ocasionar grietas sobre la superficie del concreto sin necesidad de la presencia de óxido rojo, como puede observarse en la figura 84.

Este fue el caso de los especímenes de concreto con relación a/c de 0.65 y varillas AG embebidas presentaron grietas longitudinales sobre el recubrimiento de concreto, éstas sin la presencia de manchas de óxido rojo sobre la superficie. Sin embargo, tras realizar un corte longitudinal a la varilla se pudo observar la presencia de óxidos rojos provenientes de la corrosión de la varilla base AC y que se encontraron a 7 mm de salir al exterior del espécimen (véase figura 85).



Fig. 84. Superficie de un espécimen de concreto agrietado expuesto a ambiente controlado en laboratorio: AG-0.65 (varilla de acero galvanizado-relación a/c=0.65).

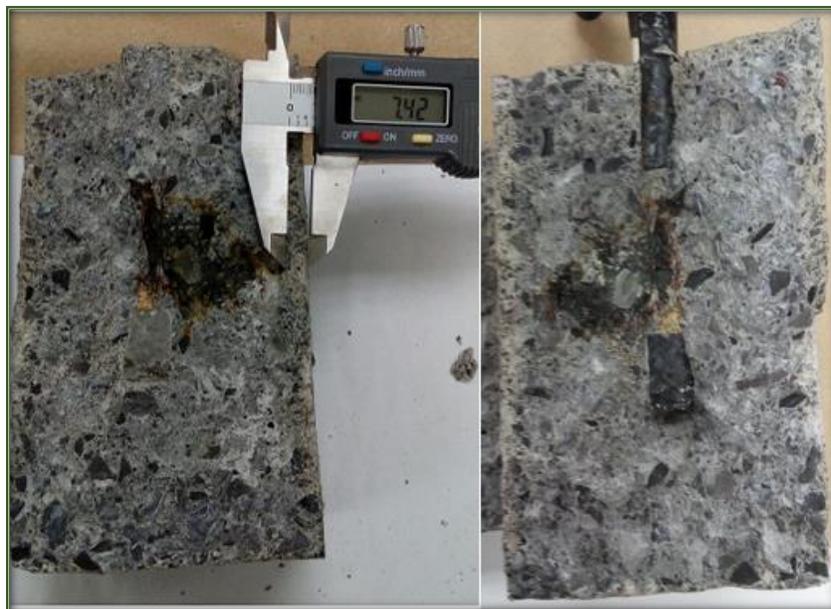


Fig. 85. Corte de un espécimen de concreto agrietado expuesto en ambiente controlado en laboratorio: AG-0.65. Sin presencia de manchas en la superficie del espécimen.

Sin duda un monitoreo constante más allá de la fase de despasivación permitió identificar la influencia de la superficie de la varilla como un factor importante en el proceso de corrosión. En el caso de las varillas con doble recubrimiento (ADCI) presentaron un comportamiento en etapas similares a la varilla AG, esto obviamente por las incisiones practicadas sobre la superficie de la varilla. Sin embargo, se incrementó el tiempo en que se presentó la despasivación para las varillas embebidas en la relación a/c de 0.65. En cuanto a las varillas ADCI embebidas en la relación a/c de 0.45 no presentaron indicios de despasivación hasta la conclusión del experimento. Trabajos que se han realizado con este tipo de varilla reportan un incremento de tiempo antes de la activación (Dong et al., 2012; Villa, 2014; Lau & Sagues, 2011). Dicho incremento solo se vio superado por los especímenes a los que no se les realizó un daño, ya que hasta la fecha de finalización del experimento no existe una respuesta electroquímica que evidencie cambios en la superficie.

4.3.3 Contenido crítico de cloruros (CCC)

Una vez que los resultados electroquímicos mostraron valores inferiores a -275 mV_{SCE} para E_{corr} (véase figuras 76 y 77) y superiores a $0.1 \mu A/cm^2$ para i_{corr} (véase figuras 80 y 81), indicando una alta probabilidad de corrosión y una velocidad de corrosión baja, se extrajeron de los ciclos de inmersión-secado especímenes con la correspondiente varilla activa, con el objetivo de determinar la concentración crítica de cloruros.

En la figura 86 se muestra el contenido de crítico de cloruros (CCC) de los distintos tipos de varilla expuestos a ambiente controlado en laboratorio, expresado en porcentaje por peso de cemento en el tiempo en que se presentó la despasivación.

Se puede observar que están ordenadas conforme el tiempo de despasivación, cada varilla está identificada en la parte superior con el tipo de varilla y su relación a/c. Mediante una línea horizontal punteada se presenta la concentración máxima permitida de cloruros en el diseño de nuevas estructuras de concreto reforzado expuestas a un ambiente agresivo o costero (ACI-318, 2008). Adicionalmente, en la parte superior derecha se muestra un esquema señalando la sección de donde se tomó la muestra de concreto para determinar el valor correspondiente.

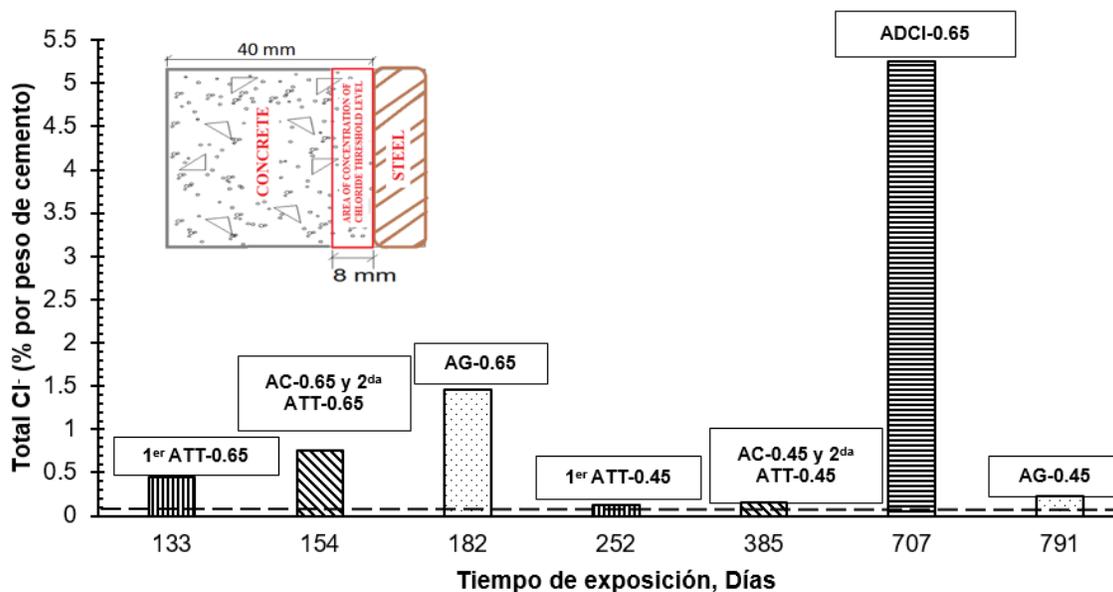


Fig. 86. Contenido crítico de cloruros para los diferentes tipos de varilla expuestas a ambiente controlado en laboratorio en sus respectivas relaciones a/c y tiempo de despasivación.

En la figura 86 se puede apreciar el CCC de los diferentes tipos de varilla con respecto al tiempo de exposición. Como se mostró en las figuras del comportamiento electroquímico las varillas ATT presentaron en la transición de iniciación/despasivación un comportamiento de activación-pasivación-activación, es por ello, que se presentan dos valores de CCC para ambas relaciones a/c. En el primer indicio de despasivación las varillas ATT requirieron de 0.45% (133 días) y 0.12% (252 días) para las relaciones a/c de 0.65 y 0.45 respectivamente. Posteriormente, en conjunto con las varillas AC y ATT presentaron una despasivación, obteniéndose valores de 0.75% (154 días) para la relación a/c de 0.65 y 0.15% (385 días) para la a/c de 0.45. En el caso de las varillas AG requirieron de una concentración de 1.46% (182 días) y 0.23% (791 días) para las relaciones a/c de 0.65 y 0.45 respectivamente. Finalmente, las varillas ADCI embebidas en los especímenes con relación a/c de 0.65 fueron despasivadas con una concentración de 5.25% (707 días), mientras que las de 0.45 no presentaron indicios de activación al final del seguimiento electroquímico.

De estos resultados se puede deducir la importancia que tiene la superficie de la varilla frente al proceso de degradación por efecto de la corrosión provocado por cloruros. El incremento en la cantidad de cloruros necesarios para despasivar la varilla AG comparados con los requeridos por la varilla AC, ya ha sido reportado por diversos autores (Tan & Hansson, 2008; Roventi et al., 2014). Para el caso de la varilla ADCI basándose en los resultados obtenidos de la varilla AG se esperaba un incremento mayor en dicha concentración debido a la doble protección de este tipo de varilla.

Como se ha mencionado anteriormente la variabilidad en los valores de CCC depende de muchos factores y la relación a/c es uno de los más importantes. En la figura 87 se pueden observar algunos valores de CCC determinados por diversos autores incluyendo los obtenidos en esta investigación. Adicionalmente, se

presentan en la Tabla 11 los valores máximos de contenido de cloruro establecidos por diversos documentos del ACI y BS.

