



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

# **Diseño de un Laboratorio Virtual de Ensayos Tecnológicos aplicado a Materiales Metálicos**

**Autor:**

**Elián Diez Arranz**

**Tutor(es):**

**Ana Cristina García Cabezón**

**Departamento de Ciencia de los  
Materiales e Ingeniería Metalúrgica**

**Celia García Hernández**

**Departamento de Ciencia de los  
Materiales e Ingeniería Metalúrgica**

**Valladolid, julio de 2023.**

## Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado, desarrollado en el laboratorio de metalotecnia de la EII de la UVa, se ha dado continuidad a la propuesta llevada a cabo desde hace algunos años de crear laboratorios virtuales dedicados a la Ciencia e Ingeniería de los materiales. En este caso, se han creado los laboratorios virtuales de los ensayos tecnológicos de corrosión y desgaste.

Para la digitalización se ha creado una página web en la que se engloban una serie de ensayos tecnológicos de corrosión y desgaste, todos ellos con un texto y un video explicativo de los equipos necesarios, procedimientos y resultados que se pueden obtener de cada uno de ellos.

Además, para completar la página web se ha desarrollado una prueba de autoevaluación para que el alumno pueda comprobar el nivel de aprendizaje adquirido en los ensayos tecnológicos donde se indican las respuestas correctas, incorrectas y los comentarios explicativos de cada una de las preguntas para aclarar o afianzar conceptos.

**Palabras clave:** Laboratorio virtual; Ensayos Tecnológicos; Corrosión; Desgaste; Plataforma web.

## Abstract

In this Final Degree Project, developed at the metallography laboratory of the EII in UVa, it has proceeded to the continuation of the proposal carried out since few years of creating a virtual laboratory dedicated to the materials science and engineering. In this case it has been created the virtual laboratories of technological test of corrosion and wear.

For the digitized, it has created a web site where there are a part of this tecnológicas test, all of them with and explicative text and video which we may find the necessary tolls, methods y results that he may get from each one of this tests.

Furthermore, to complete the web site it has developed an self-evaluation test which the student may prove his or her learning about technological test and which it shows correct and wrong answers and also some explicative commentaries of each cuestions with the purpose of clarify or strengthen the most important concepts.

**Keywords:** Virtual laboratory; Technological test; Corrosion; Wear; Web platform.



## Contenido

1.-Introducción .....	1
2.-Objetivos.....	3
3.-Justificación del proyecto .....	4
4.- Fundamentos teóricos.....	5
4.1.-La importancia de la corrosión .....	5
4.1.1-Clasificación de la corrosión.....	5
4.2.-El desgaste de los materiales.....	21
4.2.1-Rozamiento de deslizamiento .....	21
4.2.2-Rozamiento de rodadura .....	23
4.2.3-Tipos de desgaste .....	24
4.2.4-Lubricación de los materiales .....	28
4.3- Ensayos de corrosión .....	30
4.3.1- Ensayo de cámara de niebla salina (Normas ASTM B287 y B368).....	30
4.3.2- Ensayo de oxidación.....	36
4.3.3- Ensayo de potencial a circuito abierto (OCP) .....	39
4.3.4- Ensayo de polarización anódica (Norma ASTM G5).....	44
4.4.-Ensayos de desgaste.....	49
4.4.1- Representación e interpretación de los ensayos de desgaste .....	51
4.4.2- Ensayo de desgaste circular seco (Norma ASTM G99) .....	51
4.4.3- Ensayo de desgaste circular lubricado (Norma ASTM G99).....	57
5.- Desarrollo del TFG .....	64
5.1- Desarrollo de los textos explicativos .....	64
5.2- Desarrollo del contenido audiovisual.....	65
5.2.1- Desarrollo de videos explicativos.....	65
5.2.2- Desarrollo de la página web .....	66
5.3- Desarrollo de la prueba de autoevaluación.....	69
6.-Conclusiones .....	73
7.- Líneas futuras de trabajo .....	74
8.- Bibliografía .....	75

## Índice de Figuras.

<i>Figura 1: Ejemplo de corrosión uniforme.</i> .....	6
<i>Figura 2: Esquema representativo de la corrosión uniforme.</i> .....	6
<i>Figura 3: Ejemplo de corrosión selectiva.</i> .....	7
<i>Figura 4: Imagen obtenida mediante microscopia electrónica de barrido mostrando el ataque selectivo sobre la ferrita en un acero hipoeutectoide.</i> .....	7
<i>Figura 5: Descincificación del latón.</i> .....	7
<i>Figura 6: Reacciones producidas en la descincificación del latón.</i> .....	8
<i>Figura 7: Picadura en tubería de acero galvanizado.</i> .....	8
<i>Figura 8: Cambio en el potencial de inicio de picaduras en circonio en contacto con soluciones acidas conteniendo distintos halogenuros.</i> .....	10
<i>Figura 9: Cambio en el potencial de picadura del acero inoxidable austenítico al modificarse la concentración del anión agresivo.</i> .....	10
<i>Figura 10: Variación del potencial de picadura del acero inoxidable austenítico en función de los aleantes presentes y de su contenido.</i> .....	11
<i>Figura 11: Corrosión en resquicio localizado en una arandela situada debajo de la cabeza de un tornillo de acero inoxidable austenítico.</i> .....	11
<i>Figura 12: Representación esquemática mostrando la concentración localizada de catión metálico, protones y anión cloruro en el interior del resquicio</i> .....	12
<i>Figura 13: Carburos de cromo precipitados en el límite de grano de la austenita en acero inoxidable</i> .....	13
<i>Figura 14: a) Representación esquemática de la precipitación de carburos en borde de grano. b) Perfil de concentración de cromo en la zona próxima al carburo.</i> .....	13
<i>Figura 15: Imagen del borde de 3 granos con precipitación de carburos.</i> .....	14
<i>Figura 16: Imagen del borde de grano con precipitación de carburos por calentamiento de acero inoxidable austenítico de grano grueso.</i> .....	15
<i>Figura 17: Rotura intergranular en la proximidad de un cordón de soldadura de un acero inoxidable austenítico.</i> .....	15
<i>Figura 18: Rotura intergranular en acero al carbono provocada por corrosión bajo tensión.</i> .....	16
<i>Figura 19: Rotura transgranular en bronce por corrosión bajo tensión</i> .....	16
<i>Figura 20: Representación de la matriz metálica en la que la concentración de vacantes es mayor de la que habría en el equilibrio.</i> .....	18
<i>Figura 21: Representación esquemática de los distintos tipos de corrosión de acuerdo con la morfología del ataque.</i> .....	18
<i>Figura 22: Representación esquemática de la superficie de un material metálico mostrando zonas con distinto potencial electroquímico (pilas de corrosión).</i> .....	19
<i>Figura 23: Representación esquemática del proceso de corrosión electroquímica para un metal divalente.</i> .....	19
<i>Figura 24: Representación de un proceso de corrosión electroquímica.</i> .....	20
<i>Figura 25: Reacción presente en la corrosión seca (oxidación).</i> .....	20
<i>Figura 26: Esquema de dos superficies rugosas en contacto y sus áreas de contacto.</i> .....	21
<i>Figura 27: Esquema del mecanismo de fricción por adhesión.</i> .....	22
<i>Figura 28: Esquema del mecanismo de fricción por deformación.</i> .....	22
<i>Figura 29: Esquema representativo de la fricción por rodadura.</i> .....	23
<i>Figura 30: Desgaste adhesivo entre superficies.</i> .....	24

Figura 31: Representación de desgaste abrasivo de dos cuerpos (superior) y de tres cuerpos (inferior).....	25
Figura 32: Representación del desgaste por fatiga de superficies en contacto. ....	25
Figura 33: Imagen de desgaste por fatiga en un rodamiento de cilindros .....	26
Figura 34: Rodamiento desgastado por corrosión. ....	26
Figura 35: Desgaste por erosión de partículas en una turbina Pelton. ....	27
Figura 36: Desgaste por cavitación en la hélice de una turbina. ....	27
Figura 37: Representación del funcionamiento de la lubricación hidrodinámica .....	28
Figura 38: Representación del funcionamiento de la lubricación elastohidrodinámica (EHL). .....	29
Figura 39: Lubricación mixta.....	29
Figura 40: Lubricación marginal .....	30
Figura 41: Cámara de niebla salina.....	31
Figura 42: Depósito en el que se almacena la disolución salina. ....	32
Figura 43: Probeta de acero electrocincado colgada en un soporte dentro de la cámara de niebla salina antes de comenzar el ensayo. ....	33
Figura 44: Vista superior de la cámara de niebla salina desde donde podemos ver el canal lateral, los soportes, los capilares y el difusor encargado de la generación de la niebla. ....	33
Figura 45: Panel de control de la cámara de niebla salina.....	34
Figura 46: Ejemplo de pieza de acero electrocincado antes de ser ensayado en cámara de niebla salina. ....	35
Figura 47: Probeta de acero electrocincado ensayada durante 40 horas en cámara de niebla salina. ....	35
Figura 48: Probeta de acero al carbono pintada y ensayada en cámara de niebla salina durante 40 horas. ....	36
Figura 49: Probeta de cobre ensayada durante 40 horas en cámara de niebla salina.....	36
Figura 50: Horno para ensayo de oxidación.....	37
Figura 51: Probeta a ensayar en etanol para ser limpiada.....	38
Figura 52: Probeta antes (a) y después (b) de ser ensayada.....	38
Figura 53: Resultados obtenidos del ensayo de corrosión. ....	39
Figura 54: Potenciostato con el que se realizan los ensayos de potencial a circuito abierto y de polarización anódica.....	39
Figura 55: Diferencia entre una celda (a) y una minicelda (b).....	40
Figura 56: Electrodo de referencia de Ag AgCl.....	41
Figura 57: Probeta preparada para ser ensayada.....	41
Figura 58: Interfaz de usuario para la realización del ensayo de potencial a circuito abierto. .....	42
Figura 59: Placa calefactora para ensayos termostatados.....	42
Figura 60: Bomba peristáltica para ensayos termostatados. ....	43
Figura 61: Ensayos de potencial a circuito abierto realizados a diferentes materiales en un medio salino. ....	44
Figura 62: Ejemplo de diagrama de Evans.....	45
Figura 63: Contraelectrodos. Barra de grafito y placa de platino. ....	45
Figura 64: Celda electroquímica convencional realizando ensayo de polarización anódica.....	46
Figura 65: Interfaz de usuario para la realización del ensayo de polarización anódica. ....	47

Figura 66: Diferentes diagramas de Evans obtenidos de probetas con diferentes recubrimientos. ....	48
Figura 67: Punto de equilibrio obtenido gracias a la aproximación de Tafel.....	48
Figura 68: Vista lateral de la máquina de ensayos "MicroTest Tribómetro". ....	49
Figura 69: Vista frontal de la máquina de ensayos "MicroTest Tribómetro" .....	50
Figura 70: Curva de desgaste en función de la distancia de deslizamiento. [9].....	51
Figura 71: Representación ensayo Pin-on-disk.....	52
Figura 72: Bolas o pines de diferentes diámetros (3 y 6 mm) y diferentes materiales (acero y alúmina). ....	52
Figura 73: Pesos colocados en el porta-pines. ....	53
Figura 74: Bola de alúmina desgastada.....	53
Figura 75: Disco giratorio para ensayo de desgaste circular seco. ....	54
Figura 76: Horquillas y tornillos de fijación. ....	54
Figura 77: Ejemplo de la parametrización del ensayo dentro del software.....	55
Figura 78: Huella circular en probeta desgastada mediante un ensayo de desgaste circular seco.....	55
Figura 79: Ejemplo de gráficas obtenidas por el software a la vez que se está realizando el ensayo de desgaste circular seco (en naranja la penetración y en azul el coeficiente de rozamiento, ambos en función de la distancia de deslizamiento). ....	57
Figura 80: Sistema de lubricación para el ensayo de desgaste circular lubricado. ....	58
Figura 81: Manguera de lubricación para el ensayo de desgaste circular lubricado.....	58
Figura 82: Situación con acumulación de lubricante después de un cierto periodo de ensayo.....	59
Figura 83: Disco giratorio para el ensayo de desgaste circular lubricado. ....	60
Figura 84: Ejemplo de la parametrización del ensayo dentro del software.....	60
Figura 85: Situación una vez finalizado un ensayo de desgaste circular lubricado.....	61
Figura 86: Ejemplo de gráficas obtenidas por el software a la vez que se está realizando el ensayo de desgaste circular lubricado (en naranja la penetración y en azul el coeficiente de rozamiento, ambos en función de la distancia de deslizamiento). ....	62
Figura 87: Comparativa de huellas en probetas entre desgaste circular seco y desgaste circular lubricado.....	63
Figura 88: Ejemplo de texto explicativo abierto desde la página web del laboratorio virtual. ....	64
Figura 89: Interfaz de usuario del editor de video.....	65
Figura 90: Primer paso dentro de la interfaz de usuario de Jimdo.....	66
Figura 91: Primera página web sin editar. ....	67
Figura 92: Inicio del sitio web creado. ....	68
Figura 93: Ejemplo de diapositiva explicativa dentro de la corrosión. ....	68
Figura 94: Espacio de la página dedicada al desgaste que introduce el enlace a los ensayos de desgaste. ....	69
Figura 95: Pantalla principal de la aplicación Google Forms.....	70
Figura 96: Plantillas propuestas por Google Forms.....	70
Figura 97: Ejemplo de programación de pregunta en Google Forms.....	71
Figura 98: Ejemplo de respuesta correcta en la prueba de autoevaluación.....	71
Figura 99: Ejemplo de respuesta incorrecta en la prueba de autoevaluación.....	72

## 1.-Introducción

El presente Trabajo Fin de Grado (en adelante TFG) se ha realizado durante los meses de marzo a junio de 2023 dentro del Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, en el laboratorio de metalotecnia de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid. En este TFG se ha creado una plataforma on-line dedicada a un Laboratorio Virtual de Ciencia e Ingeniería de Materiales que será útil para los alumnos de Grado en el ámbito de la Ingeniería Industrial. Concretamente, se centra en el desarrollo de Ensayos Tecnológicos de desgaste y corrosión aplicados al Control de Calidad de Materiales de interés industrial. Los ensayos tecnológicos son, en general, procesos instrumentales ejecutados mediante metodologías arbitrariamente aceptadas como referentes o desarrollados “ad hoc”, que ponen de manifiesto diversas características asociadas al comportamiento en la fabricación o en el servicio, de los materiales industriales. Todo ello realizado de mutuo acuerdo entre proveedor y cliente, con arreglo a una normativa general o a un procedimiento particular de ensayo y evaluación. Anteriormente, en el Departamento, se han desarrollado otros laboratorios virtuales sobre Caracterización Microestructural, Ensayos Mecánicos y Ensayos No Destructivos (END).

Con este trabajo se espera diseñar un material docente de fácil acceso para el estudiante que le permita adquirir conocimientos y habilidades relevantes en las asignaturas de Ciencia de Materiales y de Ingeniería de Materiales. El material docente de carácter práctico e innovador al que tendrá acceso el alumno se espera que mejore el proceso de enseñanza-aprendizaje a partir de un mayor conocimiento y una mejor comprensión de técnicas y ensayos tecnológicos que nos permitan conocer cómo se comportan los materiales ante los diferentes procesos de corrosión y desgaste a los que son sometidos a nivel industrial, así como predecir los posibles problemas de comportamiento en servicio que pueden surgir durante su uso industrial.

Por otro lado, dado el elevado número de alumnos que se matriculan anualmente en las asignaturas mencionadas, además de las limitaciones de espacio y tiempo para realizar ensayos de laboratorio sobre diferentes materiales, se hace imprescindible la creación de nuevos recursos didácticos que complementen y ayuden al aprendizaje, a la vez que dota al alumno de mayor autoconfianza a la hora de realizar los ensayos en el laboratorio real, pero sin la intención de sustituir la impartición de los laboratorios de manera presencial. Con ello, se espera conseguir un modelo de enseñanza-aprendizaje más dinámico, agradable, atractivo y de mayor calidad, así como una intervención más activa del alumno, pues éste puede experimentar desde cualquier dispositivo digital, a cualquier hora y desde cualquier lugar haciendo el aprendizaje más accesible según sus necesidades mejorando su aprovechamiento de las prácticas. Además, también se pretende promover el trabajo autónomo del alumno, pero no eliminar el papel clave del profesor que llevará a cabo un seguimiento continuo del proceso de aprendizaje de los alumnos y les apoyará y proporcionará los recursos que precisen en cada momento.

Estas prácticas tienen gran importancia ya que los ensayos tecnológicos, utilizados para evaluar si un material es útil para una determinada aplicación y para evaluar su



comportamiento en servicio, suponen una parte fundamental dentro de la industria. Además, los estudios de desgaste o de corrosión pueden llegar a suponer un gran ahorro en los costes que puede tener la industria.

Para llevar a cabo la digitalización de estos ensayos, se ha decidido crear una página web en la que se han incorporado textos y videos explicativos de cada uno de los ensayos que conciernen a estas prácticas de laboratorio. Además, se realizará del mismo modo una prueba de autoevaluación con el fin de que el alumno compruebe el nivel de aprendizaje obtenido.



## 2.-Objetivos

El objetivo principal de este TFG es la creación de un Laboratorio Virtual de Ensayos Tecnológicos de corrosión y desgaste que sea de utilidad para los alumnos de Ciencia de Materiales e Ingeniería de Materiales que cursan Grados del ámbito de la Ingeniería.

En cuando a los objetivos específicos, se distinguen los siguientes:

- Preparación metalográfica de muestras metálicas para realizar los diferentes ensayos.
- Creación de material audiovisual de los ensayos de desgaste y corrosión.
- Elaboración de material didáctico (textos explicativos y pruebas de autoevaluación) que acompañe a los diferentes vídeos que se incorporarán a la plataforma.
- Aprendizaje y manejo de programas de edición de videos y creación de páginas web.

Todo ello se llevará a cabo para crear una página web que sea didáctica, entretenida, intuitiva y de fácil navegación, con la finalidad de que el alumno se encuentre motivado a la hora de explorar el material didáctico disponible.

### 3.-Justificación del proyecto

Con este TFG se ha diseñado un material docente de fácil acceso para el estudiante que le permita adquirir conocimientos y habilidades relevantes sobre los Ensayos Tecnológicos de corrosión y desgaste en materiales que se imparten en los laboratorios de las asignaturas de Ciencia de Materiales e Ingeniería de Materiales en el ámbito de la Ingeniería. Supone, por lo tanto, una herramienta novedosa que ayuda al aprendizaje del alumno a la vez que complementa las prácticas de laboratorio presenciales.

Además, gracias a la mayor importancia de las nuevas tecnologías como herramientas de aprendizaje es interesante la creación de este contenido que resultará más dinámico y atractivo fomentando la motivación de los alumnos por el aprendizaje autónomo.

Por último, el presente TFG tiene como justificación el cumplimiento de los requisitos académicos necesarios para obtener el Título de Ingeniero Mecánico. Dentro del plan de estudios, se establece la realización de éste como un requisito fundamental para la adquisición y demostración de conocimientos, habilidades y competencias obtenidas a lo largo del Grado en Ingeniería Mecánica.

