



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA DE ESPECIALIDAD

Título

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA NORMATIVA EXISTENTE
PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO Y VELOCIDAD DE
CORROSIÓN EN ACEROS PARA LA CONSTRUCCIÓN.**

Autor/a

MARC QUEROL MARTÍ

Tutor/a

PATRICIA PARDO TRÀFACH

Departamento

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Intensificación

INTENSIFICACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Fecha

JUNIO DE 2011

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que me han ayudado con la realización de esta tesina y que me han apoyado durante el largo camino que ha supuesto la obtención de esta carrera.

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mi tutora, Patricia Pardo, por su interés, atención y dedicación en la orientación y desarrollo de este trabajo, ya que sin su ayuda la realización del mismo no habría sido posible.

También me gustaría dar las gracias a todas las personas que me han ofrecido su colaboración desinteresada en el laboratorio de materiales de construcción, ayudándome en la realización de los ensayos, facilitándome la normativa y respondiendo a cualquier duda que se me presentaba.

Finalmente me gustaría agradecer a mis amigos, compañeros y familiares por su compañía y apoyo durante todos estos años de carrera, en especial a mis padres por creer en mí.

A todos, muchas gracias!

Título: Estudio comparativo de la normativa existente para la evaluación del grado y velocidad de corrosión en aceros para la construcción

Autor: Querol Martí, Marc

Tutor: Pardo Tráfach, Patricia

RESUMEN

La corrosión es una reacción química entre un material y su entorno que provoca su deterioro y el de sus propiedades.

Por este motivo la evaluación del grado y la velocidad de corrosión es un aspecto de vital importancia para determinar la vida útil de los aceros en construcción, así como para el establecimiento de las condiciones de uso de aceros y de elementos constructivos compuestos en los que participan materiales mecánicos.

Existen varios métodos normativos para la determinación, cualitativa o cuantitativa, del grado de corrosión al que un ambiente somete a un determinado elemento. Muchos de ellos son procedimientos definidos en base a su operatividad, es decir, en los que el resultado obtenido depende principalmente de las condiciones experimentales en las que se ha llevado a cabo el ensayo. Otros métodos normativos son específicos para un tipo de metal o para un tiempo de exposición concreto (normalmente un año). Por ello es muy difícil comparar los resultados provenientes de diferentes ensayos y su traslación a los escenarios de uso reales.

En este trabajo se pretende realizar un estudio comparativo de diferentes procedimientos normativos para la evaluación del grado y la velocidad de corrosión de diferentes materiales metálicos. Una vez realizado el estudio se escogerán algunos de estos métodos para llevarlos a cabo en el laboratorio sobre diferentes materiales metálicos con y sin recubrimiento de mortero, a fin de establecer la comparabilidad de los resultados obtenidos.

También se categorizará, según los criterios definidos en la norma ISO 9923, diferentes metales y sus aleaciones, con o sin protección de mortero, ensayados según el procedimiento establecido y se valorará la variación de corrosión debido a la presencia del recubrimiento de mortero.

Finalmente, se estudiará la validez de una metodología común para los materiales ensayados y su correspondencia con los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los ensayos normativos previamente seleccionados.

Title: Comparative study of the existing rules for evaluating the extent and rate of corrosion in steel used in construction.

Author: Querol Martí, Marc

Tutor: Pardo Tráfach, Patricia

ABSTRACT

Corrosion is a chemical reaction between a material and its environment that causes its deterioration and the deterioration of its properties.

For this reason the evaluation of the extent and rate of corrosion is an issue of vital importance in determining the useful life of steel in construction as well as in establishing the conditions for the use of steel and construction elements involving mechanical materials.

There are several standard methods for determining, qualitative or quantitative, the degree of corrosion in an environment subjected to a particular element. Many of them are based on procedures defined in its operation, i.e where the result depends mainly on the experimental conditions in which it has conducted the trial. Other regulatory methods are specific to one type of metal or concrete exposure time (usually one year). It is therefore very difficult to compare results from different trials and their translation to actual usage scenarios.

This paper aims to conduct a comparative study of different regulatory procedures for evaluating the extent and rate of corrosion of different metal materials. Once the study is done, some of these methods are chosen to carry them out in the laboratory on different metallic materials, with and without mortar protection, to establish the comparability of the results.

Different metals and alloys, with and without protection of mortar, will also be categorized according to the criteria defined in the norm ISO 9923, and the variation of corrosion due to the presence of the coating of mortar will be valued.

Finally, we will examine the validity of a common methodology for the materials tested and their correspondence with the results obtained from the application of a standard testing method previously selected.

ÍNDICE

Introducción	9
Objetivos	10
1. Estado del Arte	11
1.1 Corrosión en aceros	11
1.1.1 Definición	11
1.1.2 La corrosión en los metales	11
1.1.3 Factores que intervienen en la corrosión	13
1.1.3.1 Factores Internos	13
1.1.3.2 Factores Externos	14
1.1.4 Pérdidas económicas producidas por la corrosión	15
1.2 Corrosión del acero embebido en mortero u hormigón.	17
1.2.1 Consideraciones Iniciales	17
1.2.2 Mecanismo de corrosión del acero embebido en mortero	17
1.2.3 Factores que intervienen en la corrosión	20
1.2.3.1 Factores Internos	20
1.2.3.2 Factores Externos	21
1.2.4 Medidas preventivas y de reparación	24
1.2.4.1 Adecuación de los materiales.	24
1.2.4.2 Consideraciones en el diseño	25
1.2.4.3 Protección catódica	25
1.2.4.4 Aplicación de recubrimientos protectores.	26
1.2.4.4.1 Recubrimientos metálicos	26
1.2.4.4.2 Recubrimientos inorgánicos.	27
1.2.4.4.3 Recubrimientos orgánicos.	27
1.3 Medidas de evaluación y cuantificación de la corrosión	28
1.3.1 Medidas electroquímicas	28
1.3.2 Métodos físicos	28
1.3.3 Velocidad de corrosión	29
1.4 Ensayos normalizados de corrosión.	30
1.4.1 Consideraciones previas.	30
1.4.2 Parámetros a tener en cuenta en los ensayos	30
1.4.2.1 Tipos de ataque	30
1.4.2.2 Evaluación	30
1.4.3 Categorización de la atmosfera	31
1.4.4 Cuadro resumen	31
1.4.4.1 Normas NACE	32
1.4.4.2 Normas ASTM.	33
1.4.4.3 Normas ISO.	34

1.4.4.4 Normas UNE.	35
1.5 Planteamiento del trabajo.	36
2 Materiales y metodología	37
2.1 Alambres	37
2.2 Morteros	38
2.3 Ensayos de corrosión realizados bajo normativa	40
2.3.1 UNE-EN 990	40
2.3.2 UNE-EN ISO 16701	41
2.4 Determinación de la pérdida de masa	41
2.5 Cálculo del área expuesta	42
2.6 Cálculo de la velocidad de corrosión a partir de la pérdida de masa	43
2.7 Extrapolación de la velocidad de corrosión a un año	43
2.8 Categorización	44
2.9 Diseño de la fase experimental	44
3 Resultados	47
3.1 Consideraciones previas	47
3.2 Acero al carbono (tipo G)	47
3.2.1 Alambres sueltos	47
3.2.1.1 Ensayo UNE-EN 990	48
3.2.1.2 Ensayo EN 16701	49
3.2.1.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año	50
3.2.2 Alambres embebidos en mortero	50
3.2.2.1 Ensayo UNE-EN 990	50
3.2.2.2 Ensayo EN 16701	50
3.2.2.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año	51
3.3 Acero galvanizado (tipo A y E)	53
3.3.1 Alambres sueltos	53
3.3.1.1 Ensayo UNE-EN 990	53
3.3.1.2 Ensayo EN 16701	54
3.3.1.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año	57
3.3.2 Alambres embebidos en mortero	57
3.3.2.1 Ensayo UNE-EN 990	57
3.3.2.2 Ensayo EN 16701	58
3.3.2.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año	60
3.4 Aluminio-zinc (ALZ)	61
3.4.1 Alambres sueltos	61
3.4.1.1 Ensayo EN 16701	61
3.4.1.2 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año	62

3.4.2	Alambres embebidos en mortero	63
3.4.2.1	Ensayo EN 16701	63
3.4.2.2	Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año	64
3.5	Velocidades de corrosión sin ajuste de pH	65
3.6	Comparación de la velocidad de corrosión anual de los distintos alambres	66
3.6.1	Sin recubrimiento de mortero	66
3.6.2	Con recubrimiento de mortero	67
3.7	Categorización de la corrosividad del ambiente según ISO 9223	67
4	Conclusiones	69
5	Referencias	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. <i>Potencial electródico</i>	12
Tabla 1.2. serie galvánica en agua de mar	13
Tabla 1.3. Resumen de los datos del informe Hoar (1971)	16
Tabla 1.4. Recubrimientos mínimos para las distintas clases de exposición	21
Tabla 1.5. Riesgo de corrosión por cloruros	28
Tabla 1.6. Interpretación de la relación entre resistividad y probabilidad de corrosión	28
Tabla 1.7. Velocidades de corrosión del primer año de exposición para diferentes metales y categorías de ambiente (ISO 9223)	31
Tabla 1.8. Normas NACE de corrosión	32
Tabla 1.9. Normas ASTM de corrosión	33
Tabla 1.10. Normas ISO de corrosión	34
Tabla 1.11. Normas UNE de corrosión	35
Tabla 2.1. Composición de los alambres estudiados	37
Tabla 2.2. propiedades mecánicas de los alambre estudiados	38
Tabla 2.3. Composición de los morteros para el recubrimiento de las muestras de ensayo	39
Tabla 2.4. Condiciones experimentales de los ensayos de corrosión aplicados	40
Tabla 2.5. Resumen de la fase experimental	45
Tabla 3.1. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo UNE-EN 990 durante 7 y 30 días.	47
Tabla 3.2. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo G a 7 y 30 días de exposición de acuerdo a la norma 990	48
Tabla 3.3. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo EN 16701 durante 7 días	48
Tabla 3.4. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo EN 16701 durante 14 días	48
Tabla 3.5. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres sometidos al ensayo EN 16701 durante 28 días	49
Tabla 3.6. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo G a 7 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma 16701	49
Tabla 3.7. Velocidades de corrosión del alambre tipo G estimadas a 1 año	
Tabla 3.8: Resultados de los ensayos de alambres tipo G embebidos en mortero según la norma UNE-EN990	49
Tabla 3.9. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G embebidos en mortero sometidos al ensayo EN 16701 durante 28 días	50

Tabla 3.10. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G embebidos en mortero sometidos al ensayo EN 16701 durante 56 días	51
Tabla 3.11. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo EN 16701 durante 90 días	51
Tabla 3.12. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión media de los alambres tipo G sometidos a 28 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 16701	51
Tabla 3.13. Parámetros para estimar la velocidad de corrosión en el primer año. (alambre tipo G embebido en mortero)	52
Tabla 3.14. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN 990 durante 7 y 30 días.	53
Tabla 3.15. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo UNE-EN 990 durante 7 y 30 días	53
Tabla 3.16. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo A a 7 y 30 días de exposición de acuerdo a la norma 990	54
Tabla 3.17. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo E a 7 y 30 días de exposición de acuerdo a la norma 990	54
Tabla 3.18. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 7 días	54
Tabla 3.19. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 14 días.	55
Tabla 3.20. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.	55
Tabla 3.21. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo A a 7 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701.	55
Tabla 3.22. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo EN 16701 durante 7 días.	55
Tabla 3.23. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo EN 16701 durante 14 días.	56
Tabla 3.24. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.	56
Tabla 3.25. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo E a 7 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701	56
Tabla 3.26. Velocidades de corrosión de los aceros tipo A y E estimadas a 1 año.	57
Tabla 3.27. Resultados de los ensayos de alambres tipo A y E embebidos en mortero según la norma UNE-EN 990.	57

Tabla 3.28. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.	58
Tabla 3.29. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.	58
Tabla 3.30. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.	58
Tabla 3.31. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo A a 28 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701	59
Tabla 3.32. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.	59
Tabla 3.33. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.	59
Tabla 3.34. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.	59
Tabla 3.35. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión promedio de los alambres a 28, 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701.	60
Tabla 3.36. Parámetros para estimar la velocidad de corrosión de los alambres tipo A y E embebidos en mortero durante el primer año.	60
Tabla 3.37. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 7 días.	61
Tabla 3.38. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 14 días.	62
Tabla 3.39. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.	62
Tabla 3.40. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo ALZ a 7, 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 1670.	62
Tabla 3.41. Velocidades de corrosión del alambre tipo ALZ estimada a 1 año.	62
Tabla 3.42. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.	63
Tabla 3.43. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.	63

Tabla 3.44. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.	63
Tabla 3.45. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo ALZ embebidos en mortero a 28 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 16701	64
Tabla 3.46. Parámetros para estimar la velocidad de corrosión del alambre tipo ALZ en el primer año.	64
Tabla 3.47. Peso inicial, peso final, pérdida de peso y velocidad de corrosión para los alambres embebidos en mortero sometidos a los ciclos definidos en la norma UNE-EN ISO 16701 a 28 días, sin ajuste de pH	65
Tabla 3.48. Pérdidas de masa (en %) según UNE-EN ISO 16701 de morteros a 28 días con y sin ajuste de pH.	65
Tabla 3.49. Velocidades de corrosión a un año para los distintos aceros	66
Tabla 3.50. Velocidades de corrosión a un año para los distintos aceros embebidos en mortero	67
Tabla 3.51. Categorización según ISO 9223 de los alambres tipo A, E, G y ALZ sin recubrimiento de mortero.	68
Tabla 3.52. Categorización según ISO 9223 de los alambres tipo A, E, G y ALZ embebidos en el mortero	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. fotografía de una armadura corroída	15
Fig. 1.2. Mecanismo de la corrosión electroquímica del acero	18
Fig. 1.3. Volúmenes relativos de los productos de la oxidación del hierro	19
Fig. 1.4. Estados de corrosión del acero en función del tiempo	19
Fig. 1.5. Ilustración esquemática del proceso de corrosión del acero embebido en mortero por la acción de cloruros	22
Fig. 1.6. Ilustración del acero corroído por picadura	22
Fig. 1.7. Zonas de exposición del hormigón en ambiente marino	24
Fig. 2.1. Diámetros de alambre estudiados	37
Fig. 2.2. Moldes utilizados para la fabricación de morteros	38
Fig. 2.3. Recubrimiento de silicona de la parte exterior del alambre	39
Fig. 2.4. a) Fase 1; b) Fase 2; Según norma UNE-EN ISO 16701	41
Fig. 2.5. Determinación de la masa del espécimen corroído según ISO 8407	42
Fig. 2.6. Partes en que se divide el alambre para el cálculo del área	42
Fig. 2.7. Estimación gráfica de la velocidad de corrosión a 1 año	44
Fig.3.1. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) del alambre tipo G embebido en mortero.	52
Fig.3.2. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) de los alambres tipo A y E embebidos en mortero.	60
Fig.3.3. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) del alambre tipo ALZ embebido en mortero.	64
Fig.3.4. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) para los distintos alambres sin recubrimiento de mortero.	66
Fig.3.5. Gráfica que relaciona el logaritmo del del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) para los distintos alambres embebidos en mortero	67

INTRODUCCIÓN

La evaluación del grado y la velocidad de corrosión es un aspecto de vital importancia para determinar la vida útil de los aceros en construcción, así como para el establecimiento de las condiciones de uso de aceros y de elementos constructivos compuestos en los que participan materiales mecánicos.

Existen varios procesos normalizados para la determinación, cualitativa o cuantitativa, del grado de corrosión que un metal experimenta. Muchos de estos procesos están definidos solamente para un uso muy restrictivo y son específicos para un tipo de metal o para un ambiente concreto de exposición. Por ello es muy difícil comparar los resultados provenientes de diferentes ensayos y su traslación a los escenarios de uso reales.

En esta tesina se pretende realizar un estudio exhaustivo sobre la corrosión, estudiando las causas y efectos y planteando maneras de prevenirla.

También se plantean diferentes ensayos normalizados para la evaluación del grado y velocidad de corrosión de diferentes materiales metálicos y su realización en el laboratorio. Los materiales estudiados son alambres de acero, sueltos y embebidos en mortero.