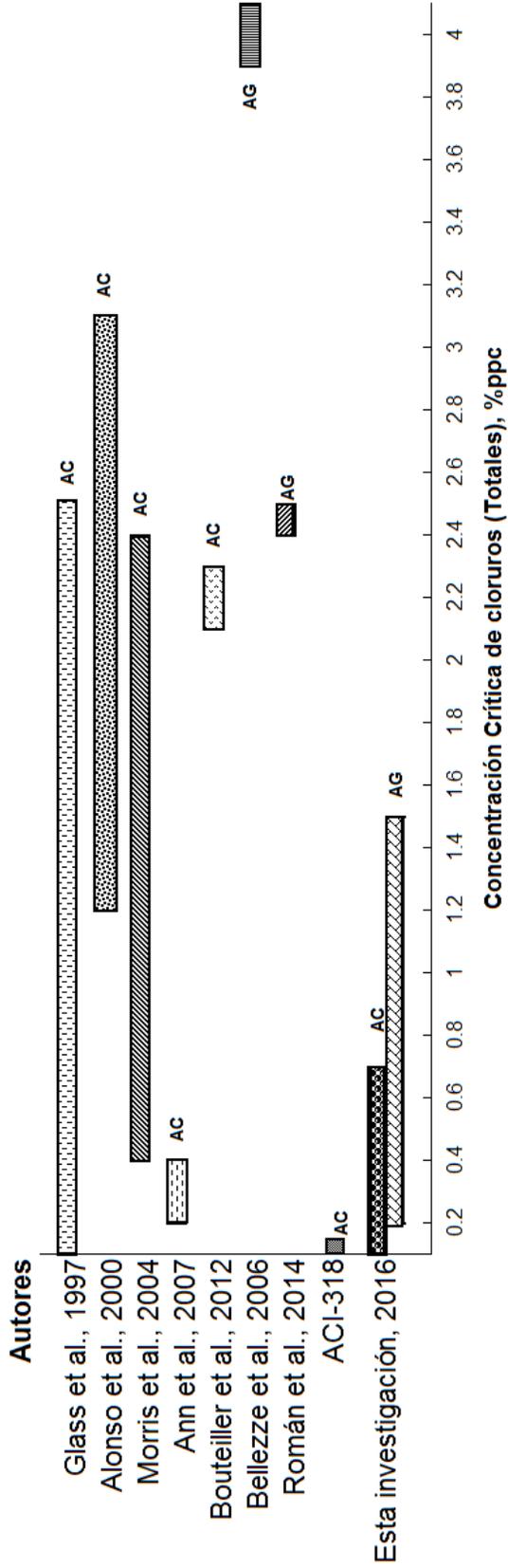


Fig. 87. Valores críticos de cloruros necesarios para iniciar la corrosión de la varilla de acero de refuerzo. Datos de literatura: % por peso del cemento (%ppc)

Tabla 11. Valores críticos de cloruros necesarios para iniciar la corrosión de la varilla de acero de refuerzo.

Tipo	Máximo contenido de cloruros (% ppc)			
	BS 8110	ACI 201	ACI 357	ACI 222
Concreto pretensado	0.10	-	0.06	0.08
Concreto reforzado expuesto a cloruros en servicio	0.2	0.1	0.1	0.2
Concreto reforzado que estará seco o protegido en serv	0.4	-	-	-
Otros concretos reforzados	-	0.15	-	-

De la figura 87 se puede observar que la CCC obtenida para las varillas AC en ambas relaciones a/c (0.45 y 0.65) se colocan entre los rangos publicados en la literatura, e incluso muy próximos a los marcados por las recomendaciones del ACI-318. En el caso de las varillas AG, los valores obtenidos son inferiores a los reportados, posiblemente debido a la variabilidad en la pureza y espesor del zinc utilizado.

Además de la influencia mostrada sobre el tiempo de despasivación de los distintos tipos de varillas, la relación a/c también influye en la cantidad necesaria de cloruros para que ocurra dicha despasivación. Esto se muestra en los valores presentados en este trabajo, donde los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.65 necesitaron una concentración de cloruros mayor a la requerida por los especímenes con la relación a/c de 0.45.

Esta variabilidad podría atribuirse al proceso de formación de la capa pasiva de las varillas. En efecto, se sabe que la alcalinidad del concreto (pH entre 12 y 13) genera un ambiente propicio para la estabilidad de los óxidos de hierro que se forman sobre la superficie de la varilla. En este fenómeno, es necesario que primero se genere una película de compuestos formada entre los iones de hierro y el oxígeno, i.e. óxido de hierro. De tal manera que la pasivación dependerá de la formación de óxidos de hierro, y ésta a su vez de la disponibilidad de oxígeno en la interface varilla – concreto. A su vez, el acceso de oxígeno dependerá de la facilidad con que éste ingrese a través de la red de poros del concreto; más fácil en concretos con elevadas relaciones a/c, y viceversa con bajas relaciones a/c.

En nuestro caso, los especímenes fueron sometidos a ciclos de inmersión y secado, promoviendo el acceso de oxígeno durante la fase de secado hacia el interior de los mismos. Para el mismo tiempo de secado (3 días) en las dos relaciones a/c, se infiere que en los especímenes con a/c de 0.45, el acceso de oxígeno pudo ser más difícil lo que provocó una menor cantidad de oxígeno disponible para generar una película pasivante más compacta en la superficie de la varilla. Aunado a ello, durante la fase de inmersión (4 días) el contenido de agua de los especímenes no fue totalmente eliminada de los poros del concreto, impidiendo con ello el ingreso de oxígeno y la formación completa de la película pasivante. En ese sentido, una cantidad menor de cloruros podría ser suficiente para provocar la despasivación de la varilla embebida en un concreto con una matriz densa (relación a/c de 0.45), como ocurrió en esta investigación.

4.3.4 Inspección visual

Una vez concluida la evaluación electroquímica y la determinación de cloruros, se realizó una inspección visual de los diferentes tipos de varilla al final de la exposición, esto para observar la morfología del daño ocasionado por la acción de los cloruros.

A continuación, se muestra una serie de figuras que corresponden a los cuatro tipos de varilla de acero: AC, ATT, AG y ADCI en sus respectivas relaciones a/c: 0.65 y 0.45, después de haber sido expuestas durante 959 días (136 ciclos). En las figuras, el área de estudio corresponde a las graduaciones indicadas entre el 2 y 7.

Como era de esperarse las varillas extraídas de los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.65 (véase figuras 89, 91, 93 y 95), presentaron un grado de deterioro mucho mayor comparado con el observado en la superficie de las varillas correspondientes a la relación a/c de 0.45 (véase figuras 88, 90, 92 y 94). Lo cual corresponde directamente con los resultados obtenidos del monitoreo electroquímico, es decir, los valores de velocidad de corrosión presentados por las varillas en los especímenes de concreto con relación a/c de 0.65 fueron muy

superiores a los presentados por las varillas embebidas en los concretos con relación a/c de 0.45.

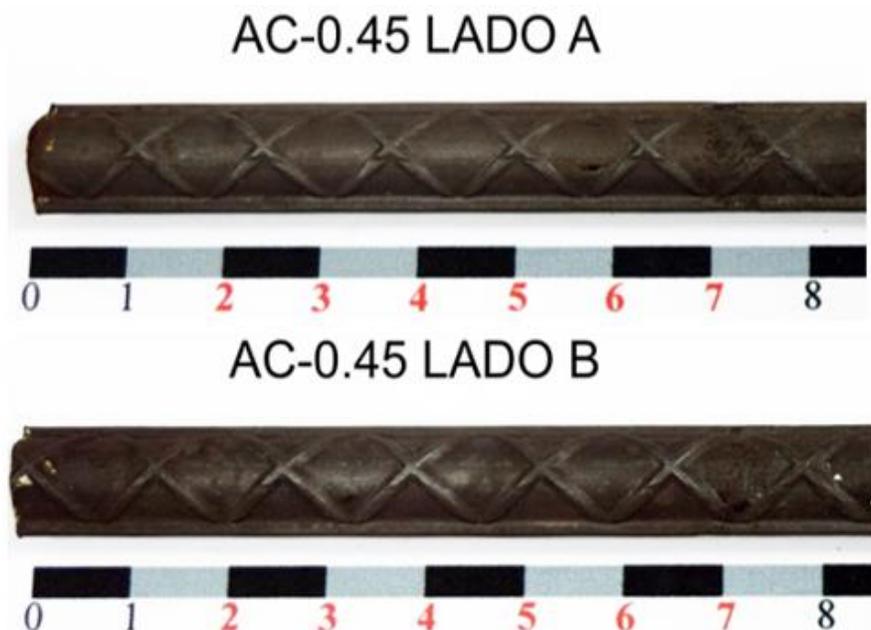


Fig. 88. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas AC expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.

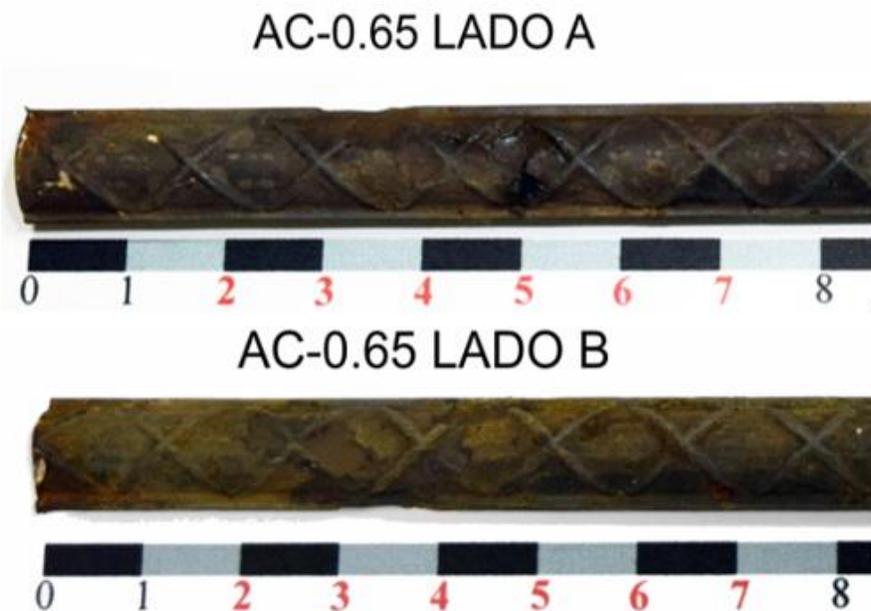


Fig. 89. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas AC expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.