## 4.- Fundamentos teóricos

### 4.1.-La importancia de la corrosión

La corrosión se define como una reacción química o electroquímica entre un metal o una aleación con el medio en el que se encuentra. Con ello el metal pasa de estar en su forma elemental a su forma iónica cediendo electrones a otro material metálico o no metálico como pueden ser el oxígeno o el azufre. De este modo, el metal a través de la corrosión forma óxidos, sulfuros o hidróxidos, que son las formas en que los metales se encuentran en la naturaleza, ya que son termodinámicamente más estables. Además, cuanto mayor sea la cantidad de energía utilizada en la obtención del metal a partir de un mineral, más fácil será que este retorne a su estado combinado, es decir, más favorecida estará la reacción de corrosión, ya que el metal quiere volver a su forma más estable. [1]

Los principales problemas de la corrosión son a nivel económico ya que supone unas pérdidas sustanciales. Estas pérdidas pueden ser directas si están relacionadas con los costes de reposición de estructuras, maquinaria o componentes, o indirectas, como son las pérdidas originadas por las interrupciones de fabricación para inspecciones, reparaciones, etc. por el sobredimensionamiento de los equipos, por la disminución del rendimiento por la formación de productos de la corrosión, por la rotura de tuberías, o por contaminación de material y/o equipamiento. Aproximadamente, estos gastos económicos pueden rondar el 3.5% del PIB de un país. [1]

Para hacer frente a los problemas originados por la corrosión es necesario conocer los mecanismos, formas y características de los diferentes métodos en los que se da. [1]

#### 4.1.1-Clasificación de la corrosión

##### 4.1.1.1-Según la morfología del ataque

Según la morfología del ataque, la corrosión se clasifica en: [1,2]

##### 4.1.1.1.1-Corrosión uniforme u homogénea

Es el proceso de corrosión más conocido y usual. El ataque se presenta de manera homogénea sobre toda la superficie y la penetración de este es aproximadamente constante en todos los puntos. [1-3]



Figura 1: Ejemplo de corrosión uniforme. [3]

La principal problemática de este tipo de corrosión es el adelgazamiento progresivo de la superficie que está siendo atacada, pudiendo reducir de esta manera la sección resistente de una pieza y provocando el fallo. [1-3]

Se puede medir mediante la velocidad de retroceso durante un periodo de tiempo (por ejemplo, acero al carbono desprotegido en un ambiente marino puede llegar a perder 1 mm de espesor), o mediante la pérdida de peso que sufre la superficie de la superficie (usualmente se mide en miligramos por centímetro cuadrado de superficie expuesta y día). [1-3]

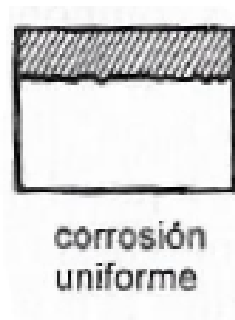


Figura 2: Esquema representativo de la corrosión uniforme. [1]

#### 4.1.1.1.2-Corrosión en placas o selectiva

Consiste en la disolución preferencial del componente más activo de una aleación. Se trata por lo tanto de un ataque no homogéneo, que se puede situar en un caso intermedio entre una corrosión uniforme y una corrosión por picaduras. Se ve agravado con el diferente comportamiento frente a la corrosión que pueden presentar las diferentes fases de una aleación, llegando en algunos casos al ataque selectivo sobre alguna de ellas permaneciendo las demás inalteradas. [1,2,4,5]



Figura 3: Ejemplo de corrosión selectiva. [5]



Figura 4: Imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido mostrando el ataque selectivo sobre la ferrita en un acero hipoeutectoide. [1]

Un ejemplo de este tipo de corrosión es la descincificación del latón (Figura 5), en el cual, el zinc de este se disuelve mientras que el cobre permanece en la aleación en forma de masa porosa, por lo que a la más mínima sollicitación mecánica el material falla. [1,2,4,5]



Figura 5: Descincificación del latón. [4]

La reacción que sucede la podemos ver en la Figura 6. Para explicar este proceso se proponen dos mecanismos: [1,2,4,5]

- Una disolución selectiva del zinc que deja el cobre como residuo poroso. [1,2,4,5]
- La disolución de los dos componentes, tanto el zinc como el cobre, y una posterior redeposición del cobre en una capa porosa. [1,2,4,5]

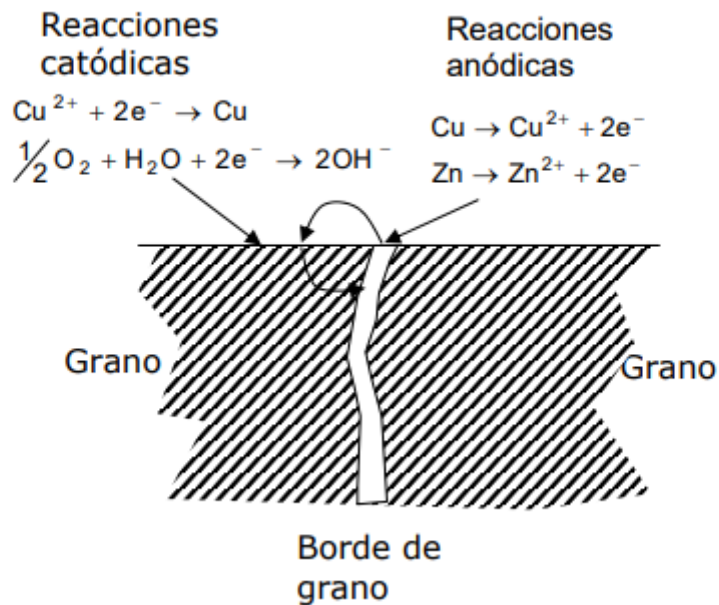


Figura 6: Reacciones producidas en la descincificación del latón. [4]

#### 4.1.1.1.3-Corrosión por picaduras

El ataque de la corrosión se centra en áreas muy reducidas respecto a la superficie total expuesta, pero por el contrario la profundidad de este es mucho mayor que en otros casos de corrosión como puede ser la uniforme. Este tipo de corrosión se ve favorecido por heterogeneidades, ya sean de la superficie del metal o del electrolito que se encuentra en contacto con este. [1,2]

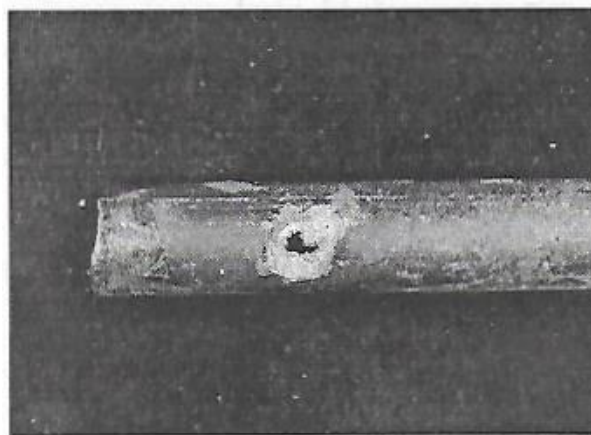


Figura 7: Picadura en tubería de acero galvanizado. [1]

Se ve favorecida por los siguientes factores:

- Factores macroscópicos: A este nivel, el principal causante de la corrosión por picaduras es la formación de pilas de aireación diferencial. En una zona que puede situarse un depósito sólido o un levantamiento de un recubrimiento, existe una región mal aireada que constituye el ánodo de la pila de corrosión, mientras que la región bien aireada sería el cátodo. Si la relación de áreas es favorable al cátodo nos encontraremos una velocidad de disolución elevada. [1,2]

También puede iniciarse la picadura por la disolución selectiva de una fase minoritaria del material metálico. Esto ocurre si, como consecuencia de la composición química, esta fase minoritaria presenta un comportamiento anódico respecto a la fase mayoritaria del material. [1,2]

- Factores microscópicos: Se observa el ataque por picadura normalmente en aleaciones de gran resistencia a la corrosión, sin apenas heterogeneidades (ni en ellas mismas ni en el electrolito que las rodea) y en soluciones cercanas al pH neutro y, en general, en zonas de estabilidad del diagrama de Pourbaix. [1,2]

Normalmente se produce en superficies homogéneas con presencia de aniones electrolíticos como con el Cl<sup>-</sup>, el F<sup>-</sup> o el I<sup>-</sup>. En estas condiciones se produce la rotura de la película pasiva por parte de los aniones, produciéndose una pila activa-pasiva en la que la zona sin película tiene un menor valor de potencial de reducción. Todo ello se ve favorecido por la relación de áreas, el área del cátodo es mucho mayor que la del ánodo, lo que explica las grandes velocidades de disolución. [1,2]

En general, el mecanismo de la corrosión por picadura consiste en una región desprovista de capa pasiva se convierte en el ánodo de una pila de corrosión, creándose de esta manera una cavidad a gran velocidad por la relación de áreas existente. Aunque se diesen las condiciones electroquímicas para la regeneración de la capa pasiva, dentro de la cavidad no es posible la regeneración de esta, por lo que la corrosión se prosigue hacia el interior. [1,2]

Cabe destacar que otros factores que afectan a la corrosión por picadura son:

- El tipo de anión electrolítico: Dependiendo del tipo de anión vemos como existen diferentes potenciales. En la Figura 8 se ve como ambientes con yodo son más agresivos que los que contienen bromo y estos más agresivos que los que contienen cloro. [1,2]

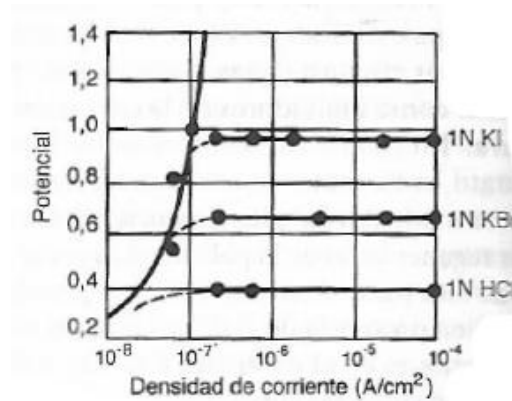


Figura 8: Cambio en el potencial de inicio de picaduras en circonio en contacto con soluciones acidas conteniendo distintos halogenuros. [1]

- La concentración del anión: En general el potencial disminuye al aumentar la concentración del anión. Como se ve en la Figura 9, con concentraciones del 10% el potencial es significativamente menor que con concentraciones del 0,1%. [1,2]

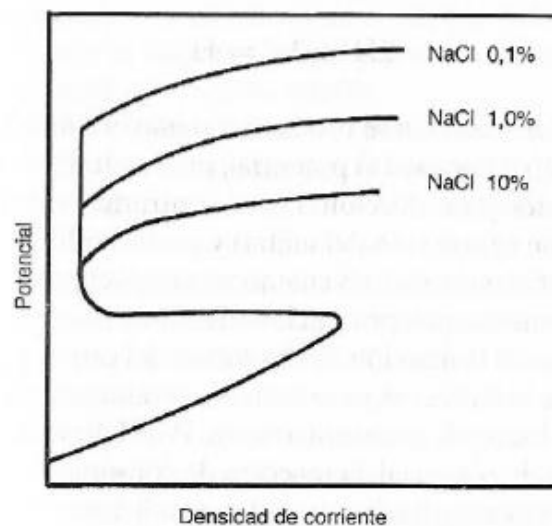


Figura 9: Cambio en el potencial de picadura del acero inoxidable austenítico al modificarse la concentración del anión agresivo. [1]

- La composición del material metálico: Como se ve en la Figura 10, la concentración y la naturaleza de los diferentes aleantes es determinante en el potencial de picadura. [1,2]



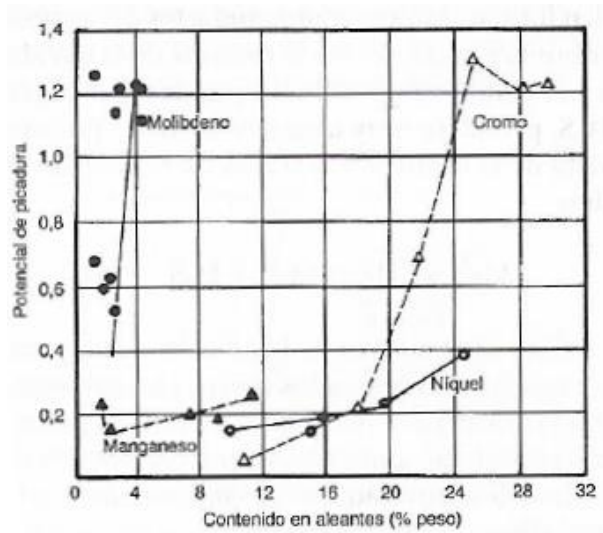


Figura 10: Variación del potencial de picadura del acero inoxidable austenítico en función de los aleantes presentes y de su contenido. [1]

- El pH, la temperatura y la geometría de la superficie: El pH del medio puede condicionar el nivel de acidificación de la entalla, la temperatura influye en la estabilidad de la capa pasiva y la presencia de irregularidades geométricas en la superficie puede propiciar el ataque del anión electrolítico. [1,2]

#### 4.1.1.1.4-Corrosión en resquicio

Aparece en rendijas o resquicios como pueden ser roscas, cordones de soldadura o grietas, y se da entre un metal y otro material ya sea metálico o no metálico. [1,2]

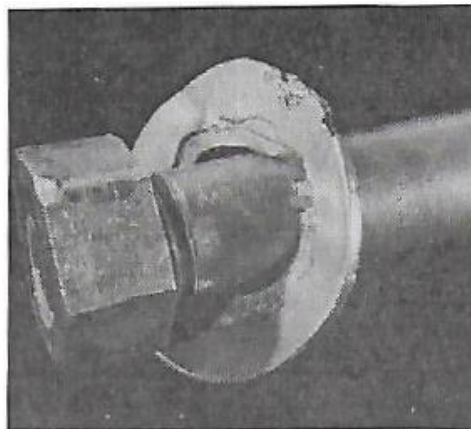
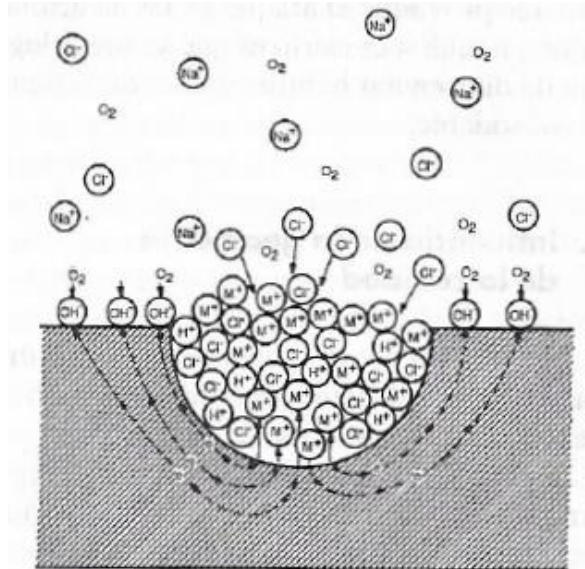


Figura 11: Corrosión en resquicio localizado en una arandela situada debajo de la cabeza de un tornillo de acero inoxidable austenítico. [1]

Los resquicios favorecen la aparición de concentraciones diferenciales de cloruros, lo que hace que en el interior de estos el oxígeno del ambiente se consuma mientras que en la zona exterior sigue existiendo. De este modo, se forma una celda electrolítica donde el potencial del resquicio es más activo. En la zona exterior dependiendo del potencial de corrosión puede formarse una capa pasiva estable o,

por el contrario, puede formarse una pila. En resumen, el comienzo de la corrosión pasiva se produce por la liberación de iones metálicos y electrones que viajan hasta el exterior del resquicio. Estos electrones con la suficiente cantidad de protones e iones cloruros (se ve favorecida por ambientes en los que estén presentes) rompen la capa pasiva que protegía al metal y comienza la corrosión. [1,2]



*Figura 12: Representación esquemática mostrando la concentración localizada de catión metálico, protones y anión cloruro en el interior del resquicio. [1]*

En la Figura 12 se puede ver un pequeño esquema de cómo se da este tipo de corrosión.

Generalmente, esta corrosión se ve acentuada por rendijas de menor tamaño, mientras que cuanto más profunda sea esta más protegida estará, ya que se encontrará en la zona de inmunidad del diagrama de Pourbaix. [1,2]

#### 4.1.1.1.5-Corrosión intergranular

Es aquella corrosión que se presenta como un ataque selectivo en los bordes de grano, especialmente en aceros que han sufrido algún tipo de tratamiento térmico entre los 450 y los 900°C situados en ambientes ácidos. [1,2,5,6]

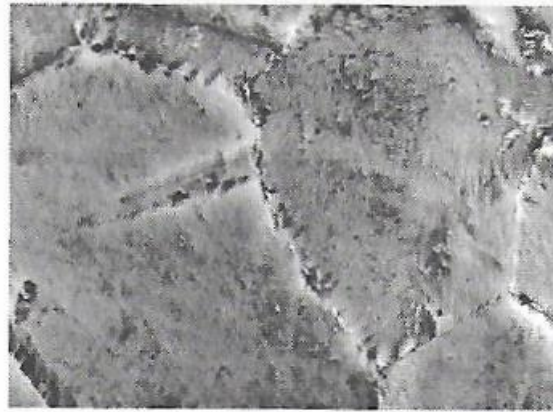


Figura 13: Carburos de cromo precipitados en el límite de grano de la austenita en acero inoxidable. [1]

Se debe principalmente a la precipitación en el borde de grano de carburos de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) mediante 3 mecanismos diferentes:

- Zona empobrecida en cromo: Durante el enfriamiento desde el estado líquido aparece una fase  $\gamma$  (austenita) a partir de la cual precipitan los carburos metálicos. Al ser el carburo de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) más estable con respecto a los carburos de hierro o de níquel, son estos los primeros en aparecer y precipitar en las zonas más activas como son los bordes de grano. [1,2,5,6]

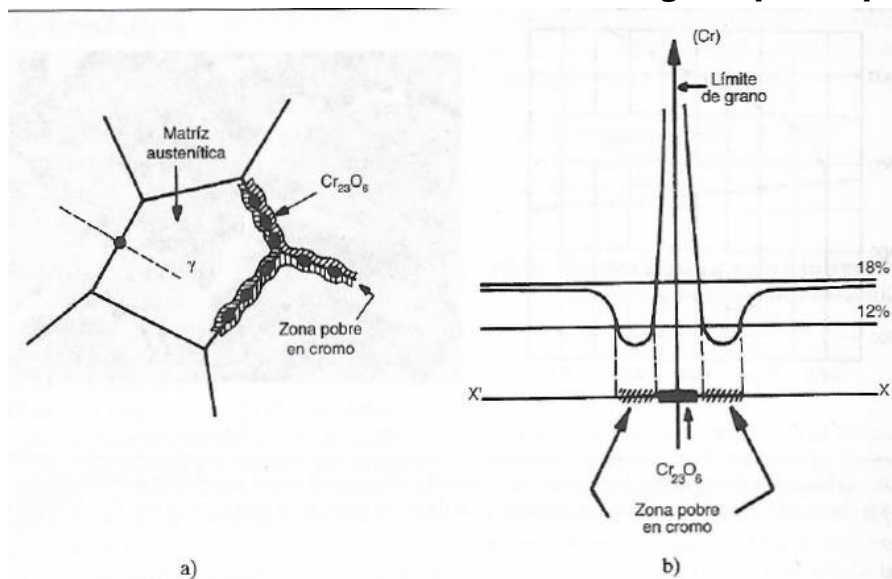


Figura 14: a) Representación esquemática de la precipitación de carburos en borde de grano. b) Perfil de concentración de cromo en la zona próxima al carburo. [1]

- Tensiones internas en la interfase: Da lugar al ataque en hoja de cuchillo. Se basa en la falta de acoplamiento atómico de la interfase que, según la orientación de los átomos, aparecen o no tensiones internas. La corrosión solo se dará en la zona tensionada por la distorsión de la red. [1,2,5,6]
- Efecto electroquímico: Se basa en que el potencial del  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  es menor al de la matriz austenítica en el que se encuentra insertado, por lo que la región del

límite de grano se comportaría como ánodo y sobre él se localizaría el ataque.  
[1,2,5,6]

Este tipo de corrosión se produce por la sobresaturación del carbono en la matriz austenítica. Además de esto, se ve favorecida por los siguientes factores:

- Una alta concentración de cromo, alrededor del 18%, lo que favorece la formación de los  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  anteriormente nombrados. [1,2,5,6]
- El nivel de sobresaturación en carbono, a mayor cantidad de este mayor es la posibilidad que el acero pueda verse visto en un proceso de corrosión intergranular. [1,2,5,6]
- Es importante también el tamaño de grano austenítico, a mayor tamaño de grano la separación entre varios límites de grano es mayor, lo que favorece la difusión hacia este y el crecimiento del  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . [1,2,5,6]
- El grado de acritud es significativo a la hora de hablar de la sensibilización del acero. Con deformaciones a bajas temperaturas (unos 500 o 600 °C) la difusión del cromo se ve favorecida y es, además, directamente proporcional al grado de carga al que lo sometamos, es decir, a mayor grado de carga, la difusión del cromo se verá más favorecida. [1,2,5,6]

Por el contrario, si esta deformación la realizamos a mayores temperaturas (unos 800 o 900°C) no se mejoran los mecanismos de crecimiento del  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . [1,2,5,6]

- La estequiometría del carburo también es un factor a tener en cuenta. Anteriormente se ha comentado que  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  es el carburo que se forma, pero además de este también se puede formar  $(\text{CrFe})_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  y  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , siendo estos menos habituales, ya que el  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  es el termodinámicamente más estable. A pesar de ello, es necesario tener todos los compuestos en cuenta ya que en determinadas situaciones la cinética de la formación de estos carburos más inestables se puede ver favorecida. [1,2,5,6]

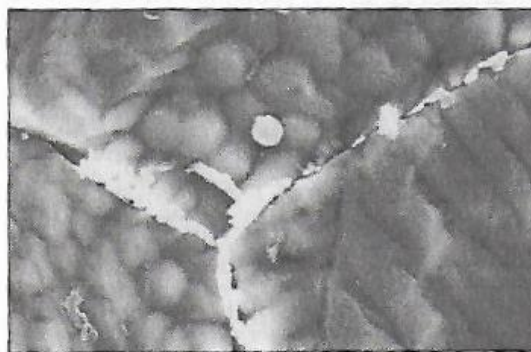
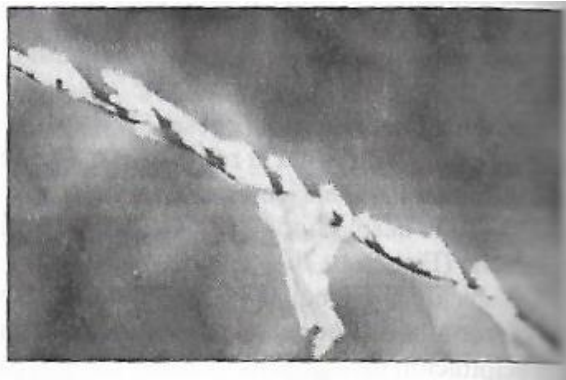


Figura 15: Imagen del borde de 3 granos con precipitación de carburos. [1]

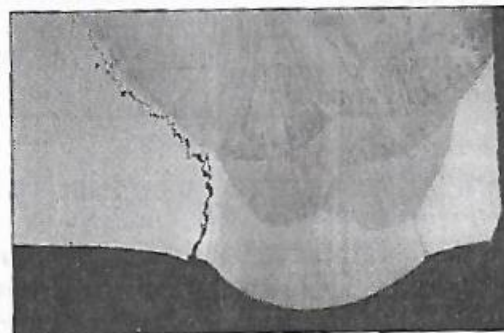


*Figura 16: Imagen del borde de grano con precipitación de carburos por calentamiento de acero inoxidable austenítico de grano grueso. [1]*

Frente a la corrosión intergranular existen métodos para poder reducir el riesgo a su aparición. En primer lugar, existen tratamientos térmicos de solubilización de carburos, como puede ser el calentamiento del material a unos  $1100^{\circ}\text{C}$  durante dos horas para después ser templada. Con ello se consigue que los carburos vuelvan a disolverse en la matriz metálica. Otra alternativa sería la utilización de aceros inoxidables con menores contenidos en carbono, alrededor de un 0.03%. [1,2,5,6]