Después de la realización de los ensayos se discutirán y compararán los resultados obtenidos con el fin de estudiar la validez de una metodología común.

También se categorizará, según los criterios definidos en la norma ISO 9923, diferentes metales y sus aleaciones, con o sin protección de mortero, ensayados según el procedimiento establecido y se valorará la variación de corrosión debido a la presencia del recubrimiento de mortero.

OBJETIVOS

Los objetivos generales del presente trabajo son:

- ⤴ Establecer un procedimiento de ensayo común para la evaluación del comportamiento bajo un ambiente corrosivo para metales, aleaciones y metales y aleaciones embebidos en mortero.
- ⤴ Evaluar y categorizar, según los criterios definidos en la norma ISO 9223, diferentes metales y sus aleaciones, con o sin protección de mortero, y ensayados según el procedimiento establecido.
- ⤴ Generar y proporcionar un conjunto de datos que permita desarrollar un método acelerado para el estudio del comportamiento bajo corrosión de diferentes materiales, así como la estimación de su vida útil. Este método es objeto de un trabajo paralelo realizado en la Sección de Materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción llevado a cabo como Trabajo Final de Carrera por Izaskun Agirre, bajo la dirección de la Dra. Miren Etxeberría.

Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

- ⤴ Estudiar los diferentes procedimientos normativos para la evaluación del comportamiento frente a la corrosión de diferentes metales, aleaciones y elementos constructivos.
- ⤴ Seleccionar uno de los métodos normativos estudiados para su aplicación en diferentes metales y en dichos metales embebidos en mortero.
- ⤴ Introducir las modificaciones necesarias para poder utilizar un método común para todos los materiales estudiados.
- ⤴ Evaluar, con el método elegido, la resistencia a la corrosión de diferentes metales.
- ⤴ Determinar la protección que ofrece un recubrimiento de mortero a los metales estudiados.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Corrosión en aceros

1.1.1. Definición

La corrosión se define como la reacción química o electroquímica entre un material y su entorno que provoca el deterioro del material y de sus propiedades (Botia, 1985). Otra definición de corrosión es la dada en “Reichanschuss für Metallschutz, (1926)”. Según este texto, corrosión es la destrucción de un cuerpo sólido causada por un ataque no provocado, de naturaleza química o electroquímica, que se inicia en la superficie del material. De manera más general, puede entenderse como la tendencia que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna (Smith, 1998).

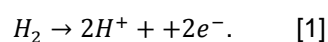
1.1.2. La corrosión en los metales

La corrosión metálica aparece como resultado de reacciones electroquímicas entre la superficie del metal y el ambiente que le rodea. En el estado elemental las energías de los metales son más altas, y por eso existe una tendencia espontánea de los metales a reaccionar químicamente para formar compuestos de menor energía y más estables. La mayoría de fenómenos de corrosión son esencialmente electroquímicos e implican la presencia de una solución acuosa (de sal, ácido o álcali) llamada electrolito en contacto con el metal. La velocidad a la que tiene lugar la corrosión depende en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades del metal en cuestión.

Se define diferencia de potencial como la diferencia de voltaje entre dos puntos, equivalente al trabajo que se necesita para transferir una unidad de carga desde un punto de referencia a otro determinado. El alcance de la corrosión depende de la afinidad química entre electrolito y metal también llamada diferencia de potencial (Thomas, 1994).

La combinación de dos conductores eléctricos, llamados electrodos, sumergidos en un electrolito se denomina pila galvánica. La pila convierte la energía química en energía eléctrica. Al unir los electrodos con un conductor se establece una corriente eléctrica desde el polo positivo (cátodo) hacia el polo negativo (ánodo).

Para determinar la diferencia de potencial es preciso establecer una referencia como cero arbitrario de la escala de potenciales. Se toma la semipila de hidrógeno en condiciones estándar (1M, 1 atm de presión y 298K de temperatura) como cero de la escala de potenciales:



Los valores del potencial de corrosión de diferentes materiales medidos respecto a la semipila de hidrógeno están tabulados. En la tabla 1.1, se muestran algunos de ellos, referidos siempre

a metales cuya superficie está libre de capa de óxido. Los valores numéricos indican el voltaje de la pila formada por cualquier electrodo o semirreacción y el electrodo de hidrógeno. El signo positivo indica que la reacción es de reducción (ganancia de electrones) mientras que el negativo indica que la reacción es de oxidación (pérdida de electrones). Cuanto mayor sea el potencial de corrosión, más acentuada será la tendencia del electrodo a reducirse y mayor será su poder oxidante.

Tabla 1.1. *Potencial electródico* (Thomas, 1994; Gómez de León, 2004)

<i>Reacción de oxidación</i>	<i>Potencial (V)</i>	<i>Reacción de oxidación</i>	<i>Potencial (V)</i>
$Au \rightarrow Au^{3+} + 3e^{-}$	1,45	$H_2 \rightarrow 2H^{+} + 2e^{-}$	0
$Pt \rightarrow Pt^{2+} + 2e^{-}$	1,20	$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^{-}$	-0.13
$Au + 4Cl^{-} \rightarrow AuCl_4^{-} + 3e^{-}$	0.99	$Sn \rightarrow Sn^{2+} + 2e^{-}$	-0.14
$Ag \rightarrow Ag^{+} + e^{-}$	0.79	$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^{-}$	-0.25
$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^{-}$	0.77	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$	-0.44
$Cu \rightarrow Cu^{+} + e^{-}$	0.52	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$	-0.763
$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^{-}$	0.34	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$	-1.662
$Ag + Cl^{-} \rightarrow AgCl + e^{-}$	0.22	$Li \rightarrow Li^{+} + e^{-}$	-3.10

En condiciones estándar para una reacción en la que se oxida un metal M1 y se reduce un metal M2 ($M1_{red} + M2_{ox} \leftrightarrow M1_{ox} + M2_{red}$), la diferencia de potencial total que se tiene entre electrodos de pila será:

$$E_0 = E_2^0 - E_1^0 \quad [2]$$

Según las leyes de la termodinámica, para que la reacción se produzca espontáneamente, E_0 debe ser positivo. La expresión anterior no contempla el efecto de la temperatura ni de la concentración de las disoluciones puesto que se imponen condiciones estándar. Si se tienen en cuenta estos factores la diferencia de potencial se puede calcular mediante la ecuación de Nerst.

$$\Delta E = (E_2^0 - E_1^0) \frac{RT}{nF} \log \frac{[M_1^{n+}]}{[M_2^{n+}]} \quad [3]$$

Donde R es la constante de los gases; n es el número de electrones intercambiados en el proceso; F es la constante de Faraday (96485,309 C mol⁻¹); $[M_1^{n+}]$ y $[M_2^{n+}]$ la concentración iónica molar de cada disolución; y T la temperatura absoluta.

No todos los materiales tienden a corroerse (actuación anódica) y dentro de los que se corroen existen algunos más propensos a la corrosión. La serie galvánica constituye una clasificación de las actividades relativas de los diferentes metales y aleaciones de uso frecuente en un medio dado. En la tabla siguiente se recoge la serie galvánica en agua de mar. Los metales están ordenados según su actividad catódica y anódica siendo el primero el menos propenso a la corrosión y el último el que más (Gómez de León, 2004).

Tabla 1.2. Serie galvánica en agua de mar (Gómez de León, 2004)

Platino	
Oro	
Grafito	
Titanio	
Plata	
Acero inoxidable (pasivo)	↑
Níquel (pasivo)	Inactividad Creciente (catódicos)
Bronce	
Cobre	
Latón	
Níquel(activo)	Actividad creciente (anódicos)
Estaño	
Plomo	↓
Hierro forjado	
Hierro Dulce	
Aleaciones de aluminio	
Cadmio	
Zinc	
Magnesio	

1.1.3 Factores que intervienen en la corrosión

1.1.3.1 Factores Internos

El origen de la corrosión puede venir de diferentes heterogeneidades en la superficie metálica capaces de crear una diferencia de potencial en la misma. Los principales causantes de heterogeneidades son (Gómez de León, 2004):

- Impurezas en la matriz metálica: Es la inclusión de diferentes compuestos químicos dentro del metal.
- Partículas contaminantes en la superficie: La superficie puede ser contaminada por ejemplo durante el laminado por el uso de rodillos sucios, sufriendo golpes con otros

metales durante el transporte o roces con herramientas de trabajo durante el almacenamiento.

- Uniones bimetálicas: Piezas formadas por metales distintos en contacto directo entre sí.
- Discontinuidades en los recubrimientos: La presencia de una discontinuidad puede ser el origen de una pila de corrosión entre el metal y el recubrimiento
- Regiones de metal sometidas a tensión y deformación elástica: Las regiones sometidas a tensiones tienen tendencia a comportarse más anódicamente ya sea por la deformación de la estructura cristalina o la aparición de grietas en la superficie del metal.

1.1.3.2. Factores Externos

Entre los factores externos con más influencia en el proceso corrosivo destacan la temperatura, la presión y la composición del agua o fluido en contacto con el metal (Terán et al, 2004).

Así, al incrementar la temperatura aumenta tanto la probabilidad como la velocidad de corrosión. Esto se explica porque al proporcionar una mayor energía cinética a los átomos del material se facilita la ruptura de enlaces para formar otros nuevos. Por otro lado un aumento de presión equivale a un aumento de la concentración del agente corrosivo en la superficie metálica (Gómez de León, 2004).

El medio en contacto con el material juega un papel trascendental en la corrosión. En agua y disoluciones acuosas se debe tener en cuenta los diferentes factores (Feliu, 1991):

- Efecto del pH: Se sabe que la acidez del medio influye en la velocidad de corrosión. La mayoría de metales utilizados en la construcción experimentan una aceleración de la corrosión en medios ácidos. En medios neutros esta velocidad de corrosión se mantiene pequeña y constante mientras que en medios básicos el comportamiento depende del metal. La mayoría de ellos, en medio básico y con presencia de oxígeno sufren un incremento en la velocidad de corrosión.
- Oxígeno y otros gases disueltos: El oxígeno es necesario para que haya corrosión en medios neutros y básicos. A mayor agitación del medio que envuelve el metal, mayor será el contenido de oxígeno disuelto y por consiguiente aumentará la velocidad de corrosión. Otros gases que afectan a la corrosión son el cloro, el amoníaco y el dióxido de carbono.
- Dureza: Las aguas con presencia de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} son menos corrosivas porque son capaces de formar capas protectoras de carbonato sobre la superficie del metal.
- Presencia de sales: La presencia de sales en el agua aumenta la velocidad de corrosión debido a un aumento de la conductividad. Dentro de este grupo destaca el agua de mar, cuya corrosividad viene determinada por muchos factores pero

principalmente por la concentración de sal y acceso de oxígeno a la estructura metálica.



Fig. 1.1. Fotografía de una armadura corroída (www.e-construccion.cl; 29 marzo 2011)

1.1.4 Pérdidas económicas producidas por la corrosión

La mayor problemática de la corrosión es la destrucción del metal al que afecta. Los ataques por corrosión pueden causar disminución de la resistencia mecánica, fugas en conductos y muchos otros efectos que pueden comprometer la estabilidad de la estructura y la seguridad de las personas. Desde el punto de vista económico, las pérdidas se pueden clasificar en directas e indirectas. *Las pérdidas directas* son las que afectan de manera inmediata cuando se produce el ataque. Estas se pueden clasificar en varios tipos también, de los cuales los más importantes son el coste de las reparaciones, las sustituciones de los equipos deteriorados y los costes por medidas preventivas. *Las pérdidas indirectas* se consideran todas las derivadas de los fallos debidos al ataque por corrosión. Las principales son la detención de la producción debida a las fallas y las responsabilidades por posibles accidentes (Uhlig, 1970).

Estudios económicos mundiales han demostrado que el coste global de la corrosión alcanza valores del 4-5% del PIB en los países industrializados. Estos estudios también predicen que el 20-25% de este coste podría haberse evitado usando la tecnología existente de control de corrosión (Bhaskaran et al, 2005).

En 1971, se presentó el informe Hoar. Este informe mostraba de qué manera podrían reducirse los gastos de cada país si se utilizaran los conocimientos disponibles de una mejor manera. Aunque los datos sean probablemente obsoletos, dan una idea de la magnitud de los costes. Un resumen de dicho informe es el siguiente:

Tabla 1.3. Resumen de los datos del informe Hoar (1971)

Industria o sector	Coste estimado (miles de millones de dólares)	Ahorro potencial estimado (miles de millones de dólares)	Ahorro %
Construcción	190	38	20
Alimentación	30	3,04	10,1
Ingeniería en general	83,6	26,6	31,8
Agencias y dptos. gubernamentales	41,8	15,2	36,4
Marina	212,8	41,8	19,6
Refino del metal y semielaborados	11,4	1,52	13,3
Petróleo y productos químicos	136,8	11,4	8,3
Energía	45,6	19	41,7
Transporte	266	76	28,6
Agua	19	3,04	16
TOTAL	1.037	235.6	22,7

Como puede extraerse del informe Hoar, los sectores de transporte, marina y construcciones son los de mayores costes, debido al fuerte impacto de la intemperie y el agua de mar sobre la corrosión en los metales. Los costes del sector ingeniería no son tan altos pero es de destacar el ahorro potencial que, en proporción, es considerable.

1.2. Corrosión del acero embebido en mortero u hormigón.

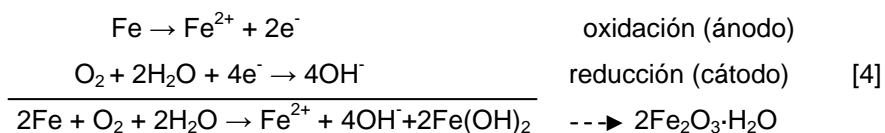
1.2.1 Consideraciones Iniciales

Como es sabido, el hecho de reforzar el mortero o el hormigón con barras de acero nos proporciona una resistencia y ductilidad añadida. A su vez, un recubrimiento de hormigón o mortero nos proporciona un alto grado de protección del acero frente a la corrosión. En el ambiente fuertemente alcalino proporcionado por el mortero o el hormigón (con $\text{pH} > 13,5$) el acero permanece pasivado. Se denomina pasivación (Schönbein, 1836) a la formación sobre el metal de una capa superficial que inhibe o ralentiza las reacciones posteriores del metal. Con la pasivación conseguimos que el metal sea mucho menos reactivo ya que se comporta como si tuviera un potencial electroquímico más noble (es decir, con menor tendencia a la oxidación). En el hormigón el volumen del material corroído es mayor que el metal en buen estado produciendo zonas de presión que tiende a expandirse y a fisurarse (Caré, 2007). El grado de corrosión puede incrementar el deterioro del hormigón, el acero, o ambos produciendo una disminución de la resistencia inesperada con sus correspondientes problemas (Fang et al, 2003). En vista al deterioro de muchas estructuras debido a su prolongada exposición al medio ambiente y sus agentes, se puede constatar que la corrosión es una de las principales causas de la limitada vida de las estructuras (Kapasny, 1993). Esta corrosión es debida a agentes nocivos provenientes del medio ambiente. El peor de todos estos agentes nocivos son los cloruros contenidos ya sea en agua de mar o en ciertas sales. Bajo un ataque de cloruros la capa pasivadora del acero es atacada e incrementan las zonas despasivadas y la corrosión.

1.2.2 Mecanismo de corrosión del acero embebido en mortero

En el acero embebido en mortero la superficie del metal funciona como un electrodo mixto compuesto por ánodos y cátodos conectados eléctricamente por el mismo cuerpo del material. El agua contenida en los poros del hormigón o mortero funciona como un medio acuoso formando el electrolito, por lo tanto tenemos todas las partes necesarias para que se forme corrosión (Hansson, 1984).

En el proceso de corrosión de una armadura en hormigón armado, las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



La reacción anódica es el proceso de oxidación que tiene como consecuencia la formación del óxido y la disolución del metal. La reacción catódica en cambio es el proceso por el que se reduce el oxígeno disuelto formando iones hidróxido.