Fig. 90. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.

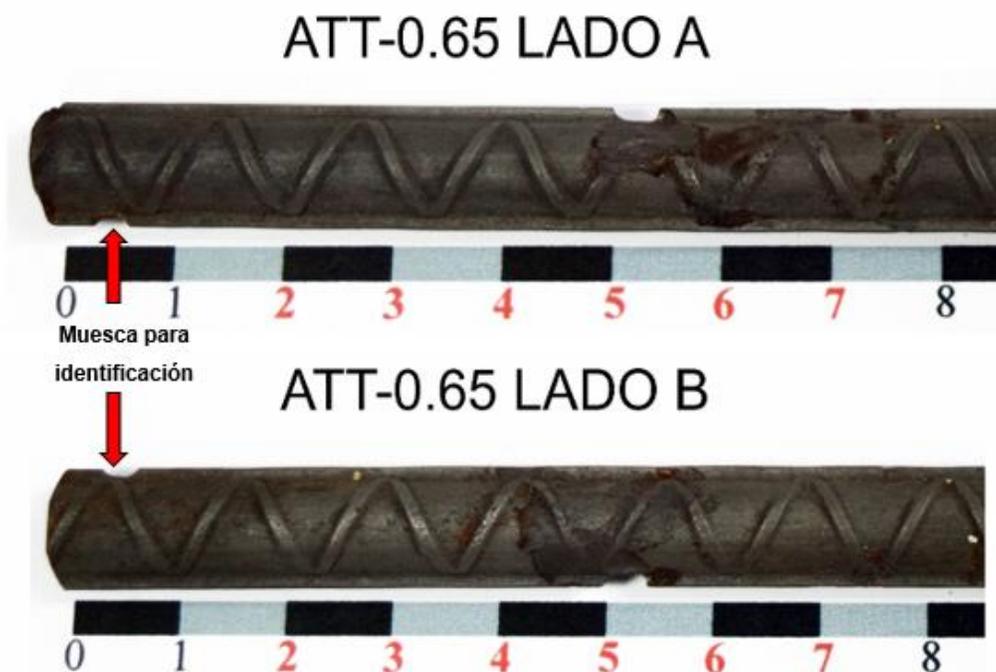


Fig. 91. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas ATT expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.



Fig. 92. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas AG expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.

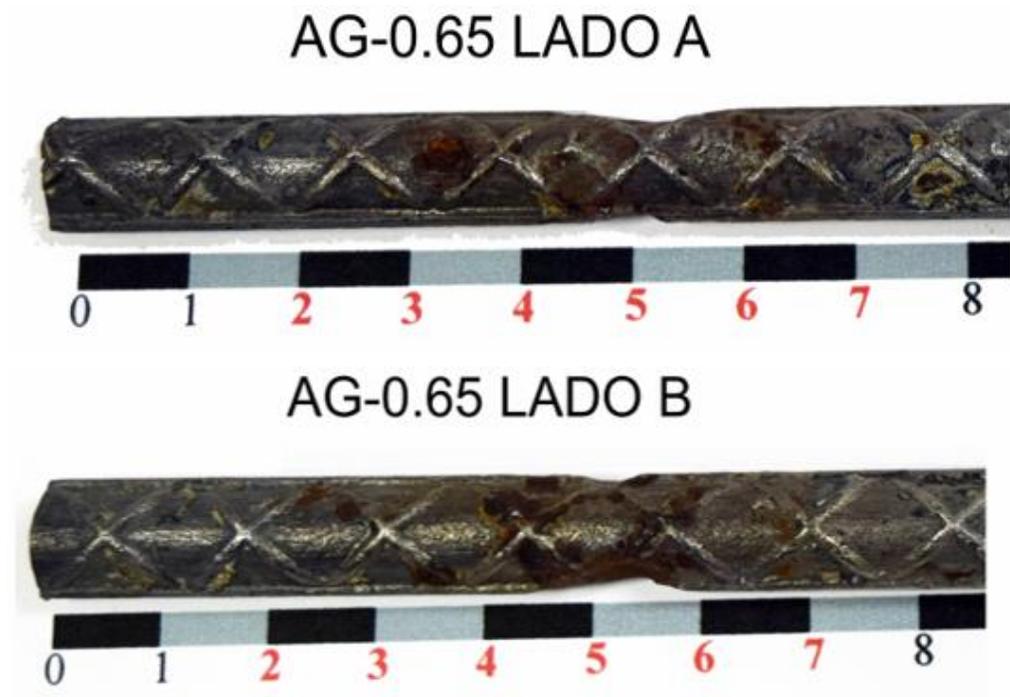


Fig. 93. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas AG expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.

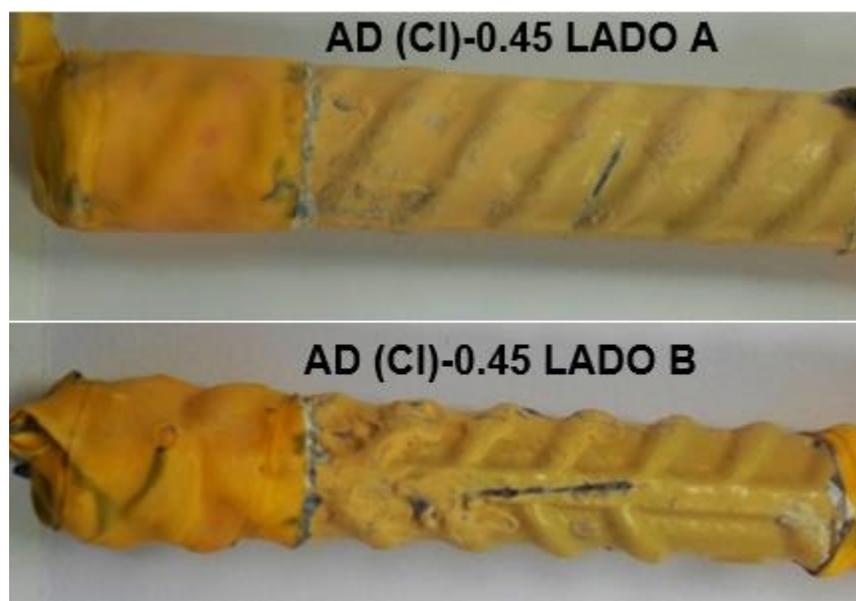


Fig. 94. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas ADCl expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.45.



Fig. 95. Estado de la superficie localizada en el área de estudio de las varillas ADCl expuestas a ambiente controlado en laboratorio: relación a/c de 0.65.

Aunque el grado de deterioro de las varillas extraídas de los concretos de relación a/c de 0.45 no es tan notorio, si lo es para las de 0.65, esto permitió identificar la morfología del daño ocasionado por la corrosión inducida por cloruros. Mientras que el daño generado en las varillas AC se ve repartido a lo largo del área expuesta, en el caso de las varillas ATT tiende a ser localizado. Para las varillas AG el daño generado fue mayor como se puede observar en la figura 93. Las varillas ADCl apenas presentaron manchas de óxido rojo en el área donde se realizaron las

incisiones y no se observaron ampollamientos ni desprendimientos del recubrimiento epóxico circundante.

Es claro que la concentración de cloruros aumenta cuando las varillas AC son recubiertas mediante el galvanizado, esto debido al efecto barrera y a la protección catódica que representa dicho recubrimiento. Sin embargo, en este trabajo pudo mostrarse el daño generado en los especímenes de concreto con este tipo de varilla, donde la acumulación de los productos de corrosión llevó al agrietamiento del recubrimiento de concreto (véase figura 84) aún sin la presencia de manchas de óxido rojo sobre la superficie del espécimen. El seguimiento durante la fase de propagación permitió evidenciar el deterioro que se genera cuando el recubrimiento de zinc se ha disuelto y la superficie de acero al carbono de las varillas se expone a una alta concentración de cloruros.

A pesar de que la velocidad de corrosión que presentó la varilla AG embebida en los especímenes con relación a/c de 0.65 durante la fase de propagación fue similar a la de la varilla AC, la morfología de daño causada por el ataque por cloruros visiblemente fue mayor (véase figura 89 y 93). Evidentemente la velocidad de deterioro por efecto de la corrosión seguirá incrementando con el incremento de la concentración de cloruros en la interface varilla-concreto. En el momento de la inspección visual (960 días de exposición) se determinaron concentraciones de cloruros de 3.04 % y 5.84% por peso de cemento para las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente.

4.4 INDUCCIÓN DE LA CORROSIÓN GALVÁNICA POR CO₂ (FRANCIA)

En las figuras 96 y 97 se muestra el comportamiento electroquímico obtenido tras la inducción de la corrosión galvánica por CO₂, esto para los especímenes fabricados con las relaciones a/c de 0.45 y 0.65 respectivamente. Debido a que el equipo solo registraba 30 días de monitoreo, hubo períodos en los que no se reprogramó el registro, es por ello que en las figuras se muestran períodos de tiempo que fueron seccionados. Cabe señalar que los especímenes no fueron

desconectados sino hasta el final del experimento, así que, el comportamiento mostrado pertenece a la evolución de la corriente de corrosión de los distintos tipos de varillas durante el tiempo de exposición, resultado del promedio de tres especímenes por tipo de varilla.