#### 4.1.1.1.6-Corrosión bajo tensión

Se caracteriza por la aparición de grietas en dirección aproximadamente perpendicular a la carga a la que está sometida la pieza, por lo general de aleaciones. [1,2,5,6]



*Figura 17: Rotura intergranular en la proximidad de un cordón de soldadura de un acero inoxidable austenítico. [1]*

Para que se de este tipo de corrosión son necesarias unas tensiones aplicadas sobre el material (aplicadas o residuales del proceso de fabricación), un medio agresivo y un material susceptible a la corrosión. La rotura que se produzca podrá ser o bien intergranular o bien transgranular. [1,2,5,6]



*Figura 18: Rotura intergranular en acero al carbono provocada por corrosión bajo tensión. [1]*



*Figura 19: Rotura transgranular en bronce por corrosión bajo tensión. [1]*

El mecanismo por el que se produce la corrosión bajo tensión tiene dos grandes etapas, la incubación de la grieta y el desarrollo de esta. La incubación de la grieta consiste en la formación de una cavidad ya sea provocada por un efecto electroquímico o un efecto mecánico, habitualmente esta cavidad viene originada por una picadura. Como el material se encuentra sometido a una tensión este sufrirá una deformación causada por el movimiento de las dislocaciones. Estas dislocaciones producirán un escalón superficial del material, que en el caso de ser en un material metálico pasivable puede suceder que: [1,2,5,6]

- La capa pasiva al estar compuesta por óxidos plásticos se adapte y no se rompa. [1,2,5,6]

- La capa pasiva este compuesta de óxidos frágiles que se rompen al formar el escalón, pero al ser la cinética de formación de la capa pasiva rápida se permite la regeneración de esta. [1,2,5,6]
- La capa pasiva es frágil y además la cinética de la formación de esta es lenta. [1,2,5,6]
- No es posible la regeneración de la capa pasiva por el medio en el que se encuentra. [1,2,5,6]

En los dos últimos casos se formaría una pila activa-pasiva lo que generaría la cavidad por medio de un mecanismo electroquímico. Por otro lado, la cavidad puede venir determinada del acabado superficial de la superficie expuesta. [1,2,5,6]

En cuanto a la etapa de desarrollo de la grieta hay varias hipótesis de cómo se produce:

- Agrietamiento por mecanismo exclusivamente electroquímico: La velocidad de propagación de la grieta es significativamente alta (1mm/h) para este tipo de mecanismo. A pesar de ello, esta hipótesis sugiere que la tensión a la que está sometido el material se distribuye únicamente en la entalla. Por otro lado, la deformación produciría la rotura de las capas pasivas que, junto a que el material que se está deformando puede proporcionar corrientes anódicas, provocaría la existencia de una pila unas cien mil veces mayores los procesos sin deformación. Con ello se explican las grandes velocidades de propagación de la grieta. [1,2,5,6]
- Agrietamiento con participación conjunta de factores mecánicos y electroquímicos: Esta hipótesis plantea de nuevo que la concentración de la tensión se produce en la entalla que, aunque produce una fuerte concentración de esfuerzos, no permite explicar la rotura que se produce por debajo del límite tensional. Por otra parte, se ha comprobado que cuando se produce la rotura con corrosión bajo tensión, es una rotura frágil sin apenas deformación. [1,2,5,6]

Para explicar la fragilización de la entalla se dan dos situaciones, el medio es ácido o el medio es neutro o alcalino. Si el material trabaja en un medio ácido la reacción que se produce en la zona de la cavidad forma átomos de hidrógeno que al difundirse dentro del material produciría la llamada fragilización por hidrógeno. Mientras que, si el material trabaja en un medio neutro o alcalino, al darse superficies de aleaciones y no de metales puros habrá una serie de heterogeneidades que serán las causantes de la creación de pilas entre las distintas fases de este. [1,2,5,6]

- Mecanismo de movilidad superficial: Esta hipótesis establece que la corrosión bajo tensión se fundamenta en el movimiento de los átomos dentro del seno de los materiales metálicos gracias a la existencia de los defectos cristalinos conocidos como vacantes. Al estar sometido a una carga y gracias a la diferencia entre la concentración de vacantes y la concentración que habría en el equilibrio (Figura 20) son los principales impulsores del proceso de agrietamiento. La velocidad de propagación de la grieta será la velocidad con

la que los átomos difundan desde el interior de la grieta hasta otras posiciones o hasta su salida de la red por el proceso de corrosión. [1,2,5,6]

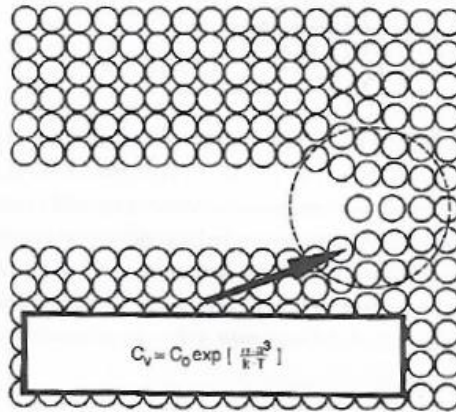


Figura 20: Representación de la matriz metálica en la que la concentración de vacantes es mayor de la que habría en el equilibrio. [1]

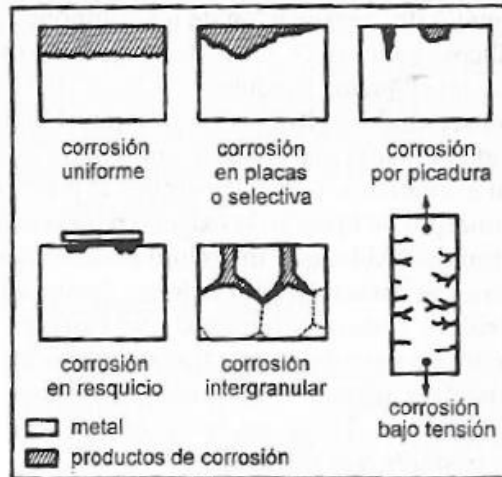


Figura 21: Representación esquemática de los distintos tipos de corrosión de acuerdo con la morfología del ataque. [1]

#### 4.1.1.2- Según el mecanismo de corrosión

Si atendemos al mecanismo de corrosión, puede ser:

##### 4.1.1.2.1-Corrosión electroquímica

Este mecanismo de corrosión se basa en la formación de pilas electroquímicas donde ocurren reacciones de oxidación-reducción en las que el metal se disuelve (se corroe) en las zonas anódicas, mientras que en las zonas catódicas se producen reacciones de reducción. [1,7,8]



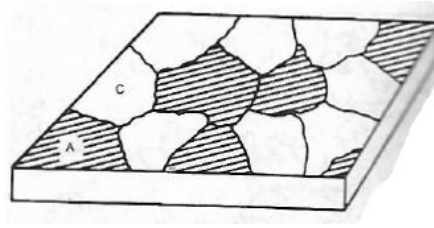


Figura 22: Representación esquemática de la superficie de un material metálico mostrando zonas con distinto potencial electroquímico (pilas de corrosión). [1]

Se da cuando dos metales se encuentran en contacto mediante un medio conductor (electrolito), ya sea agua, soluciones de sales, la atmósfera, etc., apareciendo una diferencia de potencial entre ellos. Gracias a la corriente que se genera debida a la diferencia de potenciales se produce un movimiento de aniones hacia el ánodo y de cationes hacia el cátodo. La zona anódica donde ocurren las reacciones de oxidación (zona del metal con más tendencia a la disolución) se corroe cediendo iones positivos al medio y manteniendo en su estructura electrones que viajan a través del material hasta la zona catódica (zona metálica con menor tendencia termodinámica a la disolución) y son cedidos al ambiente (dando lugar a reacciones catódicas), quedando esta zona inmune al ataque. El potencial de reducción (o de disolución) de cada metal indica quién es el ánodo y quién es el cátodo en cada caso, siendo el metal con el menor potencial el que actúa como ánodo. [1,7,8]

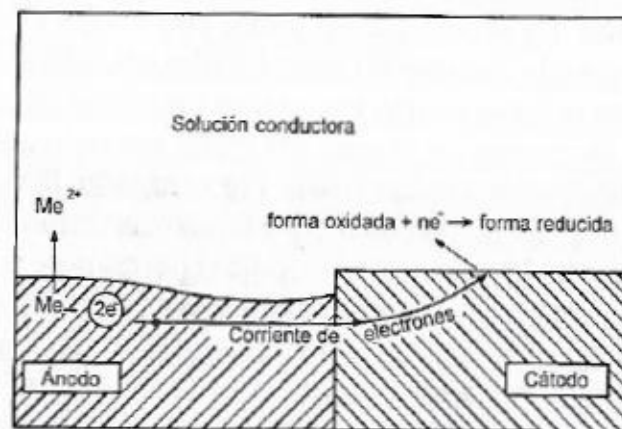


Figura 23: Representación esquemática del proceso de corrosión electroquímica para un metal divalente. [1]

Las reacciones que tienen lugar en la corrosión electroquímica dependen también del electrolito en cuestión. Así, en la Figura 24 a), con un electrolito de sulfato de cobre, se observa que el hierro se disuelve porque tiene un potencial de reducción menor que el cobre y la reacción de reducción es  $Cu^{2+}$  más  $2e^-$  para dar Cu. Sin embargo, cuando se cambia el electrolito de sulfato de cobre por agua (figura 24 b)), el hierro se corroe porque sigue siendo el ánodo, pero no hay exceso de iones  $Cu^{2+}$  en la disolución y las reacciones de reducción cambian. En este caso, la reacción

catódica será la reducción de oxígeno a  $\text{OH}^-$  (medio neutro o alcalino). Cuando el medio es ácido, la reacción sería la reducción de oxígeno a agua. Si el medio es ácido y no aireado (sin presencia de  $\text{O}_2$ ), se forma  $\text{H}_2$ . Por otro lado, no es necesaria la presencia de dos metales para que haya corrosión electroquímica, ya que las reacciones anódicas y catódicas pueden tener lugar en la superficie de un mismo metal (figura 24 c)). [1,7,8]

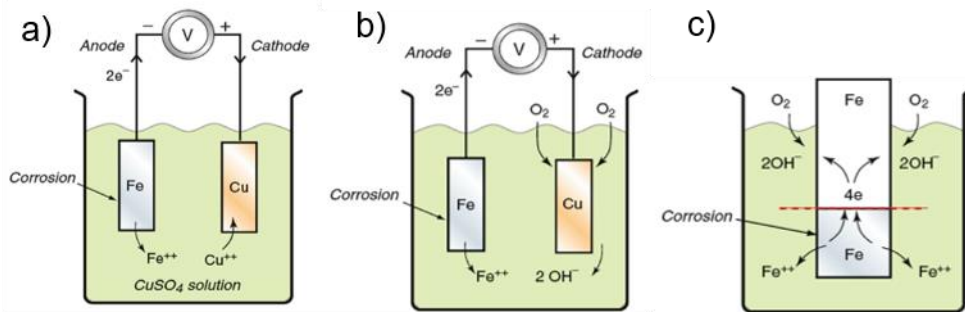


Figura 24: Representación de un proceso de corrosión electroquímica. [1]

#### 4.1.1.2.2- Corrosión directa o seca (oxidación)

Se da cuando el metal se encuentra a una alta temperatura en contacto con el aire y no aparece una película de humedad a su alrededor formándose una película superficial en forma de óxido. Los óxidos son la forma más estable en la que se encuentran la mayoría de los elementos en la naturaleza. El mecanismo fundamental de esta reacción química de corrosión es el de la Figura 25. [1,7,8]

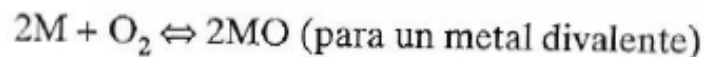


Figura 25: Reacción presente en la corrosión seca (oxidación). [1]

Suele presentarse el modo de corrosión homogéneo, ya que la oxidación se puede producir en cualquier punto de la superficie. Los productos que se generan son óxidos que si no se funden o volatilizan por la temperatura en la que se encuentran pueden generar un efecto de barrera protectora entre el metal y el medio. De esta manera, en ocasiones, para la protección de metales a grandes temperaturas, se busca este efecto en el que se busca una aleación capaz de generar estas capas de protección, buscando el menor contacto entre metal y medio de ataque. Los factores que influyen en este tipo de corrosión son la tendencia del metal a oxidarse y la velocidad de crecimiento de la capa de óxido una vez que se ha formado. [1,7,8]

En resumen, este mecanismo de corrosión se da en ausencia de un electrolito y en presencia de altas temperaturas atacando a toda la superficie de la pieza de forma uniforme. La circulación de electrones produce en la película de óxido metálico que puede funcionar de barrera protectora frente a las posteriores reacciones de corrosión. [1,7,8]

## 4.2.-El desgaste de los materiales

El desgaste está definido como la pérdida progresiva de las superficies deslizantes de varios materiales por la acción del rozamiento o la fricción que existe entre ellos. La tribología es la ciencia encargada de estudiar los fenómenos relacionados con la fricción, el desgaste que éste produce y la lubricación como medio para evitar el desgaste. El desgaste, al igual que la corrosión, tiene gran importancia debido a las pérdidas económicas que puede producir por lo que su estudio es de vital interés. Para ello, en este trabajo se expondrán algunos de los ensayos de mayor importancia como son el ensayo de desgaste seco y el ensayo de desgaste lubricado [9,10]

Con respecto a la fricción, se define como el efecto que proviene de la existencia de fuerzas tangenciales existentes entre dos superficies en contacto entre sí, es decir, es la resistencia al movimiento al deslizar o rodar estas dos superficies entre sí. Además de clasificar la fricción entre fricción externa (entre cuerpos diferentes) y fricción interna (entre partículas de un mismo cuerpo), se puede clasificar como rozamiento de deslizamiento y rozamiento de rodadura. A continuación, se describen ambos tipos de rozamiento. [9,10]

### 4.2.1-Rozamiento de deslizamiento

Se define en términos relativos de fuerza como el cociente entre la fuerza de fricción y la carga normal a la superficie de contacto, denominándose coeficiente de fricción ( $\mu$ ). Este parámetro no es únicamente intrínseco al material si no que depende de otros factores como la humedad, la velocidad, el acabado superficial, el área de contacto entre superficies, etc. [9,10]

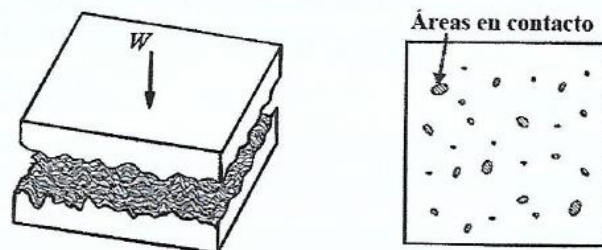


Figura 26: Esquema de dos superficies rugosas en contacto y sus áreas de contacto. [9]

Al intentar mover dos superficies una sobre otra, el valor de la fuerza tangencial que se contrapone a este movimiento es la fuerza de fricción. Cuando se inicia el movimiento es mayor y se denomina fuerza de fricción estática, y si el movimiento se mantiene, el valor de esta fuerza disminuye y se denomina fuerza de fricción dinámica. [9,10]

En general, este tipo de fricción sigue tres leyes cuando se da entre superficies sin lubricar: [10,17]

1. Primera ley: La resistencia que se produce es proporcional a la fuerza normal que el cuerpo ejerce sobre la superficie, es decir:

$$F = \mu * N$$

(siendo  $F$  la fuerza de rozamiento,  $\mu$  el coeficiente de fricción y  $N$  la fuerza normal entre superficies). [9,10]

2. Segunda ley: El coeficiente de rozamiento por deslizamiento no depende de la extensión de las superficies en contacto, sino que solo depende de la naturaleza de éstas, y de otros factores como pueden ser la humedad o la velocidad relativa entre ellas. [9,10]
3. Tercera ley: Una vez haya comenzado el movimiento, el coeficiente de rozamiento es menor al que existe en reposo y va disminuyendo con el aumento de la velocidad. [9,10]

Los principales mecanismos de interacción entre los picos y valles que presenta la rugosidad de las superficies de los materiales en contacto y por los que se da la fricción por deslizamiento son: [9,10]

1. Mecanismo de adhesión: Entre las puntas se generan altas presiones que producen microsoldaduras de forma que, al producirse un movimiento relativo entre las superficies, estas microsoldaduras son cortadas y fragmentadas sucesivamente. [9-11]

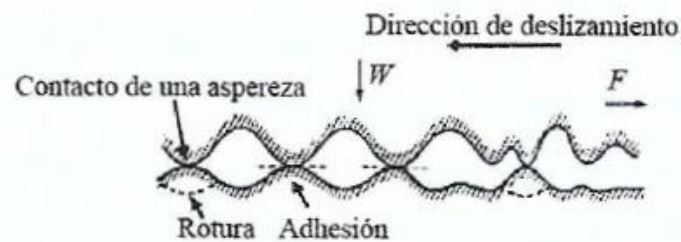


Figura 27: Esquema del mecanismo de fricción por adhesión. [9]

2. Mecanismo de deformación: La interacción entre las asperezas de las superficies en contacto hace que el material más duro realice unos surcos en el material más blando por medio de una deformación plástica. [9,10]



Figura 28: Esquema del mecanismo de fricción por deformación. [9]

En ambos mecanismos es necesaria una energía, tanto para romper las microsoldaduras como para producir una deformación plástica. Esta energía es suministrada por la energía cinética del cuerpo, haciendo que la velocidad de éste tienda a disminuir, o visto de otra manera, causando una aceleración menor. Éste es el motivo por el que aparece la fuerza de rozamiento. [9,10]

En general, para reducir la fricción es útil pulir las superficies en contacto, utilizar un lubricante o cambiar el rozamiento por deslizamiento por el de rodadura, que se describe a continuación. [9,10]

#### 4.2.2-Rozamiento de rodadura

Se produce cuando dos sólidos en contacto ruedan entre sí. En una situación ideal en la que ambos sólidos son indeformables, la rodadura no tendría rozamiento alguno, ya que el contacto sería puntual y la velocidad en este punto sería nula. [9,10]

Sin embargo, los sólidos son deformables, lo que provoca que el contacto tenga una pequeña extensión. Dado que la rueda está en movimiento y los puntos que están en contacto se hallan en reposo, se producen esfuerzos que disipan energía y que producen un rozamiento. [9,10]

Al igual que el rozamiento por deslizamiento, el rozamiento de rodadura se rige por unas leyes obtenidas gracias a las experiencias de Coulomb:

1. Primera ley: La fuerza con la que se vence la resistencia al rozamiento ( $F$ ) es proporcional a la reacción que ejerce la superficie sobre la rueda ( $R$ ), es decir: [9,10]

$$F = k * R$$

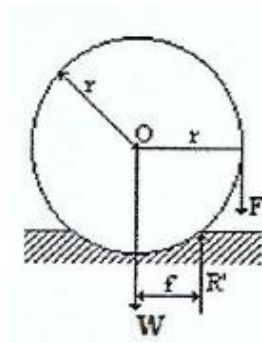


Figura 29: Esquema representativo de la fricción por rodadura. [9]

2. Segunda ley: La fuerza para vencer la resistencia al rozamiento ( $F$ ) varía con el valor de “ $f$ ” y, por lo tanto, de la deformación producida, siendo la magnitud “ $f$ ” el coeficiente de rozamiento de rodadura y sus valores son obtenidos gracias a las experiencias. [9,10]

Cabe destacar que, en el caso de que la fuerza aplicada en la rueda para vencer el rozamiento por rodadura sea mayor que la necesaria para vencer el rozamiento por deslizamiento, la rueda deslizará. Para que ésta ruede, es necesario que la fuerza aplicada sea mayor que la necesaria para vencer el rozamiento por rodadura, pero menor que la necesaria para vencer el rozamiento por deslizamiento. [9,10]

#### 4.2.3-Tipos de desgaste

La fricción es la responsable del desgaste que puede presentarse en 6 formas diferentes: [9,10]

##### 4.2.3.1-Desgaste adhesivo

Se producen soldaduras en frío por adhesiones químicas instantáneas entre los puntos de contacto de las superficies. Estas soldaduras tienden a frenar el movimiento que, en caso de continuar, rompe estos contactos, generando de esta manera fragmentos microscópicos que se transferirán de una superficie a otra y que, finalmente, podrán ser liberados en forma de virutas o de rebabas. [9-11]

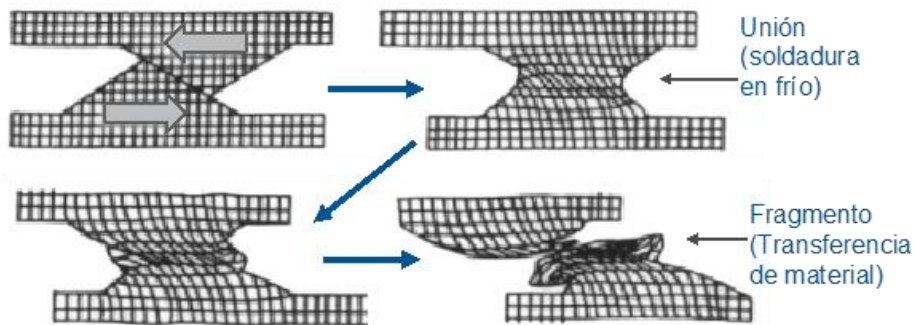


Figura 30: Desgaste adhesivo entre superficies. [11]