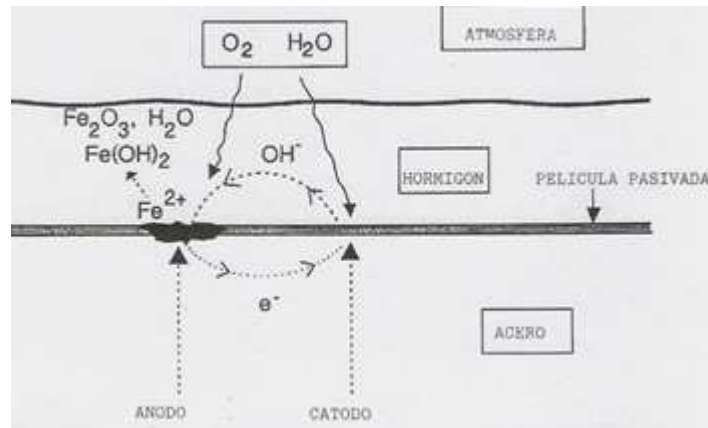
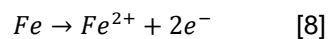
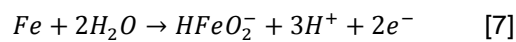
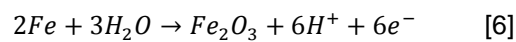
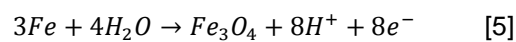
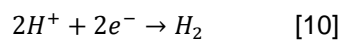
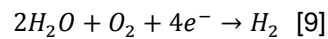


Fig. 1.2. Mecanismo de la corrosión electroquímica del acero (Thomas, 1994)

Dependiendo de la presencia de agentes agresivos y la existencia de un potencial electroquímico apropiado en la superficie del acero, las reacciones anódicas en medios con pH ácido o neutro van a ser las siguientes (Ahmad,2003):



Las posibles reacciones catódicas dependen de la cantidad de oxígeno disuelto y del pH en la superficie del acero. Las más comunes son:



La corrosión de la armadura actúa perjudicialmente en dos sentidos. Por un lado consume la misma armadura disminuyendo la capacidad resistente de la estructura. Por otro lado, como podemos observar en la figura 1.3, los productos de la corrosión que se obtienen representan un incremento de volumen en relación al hierro no oxidado (Bazant, 1979). Este incremento de volumen provoca la aparición de fisuras y grietas en el hormigón y facilita la entrada de nuevos agentes agresores al interior de la matriz, favoreciendo los posteriores procesos de deterioro del material.

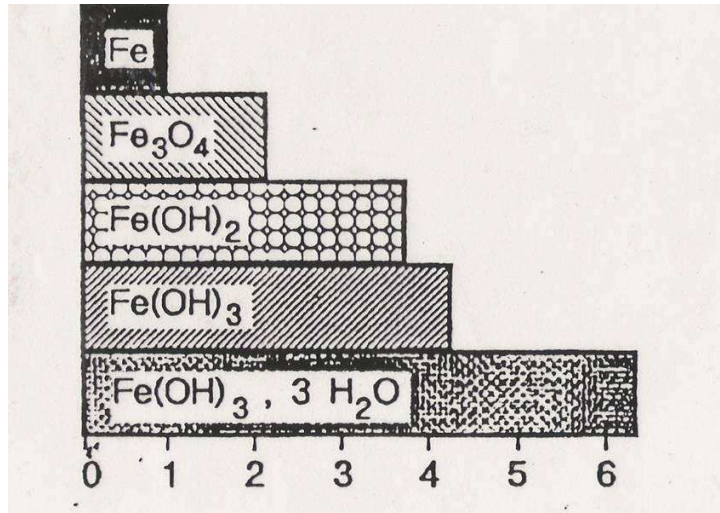


Fig. 1.3. Volúmenes relativos de los productos de la oxidación del hierro (Thomas, 1994)

Diferentes modelos conceptuales han sido propuestos para describir este proceso de corrosión. Según Tuutti (1982), bajo condiciones naturales, la corrosión en el acero incluye dos estados diferenciados. El primer estado, también llamado de *iniciación* sucede cuando los agentes agresivos penetran el mortero pero sin despasivar el acero. En el segundo estado, o estado de *propagación*, el acero pierde la capa pasivadora de la superficie y el proceso de corrosión se acelera oxidando al acero. Como se ha citado anteriormente éste óxido tiende a aumentar el volumen del acero fisurando a su vez el mortero.

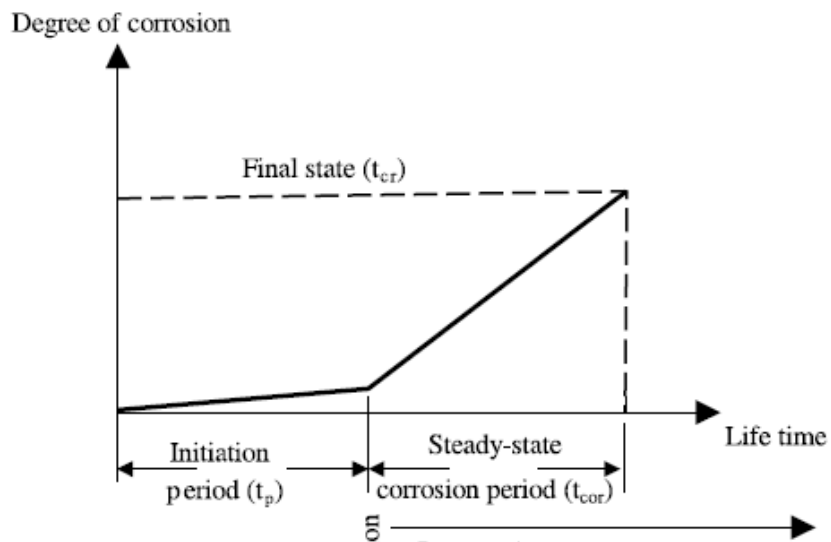


Fig. 1.4. Estados de corrosión del acero en función del tiempo (Tuutti,1982).

1.2.3 Factores que intervienen en la corrosión

1.2.3.1 Factores Internos

Los factores internos que intervienen en la corrosión del acero embebido en mortero u hormigón son también los mencionados en el apartado 1.1.3.1. En este apartado se nombran los factores que tienen características específicas a causa de la presencia del mortero u hormigón.

- Contenido de cemento: El contenido de cemento no solamente afecta a la resistencia de la estructura sino que juega un papel fundamental en la durabilidad. Una mala proporción en la mezcla puede producir una mala consolidación del mortero formando huecos que ayudan a la penetración y difusión de agentes contaminantes. Un hormigón con poco contenido de cemento carecerá de plasticidad y no se formará la capa pasiva en la superficie del acero. Por eso es importante mantener un mínimo de cemento (Ahmad, 2003). Según Verbeck (1991), se recomienda un mínimo de 350-375 Kg/m³ para estructuras expuestas a ambiente marino.
- Consolidación y ratio agua cemento: Un hormigón bien consolidado y con un ratio agua/cemento (a/c) bajo tiene una menor permeabilidad lo que minimiza la penetración de agentes agresivos como los cloruros, el dióxido de carbono, etc. La profundidad de penetración de los cloruros aumenta con el aumento de la relación a/c. Lo mismo pasa con la profundidad de la carbonatación (Jaegermann, 1990). Por ello es necesario controlar que los materiales que se van a utilizar durante la fabricación del mortero no contengan cloruros y que los contenidos de la mezcla (relación a/c y contenido de cemento) sean apropiados.
- Grosor de recubrimiento: Un buen grosor de hormigón o mortero recubriendo el acero nos reducirá la penetración de agentes agresivos y a su vez reducirá la corrosión (Rasheeduzzafar et al, 1986). Dependiendo del ambiente al que este expuesta la estructura y su vida útil, la EHE (2008) nos recomienda unos recubrimientos mínimos a considerar (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición I II

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del hormigón (N/mm^2)	Recubrimiento mínimo (mm) según vida útil de proyecto	
			50 años	100 años
I	Cualquiera	$f_{ck} \geq 25$	15	25
II a	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Otros tipos de cemento o en el caso de hormigón con adiciones	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
II b	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cemento o en el caso de hormigón con adiciones	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30

- Proceso constructivo: El proceso constructivo (curado, compactación) debe asegurar la formación de la mínima porosidad
- Esfuerzos: La presencia de esfuerzos estructurales en el acero, ya sean de carácter estático o cíclico, crea diferencias de potencial en diferentes puntos de la superficie del acero causando, a su vez, la formación de celdas de corrosión (Mozer et al, 1965).

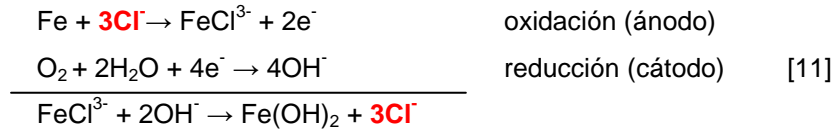
1.2.3.2 Factores Externos.

A parte de los factores explicados en el apartado 1.1.3.2, existen otros factores externos debido a la presencia de mortero y hormigón:

- Presencia de oxígeno disuelto al nivel del acero: La presencia de oxígeno disuelto tiende a formar iones OH^- que incrementan la capa de óxido e hidróxido en la superficie del acero.
- Temperatura: Un aumento de temperatura puede tener dos efectos contradictorios. Es cierto que si se incrementa la temperatura, las velocidades de las reacciones van a aumentar. No obstante este incremento de temperatura disminuye la solubilidad del oxígeno disminuyendo a su vez el grado de corrosión (Mozer et al, 1965).
- Carbonatación y entrada de contaminantes ácidos: El efecto de la carbonatación y la entrada de algunos ácidos es importante porque reduce el pH del hormigón. La bajada del pH destruye la capa pasivadora del acero y acelera el proceso de corrosión como se ha explicado en el apartado 1.1.3.2. (Berkely, 1990).
- Presencia de cloruros: La presencia del ion cloruro despasiva el acero causando la disolución del metal en la zona activa o ánodo. A su vez el acero dispone de zonas

pasivas o cátodo, donde el oxígeno se reduce. La presencia de las dos zonas produce una diferencia de potencial causando corrosión (Rengaswamy,1987).

El mecanismo de corrosión en presencia de cloruros queda descrito mediante las siguientes reacciones:



Según este mecanismo, los cloruros no se consumen en el proceso global, sino que se regeneran y quedan libres para continuar la reacción en el mismo sitio. Esta es la causa de la forma característica que adopta la corrosión por cloruros y que se conoce como *corrosión por picadura*.

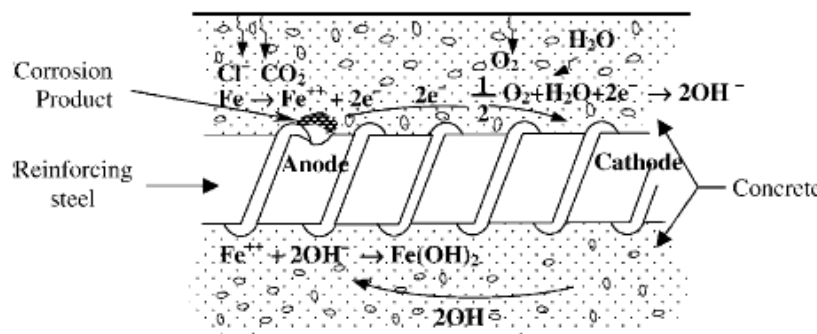


Fig. 1.5. Ilustración esquemática del proceso de corrosión del acero embebido en mortero por la acción de cloruros (Hansson, 1984).



Fig. 1.6. Ilustración del acero corroído por picadura (verosanhue.blogspot.com; 12 Marzo 2011)

Tabla 1.5. Riesgo de corrosión por cloruros (Ahmad, 2003).

Cloruros contenidos en el hormigón (en relación al % de cemento)	Condición del hormigón en contacto con el acero	Riesgo de corrosión
Menos del 0,4 %	Carbonatado	Alto
	Hormigón no carbonatado con un contenido inferior al 8% de C_3A en el cemento.	Moderado
	Hormigón no carbonatado con un contenido superior al 8% de C_3A en el cemento.	Bajo
0,4%-1%	Carbonatado	Alto
	Hormigón no carbonatado con un contenido inferior al 8% de C_3A en el cemento.	Alto
	Hormigón no carbonatado con un contenido superior al 8% de C_3A en el cemento.	Moderado
Más de 1%	En todos los casos	Alto

En ambiente marino además de la presencia de cloruros tenemos otros agentes nocivos que afectan a la corrosión. Entre estos agentes nocivos hay el CO_2 que provoca un descenso del pH y los sulfatos que reaccionan formando etringita, aumentando el volumen del hormigón y provocando fisuras que merman a su vez la protección que el hormigón nos ofrece frente a la corrosión. Otro aspecto a tener en cuenta en la corrosión son los microorganismos que se encuentran en el mar. Estos microorganismos pueden acelerar la corrosión del acero ya sea mediante la creación de medio ácido al metabolizarse o afectando al recubrimiento. Como se muestra en la figura 1.7 una estructura sometida a ambiente marino puede presentar diferentes zonas de exposición que determinaran las diferentes causas de agresión al hormigón afectando a la corrosión del acero.

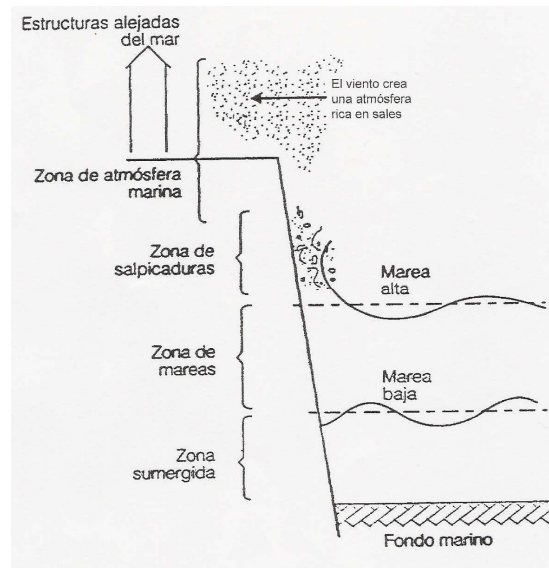


Fig. 1.7: Zonas de exposición del hormigón en ambiente marino (Thomas, 1994).

En la zona de atmósfera marina tendremos corrosión por cloruros. En la zona de salpicaduras a parte de la corrosión por cloruros se debe tener en cuenta la erosión del hormigón por el impacto del oleaje. En la zona de mareas se suma a los factores anteriores el efecto del crecimiento de microorganismos y el ataque químico por sulfatos. Finalmente en la zona sumergida tendremos todos los factores anteriores a parte de una baja difusión del oxígeno debido a la saturación del hormigón.

1.2.4. Medidas preventivas y de reparación

Los métodos de prevención tienen por finalidad prolongar la vida útil de los materiales con el fin de asegurar la vida prevista en una estructura. El concepto de vida útil expresa el periodo de tiempo durante el cual una estructura mantiene sus requisitos mínimos de seguridad, estabilidad y funcionalidad por los que ha sido proyectada, sin ningún coste inesperado de mantenimiento o reparación. Según Gómez de León (2004) los métodos genéricos de protección frente a la corrosión pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Adecuación de los materiales
2. Consideraciones en el diseño
3. Protecciones catódicas y catódicas por ánodos de sacrificio.
4. Aplicación de recubrimientos protectores

1.2.4.1 Adecuación de los materiales.

El paso previo a cualquier otro método de protección es la correcta selección de los materiales, con el fin de adecuarlos a la aplicación y al medio que estarán expuestos. Cada metal o

aleación tiene diferentes comportamientos según el medio. Así por ejemplo, se aconseja utilizar aleaciones de níquel y cromo en medios ácidos y titanio en medios muy oxidantes.

1.2.4.2 Consideraciones en el diseño.

Existen unos elementos clave a considerar en el diseño de estructuras de acero embebido en hormigón y que es preciso tener en cuenta al realizar un proyecto, con el fin de prevenir los futuros problemas inducidos por la corrosión:

- Reducir las tensiones mecánicas donde sea posible.
- Evitar las uniones bimetálicas interponiendo arandelas o juntas aislantes así como la humedad en las mismas.
- Utilizar metales de potenciales similares.
- Evitar que en el diseño aparezcan zonas o puntos con concentraciones de líquidos.
- Evitar zonas con alto gradiente térmico.
- Prever la instalación de dispositivos y sistemas de seguridad que permitan controlar los niveles de corrosión existentes.