La figura 96 corresponde al comportamiento electroquímico obtenido de la corriente de corrosión generada por el par galvánico de los especímenes fabricados con concretos con relación a/c de 0.45, esto para un período de exposición de 300 días. En el caso de la figura 97 corresponde al comportamiento obtenido de los especímenes fabricados con la relación a/c de 0.65, para un tiempo de exposición de 183 días.

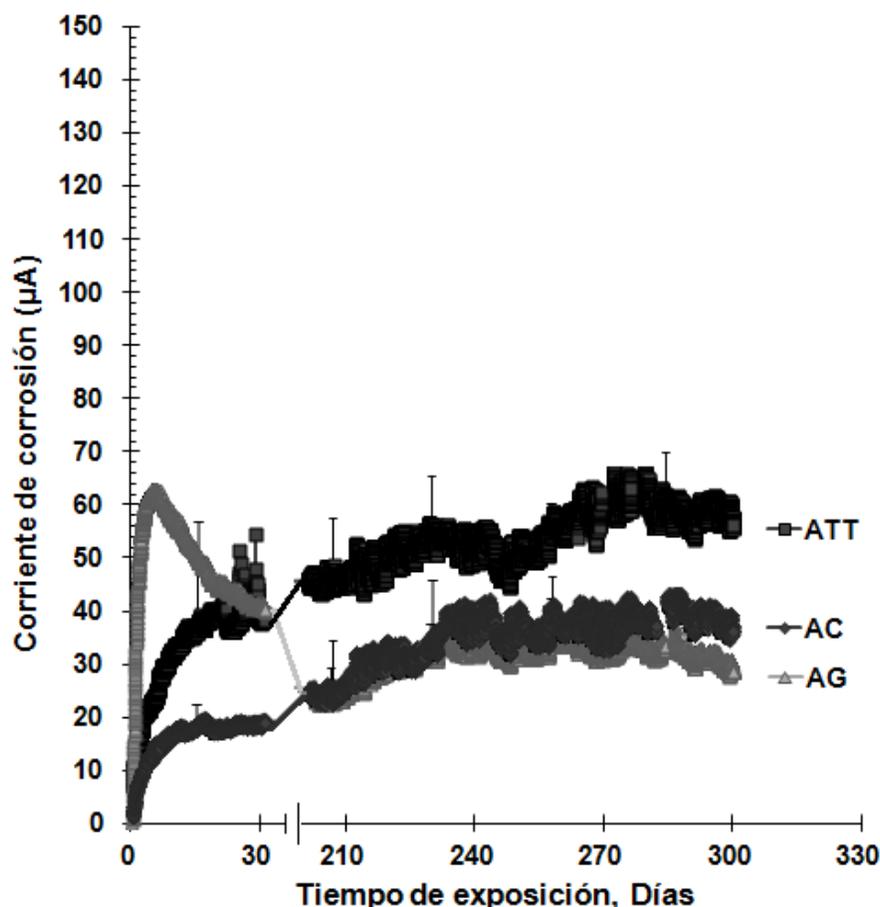


Fig. 96. Comportamiento electroquímico de los diferentes tipos de varillas de acero inducidas a corrosión galvánica por CO_2 : relación a/c=0.45.

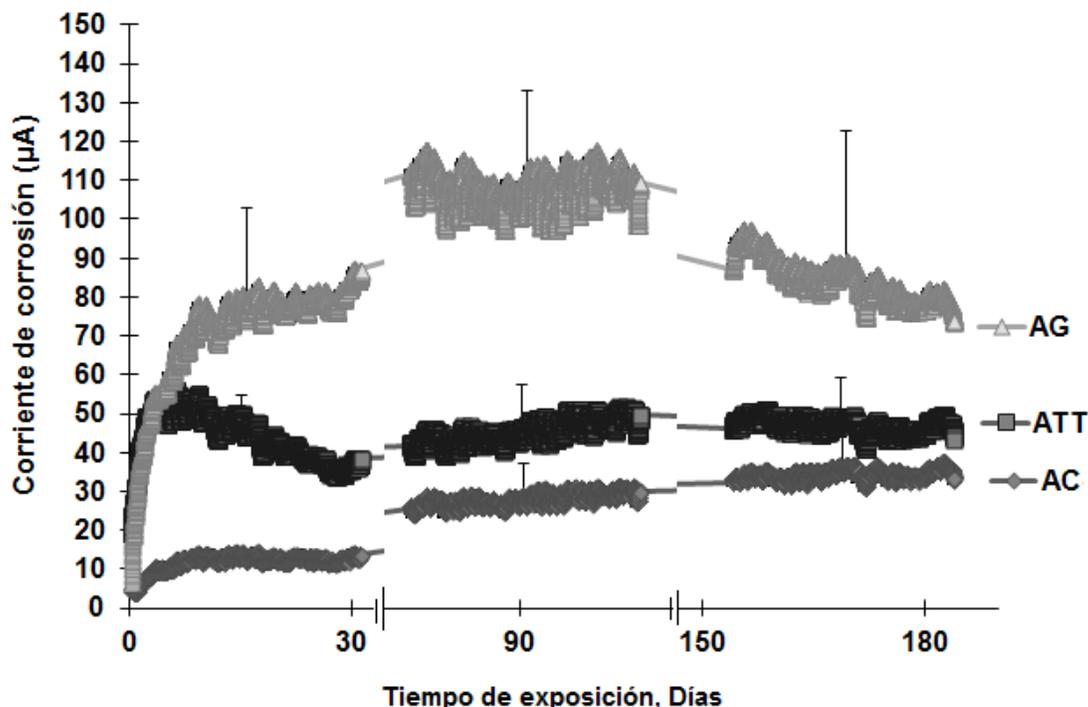


Fig. 97. Comportamiento electroquímico de los diferentes tipos de varillas de acero inducidas a corrosión galvánica por CO_2 : relación $a/c=0.65$.

Los resultados del monitoreo de los diferentes tipos de varilla sometidos a corrosión galvánica, muestran un aumento de la corriente de corrosión en el primer mes de ser conectados, esto para ambas relaciones a/c . Este comportamiento ya ha sido reportado para las varillas AC y AG en concretos carbonatados (Tuutti, 1982; Vu, 2011). Lo anterior es atribuible a la resistencia del concreto que tiende a disminuir a partir de la inmersión del sistema por efecto de la humectación del mismo (Andrade et al., 2002; Dangla & Dridi, 2009), lo que incrementa la intensidad de corriente de corrosión durante los primeros 7 días. Posteriormente, se presentó un ligero descenso en la corriente de corrosión atribuida principalmente a la disminución de la diferencia de potencial entre el ánodo y los cátodos. Este comportamiento electroquímico fue similar para los tres tipos de acero.

Hacia el final del período de prueba se obtuvieron valores de $36.3 \mu\text{A}$ ($2.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para la varilla de AC, $56.3 \mu\text{A}$ ($3.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para ATT y $35 \mu\text{A}$ ($2.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para las varillas de AG, esto para los especímenes fabricados con concretos de relación a/c

de 0.45 (véase figura 95). Los valores obtenidos para las varillas en la relación a/c de 0.65 fueron de 33 μA ($2.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para AC, 44 μA ($2.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para la varilla ATT y de 74 μA ($4.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) para la varilla AG (véase figura 96). En investigaciones previas realizadas sobre el comportamiento electroquímico de las varillas AC y AG expuestos a carbonatación, se han detectado valores de densidad de corriente de corrosión de hasta 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para la varilla AC (Andrade & Alonso, 1996), Nasser (Nasser et al., 2010) reporta valores de 13 μA para este tipo de varilla y medidas por ZRA (Zero Resistance Ammetry). En cuanto a la varilla AG se han registrado valores de 25 μA (Arenas et al., 2006; Bellezze et al., 2006). Para la varilla ATT no se encuentra información relacionada con su comportamiento ante su deterioro por carbonatación, la poca información que se tiene hace referencia a corrosión por efecto de cloruros.

A diferencia del comportamiento electroquímico de los especímenes expuestos a cloruros, donde los valores de densidad de corriente de corrosión de las varillas ATT fueron inferiores a los de las varillas AC, en este caso fue lo opuesto ya que los resultados muestran que la corriente de corrosión resultó de 10 a 20 μA más que la varilla AC. Esto puede deberse a la influencia de la capa superficial de martensita que tras la carbonatación total del concreto toda el área expuesta actúa como ánodo incrementando la relación superficie anódica/superficie catódica (S_a/S_c). En el caso de la varilla AC la composición fásica es ferrita-perlita (granos de ferrita y carburos), se sabe que tras el proceso de corrosión los carburos son los que se corroen activamente (Trejo et al., 1994), así la relación S_a/S_c de la varilla AC puede variar ligeramente tras la corrosión activa exclusivamente de dichos carburos.

En el caso de la varilla AG el incremento en la intensidad de corrosión puede deberse a la polarización del sistema cuando se conectan la varilla activa con las pasivas, adicionalmente, se ha reportado que en la primera fase la intensidad de corriente del par galvánico de este tipo de varilla es muy alta (Bellezze et al., 2006). Posteriormente, la capa de óxido de zinc generada sobre la superficie de la varilla mantiene a un nivel mínimo la intensidad generada, sin embargo, la capa de zinc se sigue consumiendo lentamente. Esto puede observarse en las figuras anteriores

donde para la primera (a/c de 0.45) el espectro de monitoreo es más amplio y en él se puede apreciar como la corriente después de casi 210 días de monitoreo se mantuvo por debajo de la obtenida por las varillas AC y ATT. En el caso de la segunda (a/c de 0.65) se observa que, aunque la varilla de AG presentó una mayor intensidad, al final de la exposición se observa una tendencia a disminuir.