##### 4.2.3.2-Desgaste abrasivo

Es el resultado de la interacción mecánica entre las superficies en contacto. Puede ser producida por la penetración de las asperezas del material más duro en el más blando (abrasión de dos cuerpos), o bien, puede ser producida por partículas abrasivas situadas entre las dos superficies (abrasión por tercer cuerpo). El principal mecanismo de desgaste es la deformación plástica, ya que es la causante del rayado superficial y también la responsable de cierta eliminación del material. Las partículas existentes en la abrasión por tercer cuerpo pueden ser producto del mismo proceso de desgaste o haber sido introducidas voluntariamente para algún fin en concreto como puede ser un proceso de fabricación. [9,10]

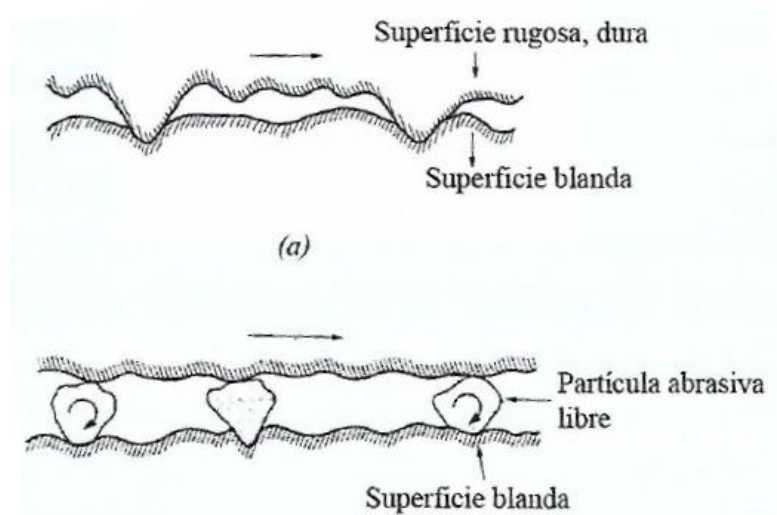


Figura 31: Representación de desgaste abrasivo de dos cuerpos (superior) y de tres cuerpos (inferior). [9]

#### 4.2.3.3-Desgaste por fatiga

Es debido a la fatiga superficial que se produce, que origina grietas en las superficies y que resultan en la rotura de la superficie afectada, formando grandes fragmentos y hoyos. [9,10]

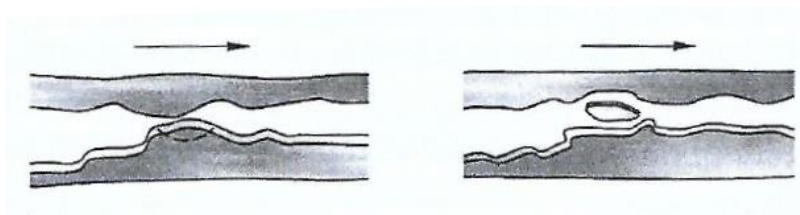


Figura 32: Representación del desgaste por fatiga de superficies en contacto. [9]

En este aspecto, se distinguen dos mecanismos capaces de producir la fatiga, por carga de contacto y por carga térmica. La fatiga por carga térmica es debida a los cambios de temperatura superficial, pasando de calor a frío de forma cíclica. Las contracciones y las dilataciones inducidas son las causantes de las grietas que se forman y las cuales avanzan ciclo a ciclo. La fatiga por carga de contacto se produce por la repetición de un proceso de carga y descarga sobre un área de la superficie. Las grietas van avanzando ciclo a ciclo hasta producir la rotura de la superficie. [9,10]

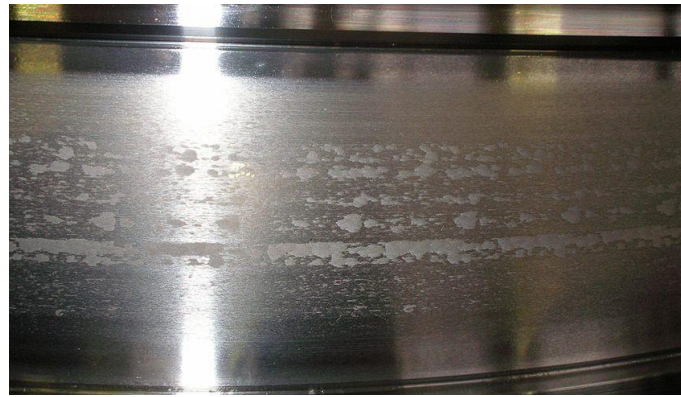


Figura 33: Imagen de desgaste por fatiga en un rodamiento de cilindros.[12]

#### 4.2.3.4-Desgaste químico

Se forma un óxido encima de la superficie y por la acción combinada de otro tipo de desgaste como fatiga o abrasión, éste es arrancado dejando otra vez el material base en contacto con el medio agresivo con lo que se repetirá el proceso de oxidación y desgaste. Se habla de desgaste corrosivo si el medio que produce el óxido es el aire a temperatura ambiente, mientras que el término desgaste oxidativo es el que se utiliza si el proceso ocurre a altas temperaturas. [9,10]



Figura 34: Rodamiento desgastado por corrosión. [10]

#### 4.2.3.5- Desgaste por frotación

Tiene lugar entre cuerpos que tienen movimientos de oscilación de baja amplitud (menor a 100  $\mu\text{m}$ ). Normalmente existe en sistemas ensamblados de maquinaria sujeta a vibraciones. La carga normal causa la adhesión entre asperezas y el movimiento causa la rotura, produciendo partículas libres que podrán actuar como abrasivo. Además, si la carga es cíclica podría aparecer fatiga superficial y si las superficies se encuentran en medios agresivos se pueden producir óxidos y causar también desgaste químico.

Por todo esto, el desgaste por frotación suele venir acompañado de otro tipo de desgaste. [9,10]



#### 4.2.3.6- Desgaste por impacto

Se incluyen en este tipo de desgaste la remoción del material debido al impacto de un líquido o corriente de partículas transportadas por un flujo. Se divide en dos subtipos de desgaste: [9,10]

- Desgaste por erosión por partículas: Producido por un chorro de partículas sólidas que impactan contra una superficie produciendo una deformación plástica o fractura frágil. Además, se distingue entre la erosión por partículas al azar y la erosión por desgaste percusivo, cuando se trata de impactos repetidos en un mismo punto. El desgaste percusivo ocurre por mecanismos de desgastes híbridos, combinando distintos tipos de desgaste como abrasión, químico o fatiga superficial. [9,10]

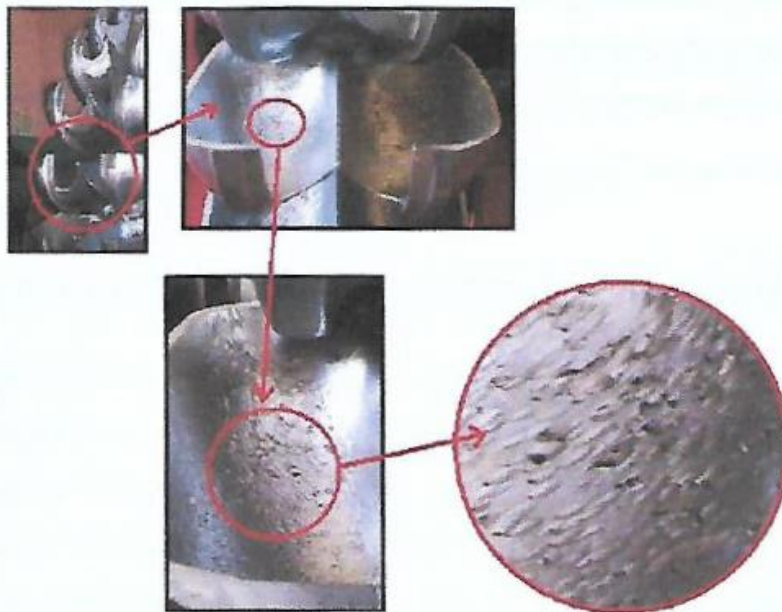


Figura 35: Desgaste por erosión de partículas en una turbina Pelton. [9]

- Desgaste por erosión por cavitación: En un fluido sometido a grandes velocidades se generan pequeñas cavidades de vacío que al colapsar producen elevadas presiones transitorias las cuales inducen un daño en la superficie en forma de deformación o de fractura. [9,10,13]



Figura 36: Desgaste por cavitación en la hélice de una turbina. [13]

#### 4.2.4-Lubricación de los materiales

Para poder disminuir este desgaste es necesaria la lubricación, cuyo propósito principal es la separación de las dos superficies con deslizamiento de tal manera que no se produzca ningún daño entre ellas. Para conseguir esto es necesaria la existencia de una película de lubricante de espesor suficiente que evite el contacto. [14,15]

En la mayoría de los casos esta lubricación se consigue gracias a un aceite mineral, aunque también puede ser con agua, aire o lubricantes sintéticos en condiciones más específicas. Para conseguir que la lubricación sea efectiva hay que tener en cuenta una serie de factores: [14,15]

- Determinar las condiciones y cargas de trabajo de las superficies en contacto. [14,15]
- Establecer condiciones de mantenimiento de esta lubricación. [14,15]
- Asegurar en los procesos de fabricación las tolerancias necesarias para un buen funcionamiento de la lubricación. [14,15]

##### 4.2.4.1-Tipos de lubricación

Teniendo en cuenta todo ello, existen, al menos, 4 tipos diferentes de lubricación: [14,15]

##### 4.2.4.1.1-Lubricación hidrodinámica

Se caracteriza por la existencia de una pequeña película fluida de lubricante que separa completamente las superficies opuestas de manera que ninguna aspereza de una de las superficies este en contacto con la otra. Este tipo de lubricación se rige, principalmente, por la viscosidad del fluido. Gracias al movimiento relativo, a la viscosidad del fluido y a que las superficies convergen, se genera una presión de empuje que separa las superficies y que es capaz de soportar la carga normal. Generalmente, la presión que se desarrolla no es superior a 5 MPa, lo cual no es suficiente como para causar una deformación elástica significativa en las superficies. [14,15]

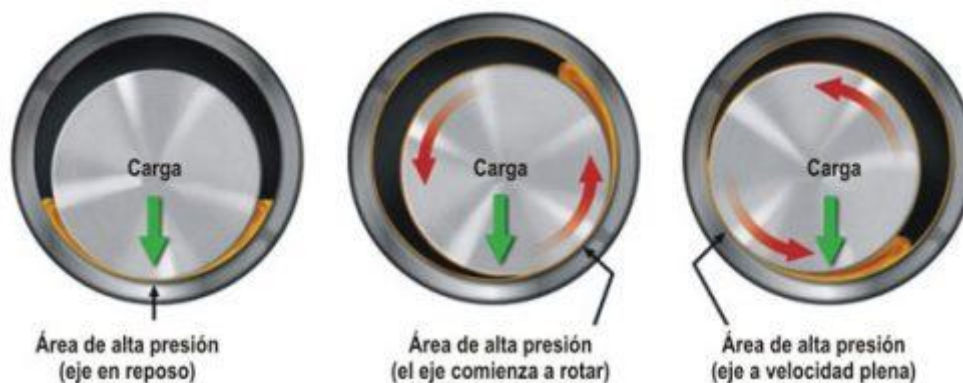


Figura 37: Representación del funcionamiento de la lubricación hidrodinámica.[14]

#### 4.2.4.1.2- Lubricación elastohidrodinámica (EHL)

En este caso se tiene en cuenta la deformación elástica de las superficies metálicas, que influye en la formación del espesor de película. Cuando la carga es elevada las rugosidades de las superficies trabajan siempre entrelazadas y nunca llegan a separarse por la existencia de un espesor mínimo de película de lubricante adherida a las rugosidades de las superficies, de lo contrario se generaría una interacción entre éstas produciendo desgaste y consumo de energía. Se trata de una lubricación permanente, es decir, las condiciones de lubricación en el momento de puesta en marcha y una vez que se alcanza la velocidad de operación son muy similares. El espesor de película suele ser de 1  $\mu\text{m}$  o inferior, mientras que en el caso anterior (hidrodinámica) suele estar alrededor de 5  $\mu\text{m}$  en adelante. [14,15]



Figura 38: Representación del funcionamiento de la lubricación elastohidrodinámica (EHL).[14]

#### 4.2.4.1.3- Lubricación mixta

Se encuentra entre la lubricación de películas límite y la lubricación hidrodinámica. En este caso, hay un porcentaje de crestas que interactúan entre sí mediante películas límite, mientras otras están totalmente separadas. [14,15]

El desgaste y el consumo de energía dependen tanto de las características de la película como de su resistencia a la cizalladura y estabilidad. Si las presiones entre los elementos son demasiado altas o las velocidades de operación son demasiado bajas, la película de lubricante se dispersa y no es capaz de separar las dos superficies, y es en estas condiciones cuando se produce este tipo de lubricación. El espesor promedio de la película tiene valores intermedios entre los 2 casos anteriores (lubricación hidrodinámica y lubricación elastohidrodinámica). [14,15]

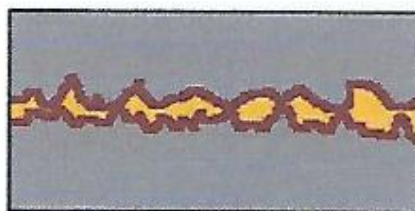


Figura 39: Lubricación mixta.[14]

#### 4.2.4.1.4- Lubricación marginal

Los sólidos no están separados por una capa de lubricante, sino que existe un contacto entre las rugosidades de ambas superficies. El mecanismo de lubricación se rige por las propiedades que presentan las películas de lubricante de proporciones moleculares, con espesores entre 1 y 10 nm, unas 1000 veces menor que en los casos anteriores. [14,15]



Figura 40: Lubricación marginal.[14]

### 4.3- Ensayos de corrosión

Una vez conocida la morfología y el mecanismo de corrosión que puede ocurrir sobre el material bajo estudio, se realizan una serie de ensayos tecnológicos de comportamiento en servicio frente a la corrosión consistentes en la simulación de ambientes o procesos corrosivos que pueden darse en procesos reales, con la finalidad de estudiar su comportamiento frente a la corrosión y poder sacar conclusiones de cómo evitar o minimizar los daños provocados por la corrosión, ya sea con pinturas, recubrimientos, inhibidores, protección catódica, protección anódica, etc.

En el presente trabajo se realizarán los siguientes ensayos de corrosión:

- Ensayo en cámara de niebla salina.
- Ensayo de oxidación.
- Ensayo de potencial a circuito abierto.
- Ensayo de polarización anódica.

#### 4.3.1- Ensayo de cámara de niebla salina (Normas ASTM B287 y B368)

El ensayo de cámara de niebla salina se trata de un ensayo de corrosión que normalmente consiste en la comparación de diferentes probetas sometidas a un medio agresivo. Las probetas suelen ser de diferentes formas y/o con diferentes recubrimientos buscando comparar comportamientos y resistencias a la corrosión. [16,17]



*Figura 41: Cámara de niebla salina.*

Este ensayo se puede hacer en tiempo real (Norma ASTM B287) o en tiempo acelerado (Norma ASTM B368), todo ello siempre de mutuo acuerdo con la empresa o persona interesada en el ensayo. [16,17]

Las probetas se introducen en la cámara de niebla salina colgadas en unos soportes mediante sedal y con precaución de que los productos de corrosión no caigan de unas piezas sobre las otras, ya que esto alteraría los resultados. Se someten durante un periodo de horas prefijado a una niebla al 5% en peso de sal común o ácido acético y se fijan parámetros como temperatura de la cámara o frecuencia de generación de niebla (puede ser continua o en intervalos). [16,17]

Como principales resultados, a parte de la inspección visual de las probetas en la que se pueden observar las zonas o recubrimientos más afectados, tenemos la comparativa en peso de éstas. Para ello, además de pesar las probetas antes y después del ensayo, la norma dice que se realizará la inspección visual y de pesada cada 24 horas para poder ver la evolución del ensayo. [16,17]

#### *4.3.2.1-Marco teórico*

Al someter las probetas a un medio agresivo durante un determinado tiempo se produce la formación de una pila electroquímica, generando una corriente eléctrica debida a la diferencia de potenciales entre distintas zonas de la probeta y favorecidas por la presencia de la niebla como medio agresivo. [1,7,16,17]

La zona anódica se corroe cediendo iones positivos al medio y electrones a la zona catódica. Estos electrones serán cedidos al ambiente desde la zona catódica, quedando ésta protegida del ataque. [1,7,16,17]

#### 4.3.2.2- Procedimiento de ensayo (según normas ASTM B287 y B368)

En primer lugar, hay que realizar la disolución que utilizaremos para crear la niebla salina dentro en el interior de la cámara (disolución al 5% en peso de NaCl). También se limpian cuidadosamente las probetas a ensayar, se pesan y se fotografían. [16,17]

La disolución se vierte en un depósito que la suministrará a la cámara de niebla salina. [16,17]



Figura 42: Depósito en el que se almacena la disolución salina.

Las probetas se fijan mediante sedal a los soportes que posee la cámara de niebla salina teniendo especial cuidado en no colocar unas probetas debajo de otras ya que, como se ha mencionado anteriormente, si los productos de corrosión caen encima de otras probetas pueden alterarse los resultados acelerando el proceso de corrosión en esas zonas. [16,17]



*Figura 43: Probeta de acero electrocincado colgada en un soporte dentro de la cámara de niebla salina antes de comenzar el ensayo.*

Una vez colocadas las probetas, se sella con agua el canal lateral donde apoya la tapa de la cámara de niebla salina cuando se cierra, se procede a bajar la tapa y se comprueba que hay una estanqueidad en todo el lateral que evite que la niebla salga durante el ensayo. [16,17]



*Figura 44: Vista superior de la cámara de niebla salina desde donde podemos ver el canal lateral, los soportes, los capilares y el difusor encargado de la generación de la niebla.*

A continuación, se enciende la cámara de niebla salina y se programa el ensayo mediante el panel de control introduciendo parámetros como la temperatura de la niebla y de la cámara o el pulverizado de niebla continuo o discontinuo (a intervalos). La niebla salina empieza a formarse gracias a dos capilares, uno con una corriente de aire saturado de humedad gracias al agua destilada que se suministra a la cámara y el otro con una corriente de la disolución de la sal. [16,17]



Figura 45: Panel de control de la cámara de niebla salina.

Una vez comenzado el ensayo, se vigilará que tanto los niveles de disolución como los de agua destilada y las temperaturas de la cámara y de la niebla se mantengan entre unos valores deseados. Cada 24 horas se tomarán las fotografías y pesos de las diferentes probetas. [16,17]

Al terminar el tiempo de ensayo, que ha sido previamente fijado entre la empresa que quiere realizar el ensayo y la persona encargada de realizarlo, se retiran las probetas y se realizan los últimos pesajes y fotografías. [16,17]

Finalmente, se vacían tanto los depósitos como el canal lateral del cierre y se limpiarán intentando dejar los menores restos de disolución posibles para preparar el próximo ensayo. [16,17]

#### 4.3.2.3-Obtención de resultados

Para la obtención de resultados es necesario un pesado previo de las probetas a la par de unas fotografías de éstas para poder compararlas posteriormente. [16,17]





*Figura 46: Ejemplo de pieza de acero electrocincado antes de ser ensayado en cámara de niebla salina.*

Según la norma cada 24 horas de ensayo, las probetas se extraen, se lavan y limpian para eliminar los posibles productos de corrosión depositados sobre la superficie de las piezas (cloruros, sales, etc.). Después, se pesan y fotografían y se posicionan de nuevo dentro de la cámara de niebla salina para poder comparar y trazar unas tendencias de comportamiento del material en el ensayo. [16,17]



*Figura 47: Probeta de acero electrocincado ensayada durante 40 horas en cámara de niebla salina.*

El peso obtenido irá disminuyendo conforme pase el tiempo de ensayo debido a la pérdida del recubrimiento por la oxidación del material base o, en materiales sin recubrimiento, por la oxidación del metal que se produce durante la corrosión. [16,17]



*Figura 48: Probeta de acero al carbono pintada y ensayada en cámara de niebla salina durante 40 horas.*

Al tratarse de un ensayo tecnológico, los resultados obtenidos sirven para comparar el comportamiento en servicio frente a la corrosión de diferentes piezas, normalmente con distintos recubrimientos o morfologías. También, sirven para observar si el proceso de corrosión ha sido uniforme en toda la pieza o se ha localizado en alguna zona específica, especialmente si la pieza tiene una geometría compleja. [16,17]



*Figura 49 Probeta de cobre ensayada durante 40 horas en cámara de niebla salina.*

#### 4.3.2- Ensayo de oxidación

En este ensayo se estudia el proceso de corrosión seca en los materiales metálicos. El ensayo consiste en someter a un material metálico a una elevada temperatura dentro de un horno con lo que se consigue una ganancia de peso de las probetas metálicas debido a la oxidación de éstas al reaccionar con el oxígeno del aire. [7]

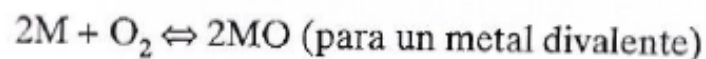


Figura 50: Horno para ensayo de oxidación.

En general, se introducen varias probetas previamente pesadas en un horno a elevada temperatura (ej.: 700-900 °C). Estas probetas se sacan del horno en unos periodos de tiempo preestablecidos, se pesan y se obtiene la recta que relaciona la ganancia de peso de las probetas ensayadas en función del tiempo que han estado en atmósfera oxidante a elevada temperatura. [7]

#### 4.3.2.1-Marco teórico

El ensayo de corrosión seca u oxidación se basa en la reacción de oxidación del metal, mostrada a continuación. En este ensayo, no existe la presencia de un electrolito debido a las altas temperaturas a las que se realiza. [7]



Suele presentarse una corrosión de manera homogénea ya que la oxidación se puede producir en cualquier punto de la superficie. Los productos que se generan son óxidos que si no funden o volatilizan debido a la elevada temperatura pueden generar un efecto de capa protectora disminuyendo la velocidad de corrosión del metal base. [7]

#### 4.3.2.2-Procedimiento de ensayo

En primer lugar, es necesario limpiar las probetas con etanol y después secarlas con aire caliente para posteriormente pesarlas antes del ensayo. [7]



Figura 51: Probeta a ensayar en etanol para ser limpiada.