1.2.4.3 Protección catódica

La protección catódica es el método más efectivo de cuantos existen para conseguir una protección frente a la corrosión. Mediante la protección catódica puede detenerse completa y permanentemente la corrosión sobre una superficie metálica y a veces incluso revertir el proceso (Gómez de León, 2004). En las estructuras de hormigón armado la protección catódica es un método efectivo para las estructuras afectadas por cloruros como las que están expuestas en ambientes marinos o las que sufren ataques de sales (Bertolini et al, 2003).

Ésta protección consiste en la aplicación de un corriente eléctrica de densidad entre 5 y 20 mA/m^2 en el acero. Con esta corriente se consigue que el acero que se comporta anódicamente y se corroe tienda a comportarse catódicamente, es decir, desplazamos el equilibrio de la reacción con el propósito de reducir la corrosión a valores inapreciables (Page, 1997).

La intensidad de corriente necesaria para proteger el acero también puede obtenerse, sin necesidad de una fuente de alimentación externa, uniendo el metal eléctricamente a otro metal con un potencial de reducción más negativo. En este caso se forma otra reacción donde el acero hará de cátodo y el otro metal de ánodo. A este tipo de metal se le denomina ánodo de sacrificio ya que se consumirá y se corroerá para proteger el acero.

Las principales aplicaciones de la protección catódica se encuentran en la construcción naval, en la protección de tuberías y canalizaciones sumergidas o enterradas y en la protección de estructuras metálicas y armaduras en hormigón armado.

El principal inconveniente de los sistemas de protección catódica es la posibilidad de que la introducción de una corriente eléctrica a la estructura pueda tener efectos negativos en ésta (Elsener et al, 1993).

1.2.4.4 Aplicación de recubrimientos protectores.

Los recubrimientos que se aplican sobre las superficies metálicas para protegerlas de la corrosión deben tener unas ciertas características como impermeabilidad, adherencia y baja conductividad eléctrica. Según Gómez de León (2004), pueden clasificarse básicamente en tres grupos: Recubrimientos metálicos, recubrimientos inorgánicos, recubrimientos orgánicos.

1.2.4.4.1 Recubrimientos metálicos

Todos los recubrimientos metálicos son, en cierta medida, porosos. Esta porosidad hace que deba prestarse especial atención a la calidad del recubrimiento y al transporte o utilización de las piezas afectadas.

En el caso que se utilicen como recubrimiento metales con un potencial de reducción más negativo que el del metal a proteger, la presencia de poros provoca la aparición de pilas de acción local en las que el metal base queda protegido catódicamente mientras que el metal del recubrimiento es quien sufre la corrosión.

Los metales más utilizados como recubrimiento protector son el níquel, el plomo, el zinc, el estaño y el aluminio.

En la tesina realizada a parte de acero se ha estudiado acero galvanizado.

La galvanización es un procedimiento de protección del acero frente a la corrosión, mediante el cual el acero se recubre con zinc para evitar su oxidación. El proceso incluye la inmersión de las piezas de hierro y acero en zinc fundido (a una temperatura de unos 450°C). Mediante una reacción metalúrgica entre el hierro y el zinc se forman una serie de aleaciones de zinc-hierro que crean una fuerte unión entre el acero y el recubrimiento. La duración típica de la inmersión es de unos cuatro o cinco minutos, pero puede ser mayor en el caso de las piezas pesadas que tiene una elevada inercia térmica o cuando es necesario que el zinc penetre en las piezas o construcciones huecas.

La vida y durabilidad del acero aumentan sensiblemente cuando se recubren con zinc. No hay ningún otro material que pueda proporcionar al acero una protección tan eficiente y económica. Si se deja el acero sin proteger, se corroerá en casi cualquier ambiente. Los recubrimientos de zinc detienen la corrosión del acero de dos maneras: mediante una barrera física y mediante protección electroquímica (Woolley, 2005).

1.2.4.4.2 Recubrimientos inorgánicos.

Los recubrimientos inorgánicos más importantes son los esmaltes vítreos, los revestimientos de vidrio y los esmaltes de porcelana. Los esmaltes vítreos ofrecen una protección muy buena frente a la corrosión, en parte, gracias a su impermeabilidad al agua y oxígeno. Su principal inconveniente es su escasa resistencia mecánica y su fragilidad frente a golpes o cambios de temperatura (Gómez de León, 2004).

1.2.4.4.3 Recubrimientos orgánicos.

Constituyen, desde el punto de vista cuantitativo, el principal tipo de recubrimiento. Son recubrimientos orgánicos las pinturas y barnices (mezclas líquidas de partículas insolubles suspendidas en un vehículo orgánico), las lacas (resinas disueltas en un disolvente volátil que en evaporarse permite la formación de una capa protectora) y todo tipo de recubrimientos plásticos como el polietileno, teflón, neopreno y vinilo (Elsener et al, 1993).

1.3. Medidas de evaluación y cuantificación de la corrosión

1.3.1 Medidas electroquímicas

La información sobre el estado de la corrosión en estructuras de hormigón armado se obtiene basándose en tres parámetros de medida: potencial de corrosión o half-cell potencial (E_{corr}), resistividad del hormigón (ρ) e intensidad de corriente (I_{corr}) (Ahmad, 2003).

- **Potencial de corrosión:** El potencial de corrosión (mV) se mide en múltiples puntos del metal y se usa como un índice cualitativo para predecir si el metal tiene tendencia a corroerse o no. Con la medida del potencial de corrosión se puede saber que partes de la estructura actúan como parte anódica (tendiendo a la corrosión) y catódica (manteniéndose pasiva). La interpretación de este tipo de ensayos viene definida en la norma ASTM C876 del organismo de normalización de Estados Unidos.
- **Resistividad del hormigón:** La corrosión en una estructura de hormigón armado es directamente proporcional a la suma de los corrientes eléctricos que se forman en la zona anódica y que fluyen a través del hormigón hacia la zona catódica. Es por eso que la resistividad del hormigón (ohm.cm) juega un papel trascendental para determinar la magnitud de la corrosión. En la tabla 1.6 se observa la relación entre probabilidad de corrosión y resistividad del hormigón (Bungey, 1989).

Tabla 1.6: Interpretación de la relación entre resistividad y probabilidad de corrosión (Bungey, 1989).

Resistividad (ohm.cm)	Probabilidad de corrosión significativa.
< 5000	Muy alta
5000-10000	Alta
10000-20000	Moderada
>20000	Baja

- **Intensidad de corriente:** Mediante la medida de la intensidad de corriente (Amp/cm^2) se obtiene una idea cualitativa de la corrosión global de la estructura. Según Rodríguez et al (1994) bajo una intensidad de corriente del orden de 10^{-9} a $10^{-7} Amp/cm^2$ se observa un estado bajo de corrosión mientras que para intensidades del orden de 10^{-6} a $10^{-5} Amp/cm^2$ el grado de corrosión es alto.

1.3.2 Métodos físicos

Los métodos físicos más comunes para evaluar la corrosión son los siguientes:

- Inspección visual: La inspección visual nos permite la detección de oxidación en los anclajes y zonas adyacentes. La presencia de áreas fisuradas en el hormigón puede ser un claro indicio de las zonas más propensas a la corrosión. En casos de evidencia de notable corrosión o pérdidas mecánicas del acero, en estructuras pretensadas, puede extraerse algún cordón como muestra representativa, para realizar un ensayo visual con el fin de detectar corrosión o picaduras en el acero y realizar ensayos para determinar sus características mecánicas (HIT, 2008).
- Radiografía y técnicas nucleares: El más utilizado es la radiografía con rayos X o rayos gamma. El método consiste en emitir radiaciones con una fuente desde un lado de la superficie de ensayo y colocar una película fotográfica al otro lado. La energía recogida en la película es función de la densidad del medio que atraviesa, por tanto son útiles para determinar la posición de armaduras, espesores o características físicas y químicas que afectan directamente a la corrosión. El principal inconveniente de este método es que la estructura debe ser accesible por los dos lados y la sección debe tener un espesor inferior a un metro (HIT, 2008).
- Pérdida de peso y grosor: Un método para evaluar la corrosión que nos permite su cuantificación es la medida de pérdida de peso y grosor. El elemento corroído pierde peso y grosor debido al resultado de la corrosión.

1.3.3 Velocidad de corrosión

La determinación de la intensidad (en $\mu A/cm^2$) con la que se está produciendo el proceso de corrosión de armaduras embebidas en hormigón, permite conocer el estado de corrosión en que se encuentra la estructura, identificando las zonas activas y pasivas de la misma, y cuantificar la velocidad (en $\mu m/año$) de avance del proceso de corrosión en el momento y en la zona de la medida. Se sabe que un Ampere equivale a un culombio/segundo y que un culombio en nuestro caso es lo mismo que un equivalente en gramo de hierro (27,8g). Efectuando el cambio de unidades se puede expresar la intensidad de corriente en términos de $g/(cm^2 \cdot dia)$. Finalmente dividiendo entre la densidad ($7,86 g/cm^3$) se obtiene la velocidad de corrosión. La normativa ISO 9223 proporciona como determinar la corrosividad ambiental en función de la velocidad de corrosión determinada en un espécimen metálico estándar. Éstos resultados se exponen en la tabla 1.7 en el apartado 1.4.2.2.

1.4. Ensayos normalizados de corrosión.

1.4.1 Consideraciones previas.

Una de las cuestiones fundamentales en el estudio de corrosión es cómo se determina ésta. Para ello existen varios ensayos normalizados por diferentes organismos oficiales. Aunque la normalización de ensayos es de gran utilidad, pues lo que proporciona un marco de comparabilidad de resultados, no dejan de estar exentes de ciertos inconvenientes:

- Dificultad de correlación de resultados del ensayo con los de la realidad.
- Dificultad de transposición de escalas temporales.
- Dificultad de comparar resultados obtenidos con diferentes normas.

En este apartado se explican los principales métodos de evaluación de la corrosión, como se realiza el ataque en los ensayos y cómo se categorizan los resultados. Finalmente se nombran algunos de los múltiples ensayos normalizados relacionados con la corrosión.

1.4.2 Parámetros a tener en cuenta en los ensayos

1.4.2.1 Tipos de Ataque

Para determinar el tipo de ataque óptimo es necesario conocer a priori el ambiente al que el metal está expuesto. Sobre la base de ensayos en el laboratorio, se pueden llegar a establecer las condiciones ambientales más fielmente parecidas a la realidad y, por tanto, estudiar el comportamiento de un metal o varios metales en este medio. Los principales tipos de ataque son:

- Vaporación salina intermitente alternada con ciclos de humedad: El ensayo se realiza en una cámara climática dónde se pueden programar humedades y temperaturas. Éste método se utiliza en el ensayo UNE-EN ISO 16701.
- Inmersión alternada en soluciones ácidas y secado más ciclos de temperaturas alternadas: El ensayo se efectúa manualmente utilizando estufas para controlar los ciclos de temperatura alternada. Éste método se utiliza en el ensayo UNE-EN 990.

1.4.2.2 Evaluación

Uno de los métodos más utilizados, por su sencillez y porque permite la cuantificación del fenómeno, es el de medida de la pérdida de peso. Como su nombre indica, este método consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo. El procedimiento se especifica detalladamente en el apartado 2.4. A partir de la pérdida de peso se puede hallar fácilmente la velocidad de corrosión como se especifica en el apartado 2.6.

Otros métodos para evaluar la corrosión son mediante la dimensión de la superficie corroída y la intensidad de corriente.

Cómo se ha comentado en el apartado 1.3.3 la norma ISO 9223 nos proporciona una estimación del ambiente al que se encuentra expuesta la estructura dependiendo de la velocidad de corrosión y del metal en cuestión. Los resultados vienen recogidos en la tabla siguiente:

Tabla 1.7: Velocidades de corrosión del primer año de exposición para diferentes metales y categorías de ambiente (ISO 9223)

Velocidad de corrosión r_{corr} ($\mu\text{m/año}$)				
Categoría del ambiente	Acero al carbono	Zinc	Cobre	Aluminio
C1	$r_{corr} \leq 1,3$	$r_{corr} \leq 0,1$	$r_{corr} \leq 0,1$	negligible
C2	$1,3 < r_{corr} \leq 25$	$0,1 < r_{corr} \leq 0,7$	$0,1 < r_{corr} \leq 0,6$	$r_{corr} \leq 0,07$
C3	$25 < r_{corr} \leq 50$	$0,7 < r_{corr} \leq 2,1$	$0,6 < r_{corr} \leq 1,3$	$0,07 < r_{corr} \leq 0,2$
C4	$50 < r_{corr} \leq 80$	$2,1 < r_{corr} \leq 4,2$	$1,3 < r_{corr} \leq 2,8$	$0,2 < r_{corr} \leq 0,7$
C5	$80 < r_{corr} \leq 200$	$4,2 < r_{corr} \leq 8,4$	$2,8 < r_{corr} \leq 5,6$	$0,7 < r_{corr} \leq 1,4$

1.4.3 Categorización de la atmósfera

Cómo se especifica en la norma ISO 9223 (1992) existen cinco categorías para clasificar el grado de corrosividad de una atmósfera o ambiente (C1, C2, C3, C4, C5, de menor a mayor grado). Ésta clasificación se basa en tres factores clave en la corrosión como son la salinidad del aire, la contaminación por sulfatos y el tiempo de exposición al agua. Ésta clasificación se usa de forma cualitativa para evaluar técnica y económicamente el daño producido en una estructura metálica en un ambiente concreto y poder determinar de forma racional las medidas protectoras.

1.4.4 Cuadro resumen

En este apartado clasificaremos algunos de los principales ensayos de corrosión según su organismo de procedencia (ASTM, NACE, ISO o UNE) y haremos una breve descripción de cada ensayo. Los principales organismos son:

ASTM es el organismo de normalización en Estados Unidos, NACE es una sociedad internacional especializada en el control de corrosión y reconocida mundialmente, ISO es la organización internacional de normalización encargada de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación y finalmente UNE (Una Norma Española) es el organismo del estado Español encargado de fijar las normas.

1.4.4.1 Normas NACE

Tabla 1.8. Normas NACE de corrosión

Código	Título	año	Material al que se aplica	Observaciones.
TM0169	"Laboratory Corrosion Testing of Metals"	1995	varios	Describe los factores que influyen los ensayos de corrosión en el laboratorio. Incluye preparación de muestras, condiciones de ensayo, métodos de limpieza y evaluación del grado de corrosión.
TM0497	"Standard Test Method Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems"	2002	acero	Incluye procedimientos de evaluar la corrosión en acero situado bajo tierra.
RP0775	"Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations"	2005	Varios	Destaca procedimientos de análisis y control de la corrosión. También incluye como calcular grados de corrosión y como almacenar los datos.
TM0177	"Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H ₂ S Environments"	2005	acero	Cubre la examinación de la corrosión del acero sometido a esfuerzos en ambiente acuoso ácido, con contenido de H ₂ S.

1.4.4.2 Normas ASTM.

Tabla 1.9. Normas ASTM de corrosión

Código	Título	año	Material al que se aplica	Observaciones.
ASTM B117-09	"Standard Practice for Operating Salt Spray Fog Apparatus"	2009	varios	Ensayo para evaluar la corrosión utilizando una cámara climática.
ASTM C876 - 09	"Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete"	2009	acero	Adecuado para evaluar en servicio y para su uso en el desarrollo de futuras investigaciones.
ASTM C1202	"Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"	2009	varios	Método para determinar la resistencia a la penetración de iones cloruro en el hormigón.
ASTM G16-95	"Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data"	2004	varios	Guía que enseña cómo aplicar análisis estadístico de los datos de corrosión.
ASTM G31-72	"Standard Practice for Laboratory immersion corrosion testing of metals."	2004	varios	Especifica un ensayo para determinar la corrosión de metales en laboratorio mediante la inmersión de los metales en diferentes soluciones.
ASTM G44-99	"Standard Practice for Exposure of Metals and alloys by alternate immersion in Neutral 3,5% sodium Chloride Solution."	2005	varios	Método de control de corrosión que consiste en sumergir los metales en una solución del 3,5 % de cloruro sódico alternando unos ciclos.
ASTM G46-94	"Standard Guide for examination and evaluation of pitting corrosion."	2005	varios	Incluye métodos para evaluar y examinar la corrosión por picadura.
ASTM G101-04	"Standard Guide for estimating the atmospheric Corrosion Resistance of Low alloy Steels "	2010	Acero	Incluye una guía para estimar la corrosión atmosférica de aceros de baja aleación.
ASTM G103-97	"Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion Cracking Resistance of Low Copper 7XXX Series Al-Zn-Mg-Cu Alloys in Boiling 6% Sodium Chloride Solution"	2011	aleaciones de acero	Ensayo para evaluar la corrosión en aleaciones mediante la inmersión en solución salina.