Así, mediante la implementación de esta técnica se logró destacar el comportamiento electroquímico que presentan los diferentes tipos de varillas, cuando las condiciones de alcalinidad que mantienen la pasividad de las varillas se pierden. Se observó que la corriente de corrosión de las varillas ATT fue mayor comparada con las varillas AC y AG, pudiéndose ver esto en la figura 96 la cual muestra un tiempo mayor de exposición.

Finalmente, se puede destacar que cada tipo de varilla presentó un grado de deterioro diferente dependiendo del medio agresivo en que se localice (ya sea cloruros o carbonatación). Esto se puede mostrar en los resultados del comportamiento que presentó cada tipo de varilla. Destacándose, un grado mayor de deterioro de la varilla AG en un medio con cloruros respecto a carbonatación, o lo opuesto por la varilla ATT, la cual presentó un mayor deterioro en carbonatación con respecto a cloruros.

4.5 MODELACIÓN MEDIANTE ELEMENTO FINITO

Para el análisis numérico se requirió de ciertos valores para alimentar las ecuaciones del modelo.

En la Tabla 12, se muestran los coeficientes obtenidos por las pendientes de Tafel y la resistividad del concreto, presentando una baja resistividad (ρ) en las áreas con concreto no carbonatado y una alta resistividad en las áreas donde el concreto estuvo carbonatado (véase figura 53).

Tabla 12. Parámetros de Tafel y Resistividad del concreto para varillas en estado activo y pasivo para la relación $a/c=0.45$.

Especímen		Parámetros de TAFEL				Resistencia y resistividad del concreto		
		Beta A (V/Decade)	Beta C (V/Decade)	I_{corr} (μA)	E_{corr} (mV)	GetRu (Ω)	R (Ω)	ρ ($\Omega \cdot m$)
Concreto carbonatado $a/c=0.45$	AC-C	0.17	0.05	21.7	-602.9	1034.4	1253.0	103.5
	ATT-C	0.14	0.06	28.4	-619.8	1080.1	1285.3	106.1
	AG-C	0.28	0.15	4.4	-972.0	1873.5	3212.7	265.3
Concreto sin carbonatar $a/c=0.45$	AC-NC	1.03	0.04	0.3	-228.0	340.3	570.6	94.3
	ATT-NC	1.10	0.02	0.4	-191.6	304.9	428.5	70.8
	AG-NC	0.79	0.08	0.3	-695.5	455.5	848.0	140.1

En la figura 98, se muestra el gradiente de potencial existente, resultado de la simulación del sistema galvánico, los diferentes valores de E_{corr} que participan en la simulación son representados por los diferentes colores (pudiéndose leer con ayuda de la barra que se encuentra a un costado). Se observa que las varillas en estado pasivo presentaron una mayor polarización comparada con la varilla activa, esto para alcanzar el equilibrio de la macrocelda, lo cual está en concordancia con la forma de las curvas de polarización de la figura 99, donde se muestra la difusión de la densidad de corriente generada en la macrocelda de corrosión del espécimen.

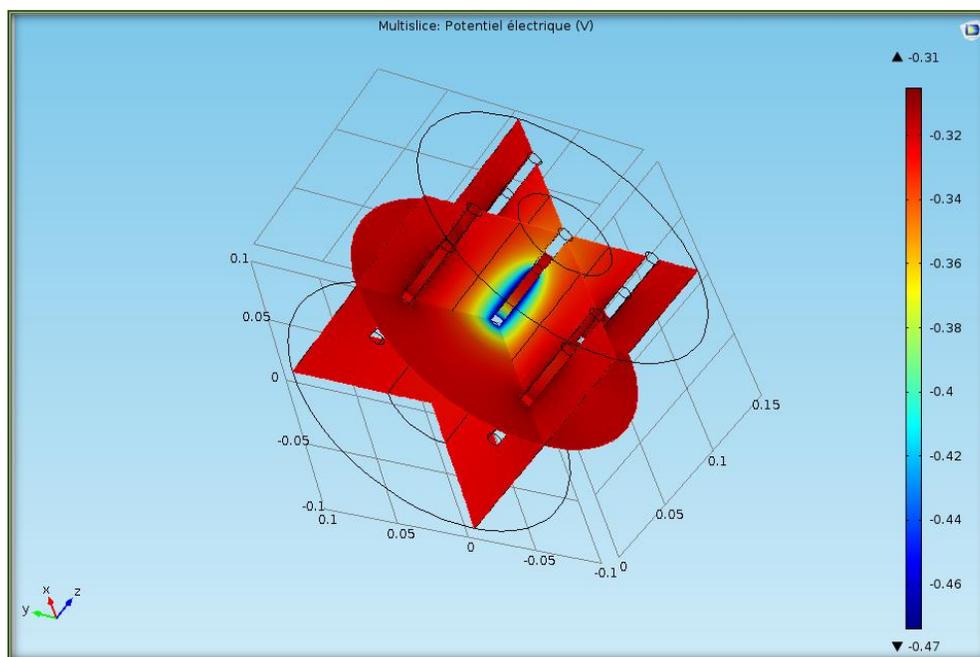


Fig. 98. Campo de potencial eléctrico inducido por el sistema de par galvánico.

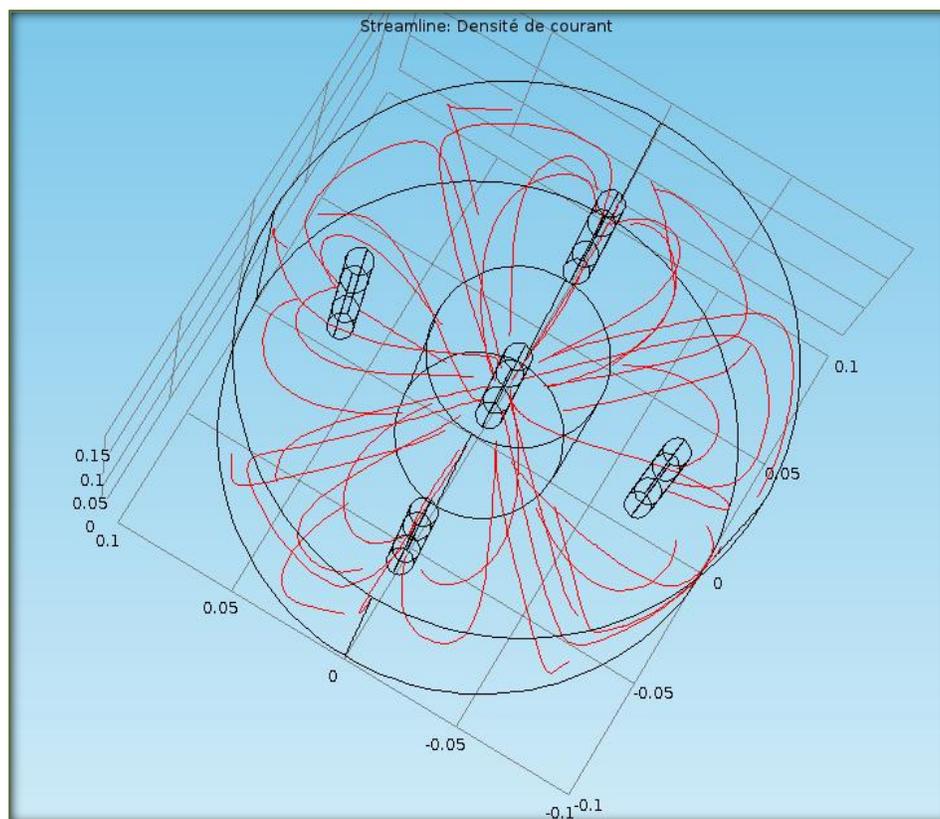


Fig. 99. Líneas de densidad de corriente inducido por el sistema de par galvánico.

La Tabla 13 y Tabla 14 corresponden a los resultados de intensidad de corriente de corrosión obtenidos a partir de la modelación por elemento finito y del ensaye en laboratorio.

Tabla 13. Intensidades de corriente obtenida por modelación con elemento finito.

COMSOL / relación a/c=0.45				
Varilla	Corriente 1 (A)	Corriente 2 (A)	Promedio (A)	μA
AC	7.35E-05	7.39E-05	7.37 E-05	73.7
ATT	2.13E-04	2.16E-04	2.15E-04	215
AG	3.73E-05	3.95E-05	3.84E-05	38.4

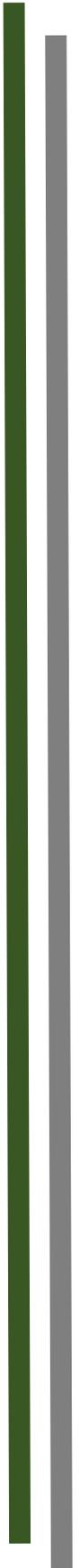
Tabla 14. Intensidades de corriente obtenida en laboratorio.