Una vez pesadas todas las probetas, se introducen dentro del horno que previamente se ha precalentado a la temperatura a la que se realizará el ensayo (unos 700, 800 o 900 °C). [7]

Posteriormente, las probetas se van sacando una a una en los periodos preestablecidos. Por ejemplo, una a las 24 horas, otra a las 72 horas, a las 120 horas, a las 168 horas, etc. y se pesan y anotan los resultados. [7]



Figura 52: Probeta antes (a) y después (b) de ser ensayada.

#### 4.3.2.3-Obtención de resultados

Para la obtención de resultados, se representan los incrementos de peso de las diferentes probetas ensayadas en función del tiempo que han sido sometidas al ensayo, con lo que se obtiene una curva como la mostrada en la Figura 53 donde se observa el incremento de peso en la probeta en función del tiempo. [7]

	Peso inicial	Peso final	Incremento de peso	Tiempo de ensayo
Muestra 1	3,221	3,2966	0,0756	24
Muestra 2	2,6908	2,7967	0,1059	72
Muestra 3	4,5378	4,7153	0,1775	120
Muestra 4	9,1486	9,5355	0,3869	168

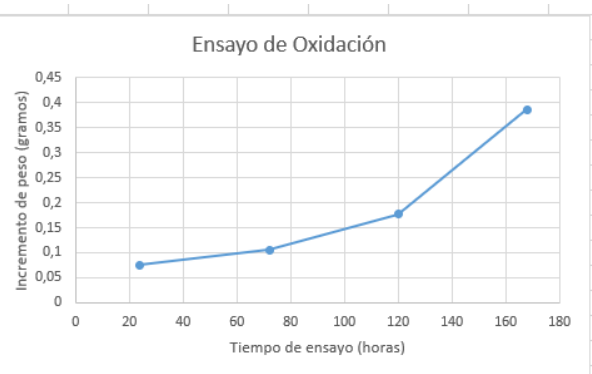


Figura 53: Resultados obtenidos del ensayo de corrosión.

### 4.3.3- Ensayo de potencial a circuito abierto (OCP)

#### 4.3.3.1-Marco teórico

El ensayo de potencial a circuito abierto (OCP, de sus siglas en inglés) consiste en introducir en un electrolito, como puede ser una disolución de una sal, el material del que queremos conocer el potencial a circuito abierto y el electrodo de referencia, todo ello conectado a un potencióstato que, sin imponer ninguna condición de voltaje o intensidad (porque es a circuito abierto), es el encargado de ir registrando los distintos valores potencial en función del tiempo de ensayo hasta llegar a un valor de potencial donde el sistema se encuentra en equilibrio. Este potencial define en última instancia su capacidad para oxidarse o reducirse, o lo que es lo mismo, la capacidad pasivante del metal. El potencial a circuito abierto obtenido depende del electrolito donde estemos realizando el ensayo. [7,18]

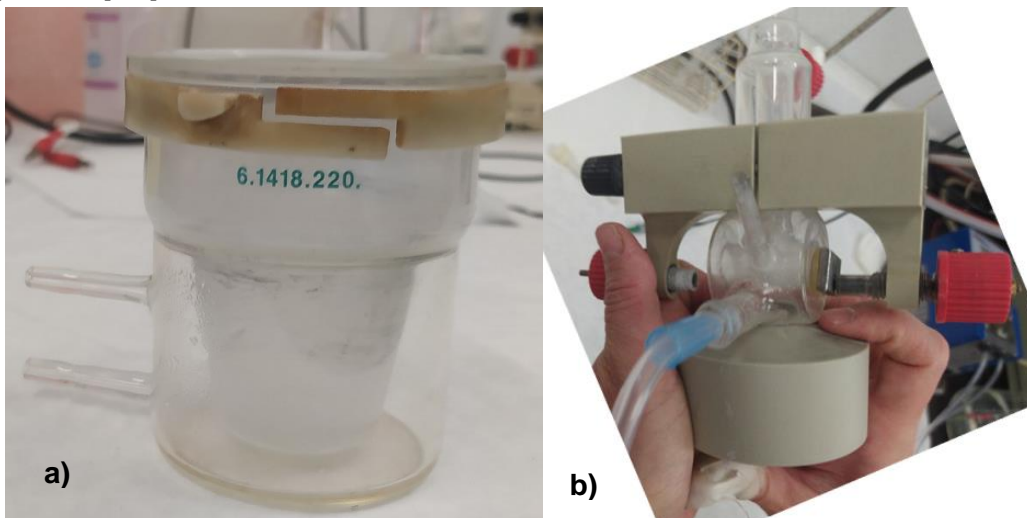


Figura 54: Potenciostato con el que se realizan los ensayos de potencial a circuito abierto y de polarización anódica.

En general, cuanto mayor sea este potencial para un metal en circuito abierto, tendrá un comportamiento más noble y, por lo tanto, tendrá una menor tendencia a experimentar corrosión. Cuando el potencial se estabiliza con el tiempo se dice que el metal tiene capacidad pasivante y ésta puede alcanzarse antes en un metal que en otro dependiendo del tiempo que tarde en estabilizarse el potencial.

Si hay dos metales conectados eléctricamente, el material con el potencial más bajo se convierte en el ánodo, mientras que el material con el potencial más alto se convierte en el cátodo (es más noble). Es decir, termodinámicamente la reacción de oxidación más favorable (espontánea) se da para el metal que tiene menor potencial de oxidación. La diferencia de potencial que existe entre ambos da lugar a un flujo de corriente de los electrones que se mueven del metal con potencial más bajo hacia el metal con el potencial más alto. El concepto de potencial a circuito abierto es importante en el estudio de la corrosión porque ayuda a predecir cómo los materiales metálicos participarán en las reacciones de corrosión electroquímica en un medio determinado. [7,18]

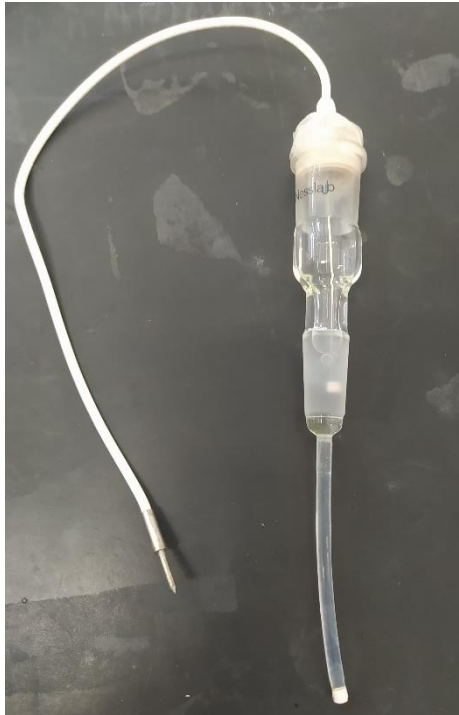
Para la realización del ensayo se utilizan celdas electroquímicas convencionales o también se pueden utilizar miniceldas que requieren de volúmenes de electrolito pequeños. [18]



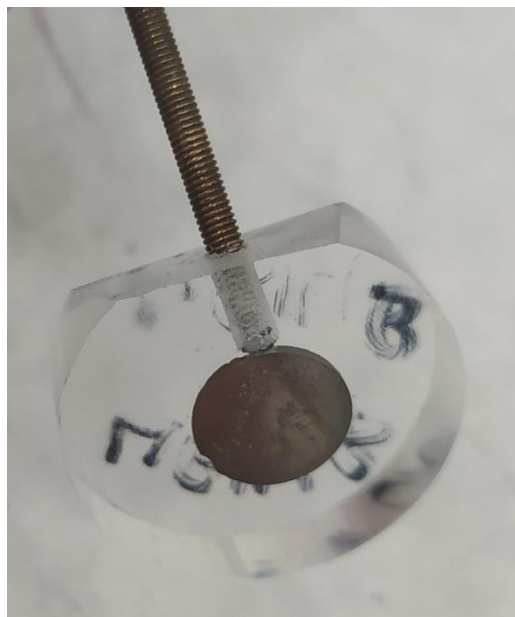
*Figura 55: Diferencia entre una celda (a) y una minicelda (b)*

#### *4.3.3.2- Procedimiento de ensayo*

Se introduce en la celda de ensayo el electrolito, el electrodo de referencia y la probeta a ensayar, que previamente habrá sido desbastada y pulida. Para que la muestra esté en contacto con el circuito se procede a taladrar la probeta haciendo un orificio estrecho que conecta con el metal, se introduce una varilla metálica y se pinza al circuito. [18]



*Figura 56: Electrodo de referencia de Ag|AgCl.*



*Figura 57: Probeta preparada para ser ensayada.*

Se conectan al potencióstato tanto el electrodo de referencia como la probeta a ensayar y dentro del software de ensayo se eligen: el tipo de ensayo a realizar (en este caso potencial a circuito abierto) y parámetros de ensayo como la duración de éste o el intervalo de adquisición de datos. [18]

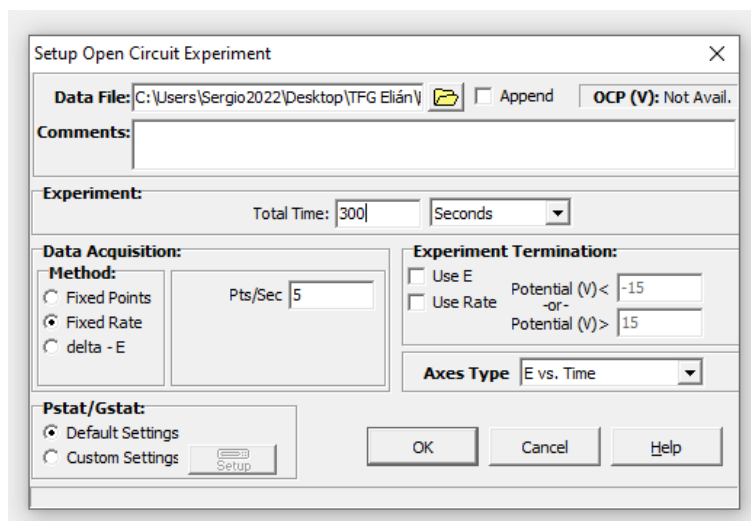


Figura 58: Interfaz de usuario para la realización del ensayo de potencial a circuito abierto.

Una vez comprobado que las conexiones son correctas se inicia el ensayo que llegará hasta completar el tiempo previamente estipulado, momento en el cual el potencióstato deja de tomar datos. [18]

Cabe destacar que, gracias a las celdas con camisa, se pueden realizar ensayos termostatados a una temperatura específica. Para ello, es necesario disponer de un sistema de calentamiento con un sistema de impulsión (bomba peristáltica), normalmente agua destilada, que servirá para mantener el electrolito del ensayo a la temperatura deseada. [18]



Figura 59: Placa calefactora para ensayos termostatados.





Figura 60: Bomba peristáltica para ensayos termostatados.

#### 4.3.3.3-Obtención de resultados

Gracias al software de ensayo y al potencióstato, podemos obtener las gráficas de la figura 61 en las que podemos observar el potencial en función del tiempo, llegando a un punto de equilibrio en el que el potencial se estabiliza, siendo éste el potencial a circuito abierto del material en el electrolito donde se ha realizado el ensayo. [18]

En la siguiente figura 61, se puede observar que el material al que corresponde la gráfica negra será el más noble mientras que el rojo es el material más susceptible de corroerse en el medio de ensayo utilizado. [18]

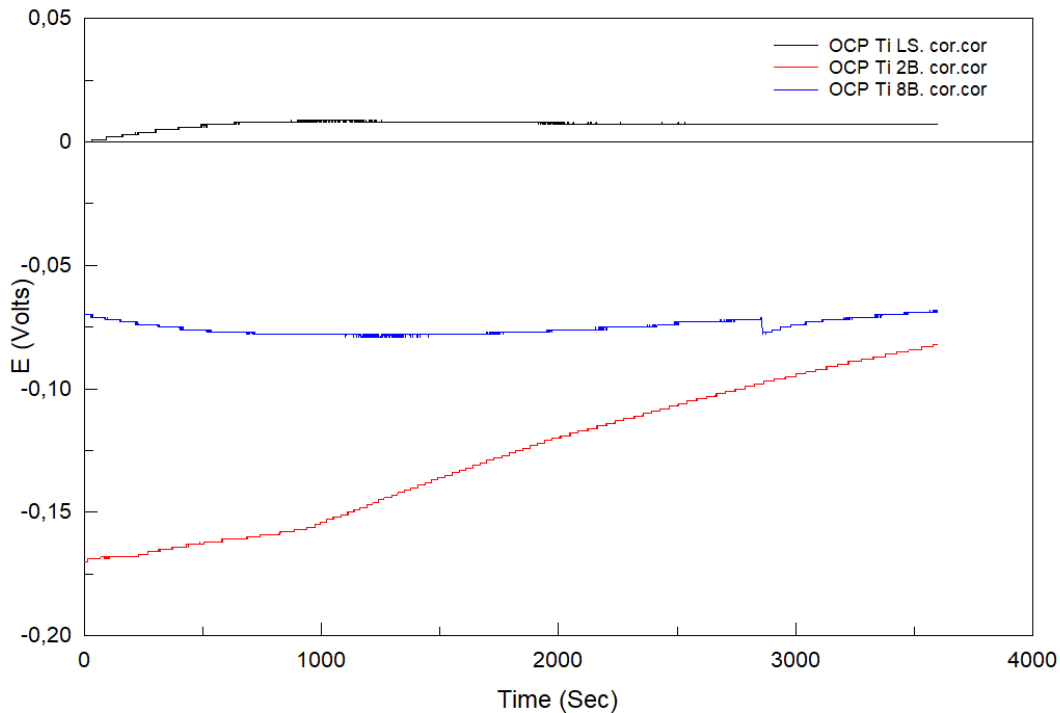


Figura 61: Ensayos de potencial a circuito abierto realizados a diferentes materiales en un medio salino.

#### 4.3.4- Ensayo de polarización anódica (Norma ASTM G5)

##### 4.3.4.1-Marco teórico

En el ensayo de polarización anódica (PA) se hace que el metal a estudiar se comporte primero como cátodo y después como ánodo, obteniéndose dos curvas de polarización, una catódica y otra anódica, respectivamente. Lo que se estudia con este ensayo es el comportamiento del metal frente a la corrosión desde el punto de vista cinético, es decir, cómo es su velocidad de corrosión. Para realizar este ensayo se realiza previamente un ensayo de potencial a circuito abierto para asegurar que el potencial del metal se encuentra en equilibrio en el electrolito. Durante el ensayo se registran los valores de densidad de corriente (o intensidad de corriente) frente a un barrido de potenciales obteniéndose los conocidos diagramas de Evans y, posteriormente, con las rectas de Tafel, haciendo el ajuste correspondiente, se obtiene el potencial y la intensidad de corrosión del material frente al electrolito de ensayo. Además, estos ensayos nos permiten ver cómo se comporta el material en el electrolito, si se corroe (es activo, se disuelve), si se pasiva (hay una disminución drástica de la intensidad de corriente que se registra y luego se mantiene constante) y si hay transpasivación (se rompe la capa pasiva y el metal vuelve a ser activo y corroerse). [7,18]

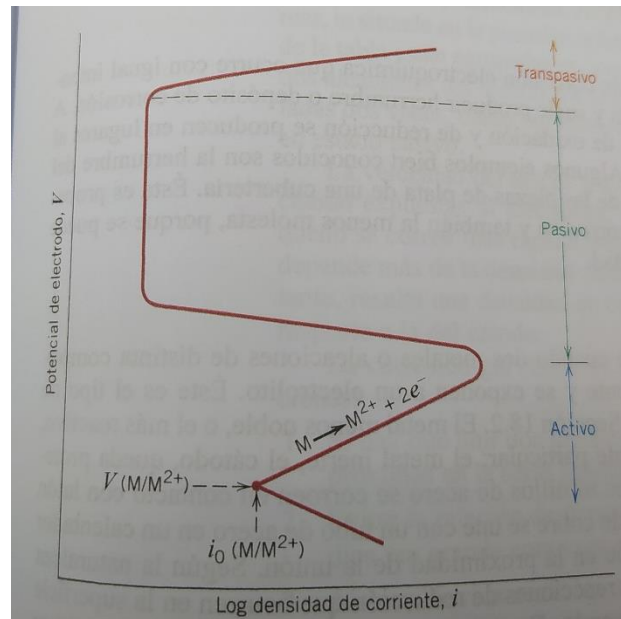


Figura 62: Ejemplo de diagrama de Evans. [6]

En este ensayo sí es necesario cerrar el circuito eléctrico porque se mide la densidad de corriente que circula entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, por lo que además del electrodo de referencia y de la probeta de ensayo, se necesita también un contraelectrodo que puede ser de grafito o platino (materiales muy nobles). [7,18]



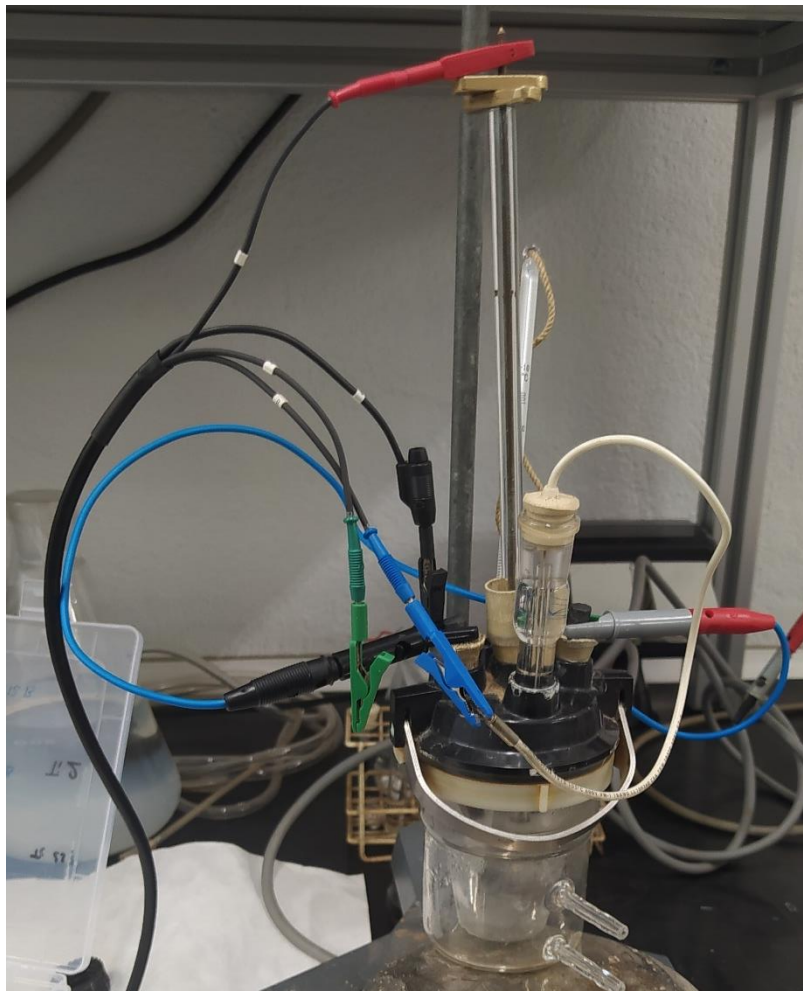
Figura 63: Contraelectrodos. Barra de grafito y placa de platino.

En resumen, la finalidad de este ensayo es conocer las intensidades y los potenciales de corrosión de diferentes materiales para determinar la velocidad de corrosión y también conocer la capacidad pasivante de éstos. [7,18]

#### 4.3.4.2- Procedimiento de ensayo (según norma ASTM G5)

El procedimiento de ensayo es similar al del ensayo de potencial a circuito abierto.

Tras la preparación de la probeta a ensayar se introducen en el electrolito el electrodo de referencia, el contraelectrodo y la probeta, dispuestos en una celda electroquímica. Se conectan al potenciostato y se inicia el software de ensayo. [18]



*Figura 64: Celda electroquímica convencional realizando ensayo de polarización anódica.*

Dentro del software, se introducen los parámetros de ensayo que son el barrido de potenciales y la velocidad de barrido. Generalmente, se inicia el barrido de potenciales a partir del potencial a circuito abierto obtenido en el ensayo de OCP, previamente realizado. [18]

Figura 65: Interfaz de usuario para la realización del ensayo de polarización anódica.