1.4.4.3 Normas ISO.

Tabla 1.10. Normas ISO de corrosión

Código	Título	año	Material al que se aplica	Observaciones.
ISO 9223	"Corrosion of metals and alloys - corrosivity of atmospheres – Classification"	1992	varios	Define 5 categorías de corrosividad dependiendo de la atmosfera al que éste sometido el metal.
ISO 9224	"Guiding values for the corrosivity categories"	1992	varios	Guía para distinguir los efectos de la corrosión en las categorías de la norma ISO 9223.
ISO 11463	"Evaluation of pitting corrosión"	1995	varios	Guía que enseña cómo tratar la corrosión por picadura.
ISO 17864	"Determination of the critical pitting temperature under potentiostatic control"	2005	Acero inoxidable	Ensayo rápido de medida de la temperatura crítica dónde se produce corrosión por picadura
ISO 16151	"Accelerated cyclic tests with exposure to acidified salt spray, "dry" and "wet" conditions"	2005	varios	Método de evaluación de la corrosión en ambientes exteriores expuestos a ambientes de lluvia ácida.
ISO 8407	"Removal of corrosion products from corrosion test specimens"	2009	varios	Especifica un procedimiento para extraer las partes corroídas sin grandes movimientos del metal base.

1.4.4.4 Normas UNE.

Tabla 1.11. Normas UNE de corrosión

Código	Título	año	Material al que se aplica	Observaciones
<i>UNE-EN 990</i>	"Métodos de ensayo para la verificación de la protección contra la corrosión de las armaduras del hormigón curado en autoclave y el hormigón con áridos ligeros de estructura abierta."	1995	varios	Ensayo para la verificación de la protección contra la corrosión de las armaduras del hormigón.
UNE-EN ISO 9227	"Determination of the critical pitting temperature under potentiostatic control"	2005	Acero inoxidable	Ensayo rápido de medida de la temperatura crítica dónde se produce corrosión por picadura
<i>UNE-EN 1670</i>	"Normativas de Patologías en edificación"	2007	varios	Herrajes para la edificación. Resistencia a la corrosión. Requisitos y métodos de ensayo.
UNE-EN ISO 9227	"Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina"	2007	varios	Ensayo de corrosión en atmosfera modificada (cámaraclimática)
<i>UNE-EN ISO 16701</i>	"Corrosión de metales y aleaciones. Corrosión en atmósfera artificial"	2009	varios	Ensayo de corrosión acelerada con exposición en condiciones controladas de humedad cíclica y vaporización intermitente de solución salina

1.5 Planteamiento del trabajo.

Como se ha descrito en el apartado anterior, existe una gran variedad de métodos normalizados para la evaluación de la resistencia a la corrosión tanto para metales y aleaciones como para diferentes elementos constructivos que hayan de estar sometidos a ambientes agresivos de corrosión. Estos procedimientos tienen un elevado componente operacional, es decir, los resultados que proporcionan dependen principalmente de las condiciones experimentales en las que se ha realizado el ensayo. Esto dificulta en gran medida la posibilidad de comparar el comportamiento de diferentes materiales.

En el presente trabajo se estudia la viabilidad de disponer de un único método común para la evaluación de la resistencia a la corrosión de, por un lado varios metales, y por otro, de dichos metales protegidos por un recubrimiento de mortero. Este procedimiento común seguirá siendo operacional, y por lo tanto su utilidad queda restringida a valoraciones comparativas, pero el hecho de ser común para metales y morteros amplía el campo de aplicación de las normas existentes.

Así pues, para alcanzar los objetivos planteados en el capítulo 2 de este documento, se seguirá el planteamiento que se describe a continuación:

1. Se seleccionará un método normativo para la evaluación de la resistencia a la corrosión.
2. Independientemente del campo de aplicación del procedimiento escogido, éste se aplicará a diferentes metales y a los mismos metales protegidos con un recubrimiento de mortero de albañilería.
3. Se obtendrá, mediante la determinación de la pérdida de peso del metal, el grado y la velocidad de corrosión para cada uno de los materiales estudiados a diferentes tiempos de exposición al ambiente corrosivo.
4. Las velocidades de corrosión a diferentes tiempos de exposición permitirán extrapolar para la estimación de la velocidad de corrosión al año de cada elemento.
5. Las velocidades de corrosión al año conducirán a la categorización de los elementos estudiados según la norma ISO 9223. Cabe destacar que esta norma clasifica la corrosividad *de un ambiente* de C1 a C5 según la velocidad de corrosión que provoca en un metal de referencia. En este trabajo utilizaremos dicha categorización en un sentido inverso, es decir, clasificaremos la resistencia a la corrosión *de diferentes materiales* según los efectos que un ambiente estándar (común para todos los materiales ensayados) produce sobre ellos. Así, si el mismo ambiente alcanza una categoría C4 para un metal A y una categoría C2 para un metal B, podremos decir que el metal B es más resistente a la corrosión que el metal A, puesto que el mismo ambiente resulta menos agresivo para el metal B.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Alambres

Se han estudiado alambres fabricados con cuatro tipos de aceros: acero normal sin ningún tratamiento superficial de 1,8 mm de diámetro (G), acero con recubrimiento, de aluminio-zinc de 2 mm de diámetro (Alz) y acero galvanizado de diámetros 1.8 mm y 3 mm (A y E respectivamente). Todos los alambres eran trenzados (fig.2.1). La composición de cada tipo de alambre y sus propiedades mecánicas se describen en las tablas siguientes:

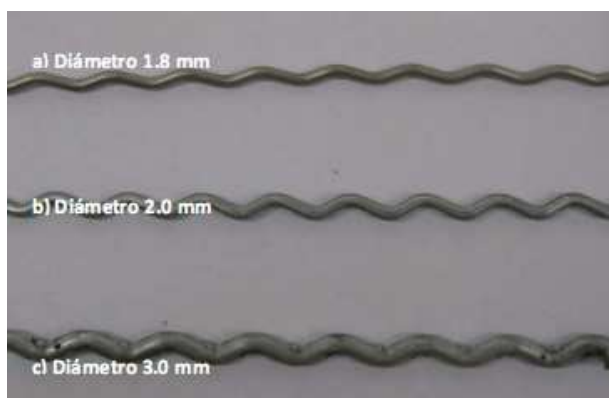


Fig. 2.1. Diámetros de alambre estudiados.

Tabla 2.1. Composición de los alambres estudiados

Nombre: Tratamiento	Diám. (mm)	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	N
G: Acero normal	1.8	0.66	0.61	0.21	0.007	0.013	0.121	0.062	0.062	0.012
A:Galvanizado (recubrimiento zinc 82g/m ²)	1.8	0.70	0.70	0.19	0.02	0.005	0.010	-	-	-
E:Galvanizado (recubrimiento zinc 138g/m ²)	3.0	0.65	0.52	0.20	0.012	0.003	0.035	0.033	0.021	0.0068
Alz: Aluminio- zinc	2.0	0.44	0.6	0.23	0.011	0.05	-	-	-	-

Tabla 2.2. propiedades mecánicas de los alambre estudiados.

Nombre: Tratamiento	Diám. (mm)	Resistencia tracción (MPa)	Torsión (%)	Estricción (%)
G: Acero normal	1.8	1550	22	40
A:Galvanizado (recubrimiento zinc $82g/m^2$)	1.8	1878	32	43
E:Galvanizado (recubrimiento zinc $138g/m^2$)	3.0	1457.5	36	52
Alz: Aluminio- zinc	2.0	-	-	-

2.2 Morteros

Se han preparado morteros a fin de ensayar la resistencia a la corrosión de los aceros galvanizados (muestras A y E), los aceros sin tratar (muestras G), y los aceros con recubrimiento de aluminio-zinc (muestras ALZ). Las dimensiones de las probetas preparadas han sido 10x2,5x2,5 cm, con lo cual el recubrimiento de las muestras de ensayo ha sido aproximadamente de 1,25 cm (figura 2.2). Los alambres fueron cortados con una longitud de 11 cm, 10 de los cuales quedan recubiertos por el mortero.



Fig. 2.2. Moldes utilizados para la fabricación de morteros.

Para la dosificación del mortero se consideró la típica de un mortero de albañilería, con una relación cemento:arena de 1:6 y una cantidad de agua suficiente para obtener una consistencia, determinada con mesa de sacudidas, de 120 mm. La tabla 2.3 especifica la composición del mortero preparado:

Tabla 2.3. Composición de los morteros para el recubrimiento de las muestras de ensayo.

Cemento IIA-L 42.5R	250g
Arena calcárea 0/5	1500g
Agua	240g

Para el estudio de la corrosión en morteros, los extremos de los alambres se cubrieron con silicona (figura 2.3) para sellar adecuadamente la interfase mortero-aire a fin de evitar puntos iniciadores y propagadores de corrosión.

**Fig. 2.3.** Recubrimiento de silicona de la parte exterior del alambre

2.3 Ensayos de corrosión realizados bajo normativa

La tabla 2.4 muestra, de manera resumida y comparada, las condiciones experimentales para los tres ensayos de corrosión aplicados, correspondientes a las normas UNE-EN 990 y UNE-EN ISO 16701.

Tabla 2.4: Condiciones experimentales de los ensayos de corrosión aplicados.

	Dispositivo Experimental	Ciclos	Duración total del ciclo	Disolución salina	PH	Temp. (°C)	Humedad (%)
UNE-EN 990	Inmersión alternada	2h inmersión 70h secado al aire	72h	NaCl 3%	Sin ajuste	15-20	Ambiente
UNE-EN ISO 16701	Inmersión alternada y cámara climática	Fase 1: 3x(15min+1h y 45min) Fase 2: 12h	18h	NaCl 1%	4,2±0,2	35	50 o 95% según ciclo

2.3.1 UNE-EN 990

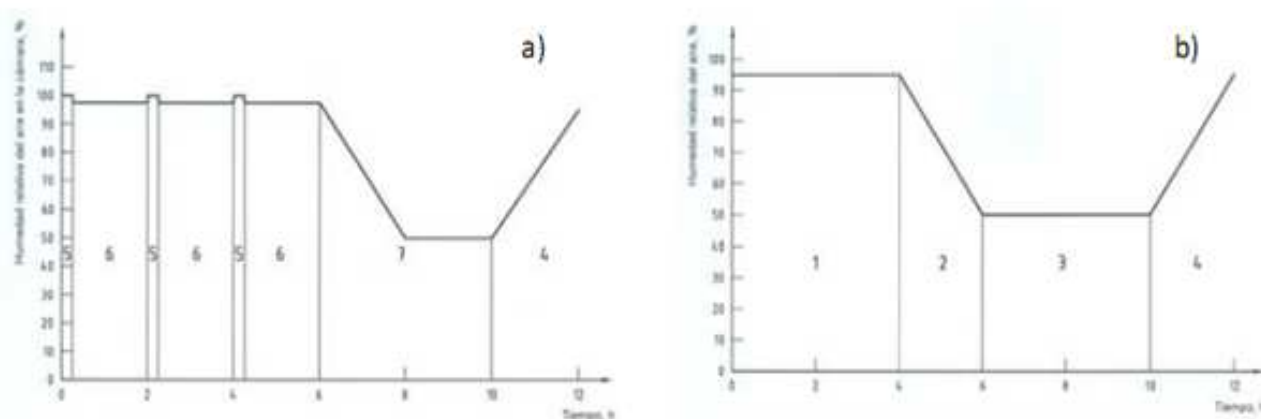
(Enero 2003). *Métodos de ensayo para la verificación de la protección contra la corrosión de las armaduras en el hormigón celular curado en autoclave y de hormigón de áridos ligeros en estructura abierta.*

En esta norma, se exponen las muestras de ensayo a un ambiente corrosivo definido durante una serie determinada de ciclos de exposición. Al finalizar los ciclos se observa a simple vista la corrosión de la superficie del acero y se determina el área de la superficie corroída. Los ciclos de corrosión aplicados han correspondido al Método 1, definido como ciclos de 2h de inmersión en una disolución de NaCl 3% y 70h de secado al aire, todo ello a temperatura ambiente (entre 15 y 20°C). Se han realizado ensayos a 7 días (3 ciclos) y 30 días (10 ciclos) para barras y ensayos a 30 días para morteros. Al finalizar estos períodos se han retirado los productos de corrosión siguiendo la norma ISO 8407 y se ha evaluado el avance de la corrosión mediante la determinación de la pérdida de masa y el cálculo de la velocidad de corrosión correspondiente.

2.3.2 UNE-EN ISO 16701

(Septiembre 2009). *Corrosión de metales y aleaciones. Corrosión en atmósfera artificial. Ensayo de corrosión acelerada con exposición en condiciones controladas de humedad cíclica y vaporización intermitente de solución salina:*

Esta norma define un método de ensayo de corrosión acelerada para simular la corrosión atmosférica en ambientes donde hay una influencia significativa de iones cloruro. Este método puede emplearse como alternativa al método de ensayo de niebla salina continua de la Norma 9227. En una primera fase de exposición las muestras de ensayos son sometida a una inmersión manual de 15 minutos en una disolución acuosa de NaCl 1% acidificada a $\text{pH} = 4,2 \pm 0,2$ (método simplificado). A continuación tiene lugar un período de 1h 45min de descanso húmedo. Esta secuencia se repite tres veces para dar un total de 6h de exposición a la humedad tal y como se puede ver en la imagen a) de la figura 2.4. A partir de entonces las muestras de ensayo se someten a ciclos de humedad entre los dos niveles de 95% y 50% de humedad relativa a una temperatura constante de 35°C tal y como se puede ver en las imágenes a) y b) de la figura 2.4. El ciclo total (imagen a) + imagen b)) se repiten dos veces por semana: el primer ciclo tiene una duración de 4 días (1 vez imagen a) y 7 veces imagen b)) y el segundo ciclo dura 3 días (1 vez imagen a) y 5 veces la imagen b)). Se han realizado ensayos a 7 días (2 ciclos), 14 días (4 ciclos) y 28 días (8 ciclos) para barras y ensayos a 28 días (8 ciclos), 56 días (16 ciclos) y 90 días (26 ciclos) para alambres embebidos en mortero. Al finalizar estos períodos se han retirado los productos de corrosión siguiendo la norma ISO 8407, y se ha evaluado el avance de la corrosión mediante la determinación de la pérdida de masa y el cálculo de la velocidad de corrosión correspondiente.



2.4 Determinación de la pérdida de masa

Para determinar la pérdida de masa debida a la corrosión de las muestras de ensayo, se ha seguido la norma ISO 8407 (Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens).

La limpieza de los productos de corrosión se ha llevado a cabo mediante un procedimiento químico siguiendo los pasos que se señalan a continuación:

1. Cepillado suave de los productos de corrosión con un cepillo de cerdas metálicas.
2. Inmersión de las piezas en un baño con disolución limpiadora durante 10 minutos.
3. Enjuagado con agua del grifo.
4. Enjuagado con etanol.
5. Secado.
6. Pesado en balanza de precisión 0,1 mg.

Siguiendo las indicaciones de la norma ISO 8407, para las muestras de acero sin tratar (muestras G), la solución limpiadora ha sido una disolución de citrato de amonio al 20%. Para las muestras de acero galvanizado y aluminio-zinc (muestras A, E y ALZ) se ha utilizado como solución limpiadora una disolución saturada de glicina (~250 g/l).

El procedimiento de limpieza se repite hasta llegar a peso constante. A continuación se representa gráficamente la masa de la muestra en función del número de ciclos de limpieza y se determina la pérdida de masa de la manera que muestra la figura 2.5.