Tipo de varilla	a/c=0.65 (183 días)	a/c=0.45 (300 días)
AC	33 μA	36.3 μA
ATT	44 μA	56.3 μA
AG	74 μA	35 μA

De los resultados obtenidos por modelación mostrados en las tablas anteriores, se puede destacar que las tendencias de las intensidades corresponden a los valores obtenidos en laboratorio. En el caso de la varilla AC Nasser reportó valores obtenidos de 31.3 μA valor cercano al obtenido en esta investigación. En lo que concierne a la varilla AG, se destaca el comportamiento que presenta cuando se le induce a un par galvánico por medios acelerados de carbonatación y cloruros. Si se comparan los valores obtenidos en esta investigación con los valores reportados por Bellezze (Bellezze et al., 2006), la diferencia en el comportamiento entre estos dos medios es muy grande, mientras que los valores reportados por Bellezze son de 300 μA en un par galvánico inducido por cloruros, en esta investigación el

máximo alcanzado fue de 70 μA . Comparando el comportamiento con el obtenido por Bellezze y el obtenido en la exposición controlada en laboratorio de esta investigación, se puede concluir que las varillas AG son más afectadas por el proceso de corrosión inducida por cloruros que el generado por un par galvánico provocado por la carbonatación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



5.1 CONCLUSIONES

Específicas

- La varilla AC presenta una mayor densidad de corriente de corrosión al inicio de la exposición a cloruros, cerca de 50% con respecto a la varilla ATT.
- La varilla ATT embebida en los especímenes con relación a/c de 0.45 y expuesta a cloruros presentaron una menor velocidad de corrosión respecto a las varillas de AC y AG durante la fase de propagación.
- La varilla ATT presentó un comportamiento electroquímico de activación-pasivación-activación en la transición de iniciación/propagación. Ésta respuesta puede ser considerada como un comportamiento característico de este tipo de varilla.
- La despasivación de las distintas varillas expuestas en ambiente controlado de laboratorio se dio en el mismo orden para ambas relaciones a/c: ATT, AC, AG y AD. La mayor concentración crítica de cloruros se obtuvo para las varillas AG y AD. Por otro lado, debido a que el tiempo de despasivación de los distintos tipos de varilla fue determinado en base al comportamiento electroquímico, las varillas ATT presentan dos valores de CCC, a causa del comportamiento característico comentado en el punto anterior. Cabe mencionar que el segundo valor converge con el obtenido para la varilla AC.
- El recubrimiento a base de zinc obtenido por galvanizado en inmersión en caliente incrementa el tiempo de despasivación de la varilla AC y la cantidad de cloruros necesaria para que ocurra. Sin embargo, durante la fase de propagación los compuestos insolubles del zinc formados tras la alta concentración de cloruros en la interface varilla-concreto, pueden agrietar el recubrimiento de concreto aun antes de la aparición de manchas de óxido rojo.

- La morfología de daño ocasionada por los cloruros sobre las varillas está influenciada por las características superficiales de ésta. Mientras en la varilla AC el daño se distribuye sobre el área expuesta, en el caso de las varillas de ATT y AG se presume de un daño puntualizado, siendo más severo para la varilla AG.
- La varilla AG se comporta electroquímicamente más estable en el concreto carbonatado que en concretos contaminados por cloruros, debido a la influencia del pH del concreto sobre este tipo de varilla.
- La doble protección (metal-polímero) sobre la superficie de la varilla de acero incrementa el tiempo antes de la despasivación, e incluso presentando daños sobre el recubrimiento polimérico.
- El comportamiento electroquímico durante la corrosión galvánica fue similar para los diferentes tipos de varilla involucradas. Las diferencias en los rangos de valores de la corriente de corrosión son atribuibles a los diferentes tipos de recubrimiento de las varillas. Los valores obtenidos para la varilla AC y AG resultaron ser un 35% y 38% menor a la varilla ATT.

Generales

- El diseño del espécimen debe de ser considerado como parte prioritaria cuando se evalúa el proceso de degradación por corrosión, ya que podría sobreestimarse esta última, es decir, se pueden reportar valores electroquímicos o de concentración de cloruros que no necesariamente representarían el estado de la zona de la varilla estudiada.
- El monitoreo electroquímico en las fases de iniciación, despasivación y propagación permite identificar el comportamiento característico de los diferentes tipos de varilla embebidas en concreto y expuestas a un determinado medio agresivo.

- Las características superficiales de las varillas son un factor muy importante en el proceso de corrosión, ésta debe de ser considerada a la hora de la determinación de la concentración crítica de cloruros.
- El avance de la carbonatación obtenido para los especímenes expuestos en ambiente marino y urbano/industrial fue muy similar, independientemente de la relación a/c. Es de suma importancia considerar a ambos ambientes al momento de utilizar un determinado tipo de varilla de acero como refuerzo.
- La prueba de corrosión galvánica simula de manera macro, las micro-celdas de corrosión generadas durante el proceso de corrosión por carbonatación, esto mediante el aumento de la relación cátodo/ánodo.
- El ensayo de corrosión por par galvánico puede ser útil para la comprensión de la corrosión de las varillas en estructuras en vías de carbonatación, ya que los resultados representan la intensidad de corriente de corrosión galvánica natural.

5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

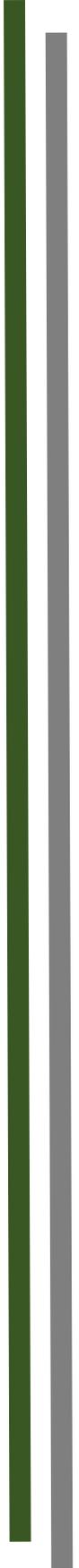
El presente trabajo aportó resultados característicos de varillas con diferente acabado superficial en distintos medios de exposición, estas evaluadas en las etapas de iniciación, despasivación y propagación, sin embargo, se propone continuar con líneas de investigación que complementen las contribuciones del presente:

- Evaluar el comportamiento electroquímico de varillas en solución de poro sintética contaminada con cloruros, teniendo como variable principal la concentración de oxígeno.
- Evaluar a largo plazo (entiéndase como fase de agrietamiento por corrosión del espécimen) especímenes con diferentes tipos de varilla expuestos a

cloruros en un ambiente controlado en laboratorio y analizar el tipo de óxido formado sobre la superficie de la varilla.

- Se recomienda realizar un experimento de carbonatación acelerada donde el objetivo principal sea evaluar el comportamiento de varillas ATT comparada con las varillas AC, para analizar el comportamiento que ésta tendrá ante este medio de exposición.
- Realizar experimentos de inducción de corriente galvánica por carbonatación y/o cloruros, analizando períodos de tiempo prolongados, esto en laboratorio y mediante modelación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



407-ONNCCE-01, N.-C.-. (2001). NMX C 407-ONNCCE-2001.pdf.

ACI-222R-01. (2010). ACI 222R-01 Protection of Metals in Concrete Against Corrosion Reported by ACI Committee 222. *Design, 01*(Reapproved), 1–41.

ACI-318. (2008). ACI-318.

ACI-365.1R. (2000). Service-Life Prediction — State-of-the-Art Report Reported by ACI Committee 365, 44.

Acosta, A. T., Moreno, A. del V., Madrid, M. M., Quiroz, J. T. P., & Polhs, M. B. (2010). Plan Nacional de evaluación de estructuras federales dañados por corrosión. Retrieved from <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt327.pdf>

Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., & Castro, P. (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research, 30*(7), 1047–1055. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00265-9](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00265-9)

Alonso, C., Castellote, M., & Andrade, C. (2002). Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. *Electrochimica Acta, 47*(21), 3469–3481. [http://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00283-9](http://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00283-9)

Alvarenga, de A. E., & Cunha Lins, V. de F. (2016). Atmospheric corrosion evaluation of electrogalvanized, hot-dip galvanized and galvanized interstitial free steels using accelerated field and cyclic tests. *Surface and Coatings Technology*. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.021>

Andrade, C., Alonso, C., & Sarfá, J. (2002). Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. *Cement and Concrete Composites, 24*(1), 55–64. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00026-9](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00026-9)

Andrade, C., & Alonso, M. C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and

on-site. *Science*, 10(5), 315–328. [http://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](http://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)

Andrade, C., Río, O., Castillo, Á., Castellote, M., & Andrea, R. D'. (2010, June 11). A NDT Performance Method Based on Electrical Resistivity for the Specification of Concrete Durability. Retrieved from <http://digital.csic.es/handle/10261/25188>

Ann, K. Y., & Song, H. W. (2007). Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 49(11), 4113–4133. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007>

Apostolopoulos, C. A., & Papadakis, V. G. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2316–2324. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006>

Arenas, M. A., Casado, C., Nobel-Pujol, V., & De Damborenea, J. (2006). Influence of the conversion coating on the corrosion of galvanized reinforcing steel. *Cement and Concrete Composites*, 28(3), 267–275. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.010>

ASTM A-1055. (2008). Standard Specification for Zinc and Epoxy Dual-Coated Steel Reinforcing Bars 1 (pp. 1–9). <http://doi.org/10.1520/A1055>

ASTM A-767. (2013). Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete, 1–5. <http://doi.org/10.1520/A0767>

ASTM C-876. (2000). Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete., 03(Reapproved).

ASTM E-1019. (2003). Standard Test Methods for Determination of Carbon , Sulfur , Nitrogen , and Oxygen in Steel and in Iron , Nickel , and Cobalt Alloys 1. *Methods*, 03(January 2001), 1–28. <http://doi.org/10.1520/E1019-11>. Copyright

ASTM E-384. (1999). Standard Test Methods for Microindentation Hardness of Materials. *Annual Book of ASTM Standard*, 3(1), 1–24.

ASTM G-1. (1999). Standard Practice for Preparing , Cleaning , and Evaluating Corrosion Test Specimens. *Significance*, 90(Reapproved 2011), 1–9. <http://doi.org/10.1520/G0001-03R11.2>

ASTM-STP-1276. (2014). Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures.