Al terminar la consigna de potencial final se termina el ensayo y gracias al software se obtiene la representación del potencial frente a la intensidad; es decir, se obtiene el correspondiente diagrama de Evans del material ensayado en el electrolito donde se ensayó. [18]

Cabe destacar que, al igual que en el ensayo de potencial a circuito abierto, se puede realizar el ensayo en una celda convencional o en una minicelda, además de que puede ser un ensayo termostatado. [18]

#### 4.3.4.3-Obtención de resultados

Gracias al software de ensayo y al potencioestado, podemos obtener el diagrama de Evans de la probeta ensayada. Un ejemplo es la Figura 66 donde podemos observar diferentes diagramas de Evans de diferentes probetas ensayadas. [18]

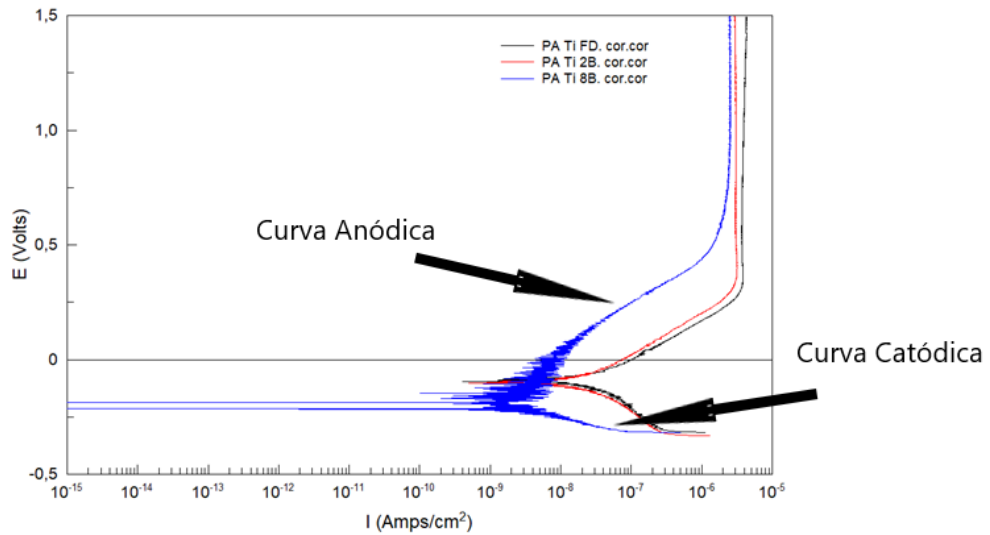


Figura 66: Diferentes diagramas de Evans obtenidos de probetas con diferentes recubrimientos.

Además, con la aproximación y rectas de Tafel podemos obtener el punto de equilibrio conociendo la intensidad y el potencial de corrosión de la probeta. [18]

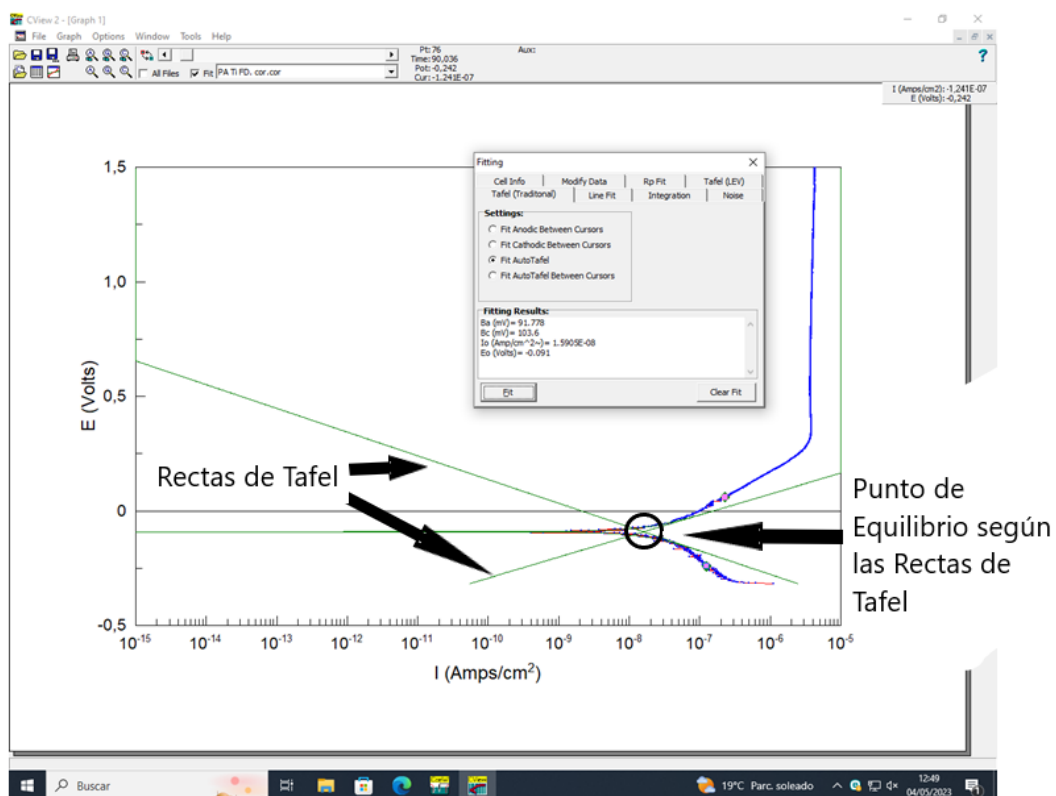


Figura 67: Punto de equilibrio obtenido gracias a la aproximación de Tafel.

#### 4.4.-Ensayos de desgaste

Como se ha comentado anteriormente, es de vital importancia caracterizar el desgaste de materiales para después poder seleccionar el más apropiado junto a la lubricación más adecuada (en el caso de existir) para la aplicación necesaria dentro de la industria. [19]

Por ello, en el presente trabajo, se describirán los principales ensayos tribológicos “pin-on-disk” y “ball-on-flat” que se realizarán con la máquina de ensayos “MicroTest Tribómetro” mostrada en las Figuras 68 y 69. [19]

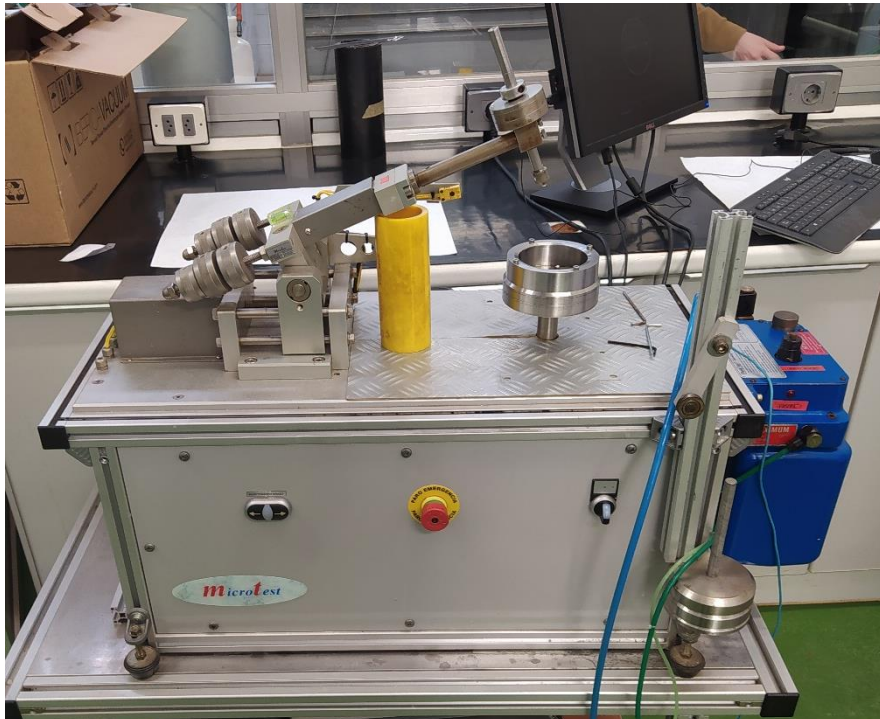


Figura 68: Vista lateral de la máquina de ensayos "MicroTest Tribómetro".

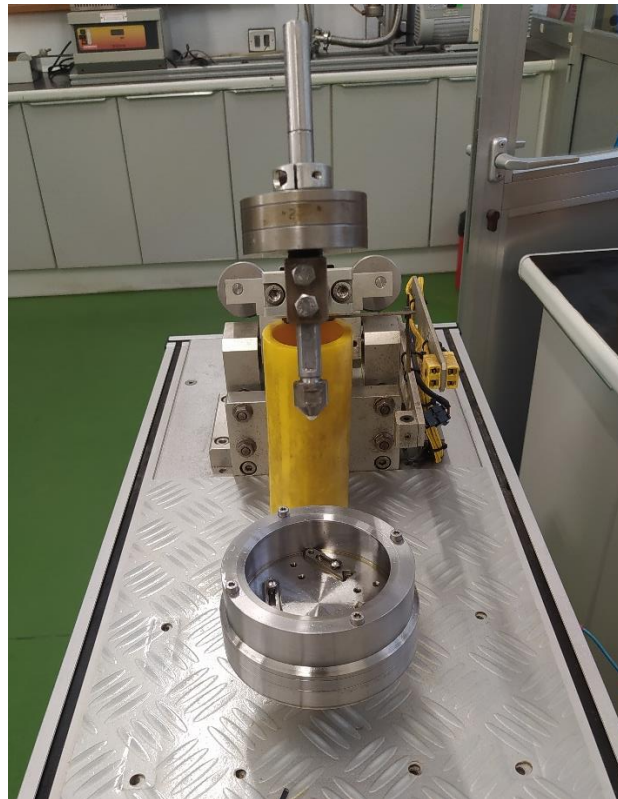


Figura 69: Vista frontal de la máquina de ensayos "MicroTest Tribómetro".

El funcionamiento principal del mismo consiste en una mesa o plato en la que se colocará la probeta a ensayar y que presenta un movimiento longitudinal o rotacional (en función del tipo de ensayo), controlada por un software en el que se fijarán parámetros como la velocidad de rotación o traslación, radio y longitud de la huella que aparecerá, etc. La otra parte fundamental de la máquina de ensayos es un "pin" o bola, que es la encargada de realizar la fuerza puntual sobre la probeta a ensayar gracias al peso que se coloca en el brazo que sujeta al "pin". La fuerza aplicada sobre la probeta es una fuerza normal y el tribómetro registra la fuerza tangencial que se produce en la superficie de la probeta durante el ensayo y calcula el coeficiente de rozamiento. [19]

Todo ello se puede acompañar de otros accesorios como pueden ser un sistema de lubricación para realizar ensayos de desgaste lubricado o los elementos necesarios para poder crear una celda electroquímica y poder realizar ensayos de tribocorrosión. [19]

Los resultados y el control del ensayo se realizan desde el mismo software con el que se parametriza el ensayo. En él podremos ver gráficas de penetración de la bola en el material a ensayar y de coeficiente de rozamiento en función de la distancia recorrida, también se puede controlar la temperatura a la que se encuentra nuestra probeta si disponemos de un termopar y podremos visualizar los datos de fuerza de rozamiento que existe y el tiempo o la distancia de ensayo. [19]



#### 4.4.1- Representación e interpretación de los ensayos de desgaste

Los resultados obtenidos en un ensayo de desgaste, existiendo o no lubricación, son los que se representan en una curva de desgaste que representa la masa desgastada ( $M_d$ ) en función de la distancia de deslizamiento tal y como se muestra en la figura 70. Hay que destacar que la pendiente será más o menos acusada dependiendo de si hay o no lubricación, siendo menor en el caso de que haya lubricación porque hay menor desgaste. [9,19]

En primer lugar, en el tramo OA, se observa el desgaste inicial o rodaje, que corresponde al acoplamiento entre superficies dominado por altos valores de coeficientes de rozamiento, que da lugar a un gran desgaste de las superficies. En segundo lugar, entre A y E se observa el desgaste lineal o estabilizado, dominado por el coeficiente de rozamiento dinámico o abrasivo. En este tramo el desgaste es más controlado y lineal con la distancia. Por último, a partir del punto E, el desgaste provoca la rotura de la superficie haciendo que la masa desgastada se dispare. [9,19]

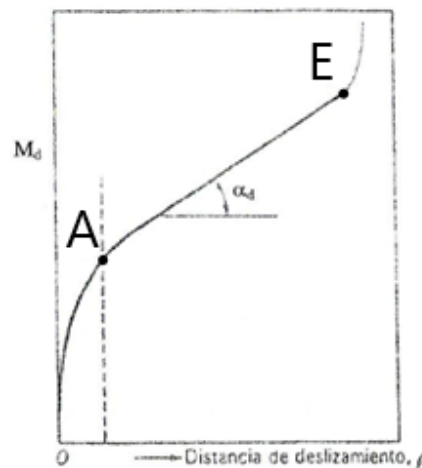


Figura 70: Curva de desgaste en función de la distancia de deslizamiento. [9]

Además de esta curva de desgaste hay otros parámetros de interés que podemos obtener de los ensayos de desgaste como son el coeficiente de rozamiento o el tamaño de la huella mediante la penetración que se produjo durante el ensayo, todo ello en función de la distancia de deslizamiento. [9,19]

#### 4.4.2- Ensayo de desgaste circular seco (Norma ASTM G99)

El ensayo de desgaste circular seco es un tipo de ensayo de desgaste perteneciente a los ensayos "pin-on-disk" que vienen regidos por la norma ASTM G99. Esta norma describe el procedimiento necesario para la determinación del desgaste de diferentes materiales durante el deslizamiento con una trayectoria circular de un "pin" o bola sobre la superficie de la probeta a ensayar.[20]

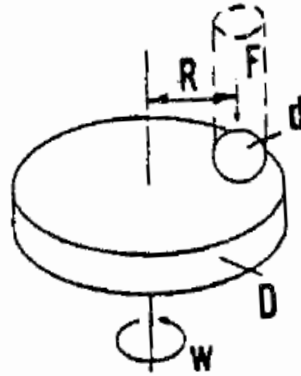


Figura 71: Representación ensayo Pin-on-disk. [20]

#### 4.4.2.1-Marco teórico

El método de ensayo consiste en un “pin” o bola colocada lo más perpendicular posible a la probeta a ensayar. En un principio, el brazo que contiene la bola y el brazo del disco rotativo, donde se encuentra bien anclada la probeta a ensayar, se encuentran alineados. Gracias al tribómetro se consigue que la bola se coloque a una distancia deseada, que será el radio de la huella, simplemente accionando el brazo con la bola y moviéndolo de su posición inicial. Durante el ensayo, el disco rotativo será el encargado de girar, mientras que la bola se mantiene fija sobre la probeta, con lo que al final del ensayo la probeta presentará una huella circular. [20] Tanto el material de la bola puede variar de materiales entre los que cabe destacar bolas de alúmina y bolas de acero, y también puede variar el diámetro de ésta (normalmente se utilizan diámetros de 3 o 6 mm). [20]

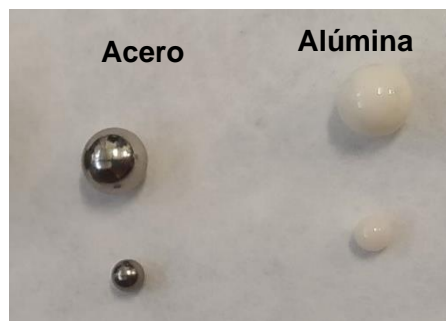
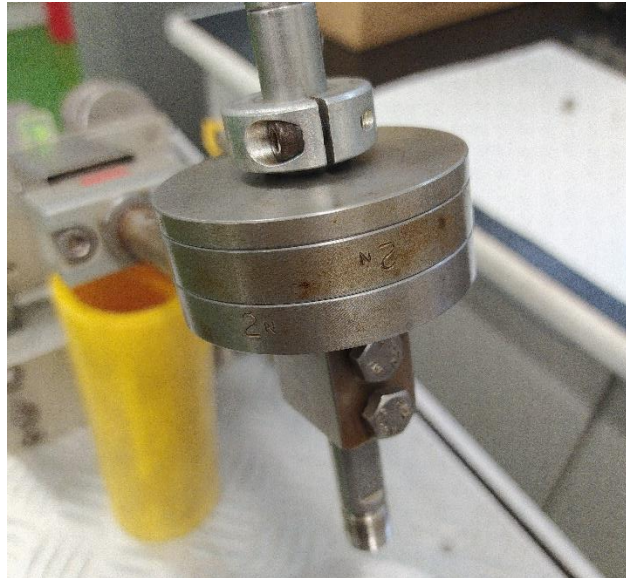


Figura 72: Bolas o pines de diferentes diámetros (3 y 6 mm) y diferentes materiales (acero y alúmina).

La presión que existe entre la bola y la probeta se consigue gracias a unos pesos situados encima del porta-pines, los cuales variarán dependiendo de la dureza de los materiales de la bola y de la probeta. [20]



*Figura 73: Pesos colocados en el porta-pines.*

La duración del ensayo depende de la distancia de deslizamiento y de la velocidad de rotación, ambas prefijadas. [20]

Al final del ensayo se obtiene una huella de desgaste en la probeta a ensayar que nos servirá para caracterizar el desgaste de la misma gracias al peso o al volumen perdido. Además, gracias al software del sistema se podrá determinar el coeficiente de rozamiento del material en las condiciones de ensayo, además de la penetración del pin sobre la probeta durante el ensayo. Cabe destacar que la bola también sufrirá desgaste durante el ensayo. [20]



*Figura 74: Bola de alúmina desgastada.*

#### *4.4.2.2- Procedimiento de ensayo (según Norma ASTM G99)*

Previamente a la realización del ensayo de desgaste circular seco es necesario desbastar, limpiar cuidadosamente, evitando que quede suciedad, y secar la probeta a ensayar. Además, es necesario pesarla antes y después del ensayo para registrar la pérdida de masa que sufre el material. [20]

Después de esto, la probeta se coloca en el disco giratorio fijándola de manera que quede perpendicular (con una tolerancia de  $\pm 1^\circ$ ) al porta-pines donde se sitúa la bola y los pesos (previamente colocados), y comprobando que el área de ensayo se encuentra totalmente dentro del material de la probeta. Todo esto será posible

gracias a los tornillos y horquillas de fijación y a un nivel ya incorporado en el tribómetro. [20]

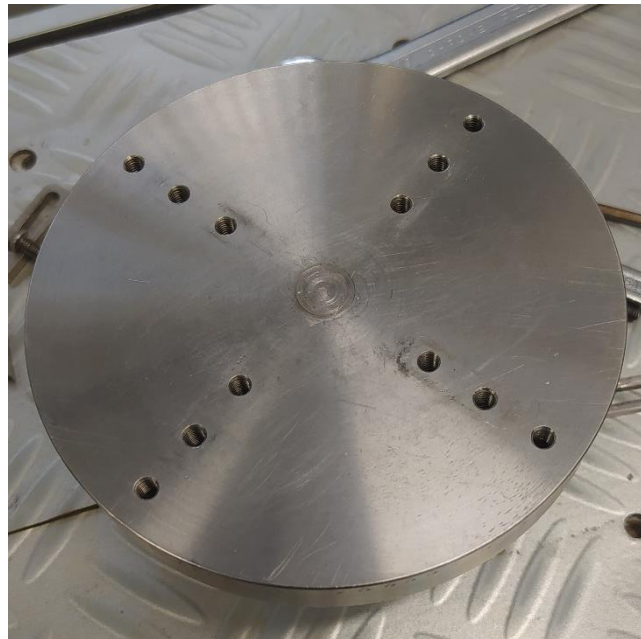


Figura 75: Disco giratorio para ensayo de desgaste circular seco.



Figura 76: Horquillas y tornillos de fijación.

A continuación, se inicia el software de ensayo en el cual se parametrizarán los datos de velocidad de rotación, diámetro de la huella que obtendremos, fuerza aplicada con los pesos, diámetro de la bola de desgaste y distancia de deslizamiento del ensayo. Además, se incorporan datos que serán de interés conocer en la fase de obtención y análisis de resultados como son los materiales tanto de bola como de probeta, los pesos de la probeta antes y después del ensayo, profundidad de la huella, volumen de la huella, etc. [20]

Identificación 1	Identificación 2	Identificación 3
Peso aplicado en pin - N		
2		
Radio		
3		
Diámetro de la Bola - mm		
6		
Velocidad ensayo - rpm		
150		
Distancia - m		
200		
Profundidad de la huella - $\mu\text{m}$		
0		

Figura 77: Ejemplo de la parametrización del ensayo dentro del software.

En este momento, se inicia el ensayo, el disco empieza a girar y se inicia el rozamiento entre la bola y la probeta. Es importante destacar que, según la norma del ensayo, éste no se puede parar ni reanudar, si existe algún fallo o alguna interrupción habría que empezar de cero el procedimiento. Esto significa que hay que volver a desbastar la probeta y realizar todos los pasos descritos anteriormente. [20]

Al llegar a la consigna de distancia de deslizamiento, el ensayo habrá terminado. La probeta se extraerá del disco giratorio y será limpiada para eliminar los restos del desgaste del material (y/o de la bola) sobre la huella que se ha formado. La probeta será pesada (con tolerancia de  $\pm 0.0001$  g según la norma) y medida (con tolerancia de  $\pm 2.5$   $\mu\text{m}$  según la norma) para la posterior obtención de datos. [20]



Figura 78: Huella circular en probeta desgastada mediante un ensayo de desgaste circular seco.