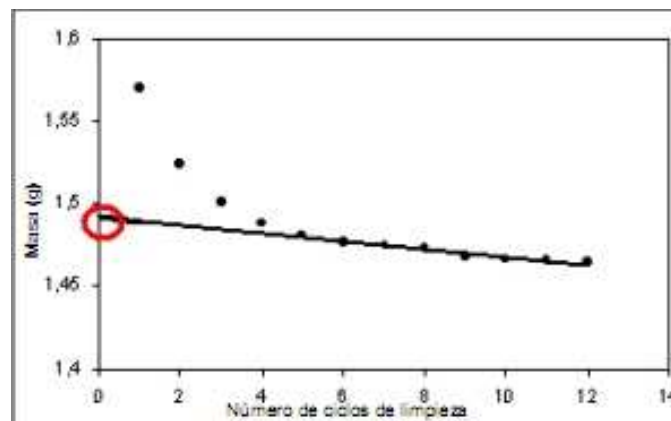


Fig. 2.5. Determinación de la masa del espécimen corroído según ISO 8407.

2.5 Cálculo del área expuesta

Debido a la sinuosidad del alambre estudiado el cálculo del área de exposición se ha realizado de la siguiente manera: Primero se calcula la longitud lineal del arco de circunferencia que forma cada una de las partes del alambre (fig2.6). Después se multiplica por el perímetro del acero (se sabe el diámetro) y finalmente se cuentan cuantos arcos de circunferencia contiene el alambre estudiado.



Fig. 2.6. Partes en que se divide el alambre para el cálculo del área de exposición.

2.6 Cálculo de la velocidad de corrosión a partir de la pérdida de masa

La velocidad de corrosión (R_{corr}) se ha calculado como pérdida de masa en g dividido por el área de la muestra de ensayo en m^2 . Dividiendo el valor de la velocidad de corrosión en g/m^2 por la densidad del material ($7,86 g/cm^3$) se obtiene una velocidad de corrosión expresada en unidades de longitud. Finalmente teniendo en cuenta el cambio de unidades se expresa la velocidad de corrosión en términos de μm (profundidad de corrosión en micrómetros).

2.7 Extrapolación de la velocidad de corrosión a un año

A fin de poder categorizar los elementos ensayados según las categorías C1-C5 de la norma ISO 9223 (*Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification*), se estimó la velocidad de corrosión a un año a partir de los valores obtenidos a diferentes días extrapolando una recta como se explica a continuación. Para ello, se utilizó la expresión siguiente (Natesan, 2006):

$$C = Kt^n \quad [12]$$

en la que C es la velocidad de corrosión expresada en μm y t el tiempo en años. En esta ecuación, K representa la velocidad de corrosión en el primer año.

La expresión [12], transformada logarítmicamente, da lugar a una recta [13] que permite la determinación de K a partir de la ordenada en origen de dicha recta.

$$\log C = \log K + n \cdot \log t \quad [13]$$

A continuación los datos se transforman logarítmicamente y se representan en un gráfico. Para hallar la ordenada al origen se ajusta por regresión lineal una recta que se corresponde con la expresión [13]. La ordenada en el origen de la recta nos permite calcular la velocidad de corrosión a un año (figura 2.7).

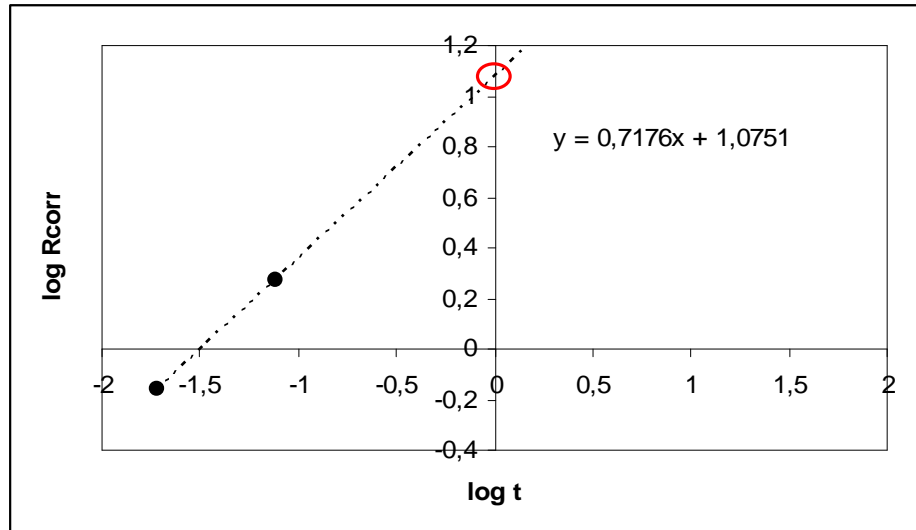


Figura 2.7. Estimación gráfica de la velocidad de corrosión a un año.

Hay que tener en cuenta que en el ensayo UNE-EN 990 se disponía únicamente de dos puntos para ajustar la recta, con lo cual el valor $\log K$ obtenido, y la velocidad a un año que de él se derivaron eran valores orientativos. Con el ensayo EN 16701 se buscaron 3 puntos (7, 14, 28 días para alambres sueltos y 28, 56 y 90 días para alambres en mortero) pudiendo hallar una mejor estimación de la velocidad de corrosión a un año.

2.8 Categorización

Se ha seguido la categorización descrita en la norma ISO 9223. Hay que decir que esta norma clasifica un ambiente. Sin embargo, en este trabajo se ha utilizado para, fijando un ambiente (el dado por el 16701), determinar cuál es su agresividad para cada tipo de alambre. Esto permite comparar la resistencia a la corrosión de los distintos alambres en un ambiente concreto.

2.9 Diseño de la fase experimental

Siguiendo el planteamiento expuesto en el apartado 1.5 de este documento, los dos métodos escogidos, uno para morteros (UNE-EN 990) y otro para alambres (UNE-EN ISO 16701) se aplicarán a aceros (tipo G) y a aceros galvanizados (tipos A y E) sueltos y con recubrimiento de mortero, a diferentes tiempos. Los tiempos para los alambres embebidos en mortero serán mayores en previsión de que el ataque corrosivo se producirá más tarde por el efecto de la protección proporcionada por el mortero.

Una vez seleccionado uno de los dos métodos, éste se aplicara a aceros con recubrimiento de aluminio-zinc a diferentes tiempos.

En cada caso una vez alcanzado el tiempo establecido de ataque, se limpiarán los metales y se determinará su pérdida de peso según el método establecido por la norma ISO 8407 y descrito en el apartado 2.4, y se calcularán las velocidades de corrosión correspondientes siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 2.6. Finalmente, se estimará la velocidad de corrosión a un año tal como se ha explicado en el apartado 2.7 y se procederá a la categorización del material según la norma ISO 9223 tal como se describe en el apartado 2.8.

En la tabla siguiente se muestran de manera resumida, los materiales, normas y tiempos de exposición utilizados en este trabajo.

Tabla 2.5. Resumen de la fase experimental

	Alambres sueltos		Alambres embebidos en mortero	
	UNE-EN 990	UNE-EN ISO 16701	UNE-EN 990	UNE-EN ISO 16701
Acero (tipo G)	7d, 30d	7d, 14d, 28d	30d	28d, 56d, 90d
Acero galvanizado (tipos A y E)	7d, 30d	7d, 14d, 28d	30d	28d, 56d, 90d
Acero con recubrimiento aluminio-zinc (ALZ)	-	7d, 14d, 28d	-	28d, 56d, 90d

La última etapa de la fase experimental consiste en aplicar una variación de la norma UNE-EN ISO 16701 a los tres tipos de acero con recubrimiento de mortero a los 28 días. Esta variación consiste en no ajustar el pH de la solución corrosiva de manera previa a cada inmersión del elemento ensayado, y responde a la elevada variación de pH que sufre la disolución por efecto de la lixiviación del mortero.

3. RESULTADOS

3.1 Consideraciones previas

En este apartado presentaremos los resultados de los ensayos previamente descritos agrupados por tipo de metal. Distinguiremos entre acero al carbono (muestras G), acero galvanizado (muestras A y E) y aluminio-zinc (muestras ALZ). Dentro de cada tipo de metal distinguiremos entre resultados de los alambres sueltos, con los dos tipos de ensayo realizado, y alambres embebidos en mortero. Finalmente se comparan las velocidades de corrosión a un año para todos los tipos de alambre y se categorizaran según la norma ISO 9223.

3.2 Acero al carbono (tipo G)

3.2.1 Alambres sueltos

3.2.1.1 Ensayo UNE-EN 990

Se realizó el ensayo a 7 y 30 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.1. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo UNE-EN 990 durante 7 y 30 días.

	7 días	30 días	
	G 1	G1	G2
Peso inicial (g)	2,0672	2,0709	2,0724
Peso final (g)	2,0654	2,0637	2,0651
Área (mm ²)	557,792	525,536	553,425

Tabla 3.2. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo G a 7 y 30 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 990 (velocidad de corrosión media entre dos determinaciones).

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,088	3,52
30 días	0,35	14,05

3.2.1.2 Ensayo UNE-EN ISO 16701

Se realizó el ensayo a 7, 14 y 28 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.3. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 7 días.

	Ensayo a 7 días			
	G1	G2	G3	G4
Peso inicial (g)	2,1839	2,1989	2,2014	2,1697
Peso final (g)	2,1477	2,185	2,187	2,152
Área (mm ²)	557,792	546,269	543,165	543,682

Tabla 3.4. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 14 días.

	Ensayo a 14 días		
	G1	G2	G3
Peso inicial (g)	2,1712	2,1860	2,1699
Peso final (g)	2,143	2,157	2,141
Área (mm ²)	543,165	543,682	543,1655

Tabla 3.5. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días				
	G1	G2	G3	G4	G5
Peso inicial (g)	2,0913	2,1763	1,8543	2,6499	2,5348
Peso final (g)	1,7103	1,7447	1,699	2,391	2,3
Área (mm ²)	525,536	553,425	452,637	642,487	620,76

Tabla 3.6. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo G a 7 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma 16701 (media de los resultados expuestos en las tablas 3.3, 3.4 y 3.5)

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,70	28,2
14 días	1,32	52,8
28 días	13.5	426 – 610(*)

(*) No se ha calculado la media debido a la gran variabilidad de resultados.

3.2.1.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año

Tabla 3.7. Velocidades de corrosión del alambre tipo G estimadas a 1 año.

	g/año.m ²	µm/a
UNE-EN 990	189	24
UNE-EN ISO 16701	86183	10964

Vemos que la velocidad de corrosión para este tipo de alambre según el ensayo UNE-EN ISO 16701 es muy alta. Considerando un área de exposición de 550 mm² (media de los alambres estudiados) se consumiría un total de 47 gramos de metal anualmente cifra muy superior al peso de los alambres ensayados.

3.2.2 Alambres embebidos en mortero

3.2.2.1 Ensayo UNE-EN 990

Se realizó el ensayo a 30 días.

Tabla 3.8: Resultados de los ensayos de alambres tipo G embebidos en mortero según la norma UNE-EN 990.

	Ensayo a 30 días			
	G1	G2	G3	G4
Peso inicial (g)	2,1746	2,1303	2,0992	2,0696
Peso final (g)	2,1717	2,1269	2,0961	2,0676
Pérdida peso (%)	0,13	0,16	0,15	0,09
R.corrosión (g/m ²)	5,31	6,42	5,90	3,83

Al ser los resultados de la velocidad de corrosión tan bajos no se efectuó éste ensayo con más días de exposición y se centró la investigación con el ensayo EN 16701 más agresivo.

3.2.2.2 Ensayo UNE-EN ISO 16701

Se realizó el ensayo a 28 56 y 90 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.9. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días		
	G1	G2	G3
Peso inicial (g)	2,3224	2,3201	2,2938
Peso final (g)	2,317	2,317	2,290
Área (mm ²)	519,2308	519,263	519,1257

Tabla 3.10. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.

	Ensayo a 56 días		
	G1	G2	G3
Peso inicial (g)	2,5181	2,3982	2,4062
Peso final (g)	2,513	2,391	2,4
Área (mm ²)	516,11	517,3	517,81

Tabla 3.11. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo G embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.

	Ensayo a 90 días		
	G1	G2	G3
Peso inicial (g)	2,3573	2,3773	2,294
Peso final (g)	2,346	2,337	2,286
Área (mm ²)	516,7827	515,2308	515,7481

Tabla 3.12. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión media de los alambres tipo G sometidos a 28, 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701 (media de los resultados expuestos en las tablas 3.9, 3.10 y 3.11).

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
28 días	0,17	7,9
56 días	0,25	11,9
90 días	0,414	18,68

3.2.2.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año

Para estimar la velocidad de corrosión en el primer año pasamos la velocidad de corrosión a profundidad de corrosión en micrómetros y ponemos los datos en forma logarítmica. El procedimiento se explica en el apartado 2.7.

Tabla 3.13. Parámetros para estimar la velocidad de corrosión en el primer año (alambre tipo G embebido en mortero).

Tiempo de ensayo (días)	28	56	90
Log tiempo (años)	-1,11513483	-0,81410484	-0,60805036
Log profundidad (µm)	0,00202126	0,18101603	0,37595433

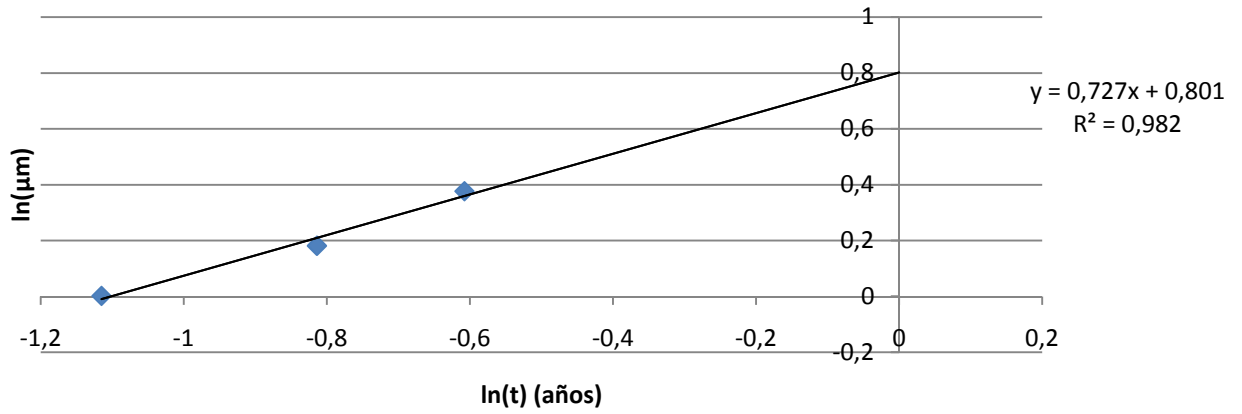


Fig 3.1. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en µm (eje y) del alambre tipo G embebido en mortero.

La **velocidad de corrosión** estimada es de **6,32 µm/año**

3.3 Acero galvanizado (tipo A y E)

3.3.1 Alambres sueltos

3.3.1.1 Ensayo UNE-EN 990

Se realizó el ensayo a 7 y 30 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.14. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN 990 durante 7 y 30 días.

	7 días	30 días	
	A1	A2	A3
Peso inicial (g)	2,0648	2,2176	2,0941
Peso final (g)	2,0619	2,2095	2,0859
Área (mm ²)	529,902	557,792	543,847

Tabla 3.15. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo UNE-EN 990 durante 7 y 30 días.

	7 días	Ensayo a 30 días	
	E1	E2	E3
Peso inicial (g)	5,8499	5,8966	6,1863
Peso final (g)	5,8358	5,8642	6,1539
Área (mm ²)	976,6453	963,729	1032,893

Tabla 3.16. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo A a 7 y 30 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 990 (velocidad de corrosión media entre dos determinaciones).

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,14	5,61
30 días	0,38	15,24

Tabla 3.17. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo E a 7 y 30 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 990. (velocidad de corrosión media entre dos determinaciones)

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,07	4,36
30 días	0,25	14,74

3.3.1.2 Ensayo UNE-EN ISO 16701

Se realizó el ensayo a 7 14 y 28 días para las muestras A y E. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.18. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 7 días.

	Ensayo a 7 días			
	A1	A2	A3	A4
Peso inicial (g)	2,0872	2,7114	2,6756	2,6964
Peso final (g)	2,0803	2,702	2,665	2,686
Área (mm ²)	529,9024	548,023	545,937	548,023

Tabla 3.19. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 14 días.