Baghabra Al-Amoudi, O. S., Al-Kutti, W. A., Ahmad, S., & Maslehuddin, M. (2009). Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 672–676. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.005>

Bastidas, D. M., Criado, M., Fajardo, S., La Iglesia, A., & Bastidas, J. M. (2015). Corrosion inhibition mechanism of phosphates for early-age reinforced mortar in the presence of chlorides. *Cement and Concrete Composites*, 61, 1–6. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.009>

Bellezze, T., Fratesi, R., & Tittarelli, F. (2006). Corrosion behaviour of galvanized steel rebars in the presence of coating discontinuities. In *Corrosion of Reinforcement in Concrete: Monitoring, Prevention and Rehabilitation Techniques*. <http://doi.org/10.1533/9781845692285.27>

Bellezze, T., Malavolta, M., Quaranta, A., Ruffini, N., & Roventi, G. (2006). Corrosion behaviour in concrete of three differently galvanized steel bars. *Cement and Concrete Composites*, 28(3), 246–255. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.011>

Bertolini, L., Carsana, M., & Redaelli, E. (2008). Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(4), 376–385. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006>

Carmen Andrade, et al. (1989). *Manual de inspección de obras dañadas por*

corrosión de armaduras. Madrid, España. Retrieved from <https://scholar.google.com/scholar?hl=es&q=manual+de+inspecci%C3%B3n+de+obras+da%C3%B1adas+por+corrosi%C3%B3n+de+armaduras+1989&btnG=&lr=>

Castel, A., François, R., & Arliguie, G. (1999). Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 561–565. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00017-4](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00017-4)

Castro-Borges, P., & Mendoza-Rangel, J. M. (2010). Influence of climate change on concrete durability in Yucatan peninsula. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 45(1), 61–69. <http://doi.org/10.1179/147842209X12489567719662>

Chang, J. J., Yeih, W., & Tsai, C. L. (2002). Enhancement of bond strength for epoxy-coated rebar using river sand. *Construction and Building Materials*, 16(8), 465–472. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00101-0](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00101-0)

Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., & Chalee, W. (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials*, 37, 693–698. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.061>

Cheng, A., Huang, R., Wu, J. K., & Chen, C. H. (2005). Effect of rebar coating on corrosion resistance and bond strength of reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 19(5), 404–412. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.006>

Cook, D. C. (2005). Spectroscopic identification of protective and non-protective corrosion coatings on steel structures in marine environments. *Corrosion Science*, 47(10), 2550–2570. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.10.018>

Dangla, P., & Dridi, W. (2009). Rebar corrosion in carbonated concrete exposed to variable humidity conditions. Interpretation of Tuutti's curve. *Corrosion Science*, 51(8), 1747–1756. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.04.029>

de la Fuente, D., D??az, I., Simancas, J., Chico, B., & Morcillo, M. (2011). Long-term atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, *53*(2), 604–617. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.007>

Delaunois, F., Tosar, F., & Vitry, V. (2014). Corrosion behaviour and biocorrosion of galvanized steel water distribution systems. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, *97*(Figure 2), 110–9. <http://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.01.003>

Dong, S., Zhao, B., Lin, C., Du, R., Hu, R., & Zhang, G. X. (2012). Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete in ocean environment. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 72–78. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.026>

Dubuisson, E., Lavie, P., Dalard, F., Caire, J. P., & Szunerits, S. (2007). Corrosion of galvanised steel under an electrolytic drop. *Corrosion Science*, *49*(2), 910–919. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.05.027>

Duong, V. B., Sahamitmongkol, R., & Tangtermsirikul, S. (2013). Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, *40*, 1066–1075. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.042>

Eijnsbergen, J. F. H. Van. (1994). Duplex Systems Hot-dip Galvanizing plus Painting.

F. Belaïd, G. Arliguie, & Francois, R. (2000). Corrosion Products of Galvanized Rebars Embedded in Chloride-Contaminated Concrete. *Corrosion Engineering Section*, *56*(9), 960–965.

Fajardo, G., Escadeillas, G., & Arliguie, G. (2006). Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by “artificial” sea-water. *Corrosion Science*, *48*(1), 110–125. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.11.015>

Fajardo, G., Valdez, P., & Pacheco, J. (2009). Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23(2), 768–774. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023>

Fan, Y., He, Y., Luo, P., Chen, X., & Liu, B. (2016). A facile electrodeposition process to fabricate corrosion-resistant superhydrophobic surface on carbon steel. *Applied Surface Science*, 368, 435–442. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.252>

Farina, S. B., & Duffó, G. S. (2007). Corrosion of zinc in simulated carbonated concrete pore solutions. *Electrochimica Acta*, 52(16), 5131–5139. <http://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.01.014>

Fattuhi, N. I., & Hughes, B. P. (1986). Resistance to acid attack of concrete with different admixtures or coatings. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8(4), 223–230. [http://doi.org/10.1016/0262-5075\(86\)90049-7](http://doi.org/10.1016/0262-5075(86)90049-7)

Feliu, V., González, J. A., Andrade, C., & Feliu, S. (1998). Equivalent circuit for modelling the steel-concrete interface. II. Complications in applying the Stern-Geary equation to corrosion rate determinations. *Corrosion Science*, 40(6), 995–1006. [http://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00037-7](http://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00037-7)

Fernández, E. M. (2008). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de acero equivalente* (Tesis Doctoral). Universidad Carlos III de Madrid.

Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1987). *Corrosion engineering* (Third Edit).

Gandía-Romero, J. M., Campos, I., Valcuende, M., García-breijo, E., & Marcos, M. D. (2016). Potentiometric thick-film sensors for measuring the pH of concrete, 68, 66–76.

Garcés, P., Miguel, T., Llorca, C., & Zornoza, E. (2008). *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado*. (C. UNIVERSITARIO, Ed.).

García-Alonso, M. C., Escudero, M. L., Miranda, J. M., Vega, M. I., Capilla, F., Correia, M. J., ... González, J. A. (2007). Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(10), 1463–1471. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.06.003>

Ghods, P., Isgor, O. B., McRae, G. A., Li, J., & Gu, G. P. (2011). Microscopic investigation of mill scale and its proposed effect on the variability of chloride-induced depassivation of carbon steel rebar. *Corrosion Science*, 53(3), 946–954. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.11.025>

Glass, G. K., Page, C. L., & Short, N. R. (1991). Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars. *Corrosion Science*, 32(12), 1283–1294. [http://doi.org/10.1016/0010-938X\(91\)90048-T](http://doi.org/10.1016/0010-938X(91)90048-T)

González, F., Fajardo, G., Arliguie, G., Juárez, C. A., & Escadeillas, G. (2011). Electrochemical realkalisation of carbonated concrete: An alternative approach to prevention of reinforcing steel corrosion. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(October), 6332–6349.

Hamlaoui, Y., Pedraza, F., & Tifouti, L. (2008). Corrosion monitoring of galvanised coatings through electrochemical impedance spectroscopy. *Corrosion Science*, 50(6), 1558–1566. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.02.010>

Hansson, C. M., Poursaee, A., & Laurent, A. (2006). Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 36(11), 2098–2102. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.07.005>

Hartt, W. (2016). Testing of Chloride Exposed Reinforced Concrete and Service Life Misrepresentation of Service Performance. *Corrosion Science Section*, 72, 1–9. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.5006/1750>

Hussain, S. E., Rasheeduzzafar, Al-Musallam, A., & Al-Gahtani, A. S. (1995). Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1543–1555. [http://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00148-6](http://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00148-6)

Ismail, M., Hamzah, E., Guan, G. C., & Rahman, I. A. (2010). CORROSION PERFORMANCE OF DUAL-PHASE STEEL. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(2), 81–90.

Ismail, M., Muhammad, B., Hamzah, E., & Keong, T. (2012). Corrosion behaviour of dual-phase and galvanized steels in concrete. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 59(3), 132–138. <http://doi.org/10.1108/00035591211224672>

Jones, M. R., Dhir, R. K., Newlands, M. D., & Abbas, a. M. O. (2000). A study of the CEN test method for measurement of the carbonation depth of hardened concrete. *Materials and Structures*, 33(2), 135–142. <http://doi.org/10.1007/BF02484168>

Keleştemur, O., & Yildiz, S. (2009). Effect of various dual-phase heat treatments on the corrosion behavior of reinforcing steel used in the reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 23(1), 78–84. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.001>

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tenesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas*.

Lau, K., & Sagues, A. (2011). Impedance of reinforcing steel with disbanded dual polymer-zinc coating. *Electrochimica Acta*, 56(23), 7815–7824. <http://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.01.008>

Li, C.-N., Ji, F.-Q., Yuan, G., Kang, J., Misra, R. D. K., & Wang, G.-D. (2016). The impact of thermo-mechanical controlled processing on structure-property relationship and strain hardening behavior in dual-phase steels. *Materials Science and Engineering: A*, 662, 100–110. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.055>

Macias, A., & Andrade, C. (1986). Stability of the calcium hydroxyzincate protective layer developed on galvanized reinforcements after a further increase of the pH value, 36, 19–28.

Macias, A., & Andrade, C. (1987). Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions: Part 1: electrochemical results. *British Corrosion Journal*, 22(2), 113–118. <http://doi.org/10.1179/000705987798271749>

Mangat, P. S., Grigoriadis, K., & Abubakri, S. (2016). Microwave curing parameters of in-situ concrete repairs. *Construction and Building Materials*, 112, 856–866. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.007>

Manrique, B. A. (2011). *Evaluación de la realcalinización de estructuras de concreto reforzado carbonatado: descripción del comportamiento postratamiento (Tesis de maestría)*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Retrieved from <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080223862.PDF>

Mansfeld, F. (1976). The Polarization Resistance Technique for Measuring Corrosion Currents. *Advances in Corrosion Science and Technology*, 163. http://doi.org/10.1007/978-1-4684-8986-6_3

Meagher, T., Shanahan, N., Buidens, D., Riding, K. A., & Zayed, A. (2015). Effects of chloride and chloride-free accelerators combined with typical admixtures on the early-age cracking risk of concrete repair slabs. *Construction and Building Materials*, 94, 270–279. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.003>

Moreno, E. I., Ixtepan, D. S., & Sarabia, C. (2005). Galvanized rebars : An option against carbonation-induced corrosion, 2, 17–24.