Por último, la norma recomienda realizar varios ensayos de desgaste para poder obtener suficientes datos para un estudio estadístico de éstos (dando valores de media y desviación estándar). [20]

#### 4.4.2.3- Obtención y análisis de resultados

Los principales resultados que podemos obtener del ensayo de desgaste circular seco son el coeficiente de rozamiento del material, la profundidad y anchura de la huella y la pérdida de peso de la probeta ensayada. Además, se puede calcular el volumen perdido tanto del material a ensayar como de la bola. [20]

Según la norma podemos se puede utilizar una serie de ecuaciones, que se muestran a continuación, para determinar estos parámetros, tanto de la bola o pin como de la de tal forma que se puede caracterizar cómo se comportan estos dos materiales cuando existe una situación de rozamiento entre ambos. [20]

En el caso de caracterizar el volumen perdido de la bola se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{volumen perdido de la bola}(mm^3) = \frac{\pi * (\text{diámetro de la huella}, mm)^4}{64 * (\text{radio de la huella}, mm)} [20]$$

Mientras que en el caso de caracterizar el volumen perdido de la probeta la fórmula sería:

$$\text{volumen perdido de la probeta}(mm^3) = \frac{\pi * (\text{diámetro de la huella}, mm) * (\text{profundidad de la huella}, mm)^3}{6 * (\text{radio de la huella}, mm)} [20]$$

En el caso de saber la masa perdida durante en el ensayo y la densidad de esta podemos obtener el volumen de probeta perdido aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{volumen perdido}(mm^3) = \frac{\text{masa perdida}, g}{\text{densidad}, g/cm^3} * 1000 [20]$$

Cabe destacar que la norma, a la hora de tomar medidas de la huella creada, dice que es necesario tomar esta medida en al menos dos puntos diferentes de la misma después de haber limpiado bien la probeta. Además, si existe una transferencia de material entre bola y probeta, el volumen perdido no es representativo de la interacción por lo que dice que el este método de ensayo no es correcto y no debería ser usado. [20]

Los resultados del coeficiente de rozamiento y de penetración se pueden visualizar desde el inicio del ensayo a través de gráficas que representan ambos datos en función de la distancia de deslizamiento, tal y como se observa en la Figura 79. Como últimos de los resultados obtenidos del ensayo son las gráficas de penetración y de coeficiente de rozamiento en función de la distancia de deslizamiento que somos capaces de obtener gracias al software. [20]

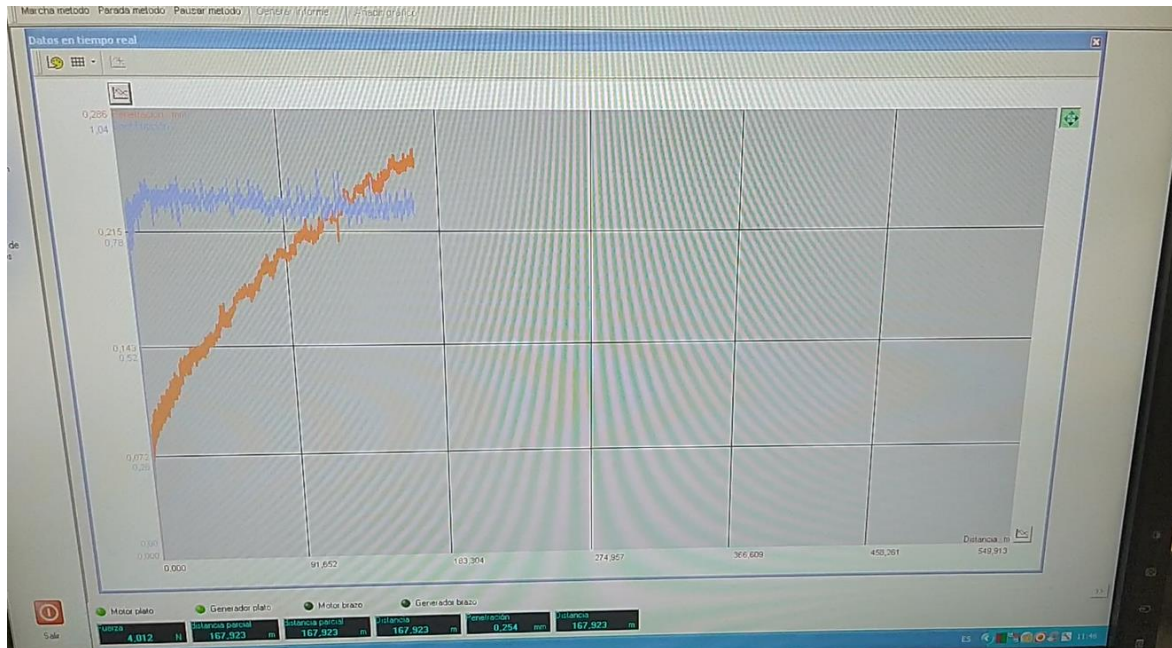


Figura 79: Ejemplo de gráficas obtenidas por el software a la vez que se está realizando el ensayo de desgaste circular seco (en naranja la penetración y en azul el coeficiente de rozamiento, ambos en función de la distancia de deslizamiento).

#### 4.4.3- Ensayo de desgaste circular lubricado (Norma ASTM G99)

El ensayo de desgaste circular lubricado, al igual que en el caso anterior, es un tipo de ensayo de desgaste perteneciente a los ensayos “pin-on-disk” que vienen regidos por la norma ASTM G99. Esta norma describe el procedimiento necesario para la determinación del desgaste de diferentes materiales durante el deslizamiento con una trayectoria circular de un “pin” o bola sobre la superficie de la probeta a ensayar. Al ser este caso el desgaste lubricado, nos encontraremos un sistema de lubricación que creará una película de lubricante entre la bola y la probeta. [20]

##### 4.4.3.1-Marco teórico

El método de ensayo es similar al anterior caso, consiste en el “pin” o bola colocada lo más perpendicular posible a la probeta a ensayar, que se situará bien anclada a un disco rotativo. Gracias al tribómetro se consigue que el disco gire manteniéndose la bola parada, con lo que al final del ensayo la probeta presentará una huella circular y gracias al sistema de lubricación se creará una película de lubricante (habitualmente se utiliza aceite, aunque puede ser también agua) entre la bola y la probeta a ensayar, con lo que el desgaste y el coeficiente de rozamiento, a priori, serán menores. [20]



Figura 80: Sistema de lubricación para el ensayo de desgaste circular lubricado.

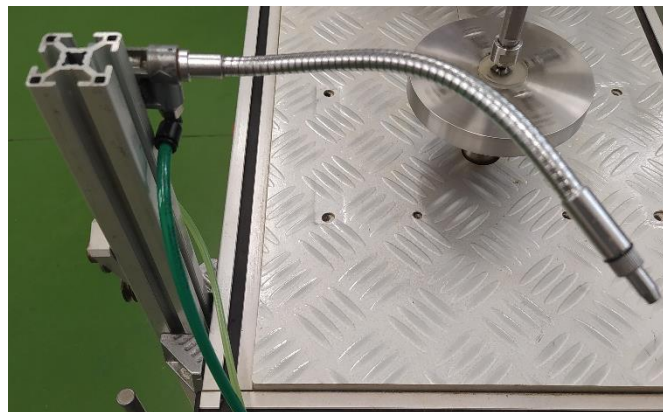


Figura 81: Manguera de lubricación para el ensayo de desgaste circular lubricado.

En este ensayo se tiene las mismas bolas que en el ensayo anterior, destacando las bolas de alúmina o de acero de 3 o 6 mm. Y, además, gracias a los pesos situados encima del porta-pines se consigue la presión necesaria para la realización del ensayo. [20]

En este ensayo, el disco giratorio es diferente al anterior ensayo ya que además de girar tiene la función de acumular el lubricante. Este vendrá prefijado de ante mano tanto la duración de la inyección del aceite como la cantidad inyectada sobre la probeta (habrá situaciones en las que será importante retirar parte de este aceite durante el ensayo para que la superficie de rozamiento no se encuentre completamente sumergida en éste). [20]





*Figura 82: Situación con acumulación de lubricante después de un cierto periodo de ensayo.*

Al igual que en el ensayo de desgaste seco, la duración del ensayo dependerá de la distancia de deslizamiento y la velocidad de rotación que se fijen para el ensayo. Igualmente, al finalizar el ensayo se pueden obtener los datos de pérdida de peso y de volumen, determinar el coeficiente de rozamiento y los valores de penetración, así como las dimensiones de la huella, que serán menores que si el ensayo se realiza sin lubricación. [20]

#### *4.4.3.2- Procedimiento de ensayo (según Norma ASTM G99)*

El procedimiento de ensayo de desgaste circular lubricado es similar al caso de ser desgaste circular seco, solo hay que tener especial cuidado en el caso de la limpieza posterior y en el caso de tener exceso de lubricante (no es recomendable que la superficie de rozamiento esté sumergida). [20]

Previamente, al igual que en el caso anterior, es necesario desbastar y limpiar la probeta a ensayar, además de pesarla y medirla para poderla comparar al finalizar el ensayo. [20]

Se coloca la probeta en el disco giratorio de igual manera que en el caso anterior, es decir, perpendicularmente (con una tolerancia de  $\pm 1^\circ$ ) al porta-pines y comprobando que toda el área de ensayo se encuentra dentro esta. [20]

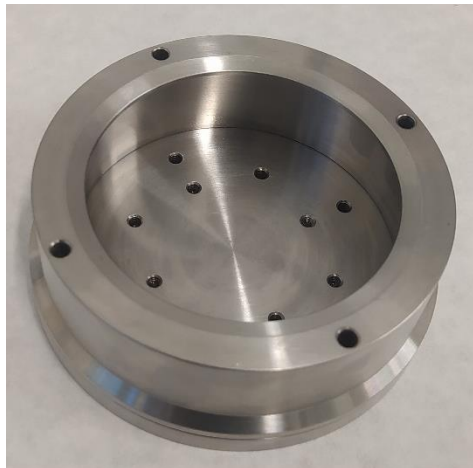


Figura 83: Disco giratorio para el ensayo de desgaste circular lubricado.

Se abre la válvula de aire a presión, que será el encargado de impulsar el aceite para lubricar el ensayo, y se sitúa la boquilla de lubricación en una posición en la que no interfiera en el ensayo, pero que además consiga hacer llegar el lubricante a la superficie de rozamiento. [20]

A continuación, se inicia el software de ensayo en el cual se parametrizarán los datos de velocidad de rotación, diámetro de la huella que obtendremos, fuerza aplicada con los pesos, diámetro de la bola de desgaste, distancia de deslizamiento del ensayo y tiempo y cantidad de lubricación. Además, se incorporan datos que serán de interés conocer en la fase de obtención y análisis de resultados como son los materiales tanto de bola como de probeta, los pesos de la probeta antes y después del ensayo, profundidad de la huella, volumen de la huella, etc. [20]

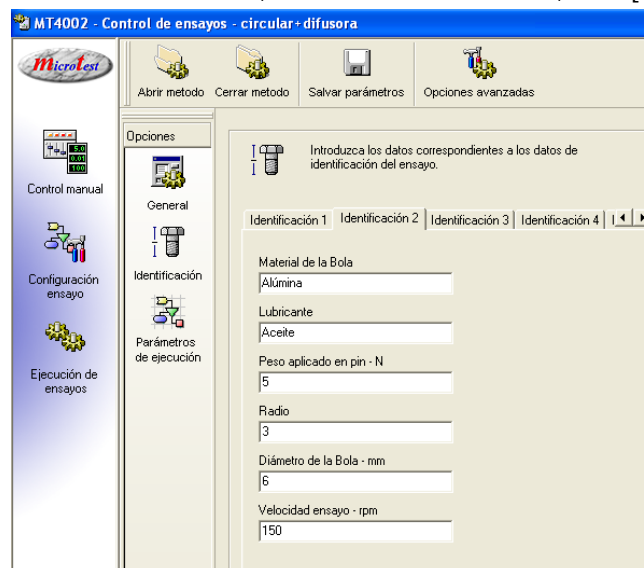


Figura 84: Ejemplo de la parametrización del ensayo dentro del software.

Se inicia el ensayo, comienza a girar y se empieza a lubricar el ensayo gracias al sistema de lubricación. En este caso, al igual que en el anterior, este ensayo una vez

iniciado no se puede parar ni reanudar, si existe algún fallo o alguna interrupción habría que empezar de cero el procedimiento. [20]

Durante el ensayo es necesario vigilar la cantidad de lubricante que tenemos en el disco giratorio ya que, como antes se ha dicho, la superficie de rozamiento no debe estar sumergida. [20]

El ensayo finaliza al llegar este a la consigna de distancia de deslizamiento. La probeta será extraída, limpiada, pesada y medida al igual que en el ensayo de desgaste circular seco. [20]



Figura 85: Situación una vez finalizado un ensayo de desgaste circular lubricado.

También, como en el caso de ensayo de desgaste circular seco, es necesario realizar varios ensayos para poder obtener las variables probabilísticas que lo caractericen. [20]

#### 4.4.3.3- Obtención y análisis de resultados

Al igual que en el caso de ensayo de desgaste circular seco los principales resultados que podemos obtener del ensayo de desgaste circular lubricado son medidas de la pérdida de volumen y, por tanto, de peso de la probeta a ensayar y de la bola. Además del coeficiente de fricción, la penetración o el tamaño de huella. [20]

Según la norma podemos utilizar una serie de ecuaciones que serán las mismas que en el ensayo de desgaste circular lubricado. [20]

En el caso de caracterizar el volumen perdido de la bola tenemos:

$$\text{volumen perdido de la bola}(\text{mm}^3) = \frac{\pi * (\text{diámetro de la huella,mm})^4}{64 * (\text{radio de la huella,mm})} [20]$$

Mientras que en el caso de caracterizar el volumen perdido de la probeta tenemos:

$$\text{volumen perdido de la probeta}(\text{mm}^3) = \frac{\pi * (\text{diámetro de la huella, mm}) * (\text{profundidad de la huella, mm})^3}{6 * (\text{radio de la huella, mm})} \quad [20]$$

Si en el caso de tener la densidad y la diferencia entre el inicio y el final del ensayo de la masa podemos obtener el volumen perdido como:

$$\text{volumen perdido}(\text{mm}^3) = \frac{\text{masa perdida, g}}{\text{densidad, g/cm}^3} * 1000 \quad [20]$$

Cabe destacar que la norma, a la hora de tomar medidas de la huella creada, dice que es necesario tomar esta medida en al menos dos puntos diferentes de la misma después de haber limpiado bien la probeta. Si existe una transferencia de material entre bola y probeta, el volumen perdido no es representativo de la interacción por lo que dice que el este método de ensayo no es correcto y no debería ser usado. [20]

Como últimos de los resultados obtenidos del ensayo son las gráficas de penetración y de coeficiente de rozamiento en función de la distancia de deslizamiento que somos capaces de obtener gracias al software. [20]

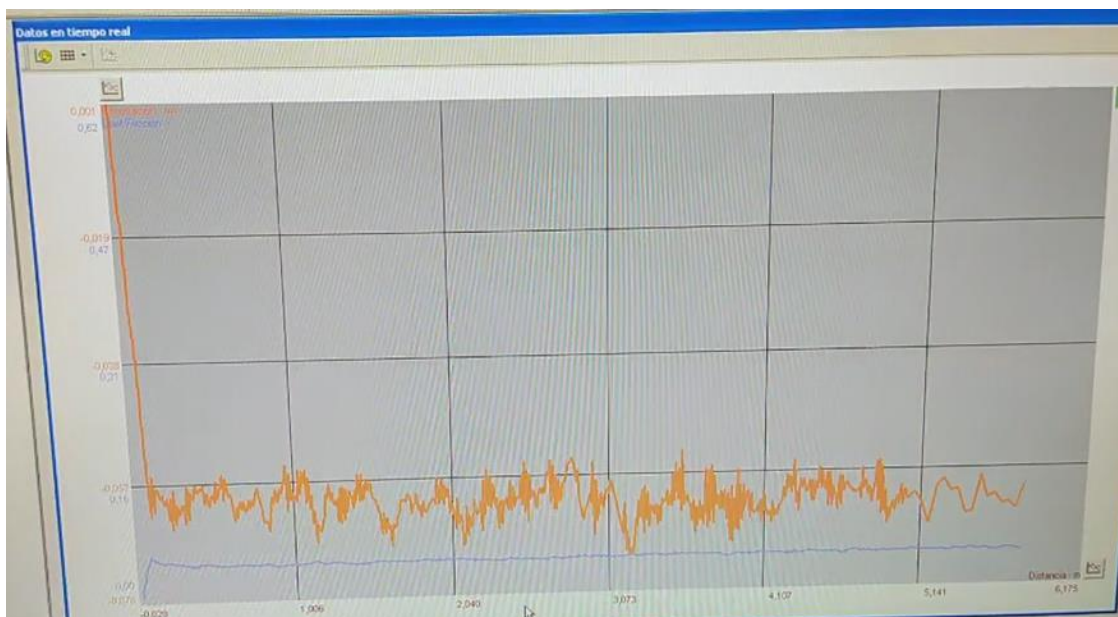
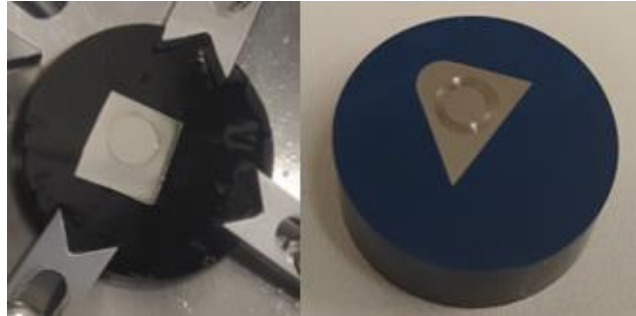


Figura 86: Ejemplo de gráficas obtenidas por el software a la vez que se está realizando el ensayo de desgaste circular lubricado (en naranja la penetración y en azul el coeficiente de rozamiento, ambos en función de la distancia de deslizamiento).

En general, los resultados obtenidos de este ensayo en comparación con su homólogo en seco son menores coeficientes de rozamiento y menores valores de

desgaste ante la interacción de los mismos materiales y de la misma carga. Además, el tamaño de la huella es mucho menor en el desgaste circular lubricado en comparación con el desgaste seco. [20]



*Figura 87: Comparativa de huellas en probetas entre desgaste circular seco y desgaste circular lubricado.*

## 5.- Desarrollo del TFG

### 5.1- Desarrollo de los textos explicativos

Los textos explicativos se refieren al material redactado en el que se incluye una primera breve explicación del ensayo, el marco teórico, el procedimiento de ensayo y la obtención de resultados. Estos textos tratan los ensayos:

- Ensayo de cámara de niebla salina.
- Ensayo de oxidación a elevada temperatura.
- Ensayo de potencial a circuito abierto (OCP).
- Ensayo de polarización anódica.
- Ensayo de desgaste circular seco.
- Ensayo de desgaste circular lubricado.

Para su creación se ha utilizado Microsoft Office Word, posteriormente se ha importado a formato PDF y por último se han subido a Google Drive, donde se encuentran enlazados a la página web que se explica más adelante.

El desarrollo de los textos explicativos se ha realizado consultando la bibliografía de las diferentes normas que rigen los ensayos, además de la consulta en libros del área de Ciencia e Ingeniería de los Materiales y a las consultas realizadas en el propio laboratorio de metalotecnia. Asimismo, estos textos van acompañados de una serie de imágenes que fueron tomadas durante la realización de los ensayos en el laboratorio de metalotecnia de la EII de la Uva.

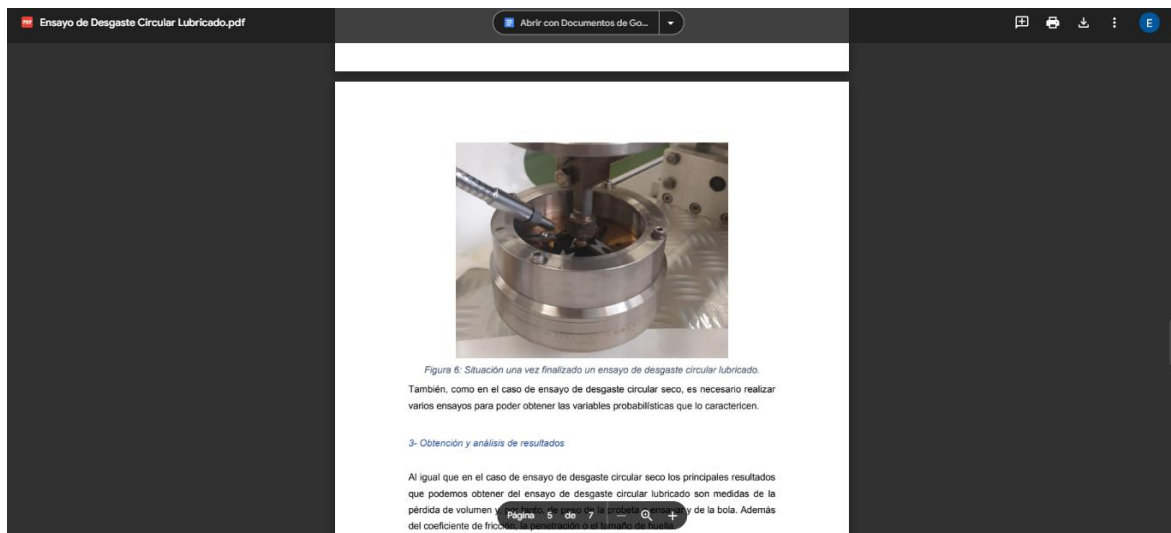


Figura 88: Ejemplo de texto explicativo abierto desde la página web del laboratorio virtual.

## 5.2- Desarrollo del contenido audiovisual

### 5.2.1- Desarrollo de videos explicativos

Para el desarrollo de videos explicativos se ha utilizado un software de libre uso: VSDC Free Video Editor.

En primer lugar, se realizaron los distintos ensayos en el laboratorio de metalotecnia de la EII de la UVA y se grabó el procedimiento de ensayo de los mismos.

Una vez grabados y con los videos en el ordenador se utilizó el editor de videos para editarlos y crear el contenido didáctico.

Dentro del editor se trabaja con una interfaz de usuario como se presenta en la Figura 89.