	Ensayo a 14 días		
	A1	A2	A3
Peso inicial (g)	2,7341	2,6783	2,6803
Peso final (g)	2,702	2,665	2,662
Área (mm ²)	548,544	545,937	545,937

Tabla 3.20. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días				
	A1	A2	A3	A4	A5
Peso inicial (g)	2,2424	2,1379	2,4176	2,4244	2,2979
Peso final (g)	2,2187	2,1165	2,389	2,397	2,276
Área (mm ²)	557,792	543,847	527,573	509,958	520,387

Tabla 3.21. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo A a 7 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701. (media de los resultados expuestos en las tablas 3.18, 3.19 y 3.20)

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,38	18,5
14 días	0,78	38,8
28 días	1,09	54,2

Tabla 3.22. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo EN 16701 durante 7 días.

	Ensayo a 7 días			
	E1	E2	E3	E4
Peso inicial (g)	5,8499	6,1724	6,2135	6,2196
Peso final (g)	5,8358	6,157	6,193	6,203
Área (mm ²)	1796,6453	1990,54	1996,17	1999,92

Tabla 3.23. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo EN 16701 durante 14 días.

	Ensayo a 14 días		
	E1	E2	E3
Peso inicial (g)	5,8627	6,1984	6,2437
Peso final (g)	5,845	6,182	6,224
Área (mm ²)	1889,23	1994,29	2009,3

Tabla 3.24. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días				
	E1	E2	E3	E4	E5
Peso inicial (g)	5,8966	6,1863	5,1706	5,5008	4,8212
Peso final (g)	5,8642	6,1539	5,137	5,465	4,786
Área (mm ²)	1863,729	2032,893	1647,78	1941,76	1541,59

Tabla 3.25. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo E a 7, 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701 (media de los resultados expuestos en las tablas 3.22, 3.23 y 3.24).

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,28	8,77
14 días	0,29	9,13
28 días	0,68	20,52

3.3.1.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año

Tabla 3.26. Velocidades de corrosión de los aceros tipo A y E estimadas a 1 año.

		Velocidad de corrosión en el primer año estimada	
		g/m ²	μm/a
Acero tipo A	UNE-EN 990	93,4	11,9
	UNE-EN ISO 16701	424,05	53,95
Acero tipo E	UNE-EN 990	30,2	3,84
	UNE-EN ISO 16701	86,98	11,06

Como se puede apreciar en la tabla 3.26 el grosor del alambre tiene una influencia significativa en la velocidad de corrosión. Los aceros tipo A experimentan una velocidad de corrosión 4 veces superior a los alambres tipo E. Esto es debido a que para el cálculo de la velocidad de corrosión se tiene en cuenta la pérdida de peso y el área de exposición. El alambre tipo E tiene más área de exposición en relación a su pérdida de peso, es por eso que en los resultados apreciamos menos velocidad de corrosión.

3.3.2 Alambres embebidos en mortero

3.3.2.1 Ensayo UNE-EN 990

Se realizó el ensayo a 30 días.

Tabla 3.27. Resultados de los ensayos de alambres tipo A y E embebidos en mortero según la norma UNE-EN990.

	Tipo A		Tipo E	
	A1	A2	E1	E2
Peso inicial (g)	2,2855	2,3209	6,6617	6,6162
Peso final (g)	2,2659	2,3052	6,63	6,5934
Pérdida peso (%)	0,86	0,68	0,47	0,34
R.corrosión (g/m ²)	34,28	27,67	29,08	21,02

Al ser los resultados de la velocidad de corrosión relativamente bajos no se efectuó éste ensayo con más días de exposición y se centró la investigación con el ensayo EN 16701 más agresivo.

3.3.2.2 Ensayo EN 16701

Se realizó el ensayo a 28 56 y 90 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.28. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días		
	A1	A2	A3
Peso inicial (g)	2,9613	2,954	2,9433
Peso final (g)	2,932	2,932	2,916
Área (mm ²)	523,202	518,301	522,472

Tabla 3.29. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.

	Ensayo a 56 días		
	A1	A2	A3
Peso inicial (g)	2,9563	3,0598	3,0679
Peso final (g)	2,924	3,028	2,992
Área (mm ²)	524,037	524,038	523,51572

Tabla 3.30. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo A embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.

	Ensayo a 90 días		
	A1	A2	A3
Peso inicial (g)	2,8247	2,9492	2,8316
Peso final (g)	2,731	2,834	2,717
Área (mm ²)	522,055	520,908	522,055

Tabla 3.31. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo A a 28 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701 (media de los resultados expuestos en las tablas 3.28, 3.29 y 3.30).

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
28 días	0,88	50,2
56 días	1,53	83,3
90 días	3,756	206,717

Tabla 3.32. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días		
	E1	E2	E3
Peso inicial (g)	6,5297	6,544	6,8904
Peso final (g)	6,451	6,497	6,838
Área (mm ²)	1868,5956	1874,2239	1870,4717

Tabla 3.33. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.

	Ensayo a 56 días		
	E1	E2	E3
Peso inicial (g)	6,9285	6,9081	7,0954
Peso final (g)	6,866	6,83	7,053
Área (mm ²)	1874,223	1874,223	1862,967

Tabla 3.34. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo E sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.

	Ensayo a 90 días		
	E1	E2	E3
Peso inicial (g)	6,8378	6,8977	6,9005
Peso final (g)	6,715	6,714	6,759
Área (mm ²)	1886,793	1876,1	1878,351

Tabla 3.35. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión promedio de los alambres a 28, 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 16701. (media de los resultados expuestos en las tablas 3.32, 3.33 y 3.34)

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
28 días	0,89	31,7
56 días	0,876	32,55
90 días	2,17	79,44

3.3.2.3 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año

Para estimar la velocidad de corrosión en el primer año pasamos la velocidad de corrosión a profundidad de corrosión en micrómetros y ponemos los datos en forma logarítmica. El procedimiento se explica en el apartado 2.7.

Tabla 3.36. Parámetros para estimar la velocidad de corrosión de los alambres tipo A y E embebidos en mortero durante el primer año

Tipo de alambre	Tiempo de ensayo (días)	28	56	90
		Log tiempo (años)	-1,11513483	-0,81410484
A	Log profundidad (µm)	0,80528117	1,05445661	1,41995408
E	Log profundidad (µm)	0,60609315	0,61769339	1,00463831

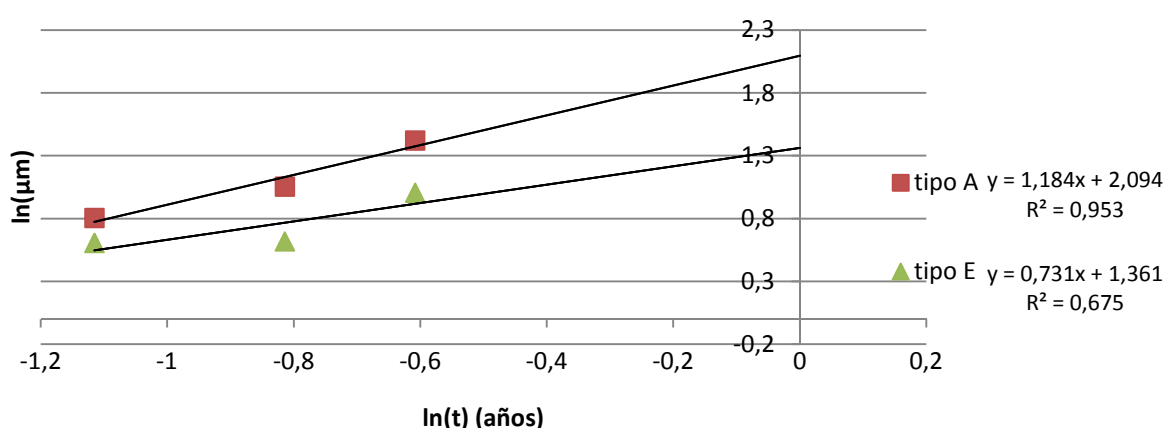


Fig.3.2. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en µm (eje y) de los alambres tipo A y E embebidos en mortero.

La **velocidad de corrosión** estimada es de **124,33 µm/año** para el acero tipo A y de **22,97 µm/año** para el acero tipo E.

3.4 Aluminio-zinc (tipo ALZ)

3.4.1 Alambres sueltos

3.4.1.1 Ensayo EN 16701

Se realizó el ensayo a 7 14 y 28 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.37. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 7 días.

	Ensayo a 7 días		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	2,1847	2,1883	2,1914
Peso final (g)	2,176	2,175	2,185
Área (mm ²)	619,459	621,227	618,870

Tabla 3.38. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 14 días.

	Ensayo a 14 días		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	2,1947	2,2088	2,2888
Peso final (g)	2,185	2,198	2,285
Área (mm ²)	619,459	620,049	649,51

Tabla 3.39. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	1,9528	1,9614	1,9288
Peso final (g)	1,914	1,934	1,941
Área (mm ²)	540,876	581,738	519,851

Tabla 3.40. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo ALZ a 7, 14 y 28 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 1670 (media de los resultados expuestos en las tablas 3.37, 3.38 y 3.39)

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
7 días	0,23-0,61	10,3-21,4
14 días	0,21-0,49	7,4-17,4
28 días	1,69	49,7

3.4.1.2 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año

Tabla 3.41. Velocidades de corrosión del alambre tipo ALZ estimada a 1 año.

	Velocidad de corrosión en el primer año estimada	
	g/m ²	µm/a
UNE-EN ISO 16701	838,34	106,65

3.4.2 Alambres embebidos en mortero

3.4.2.1 Ensayo UNE-EN 16701

Se realizó el ensayo a 28 56 y 90 días. A continuación se presentan los resultados del ensayo en forma de tablas.

Tabla 3.42. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 28 días.

	Ensayo a 28 días		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	2,3953	2,3388	2,4086
Peso final (g)	2,386	2,314	2,401
Área (mm ²)	588,22	588,81	588,82

Tabla 3.43. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ embebidos en mortero sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 56 días.

	Ensayo a 56 días		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	2,3201	2,3938	2,4209
Peso final (g)	2,289	2,351	2,405
Área (mm ²)	588,22	591,580	591,168

Tabla 3.44. Peso inicial, peso final y área de exposición de los alambres tipo ALZ sometidos al ensayo UNE-EN ISO 16701 durante 90 días.

	Ensayo a 90 días		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	2,325	2,316	2,305
Peso final (g)	2,262	2,237	2,257
Área (mm ²)	592,170	591,698	589,4

Tabla 3.45. % de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los alambres tipo ALZ embebidos en mortero a 28 56 y 90 días de exposición de acuerdo a la norma UNE-EN 16701 (media de los resultados expuestos en las tablas 3.42, 3.43 y 3.44).

Tiempo de exposición	Pérdida de peso (%)	Velocidad de corrosión (g/m ²)
28 días	0,588	23,6
56 días	1,26	50,7
90 días	2,75	108,016

3.4.2.2 Estimación de la velocidad de corrosión en el primer año

Para estimar la velocidad de corrosión en el primer año pasamos la velocidad de corrosión a profundidad de corrosión en micrómetros y ponemos los datos en forma logarítmica. El procedimiento se explica en el apartado 2.7.

Tabla 3.46. Parámetros para estimar la velocidad de corrosión del alambre tipo ALZ en el primer año.

Tiempo de ensayo (días)	28	56	90
Log tiempo (años)	-1,11513483	-0,81410484	-0,60805036
Log profundidad (µm)	0,47748946	0,80963023	1,13806726

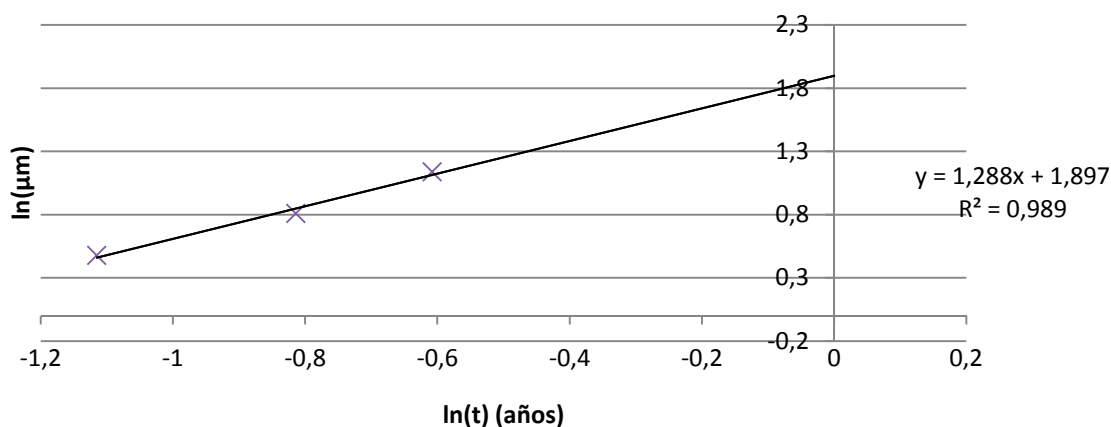


Fig.3.3. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en µm (eje y) del alambre tipo ALZ embebido en mortero.

La **velocidad de corrosión** estimada es de **79 µm/año**

3.5 Velocidades de corrosión sin ajuste de pH

Como se ha comentado anteriormente se decidió someter muestras del tipo G, A y Alz embebidas en mortero al ensayo UNE EN 16701 a 28 días sin ajustar el pH de la solución donde se sumergen las probetas. Se realizó el ensayo y se comparó con los resultados del mismo ensayo pero con ajuste de pH al 4,2, como dice la norma.

Tabla 3.47. Peso inicial, peso final, pérdida de peso y velocidad de corrosión para los alambres embebidos en mortero sometidos a los ciclos definidos en la norma UNE-EN ISO 16701 a 28 días, sin ajuste de pH.

	G			A		
	G1	G2	G3	A1	A2	A3
Peso inicial (g)	2,5015	2,5023	2,4602	2,5364	3,1335	2,987
Peso final (g)	2,495	2,5	2,459	2,526	3,116	2,974
Pérdida de peso (%)	0,2598 ^(*)	0,0919	0,0488	0,4100	0,5585	0,4352
Rcorr (g/m ²)	12,5652	4,4329	2,3128	19,8459	33,3283	24,8321

(*): Este elevado valor es debido a un defecto en el sellado de silicona en la interfase mortero-aire

	ALZ		
	ALZ1	ALZ2	ALZ3
Peso inicial (g)	2,5565	2,3951	2,5125
Peso final (g)	2,546	2,376	2,497
Pérdida de peso (%)	0,4107	0,7975	0,6169
Rcorr (g/m ²)	17,8504	32,2446	26,2193

En la tabla 3.48 se muestran los valores obtenidos de pérdida de masa aplicando la norma UNE-EN ISO 16701 con y sin ajuste de pH de la disolución de corrosión. Recordemos que en el primer caso el pH de la disolución es ajustado a 4,2 mientras que en el segundo caso se deja el pH propio de la disolución, que se encuentra alrededor de 6.

Tabla 3.48. Pérdidas de masa (en %) según UNE-EN ISO 16701 de morteros a 28 días con y sin ajuste de pH.

	16701 pH = 4,2 ± 0,2	16701 pH≈6 (sin ajustar)
Alambres G	0,15	0,07
Alambres A	0,89	0,46
Alambres ALZO	0,35	0,60

Como se puede observar en la tabla anterior, el ajuste de pH conduce a un aumento significativo de la pérdida de masa de los alambres A y G a causa de la degradación producida en el mortero. Esto cumple la hipótesis de que a menor ataque al mortero, mayor protección.

La disminución de la pérdida de masa para los alambres tipo ALZ apoyaría la hipótesis del ataque alcalino al recubrimiento, puesto que la pérdida de masa es mayor cuando menos dañado se encuentra el mortero.