Morris, W., Vico, A., & Vázquez, M. (2004). Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. *Electrochimica Acta*, 49(25), 4447–4453. <http://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.05.001>

NACE Standard SP0308. (2008). Inspection Methods for Corrosion Evaluation of.

Evaluation, (21128), 3–5.

Nadlene, R., Esah, H., Norliana, S., & Irwan, M. A. M. (2011). Study on the Effect of Volume Fraction of Dual Phase Steel to Corrosion Behaviour and Hardness. *International Scholarly and Scientific Research and Innovation*, 5(2), 393–396. Retrieved from scholar.waset.org/1999.8/15948

Nakagawa, A. H., & Thomas, G. (1985). Microstructure-mechanical property relationships of dual-phase steel wire. *Metallurgical Transactions A*, 16(May), 831–840. <http://doi.org/10.1007/BF02814834>

Nasser, A., Clément, A., Laurens, S., & Castel, A. (2010). Influence of steel-concrete interface condition on galvanic corrosion currents in carbonated concrete. *Corrosion Science*, 52(9), 2878–2890. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.037>

Nygaard, P. V. (2008). *Non-destructive electrochemical monitoring of reinforcement corrosion (PhD Thesis)*. The technical University of Denmark

Otieno, M., Beushausen, H., & Alexander, M. (2016). Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. *Cement and Concrete Research*, 79, 373–385. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.009>

Ožbolt, J., Oršanić, F., & Balabanić, G. (2016). Modeling influence of hysteretic moisture behavior on distribution of chlorides in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 67, 73–84. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.01.004>

Padilla, V., & Alfantazi, A. (2014). Corrosion film breakdown of galvanized steel in sulphate-chloride solutions. *Construction and Building Materials*, 66, 447–457. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.053>

Parrott, L. J. (1996). Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete. *Materials and Structures*, 29(April), 164–173. <http://doi.org/10.1007/bf02486162>

Pereira, V. C. D. O., Monteiro, E. C. B., & Almeida, K. D. S. (2013). Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides. *Construction and Building Materials*, 40, 710–718. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.050>

Pérez, A., Climent, M. A., & Garcís, P. (2010). Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete using a conductive cement paste as the anode. *Corrosion Science*, 52(5), 1576–1581. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.016>

Pérez, C., Collazo, A., Izquierdo, M., Merina, P., & Nóvoa, X. R. (2000). Electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion process on coated galvanized steel in a salt spray fog chamber. *Corrosion*, 56(12), 1220–1232. <http://doi.org/10.5006/1.3280510>

Polder, R. B., Leegwater, G., Worm, D., & Courage, W. (2014). Service life and life cycle cost modelling of cathodic protection systems for concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 47, 69–74. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.004>

Polder, R. B., & Peelen, W. H. A. (2002). Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. *Cement and Concrete Composites*, 24(5), 427–435. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00074-9](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00074-9)

Poursaee, A. (2010). Potentiostatic transient technique, a simple approach to estimate the corrosion current density and Stern-Geary constant of reinforcing steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1451–1458. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.04.006>

Pu, Q., Jiang, L., Chu, H., Xu, J., & Xu, Y. (2011). Electrochemical behavior of steel bar in electrolytes: Influence of pH value and cations. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 26(6), 1133–1136. <http://doi.org/10.1007/s11595-011-0376-0>

R. Yeomans. (2004). *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete : An Overview* Professor Stephen R Yeomans University of New South Wales.

Ribeiro, P. H. L. C., Meira, G. R., Ferreira, P. R. R., & Perazzo, N. (2013). Electrochemical realkalisation of carbonated concretes-Influence of material characteristics and thickness of concrete reinforcement cover. *Construction and Building Materials*, 40, 280–290. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.076>

RILEM TC-154-EMC. (2000). Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. *Materials and Structures*.

Román, J., Vera, R., Bagnara, M., Carvajal, A. M., & Aperador, W. (2014). Effect of chloride ions on the corrosion of galvanized steel embedded in concrete prepared with cements of different composition. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(2), 580–592.

Roventi, G., Bellezze, T., Giuliani, G., & Conti, C. (2014a). Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: Effect of wet-dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer. *Cement and Concrete Research*, 65, 76–84. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.014>

Roventi, G., Bellezze, T., Giuliani, G., & Conti, C. (2014b). Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: Effect of wet-dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer. *Cement and Concrete Research*, 65, 76–84. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.014>

Sarkar, P. P., Kumar, P., Manna, M. K., & Chakraborti, P. C. (2005). Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution. *Materials Letters*, 59(19-20), 2488–2491. <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.030>

Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M. (2015). Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles. *Construction and Building*

Materials, 99, 208–225. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.030>

Campos, A. R. (2011). *Estudio de la carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales: aplicación al ambiente de la zona metropolitana de Monterrey* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/2327/1/1080224574.pdf>

Simon, P., Economopoulos, M., & Nilles, P. (1984). Tempcore: a new process for the production of high quality reinforcing bars. *Iron and Steel Eng.*, 61(3), 55–67.

Sistonen, E., Cwirzen, A., & Puttonen, J. (2008). Corrosion mechanism of hot-dip galvanised reinforcement bar in cracked concrete. *Corrosion Science*, 50(12), 3416–3428. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.050>

SOHAIL, M. G. (2013). *Corrosion of Steel in Concrete: Development of an Accelerated Test by Carbonation and Galvanic Coupling (thèse de doctorat)*. Université de Toulouse III.

Sohail, M. G., Laurens, S., Deby, F., & Balayssac, J. P. (2013). Significance of macrocell corrosion of reinforcing steel in partially carbonated concrete: numerical and experimental investigation. *Materials and Structures*, 1–17. <http://doi.org/10.1617/s11527-013-0178-2>

Speer, J. G., & Matlock, D. K. (2002). Recent developments in low-carbon sheet steels. *Jom*, 54(7), 19–24. <http://doi.org/10.1007/BF02700981>

Stratfull, R. F. (1957). The Corrosion of Steel In a Reinforced Concrete Bridge. *Corrosion*. <http://doi.org/10.5006/0010-9312-13.3.43>

Tan, Z. Q., & Hansson, C. M. (2008). Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete. *Corrosion Science*, 50(9), 2512–2522. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.035>

Tittarelli, F., & Bellezze, T. (2010). Investigation of the major reduction reaction

occurring during the passivation of galvanized steel rebars. *Corrosion Science*, 52(3), 978–983. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.11.021>

Trejo, D., Monteiro, P., & Thomas, G. (1994). Mechanical Properties and Corrosion Susceptibility of Dual-Phase Steel in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(7), 1245–1254.

Trujeque, J. R. (1999). *Influencia de los principales factores climaticos y de la calidad del aire sobre la corrosión atmosferica de los metales en la costa sureste del golfo de México.*

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute.* http://doi.org/10.4324/9780203414606_chapter_2

Vera, R. M., & Cañas, F. J. (2005). Comportamiento frente a la corrosión en ambiente marino de acero galvanizado y acero galvanizado pintado (duplex). *Información Tecnológica*, 16(4), 53–58. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642005000400009>

Villa, C. S. (2014). Protección contra la corrosión con sistemas Dúplex (Galvanizado por inmersión en caliente más pintura). *Igarss 2014*, (1), 1–5. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Villeda Wong, L. A. (2011). *Dominio de efectividad de la prevención no convencional de la corrosión en concreto reforzado carbonatado.*

Vu, N. T. (2011). *Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabiliste (thèse de doctorat).* Université de Toulouse III.

William, D., & Callister, J. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. *Reverté*.

Worldwide, A. (1981). Dual Phase Steels. *Annual Review of Materials Science*,

- 11(August), 245–266. <http://doi.org/10.1146/annurev.ms.11.080181.001333>
- Xiong, Z. P., Kostryzhev, A. G., Stanford, N. E., & Pereloma, E. V. (2016). Effect of deformation on microstructure and mechanical properties of dual phase steel produced via strip casting simulation. *Materials Science and Engineering: A*, 651, 291–305. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.120>
- Xu, X., Zwaag, S. Van Der, & Xu, W. (2016). The effect of martensite volume fraction on the scratch and abrasion resistance of a ferrite – martensite dual phase steel. *Wear*, 348-349, 80–88. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.017>
- Y. Meas, F.J. Rodríguez, J. Genescá, J. Mendoza, R. Durán, J. Uruchurtu, J.M. Malo, E.A.Martínez, C. Arganiz, T. Pérez, A. Martínez, J.G. Chacón, C. Gaona, F. M. A. y J. G. G. (2002). *Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión*. (J. G. Llongueras, Ed.).
- Yeomans, S. R. (1998). Corrosion of the Zinc Alloy Coating in Galvanized Reinforced Concrete. *Corrosion* 98.
- Zamri, M. (2008). the Study of Corrosion Rate for Carbon Steel Pipe in Alkaline Concrete Solution, (May), 1–24.
- Zhang, Y., Pang, X., Qu, S., Li, X., & Gao, K. (2012). Discussion of the CO₂ corrosion mechanism between low partial pressure and supercritical condition. *Corrosion Science*, 59, 186–197. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.006>
- Zhu, F., Persson, D., Thierry, D., & Taxen, C. (2000). Formation of Corrosion Products on Open and Confined Zinc Surfaces Exposed to Periodic Wet / Dry Conditions. *Corrosion Science Section*, (December), 1256–1265.