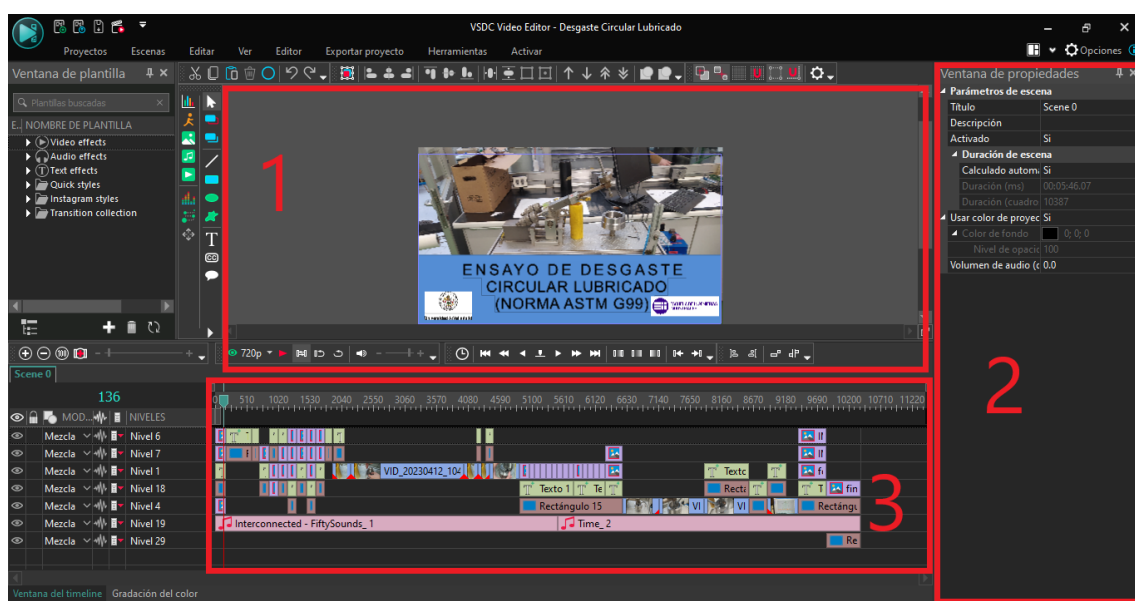


Figura 89: Interfaz de usuario del editor de video.

Como se puede ver en la figura 89, la interfaz de usuario se divide en una serie de zonas:

- La zona 1 es el apartado donde se trabaja la disposición de los elementos dentro del video y donde se puede observar cómo se presentará el video explicativo que se está desarrollando. Es una de las zonas principales de trabajo.
- En la zona 2 se encuentra una ventana de propiedades de cada elemento que se encuentra dentro del video como pueden ser cuadros de texto, imágenes, video, música, etc.
- Por último, la zona 3 es el espacio donde se trabaja la duración, superposición y organización de los distintos elementos del video. Es otra de las zonas principales de trabajo

En la figura 89 se puede ver del mismo modo un ejemplo del montaje de un video, en este caso del ensayo de desgaste circular lubricado. Se puede observar cómo en

la zona 1 se visualiza el inicio del video, mientras que en la zona 3 se puede ver el montaje de imágenes, video, música, texto, etc. con el que se realizó el video.

Cabe destacar que toda la música que se ha utilizado en los videos también es libre de derechos de autor.

Una vez finalizado y revisado el video, éste se exporta y se sube a Youtube en oculto, de esta manera solo las personas que tengan el enlace pueden acceder a verlo. Con el enlace del video, se introduce un hipervínculo en la página web para que el alumno pueda tener una conexión directa con el video explicativo de cada uno de los ensayos.

Una vez que los videos y textos explicativos, así como la web que se ha desarrollado y contiene los mismos, hayan sido revisados por el Departamento, se hará público el Laboratorio Virtual aquí desarrollado en el dominio de la EII de la UVa para que cualquier alumno pueda acceder a su contenido.

### 5.2.2- Desarrollo de la página web

Para la creación de la página web se ha hecho uso de las plantillas que presenta la aplicación web: Jimdo.

Jimdo es una plataforma en línea que permite crear y gestionar páginas web sin la necesidad de tener conocimientos técnicos en programación o diseño web. Se basa en la creación de sitios web gracias a las plantillas que presenta y cuenta con herramientas intuitivas y fáciles de utilizar para personalizar el diseño, agregar contenido y funcionalidades básicas.

Cuando se accede a Jimdo el usuario se encuentra con el siguiente mensaje en la interfaz:



Figura 90: Primer paso dentro de la interfaz de usuario de Jimdo.



En la Figura 90 se selecciona la opción de crear la página web sin necesidad de programar, lo que conduce a una serie de configuraciones (gama de colores, fuente de letra, etc.) y, posteriormente, hasta una primera página como se ve en la figura 91.

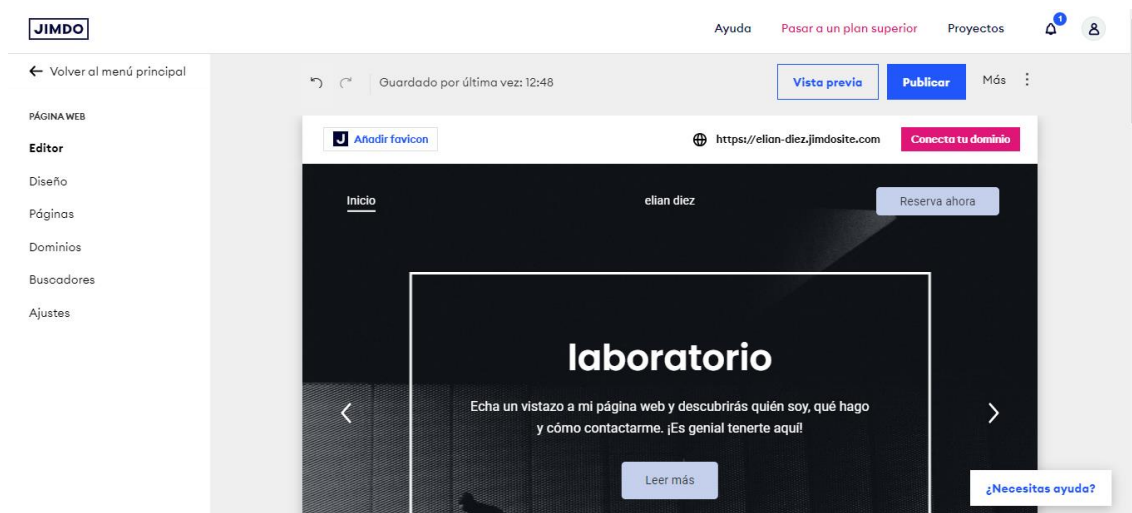


Figura 91: Primera página web sin editar.

En la parte izquierda se puede observar una barra de opciones, dentro de las que cabe destacar las siguientes:

- Editor: Modo en el que podemos añadir o quitar bloques como botones, apartados, títulos, etc.
- Diseño: Espacio donde podemos cambiar el diseño del bloque o la página dentro de las opciones que nos proporciona la herramienta. Podemos añadir objetos como diapositivas animadas o diferentes tipos de botones.
- Páginas: Área donde podemos navegar a través de las diferentes páginas que nuestro sitio web posee, en este caso:
  - Inicio
  - Corrosión
    - Ensayos de Corrosión
  - Desgaste
    - Ensayos de Desgaste

Una vez se ha modelado la página web a gusto del usuario que la ha creado, se publica en el siguiente enlace: <https://laboratorio-virtual-de-ensayos-tecnologicos-de-cor.jimdosite.com/>

En el apartado “Inicio”, se da la bienvenida al Laboratorio Virtual y también se encuentra una breve definición de lo que son los ensayos tecnológicos, así como una breve introducción a la corrosión y otra al desgaste (ambas con un hipervínculo a las páginas correspondientes dentro del sitio web) y, por último, un enlace a la prueba de autoevaluación.



Figura 92: Inicio del sitio web creado.

Dentro del apartado de corrosión se presentan unas diapositivas sobre la clasificación de la corrosión según la morfología del ataque, otra clasificación según el mecanismo de corrosión y un último apartado sobre los ensayos tecnológicos de corrosión con un enlace que lleva a la página correspondiente de dichos ensayos donde se pueden visualizar los videos y el texto explicativo.

La clasificación de la corrosión, según morfología o mecanismo, se presenta tal y como se ha comentado con unas diapositivas de fondo que son ilustrativas de cada tipo de corrosión y, además, se incorpora un breve texto que define cada tipo de corrosión. En la Figura 93 se observa un ejemplo:



Figura 93: Ejemplo de diapositiva explicativa dentro de la corrosión.

En la página de ensayos de corrosión se recogen cada uno de los ensayos con una breve descripción de éstos y dos botones, uno que lleva al video explicativo del ensayo y otro que lleva a los textos explicativos anteriormente descritos.

Por otro lado, en la página de desgaste se encuentra una comparativa de rozamiento por deslizamiento frente a rozamiento por rodadura, unas diapositivas explicativas sobre los tipos de desgaste, otras sobre los tipos de lubricación y, por último, un enlace al apartado de ensayo tecnológicos de desgaste. Al igual que en el caso de los ensayos de corrosión, dentro de la página se encuentran todos los ensayos con una breve descripción y con dos botones que sirven de enlace para los videos y textos explicativos anteriormente descritos.



Figura 94: Espacio de la página dedicada al desgaste que introduce el enlace a los ensayos de desgaste.

### 5.3- Desarrollo de la prueba de autoevaluación

Para el desarrollo de la prueba de autoevaluación que se incorpora como un enlace dentro de la página web anteriormente descrita se ha utilizado la plataforma que incorpora Google para la realización de formularios: Google Forms. Esta plataforma está diseñada para el desarrollo de cuestionarios y pruebas. Para la realización de la prueba de autoevaluación se han seguido una serie de pasos que se describirán a continuación.

En primer lugar, se repasó el contenido del Laboratorio Virtual para diseñar 10 preguntas sobre los conceptos de mayor importancia para el alumno. Estas preguntas son de respuesta tipo test con cuatro opciones en la que solo una de ellas es correcta. Además, también se diseñó una breve explicación que completa la respuesta correcta en cada una de las preguntas.

Una vez planteadas las preguntas a realizar se incorporaron estas a la aplicación Google Forms. Para comenzar la creación de la prueba, Google ofrece la opción de formulario personal o empresarial, tal y como se observa en la Figura 95. Se escoge la opción “Personal”.

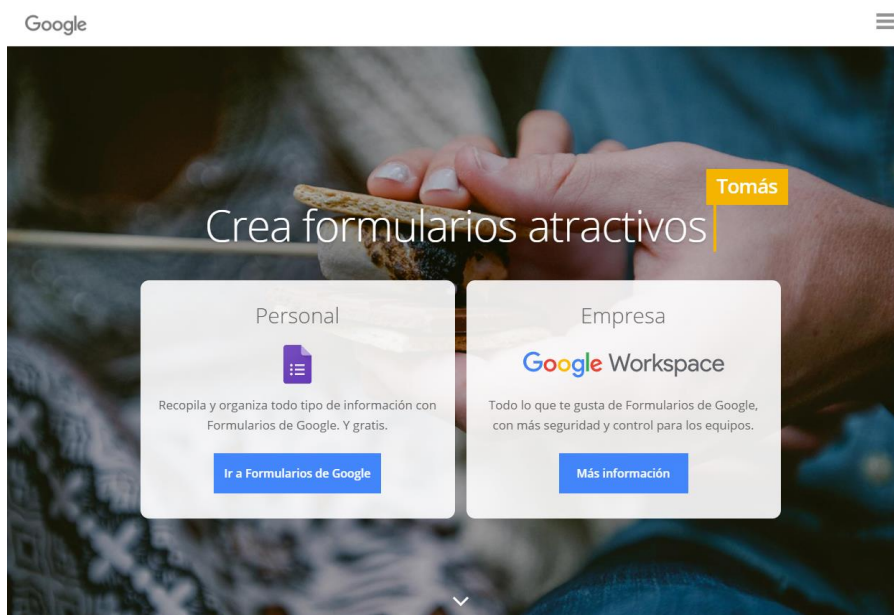


Figura 95: Pantalla principal de la aplicación Google Forms.

Una vez seleccionada la opción personal aparecen una serie de plantillas y una opción de iniciar el formulario en blanco, que será la que se escoja.

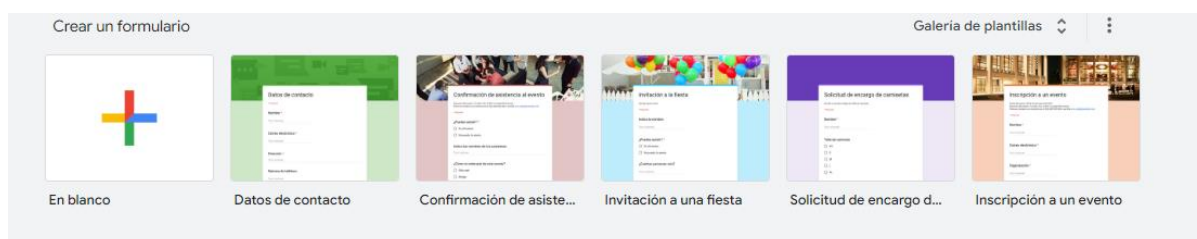


Figura 96: Plantillas propuestas por Google Forms.

Inicialmente aparecen una serie de criterios a tener en cuenta para la creación de la prueba de autoevaluación que se deben modificar para adaptarlo al estilo deseado:

- Se modifican el título y el subtítulo de la prueba de autoevaluación.
- Se introducen, una a una, las diez preguntas como se muestra en la Figura 97, siendo en cada una de ellas necesario programar cuál de las opciones es la correcta y el texto explicativo personalizado a la pregunta. Además, se configura de tal manera que no es obligatorio contestar a todas las preguntas.

¿Cuál es la finalidad de los distintos ensayos tecnológicos?

Solo hay una opción correcta.

- Obtención de valores de dureza de metales o aleaciones. X
- Poder comparar el uso de las nuevas tecnologías en los materiales. X
- Poder comparar únicamente el comportamiento de metales en servicio. X
- Comparar el comportamiento en servicio de distintos metales, recubrimientos o m... ✓ X
- Añadir opción o [añadir respuesta "Otro"](#)

Clave de respuestas (1 punto) Obligatorio

Figura 97: Ejemplo de programación de pregunta en Google Forms.

- Del mismo modo, se programa el cuestionario para que las preguntas se presenten en orden diferente cada vez que se acceda al mismo.

Por último, se publica y se copia el enlace en el hipervínculo ubicado en la página web anteriormente descrita.

En las Figuras 98 y 99 se ven los ejemplos de una respuesta correcta y otra incorrecta, cada una con el texto explicativo que será útil a la hora de asimilar la información presente en el Laboratorio Virtual de tal forma que, cuando el alumno envía el test, sus respuestas se registran y puede ver su puntuación, y entender mejor en qué ha fallado en caso de no acierto.

✓ En el ensayo de cámara de niebla salina: 1/1

Solo hay una opción correcta.

- No se puede ensayar más de una probeta simultáneamente.
- La colocación de las probetas no es relevante a la hora de ensayar.
- A la hora de ensayar es importante colocar las probetas de manera que no toquen las paredes de la cámara y, además, de manera que los productos de la corrosión de unas no caigan sobre las demás. ✓
- Siempre es un ensayo que se realiza en tiempo real y no en tiempo acelerado.

**Comentarios**

En el ensayo de cámara de niebla salina es importante la colocación de las distintas probetas a ensayar, ya que en el caso de que los productos de corrosión de unas caen sobre las demás pueden provocar una alteración de los resultados de los ensayos. Además, estos ensayos pueden ser en tiempo real, o en tiempo acelerado dependiendo de las exigencias de este.

Figura 98: Ejemplo de respuesta correcta en la prueba de autoevaluación.

**✘ La corrosión:** 0/1

Solo hay una opción correcta.

- Es un proceso que mejora la resistencia y durabilidad de los metales
- Solo ocurre en presencia de agua y no se ve afectada por otros factores ambientales. ✘
- Es un proceso electroquímico que provoca la degradación y deterioro de los metales.
- Es un proceso que solamente afecta a metales ferrosos.

Respuesta correcta

- Es un proceso electroquímico que provoca la degradación y deterioro de los metales.

**Comentarios**

*La corrosión es un proceso electroquímico que causa la degradación y deterioro de los metales. Ocurre cuando los metales están expuestos al ambiente y reaccionan con sustancias como el oxígeno, el agua u otros agentes químicos. Este proceso puede ser acelerado por factores como la humedad, la temperatura o la presencia de sales.*

Figura 99: Ejemplo de respuesta incorrecta en la prueba de autoevaluación.

## 6.-Conclusiones

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha conseguido el objetivo principal propuesto de creación de un Laboratorio Virtual de Ensayos Tecnológicos de desgaste y corrosión que sea de utilidad para los alumnos de Ciencia de Materiales e Ingeniería de Materiales que cursan Grados del ámbito de la Ingeniería, así como los objetivos específicos que se indican al inicio de este documento. Esta página web desarrollada sirve como una herramienta interactiva y es un método de enseñanza-aprendizaje novedoso para los alumnos que se encuentren realizando asignaturas de la rama de Materiales.

Por otro lado, a nivel personal y atendiendo a los objetivos específicos, quiero destacar las conclusiones:

- La preparación de las muestras metálicas para la realización de los ensayos me ha permitido adquirir habilidades prácticas en la manipulación y preparación de probetas metalográficas.
- Por otro lado, la ejecución de los ensayos me ha permitido utilizar equipos de trabajo que no había utilizado anteriormente como el tribómetro y el potenciómetro.
- Durante la elaboración de material didáctico, como videos y textos explicativos, he tenido la oportunidad de investigar, sintetizar y organizar la información de manera clara y concisa, con el objetivo de facilitar la comprensión de los alumnos.
- De igual manera, la creación de material audiovisual me ha dado la oportunidad una vez más de plasmar la información previamente obtenida en diferentes videos explicativos, creándolos de manera que resulten entretenidos y útiles para los alumnos
- Gracias al aprendizaje y manejo de programas de edición de video y páginas web he desarrollado mis competencias en el ámbito digital, con lo que estaré preparado para enfrentar desafíos tecnológicos en mi futuro profesional.

## 7.- Líneas futuras de trabajo

En el futuro se seguirá trabajando en los Laboratorios Virtuales que se vienen desarrollando en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Concretamente, las líneas de actuación que se seguirán serán:

- La ampliación de los Laboratorios Virtuales, con ensayos tecnológicos de desgaste lineal (con y sin lubricación), ensayos de tribocorrosión y ensayos de conformado.
- La ampliación de la prueba de Autoevaluación para incorporar nuevas preguntas.
- La incorporación de nuevos contenidos teóricos y audiovisuales a los Laboratorios Virtuales existentes desarrollados por el Departamento para mejorar y actualizar la información.
- Validar el método de enseñanza-aprendizaje llevado a cabo a través del Laboratorio Virtual haciendo uso de los comentarios y sugerencias que llegan de los alumnos.



## 8.- Bibliografía

[1] Huerta, O. E. (2001b). *Corrosión y Degradación de Materiales*. SINTESIS.

[2] Escuela Politécnica Nacional (2008). *La Corrosión*.

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2771/1/CD-0553.pdf>

[Fecha de consulta: 21/03/2023]

[3] M. Mosley. (2022, 22 agosto). *Corrosión Uniforme O Generalizada*. Phemtycs.  
<https://phemtycs.com/corrosion-uniforme-o-generalizada/>

[Fecha de consulta: 01/04/2023]

[4] Tema 6: *Tipos de corrosión electroquímica* (2008). Departamento de Física Química. Corrosión. Universidad de Alicante

<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8233/1/CorrTema6.pdf>

[Fecha de consulta: 21/03/2023]

[5] Ing. Marítima. (2017, 11 marzo). *La Corrosión*.

<http://ingmaritima.blogspot.com/2017/03/la-corrosion.html>

[Fecha de consulta: 17/03/2023]

[6] Tipos de Corrosión | *Guía de selección de materiales*.

<https://www.swagelok.com/es/toolbox/material-selection-guide/corrosion-types>

[Fecha de consulta: 31/03/2023]

[7] Callister, W.D. (1995): *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales* (1ª ed.--). Barcelona. Reverte.

[8] Curso de Fundamentos de ciencia de materiales. *Tema 12*.

[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12\\_1.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12_1.html)

[Fecha de consulta: 15/03/2023]

[9] Ferrer Giménez, C., & Amigó Borrás, V. (2001). *Tecnología de materiales: Tomo 1*. Universidad politécnica de Valencia.

[10] Raggio, *Rozamiento, Capitulo VII*

<https://www.escuelaraggio.edu.ar/>

[Fecha de consulta: 27/03/2023]

[11] América, N. L. (2022, 31 enero). *Explicación del desgaste adhesivo*. Noria Latín América.

<https://noria.mx/analisis-de-lubricante-a/explicacion-del-desgaste-adhesivo/>

[Fecha de consulta: 31/03/2023]

[12] *Desgaste y fatiga superficial en los rodamientos*. Evolution.

<https://evolution.skf.com/es/desgaste-y-fatiga-superficial-en-los-rodamientos/>

[Fecha de consulta: 02/04/2023]

[13] Marino, I. (2021, 16 octubre). *Corrosión y Tratamiento de Superficies. Tratamiento de la obra viva del buque (1oParte)*. Ingeniero Marino.

<https://ingenieromarino.com/corrosion-y-tratamiento-de-superficies-tratamiento-de-la-obra-viva-del-buque/>

[Fecha de consulta: 01/04/2023]

[14] Noria Latín América. (2016, 15 enero). *Determinación del flujo de aceite requerido por los cojinetes*.

<https://noria.mx/lublearn/determinacion-del-flujo-de-aceite-requerido-por-los-cojinetes/>

[Fecha de consulta: 01/04/2023]

[15] Omar Linares, O. *Fundamentos de la Lubricación, Fricción y Desgaste*  
<https://www.widman.biz/>

[Fecha de consulta: 30/03/2023]

[16] American Society for Testing and Materials [ASTM] (1978). *Standard Method of Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing*. (Norma núm. B368).

[17] American Society for Testing and Materials [ASTM] (1980). *Standard Method of Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing*. (Norma núm. B287).

[18] American Society for Testing and Materials [ASTM] (1993). *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. (Norma núm. G5).

[19] MicroTest. *Manual del Usuario. Tribometro Pin-on-disk*.

[20] American Society for Testing and Materials [ASTM] (1993). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. (Norma núm. G99).