3.6 Comparación de la velocidad de corrosión anual de los distintos alambres

3.6.1 Sin recubrimiento de mortero

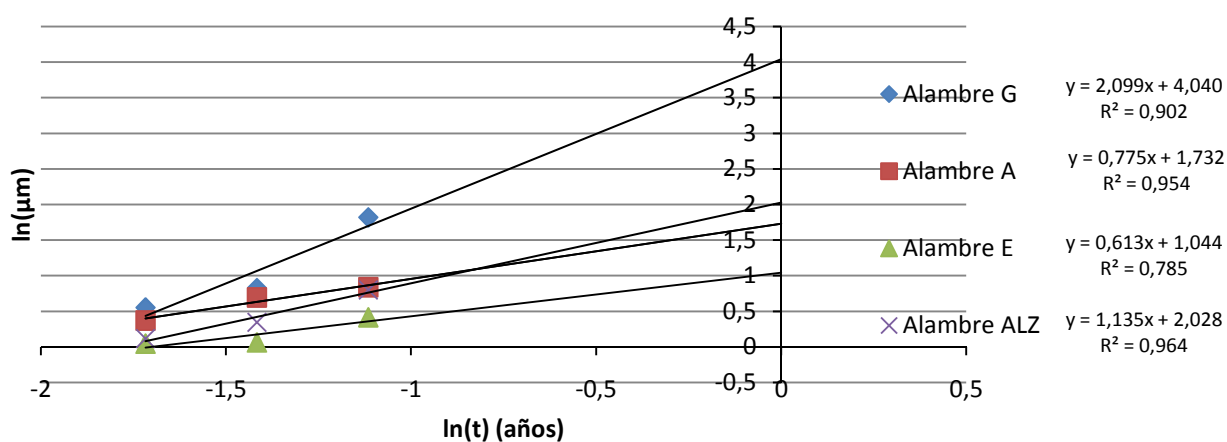


Fig 3.4. Gráfica que relaciona el logaritmo del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) para los distintos alambres sin recubrimiento de mortero.

Tabla 3.49. Velocidades de corrosión a un año para los distintos aceros

Tipo de muestra	Log velocidad	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	Velocidad de corrosión ($\text{g}/\text{m}^2\text{año}$)
G	4,04	10964,782	86183,18
A	1,732	53,95	424,05
E	1,044	11,06	86,98
ALZ	2,028	106,65	838,34

3.6.2 Con recubrimiento de mortero

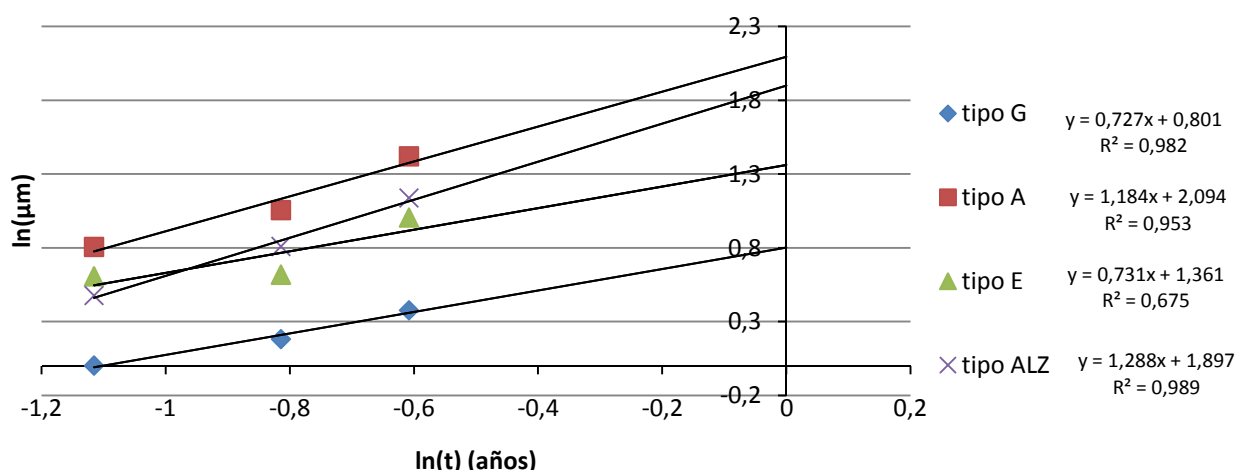


Fig.3.5. Gráfica que relaciona el logaritmo del del tiempo en años (eje x) con el logaritmo de la profundidad de corrosión en μm (eje y) para los distintos alambres embebidos en mortero.

Tabla 3.50. Velocidades de corrosión a un año para los distintos aceros embebidos en mortero

Tipo de muestra	Log velocidad	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	Velocidad de corrosión ($\text{g}/\text{m}^2 \text{ año}$)
G	0,801	6,324	49,7
A	2,095	124,33	977,28
E	1,3612	22,97	180,56
ALZ	1,89	79,03	621,18

3.7 Categorización de la corrosividad del ambiente según ISO 9223

A partir de la velocidad de corrosión en el primer año, se han asignado las categorías C1-C5 según la norma ISO 9223. Hay que tener en cuenta que estas categorías están definidas para la corrosividad establecida en la norma ISO 9226, que a su vez se refiere a la norma ISO 8565. Según esta última, para determinar la velocidad de corrosión del primer año en un ambiente determinado, las muestras deben ser expuestas a dicho ambiente durante un año, empezando la exposición al inicio del periodo de corrosividad máxima.

Como se ha comentado anteriormente, esta categorización se ha realizado tanto en los alambres sueltos como embebidos en mortero ya que se disponía de datos suficientes para estimar la velocidad de corrosión a un año. Los resultados obtenidos para los alambres sueltos y los alambres embebidos se exponen en la tabla 3.51 y tabla 3.52, respectivamente.

Tabla 3.51. Categorización según ISO 9223 de los alambres tipo A, E, G y ALZ sin recubrimiento de mortero

		UNE-EN ISO 16701	Velocidad de corrosión en el primer año estimada		Corrosividad del ambiente según ISO 9 223	Categoría de uso según ISO 9223
			g/m ²	µm/a		
Acero galvanizado	A	UNE-EN ISO 16701	424,05	53,95	ALTA	C4
	E	UNE-EN ISO 16701	86,98	11,06	BAJA	C2
acero al carbono ondulado	G	UNE-EN ISO 16701	86183,2	10964,78	MUY ALTA	C5
Alumino-zinc	ALZ	UNE-EN ISO 16701	838,34	106,65	MUY ALTA	C5

Tabla 3.52. Categorización según ISO 9223 de los alambres tipo A, E, G y ALZ embebidos en el mortero

		UNE-EN ISO 16701	Velocidad de corrosión en el primer año estimada		Corrosividad del ambiente según ISO 9 223	Categoría de uso según ISO 9223
			g/m ²	µm/a		
Acero galvanizado	A	UNE-EN ISO 16701	977,28	124,33	MUY ALTA	C5
	E	UNE-EN ISO 16701	180,56	22,97	BAJA	C2
acero al carbono ondulado	G	UNE-EN ISO 16701	49,7	6,324	BAJA	C2
Aluminio-zinc	ALZ	UNE-EN ISO 16701	621,18	79,03	ALTA	C4

Vemos que para las muestras A y E existe mayor velocidad de corrosión sin recubrimiento de mortero que con recubrimiento de mortero. Esto nos muestra la existencia de dos factores contrapuestos en el caso de los aceros galvanizados que afectan a la velocidad de corrosión. Estos factores son el ataque al recubrimiento y el ataque del mortero. Por una parte el galvanizado nos protege frente a la corrosión, pero por otro lado la alcalinidad del mortero en contacto con el acero destruye el recubrimiento protector. Por eso se puede dar el caso en que las muestras con recubrimiento experimenten más corrosión.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo se presentan a continuación. Como conclusiones generales se puede decir que:

- △ Se ha estudiado y establecido un único procedimiento de ensayo para evaluar comparativamente la respuesta a la corrosión de diferentes metales y aleaciones, tanto embebidos en mortero como sueltos.
- △ El procedimiento propuesto permite categorizar según los criterios establecidos en la norma ISO 9223 los materiales sometidos a ensayo.
- △ Se ha generado un cuerpo de datos que ha permitido desarrollar un método acelerado para la evaluación del comportamiento a corrosión y predicción de la vida útil de diferentes metales y aleaciones. Dicho procedimiento ha sido el objeto de un trabajo paralelo realizado en la Sección de Materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción llevado a cabo como Trabajo Final de Carrera por Izaskun Agirre, bajo la dirección de la Dra. Miren Etxeberria.

En referencia a los métodos normativos estudiados se puede concluir que:

- △ El ambiente creado por la norma UNE-EN 990 es de baja agresividad para los alambres embebidos en mortero. Como consecuencia, los tiempos de ensayo para obtener resultados de corrosión significativos son excesivamente largos. Por esta razón, se ha escogido la norma UNE-EN ISO 16701 para aplicarla tanto a alambres sueltos como a alambres embebidos en mortero. Esta norma, al introducir en la disolución corrosiva el parámetro de $\text{pH} = 4,2$, resulta mucho más agresiva, lo que se traduce en tiempos de ensayo más cortos. Además, permite permanecer en el lado de la seguridad al realizar la categorización según la norma ISO 9223, puesto que el ambiente ensayado resulta más agresivo que el marcado para aplicar las categorías C1-C5.
- △ Se ha estudiado el efecto del ajuste de pH en la disolución corrosiva utilizada en la norma UNE-EN ISO 16701 para el caso de los alambres embebidos en mortero. Puesto que el procedimiento indica que deben realizarse tres inmersiones sucesivas en la disolución ajustando previamente el pH en cada inmersión, se ha realizado el mismo ensayo sin el ajuste, teniendo en cuenta que tras la primera inmersión el pH varía de manera importante a causa de la lixiviación del mortero y la solución acaba siendo alcalina. Los resultados muestran cierta contraposición: Para las muestras tipo G concluimos que a menor ataque al mortero mayor protección. Sin embargo quedan en evidencia dos factores contrapuestos en el caso de los aceros con recubrimiento. Estos factores son el ataque al mortero y el ataque del mortero al recubrimiento. Según cuál de ellos sea más importante, la velocidad será mayor cuando el mortero esté menos atacado.

- ⤴ Por otro lado, hay que tener en cuenta que la norma UNE-EN ISO 16701 conduce a unos resultados de corrosividad sobrevalorados por el hecho de que la solución ácida ataca al mortero. Es decir, la corrosión observada corresponde parcialmente al ataque que la solución corrosiva realiza sobre el mortero por efecto del pH, y no exclusivamente al ataque corrosivo sobre el alambre.
- ⤴ Los ensayos realizados permiten, a partir de un mismo procedimiento, evaluar comparativamente la respuesta de diferentes metales y aleaciones al ambiente corrosivo determinado por el método ensayado. Asimismo, es posible, gracias a la utilización del mismo procedimiento para alambres y para alambres embebidos en mortero, evaluar la protección que el recubrimiento de mortero proporciona al alambre.
- ⤴ Los resultados obtenidos son puramente operativos, es decir, dependen del método llevado a cabo, por lo que su extrapolación a escalas temporales y a ambientes reales resulta arriesgada. Son útiles, sin embargo, para evaluar comparativamente la respuesta a un mismo ambiente agresivo de diferentes materiales.

Respecto a los alambres estudiados se puede concluir que:

- ⤴ El mortero ofrece una buena protección a los alambres tipo G (acero) frente a la corrosividad producida por el ambiente descrito en la norma UNE-EN ISO 16701.
- ⤴ Los alambres tipo A y E (acero galvanizado) parecen sufrir un ataque más agresivo cuando se encuentran revestidos de mortero. Esto parece confirmar la hipótesis, planteada por algunos autores, de que el ambiente fuertemente alcalino del mortero degrada el recubrimiento protector del alambre. Los datos obtenidos resultan insuficientes para evaluar cuando se degrada totalmente el recubrimiento y empieza la degradación del acero
- ⤴ El ambiente proporcionado por la norma UNE-EN ISO 16701 ha permitido categorizar los alambres según su respuesta a dicho ambiente. Hay que recordar que esta categorización indica, tal como ha sido usada en el presente trabajo, la agresividad según la que se puede clasificar al ambiente dependiendo de la respuesta del material estudiado. La tabla siguiente resume los resultados obtenidos como corrosividad de dicho ambiente.

	Sin mortero	Con mortero
Tipo G (acero al carbono 1.8mm)	Muy alta	Baja
Tipo A (galvanizado 1.8mm)	Alta	Muy alta
Tipo E (galvanizado 3mm)	Baja	Baja
ALZ (recubrimiento aluminio-zinc 2mm)	Muy alta	Alta

5. REFERENCIAS

Ahmad, Shamsad (2003), "*Reinforcement corrosion in concret structures, its monitoring and service life prediction*". King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia

Bazant, Z.P. (1979) "*Physical model for steel corrosion in concrete seastructures-theory*". ASCE J Struct Div.105:1137–53.

Berkely, KGC.(1990)"*Cathodic protection of reinforcement steel in concrete*". London: Butterworths& Co

Bertolini, Luca "et al", Bolzoni, Fabio and Pastore, Thomasso. (2003). "*Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete*". Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica.

Bhaskaran, R. (2005) "*ASM Hand Book*", Vol. 13B, 619, ASM International Metals Park, Ohio.

Botia, F.J.S. (1985). "*Ingenieria de Corrosión*". Instituto Nacional del Acero, Bogotá.

Broomfield, J.P. (1995). "*Corrosion and residual life in concrete structures – an overview*", Bull Electrochem, Vol. 11,121–128.

Bungey, J.H. (1989) "*The testing of concrete in structures*". London: Surrey university press.

Caré, Sabine. (2007) "*Influence of impressed current on the initiation of damage in reinforced mortar due to corrosion of embedded steel*". Université Paris-Est, InstitutNavier,

Elsener, B "et al", Molina M and Bohni, H. (1993). "*Electrochemical removal of chlorides from reinforced concrete structures*". Corrosion science , Vol.35, 1563-1570

Fang, C, Lundgrenb, K, Chen, L and Zhu, C. (2003). "*Corrosion influence on bond in reinforced concrete*" Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University.

Feliu, M.C. (1991). "*Corrosión y protección metálicas*", C.S.I.C., Madrid

Gómez de León, Félix Cesáreo. (2004). "*Manual Básico de corrosión para ingenieros*". Universidad de Murcia.

Hansson, C.M. (1984). "*Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concret.*",574-584.

- HIT. (2008) "*Hoja informativa técnica del consejo general de la arquitecturadécnica de España*". Anejo 28,13-15.
- Jaegermann, C. (1990). "*Effect of water–cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate*". ACI Mater J;87(4), 333–339
- Kapasny, L (1993), "*The influence of the reinforcement corrosion on the load-bearing capacity of the reinforced concrete structures*", 124-127, Proc. Int. Conf. RILEM. Bratislava,
- Mozer, J.D "et al" and Dillard, J. (1965)"*Corrosion of reinforcing bars in concrete*"J.AmConcrete Inst, 909–933
- Natesan, M.G,(2006)"*Corrosion Science*", Vol. 48, 3584-3608.
- Page, C.L. (1997)."*Cathodic protection of reinforced concrete- Principles and application.*"International Conference on Repair of Concrete Structures. Norway,123-131.
- Rasheeduzzafar "et al", Al-Gahtani, A.SandAl-Saadoun, S.S. (1989)."*Influence of construction practices on concrete durability.*"ACI Mater Vol. 86(6), 566–575
- Rengaswamy,N. (1987). "*Corrosion prevention and control*".11-17.
- Rodríguez, P"et al", Ramírez, E; Gonzalez, J. (1994). "*Methods for stustudying corrosion in reinforced concrete*".Mag. Conc. Res., 81-90
- Schönbein, C (1836) *Pogg. Ann* 37, 390
- Smith,William. (1998). "*Fundamentos de la ciencia y la ingeniería de materiales*". Editorial McGrawHill.
- Terán, G. "et al", Tovar, C., Portocarrero, J. (2004). "*Estudio de la corrosiónproducida en aceros inoxidables 304 en procesos de soldadura*"Dyna, Vol. 71, 144, Universidad Nacional de Colombia
- Thomas,Cereijo. (1994). "*Estudio experimental de corrosión de armaduras en hormigonesfabricados con material de derribo.*" Tesina de la ETSECCPB, especialidadestructuras y edificación.
- Tuutti, K. (1982). "*Corrosion of steel in concrete*", CBI research report no 4.82, Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Uhlig, H. (1970). "*Corrosión y Control de la Corrosión: Tipos de Corrosión*" Ediciones Bilbao, España, 1970.

Verbeck, N. (1991) "*Specification for Portland Pozzolana Cement*". BIS Standards, New Delhi; 1991.

Woolley, Tom. (2008). "*La galvanización y la construcción sostenible*", 8-9